



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยการกระตุ้น
เถ้าแกลบดำด้วยสารเคมีและความร้อน

โดย รศ.ดร.สุวิมล อัครพิศิษฐ์ และคณะ

31 พฤศจิกายน 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการหล่อแข็งกาตากตะกอนโลหะหนัก โดยใช้เถ้าแกลบคำผสมปูนขาวเป็นวัสดุยึดประสาน ในสภาวะที่มีและไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยาของวัสดุยึดประสานด้วยโซเดียมซิลิเกต ความร้อน และโซเดียมซิลิเกตร่วมกับความร้อน โดยทำการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบคำและปูนขาวที่ 45:55, 50:50, 55:45 และ 60:40 พบว่า อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบคำและปูนขาวที่ 55:45 มีอัตราการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ เมื่อนำเถ้าแกลบคำและปูนขาวที่ 55:45 มาทำการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต และความร้อน พบว่า เถ้าแกลบคำและปูนขาวที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 ที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยการบ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ และที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 ร่วมกับการบ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ มีการพัฒนากำลังอัดในระยะแรกสูง (7 วัน) เมื่อทำการเติมกาตากตะกอนโลหะหนักลงในก้อนหล่อแข็งในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า ก้อนหล่อแข็งของเสียสามารถรองรับกาตากตะกอนโลหะหนักได้ถึงร้อยละ 50 โดยมีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการฝังกลบอย่างปลอดภัย ความเข้มข้นของตะกั่ว โครเมียม สังกะสี แคดเมียม เหล็ก ทองแดง และนิเกิลในน้ำสกัด TCLP มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ยกเว้นก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา ที่ผสมกาตากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานที่มีความเข้มข้นของโครเมียมสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้

คำสำคัญ : เถ้าแกลบคำ / โซเดียมซิลิเกต / กาตากตะกอนโลหะหนัก / กำลังอัด / การร่วไหล

Abstract

This research work investigated the solidification of heavy metal sludge using black rice husk ash and hydrated lime with and without sodium silicate, thermal and co-activation between sodium silicate and thermal. The proportions between black rice husk ash and hydrated lime of 45:55, 50:50, 55:45 and 60:40 were studied. The results showed that a higher rate of strength development was found from black rice husk ash and hydrated lime at the ratio of 55:45. The black rice husk ash and hydrated lime at the ratio of 55:45 was then activated with sodium silicate and thermal. It was found that black rice husk ash and hydrated lime activated with Alkali Modulus 3.0 sodium silicate at 1.5 wt. %, curing at 50°C for 24 hrs and co-activation using Alkali Modulus 3.0 sodium silicate at 1.5 wt. % and curing at 50°C for 24 hrs gave high early compressive strength (7 days). The heavy metal sludge was then added to the above three mixes at 10, 30 and 50 wt. %. It was found that heavy metal sludge could be loaded to black rice husk ash and hydrated lime as much as 50 wt.% and have a 28 day compressive strength that meets the standard criteria for landfilling. Concentrations of Pb, Cr, Zn, Cd, Fe, Cu and Ni in TCLP leachates were lower than the regulatory limit. However, concentration of Cr in TCLP leachate from the solidified waste containing 50 wt. % heavy metal sludge and with no sodium silicate and thermal activation exceed that regulated by Ministry of industry.

Keywords : Black Rice Husk Ash / Sodium Silicate / Heavy Metal Sludge / Strength / Leaching

บทสรุปย่อผู้บริหาร

ของเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักจัดเป็นของเสียอันตราย ซึ่งมีสัดส่วนประมาณ 60% ของของเสียอันตรายทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม ความเป็นพิษของโลหะหนักเหล่านี้ไม่สามารถทำลายฤทธิ์ได้ด้วยวิธีทางเคมี ชีวภาพ หรือ ความร้อน แต่สามารถลดความเป็นพิษได้โดยการปรับสภาพความเป็นกรดต่างของน้ำเสียให้อยู่ในช่วงพีเอช 8 – 11 เพื่อเปลี่ยนรูปโลหะหนักเหล่านี้ให้อยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำมาก อย่างไรก็ตามการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์เหล่านี้หากถูกทิ้งหรือฝังกลบโดยไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธีสามารถเกิดผลกระทบทั้งต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไปการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักเหล่านี้มักใช้วิธีทำเป็นก้อนแข็ง โดยการเติมสารที่มีสมบัติในการยึดประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่เนื่องจากวิกฤตในเรื่องของพลังงานทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงขึ้น การนำเถ้าแกลบดำซึ่งเป็นกากของเสียจากภาคเกษตรกรรมมาใช้เป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนขาวจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวเกิดช้าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนย้ายก้อนหล่อแข็งของเสียไปทำการฝังกลบได้ในเวลาที่รวดเร็ว

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบดำสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนขาวในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักได้ โดยใช้เถ้าแกลบดำและปูนขาวที่อัตราส่วน 55:45 และกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลานด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ร่วมกับการบ่มที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นนำมาบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง พบว่าสามารถรองรับกากตะกอนโลหะหนักได้สูงถึง 50 โดยน้ำหนัก โดยกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสีย และปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างจากก้อนหล่อแข็งของเสียเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการฝังกลบของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
บทสรุปผู้บริหาร	ค
สารบัญ	ง
รายการตาราง	ฉ
รายการรูปประกอบ	ช
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 การทำเสถียรและการหล่อแข็ง	2
2.2 สมบัติของวัสดุยึดประสาน	8
2.2.1 ปูนขาว (Lime)	8
2.2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material)	11
2.3 ปฏิกริยาของวัสดุปอซโซลาน	14
2.3.1 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน	14
2.3.2 กระบวนการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน	15
2.4 โลหะหนัก	16
2.5 การตรึงโลหะหนักของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	18
2.6 การตกตะกอนทางเคมี	19
2.7 การชะละลาย (Leaching)	21
2.7.1 กลไกการชะละลาย	22
2.7.2 การวัดความสามารถในการชะละลาย	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ	27
3.1.1 การเตรียมถ้ำกลบดำ	27
3.1.2 การเตรียมสารกระตุ้นปฏิกิริยา	29
3.1.3 การเตรียมกากตะกอนโลหะหนัก	29

สารบัญ

	หน้า
3.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ	30
3.2.1 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสมของก้อนหล่อแข็ง	30
3.2.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าเกลบดำกับปูนขาว	30
3.2.3 ผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา ด้วยสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน	32
3.2.4 ผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการกระตุ้น ปฏิกิริยาด้วยสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน	43
3.2.5 ผลการทดสอบการร่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสีย	48
4. สรุปผลการศึกษา	51
4.1 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าเกลบดำ ปูนขาว และสถานะที่ กระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน	51
4.2 ความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสีย	51
4.3 ผลการทดสอบการร่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสีย	51
4. ข้อเสนอแนะ	52
5. เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การเตรียมสารเคมีและวิธีการทดลอง	56
ภาคผนวก ข. ความสามารถกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสีย	62
ภาคผนวก ค. งานวิจัยที่จะตีพิมพ์	78

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สมบัติของปูนสุกและ ปูนขาว	9
2 สมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์	9
3 สมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม	10
4 แสดงรายละเอียดของสมบัติและสารประกอบของปูนขาวแต่ละชนิด	11
5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์	13
6 ส่วนประกอบของซีเมนต์ดำที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF	28
7 ผลการทดสอบดัชนีกำลัง	29
8 ความเข้มข้นของโลหะหนักในกากตะกอน(กรัม / กก. กากตะกอนแห้ง)	30
9 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบความชื้นเหลวปกติ	31
10 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดด้วยวิธี TCLP	50
ข.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ : ปูนขาวที่ 45:55, 50:50, 55:45 และ 60:40 ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน	63
ข.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ:ปูนขาวที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 1.0	64
ข.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ:ปูนขาวที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 2.0	65
ข.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ:ปูนขาวที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 3.0	66
ข.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ:ปูนขาวที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 3.0 ปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสาน	67
ข.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ:ปูนขาวที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิห้อง	68
ข.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ:ปูนขาวที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °ซ	69
ข.8 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ:ปูนขาวที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °ซ	70
ข.9 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ดำ:ปูนขาวที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 1.0 และที่อุณหภูมิ 40 °ซ	71

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ข.10 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 1.0 และที่อุณหภูมิ 50 °ซ	72
ข.11 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 2.0 และที่อุณหภูมิ 40 °ซ	73
ข.12 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 2.0 และที่อุณหภูมิ 50 °ซ	74
ข.13 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 3.0 และที่อุณหภูมิ 40 °ซ	75
ข.14 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 3.0 และที่อุณหภูมิ 50 °ซ	76
ข.15 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสาน และที่อุณหภูมิ 50°ซ	77

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
1 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังรับแรงอัด	16
2 อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อใช้สารเคมีในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน	17
3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์กับค่า pH	20
4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะไฮดรอกไซด์ในสารละลายกับค่า pH	21
5 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์โดย X-Ray Diffraction	27
6 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งระหว่างเส้นแกลบดำและปูนขาว	31
7 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่อุณหภูมิห้อง	36
8 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่บ่มที่อุณหภูมิต่างๆ	37
9 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0	16
10 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 2.0	17
11 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0	18
12 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก	20

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนา จึงต้องมีการพัฒนาทางด้านต่างๆ โดยเฉพาะทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งในกระบวนการผลิตจะก่อให้เกิดของเสียขึ้น รวมทั้งของเสียอันตรายด้วย ของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นประมาณ 60 % เป็นของเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก ของเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักเหล่านี้จัดเป็นประเภทของเสียอันตรายที่มีความเป็นพิษและมักพบอยู่จำนวนมาก ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทชุบผิวโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมฟอกย้อม และอุตสาหกรรมสี เป็นต้น

ความเป็นพิษของโลหะหนักเหล่านี้ไม่สามารถทำลายฤทธิ์ได้ด้วยวิธีทางเคมี (ใช้สารเคมีในการตกตะกอน), ชีวภาพ (ระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ) หรือ ความร้อน (การเผา) แต่สามารถลดความเป็นพิษได้โดยการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ โดยส่วนใหญ่จะใช้การปรับสภาพความเป็นกรด่างของน้ำเสียให้อยู่ในช่วงพีเอช 8 – 11 ด้วยสารประเภทด่าง เพื่อตกตะกอนโลหะหนักเหล่านี้ให้อยู่ในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำมาก กากตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์เหล่านี้หากถูกทิ้งไว้หรือฝังกลบโดยไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธีจะสามารถเปลี่ยนกลับไปอยู่ในรูปละลายน้ำได้อีก เมื่อสภาพความเป็นกรด่างเปลี่ยนไป ทำให้โลหะหนักเกิดการปนเปื้อนดิน แหล่งน้ำผิวดิน แหล่งน้ำใต้ดิน หรืออาจจะถูกดูดซับโดยพืช ซึ่งก็จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ต่างๆ

ในการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักส่วนใหญ่จะใช้การหล่อแข็งซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดของเสียอันตรายโดยอาศัยตัวยึดประสาน เพื่อป้องกันการรั่วไหลของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม สารที่เป็นตัวยึดประสานส่วนใหญ่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เนื่องจากราคาไม่แพง หาได้ง่าย และคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังสามารถนำวัสดุพิษโซลาน เช่น เถ้าแกลบ ผุ่นซิลิกา เถ้าลอยลิกไนต์ และกากชีเหือก มาผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนการบำบัด และเพิ่มคุณภาพของก้อนหล่อแข็งของเสีย แต่การใช้วัสดุพิษโซลานเป็นตัวยึดประสานนั้น ปฏิบัติที่เกิดขึ้นจะซ้ำมากทำให้การพัฒนากำลังอัดช้าด้วย

วัสดุพิษโซลานเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหรือเป็นกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรม และเกษตรกรรม ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบออกไซด์ต่างๆ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3),

แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น วัสดุปอซโซลานเหล่านี้เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะไม่มีสมบัติในการยึดประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับด่าง เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการยึดประสานคล้ายซีเมนต์ และสามารถพัฒนากำลังได้ แต่การใช้วัสดุปอซโซลานก็มีข้อจำกัดคือ ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และวัสดุปอซโซลาน เกิดค่อนข้างช้าที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงต้องกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน เพื่อให้อัตราการพัฒนากำลังอัดในระยะแรกสูงขึ้น การกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถทำได้โดยการใช้ความร้อน หรือสารเคมี

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการหล่อแข็งกาตะคอนโลหะหนักโดยใช้ปูนขาวและเถ้าแกลบดำที่เกิดจากการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้งข้าวเปลือกเป็นวัสดุยึดประสาน โดยการแปรเปลี่ยนปริมาณกาตะคอนโลหะหนักในอัตราร้อยละ 10, 30 และ 50 และทำการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างปูนขาวและเถ้าแกลบดำด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและความร้อน โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ใช้จะแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ที่ 1, 2 และ 3 ในอัตราร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 และทำการบ่มก้อนหล่อแข็งของเสียที่อุณหภูมิห้อง, 40 °C และ 50 °C เพื่อจำลองอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตก้อนหล่อแข็งของเสียในแหล่งฝังกลบ จากนั้นจึงทำการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดและการร้าวไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียด้วยวิธีทดสอบของกรมโรงงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) ศึกษาผลของสารเคมีร่วมกับความร้อนต่อความสามารถในการรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาว
- 2) ศึกษาอิทธิพลของกาตะคอนโลหะหนักต่อคุณสมบัติของก้อนหล่อแข็งของเสียในสถานะที่มีการกระตุ้นด้วยสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทำเสถียรและการหล่อแข็ง [1, 2]

การทำเสถียร (Stabilization) เป็นกระบวนการบำบัดของเสียอันตรายเบื้องต้น โดยการเติมสารเคมีเพื่อทำลายฤทธิ์หรือลดความเป็นพิษของของเสีย นั้น ทำให้ความสามารถในการละลายความสามารถในการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม และความเป็นพิษของของเสียอันตรายลดลง

การหล่อแข็ง (Solidification) เป็นกระบวนการบำบัดของเสียอันตรายทั้งที่อยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็งของแข็งกับตัวยึดประสาน ทำให้ของเสียอันตรายถูกเปลี่ยนสถานะไปเป็นของแข็งที่มีความสามารถในการรับกำลังอัดสูงขึ้น ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย ของเสียอันตรายจะถูกตรึงโดยการกัก (Encapsulation) อยู่ในโครงสร้างของตัวยึดประสานที่มีความสามารถในการรับแรงอัดสูง และมีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ โดยไม่จำเป็นว่าจะต้องเกิดพันธะเคมีกับตัวยึดประสาน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเสียอันตรายกับสิ่งแวดล้อมลดลง และส่งผลให้อัตราการรั่วไหลของเสียอันตรายสู่สภาพแวดล้อมลดลง ทำให้มีความสามารถเคลื่อนย้ายหรือฝังกลบของเสียอันตรายได้อย่างปลอดภัย เทคนิคการหล่อแข็งกากของเสียอันตราย เช่น

Cement-Based Techniques

การหล่อแข็งกากตะกอนที่ใช้ซีเมนต์เป็นตัวยึดประสาน โดยซีเมนต์เป็นของผสมระหว่างแคลเซียม, ซิลิกา, อลูมิเนียม และเหล็กออกไซด์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้โครงสร้างแข็งคล้ายหิน และเพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของการหล่อแข็ง ซึ่งจะช่วยลดการรั่วไหลของโลหะจากก้อนหล่อแข็งได้ จึงเพิ่มสารที่มีสมบัติปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย, ลิกไนต์ และขี้เถ้าแกลบ ผสมร่วมกับซีเมนต์ซึ่งเหมาะสำหรับการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก เนื่องจากส่วนผสมมีค่า pH สูง โลหะหนักที่อยู่ในส่วนผสมอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์หรือเกลือคาร์บอเนตที่ไม่ละลายน้ำ ไอออนของโลหะอาจเข้าไปเกาะอยู่ในโครงสร้างของวัสดุยึดประสาน ส่วนการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุยึดประสานทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความแข็งแรงที่จะสามารถนำไปทำการฝังกลบแบบปลอดภัยได้

ข้อดีของวิธี Cement-Based Techniques คือ วัตถุดิบที่ใช้ (ซีเมนต์) มีอยู่มากมาย และราคาไม่แพงซีเมนต์มีสมบัติที่แน่นอน การผสมและการจัดการสามารถทำได้สะดวก เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการมีพร้อมอยู่แล้ว ไม่ต้องการผู้ชำนาญเป็นพิเศษ กากตะกอนที่ใช้ผสมไม่ต้องทำให้แห้ง หรือการเอาน้ำออก และซีเมนต์มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ความเป็นด่างของซีเมนต์สามารถทำให้กรดในของเสียเปลี่ยนสภาพเป็นกลางได้

ข้อเสียของวิธี Cement-Based Techniques คือ ต้องใช้ซีเมนต์ปริมาณมาก น้ำหนักสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งมากกว่าเทคนิคอื่นๆ ซีเมนต์ที่มีกำลังต่ำจะมีการรั่วไหลของของเสียอันตรายออกมามาก เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรด และของเสียอันตรายบางชนิดเมื่อนำมาผสมจะทำให้การก่อตัวของซีเมนต์ช้าลง

Lime-Based Techniques

เป็นการหล่อแข็งโดยใช้ปูนขาวผสมกับกาตะกอนของเสีย และอาจเพิ่มสารผสมที่มีองค์ประกอบของซิลิกา เช่น เถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าแกลบ ผสมร่วมกับซีเมนต์ การแข็งตัวใช้เวลานาน เหมาะที่จะใช้กับกากของเสียพวกสารอินทรีย์มากกว่าพวกสารอินทรีย์ เนื่องจากกากของเสียพวกสารอินทรีย์เมื่อผ่านกรรมวิธีการกำจัดแล้ว ภายหลังการบ่มจะได้กากของเสียที่มีความแข็งแรงลดลง และอาจมีการแพร่ซึมเพิ่มขึ้นได้ นอกจากการเติมปูนขาวโดยตรง แล้ววัสดุอื่นที่สามารถใช้แทนปูนขาวได้ ทั้งยังมีสมบัติและกลไกการทำปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน ได้แก่ จีเถ้าลอย เมื่อเปรียบเทียบกับกาตะกอนแข็งด้วย Cement-Based พบว่าก้อนหล่อแข็งที่ได้จาก Lime-Based ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดีกว่าและมีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยกว่า

ข้อดีของวิธี Lime-Based Techniques คือ วัตถุดิบราคาไม่แพง และอุปกรณ์ที่ใช้หาได้ทั่วไป การเกิดปฏิกิริยาของปูนขาว วัสดุปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ซึ่งสามารถพัฒนากำลังอัดได้

ข้อเสียของวิธี Lime-Based Techniques คือ ปูนขาว และสารเติมแต่งอื่นๆ จะไปเพิ่มน้ำหนักของของเสียที่ถูกขนส่ง และการฝังกลบ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับวัสดุปอซโซลาน เกิดขึ้นช้าทำให้การแข็งตัวของก้อนหล่อแข็งเป็นไปได้ช้า

Pozzolan-Based Techniques

ปอซโซลานเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ถ้ามีปูนขาว เป็นสารตั้งต้นด้วย และจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการยึดประสานคล้ายซีเมนต์

ข้อดีของ Pozzolan-Based Techniques คือ ก้อนหล่อแข็งมีสมบัติการซึมน้ำได้ดีกว่าก้อนหล่อแข็งที่ใช้เทคนิคอื่นๆ มีน้ำหนักเบา และวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่ที่นำมาใช้เป็นของเหลือจากการเกษตรซึ่งเป็นการลดของเสียจากการเกษตรกรรมได้

ข้อเสียของ Pozzolan-Based Techniques คือ ก้อนหล่อแข็งมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าวิธีอื่นๆ

Thermoplastic Techniques

เป็นการหล่อแข็งกาตะกอนของเสียที่ใช้ บิพูเมน พาราฟิน หรือโพลีเอธิลีน ซึ่งเป็นสารโพลิเมอร์ชนิดที่เป็นเทอร์โมพลาสติกผสมกับกาตะกอนของเสียที่แห้ง ณ อุณหภูมิสูงกว่า 100 °ซ จะ

ทำให้ส่วนผสมหลอมเหลวเข้ากับกาทะคอน เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจึงได้ก้อนหล่อแข็งซึ่งมีสมบัติต้านทานต่อความชื้นได้ดี ปกติมักใช้กับสารกัมมันตรังสีไม่สามารถใช้กับสารอินทรีย์ หรือ สารออกซิไดซ์ที่รุนแรง เช่น ในเตาเพอร์คลอเรต และเกลือแอนไฮดรัส

ข้อดีของวิธี Thermoplastic Techniques คือ อัตราการรั่วซึมของสารปนเปื้อนต่ำกว่ากระบวนการ Cement-Based หรือ Lime-Based ปริมาตรรวมของของเสียจะลดลง เพราะจำเป็นต้องเอาน้ำออกจากของเสียก่อนที่จะใช้เทคนิคเทอร์โมพลาสติก ก้อนหล่อแข็งมีความทนทานต่อสารละลาย ทำให้เกิดการสลายตัวด้วยจุลินทรีย์ต่ำ วัสดุที่ใช้สามารถเอากลับมาใช้ใหม่ได้น้ำหนักของก้อนหล่อแข็งที่ได้จะเบากว่าการใช้เทคนิค Cement-Based เพราะน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกน้อย ทำให้ความหนาแน่นน้อยซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

ข้อเสียของวิธี Thermoplastic Techniques คือ อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาแพง และจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญพิเศษสำหรับกระบวนการ ไม่สามารถใช้กับสารที่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง วัสดุเทอร์โมพลาสติกติดไฟได้ เมื่ออยู่ใกล้บริเวณที่มีสารอินทรีย์พวกปิโตรเลียมที่อุณหภูมิสูง ระหว่างการให้ความร้อน และสารผสมบางชนิดที่มีสารอินทรีย์ระเหยจะสามารถผลิตน้ำมัน และกลิ่น ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดมลภาวะอากาศ กาทะคอนของเสียที่ใช้จะต้องทำให้แห้งก่อนนำมาผสมกับวัสดุเทอร์โม-พลาสติก ทำให้ต้องการพลังงานในปริมาณมาก

Organic Polymer Techniques

เป็นการหล่อแข็งโดยการเติมสารอินทรีย์โมโนเมอร์ลงในกาทะคอนที่แห้งแล้วผสมให้เข้ากัน แล้วจึงเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดการรวมตัวของโมโนเมอร์กลายเป็นโพลิเมอร์อยู่ในรูปของแข็งซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ ของเสียจะถูกจับไว้ในโครงสร้างโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ของเสียที่นำมาหล่อแข็งด้วยวิธีนี้อาจอยู่ในรูปของแข็ง หรือ กึ่งของแข็งก็ได้ ตัวอย่างโมโนเมอร์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เช่น ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์, ไวนิลเอสเทอร์, สไตร์โพลิเมอร์ เป็นต้น โดยใช้กรดแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการนี้เหมาะสำหรับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ แต่ไม่เหมาะสำหรับของเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะ เนื่องจากโลหะละลายน้ำได้ดีในกรดแก่ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นโลหะบางส่วนอาจไม่ถูกจับไว้ในโครงสร้างของโพลิเมอร์ แต่ละลายปนออกมากับตัวเร่งปฏิกิริยาได้

ข้อดีของวิธี Organic Polymer Techniques คือ ใช้วัสดุในการตรึงน้อยกว่าเทคนิค Cement-Based และ Lime-Based ของเสียที่ใช้จะต้องเอาน้ำออก ไม่จำเป็นต้องแห้งสมบูรณ์ เนื่องจากโพลิเมอร์แข็งที่เสร็จแล้วจะต้องถูกทำให้แห้งก่อนกำจัด ก้อนหล่อแข็งที่ได้มีความ

หนาแน่นต่ำกว่าซีเมนต์ และสารหล่อแข็งพวกเรซินไม่ติดไฟและการทำเรซินไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง

ข้อเสียของวิธี Organic Polymer Techniques คือ ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการ Urea – Formaldehyde เป็นกรดแก่ ซึ่งทำให้โลหะส่วนใหญ่ละลายได้ที่ pH ต่ำ จึงสามารถปนออกมากับน้ำไม่ถูกจับไว้ระหว่างกระบวนการ Polymerization และตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะมีผลกัดกร่อนสูง ทำให้ยังต้องการอุปกรณ์ผสม รีแอกเตอร์ ภาชนะบรรจุ เกิดการชำรุดเสียหาย และในการนำมาฝังกลบจำเป็นต้องบรรจุในถังเหล็กก่อนทิ้ง ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

Encapsulation Techniques

เป็นการหล่อแข็งโดยทำให้กากตะกอนแห้งจับกันเป็นก้อน แล้วเคลือบด้วยสารโพลีเมอร์ สารที่ห่อหุ้มนี้มีความแข็งแรงทนทานต่อน้ำ และสภาพแวดล้อมได้ดี

ข้อดีของวิธี Encapsulation Techniques คือ ก้อนหล่อแข็งแยกจากสิ่งแวดล้อม และไม่จำเป็นต้องใส่ภาชนะก่อนทิ้ง เพราะกากของเสียถูกห่อหุ้มอย่างมิดชิด และเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี

ข้อเสียของวิธี Encapsulation Techniques คือ วัสดุที่ใช้สำหรับห่อหุ้มมีราคาแพง ต้องการพลังงานปริมาณมากสำหรับการทำให้แห้ง การหลอมตัวยึดประสานและการหล่อ วัสดุที่ใช้หุ้มสามารถติดไฟได้ง่าย อุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีความเฉพาะเจาะจงพิเศษ และต้องใช้คนที่ชำนาญเป็นพิเศษในการควบคุมอุปกรณ์การหล่อและการหลอม

Self-Cementing Techniques

ใช้กับกากของเสียที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟต ซัลไฟด์ และมีสารแคลไซน์ 8 - 10 % ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คล้ายปูนปลาสเตอร์

ข้อดีของวิธี Self-Cementing Techniques คือ ไม่ต้องเติมสารเติมแต่งตลอดกระบวนการระยะเวลาในการหล่อสั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ Cement-Based และ Lime-Based วิธีนี้สามารถกักเก็บโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบนี้ไม่ต้องการของเสียที่แห้งสมบูรณ์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต้องใช้น้ำ

ข้อเสียของวิธี Self-Cementing Techniques คือ ใช้ได้เฉพาะกากของเสียที่ปนเปื้อนซัลเฟต และ ซัลไฟด์สูง กากของเสียของกระบวนการนี้มีลักษณะการร่วซึมเหมือนกับกระบวนการ

Cement-Based และ Lime-Based ต้องการพลังงานสูงในการเกิดซีเมนต์ และต้องใช้ผู้ชำนาญพิเศษในการผสมของเสีกับสารเติมแต่ง

Classification (Vitrification)

ใช้สำหรับการหล่อแข็งโดยใช้การตะกอนผสมกับซิลิกา แล้วให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงถึง 1350° ซ ทำให้เกิดการหลอมเหลว แล้วทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจนเกิดเป็นโครงสร้างคล้ายแก้วซึ่งมีความคงตัวสูงมาก ของเสีอันตรายจะถูกจับอยู่ในรูปผลึกแก้วและไม่สามารถถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้ วิธีการนี้ต้องใช้เครื่องมือที่มีเทคโนโลยีสูงและมีราคาแพง จึงใช้สำหรับของเสีที่มีความเป็นพิษสูงมากและสารกัมมันตรังสีที่มีระดับสูงมากเท่านั้น

ข้อดีของวิธี Classification คือ ให้คุณภาพดี และสารเติมแต่งมีราคาถูก

ข้อเสียของวิธี Classification คือ ต้องใช้พลังงานสูง เนื่องจากแก้วต้องถูกให้ความร้อนถึง 1350°C เพื่อให้หลอมรวมกับของเสีสารประกอบบางชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะอาจจะระเหยเนื่องจากอุณหภูมิสูงก่อนที่มันจะรวมกับซิลิกาที่หลอมในแก้ว และต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ และบุคลากรที่ได้รับการฝึกฝน

สำหรับกากของเสีอันตรายที่มีโลหะหนักปนเปื้อน นิยมใช้การหล่อแข็งด้วยวิธี Cement-Based, Lime-Based หรือ Thermoplastic and Organics Polymer Techniques แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Cement-Based Techniques ทั้งนี้เพราะ

- ต้นทุนถูกกว่า
- ไม่ต้องใช้เทคโนโลยีชั้นสูง
- ไม่ต้องการแรงงานที่ชำนาญการเฉพาะ
- ใช้เทคนิคการผสมสารเคมี (วัสดุยึดประสาน) ในกากของเสี
- เหมาะสำหรับการหล่อแข็งของเสีอนินทรีย์ เช่น โลหะหนัก
- ซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ มีค่า pH ประมาณ 10 - 12 เพราะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนโลหะที่ปนเปื้อนในกากของเสีอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีเสียรภาพที่ค่า pH สูง
- มีความต้านทานสภาพเป็นกรดได้ดี เนื่องจากธรรมชาติของก้อนหล่อแข็งมีความเป็นด่างสูง
- ก้อนหล่อแข็งที่ได้สามารถนำไปกำจัดโดยการฝังกลบต่อไป

2.2 สมบัติของวัสดุยึดประสาน

2.2.1 ปูนขาว (Lime) [3]

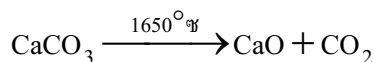
ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยนำมาเป็นวัสดุยึดประสานในการก่อสร้างอาคารหรือถนนมาตั้งแต่สมัยกรีก โรมัน และอียิปต์โบราณ โดยทั่วไปนิยามของปูนขาวคือ สารที่มีองค์ประกอบของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียมและแมกนีเซียม เป็นผลผลิตที่ได้มาจากการเผาหินปูนที่มีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สามารถขุดพบหินที่ใช้ผลิตปูนขาวได้ทั้งในสภาพที่บริสุทธิ์และไม่บริสุทธิ์ ปูนขาวสามารถแบ่งตามลักษณะทางเคมีได้เป็น 2 ประเภท คือ ปูนสุก (Quick Lime) และ ปูนขาว (Hydrated Lime)

2.2.1.1 ปูนสุก (Quick Lime)

Quick Lime คือ ปูนขาวที่มี Calcium Oxide (CaO) เป็นส่วนประกอบหลักและมี Magnesium Oxide (MgO) เป็นส่วนประกอบรอง ปูนสุกสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท

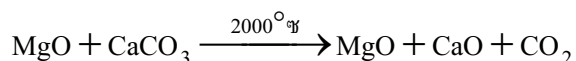
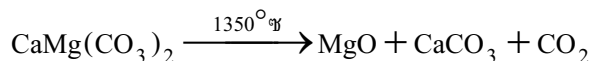
1. High Calcium Quicklime (CaO)
2. Dolomitic Calcium Quicklime ($\text{CaO}+\text{MgO}$)

กรรมวิธีในการผลิตคือ การเผาหินปูนโดยใช้อุณหภูมิสูงเพื่อขจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และนำที่มีอยู่ในหินปูนให้เหลือแต่ CaO ดังสมการ

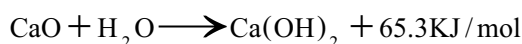


จากสมการจะเห็นได้ว่า จะต้องใช้อุณหภูมิในการเผาหินปูนสูงถึง 1650°F (900°C) จึงทำให้ หินปูน แตกตัวออกเป็น CaO และ CO_2 แต่ในบางครั้งอาจต้องใช้ อุณหภูมิสูงถึง 2000°F (1100°C) เพื่อให้ Calcitic Limestone เกิดการแตกตัว

ส่วนกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต Dolomitic Quicklime คือ การเผา Dolomitic Quicklime ที่อุณหภูมิ 1350°F (750°C) ทำให้ได้ MgO และ CO_2 แต่อาจจะต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 2000°F (1100°C) เพื่อให้เกิดการแตกตัวของ CO_2 ที่สมบูรณ์เต็มที่ ดังสมการ



ปูนสุกเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ผลของปฏิกิริยาจะทำให้ปูนสุกแตกตัวออกเป็นปูนขาว หรือ Slake Lime และมีความร้อนเกิดขึ้นดังสมการ



ในกระบวนการผลิตนอกจากจะให้ความร้อนแล้ว ยังทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของปูนสุกเป็นปูนขาวทำให้สมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของปูนสุกและ ปูนขาว [3]

Characteristic	Quick Lime	Water	Hydrate Lime
Molecular Weight	56	18	78
Specific Gravity	3.3	1	2.2
Relative Weight	1	0.32	1.32
Relative Volume	1	-	1.99

Herrin และ Mitchell ได้แสดงสมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์ หรือตามทฤษฎี ดังแสดงในตารางที่ 2 และสมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 สมบัติของปูนขาวบริสุทธิ์ [3]

PROPERTIES OF THE ORETICALLY PURE LIMES				
Characteristic	Quick Lime		Hydrate Lime	
Chemical Name	Calcaim or Calcium Oxide	Magnesia or Magnesium Oxide	Calcium Hydroxide	Magnesium Hydroxide
Chemical Formula	CaO	MgO	Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂
Crystalline From	Cubic	Cubic	Hexagonal	Hexagonal
Melting Point	2570°F	2800°C	-	-
Decomposition Point	-	-	580°C	345°C
Boiling Point	2850°C	3600°C	-	-
Heat of Solution at 18°C	+18.33 kg-cal	-	+2.79 kg-cal	+0.0 kg-cal
Molecular Weight	56.09	40.32	74.10	58.34
Specific Gravity	3.40	3.65	2.34	2.4

ตารางที่ 3 สมบัติของผลิตภัณฑ์ปูนขาวที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม [3]

PROPERTIES OF THE ORETICALLY PURE LIMES			
(a) Quick Lime			
Chemical Composition	High Calcium (%)		Dolomitic (%)
CaO	92.25-98.00		55.00-57.50
MgO	0.30-2.50		37.60-40.80
CO ₂	0.40-1.50		0.40-1.50
SiO ₂	0.20-1.50		0.10-1.50
Fe ₂ O ₃	0.10-0.40		0.05-0.40
Al ₂ O ₃	0.10-0.50		0.05-0.50
H ₂ O	0.10-0.90		0.10-0.90
Specific Gravity	3.20-3.40		3.20-3.40
Specific Heat at 100°F, Btu/lb	0.19		0.21
Bulk Density (People Lime), pcf	55.00-60.00		55.00-60.00
(b) Hydrate Lime			
Characteristic	High Calcium	Monohydrate Dolomitic	Dihydrate Dolomitic
Principle Chemical Composition	Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂ +MgO	Ca(OH) ₂ +Mg(OH) ₂
Specific Gravity	2.30-2.40	2.70-2.90	2.40-2.60
Specific Heat at 100°F, Btu/lb	0.29	0.29	0.29
Bulk Density, pcf	25.00-35.00	25.00-35.00	30.00-40.00

2.2.1.2 ปูนขาว (Hydrate Lime)

เมื่อปูนสุกรวมตัวกับน้ำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrations กลายเป็นปูนขาวซึ่งจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. Hydrate high - Calcium Lime, Ca(OH)₂
2. Normal hydrate or Monohydrate Dolomitic Lime, Ca(OH)₂+MgO
3. Predure Hydrate or Dihydrate Dolomitic Lime, Ca(OH)₂ + Mg(OH)₂

ขนาดอนุภาคของปูนขาวจะมีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะมีขนาดประมาณ 1 ใน 10 เท่าของขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์

ปูนขาวประเภท Hydrate Lime จะนิยมใช้กันกว้างกว่าประเภท Quick Lime ทั้งนี้เป็นเพราะ Hydrate Lime เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะคายความร้อนออกมาน้อยกว่า มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนเครื่องจักร และเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้อยกว่า Quick Lime ส่วนรายละเอียดของสมบัติ และสารประกอบของปูนขาวแต่ละชนิด รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดของสมบัติและสารประกอบของปูนขาวแต่ละชนิด [3]

Characteristic	Lime	
	Quick Lime	Hydrate Lime
CaO + MgO	≥ 92 %	≥ 95 %
CO ₂ - at Kiln	≤ 3 %	≤ 5 %
- elsewhere fineness	≤ 10 %	≤ 7 %

2.2.2 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) [1]

วัสดุปอซโซลานเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม หรือเป็นกากของเสียอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบออกไซด์ต่างๆ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃), เฟอรัสออกไซด์ (Fe₂O₃), แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น วัสดุปอซโซลานเหล่านี้โดยปกติเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำไม่มีสมบัติในการยึดประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับด่าง เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้ผลผลิตที่ได้มีสมบัติในการยึดประสานคล้ายซีเมนต์ และสามารถพัฒนากำลึงอัดได้

ตามมาตรฐาน ASTM C 219 – 96 และ ASTM C 618 - 91 ได้ให้คำจำกัดความของคำว่า “ปอซโซลาน” คือ วัสดุที่มีซิลิกา หรือมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปสารปอซโซลานจะมีสมบัติในการยึดประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ถ้าสารปอซโซลานนั้นมีความละเอียดมากและมีน้ำเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานคล้ายซีเมนต์ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ปริมาณตัวยึดประสานเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน

การนำเอาสารปอซโซลานมาใช้เป็นวัสดุซีเมนต์ ได้มีมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยเป็นที่ยอมรับกันว่าเมื่อนำวัสดุที่ได้จากการระเบิดภูเขาไฟมาใช้ร่วมกับหินปูนที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ แล้วสามารถปรับปรุงคุณภาพมอร์ต้า (ปูนซีเมนต์ผสมทราย) ให้ดีขึ้น โดยมอร์ต้านั้นสามารถทำให้แข็งตัวในน้ำได้ ในปัจจุบันสารปอซโซลานที่ใช้กันมากที่สุดคือ ซิเอลลอยหรือซีเถ้า แกลบที่นำมาบดเป็นผง นอกจากนี้แล้วยังมีสารปอซโซลานอีกหลายชนิดที่สามารถใช้ได้ยังเป็นวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม เช่น ได้มีการนำเอาแกลบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวมาเผาเพื่อใช้เป็นสารปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 91 จำแนกสารประกอบปอซโซลานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

- Class N ได้แก่ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ คือ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ และหินปูน
- Class F ได้แก่สารปอซโซลานสังเคราะห์ คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชลล์ หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ซีเถ้าหิน ซีเถ้าแกลบ เป็นต้น
- Class C เป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบ เช่นเดียวกับ Class F แต่มีข้อกำหนดสมบัติบางประการที่ต่างกัน

วัสดุปอซโซลานถูกนำมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการทำคอนกรีตหรือ วัสดุก่อสร้างอื่นๆ ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ หรือ Alkali Materials นั้นจะเกิดการทำปฏิกิริยาก่อตัวทำให้เกิดความแข็งแรง ซึ่งจะมีข้อดีและข้อด้อย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- ข้อดี**
 - ทำให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดีขึ้น
 - สามารถใช้ทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต และยังช่วยลดความร้อนที่จะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต โดยเฉพาะในงานคอนกรีตหนา
 - ทำให้มีความทึบน้ำสูงขึ้น
- ข้อด้อย**
 - ทำให้มีการก่อตัวและพัฒนาการรับแรงอัดช้าลง
 - มีการหดตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีความต้องการน้ำมาก พอเมื่อเริ่มมีความร้อนเกิดขึ้นน้ำก็จะเริ่มมีการระเหยออกไป ทำให้ปริมาตรลดลง
 - มีความต้านทานต่อการแข็งตัวของน้ำในโพรงได้ต่ำ

2.2.2.1 จี๊เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) [4]

จี๊เถ้าแกลบ เป็นผลผลิตที่ได้จากการเผาแกลบ ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม และนำจี๊เถ้าแกลบที่เผาและเย็นตัวลงมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดก็จะได้จี๊เถ้าแกลบที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานได้ ในประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน/ปี ปริมาณแกลบ 200 กก. เมื่อทำการเผาจะได้จี๊เถ้าแกลบประมาณ 20 % โดยน้ำหนักหรือประมาณ 40 กก. จึงมีปริมาณเปลือกข้าวหรือที่เรียกว่าแกลบประมาณ 1 ล้านตัน/ปี [5]

การเผาแกลบโดยปกติจะมีทั้งแบบเปิดและแบบปิด โดยในการเผาแกลบแบบเปิดนั้น จะมีซิลิกาอยู่ในรูปผลึกที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อยมาก เช่น Critabolite Tridymite แต่ก็มีบางส่วนที่ละเอียดมาก และมีสมบัติคล้ายสารปอชโซลาน ส่วนการเผาแบบปิดหรือควบคุมการเผาไหม้นั้นจะได้จี๊เถ้าแกลบที่มีสมบัติเป็นปอชโซลานที่ไวต่อปฏิกิริยา คือ เป็นซิลิกาที่มีโครงสร้างเป็น Cellular ซึ่งไม่เป็นผลึก และมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำจี๊เถ้าแกลบมาใช้ประโยชน์ โดยพบว่า ถ้านำแกลบข้าวไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C นาน 4 ชม. จะพบว่าจี๊เถ้าแกลบจะมีองค์ประกอบของซิลิกอนออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์รวมกันถึงร้อยละ 93.76 ขององค์ประกอบทั้งหมด และองค์ประกอบหลักดังกล่าวแล้ว จี๊เถ้าแกลบยังมีส่วนประกอบของ แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และโปแตสเซียมออกไซด์ปนอยู่ด้วย ซึ่งบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของจี๊เถ้าแกลบ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของจี๊เถ้าแกลบ [6]

องค์ประกอบ	จี๊เถ้าแกลบ (%)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	93.15
อลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	0.41
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	0.20
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.41
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.45
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.08
โปแตสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	2.31
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	2.77

2.3 ปฏิกริยาของวัสดุปอซโซลาน

2.3.1 การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน [6]

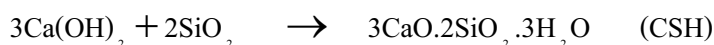
ปูนขาวที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำเป็นส่วนประกอบ คือผลผลิตส่วนหนึ่งที่ได้จากกระบวนการไฮเดรชัน ซึ่งถูกปล่อยให้เป็นอิสระในระหว่างการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ตามทฤษฎีพื้นฐาน ปฏิกริยาปอซโซลานเกิดขึ้นเมื่อ สารประกอบซิลิกาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระเพื่อที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารซีเมนต์ สำหรับปฏิกิริยานี้ซิลิกาต้องอยู่ในรูปอสัณฐาน ถ้าอยู่ในรูปผลึกจะมีผลต่อปฏิกิริยาช้ามาก ดังนั้นอัตราการเพิ่มกำลังรับแรงอัดจึงขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเข้าทำปฏิกิริยาและอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุปอซโซลาน โดยทั่วไปอัตราส่วนของวัสดุปอซโซลานที่ใช้จะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-40

วัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ เพื่อทำให้เกิดสารซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ดังปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการข้างล่างนี้

ขั้นตอนที่ 1



ขั้นตอนที่ 2



จากสมการจะเห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดในขั้นตอนที่ 2 เพราะในขั้นตอนแรกปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นแล้ว ดังนั้นจึงคาดการณ์ไว้ว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกๆ ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอซโซลานจะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาในวัสดุปอซโซลานแล้วเปลี่ยนรูปไปเป็นสารซีเมนต์ ไม่มีความแตกต่างอย่างเด่นชัดของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์ – ปอซโซลาน ปูนขาว – ปอซโซลาน และสารประกอบซีเมนต์ – ปอซโซลาน ภายหลังการผสมวัสดุปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปูนขาวกับน้ำ) ของเหลวจะอิมตัวอย่างรวดเร็วด้วยปูนขาว ค่า pH มากกว่า 12.7 อนุภาคปอซโซลานจะสัมผัสกับน้ำในสภาพที่เป็นด่างสูง จึงทำให้ SiOH (Silica Hydroxyl group) ไปเคลือบอยู่บนอนุภาคปอซโซลานในรูปของ SiO_4^{4-} และ H^+ ในขณะที่ Ca^{2+} ทำให้ชั้นผิวหนา

ขึ้น เพราะฉะนั้นสาเหตุหลักของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อมาเกิดจากการแพร่กระจายของกลุ่มอะตอมผ่านชั้นที่หนาแน่นด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรตที่เกิดกับวัสดุปอซโซลานกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$

2.3.2 กระบวนการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน [7]

เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างปูนขาวกับวัสดุปอซโซลานจะเกิดขึ้นช้า ทำให้มีการพัฒนากำลังอัดและการก่อตัวช้า เนื่องจากชั้นที่ผิวหน้าของอนุภาควัสดุปอซโซลานนั้นมีความหนาแน่นสูงและมีความเสถียรภาพทางเคมี โดยชั้นที่ผิวของวัสดุปอซโซลานนี้จะป้องกันไม่ให้อาหารประกอบในอนุภาควัสดุปอซโซลานที่มีความไวในการทำปฏิกิริยากับวัสดุที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เหตุผลอีกข้อคือ วัสดุปอซโซลานนั้นมีพันธะ Silica-Alumina ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงเป็นองค์ประกอบ ในการทำปฏิกิริยานั้นจะต้องทำลายพันธะเหล่านั้นก่อน ดังนั้นจึงต้องมีการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานในก้อนหล่อแข็ง เพื่อช่วยลดระยะเวลาการก่อตัวและเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดในระยะยาว กระบวนการที่สำคัญที่นำมาใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยามี 3 วิธี ดังต่อไปนี้

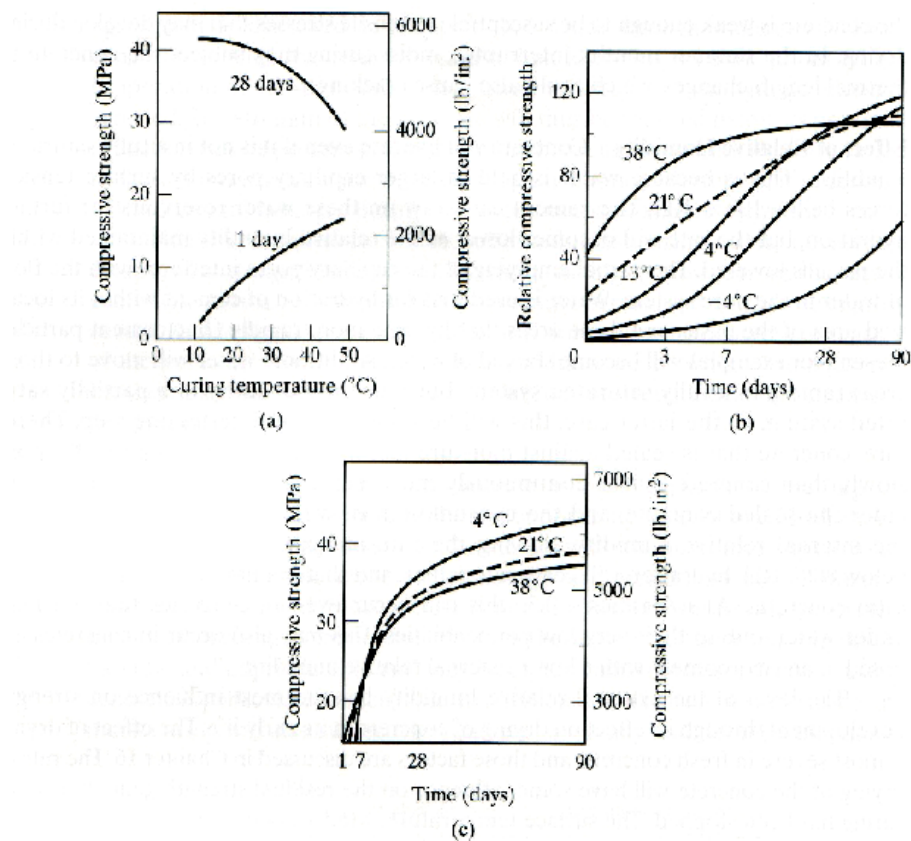
2.3.2.1 การกระตุ้นด้วยการบดลดขนาด (Mechanical Activation)

เป็นวิธีการที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี เนื่องจากความละเอียดของวัสดุทำให้มีพื้นที่ผิวที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาสูง ดังนั้นจึงเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของบุรฉัตรและคณะ [8] ที่ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการผลิตเถ้าแกลบที่มีความไวต่อปฏิกิริยา โดยเตรียมมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบอัตราส่วนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเท่ากับ 70:30 ทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดที่เวลา 3, 7 และ 28 วัน พบว่า เถ้าแกลบที่บดเป็นเวลา 90 นาที จะให้การพัฒนากำลังอัดสูงสุดในทุกอายุการบ่ม

2.3.2.2 การกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermal Activation)

การบ่มคอนกรีต ในสภาวะที่เหมาะสมหรืออุณหภูมิที่พอเหมาะ สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ได้เช่นกัน การบ่มคอนกรีตมีวิธีการบ่ม 2 วิธีคือ แบบแช่น้ำและแบบห่อหุ้ม ทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันตรงที่การบ่มแบบแช่น้ำเป็นการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แต่ในขณะเดียวกันก็มีการเพิ่มเติมน้ำเข้าไปด้วย ส่วนการบ่มแบบห่อหุ้มเป็นการป้องกันการสูญเสียความชื้นเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการรับแรงอัดพบว่า การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงสามารถเร่งปฏิกิริยาในช่วงแรกได้ดี แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปค่าความสามารถในการรับแรงจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซีเมนต์ในช่วงแรกให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การลดลงในช่วงหลังนั้นอาจเกิดจากความร้อนที่บ่มทำ

ให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่คงตัวและสูญเสียความแข็งแรงไป เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการรับแรงอัดในระยะยาว จึงลดผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตได้แสดงดังรูปที่ 1



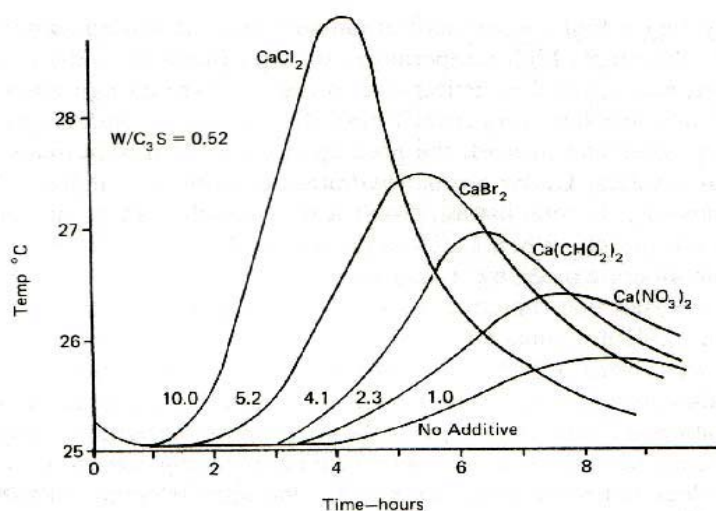
รูปที่ 1 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังรับแรงอัด [9]

- (a) เปรียบเทียบ 1 วันและ 28 วัน (โดยอุณหภูมิคงที่)
- (b) การบ่มด้วยอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง
- (c) การบ่มด้วยอุณหภูมิในระยะแรกและบ่มที่อุณหภูมิปกติที่ 21 °ซ

2.3.2.3 การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activation)

การกระตุ้นด้วยสารเคมีเป็นวิธีที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานดีขึ้น และมีอัตราการพัฒนากำลังอัดที่เร็วขึ้น ส่วนใหญ่ใช้วิธีการเติมสารเคมีในการกระตุ้น เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ยุ่งยากเหมือนวิธีอื่น และมีค่าใช้จ่ายที่ถูก โดยสารเคมีที่นิยม ได้แก่ สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบส เนื่องจากสารละลายที่เป็นเบสสามารถกัดกร่อนพันธะ Silica-Alumina โดยสารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) โซเดียม

ซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นต้น ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยลดระยะเวลาก่อตัวให้น้อยลง ทำให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นจัดเป็นสารผสมเพิ่มในประเภทสารเร่งหรือการก่อตัว



รูปที่ 2 อุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อใช้สารเคมีในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน [7]

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษถึงสมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยา โดยศึกษาจากงานวิจัยหลายๆ งานวิจัยถึงสมบัติของก้อนหล่อแข็งที่ใช้สารเคมีในการกระตุ้น พบว่าสารละลายโซเดียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และยังสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้โดยตรงแล้วเกิด Calcium Silicate Hydrate (CSH) ได้โดยตรง ทำให้ก้อนหล่อแข็งมีรูพรุนน้อย ซึ่งทำให้ก้อนหล่อแข็งมีความหนาแน่นมาก จึงมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและมีกำลังอัดสูง [9]

2.4 โลหะหนัก [10]

โลหะหนักจัดเป็นสารอันตรายประเภทที่มีความเป็นพิษ ตามนิยามขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา หรือ U.S.EPA ซึ่งให้ความหมายว่า เป็นสารอันตรายที่สามารถทำให้เกิดพิษโดยเฉียบพลัน และสามารถสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ก่อให้เกิดโรคจนถึงขั้นเสียชีวิตได้ส่วนใหญ่โลหะหนักมักใช้อยู่ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคลือบผิวหรือชุบโลหะ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งการนำโลหะหนักมาใช้ประโยชน์จะทำให้เกิดโทษได้หากผู้ใช้ไม่มีความรู้และความระมัดระวัง ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตราย

ต่อสิ่งแวดล้อม และมนุษย์ การปล่อยน้ำทิ้งที่มีปริมาณโลหะหนักเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง การนำภาคตะกอนโลหะหนักมากองทิ้งไว้ในชุมชนหรือสถานที่ทิ้งโดยปราศจากการดูแลเอาใจใส่ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต เพราะโลหะหนักสามารถกระจายเข้าสู่ดิน แหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำบาดาล และในที่สุดก็เข้าห่วงโซ่อาหารหรือสายใยอาหารของสิ่งมีชีวิต ก่อให้เกิดโรคและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตในที่สุด

โลหะหนักที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีมากที่สุดคือ ตะกั่ว พรอท แคดเมียม นิกเกิล เซเลเนียม และโครเมียม โลหะเหล่านี้จะถูกทิ้งออกมาจากโรงงานทางน้ำเสีย และเขม่าควันไฟจากโรงงาน สารโลหะหนักที่เป็นพิษสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามความเป็นพิษ คือ

- สารโลหะที่ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคโลหะที่แขวนลอยในอากาศ ได้แก่ เหล็ก ทังสเตน และไนโอเนียม
- สารโลหะที่ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับอวัยวะภายใน เช่น ดับ ไต และหัวใจ โลหะหนักที่เป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม นิกเกิล วานาเดียม โคบอลต์ ทองแดง เงิน และแคดเมียม
- สารโลหะที่มีพิษร้ายแรงจนเกินความสามารถที่จะให้รักษาให้หายได้ยาก ได้แก่ พรอท ตะกั่ว แมงกานีส สารหนู และพลวง สารพิษในกลุ่มนี้อาจเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ และระบบประสาทส่วนกลางด้วย การละลายของสารพิษเป็นปฏิกิริยาเคมี จึงเป็นการยากที่จะจัด หรือทำลายให้หมดไปในระยะเวลาอันสั้น

2.5 การตรึงโลหะหนักของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต [2]

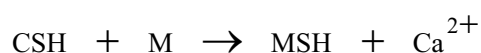
ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอลิโซลันจะเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งจะเกิดจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือจากวัสดุปอลิโซลันถึง 70-80 % CSH ที่เกิดนี้มีความสามารถในการตรึงโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม พรอท ตะกั่ว และสังกะสี ฯลฯ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง CSH และโลหะหนักนั้นสามารถเกิดได้ 2 กลไก ดังสมการข้างล่าง

การตรึงโดยปฏิกิริยาการเติม (Addition Reaction) ซึ่ง M เป็นตัวแทนของไอออนโลหะหนัก



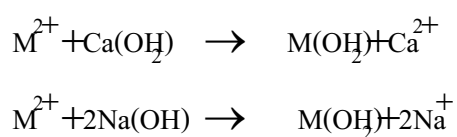
MCSH = Metallic Calcium silicate hydrate

การตรึงโดยปฏิกิริยาการแทนที่ (Substitution Reaction) ซึ่ง M เป็นตัวแทนของไอออนของโลหะหนัก

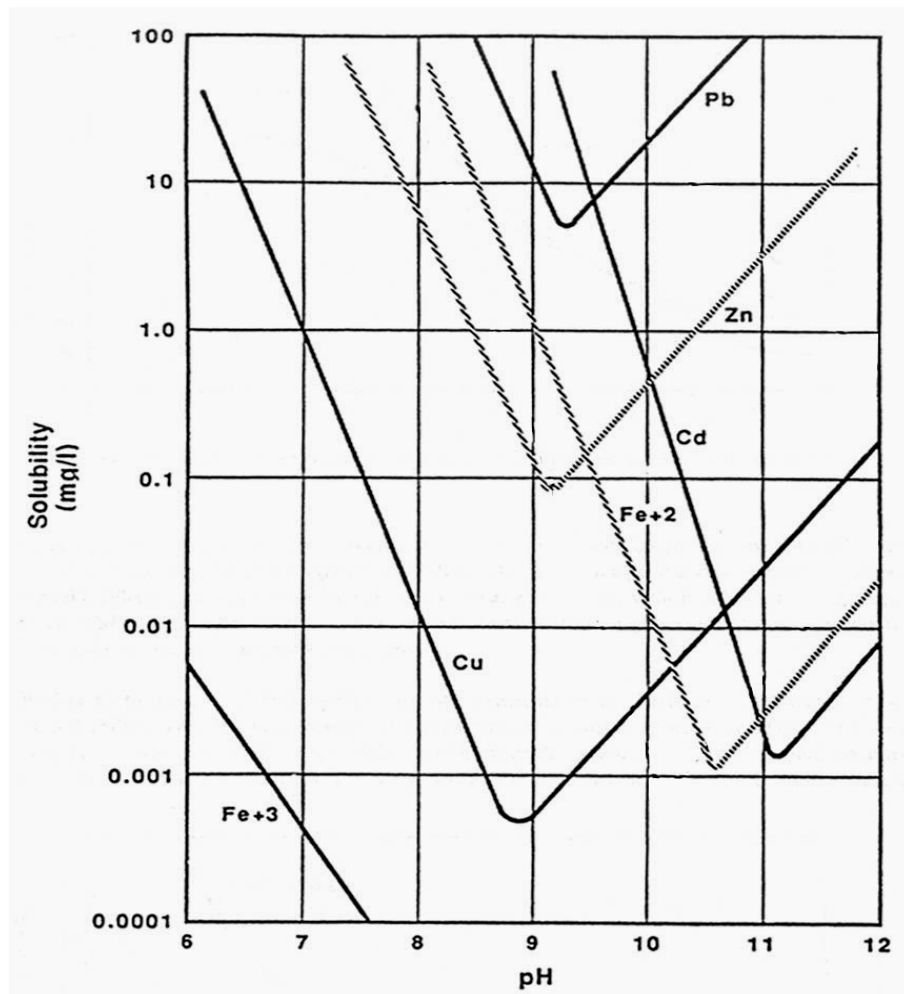


2.6 การตกตะกอนทางเคมี [6]

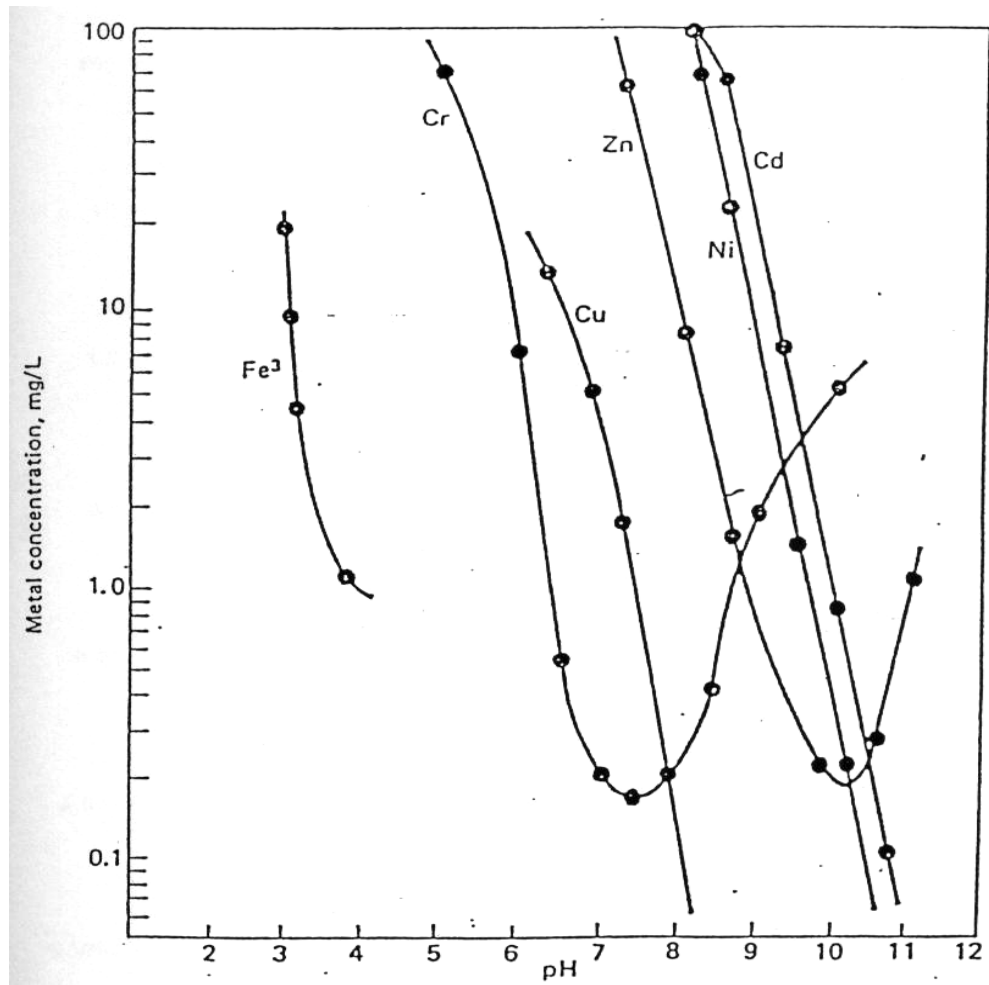
การตกตะกอนทางเคมี เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารให้เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนองค์ประกอบของตัวทำละลาย ซึ่งของแข็งที่เกิดขึ้นสามารถแยกออกจากสารละลายน้ำได้โดยการตกตะกอน หรือการกรอง สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมีหลายชนิด เช่น การตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ โดยใช้ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ การตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ การตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต การตกตะกอนโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ โดยใช้ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงดังสมการข้างล่างนี้



ความเข้มข้นของโลหะไอออนที่เหลืออยู่หลังการบำบัดขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะไอออน ชนิดของสารที่ใช้ในการตกตะกอนและสภาวะในการเกิดปฏิกิริยา เช่น pH และการมีสารรบกวนการตกตะกอนอยู่ด้วย โดยตามทฤษฎีแล้วโลหะไฮดรอกไซด์ส่วนมากเป็นสารแอมโฟเทอริก ซึ่งมีความสามารถละลายน้ำได้ดีในช่วง pH แคบๆ และจะละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดและด่างสูง ดังนั้นความสามารถในการละลายของสารแอมโฟเทอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่สารละลายมี pH ที่สูงหรือต่ำกว่า ค่า pH ที่ตกตะกอน ซึ่งโลหะต่างชนิดกันค่า pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนก็มีค่าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์กับค่า pH [2]



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะไฮดรอกไซด์ในสารละลายกับค่า pH [2]

2.7 การชะละลาย (Leaching) [11]

กากของเสียอันตรายเมื่อไม่ได้รับการบำบัดและกำจัดอย่างถูกวิธี เช่น การนำกากของเสียอันตรายไปทิ้งบนพื้นดินหรือการนำไปฝังกลบ อาจเกิดการย่อยสลายของกากของเสียออกมาทำให้เกิดการชะละลายของสารพิษซึ่งอาจสามารถแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทะเล หรือซึมลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้ และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตจากสารพิษที่รั่วไหลออกมา

น้ำชะ (Leachant) คือ น้ำที่ชะสารมลพิษต่างๆ ออกมาจากของเสีย เช่น ฝน น้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดิน ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนัก และของแข็งอื่นๆ ปนออกมาอยู่ในรูปสารละลายและตะกอนแขวนลอย ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและองค์ประกอบของกากของเสียอันตรายรวมทั้งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การรั่วไหลของสารมลพิษอาจบอกรูปความสามารถในการรั่วไหล (Leach ability : L) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสารมลพิษที่

ออกมาจากตัวอย่างหลังการสกัด 24 ชั่วโมง (W_1) และปริมาณสารมลพิษที่มีอยู่เดิมในตัวอย่าง (W_0)

$$L = W_1/W_0$$

เมื่อ W_1 และ W_0 มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม หรือ ไมโครกรัม

การทดสอบการชะละลายของสารปนเปื้อนจากก้อนหล่อแข็งมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีจุดเด่นหรือวัตถุประสงค์ในการทดสอบที่แตกต่างกันซึ่งส่วนใหญ่จะมีอยู่ 3 ข้อ คือ

- Regulatory Test เป็นการทดสอบตามมาตรฐานขององค์กร ซึ่งระบุได้ว่าผ่านหรือไม่ผ่าน
- Predictive Test เป็นการทดสอบเพื่อพิสูจน์เปรียบเทียบกับของจริงในสนาม เพื่อนำมาทำนายได้
- Investigation Test เป็นการทดสอบเพื่อนำผลการทดสอบไปศึกษาถึงกลไกการยึดเกาะและการรวบรวมละเอียดอื่นๆ เกี่ยวกับการหล่อแข็ง

2.7.1 กลไกการชะละลาย [1]

ก้อนหล่อแข็งของเสียเป็นของแข็งที่มีรูพรุนซึ่งอิมมิดด้วยน้ำ ประกอบด้วยเฟสของแข็งหนึ่งเฟสหรือมากกว่า ช่องว่างของอากาศ และเฟสของเหลวที่เรียกว่า สารละลายที่อยู่ตามรูพรุน โดยเฟสทั้งหมดอยู่ในสมดุลเคมี เมื่อก้อนหล่อแข็งของเสียได้สัมผัสกับสารชะละลาย จะเกิดการแพร่ของสารชะละลายเข้าไปภายในก้อนหล่อแข็งตามช่องเปิดต่างๆ ทำให้สมดุลเคมีภายในก้อนหล่อแข็งถูกรบกวน และเกิดการละลายขององค์ประกอบต่างๆ ภายในก้อนหล่อแข็งของเสีย และเกิดการเคลื่อนตัวเข้ามาใน Pore Solution มากขึ้น ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่าง Pore Solution และ Leachant ทำให้เกิดการแพร่ ของสารต่างๆ จากภายในก้อนหล่อแข็งออกมาสู่สารชะละลาย กลไกย่อยที่เกี่ยวกับการชะละลายมีดังนี้

2.7.1.1. การละลาย (Solubilization)

การชะละลายขององค์ประกอบต่างๆ จากก้อนหล่อแข็งของเสีย ขั้นตอนแรกองค์ประกอบนั้นๆ จะต้องละลายเข้ามาอยู่ในสารละลายที่อยู่ในรูพรุนของแข็ง หรือละลายในสารชะที่แพร่เข้าไปในของแข็ง อัตราการละลายถูกควบคุมโดยความสามารถในการละลายของแต่ละองค์ประกอบที่อยู่ภายในก้อนหล่อแข็งของเสีย และความเข้มข้นขององค์ประกอบนั้นในสารละลายที่อยู่บริเวณผิวหน้าของของแข็ง ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด อัตราการละลายถูกจำกัดโดยจำนวนไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่ในสารชะละลาย หลังจากนั้นจะถูกจำกัดโดยการแพร่ขององค์ประกอบต่างๆ จากก้อนหล่อแข็งของเสีย เพราะว่าการแพร่ของไฮโดรเจนไอออนจะเร็วกว่าอนุภาคอื่นๆ มาก

2.7.1.2. การเคลื่อนตัวผ่านของแข็ง (Transport Through the Solid)

เนื่องจากก้อนหล่อแข็งของเสียมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำ ดังนั้นการแพร่จึงเป็นกระบวนการเดียวที่มีผลต่อการเคลื่อนที่มีขององค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายทั้งในสถานะที่ใช้ในการทดสอบการชะละลาย และสถานะที่เป็นจริงในแหล่งฝังกลบ

2.7.1.3. การแพร่ชั้นที่ถูกชะ (Diffusion Through the Leached Layer)

เนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ ในก้อนหล่อแข็งของเสียถูกชะละลายออกมาภายนอกเป็นจำนวนมากทำให้เกิดชั้นที่ถูกชะ ซึ่งมีความพรุนสูง ดังนั้นการแพร่ของโมเลกุล ในสารละลายจึงเป็นตัวที่จำกัดอัตราการชะละลายด้วย

2.7.1.4. การเคลื่อนที่ผ่านชั้นที่กั้นระหว่างของแข็งกับของเหลว (Transport Through the Solid-Liquid Boundary Layer)

ชั้นที่เชื่อมระหว่างของแข็งและของเหลว อาจทำให้เกิดสถานะที่จำกัดสำหรับการชะละลายเหมือนกับปรากฏการณ์ไฟฟ้าเคมี ความเร็วที่ระบบเข้าสู่สมดุลมักถูกจำกัดโดยความหนาและลักษณะของชั้นที่กั้นอยู่

2.7.1.5. การเคลื่อนตัวในสารชะ (Bulk Transport in Liquid Leachant)

เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล อัตราการชะละลายจะลดลงตามความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟสของแข็งและเฟสของสารละลายจนเข้าสู่ศูนย์ ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นได้ในแหล่งฝังกลบที่อึดตัว และไม่มีการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดิน ซึ่งจะมีผลต่อความเข้มข้นสูงสุดที่จะเป็นไปได้ขององค์ประกอบใน น้ำชะแต่อัตราการชะละลายทั้งหมดอาจต่ำกว่าระบบที่มีการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินอย่างรวดเร็ว

2.7.2 การวัดความสามารถในการชะละลาย [11]

การทดสอบของเสียอันตรายก่อนนำไปฝังกลบโดยทั่วไปมักใช้วิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) ซึ่งพัฒนาขึ้นมาแทนที่ EP Tox วิธีการทดสอบส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการแบบ batch โดยให้ของเสียสัมผัสกับสารชะ ซึ่งสารชะที่ใช้ในการทดสอบส่วนใหญ่ คือ สารละลายกรดอะซิติก หรือบัฟเฟอร์ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปในแหล่งฝังกลบ และใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของสารชะต่อน้ำหนักของของเสียเท่ากับ 20 : 1 โดยให้ของเสียสัมผัสกับสารชะเป็นช่วงเวลาหนึ่งโดยการเขย่าส่วนผสมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้สมดุลทางเคมี จากนั้นจึงทำการแยกของเหลวออกไปทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆ ใน Leachate

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีการใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาโดยไม่ควบคุมอุณหภูมิมาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีน้อยมาก เพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะมีสมบัติในการรับกำลังอัดของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาในสถานะที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิต้องประกอบทางเคมีส่วนมากเป็นผลึก ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยาจึงทำให้ไม่มีการพัฒนากำลังอัดของผลิตภัณฑ์ และยังมีสีดำ ซึ่งสมบัตินั้นทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติทางกายภาพที่น่าดู ดังนั้นเถ้าแกลบดำจึงถูกทิ้งเป็นของเสียทางการเกษตร เถ้าแกลบดำส่วนใหญ่ได้มาจากการนำเถ้าไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงสีข้าว สำหรับอบแห้งข้าวเปลือก เชื้อเพลิงในการเผาอิฐ ใช้ทำถ่าน และเชื้อเพลิงอัดแท่ง ดังนั้นงานวิจัยที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะเกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการควบคุมเท่านั้น

บุตธฉัตร นัตรวีระ และพีรชล สุภัทธรรม, 2538 [12] ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความต้านทานของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานทำอิฐ โดยศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ กำลังรับแรงอัด ความสามารถด้านทนต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดโดยแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน และความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ มีตัวแปรหลักคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสม และร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมสามารถให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 ให้ค่าที่สูงสุด และเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้นรวมทั้งความสามารถในการต้านทานการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและความสามารถด้านทนต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

สมบัติของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาควบคุมขึ้นกับ[13] อุณหภูมิในการเผา เวลาในการเผา การบด สภาพการระบายอากาศระหว่างการเผาแกลบ และอัตราการปล่อยไอน้ำลงอย่างรวดเร็วของเถ้าแกลบหลังการเผา จะทำให้ได้เถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา โดยศึกษาการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผาที่มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าผสมเถ้าแกลบและปูนขาว โดยเตรียมมอร์ต้าที่มีอัตราส่วนปูนขาว:เถ้าแกลบที่ 0.5 อัตราส่วนน้ำต่อปูนขาว และเถ้าแกลบมีค่า 0.8 และทำการบ่มตัวอย่างมอร์ต้าที่อุณหภูมิ 45 – 50 °C เป็นเวลา 1 วัน พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเผาประมาณ 600°C เป็นเวลา 2 – 3 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มอร์ต้าจากทั้ง 2 สถานะมีค่ากำลังอัดสูงสุด

มีการศึกษาถึงความไวต่อของเกิดปฏิกิริยาของซีเมนต์แกลบโดย D.L., Cook [14] รายงานว่า ถ้าใช้อุณหภูมิในการเผาจะทำให้ปริมาณคาร์บอนเหลืออยู่มาก และมีสีดำ ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตลดต่ำลง แต่ถ้าใช้อุณหภูมิในการเผาสูงเกินไป ซิลิกาที่อยู่ในซีเมนต์แกลบจะมีการเปลี่ยนรูปร่างจากรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีความไวในการทำปฏิกิริยากลายเป็นรูปร่างผลึก (Crystalline) ที่ไม่ไวในการทำปฏิกิริยา ซึ่งได้มีการเสนอว่าอุณหภูมิในการเผาซีเมนต์แกลบควรอยู่ในช่วง 400-500 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ซิลิกาจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous)

เนื่องจากการเป็นที่ทราบกันว่าปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและวัสดุปอชโซลานเกิดค่อนข้างช้า เวลาที่ใช้ในการก่อตัวและพัฒนากำลังอัดได้ช้า ดังนั้นจึงต้องมีการกระตุ้นปฏิกิริยา โดยใช้วิธีต่างๆ เช่น ความร้อน การบด หรืออาจจะเป็นการใช้สารเคมี เป็นต้น Shi และ Day, 1993 [15] จึงได้ทำการศึกษาถึงการกระตุ้นปฏิกิริยาของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาวและวัสดุปอชโซลานธรรมชาติ โดยใช้สารเคมีกระตุ้นปฏิกิริยา ด้วยอัตราส่วนปอชโซลานธรรมชาติ 80% ผสมกับปูนขาว 20% ใช้สารเคมี 4 ชนิดทำการกระตุ้นปฏิกิริยา คือ แคลเซียมคลอไรด์ ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) และ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โดยใช้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-8 % ผลจากการศึกษาพบว่า การเติมสารเคมีประเภทต่างสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับเปสต์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟตซึ่งสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ดีทั้งในระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้าย ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 2-4% โดยน้ำหนักวัสดุปอชโซลาน นอกจากนี้ แคลเซียมคลอไรด์ให้ผลการทดลองที่ดีเช่นเดียวกันแต่ต้องใช้เวลา 3 วันขึ้นไป ซึ่งจะให้กำลังรับแรงอัดมากกว่าเปสต์ที่ผสมโซเดียมซัลเฟต 4% ในช่วงหลัง ส่วนแคลเซียมซัลเฟตเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้แต่น้อยกว่าแคลเซียมคลอไรด์ สำหรับโซเดียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด

Asavapisit, S., และ Chotklang, 2544 [16] ได้ทำการศึกษาในการนำกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมา 3 ชนิด ได้แก่ ตะกรันเตาหลอมเหล็ก ถ้ำลอยลิกไนต์ และซีเมนต์แกลบมาหล่อแข็ง โดยทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดในระยะแรกของซีเมนต์ ที่เตรียมจากปูนขาวและกากของเสียนี้ ทั้งในสถานะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น ซึ่งในการศึกษาจะใช้อัตราส่วน 20 : 80 และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคมีทั้ง 2 ชนิด คือ โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนร้อยละ 0 , 4 , 5 และ 6 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ทั้งโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตสามารถพัฒนากำลังอัดในระยะแรกของปอชโซลานซีเมนต์ได้ดี แต่โซเดียมซิลิเกตสามารถพัฒนาได้ดีกว่าโซเดียมคาร์บอเนตในช่วงแรก โดยซีเมนต์ที่เตรียมจากปูนขาวและถ้ำลอยลิกไนต์จะให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าซีเมนต์ที่เตรียมจากตะกรันเตาหลอมเหล็ก และที่เตรียมจากซีเมนต์แกลบ

เนื่องจากซิลิกาออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าลอยลิกไนต์นั้น อยู่ในรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาดีกว่าตะกอนจากเตาหลอมเหล็กและเถ้าถ่าน

ในการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน ด้วยสารเคมีร่วมความร้อน Shi,C. และ Day, R.L.,1993 [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการกระตุ้นปฏิกิริยาของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาวและวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ โดยใช้สารเคมี 4 ชนิดกระตุ้นปฏิกิริยา คือ แคลเซียมคลอไรด์($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) และโซเดียมคลอไรด์(NaCl) โดยใช้ความเข้มข้นตั้งแต่ 0-8 % นอกจากนี้ได้ใช้การบ่มที่อุณหภูมิสูงถึง 50°C ร่วมด้วย ผลการศึกษาพบว่าการเติมสารเคมีประเภทต่าง สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับเพสต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะโซเดียมซัลเฟตซึ่งสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ดีทั้งในระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้าย ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 2-4 % โดยน้ำหนักวัสดุยึดประสาน นอกจากนี้ แคลเซียมคลอไรด์จะไม่มีผลสำคัญต่อกำลังอัดในช่วง 3 วัน ปริมาณที่เหมาะสมและคุ้มค่าคือ 4 % ส่วนแคลเซียมซัลเฟตมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่ 28 วัน โซเดียมคลอไรด์ แทบจะไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังอัด ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบสารเคมีในการกระตุ้นที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือ แคลเซียมคลอไรด์และโซเดียมซัลเฟต ที่ปริมาณการผสม 4 % ส่วนการใช้สารเคมี 2 ชนิดร่วมกันระหว่างแคลเซียมคลอไรด์และโซเดียม จะมียัตราการพัฒนากำลังอัดน้อยมากจนเกือบเท่ากับการใช้โซเดียมซัลเฟตในการกระตุ้นเพียงอย่างเดียว

หลังจากเมื่อทำการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก ก่อนที่จะลงแหล่งฝังกลบจึงต้องมีการรั่วไหลของกากตะกอนออกมาจากก้อนหล่อแข็งของเสีย โดยวิธีการทดสอบต่างๆ หลายวิธี เช่น TCLP, DLT เป็นต้น ซึ่งโดยมีนักวิจัย Asavapisit, S., Intarawong, S. และ Hamwajanawong, N., 2003 [18] ศึกษาพฤติกรรมการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียประเภทสังกะสี-โซดาไนท์ โดยใช้วิธีการทดสอบคือ TCLP, DLT และ การควบคุมค่า pH โดยค่า pH ที่ใช้คือ 4.0, 8.0 และ 11.0 ของสารชะละลาย วัสดุยึดประสานที่ใช้ในการหล่อแข็งคือ OPC และ OPC กับ 10 % ของ Pulverized Fuel Ash (PFA) และใช้ค่า W/S = 0.5 จากการศึกษาพบว่าจากวิธี TCLP Cr ถูกชะละลายออกมามากที่สุดแต่ไม่เกินค่ามาตรฐานของ US.EPA ส่วนในภาวะที่ใช้การทดสอบแบบ DLT Zn, Fe และ Cr จะถูกชะละลายใน 0.1 N ของกรดอะซิติกมากกว่าในฝนกรดสังเคราะห์และใน Deionized Water และในการควบคุม pH การชะละลายของโลหะหนักใน pH = 4 จะมีมากที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้นำเถ้าถ่านที่เป็นกากของเสียที่เหลือใช้ทางการเกษตรกรรม มาใช้ในการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักร่วมกับปูนขาว ในสถานะที่มีและไม่มีกระตุ้นด้วยสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน โดยทำการทดสอบคุณภาพของก้อนหล่อแข็งของเสียด้วยการ

ทดสอบกำลังรับแรงอัด ความสามารถในการกักเก็บโลหะหนัก ซึ่งถ้าสามารถนำเถ้ากลับมาใช้เป็นวัสดุอุดประสานแทนปูนซีเมนต์ได้ในการบำบัดของเสียอันตรายประเภทกากตะกอนโลหะหนักได้ จะสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียประเภทนี้และยังประหยัดพลังงานที่ต้องสูญเสียในการผลิตปูนซีเมนต์ได้อีกด้วย

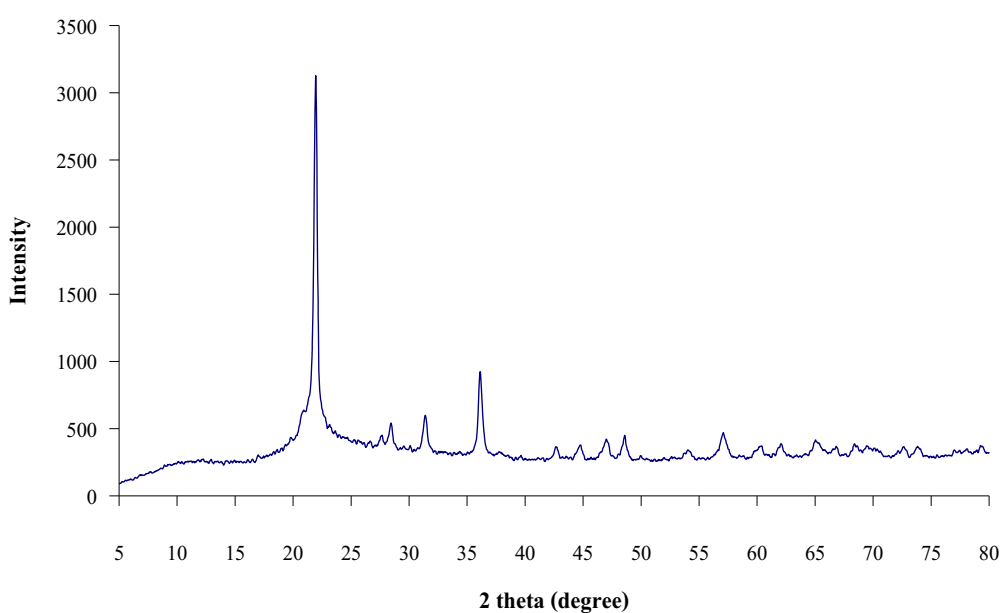
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ

3.1.1 การเตรียมเถ้าเกลบดำ

ก. นำเถ้าเกลบดำที่ได้จากโรงสีที่ใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้งข้าวเปลือกใน Boiler มาบดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine โดยใช้ลูกเหล็กจำนวน 12 ลูก ความเร็วรอบ 30 - 33 รอบ/นาที น้ำหนักลูกเหล็กรวม 2500 ± 10 กรัม นาน 5 ชั่วโมง ให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน ซึ่งได้จากการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยใช้การร่อนแบบเปียกให้มีเปอร์เซ็นต์คงค้างบนตะแกรงไม่เกิน 34 % ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 91

ข. นำเถ้าเกลบดำที่ผ่านการบดไปตรวจดูโครงสร้างผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าเกลบดำ ด้วย X-Ray Diffraction ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์โดย X-Ray Diffraction

โดยปกติกราฟของซิลิกอนไดออกไซด์มีจุดยอดสูงสุดปรากฏอยู่ที่ 24 degree ของ 2 theta แต่จากรูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์พบว่ากราฟมีจุดยอดสูงสุดอยู่ที่ 22 degree ของ 2 theta ซึ่งน่าจะเป็นผลึกของซิลิกอนไดออกไซด์ แต่อาจจะเกิดการปนเปื้อนของสารบางอย่างทำให้ degree ของ 2 theta เปลี่ยนไปเล็กน้อย สำหรับรูปแบบของกราฟซิลิกอนไดออกไซด์มีลักษณะที่เป็นยอดแหลมและมีฐานค่อนข้างกว้าง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในเถ้าแกลบดำ มีทั้งที่เป็นโครงสร้างแบบผลึกผสมกับโครงสร้างแบบอสัณฐาน

ค. นำเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดไปวิเคราะห์ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์โดยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

องค์ประกอบ	เถ้าแกลบดำ
Silicon Dioxide (SiO ₂) %	94.45
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃) %	<0.01
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃) %	0.14
Calcium Oxide (CaO) %	0.80
Magnesium Oxide (MgO) %	0.26
Sulfur Trioxide (SO ₃) %	0.04
Loss on Ignition (LOI) %	2.45

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าแกลบดำด้วยเครื่อง XRF พบว่า เถ้าแกลบดำมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์สูงสุดถึงร้อยละ 94.45 ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM C 618 - 91 ที่ระบุว่า วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน จะต้องมีความ ซิลิกอนไดออกไซด์, อลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ รวมกันมากกว่าร้อยละ 70

ง. นำเถ้าแกลบดำที่ผ่านการบดมาทำการทดสอบดัชนีกำลัง (Strength Activity Index) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 - 91 โดยนำเถ้าแกลบดำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ 20 % ในมอร์ต้า และทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ได้ค่ากำลังรับแรงอัดดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบดัชนีกำลัง

ตัวอย่างมอร์ต้า	อายุการบ่ม (วัน)	
	7	28
ซีเมนต์	215.4	606.8
ซีเมนต์+เถ้าแกลบดำ 20 %	161.6	579.0
เปรียบเทียบ (%)	75.0	95.4

ตามมาตรฐาน ASTM C 618 - 91 ระบุว่าวัสดุที่จัดว่าเป็นวัสดุปอซโซลาน เมื่อนำมาผสมมอร์ต้าโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20 จะต้องมียาคัดชนิกำลังไม่น้อยกว่า 75% มอร์ต้าปกติจากตารางที่ 7 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน โดยเฉลี่ยค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยจาก 5 ตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 161.6 และ 579.0 กก./ซม² ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 75 และ 95.4 ของกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าปกติ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้

3.1.2 การเตรียมสารกระตุ้นปฏิกิริยา

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$) โดยทำการปรับอัตราส่วนของค่า Alkali Modulus ($\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$) ให้ได้ 1.0, 2.0 และ 3.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากนั้นเติมสารละลายที่ผสมแล้วในของผสมระหว่างตัวยัดประสานและกากตะกอนโลหะหนัก ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 รายละเอียดการคำนวณเพื่อปรับอัตราส่วนของค่า Alkali Modulus แสดงในภาคผนวก ก

3.1.3 การเตรียมกากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียรวม ทำการตากแห้งกากตะกอนจนมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 และทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนด้วยวิธี Microwave Digestion โดยนำกากตะกอน 0.5 กรัม มาเติมกรดไนตริก (65 %) 5 มิลลิลิตร, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30%) 1 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (48 %) 1 มิลลิลิตร จากนั้นปิดฝานำตัวอย่างใส่เครื่อง Microwave Digestion นำสารละลายที่ได้มาปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ซึ่งความเข้มข้นของโลหะหนักในกากตะกอนแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความเข้มข้นของโลหะหนักในกาตะกอน (กรัม / กก. กาตะกอนแห้ง)

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (กรัม/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)	องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (กรัม/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)
สังกะสี	12.75	นิกเกิล	14.25
เหล็ก	354	โครเมียม	8.37
อาร์เซนิก	5.54	ตะกั่ว	3.43
แคดเมียม	0.69	ทองแดง	4.40

3.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.2.1 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของแต่ละอัตราส่วนผสมของก้อนหล่อแข็ง

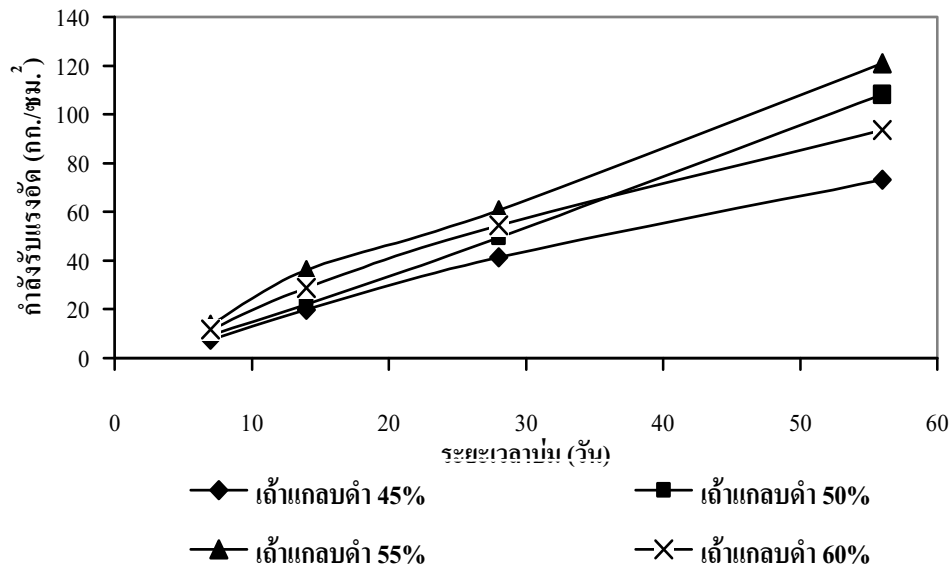
ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเตรียมก้อนหล่อแข็งจะถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งปริมาณน้ำที่ใช้ต้องเพียงพอกับความต้องการ ถ้าปริมาณน้ำมีมากจะทำให้ก้อนหล่อแข็งมีความแข็งแรงต่ำลง เนื่องจากน้ำที่ระเหยออกจากก้อนหล่อแข็งในช่วงการบ่มจะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในก้อนหล่อแข็ง ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมสามารถหาได้จากการประยุกต์วิธีทดสอบตาม ASTM C 187 – 86 โดยใช้ชุดเครื่องทดสอบ Vicat Apparatus หาความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมสำหรับแต่ละส่วนผสมแสดงในตารางที่ 9

3.2.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาว

การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาว ทำการศึกษาโดยแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวที่ 45:55, 50:50, 55:45 และ 60:40 โดยเตรียมก้อนตัวอย่างในแบบหล่อทรงกระบอกที่ทำจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร และประยุกต์วิธีการผสมจาก ASTM C 305 - 94 ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยค่ากำลังอัดที่ได้เฉลี่ยจากชุดตัวอย่างซึ่งมีชุดละ 3 ตัวอย่าง โดยใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 9 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับแต่ละส่วนผสม

เถ้าแกลบดำ : ปูนขาว	น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
45:55	57.5
50:50	58.0
55:45	58.5
60:40	59.0
เถ้าแกลบดำ : ปูนขาว (55 : 45)	น้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
ปริมาณภาคตะกอนโลหะหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
10 %	
30 %	
50 %	60.0



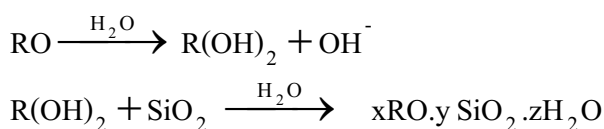
รูปที่ 6 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่เตรียมจากเถ้าแกลบดำและปูนขาว

รูปที่ 6 แสดงการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์ที่เตรียมจากเถ้าแกลบดำและปูนขาว พบว่าทุกอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ที่เตรียมจากเถ้าแกลบดำและปูนขาว มีการพัฒนากำลังรับแรงอัด

สูงขึ้น เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบดำและปูนขาวทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก และให้ CSH gel เป็นผลผลิตที่มีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพิ่มขึ้น

ปกติ Calcium Oxide (CaO) เมื่อละลายน้ำเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในเถ้าแกลบดำ โดยในสภาพที่เป็นด่างสูง (pH มากกว่า 12.7) ซิลิกอนไดออกไซด์สามารถละลายออกจากอนุภาคเถ้าแกลบดำ และอยู่ในรูปของ SiO_4^{4-} ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ที่แตกตัวออกมาจาก Ca(OH)_2 ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการยึดประสานคือ CSH gel เคลือบอยู่เป็นชั้นบางๆที่ผิวของอนุภาคเถ้าแกลบดำ ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงเกิดจากการแพร่กระจายของไอออนต่างๆผ่านชั้นที่หนาแน่นด้วยผลิตภัณฑ์ไฮเดรตที่เกิดจากวัสดุปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 [3]

สมการการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างปูนขาวกับซิลิกอนไดออกไซด์



โดยที่ R = แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca^{2+}) และ w, x, y, z เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับชนิดของ CSH

จากรูปที่ 6 พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อายุการบ่ม 28 วัน ของอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวที่ 45:55, 50:50, 55:45 และ 60:40 มีค่าซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 41.5, 49.6, 60.7 และ 54.6 กก./ชม.² ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวที่ 55:45 มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงสุดในทุกอายุการบ่ม เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณปูนขาวที่พอเพียงสำหรับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับเถ้าแกลบดำ ในขณะที่อัตราส่วนที่ 60:40 จะมีปริมาณปูนขาวไม่พอเพียงสำหรับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับเถ้าแกลบดำที่มีอยู่ในส่วนผสมทั้งหมด ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ CSH gel ได้น้อยกว่าซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด เช่นเดียวกันกับที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวที่ 45:55 และ 50:50 มีปริมาณปูนขาวมากเกินไปทำให้สัดส่วนของเถ้าแกลบดำในส่วนผสมลดลง ดังนั้นกำลังรับแรงอัดจึงมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำกับปูนขาวที่ 55:45 [19]

3.2.3 ผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวโดยใช้สารเคมี, ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน โดยนำอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าแกลบกับปูนขาวที่ 55:45 มาใช้ในการศึกษาทดลองงานวิจัย

3.2.3.1 การศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมี

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่เตรียมจากเถ้าแกลบดำและปูนขาวที่อัตราส่วน 55:45 ในสถานะที่มีการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีการแปรเปลี่ยนค่า Alkali Modulus ที่ 1.0, 2.0 และ 3.0 ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสาน แสดงดังรูปที่ 7 ก - ค

กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่มีอายุ 1 วันในสถานะที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ไม่สามารถนำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ เนื่องจากตัวอย่างมีความชื้นสูงและไม่สามารถถอดจากแบบหล่อได้ ในขณะที่ซีเมนต์ผสมที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.16, 3.64 และ 6.65 กก./ชม.² ตามลำดับ และเมื่อค่า Alkali Modulus เพิ่มขึ้นเป็น 2.0 และ 3.0 ก่อนตัวอย่างที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.75, 3.13, 5.41 กก./ชม.² และ 1.17, 2.42, 4.07 กก./ชม.² ตามลำดับ

สาเหตุที่โซเดียมซิลิเกตสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีในช่วงระยะ 1 วันแรกเนื่องมาจาก 2 สาเหตุหลัก คือสาเหตุแรกเนื่องจากโซเดียมซิลิเกตสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับปูนขาว (Ca(OH)_2) ได้โดยตรง ทำให้ได้ผลผลิตเป็น CSH gel ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น อีกสาเหตุหนึ่งคือโซเดียมซิลิเกตที่เติมลงไปสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ NaOH ทำให้ OH^- ในสารละลายเพิ่มขึ้น จึงสามารถกัดกร่อนพันธะ Si-O ได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น [20]

นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 1 วันสูงกว่าที่ค่า Alkali Modulus 2.0 และ 3.0 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Shi

และ Day [21] ที่รายงานว่า pH เริ่มต้นของสารละลายมีผลต่อกำลังรับแรงอัดในระยะแรก ดังนั้น การเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียวอาจทำให้ค่าความเป็นด่างของสารละลายไม่มากพอที่จะทำลาย พันธะ Si-O ได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่าสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0, 2.0 และ 3.0 มีค่า pH เท่ากับ 12.87, 11.75 และ 11.07 ตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่อายุ 3 วัน ในสถานะที่มีสารละลาย โซเดียมซิลิเกต Alkali Modulus 1.0 ในปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.46, 4.26, 7.72 และ 10.65 กก./ชม.² ตามลำดับ เมื่อค่า Alkali Modulus เพิ่มขึ้นเป็น 2.0 และ 3.0 ก่อน ตัวอย่างที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 4.35, 8.80, 12.03 กก./ชม.² และ 5.87, 10.23, 15.37 กก./ชม.² ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าที่อายุ การบ่ม 3 วัน ซีเมนต์ผสมที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ให้ค่า กำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ Alkali Modulus 2.0 และ 1.0 ตามลำดับ โดยในสถานะที่มีสารละลาย โซเดียมซิลิเกตที่ทุกค่า Alkali Modulus ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าในสถานะที่ไม่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต

สาเหตุที่ทำให้ซีเมนต์ผสมที่เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 ที่อายุ การบ่ม 3 วัน มีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเทียบกับที่เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 2.0 และ 3.0 เนื่องจากที่ Alkali Modulus 1.0 มีความเป็นด่างสูงจึงกัดกร่อน SiO₂ จากเถ้าแกลบดำและก่อตัวเป็น CSH gel อย่างรวดเร็ว และห่อหุ้มอนุภาคเถ้าแกลบดำเป็นชั้นหนา ขึ้น ทำให้ไอออนต่างๆในสารละลายแพร่ผ่านชั้นห่อหุ้มของ CSH gel เข้าไปทำปฏิกิริยาปอซโซลาน กับอนุภาคเถ้าแกลบดำได้ช้าลง [21]

กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อายุ 28 วัน ในสถานะที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 60.4 กก./ชม.² และในสถานะที่มีการกระตุ้น ปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 21.5, 28.3 และ 41.1 กก./ชม.² ตามลำดับ ก้อนหล่อแข็งที่มีการเติม สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 2.0 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 23.4, 31.5 และ 42.0 กก./ชม.² ตามลำดับ และก้อนหล่อแข็งที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 25.3, 34.5 และ 56.4 กก./ชม.² ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อ อายุบ่มมากขึ้นซีเมนต์ผสมที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยโซเดียมซิลิเกตมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่าง ที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทั้งนี้เนื่องจาก CSH gel ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกมีอยู่น้อยจึง

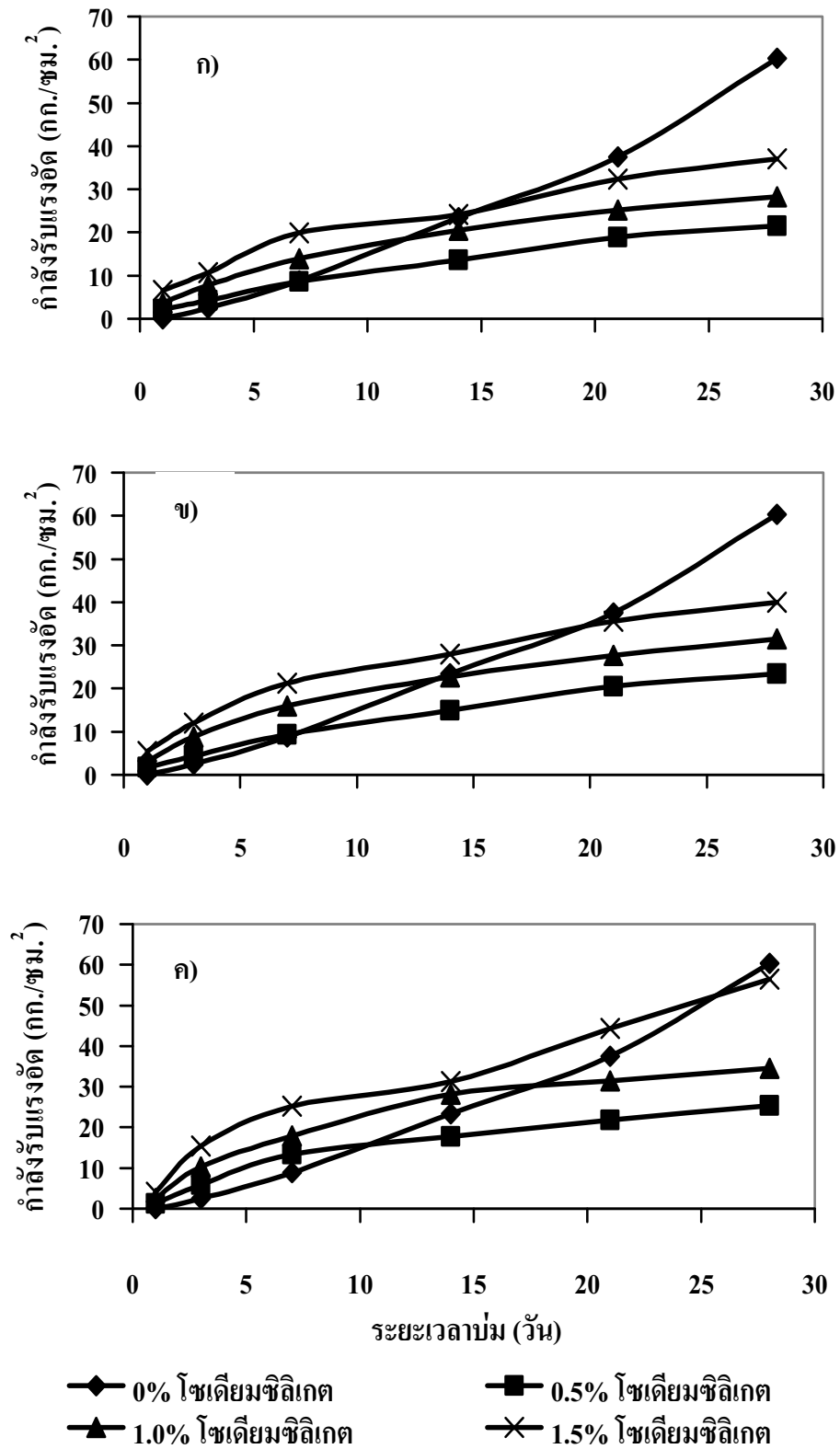
ห่อหุ้มอนุภาคเถ้าเกลบดำเป็นชั้นบางๆ ทำให้อิออนต่างๆในสารละลายสามารถแพร่ผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับเถ้าเกลบดำได้ง่ายกว่า

ในงานวิจัยขั้นต่อไปจะเลือกใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสานในการกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลานระหว่างเถ้าเกลบดำและปูนขาว ในการศึกษาความสามารถในการรองรับกาบตะกอนโลหะหนัก โดยมึเหตุผลในการเลือกดังนี้

เหตุผลที่ 1 ผลที่ได้จากการทดลอง (รูปที่ 3 ก-ค) พบว่าซีเมนต์ผสมที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วง 3 – 28 วันแรกสูงกว่าที่ Alkali Modulus 2.0 และ 1.0

เหตุผลที่ 2 ความยุ่งยากในขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus ที่ 2.0 และ 1.0 และเมื่อทิ้งไว้จะเกิดการตกตะกอน

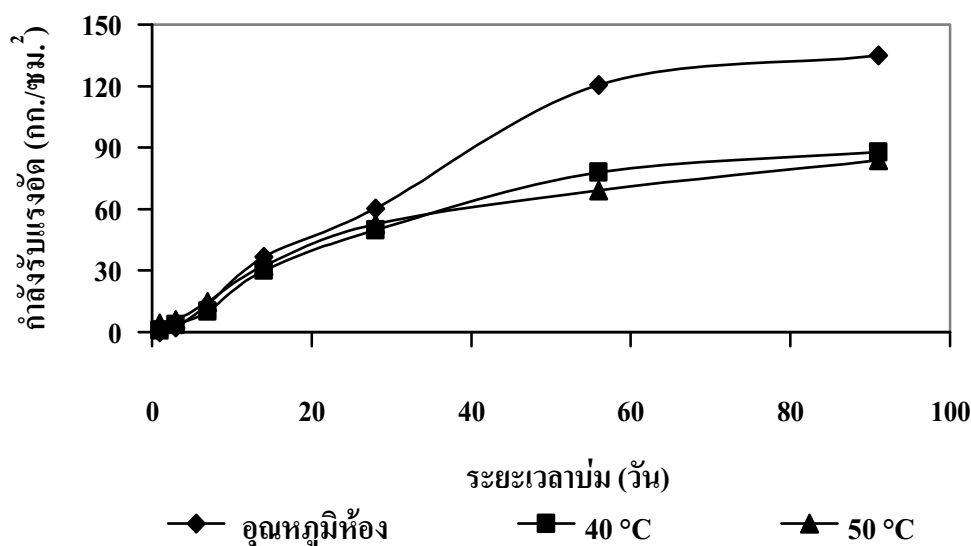
เหตุผลที่ 3 คือ โซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus ที่ 3.0 สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด และราคาถูกกว่าโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 2.0 สำหรับโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 นั้นไม่มีขายตามท้องตลาด ต้องเตรียมขึ้นเองซึ่งมีความยุ่งยากหากมีการนำไปใช้งานจริง



รูปที่ 7 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่อุณหภูมิห้องที่ ก) Alkali Modulus 1.0, ข) Alkali Modulus 2.0 และ ค) Alkali Modulus 3.0

3.2.3.2 การศึกษากำลัรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวในสถานะที่มี การกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อน

ในการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยความร้อน อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาวที่ใช้คือ 55:45 และบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 – 32°C) , 40°C และ 50°C ใน Water Bath 1 วัน หลังจากนั้นนำมาบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56 และ 91 วัน การพัฒนากำลัรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่บ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การพัฒนากำลัรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่บ่มที่อุณหภูมิต่างๆ

ซีเมนต์ผสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวที่อายุการบ่ม 1 วันที่อุณหภูมิห้องไม่สามารถทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ ในขณะที่ตัวอย่างที่ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 50°C มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.83 และ 4.11 ก.ก./ซม.² ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้บ่มสูงขึ้น สาเหตุมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเร่งให้ SiO_2 ละลายออกมาจากอนุภาคของเถ้าแกลบดำและทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ในสารละลายเกิดเป็น CSH gel เป็นผลทำให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นในช่วงแรก [22]

ที่อายุการบ่ม 3 - 28 วัน กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่บ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 50°C มีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงในช่วงแรกและลดลงจนมีค่าเกือบจะคงที่ สาเหตุมาจาก CSH

gel ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกห่อหุ้มอนุภาคของเถ้าแกลบดำ ทำให้ก้อนต่างๆในสารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับเถ้าแกลบดำได้ในอัตราที่ลดลง ส่วนก้อนหล่อแข็งที่บ่มที่อุณหภูมิห้องมีการพัฒนา กำลังอัดอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ทำให้ในช่วงอายุการบ่มที่มากกว่า 28 วัน กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงกว่าซีเมนต์ผสมที่บ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 50 °ซ

หลังจากอายุการบ่มที่ 28 วัน กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง 40 และ 50 °ซ มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 60.4, 49.7 และ 52.6 กก./ซม.² ตามลำดับ โดยซีเมนต์ผสมที่บ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 50 °ซ มีค่ากำลังอัดเท่ากับร้อยละ 82 และ 87 เมื่อเทียบกับสภาวะที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 91 วัน กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ มีค่าต่ำกว่าที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 40 °ซ เท่ากับร้อยละ 4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shi และ Day [23] ที่ทำการกระตุ้นปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและเถ้าลอยจากภูเขาไฟ โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิในช่วง 23 – 65 °ซ พบว่าอุณหภูมิในการบ่มที่สูงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น [22,24]

3.2.3.3 การศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาดังสารเคมีร่วมกับความร้อน

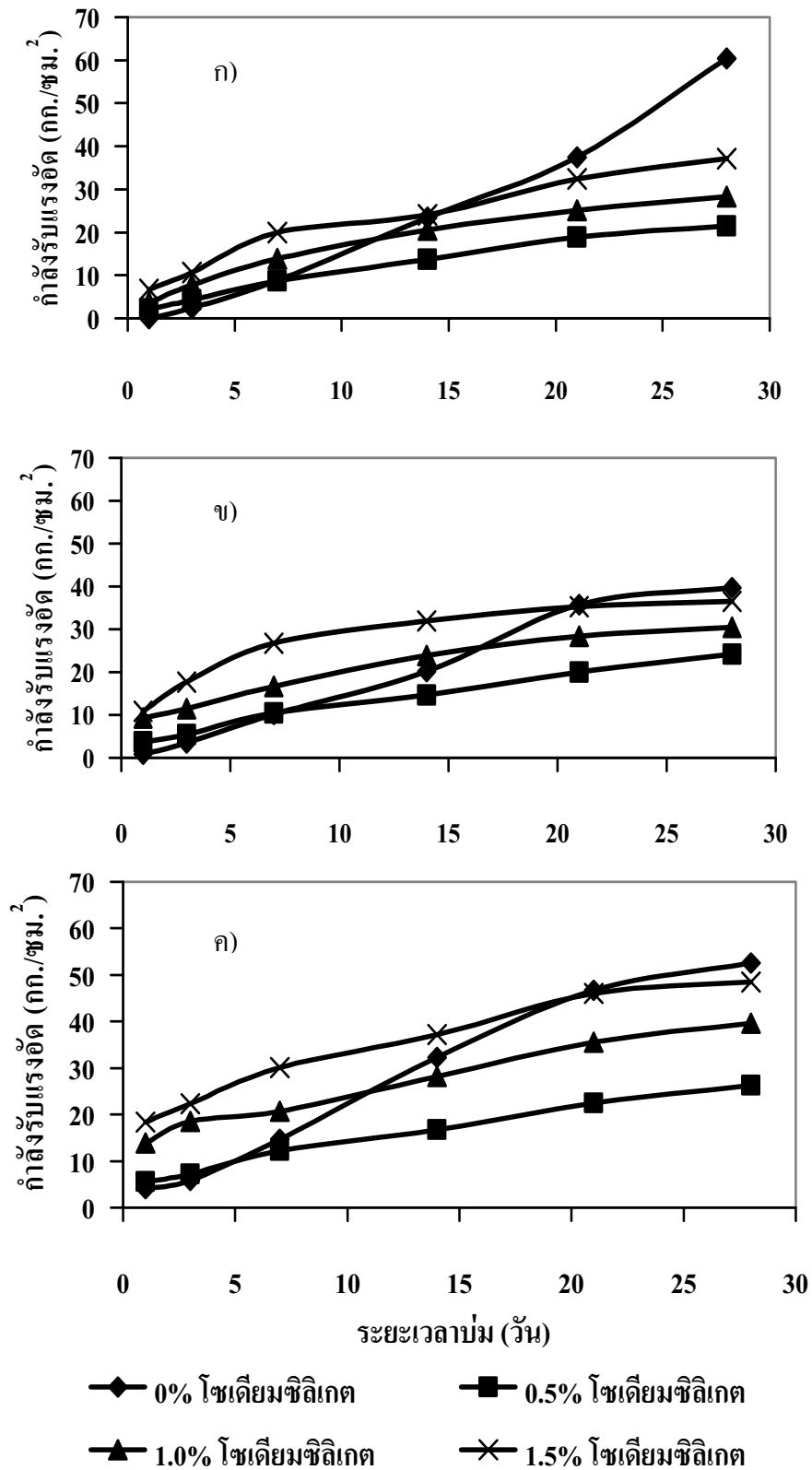
จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวที่อัตราส่วน 55:45 และกระตุ้นปฏิกิริยาดังสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยทำการแปรเปลี่ยนค่า Alkali Modulus ที่ 1.0, 2.0 และ 3.0 ในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสาน และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, 40 และ 50 °ซ รูปที่ 9-11 ก-ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนา กำลังอัดของซีเมนต์ผสมในสภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยสารเคมีร่วมกับความร้อนและระยะเวลาบ่ม

ที่อายุการบ่ม 1 วัน กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่กระตุ้นปฏิกิริยาดังสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 ในปริมาณร้อยละ 0.5 ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง, 40 และ 50 °ซ มีค่าเท่ากับ 2.16, 3.73 และ 5.57 กก./ซม.² ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น 21.5, 24.2 และ 26.3 กก./ซม.² ตามลำดับ หลังจากทำการบ่มเป็นเวลา 28 วัน โดยกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่มีอายุ 1 วันและทำการบ่มที่อุณหภูมิ 40 และ 50 °ซ สูงกว่าเมื่อทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องร้อยละ 173 และ 258 ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงเหลือร้อยละ 112 และ 122 ตามลำดับ หลังจากบ่มเป็นเวลา 28 วัน (รูปที่ 9 ก-ค)

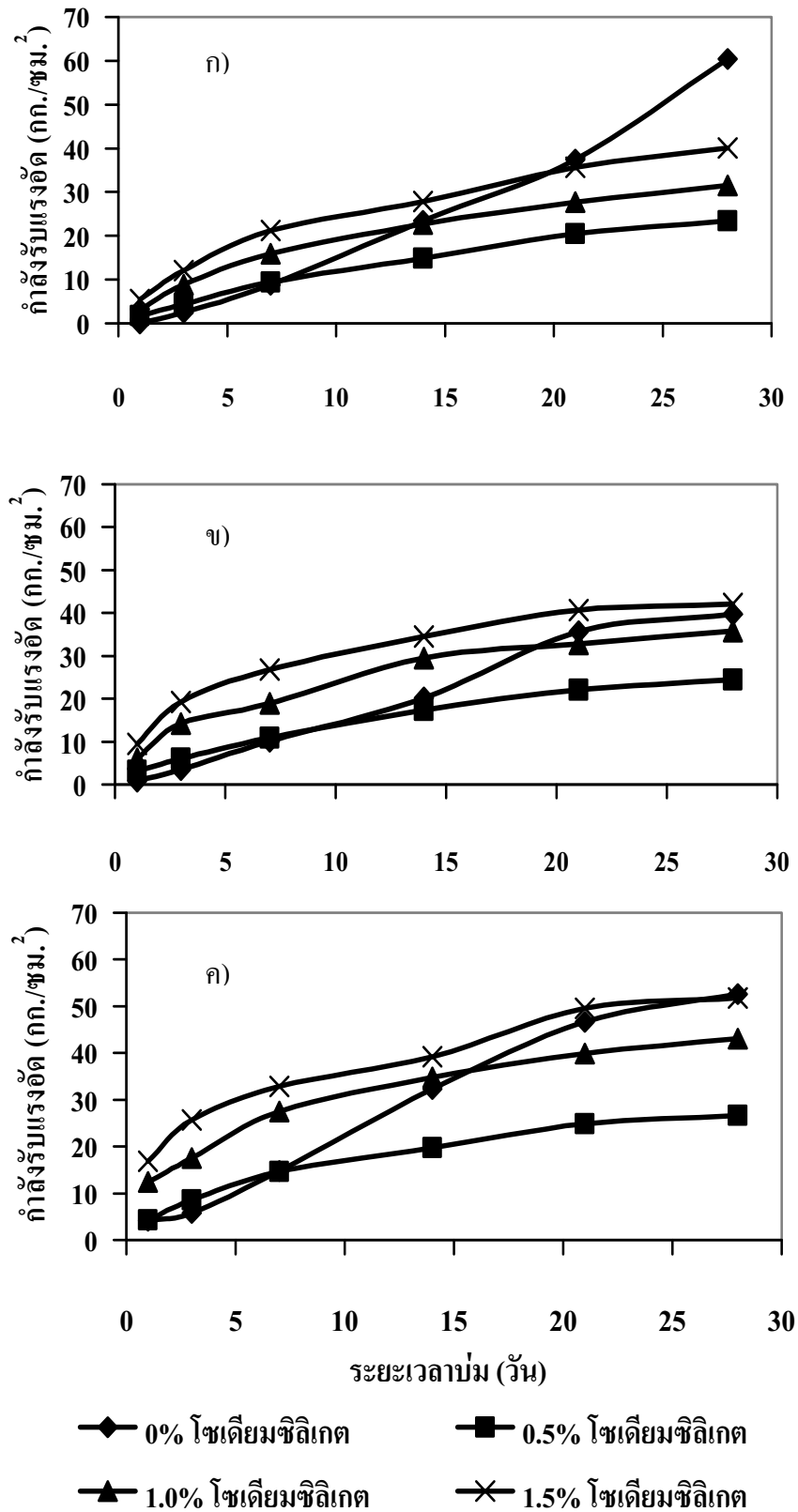
กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 ในปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 40 °ซ เป็นเวลา 1 วัน พบว่าให้ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.83, 3.73, 9.30 และ 10.89 กก./ซม.² ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น 20.2, 14.6, 23.9 และ 31.9 กก./ซม.² ตามลำดับ หลังจากบ่มเป็นเวลา 14 วัน และเพิ่มขึ้นอีกจนเท่ากับ 39.7, 24.2, 30.5 และ 36.2 กก./ซม.² ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 9 ข) จะเห็นว่าซีเมนต์ผสมที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาดังกล่าวร่วมกับความร้อน มีการพัฒนาการรับแรงอัดค่อนข้างมากในช่วง 7 วันแรกของการบ่ม และอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงจนเกือบจะมีค่าคงที่หลังจากนั้น

การพัฒนาการรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 ในปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ มีการเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้มคล้ายกันกับตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง และ 40 °ซ แต่มีอัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า (รูปที่ 9 ค)

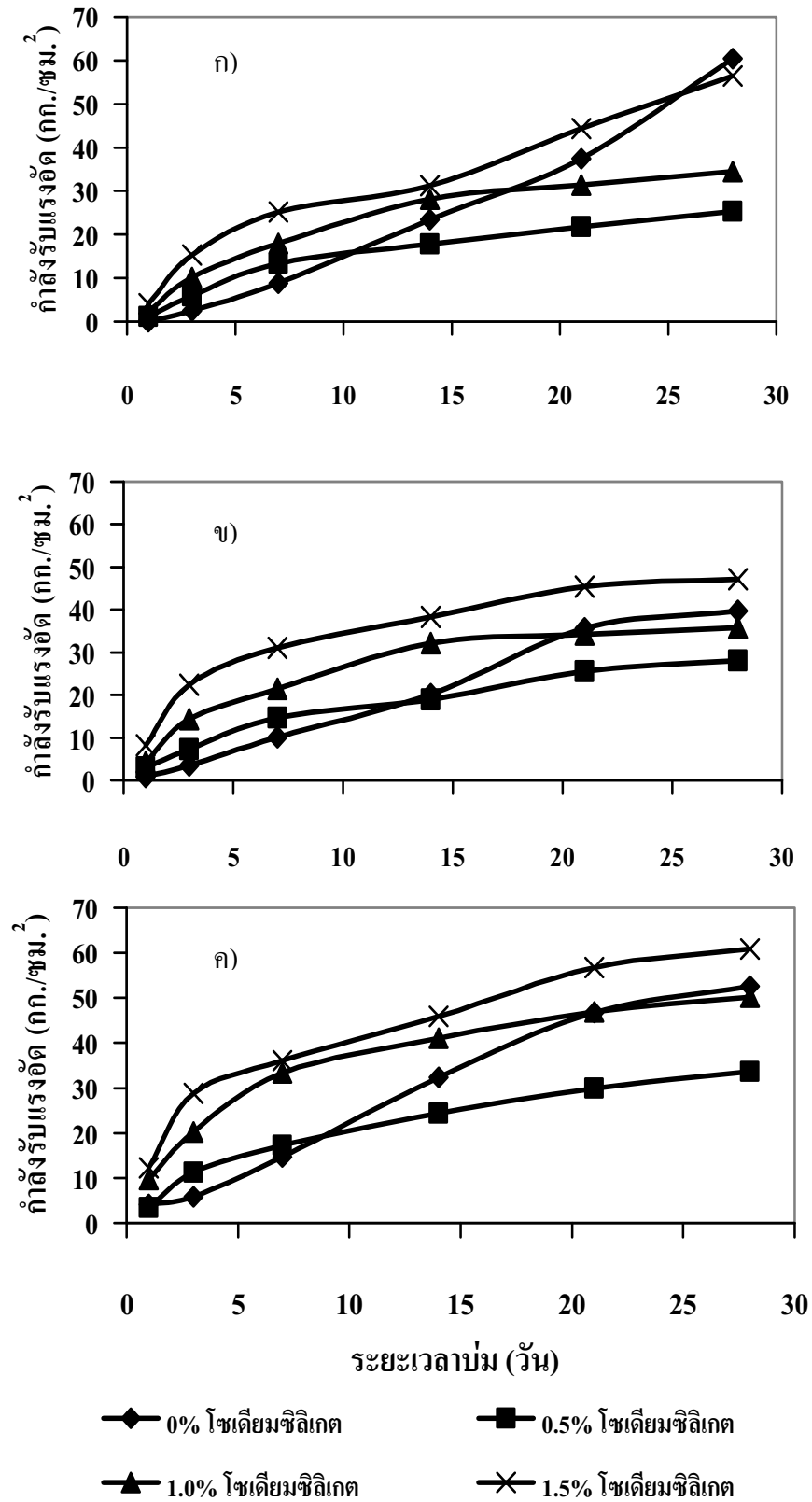
ซีเมนต์ผสมที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 2.0 และ 3.0 ในปริมาณต่าง ๆ กัน ให้ผลการพัฒนากำลังรับแรงอัดในลักษณะเดียวกันกับที่ Alkali Modulus 1.0 โดยซีเมนต์ผสมที่มีการเติมโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ Alkali Modulus 2.0 ในช่วงอายุการบ่ม 28 วัน นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมซิลิเกตและอุณหภูมิในการบ่มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 10 และ 11 ก-ค)



รูปที่ 9 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 1.0 และบ่มที่ ก) อุณหภูมิห้อง, ข) 40°C และ ค) 50°C



รูปที่ 10 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมคลอไรด์ที่ Alkali Modulus 2.0 และบ่มที่ ก) อุณหภูมิห้อง, ข) 40°C และ ค) 50°C



รูปที่ 11 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 และบ่มที่ ก) อุณหภูมิห้อง, ข) 40°C และ ค) 50°C

การที่ซีเมนต์ผสมที่มีการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตร่วมกับความร้อน มีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดในช่วงแรกสูงกว่าซีเมนต์ผสมที่มีการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต หรือ ความร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำให้สภาพความเป็นด่างของ สารละลายที่อยู่ภายในซีเมนต์ผสมสูงขึ้น ทำให้เกิดการชะละลาย SiO_2 ออกมาจากผิวของเถ้าแกลบ คามากขึ้น ในขณะที่การบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นการเร่งให้ SiO_2 ที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาค เถ้าแกลบดำเกิดการละลายออกมาได้มากขึ้น และก่อตัวเป็น CSH gel [22, 16]

3.2.4 ผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน

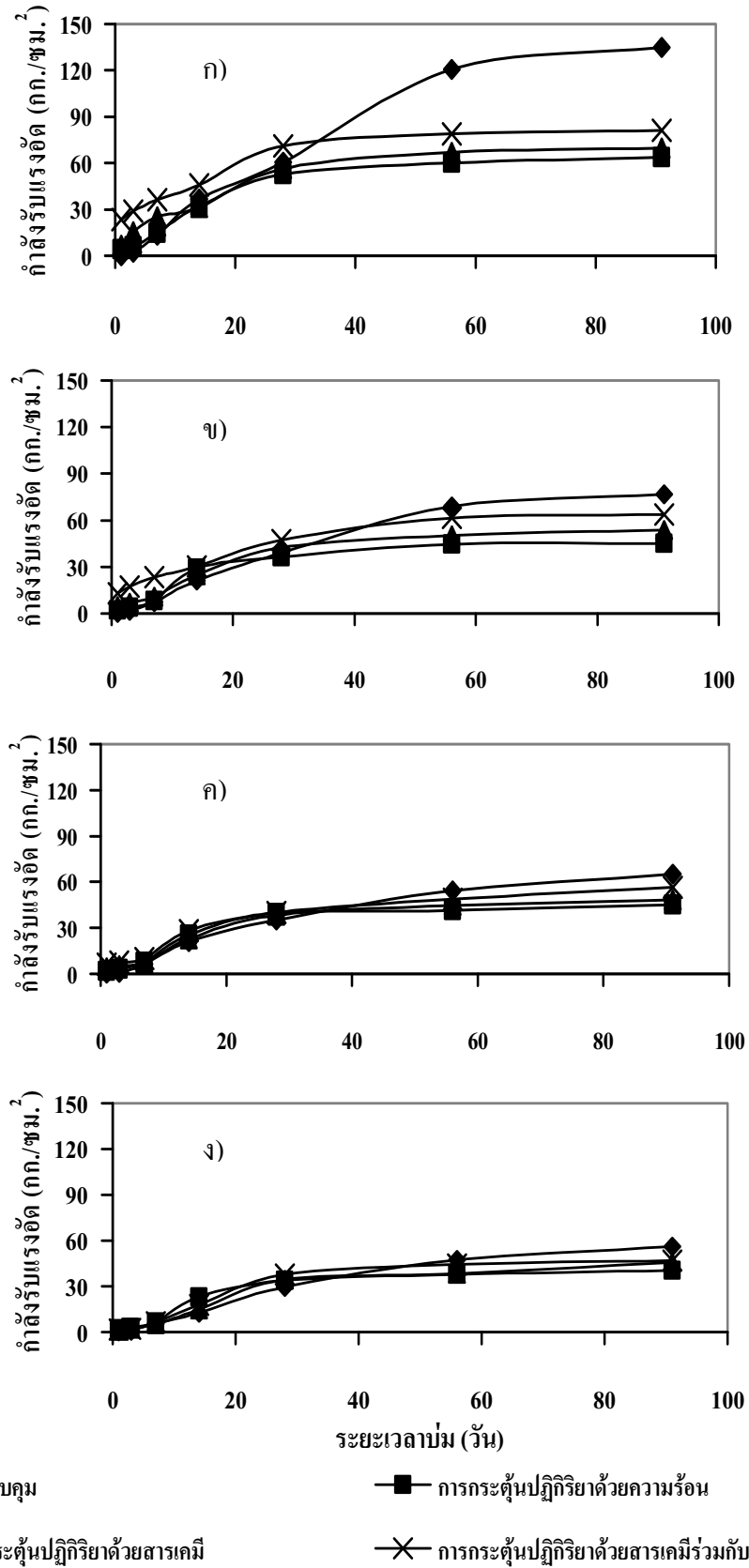
จากผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ในสถานะที่มีและไม่มี การกระตุ้นด้วยสารเคมีและความร้อน โดยพิจารณาจากการพัฒนา กำลังรับแรงอัดในช่วง 28 วัน ซึ่งสามารถเลือกสัดส่วนการผสมระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว และสถานะที่ใช้ในการกระตุ้น ปฏิกิริยาจากสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

อัตราส่วนของเถ้าแกลบดำ:ปูนขาวคือ 55:45

สถานะที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยา คือ

- สถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ใน ปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุประสาน
- สถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ 50 °ซ
- สถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมีร่วมกับความร้อนคือ เติมโซเดียม-ซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุประสาน และ บ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุการบ่มของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีกา ตะกอนโลหะหนักร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 ทั้งในสถานะที่มีและไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยาด้วย สารเคมีและความร้อน แสดงดังรูปที่ 12 ก-ง



รูปที่ 12 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ
ก) 0, ข) 10, ค) 30 และ ง) 50

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน ที่มีการเติมปริมาณกาตากตะกอนโลหะหนักในปริมาณร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 1 วัน ก้อนหล่อแข็งของเสียในสถานะที่ไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยานั้นไม่สามารถทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดได้ เนื่องจากก้อนหล่อแข็งของเสียมีความชื้นสูงมาก ไม่สามารถถอดออกจากแบบได้ (รูปที่ 12 ก – ง)

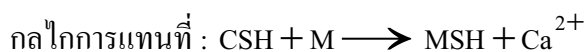
ที่อายุการบ่ม 3 วัน ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยา และเติมกาตากตะกอนโลหะหนักปริมาณร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.46, 1.52, 0.85 และ 0.66 กก./ซม.² ตามลำดับ ที่อายุการบ่ม 28 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 60.4, 38.9, 33.6 และ 27.7 กก./ซม.² ตามลำดับ เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยาพบว่า ทุกๆ อายุการบ่มกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียจะมีการพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ และกำลังอัดลดลงตามปริมาณกาตากตะกอนโลหะหนักที่ผสมเพิ่มในก้อนหล่อแข็งของเสีย

การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมี, ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน ที่มีการเติมปริมาณกาตากตะกอนโลหะหนักในปริมาณร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดคล้ายกับก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยา คือ กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อปริมาณกาตากตะกอนโลหะหนักเพิ่มขึ้น และก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมีร่วมกับความร้อนจะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด ทุกปริมาณกาตากตะกอนโลหะหนักที่ผสมเพิ่ม ในช่วงอายุการบ่ม 28 วันแรก หลังจากนั้นก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยาจะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด

สาเหตุที่ทำให้ก้อนหล่อแข็งของเสียมีกำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อปริมาณกาตากตะกอนโลหะหนักมากขึ้น เนื่องจากโลหะหนักจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวและเถ้าแกลบดำ โดยกลไกที่ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวโดยโลหะหนัก มี 2 รูปแบบดังนี้

รูปแบบที่ 1 คือ โลหะหนักที่อยู่ในกาตากตะกอนที่เติมลงในก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีประจุบวก (M^+) จะรวมตัวกับ OH^- ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับน้ำ เกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งตกตะกอนอยู่บนผิวหน้าของเถ้าแกลบดำทำให้ความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ ดังนั้นไอออนต่างๆในสารละลายจึงไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเถ้าแกลบดำได้ ทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดต่ำลง[26]

รูปแบบที่ 2 คือ โดยปกติโลหะหนักนั้นเป็นสารแอมโฟเทอริก ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำในช่วง pH แคบๆ (pH 9 – 11) เกิดการละลายกลับออกมาบางส่วน เนื่องจากสภาวะภายในก้อนหล่อแข็งของเสียมีความเป็นด่างสูง โลหะหนักซึ่งมีประจุบวก (M^+) จะสามารถเข้าไปแทนที่ Ca^{2+} ใน CSH gel ดังสมการ [2]



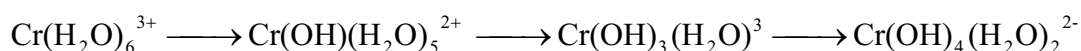
M = ไอออนของโลหะหนักประเภทต่างๆ

อีกสาเหตุหนึ่งอาจจะเกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนโลหะหนักทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานมีค่าลดลง ทำให้สารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงตามไปด้วย

เมื่อทำการพิจารณากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียทุกอายุการบ่ม ทั้งสภาวะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่า เมื่อปริมาณกากตะกอนโลหะหนักที่ผสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งสาเหตุดังกล่าวมาจากองค์ประกอบของกากตะกอนโลหะหนักที่มีส่วนผสมของเหล็ก, โครเมียม, สังกะสี และตะกั่ว อยู่ในปริมาณค่อนข้างมาก

เหล็กเป็นองค์ประกอบหลักของกากตะกอนโลหะหนัก เนื่องมาจากในกระบวนการบำบัดน้ำเสียได้ใช้การตกตะกอนโลหะหนักทางเคมีด้วยเฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) และเฟอริกซัลเฟต ($FeSO_4$) จึงทำให้มีเหล็กปริมาณมาก จากการศึกษาของ Asavapisit [27,28] ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเหล็กไฮดรอกไซด์ในปริมาณร้อยละ 10 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากตะกอนโรงชุบ พบว่า เหล็กไม่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของวัสดุยึดประสาน แต่จะทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียลดลงเพียงเล็กน้อย

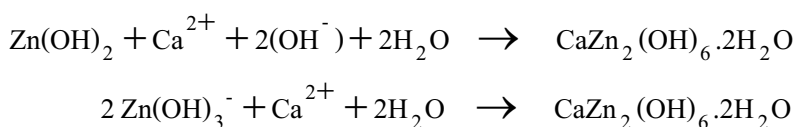
สำหรับโครเมียม จากการศึกษาของ Rha [29] พบว่าโครเมียมจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก แต่ในระยะหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เนื่องจากโครเมียมจะก่อตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับน้ำและทำให้ OH^- ถูกดึงออกจากรีแอคชันมากขึ้น กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโครเมียมไฮดรอกไซด์แสดงดังสมการ



เมื่อ OH^- ในน้ำถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาดังสมการข้างต้น ทำให้สภาพความเป็นด่างของสารละลายภายในก้อนหล่อแข็งของเสียลดลง ส่งผลให้การทำลายพันธะ Si-O เกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงเกิดได้ช้าลง กำลังรับแรงอัดจึงต่ำลง

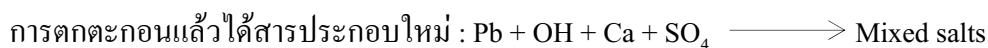
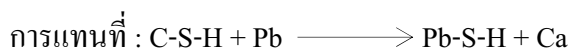
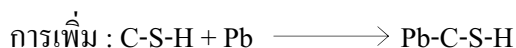
นอกจากนี้กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ ทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียลดลงเนื่องมาจาก 2 สาเหตุ คือ

สาเหตุที่ 1 จากการศึกษาวิจัยของ Li [30] สังกะสีไฮดรอกไซด์เป็นสารแอมโฟเทอริกมีความสามารถในการละลายต่ำในช่วงพีเอชแคบ ๆ (พีเอช 8-10) ดังนั้นพีเอชที่สูงขึ้นจึงทำให้เกิดการละลายกลับออกมาของสังกะสีไฮดรอกไซด์ แล้วต่อมาเกิดการตกตะกอนกลับที่ผิวหน้าของอนุภาคเถ้าแกลบดำในรูปของ Zn(OH)_2 และ Zn(OH)_3^- และทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ได้ Calcium Zinc Hydrate ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เคลือบอยู่ที่ผิวหน้าของเถ้าแกลบดำ ซึ่งสารประกอบนี้มีความสามารถในการละลายต่ำมากจึงขัดขวางการซึมผ่านของไอออนต่างๆในสารละลาย ทำให้ไอออนต่างๆในสารละลายที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคเถ้าแกลบดำลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย โดยกลไกการเกิดสารประกอบ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีดังนี้



สาเหตุที่ 2 จากการศึกษาของ Qain [31] พบว่าสังกะสีจะมีผลต่อสารกระตุ้นโซเดียมซิลิเกต เนื่องจากเกลือของสังกะสีเมื่อสัมผัสกับโซเดียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากันทันที แล้วก่อตัวในรูป Insoluble zinc silicate gelatin ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของ CSH

ตะกั่วก็เป็นโลหะหนักอีกตัวหนึ่งที่สามารถเข้าขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาปอสโซลานระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาวได้ เนื่องจากตะกั่วเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นด่างสูงของสารละลายจะละลายกลับออกมาและตกตะกอนในรูปเกลือของตะกั่ว (Pb Salt) เคลือบเป็นฟิล์มอยู่ที่ผิวของอนุภาคเถ้าแกลบดำโดยที่ Pb Salt มีค่าการละลายต่ำมาก ซึ่งจะขัดขวางไอออนต่างๆในสารละลายที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคเถ้าแกลบดำ [29] ซึ่งมีกลไกดังนี้



เห็นได้ว่า OH^- และ Ca^{2+} ถูกดึงออกจากระบบ ทำให้รบกวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งก่อให้เกิดปริมาณของ CSH ลดลง [32]

3.2.5 ผลการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสีย

การทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียใช้วิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) โดยทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน ตารางที่ 10 แสดงผลการทดสอบความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายด้วยวิธี TCLP ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการแปรเปลี่ยนปริมาณกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการกระตุ้นด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสาน ก้อนหล่อแข็งของเสียที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ และก้อนหล่อแข็งของเสียที่กระตุ้นปฏิกิริยาดด้วยโซเดียมซิลิเกตร่วมกับการบ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ

ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณกากตะกอนในก้อนหล่อแข็งของเสียเพิ่มขึ้น โดยสังเกตเห็นว่าความเข้มข้นของเหล็กในน้ำสกัดมีค่าต่ำมาก ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.24 มก./ล. เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของเหล็กเริ่มต้นที่มีอยู่ในกากตะกอนโลหะหนักซึ่งมีอยู่ถึง 354,190 มก./กก.กากตะกอนแห้ง พบว่าก้อนหล่อแข็งของเสียสามารถตรึงเหล็กไว้ได้ดีมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากค่า pH ที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของ Fe^{+3} ตั้งแต่ 7.5 ขึ้นไป ในขณะที่ค่า pH ของน้ำสกัดมีค่าอยู่ในช่วง 12.2 – 12.3 จึงทำให้เหล็กส่วนใหญ่ไม่ละลายกลับออกมา

สังกะสีเป็นโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนในปริมาณที่มากรองลงมาจากเหล็กและนิเกิล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12750 มก./กก. ผลการทดสอบพบว่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดจากทุกตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.03 – 0.75 มก./ล. ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้เท่ากับ 5 มก./ล. ปกติสังกะสีตกตะกอนได้ดีที่ pH ประมาณ 9 แต่ pH ของน้ำสกัดมีค่าสูงกว่า 9 จึงเป็นสาเหตุให้สังกะสีเกิดการละลายกลับออกมาอยู่ในรูป $\text{Zn}(\text{OH})_3^-$ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้ Calcium Zinc Hydrate ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายต่ำ จึงพบสังกะสีในน้ำสกัดในระดับความเข้มข้นที่ไม่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน อีกสาเหตุหนึ่งเนื่องจากเกลือของสังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตกลายเป็น Insoluble Zinc Silicate Gelatin ซึ่งมีค่าการละลายที่ต่ำ [30,31]

ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำสกัดที่สัมผัสกับก้อนหล่อแข็งของเสียทุกตัวอย่างมีค่าตั้งแต่ 0.2 – 0.36 มก./ล. ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดคือ 5.0 มก./ล. Bishop [2] รายงานว่า Cr^{+3} ส่วนใหญ่ตะกอนอยู่ใน Silicate Matrix ทำให้สามารถดึงโครเมียมไว้ได้ประมาณร้อยละ 85 ของปริมาณโครเมียมทั้งหมด ปริมาณโครเมียมอีกร้อยละ 15 ที่เหลืออาจหลุดออกมาได้เนื่องจาก ค่า pH ของสารละลายที่สกัดมีค่า pH ประมาณ 12 ซึ่งสูงกว่าค่า pH ที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนของโครเมียม ซึ่งมีค่าประมาณ 7 – 8 ทำให้เกิดการรั่วไหลของโครเมียมออกมาเพียงเล็กน้อย

ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำสกัดจากก้อนหล่อแข็งของเสียมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานซึ่งกำหนดไว้ที่ 1.0 มก./ล. ยกเว้นก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีปริมาณกากตะกอนร้อยละ 50 ในสถานะที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา (ชุดควบคุม) มีความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำสกัดเท่ากับ 1.39 มก./ล.

ค่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดจากก้อนหล่อแข็งของเสียทั้งในสถานะที่มีและไม่มี การกระตุ้นปฏิกิริยา มีค่าอยู่ในช่วง 0.4 – 1.4 มก./ล. ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ในขณะที่ความเข้มข้นของทองแดงและนิเกิลในน้ำสกัดจากทุกตัวอย่างมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 0.3 มก./ล. และ 0.2 – 0.49 มก./ล. ตามลำดับ

ตารางที่ 10 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดด้วยวิธี TCLP

ชุดตัวอย่าง	ภาคตะกอน โลหะหนัก (ร้อยละ)	ความเข้มข้น (มก./ล)							pH
		Pb	Cr	Cd	Zn	Fe	Cu	Ni	
		5	5	1	5	-	-	-	
ชุดควบคุม	0	0.65	0.29	0.38	0.53	0.36	0.20	0.26	12.3
	10	0.67	0.31	0.47	0.56	0.91	0.21	0.28	12.3
	30	0.69	0.31	0.78	0.60	1.25	0.24	0.28	12.2
	50	0.90	0.36	1.39	0.63	3.24	0.25	0.29	12.2
สถานะที่กระตุ้นปฏิกิริยา ด้วยสารเคมี	0	0.43	0.33	0.33	0.03	ND	ND	0.27	12.3
	10	0.69	0.33	0.33	0.08	ND	0.02	0.29	12.3
	30	0.93	0.34	0.34	0.37	0.99	0.20	0.37	12.2
	50	1.37	0.34	0.34	0.75	1.09	0.30	0.49	12.2
สถานะที่กระตุ้นปฏิกิริยา ด้วยความร้อน	0	0.63	ND	0.28	0.50	ND	0.19	0.24	12.3
	10	0.63	ND	0.38	0.52	ND	0.18	0.26	12.3
	30	0.64	0.20	0.68	0.57	1.22	0.19	0.27	12.2
	50	0.78	0.25	0.83	0.57	2.39	0.21	0.28	12.2
สถานะที่กระตุ้นปฏิกิริยา ด้วยสารเคมีร่วมกับ ความร้อน	0	0.62	0.32	0.04	0.03	ND	0.01	0.20	12.3
	10	0.63	0.34	0.14	0.07	ND	0.02	0.25	12.3
	30	0.90	0.35	0.31	0.33	0.10	0.08	0.30	12.2
	50	1.15	0.35	0.50	0.70	0.37	0.22	0.41	12.2

- : ไม่มีมาตรฐานควบคุม

ND : ความเข้มข้นของโลหะหนักเท่ากับหรือต่ำกว่าน้ำกลั่นที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง AAS

4. สรุปผลการศึกษา

4.1 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าแกลบดำ ปูนขาว และสภาวะที่กระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลาน

ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าแกลบดำและปูนขาว พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ : ปูนขาวที่ 55:45 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ดังนั้น จึงเลือกใช้อัตราส่วนนี้มาทำการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมี, ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน ดังนี้

- สภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยสารเคมี เลือกโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน
- สภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยความร้อน เลือกสภาวะที่บ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นนำมาบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง
- สภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยสารเคมีร่วมกับความร้อน เลือกโซเดียมซิลิเกตที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน และบ่มที่อุณหภูมิ 50 °ซ

4.2 ความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสีย

ก้อนหล่อแข็งของเสียในสภาวะที่มีและไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมี ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อน สามารถรองรับกากตะกอนโลหะหนักได้สูงถึงร้อยละ 50 โดยที่ กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการฝังกลบซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 3.5 กก./ซม.² ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาจะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุ 7 วันแรกในอัตราที่ต่ำ แต่เมื่อทำการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารเคมี, ความร้อน และสารเคมีร่วมกับความร้อนทำให้การพัฒนา กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ทำให้สามารถนำมาลงในแหล่งฝังกลบได้สะดวกและรวดเร็ว

4.3 ผลการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสีย

จากการทดสอบการรั่วไหลด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) พบว่าความเข้มข้นของตะกั่ว โครเมียม สังกะสี แคดเมียม เหล็ก ทองแดง และนิเกิล ของก้อนหล่อแข็งของเสียมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ยกเว้นความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะของ

ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา ที่ผสมกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสานจะมีค่าสูงเกินมาตรฐาน

5. ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักชนิดต่างๆกับวัสดุยึดประสาน เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ที่สามารถนำไปพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักโดยการทำเป็นก้อนแข็ง
2. ควรหาวิธีการที่จะลดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักชนิดต่างๆกับวัสดุยึดประสาน เพื่อให้ก้อนหล่อแข็งของเสียมีความสามารถในการเก็บกักโลหะหนักได้ดีขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการปรับองค์ประกอบทางเคมี หรือปรับวิธีการผสม
3. ควรจะมีการศึกษาถึงความทนทานในระยะยาวของก้อนหล่อแข็งของเสียต่อการกัดกร่อนโดยสารละลายกรด
4. ในการเตรียมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ควรให้พอดีกับปริมาณที่ต้องการใช้ในแต่ละครั้ง เนื่องจากหากเตรียมทิ้งไว้นานเกินไป โซเดียมซัลไฟด์จะตกผลึกซึ่งมีผลต่อความเข้มข้นของโซเดียมซัลไฟด์

5. เอกสารอ้างอิง

1. สุวิมล อัสวพิศิษฐ, 2546, “เอกสารประกอบการสอนวิชา Hazardous Waste” คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. Conner, J.R.,1990 ,**Chemical Fixtation and Solidification of Hazardous Waste**, New York, Van Nostrand Reinhold, pp.638-651
3. สมพงษ์ ภาวกรพันธ์, 2543, การปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยและทรายโดยการผสมปูนขาว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 13-22
4. นราธิป จันทร์ทอง, สมิต ส่งพิริยะกิจ, เสรี เกียรติยุทธชาติ, อวิรุทธิ์ ทัยทิมแท้, 2533, การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของซีเมนต์เถ้าแกลบเพื่อใช้ในการทำคอนกรีต, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 7-11
5. กรมส่งเสริมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, <http://www.oae.go.th> [15 ธันวาคม 2545]
6. ทศพล ตุงคนากร, 2546, การหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์โดยการกระตุ้นวัสดุยึดประสานประเภทปูนขาวและซีเมนต์เถ้าแกลบด้วยสารเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
7. นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล, 2545, รายงานสัมมนา : กระบวนการกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลาน, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-40
8. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, วชิรพล จิตะสัจจา และ ปวีณา จริยจิตพิงศ์, 2542, “คุณสมบัติทางกลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ”, วารสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา, ครั้งที่ 5 , เล่มที่ 1, หน้า MAT 23 - MAT 28
9. Sidney, M., Francis, J.Y., David, D., 2003, **Concrete**, 2nd ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, pp. 306.
10. ไมตรี สุทธจินต์, 2531, **สารพิษของเรา**, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 63-65
11. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546, **ของเสียอันตราย**, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ, หน้า 535
12. บุรฉัตร ฉัตรระวี และ พีรชล สุภัททธรรม , 2538, “คุณสมบัติทางกลและความทนทานของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ,” วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปีที่ 5 , ฉบับที่ 4 , หน้า 36-42.

13. บุตรฉัตร ฉัตรระวี และ พิชัย นิमितยงสกุล , 2537, “การผลิตเถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาและประยุกต์ใช้ในบล็อกซีเมนต์ผสมดินแบบอัดแน่น,” วารสารสายเครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, เล่มที่ 4 , ฉบับที่ 2 , หน้า 119-137.
14. Cook, D.J., **Rice Husk Ash**, Cement replacement materials, pp.170-195.
15. Shi,C. and Day,R.L.,1993, “Chemical activation of blended cement made with lime and natural pozzolans,” **Cement and Concrete Research**, Vol.23, No.6, pp.1389-1396.
16. Asavapisit, S., and Chotklang, D., 2004, “Solidification of Electroplating Sludge using Alkali-Activated Pulverized Fuel Ash as cementitious binder”, **Cement and Concrete Research**, vol.34, pp. 349-353.
17. Shi, C., and Day, R.L., 1993, “Acceleration of Strength Gain of Lime– Pozzolan Cements by Thermal Activation”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 23, pp. 824-832.
18. Asavapisit, S., Intarawong, S. and Harnwajanawong, N., 2003, “Leaching Behavior of Heavy Metal from the Solidified Plating Sludge under Various Leaching Condition” , Thammasat Int. J. Sc. Tech., Vol. 8, No. 1, pp. 1-12
19. จิตตินิ เจริญจิตต์, 2546, การหล่อแข็งกากตะกอนหุบโลหะโดยการกระตุ้นวัสดุยึดประสานประเภทปูนขาวและเถ้าแกลบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 49
20. Fan,Y.,Yin S., Wen, Z. and Zhong J., 1999, “Activation of Fly Ash and its Effects on cement properties”, **Cement and Concrete Research**, Vol.29, pp.467-472..
21. Shi, C, and Day, R.L., 1995, “A chemical activation of lime-slag blend, Proceedings Fifty International Conference Milwaukee”, Wisconsin, USA, SP 153-61, pp. 1168-1177.
22. Shi, C. and Day, R.L., 2000, “Pozzolanic Reaction in The Presence of Chemical Activators Part II. Reaction Product and Mechanism”, **Cement and Concrete Research**, vol.30, pp. 607-613.
23. Shi C., Day R.L., 2001, “Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 31, pp. 813-818.
24. Li, X.D., Zhang, Y.M., Poon, C.S. and Lo, I.M.C., 2001, “Study of zinc in cementitious material stabilization /solidified wastes by sequential chemical extraction and microstructural analysis”, **Chemical Speciation and Bioavailability**, Vol.13, No.1, pp.1-7.
25. ดวงฤดี โชติกลาง, 2543, การตรึงโลหะหนักโดยการกระตุ้นวัสดุยึดประสานประเภทต่างและปอชโซลานด้วยสารเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 52.

26. Asavapisit S. , Fowler G. and Cheeseman C.R., 1997, “Solution chemistry during cement hydration in the presence of metal hydroxide wastes”, **Cement and Concrete Research** , Vol. 27, pp. 1249-1260
27. Asavapisit S., Naksrichum S. and Harnwajanawong N., 2005, “Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, pp. 1042-1049
28. Asavapisit S. and Ruengrit N., 2005, “The role of RHA-blended cement in stabilizing metal-containing wastes”, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 27, pp. 782-787
29. Rha, C.Y., Kang, K.K. and Kim, C.E., 2000, “Investigate of the stability of hardened slag paste for the stabilization/solidification of waste containing heavy metal ions”, **Journal of Hazardous Materials**, Vol.73, pp. 255-267
30. Li, X.D., Zhang, Y.M., Poon, C.S. and Lo, I.M.C., 2001, “Study of zinc in cementitious material stabilization /solidified wastes by sequential chemical extraction and microstructural analysis”, **Chemical Speciation and Bioavailability**, Vol. 13, No. 1, pp. 1-7.
31. Qian, G.R. , Sun, D.D. and Tay, J.W., 2003, “Characterization of Mercury- and Zinc-doped Alkali-activated Slag Matrix Part II. Zinc”, **Cement and Concrete Research**, vol.33, pp. 1257-1262.
32. Palomo, A. and Palacios, M., 2003, “Alkali-activated Cementitious Materials:Alternative Matrices for The Immobilization of Hazardous Wastes Part II. Stabilization of Chromium and Lead”, **Cement and Concrete Research**, vol.33, pp.289-295.

ภาคผนวก ก.

การเตรียมสารเคมีและวิธีการทดลอง

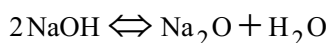
1. ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมโซเดียมซิลิเกต

เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มี Alkaline Modulus 1.0

จากสารละลายที่ได้มามีปริมาณ $\text{Na}_2\text{O} = 12.2865 \%$, $\text{SiO}_2 = 27.3945 \%$

Na_2SiO_3 100 g จะมี $\text{Na}_2\text{O} = 12.29$ g, $\text{SiO}_2 = 27.39$ g และ $\text{H}_2\text{O}_{(1)} = 60.32$ g

$$\text{ต้องเติม } \text{Na}_2\text{O} = 27.39 - 12.29 = 15.10 \text{ g} = \frac{15.10}{62} = 0.2435 \text{ mole}$$



$$\text{เติม NaOH} = 2 \times 0.2435 = 0.487 \text{ mole} = 0.4871 \times 40 = 19.48 \text{ g}$$

$$\text{เติม NaOH} = 19.48 \text{ g} / \text{Na}_2\text{SiO}_3 \text{ 100 g}$$

หาปริมาณ % Na_2O และ % SiO_2

น้ำหนัก $\text{Na}_2\text{O} = 12.29\text{g}$

$$\text{SiO}_2 = 27.39 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O}_{(1)} = 60.32 \text{ g}$$

$$\text{H}_2\text{O}_{(2)} = 0.2435 \times 18 = 4.383 \text{ g}$$

รวมน้ำหนักทั้งหมด 104.383 g

$$\% \text{Na}_2\text{O} \text{ และ } \% \text{SiO}_2 = \frac{27.39}{104.383} \times 100 = 26.24\%$$

2. วิธีการตรวจสอบสารละลายโซเดียมซิลิเกต

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักโซเดียมออกไซด์ (% Na_2O)

1. นำขวดรูปชมพู่ปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งแล้วบันทึกน้ำหนักไว้ (W_1)
2. นำขวดรูปชมพู่มาเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ประมาณ 0.5 กรัม โดยสูบลูกจากตัวอย่าง แล้วบันทึกค่าน้ำหนักไว้ (W_2)
3. เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เติมสารละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ 3 หยด จะได้สารละลายสีเหลือง (การเตรียมสารละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ ได้มาจากการนำ Methyl Red จำนวน 0.1 กรัม ละลายในเอทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร)
4. นำสารละลายที่ได้มาไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.5 N จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายสีส้ม จดปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ใช้ไว้ (V_{HCl})
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักโซเดียมออกไซด์ (% Na_2O) ได้จากสูตร

$$\% \text{Weight Na}_2\text{O} = \frac{3.1 \times V_{\text{HCl}} \times \text{ความเข้มข้น HCl}}{W1 - W2}$$

วิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักซิลิกอนไดออกไซด์ (% SiO₂)

1. นำสารละลายที่เตรียมนำหนักซิลิกอนไดออกไซด์ (NaF) จำนวน 2.5 กรัม จะได้สารละลายสีเหลือง จากนั้นเติมเอทานอลปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

2. นำสารละลายที่ได้มาไตรเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.5 N จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายสีชมพู จดปริมาตรสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ใช้ไว้ (V_{HCl})

3. นำสารละลายที่ได้มาไตรเตรตด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 0.5 N จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายสีเหลือง จดปริมาตรสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ใช้ไว้ (V_{KOH})

4. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักซิลิกอนไดออกไซด์ (% SiO₂) ได้จากสูตร

$$\% \text{Weight Na}_2\text{O} = \frac{1.5022 \times [(V_{\text{HCl}} \times \text{ความเข้มข้น HCl}) - (V_{\text{KOH}} \times \text{ความเข้มข้น KOH})]}{W1 - W2}$$

วิธีการคำนวณอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ต่อโซเดียมออกไซด์ (Na₂O)

$$\text{Weight Ratio} = \frac{\% \text{Weight SiO}_2}{\% \text{Weight Na}_2\text{O}}$$

$$\text{Molecular Ratio} = \frac{\% \text{Weight SiO}_2 \times 1.0315}{\% \text{Weight Na}_2\text{O}}$$

3.การผสมก้อนหล่อแข็งและก้อนหล่อแข็งของเสีย

ซึ่งวิธีการผสมได้ประยุกต์ใช้จากมาตรฐานวิธีผสมเพสต์ ASTM C 305 - 94

1. สำหรับก้อนหล่อแข็ง นำซีเมนต์ที่เตรียมไว้ผสมกับปูนขาวที่ผ่านการร่อนแล้ว และสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้ใส่ลงในเครื่องกวนผสม คนให้เข้ากันด้วยทัพพีที่สะอาด ส่วนก้อนหล่อแข็งของเสียให้นำกากตะกอนที่เตรียมไว้ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ กัน ได้แก่ 10 %, 30 % และ 50 % ของกากตะกอนของเสียมาผสมรวมกับส่วนผสมของก้อนหล่อแข็ง (ปูนขาว+ซีเมนต์+สารกระตุ้น)

2. เปิดเครื่องผสมความเร็วต่ำ (Speed 1) 140 ± 5 รอบ เป็นเวลา 1 นาที ทำการหยุดเครื่องผสม 15 วินาที ระหว่างนี้ให้กวาดซีเมนต์เพสต์ที่ติดอยู่ข้างๆ หม้อและใบพายให้รวมอยู่ตรงกลาง

3. เปลี่ยนความเร็วของเครื่องผสมให้เป็นความเร็วปานกลาง (Speed 2) 285 ± 10 รอบ เป็นเวลา 1 นาทีแล้วปิดเครื่อง

4. นำส่วนผสมที่ได้เทลงในแบบหล่อพีวีซีทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร โดยเทใส่แบบหล่อให้มีความสูงกว่าขอบบนของแบบหล่อประมาณ 1 เซนติเมตร กระทุ้งด้วยแท่งแก้ว 5 ครั้ง จากนั้นนำมาแช่ที่โต๊ะสั่นคอนกรีตนาน 30 วินาที

5. ค่อยๆ ใช้เกียงปาดซีเมนต์เพสต์ที่ล้นจากขอบบนของแบบหล่อออก จนซีเมนต์เพสต์ใกล้จะแข็งตัวจึงปาดผิวหน้าให้เรียบ วางแบบหล่อทิ้งไว้ให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้องจนแข็งตัวดี และใช้แผ่นพลาสติกปิดผิวหน้าเพื่อไม่ให้สัมผัสกับอากาศ

6. เมื่อถอดออกจากแบบหล่อ ให้ห่อก้อนตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกให้เรียบแน่น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อรอเวลาทดสอบตามระยะเวลาการบ่มที่กำหนด หลังจากนั้นนำไปทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด

4. การทดสอบหาค่าความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์โดยเครื่องมือไวแคต

ประยุกต์ใช้ตามมาตรฐาน ASTM C 187 – 86

1. ทำการผสมซีเมนต์เพสต์ โดยกะประมาณน้ำที่จะนำมาผสมให้ซีเมนต์เพสต์พอป็นเป็นก้อนได้ ซึ่งปริมาณน้ำนั้นจะคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักซีเมนต์เพสต์

2. ปั้นซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดเป็นก้อนกลม โยนจากมือหนึ่งไปอีกมือหนึ่ง 6 ครั้ง โดยมือทั้งสองข้างห่างกันประมาณ 6 นิ้ว

3. จับทรงกรวยใส่ฝ่ามือข้างหนึ่ง และนำซีเมนต์ในฝ่ามืออีกข้างหนึ่งกดซีเมนต์เพสต์เข้าแบบทรงกรวยทางด้านกว้างจนเต็ม ปาดซีเมนต์เพสต์ที่เหลือทางแบบด้านกว้างออกด้วยมือครั้งเดียวให้หมด วางแบบพร้อมซีเมนต์เพสต์ลงบนแผ่นแก้วให้แบบด้านกว้างอยู่ด้านล่าง

4. ปาดซีเมนต์เพสต์ที่ล้นแบบทางด้านแคบออกด้วยเกียงครั้งเดียวให้เรียบ โดยเอียงทำมุมกับด้านบนของแบบเล็กน้อย ถ้ายังไม่เรียบดีอาจใช้ปลายเกียงแตะให้เรียบ พยายามอย่ากดซีเมนต์เพสต์

5. เตรียมเครื่องมือไวแคตโดยใช้ก้านทางด้านป้าน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) ในการทดสอบนี้

6. นำแบบกรวยหั่วตัดไปวางไว้ใต้เข็มทดสอบมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ของชุดทดสอบไวแคต ปรับให้เข็มทดสอบมาตรฐานแตะกับผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์และอยู่ตรงกลางกรวย แล้วปรับเข็มสเกลที่บอกระยะจมบนแผ่นสเกลให้เป็นเลข 0 แล้วทำการปล่อยเข็มทดสอบมาตรฐานทันทีหลังจากการผสมซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่องเสร็จแล้ว 30 วินาที จึงบันทึกการระยะจม (Penetration) ได้

7. นำซีเมนต์เพสต์ในกรวยนี้ออกทิ้ง แล้วล้าง และเช็ดกรวยให้สะอาดจนแห้งสนิท พร้อมที่จะทำการทดสอบปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นครั้งต่อไป

8. ทำการผสมซีเมนต์กับปริมาณน้ำใหม่ โดยให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากครั้งแรก แล้วทำการทดสอบเหมือนกับข้อ 2 - 6 จนกระทั่งครบปริมาณน้ำที่กำหนดไว้จึงจะหยุดการทดสอบ ซึ่งจะได้ค่าระยะจมกับปริมาณน้ำหลายค่า หรือจะหยุดการทดสอบเมื่อระยะจมของเข็มทดสอบมาตรฐานนี้มากกว่า 10 มิลลิเมตร ประมาณ 2 ค่าก็ได้ (หากทำการทดสอบโดยใส่น้ำปริมาณมากในครั้งแรก แล้วค่อยลดปริมาณน้ำลงมา ก็ให้ระยะจมของเข็มทดสอบมาตรฐานน้อยกว่า 2 ค่าก็ได้)

9. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยให้ค่าระยะจมของเข็มทดสอบมาตรฐาน ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรเป็นแกน X และค่าปริมาณน้ำมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรเป็นแกน Y แล้วลากเส้นตรงเชื่อมต่อระหว่างจุดที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด การพิจารณาให้ลากเส้นตรงจากระยะจม 10 มิลลิเมตร ขึ้นไปตัดกับเส้นกราฟ แล้วลากเส้นแนวนอนไปตัดกับแกนปริมาณน้ำ ค่าที่ได้จากปริมาณน้ำนี้ ก็คือปริมาณน้ำที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) นำค่าปริมาณน้ำที่ได้ซึ่งมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร มาทำให้เป็นเปอร์เซ็นต์ (Percent Normal Consistency)

การหาระยะเวลาการก่อตัวนี้จะใช้เข็มไวเคตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และปริมาณน้ำที่จะผสมเข้าไปในซีเมนต์ เพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวนี้จะใช้ปริมาณน้ำที่ทำให้ซีเมนต์อยู่ในสภาวะความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) เท่านั้น โดยสามารถแบ่งระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ออกได้เป็น 2 ระยะ คือ

1. ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นต้น (Initial Setting Time) คือ ระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวจนสามารถรับน้ำหนักของเข็มทดสอบมาตรฐานไวเคต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ที่ปล่อยให้จมลงในซีเมนต์เพสต์ 25 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที

2. ระยะเวลาการก่อตัวขึ้นปลาย (Final Setting Time) คือ ระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวจนสามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานไวเคตได้ โดยไม่จมลงในซีเมนต์เพสต์เลย เพียงแค่เป็นรอยกระแทกของเข็มเท่านั้น

5. ขั้นตอนการทดสอบการรั่วไหลโดยวิธี TCLP

1. นำตัวอย่างของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุการบ่ม 28 วัน มาทำการบดให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรง (Sieve) ให้ได้ขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 9.5 มิลลิเมตร

2. นำน้ำกลั่นมาผสมกับสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริกในอัตราส่วน 80:20 ปรับให้มีค่า pH เท่ากับ 5 อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักตัวอย่างต่อปริมาตรตัวละลายเท่ากับ 1:20

3. นำตัวอย่างของก้อนหล่อแข็งของเสียที่บด 10 กรัม ใส่ขวด TCLP และเติมสารละลายกำมะถันและกรดไนตริก 200 มิลลิลิตร ลงไป จากนั้นปิดฝานำเข้าเขย่าบนเครื่องเขย่า (Rotary Extractor) ความเร็ว 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 °C
4. กรองสารละลายที่ได้ด้วยกระดาษกรองที่มีขนาดรูกรอง 0.45 ไมครอน
5. นำตัวอย่างน้ำชะละลายโลหะหนักที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาความสามารถกำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสีย

ตารางที่ ข.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง
เถ้าแกลบดำ:ปูนขาวที่ 45:55, 50:50, 55:45 และ 60:40 ที่อายุ 7, 14, 28 และ 56 วัน

อัตราส่วนระหว่าง เถ้าแกลบดำ:ปูนขาว	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)			
		7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน
45:55	1	7.80	18.66	39.98	93.51
	2	7.21	23.71	40.78	50.91
	3	7.21	17.30	43.63	75.56
	ค่าเฉลี่ย	7.41	19.89	41.46	73.33
50:50	1	8.76	22.75	50.32	104.34
	2	9.85	23.07	48.12	110.49
	3	9.61	20.19	50.21	109.47
	ค่าเฉลี่ย	9.41	22.00	49.55	108.10
55:45	1	13.84	35.85	62.08	117.68
	2	13.18	35.99	59.10	122.31
	3	13.73	fail	61.05	123.26
	ค่าเฉลี่ย	13.58	35.92	60.74	121.08
60:40	1	12.96	28.01	55.32	92.77
	2	9.64	29.72	51.91	95.85
	3	12.72	28.68	56.59	92.00
	ค่าเฉลี่ย	11.77	28.80	54.61	93.54

ตารางที่ ข.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาวที่ 55:45
ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 1.0

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	2.17	4.55	8.87	14.75	18.48	20.50
	2	1.98	4.25	9.09	13.94	18.22	21.95
	3	2.33	3.99	8.14	12.27	19.79	22.14
	ค่าเฉลี่ย	2.16	4.26	8.70	13.65	18.83	21.53
1.0	1	3.80	7.95	15.01	20.96	24.98	28.57
	2	3.60	7.35	13.58	20.27	25.65	27.87
	3	3.51	7.87	13.15	20.46	24.73	28.48
	ค่าเฉลี่ย	3.64	7.72	13.91	20.56	25.12	28.31
1.5	1	6.33	10.70	19.73	24.76	32.95	43.35
	2	6.60	10.13	20.47	23.27	32.40	39.90
	3	7.03	11.12	19.58	24.30	31.84	40.03
	ค่าเฉลี่ย	6.65	10.65	19.93	24.11	32.40	41.09

ตารางที่ ข.3 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาวที่ 55:45
ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 2.0

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ^๒)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	2.19	5.00	9.49	14.81	20.76	22.47
	2	1.28	4.29	9.36	14.52	20.51	24.26
	3	1.78	3.76	9.36	15.31	20.21	23.50
	ค่าเฉลี่ย	1.75	4.35	9.40	14.88	20.49	23.41
1.0	1	3.16	8.32	15.82	23.91	28.11	32.43
	2	2.79	9.05	16.96	22.30	26.33	31.10
	3	3.44	9.03	15.05	22.07	28.55	30.87
	ค่าเฉลี่ย	3.13	8.80	15.94	22.76	27.66	31.47
1.5	1	5.50	11.15	21.52	26.93	32.44	42.78
	2	5.64	12.37	21.61	28.15	33.71	40.99
	3	5.10	12.56	20.64	28.64	34.72	42.34
	ค่าเฉลี่ย	5.41	12.03	21.26	27.91	33.62	42.04

ตารางที่ ข.4 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าเคลือบดำ:ปูนขาวที่ 55:45
ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่Alkali Modulus 3.0

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ^๒)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	1.15	5.47	13.32	17.24	21.67	26.65
	2	1.26	6.71	12.13	17.84	23.38	25.86
	3	1.10	5.43	14.63	18.32	20.28	23.44
	ค่าเฉลี่ย	1.17	5.87	13.36	17.80	21.78	25.32
1.0	1	2.43	10.22	17.26	26.92	30.01	34.84
	2	2.37	10.47	18.36	27.67	34.12	35.00
	3	2.46	10.00	18.16	29.78	30.09	33.62
	ค่าเฉลี่ย	2.42	10.23	17.93	28.12	31.41	34.49
1.5	1	4.09	15.74	24.94	31.60	44.29	53.75
	2	4.03	15.46	23.80	30.13	43.08	56.68
	3	4.10	14.92	27.02	31.87	45.82	58.76
	ค่าเฉลี่ย	4.07	15.37	25.25	31.20	44.40	56.40

ตารางที่ ข.5 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าเคลือบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 3.0 ปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสาน

ปริมาณกาตากะกอน โลหะหนัก (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)						
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
0	1	6.25	15.74	24.94	31.60	53.75	54.97	61.74
	2	7.82	15.46	23.80	30.13	56.68	58.31	60.08
	3	6.04	14.92	27.02	31.87	58.76	58.07	56.95
	ค่าเฉลี่ย	6.70	15.37	25.25	31.20	56.40	57.12	59.59
10	1	4.68	6.38	10.85	24.32	42.46	43.30	45.25
	2	4.31	7.96	11.40	24.92	44.02	44.09	43.56
	3	4.74	6.91	10.50	24.88	41.34	45.54	43.07
	ค่าเฉลี่ย	4.58	7.08	10.92	24.71	42.61	44.31	43.96
30	1	4.33	5.33	7.03	21.93	38.44	39.76	41.22
	2	3.83	5.00	8.10	23.10	36.83	40.16	40.81
	3	4.51	6.14	7.26	22.95	39.71	41.51	41.24
	ค่าเฉลี่ย	4.22	5.49	7.46	22.66	38.33	40.48	41.09
50	1	0.60	1.79	5.92	13.46	33.92	37.81	38.21
	2	1.53	2.36	5.09	14.93	35.14	39.16	40.20
	3	0.89	2.10	5.25	15.78	34.48	37.30	40.02
	ค่าเฉลี่ย	1.01	2.08	5.42	14.72	34.51	38.09	39.48

ตารางที่ ข.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าเคลือบดำ:ปูนขาว
ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิห้อง

ปริมาณกาตากะกอน โลหะหนัก (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ^๒)						
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
0	1	0.00	2.87	14.47	36.85	59.83	126.94	134.94
	2	0.00	2.09	12.76	36.78	60.25	117.74	130.31
	3	0.00	2.41	13.06	36.88	61.11	116.70	139.78
	ค่าเฉลี่ย	0.00	2.46	13.43	36.84	60.40	120.46	135.01
10	1	0.00	1.54	7.39	21.39	39.20	70.15	78.72
	2	0.00	1.49	7.33	20.60	38.85	69.88	74.26
	3	0.00	1.54	7.67	21.54	38.76	66.30	77.80
	ค่าเฉลี่ย	0.00	1.52	7.46	21.18	38.94	68.78	76.93
30	1	0.00	0.35	1.04	6.13	30.43	35.15	54.44
	2	0.00	1.03	6.25	20.17	35.11	54.59	62.43
	3	0.00	1.17	6.34	20.64	35.34	53.82	65.43
	ค่าเฉลี่ย	0.00	0.85	4.54	15.65	33.63	47.85	60.77
50	1	0.00	0.35	0.95	5.66	25.12	30.60	49.34
	2	0.00	0.83	5.23	12.94	28.24	46.70	56.77
	3	0.00	0.80	5.64	12.98	29.84	46.23	55.75
	ค่าเฉลี่ย	0.00	0.66	3.94	10.53	27.73	41.18	53.95

ตารางที่ ข.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างถ้ำเกลบดำ:ปูนขาว
ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °ซ

ปริมาณกาตากะกอน โลหะหนัก (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)						
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
0	1	0.83	3.29	10.53	29.07	49.03	76.50	89.12
	2	0.83	3.91	9.69	30.08	49.56	78.22	84.12
	3	0.82	3.18	10.13	31.42	50.52	78.99	89.62
	ค่าเฉลี่ย	0.83	3.46	10.12	30.19	49.70	77.90	87.62
10	1	1.42	3.48	8.26	23.38	45.86	60.03	72.69
	2	0.82	2.93	7.63	26.75	49.34	61.68	73.52
	3	0.83	3.34	7.92	25.66	47.82	60.25	70.79
	ค่าเฉลี่ย	1.02	3.25	7.94	25.26	47.67	60.65	72.33
30	1	1.64	3.09	6.42	24.78	37.34	56.30	58.18
	2	1.48	2.41	5.12	22.32	37.04	52.13	62.12
	3	1.66	3.27	6.88	23.05	37.42	53.07	64.68
	ค่าเฉลี่ย	1.59	2.92	6.14	23.38	37.27	53.83	61.66
50	1	2.01	2.21	5.79	21.99	32.62	45.91	53.28
	2	1.70	2.05	5.63	19.35	32.82	46.84	53.14
	3	1.82	2.37	6.03	20.91	32.65	46.56	51.74
	ค่าเฉลี่ย	1.84	2.21	5.82	20.75	32.70	46.44	52.72

ตารางที่ ข.8 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว
ที่ 55:45 ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °ซ

ปริมาณกากตะกอน โลหะหนัก (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)						
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
0	1	4.18	5.65	15.04	33.45	52.97	78.90	83.33
	2	4.43	6.15	14.88	31.71	52.52	82.93	81.38
	3	3.72	5.70	14.33	31.79	52.23	80.23	86.96
	ค่าเฉลี่ย	4.11	5.83	14.75	32.32	52.57	80.69	83.89
10	1	2.24	4.10	8.68	27.82	47.34	56.19	59.92
	2	2.23	3.97	8.24	28.76	46.87	53.58	57.13
	3	1.99	4.18	8.33	29.99	44.92	54.40	65.09
	ค่าเฉลี่ย	2.15	4.08	8.42	28.86	46.38	54.72	60.71
30	1	1.41	3.15	8.39	26.49	40.72	53.12	54.96
	2	2.03	3.82	6.81	24.91	39.36	52.63	56.28
	3	2.51	2.87	7.75	24.95	38.28	52.26	57.95
	ค่าเฉลี่ย	1.98	3.28	7.65	25.45	39.45	52.67	56.40
50	1	2.03	2.96	8.18	23.85	31.83	49.03	54.52
	2	1.66	3.03	5.29	23.37	34.34	49.47	54.83
	3	1.88	3.09	6.15	22.36	35.84	47.36	54.07
	ค่าเฉลี่ย	1.86	3.03	6.54	23.19	34.00	48.62	54.47

ตารางที่ ข.9 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 1.0 และที่อุณหภูมิ 40 °ซ

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	3.98	4.92	10.34	13.86	20.37	24.96
	2	3.47	4.79	10.57	14.29	19.83	23.46
	3	3.73	6.52	10.50	15.70	19.80	24.21
	ค่าเฉลี่ย	3.73	5.41	10.47	14.62	20.00	24.21
1.0	1	9.53	12.43	16.99	23.70	28.48	35.36
	2	9.15	10.88	14.40	24.24	28.73	37.36
	3	9.21	11.12	18.62	23.62	27.90	33.74
	ค่าเฉลี่ย	9.30	11.47	16.67	23.85	28.37	35.49
1.5	1	11.02	17.02	26.78	32.48	34.73	44.36
	2	10.69	17.51	26.82	31.99	36.08	43.69
	3	10.96	18.59	26.69	31.39	35.10	45.55
	ค่าเฉลี่ย	10.89	17.71	26.76	31.95	35.30	44.53

ตารางที่ ข.10 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 1.0 และที่อุณหภูมิ 50°C

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	5.26	7.07	13.49	17.66	20.33	26.26
	2	5.82	6.86	12.42	15.83	23.38	24.74
	3	5.63	7.50	10.93	16.83	23.67	27.90
	ค่าเฉลี่ย	5.57	7.15	12.28	16.77	22.46	26.30
1.0	1	13.46	17.35	19.46	27.51	35.83	39.83
	2	14.10	18.84	20.40	28.56	35.39	40.16
	3	13.95	19.32	22.31	28.65	35.56	38.78
	ค่าเฉลี่ย	13.84	18.50	20.72	28.24	35.59	39.59
1.5	1	18.15	22.93	30.66	37.19	46.30	49.86
	2	17.96	21.40	29.99	37.71	46.07	50.27
	3	19.15	22.59	29.75	36.58	45.64	51.16
	ค่าเฉลี่ย	18.42	22.31	30.14	37.16	46.00	50.43

ตารางที่ ข.11 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 2.0 และที่อุณหภูมิ 40°C

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	3.26	5.93	11.26	16.18	23.20	23.67
	2	3.00	5.33	10.30	18.81	21.67	24.37
	3	3.41	6.77	10.85	16.89	21.45	25.44
	ค่าเฉลี่ย	3.22	6.01	10.80	17.29	22.11	24.49
1.0	1	5.85	13.84	19.29	31.56	33.97	35.58
	2	6.30	13.64	18.96	27.80	31.87	36.31
	3	5.65	14.98	18.37	29.23	32.78	35.39
	ค่าเฉลี่ย	5.93	14.15	18.87	29.53	32.87	35.76
1.5	1	8.92	18.10	26.96	35.81	40.53	57.15
	2	9.31	19.32	25.70	33.13	41.42	56.73
	3	10.04	20.42	27.75	34.62	40.06	54.57
	ค่าเฉลี่ย	9.42	19.28	26.80	34.52	40.67	56.15

ตารางที่ ข.12 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 2.0 และที่อุณหภูมิ 50°C

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	4.32	8.58	15.28	20.77	25.10	28.60
	2	4.65	9.03	15.45	18.97	24.92	28.03
	3	4.06	8.07	13.36	19.41	24.67	29.37
	ค่าเฉลี่ย	4.34	8.56	14.70	19.72	24.90	28.67
1.0	1	12.68	17.36	27.31	34.90	39.00	46.74
	2	12.91	17.69	27.50	34.91	40.62	44.26
	3	11.52	17.75	27.64	34.54	40.28	47.16
	ค่าเฉลี่ย	12.37	17.60	27.48	34.78	39.97	46.05
1.5	1	17.12	25.73	32.67	37.51	50.57	59.47
	2	16.93	25.63	31.80	40.72	47.53	62.51
	3	16.29	25.69	34.04	39.27	50.76	60.24
	ค่าเฉลี่ย	16.78	25.68	32.84	39.17	49.62	60.74

ตารางที่ ข.13 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 3.0 และที่อุณหภูมิ 40°C

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	2.81	6.95	15.59	18.90	25.47	27.95
	2	2.74	6.90	13.61	18.23	23.96	28.68
	3	3.46	7.81	14.66	19.73	27.27	27.73
	ค่าเฉลี่ย	3.00	7.22	14.62	18.95	25.56	28.12
1.0	1	4.30	16.51	21.95	32.44	34.68	40.76
	2	4.32	17.25	20.54	31.95	34.46	38.29
	3	4.19	18.24	21.94	32.07	33.28	37.30
	ค่าเฉลี่ย	4.27	17.33	21.48	32.15	34.14	38.78
1.5	1	8.29	22.99	31.09	38.75	49.41	60.19
	2	7.94	22.59	31.92	39.44	52.32	59.33
	3	8.32	21.48	30.31	36.87	49.45	61.06
	ค่าเฉลี่ย	8.18	22.35	31.11	38.35	50.39	60.19

ตารางที่ ข.14 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 3.0 และที่อุณหภูมิ 50°C

ปริมาณโซเดียมซิลิเกต (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)					
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
0.5	1	3.92	11.87	17.11	21.00	30.15	34.56
	2	3.34	10.28	18.19	22.02	30.39	35.14
	3	2.87	11.65	16.54	21.29	29.11	37.28
	ค่าเฉลี่ย	3.38	11.27	17.28	21.44	29.88	35.66
1.0	1	9.56	20.93	33.85	41.21	47.69	50.27
	2	9.18	19.64	34.97	41.08	47.91	53.28
	3	10.47	20.19	37.38	40.69	45.21	49.91
	ค่าเฉลี่ย	9.74	20.25	35.40	40.99	46.94	51.15
1.5	1	11.95	28.70	35.25	45.30	56.85	70.11
	2	12.18	28.40	36.98	44.83	55.37	70.23
	3	12.80	29.44	36.03	47.46	58.13	72.47
	ค่าเฉลี่ย	12.31	28.85	36.09	45.86	56.78	70.94

ตารางที่ ข.15 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบดำ:ปูนขาว ที่ 55:45 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ที่ Alkali Modulus 3.0 ในปริมาณร้อยละ 1.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักวัสดุยึดประสาน และที่อุณหภูมิ 50°C

ปริมาณกาตากะกอน โลหะหนัก (ร้อยละ)	ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม. ²)						
		1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	56 วัน	91 วัน
0	1	22.63	28.70	35.25	45.30	70.11	80.10	81.32
	2	22.98	28.40	36.98	44.83	70.23	79.03	81.66
	3	24.31	29.44	36.03	47.46	72.47	77.32	80.44
	ค่าเฉลี่ย	23.31	28.85	36.08	45.86	70.94	78.82	81.14
10	1	13.35	17.80	19.76	29.42	45.89	50.26	53.83
	2	13.36	16.86	23.70	29.72	49.54	53.28	53.51
	3	11.87	17.03	27.24	31.31	46.68	51.58	53.58
	ค่าเฉลี่ย	12.86	17.23	23.57	30.15	47.37	51.71	53.64
30	1	5.71	7.42	10.80	28.73	39.38	46.47	47.08
	2	6.31	7.70	11.58	27.37	39.32	43.01	49.11
	3	7.00	7.84	12.36	28.02	41.89	45.70	50.11
	ค่าเฉลี่ย	6.34	7.65	11.58	28.04	40.20	45.06	48.77
50	1	2.43	2.45	6.46	17.75	35.69	37.98	41.71
	2	2.51	2.31	6.61	17.65	37.01	36.57	40.23
	3	2.71	2.31	5.92	18.16	36.08	38.56	40.10
	ค่าเฉลี่ย	2.55	2.36	6.33	17.85	36.26	37.70	40.68

ภาคผนวก ข.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

EFFECTS OF ELEVATED TEMPERATURE CURING ON STRENGTH AND LEACHABILITY OF THE SOLIDIFIED WASTES USING LIME AND BHA AS SOLIDIFICATION BINDER

Rungroj Piyaphanuwat, Suwimol Asavapisit* and Sasidhorn Buddhawong

Received: Mar 1, 2005; Revised: Jan 8, 2005; Accepted: Jan 9, 2005

Abstract

This work studied the effects of elevated temperature curing on strength and leachability of the solidified wastes. The lime to BHA ratio of 45 : 55 was used as solidification binder. The metal-containing waste was added to the solidification binders at 10, 30, and 50 wt% by weight of binder. The sample were cured at 40°C and 50°C for 1 day and the followed by room temperature. It was observed that the elevated curing temperature accelerated the dissolution of monosilicate ion $[\text{SiO}(\text{OH})_3]$ and Ca^{2+} ion from BHA and lime. This resulted in an increase in the rate of strength development at the early ages (1 and 3 days); although a reduction of the strength at later age (28 days) was observed. In addition, the leachability of Pb, Cr, Ni, Cu, Fe, and Zn from the solidified wastes was very low except that of cadmium. This was due to the high buffering capacity of the solidified matrices.

Keywords: Black husk ash, sodium silicate, thermal activation, strength, leaching

Introduction

Stabilization/solidification is a widely used technology to treat heavy metal-containing wastes prior to landfilling. Heavy metals are chemically stabilized as insoluble hydroxides by controlling pH of the wastes to between 8 and 9.5. The metal hydroxide sludges were then solidified using ordinary Portland cement (OPC) as solidification binder. Several pozzolanic materials, for example pulverized fuel ash and rice husk ash, can be used to substitute for OPC or react with lime to produce monolithic materials. The hydration reactions of OPC or pozzolanic reactions between OPC or lime and

pozzolanic materials provide an interlocking matrix to physically encapsulate waste particles and account for the strength development.

Pozzolanic materials are high in SiO_2 and often also in Al_2O_3 but low in CaO . Most pozzolans do not undergo self-cementing reactions, but in the presence of lime and water can produce cementitious materials and act in a similar manner to hydraulic cement, (Wiles, 1987). The slow pozzolanic reactions make the pozzolan-based solidification processes unattractive for some applications although these types of treatment also reduce costs. Some

Environmental Technology Division, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

* Corresponding author

Suranaree J. Sci. Technol. 12(2):91-97

recent research has shown that the slow pozzolanic reactions could be accelerated using either chemical or thermal activation (Shi and Day, 1993a, 1993b, 2001; Roy, 1999).

Previous works have been done on thermal activation of blast furnace slag and fly ash cements (Shi *et al.*, 1991; Paya *et al.*, 2000; Asavapisit and Chotklang, 2004). Very few works were found on thermal activation of black husk ash (BHA) cement. The purpose of this work is to use BHA as solidification binder to solidify metal-containing waste. BHA is generated in large quantities from a boiler using rice husk to replace fossil fuel. In this work, BHA was used in combination with lime to solidify metal-containing waste and curing at room temperature (30°C - 32°C), 40°C and 50°C. Low temperatures curing 40°C and 50°C were selected to simulate the landfill conditions where the solidified wastes were placed and directly exposed to solar radiation. The metal-containing waste was added to the solidification binders (BHA and lime) at 0, 10, 30, and 50 wt% Strength development and heavy metals released from the solidified wastes were measured to evaluate their performances.

Materials and Methods

Materials

BHA used in this work was from Lad Bua Luang District, Phra Nakhon Si Ayutthaya. It is generated from the cyclone burner using rice husk as fuel to remove moisture from the paddies. The BHA was ground to a particle size of less than 45 mm using Los Angeles Abrasion

Machine. Chemical compositions of BHA were determined by X-ray fluorescence and are shown in Table 1. SiO₂ was present in BHA at 94.5% which was classified as pozzolan class C following ASTM C 618-97. In addition, the 28-day strength activity index of BHA was 95.4%.

The metal-containing sludge was brought from a central treatment plant in Bangkok, Thailand. The sludge was oven dried and ground to a particle size of less than 0.5 mm. The ground metal-containing waste was digested with 5 ml of concentrated nitric acid, 1 ml of hydrogenperoxide and 1 ml of hydrogenfluoride using microwave digestion. The concentration of heavy metals was analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) and the results are shown in Table 2.

Sample Preparation

Lime-BHA cements were prepared using lime and BHA at the ratios of 55 : 45, 50 : 50, 45 : 55, and 40 : 60, respectively. A water-to-solid ratio for each mix was obtained by conducting normal consistency test using the procedure described in the ASTM C 187-86 and results are shown in Table 3. The slurry was mixed following the ASTM C 305-94 standard test method to achieve a uniform distribution and later transferred to the cylindrical plastic mould. The optimum proportion between lime and BHA was selected from the strength development results during 56 days of curing under room temperature (30°C - 32°C).

The metal-containing waste was then loaded to the optimum proportion between lime and BHA at 0, 10, 30, and 50 wt% of binder.

Table 1. Chemical compositions of BHA (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
94.45	<0.01	0.14	0.80	0.26	0.04	2.45

Table 2. Concentration of heavy metals in the metal-containing waste (mg/kg dry waste)

Zn	Ni	Fe	Pb	Al	Cr	Cd	Cu
127.5	142.5	3,541.8	3.4	104.5	83.7	7.1	44.0

Water requirement for each mix is shown in Table 3. The sample specimens were wrapped with cling film and placed in the zip-locked plastic bag and sat in water bath. The sample specimens were cured under the controlled temperatures for 1 day and cured at room temperature thereafter (Table 4).

Unconfined Compressive Strength Test

Compressive strength of the samples was measured following ASTM D 1633-96 test method. The cylindrical moulds, 50 mm in diameter and 100 mm in height, were modified. Strength development of the solidified wastes was determined after curing for 1, 3, 7, 14, 28, 56, and 91 days. A set of three samples was used for the compression test to ensure the reproducibility of the results.

Leaching Test

Metal leaching from the solidified wastes was assessed using the test method defined by the Ministry of Industry on the samples cured for 28 days. A synthetic acid leachant composed of 80 wt% sulfuric acid and 20 wt% nitric acid and diluted with deionized water to a pH of 5 was used. This is designed to simulate waste exposure to acid rain.

The samples were crushed until the particle sizes were less than 9.5 mm. The crushed samples were then extracted with an amount of acid leachant equal to 20 times of the sample weight. The extraction vessels were rotated in an end-over-end manner at 30 rpm for 18 h. The leachates were filtered through a 0.45 μ m membrane filter to remove suspended solids. The filtrates were measured for pH and heavy metals concentration by AAS. Each leachate was analysed in triplicate and the mean values were reported.

Results and Discussion

Strength Development of Lime-BHA Cements

Figure 1 shows the strength development of lime-BHA cements containing lime and BHA at various proportions. BHA does not undergo self-cementing reactions like OPC to low lime

content (Table 1). In the presence of lime and water SiO_2 dissociates from the surface of BHA. The dissolved monosilicate ion $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ then reacts with Ca^{2+} ion dissociates from lime and as a result C-S-H gels are formed (Shi and Day, 2000). The experimental results showed that the highest rate of the strength development was obtained from the proportion of 45% lime and 55% BHA. This proportion was selected for further study throughout this work.

Effect of Curing Temperatures on Strength of Lime-BHA Cements

The strength development of lime-BHA cements containing 45% lime and 55% BHA and cured at room temperature, 40°C and 50°C is shown in Figure 2. At the age of 1 day, lime-BHA cements cured at room temperature could not be demoulded whereas those cured at 40°C and 50°C gained strength of 0.82 and 4.11 kg/cm^2 . A higher rate of the strength development from the samples cured at elevated temperatures was also observed at the age of

Table 3. Water requirement for each mix

Composition	W / S
BHA : Lime	
40 : 60	0.570
45 : 55	0.575
55 : 45	0.585
60 : 40	0.590
BHA : Lime : Waste	
55 : 45 : 10	0.585
55 : 45 : 30	0.595
55 : 45 : 50	0.600

W / S = water to solid ratio

Table 4. Curing conditions for lime-BHA cement and the solidified wastes

Identity	Curing condition
Curing regime 1	Room temperature
Curing regime 2	40°C for 1 day followed by room temperature
Curing regime 3	50°C for 1 day followed by room temperature

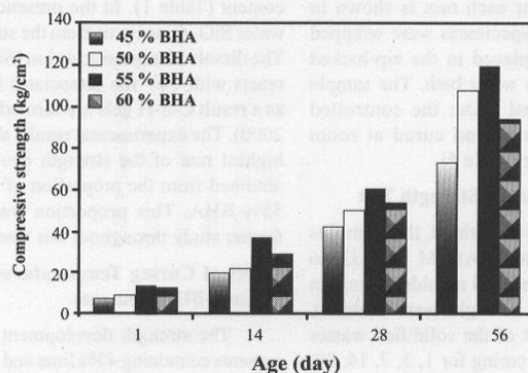


Figure 1. Strength development of lime-BHA cements

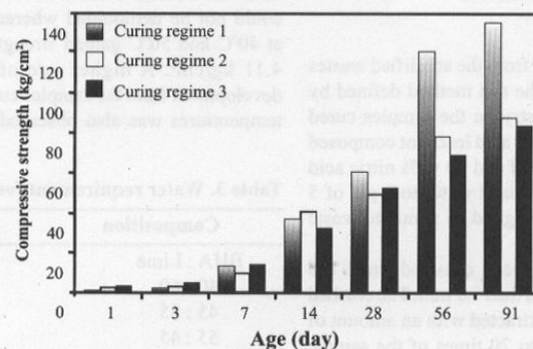


Figure 2. Strength development of lime-BHA cements containing 45% lime and 55% BHA cured at different temperatures

3 days. This is because the solubility of SiO_2 from the surface of BHA under alkali environment increases at the increasing curing temperatures. As a result, the soluble silicate reacts with lime and C-S-H gels are formed. This is responsible for the early strength development of lime-BHA cements.

At the later ages (after 7 days of curing), the strength of lime-BHA cements cured at 40°C and 50°C was lower than that cured at room temperature. The 28-day strengths of lime-BHA cements cured at 40°C and 50°C were 82%

and 87% that of the control (cured at room temperature). In addition, the strength of lime-BHA cements cured at 50°C was lower than that cured at 40°C at the age of 56 and 91 days. Similar observation was reported by Shi and Day (2001) that a rise in curing temperature from 23°C to 65°C affected the hydration rate at the later ages and the later ages strength. Possible explanation for this phenomenon is that under elevated temperature curing the dissolution of SiO_2 from the surface of BHA is accelerated. This leads to the

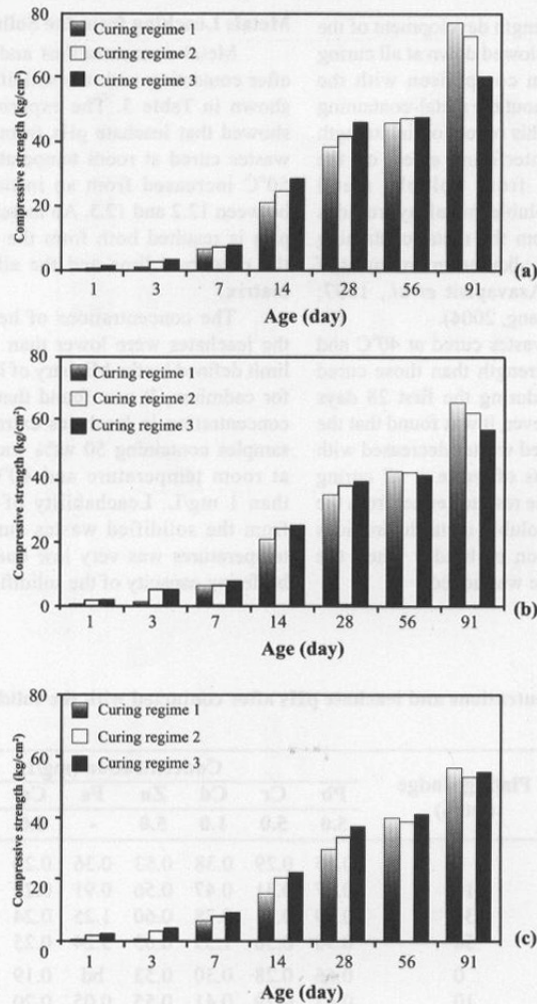


Figure 3. Strength development of lime-BHA cements containing metal-containing waste at (a) 10%, (b) 30%, and (c) 50%

rapid formation of hydration products which precipitate and cover the BHA particles. The rate of hydration at the later ages is therefore controlled by diffusion through the thick layer of precipitated hydration products. (Shi and Day, 2000a, 2000b)

Effect of Curing Temperatures on Strength of the Solidified Wastes

The Strength development of the solidified wastes at different waste concentrations and cured at room temperature, 40°C and 50°C is shown in Figures 3(a-c). At 10 wt% of waste

loading, the rate of strength development of the solidified wastes was slowed down at all curing durations observed in comparison with the reference samples without the metal-containing waste (Figure 3(a)). This reduction in strength was caused by the interfering effect on the hydration reaction from soluble metal hydroxides. These soluble metal hydroxides were resolubilized from the metal-containing waste under the highly alkaline environment of lime-BHA cement (Asavapisit *et al.*, 1997; Asavapisit and Chotklang, 2004).

The solidified wastes cured at 40°C and 50°C gained higher strength than those cured at room temperature during the first 28 days (Figures 3(a-c)). However, it was found that the strength of the solidified wastes decreased with increasing the amounts of waste at all curing durations. This could be resulted either from the interfering effect of soluble metal hydroxides or the reduced portion of binder when the metal-containing waste was added.

Metals Leaching from the Solidified Wastes

Metal concentrations and leachate pHs after contacting with the solidified wastes are shown in Table 5. The experimental results showed that leachate pHs from the solidified wastes cured at room temperature, 40°C and 50°C increased from an initial pH of 5 to between 12.2 and 12.3. An increase of leachate pHs is resulted both from the dissolution of the unreacted lime and the alkali solidified matrix.

The concentrations of heavy metals in the leachates were lower than the regulatory limit defined by the Ministry of Industry except for cadmium. It was found that the cadmium concentration in leachates extracted from the samples containing 50 wt% wastes and cured at room temperature and 40°C was higher than 1 mg/L. Leachability of heavy metals from the solidified wastes cured at various temperatures was very low due to the strong buffering capacity of the solidified wastes. It is

Table 5. Metal concentrations and leachate pHs after contacted with the solidified plating wastes

BHA : Lime (55 : 45)	Plating sludge (wt%)	Concentration (mg/L)							pH
		Pb	Cr	Cd	Zn	Fe	Cu	Ni	
		5.0	5.0	1.0	5.0	-	2.0	-	
Curing regime I	0	0.65	0.29	0.38	0.53	0.36	0.20	0.26	12.3
	10	0.67	0.31	0.47	0.56	0.91	0.21	0.28	12.3
	30	0.69	0.31	0.78	0.60	1.25	0.24	0.28	12.2
	50	0.90	0.36	1.39	0.63	3.24	0.25	0.29	12.2
Curing regime II	0	0.66	0.28	0.30	0.53	bd	0.19	0.25	12.3
	10	0.67	0.29	0.41	0.55	0.05	0.20	0.26	12.3
	30	0.68	0.30	0.71	0.59	1.76	0.20	0.28	12.2
	50	0.83	0.34	1.31	0.60	2.70	0.23	0.28	12.2
Curing regime III	0	0.63	bd	0.28	0.50	bd	0.19	0.24	12.3
	10	0.63	bd	0.38	0.52	bd	0.18	0.26	12.3
	30	0.64	0.02	0.68	0.57	1.22	0.19	0.27	12.2
	50	0.78	0.05	0.83	0.57	2.39	0.21	0.28	12.2

Curing regime I : room temperature (30 - 32°C)

Curing regime II : 40°C for 1 day followed by room temperature

Curing regime III : 50°C for 1 day followed by room temperature

bd = Below analytical detection limit

therefore not possible to assess the effect of the elevated temperature curing on leachability of heavy metals from the solidified wastes.

Conclusion

1. BHA consists of 94.5 wt% SiO_2 with a 28-day strength activity index of 95.4% of the control. The lime-BHA cement gained the highest rate of strength development when lime was added at 45 wt%.
2. Lime-BHA cements cured at the elevated temperatures (40°C and 50°C) have higher strength at the early age. This is due to an increase of the solubility of monosilicate ion $[\text{SiO}(\text{OH})_2]$ from the surface of BHA and rapidly reacts with Ca^{2+} to form C-S-H gels.
3. The elevated temperature curing has a significant influence on the later age strength of lime-BHA cements. The experimental results showed that the 91-day strength of lime-BHA cements cured at 40°C and 50°C was 65% and 63% of the control.
4. Addition of metal-containing waste to lime-BHA cement matrices caused strength reduction of lime-BHA cements. The strength decreased with increasing the amounts of waste loading. This could be partly resulted from the interfering effects of heavy metals on hydration reactions and the dilution effect on binder. However, concentration of heavy metals in leachates contacted with the solidified wastes meets the regulatory limit defined by the Ministry of Industry except for cadmium.

Acknowledgements

The authors would like to give special thanks to the Thailand Research Fund and the Siam City Cement Public Co. Ltd. for the financial support. The Commission on Higher Education, Ministry of Education also deserves acknowledgement for partial support to this work. The Department of Civil Engineering and Department of Civil Technology Education, Faculty of Engineering, KMUTT, deserved appreciation for providing access to their laboratories.

References

- Asavapisit, S., and Chotklang, D., (2004). Solidification of electroplating sludge using alkali-activated pulverized fuel ash as cementitious binder. *Cement and Concrete Research*, 34:349-353.
- Asavapisit, S., Fowler, G., and Cheeseman, C.R. (1997). Solution chemistry during cement hydration in the presence of metal hydroxide wastes. *Cement and Concrete Research*, 27:1,249-1,260.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Peris-Mora, E., and Amahjour, F. (2000). Mechanical treatment of fly ashes Part IV: Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperature. *Cement and Concrete Research*, 30:543-551.
- Roy, D.M. (1999). Alkali-activated cements: opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29:249-254.
- Shi, C., and Day, R.L. (1993a). Acceleration of strength gain of lime-pozzolan cements by thermal activation. *Cement and Concrete Research*, 23:824-832.
- Shi, C., and Day, R.L. (1993b). Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*, 23:1,389-1,396.
- Shi, C., and Day, R.L. (2000a). Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part I: Reaction kinetics. *Cement and Concrete Research*, 30:51-58.
- Shi, C., and Day, R.L. (2000b). Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part II: Reaction products and mechanism. *Cement and Concrete Research*, 30:607-613.
- Shi, C., and Day, R.L. (2001). Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans. *Cement and Concrete Research*, 31:813-818.
- Shi, C., Wu, X., and Tang, M. (1991). Hydration of alkali-slag cements at 150°C . *Cement and Concrete Research*, 21:91-100.
- Wiles, C.C. (1987). A review of solidification/stabilization technology. *Journal Hazard Waste Material*, 14:5-21.