



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การลดแทรกสอดของโลหะหนักต่อการไฮโดรชันของวัสดุยืด
ประสานโดยการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีของผสมและวิธีผสม

โดย รศ.ดร.สุวิมล อัครพิศิษฐ์
สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ธันวาคม 2552

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัยและเครื่องมือทดสอบ ขอขอบคุณโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ที่จังหวัดชัยนาทที่ให้ความอนุเคราะห์เช่าแปลงดำที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณคุณสุพจน์ ก้อนทอง และโรงสีข้าวจังหวัดฉะเชิงเทราที่ให้ความสะดวก และอนุเคราะห์แปลง และขอขอบคุณโรงชุบเพชรเกษมที่ให้ความอนุเคราะห์กากตะกอนโลหะหนัก อีกทั้งยังช่วยจัดเตรียมเพื่อให้เกิดความสะดวกในการนำมาใช้ในการทดลอง

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RMU5080007

ชื่อโครงการ : การลดการแทรกสอดของโลหะหนักต่อการไฮเดรชันของวัสดุยึดประสาน โดยการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีของของผสมและวิธีผสม

ชื่อนักวิจัย : รศ.ดร.สุวิมล อัสวาทิษฐ์
สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

อีเมลล์ : suwimol.asa@kmutt.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 3 ปี

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของของผสมและการปรับปรุงวิธีการผสมต่อสมบัติของก้อนของเสียหล่อแข็ง ได้แก่ กำลังอัด การรั่วไหลของโลหะหนัก การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารละลาย และโครงสร้างจุลภาค โดยใช้ปูนซีเมนต์ (OPC) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ (BHA) หรือเถ้ากลบสังเคราะห์ (sRHA) ปูนขาวผสม BHA หรือ sRHA ที่มีและไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต ร้อยละ 2 เป็นวัสดุยึดประสานในการตรึงกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ผลการทดสอบพบว่า การปรับปรุงวิธีการผสมโดยการเติมกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์หลังจากปล่อยให้วัสดุยึดประสานเกิดการไฮเดรชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้กำลังอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม ในขณะที่การปรับองค์ประกอบทางเคมีของของผสมด้วย BHA หรือ sRHA สามารถลดการแทรกสอดของโลหะหนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งสังกะสีในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของตัวยึดประสาน อย่างไรก็ตาม การปรับองค์ประกอบทางเคมีและวิธีการผสมสามารถลดการรั่วไหลของโลหะหนักได้แต่ไม่มีนัยสำคัญ สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่า BHA และ sRHA ทำให้ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบเพิ่มขึ้น ขณะที่ตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ส่งผลให้ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตทำให้ค่าไฮดรอกไซด์ของสารละลายปูนขาวผสม BHA และ sRHA สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และยังส่งผลให้ความเข้มข้นของสังกะสีลดลง จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค XRD และ SEM/EDX พบว่า สังกะสีถูกตรึงอยู่ในซีเมนต์ในรูปของ calcium zinc hydroxide hydrate และ calcium zinc silicate hydrate และในกรณีที่มีโซเดียมคาร์บอเนตสังกะสีสามารถถูกตรึงอยู่ในรูป CaZnCO_3

คำสำคัญ : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้ากลบ ปูนขาว โลหะหนัก สารกระตุ้น

Abstract

Project Code : RMU5080007

Project Title : Minimizing the interfering effects of heavy metals on hydration of cementitious binders by modifying chemical composition of the mixes and mixing method

Investigator : Assoc.Prof.Dr. Suwimol Asavapisit

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

E-mail Address : suwimol.asa@kmutt.ac.th

Project Period : 3years

This research studied the effects of modifying chemical composition of the mixes and mixing method on properties of the solidified wastes such as compressive strength, leachability of heavy metals, variation in chemical composition of solution and microstructures. OPC, OPC/BHA, OPC/sRHA, lime/BHA, lime/sRHA with and without 2% of sodium silicate and sodium carbonate were used as solidification binders to solidify plating sludge and synthetic zinc hydroxide. Results showed that the delay addition of the plating sludge and synthetic zinc hydroxide after allowing the binders to hydrate for 1 hour resulted in a higher strength of the samples due to a reduction of the mix water. For modifying chemical composition of the mixes with BHA and sRHA could reduce the interfering effects of heavy metals on hydration reactions of the binders especially zinc. However, both modifying chemical composition of the mixes and mixing method could reduce leaching of heavy metals insignificantly. The study of variation of different ionic concentrations in solution during hydration reactions found that BHA and sRHA increased the silicon concentration of OPC/BHA and OPC/sRHA whereas the plating sludge and synthetic zinc hydroxide resulted in rapid disappearance of SO_4^{2-} from the solution. In addition, sodium silicate and sodium carbonate rapidly increased the concentration of OH^- and decreased concentration of zinc in lime/BHA and lime/sRHA mixes. The microstructures as examined by XRD and SEM/EDX techniques revealed that zinc was immobilized in cement matrix in the form of calcium zinc hydroxide hydrate and

calcium zinc silicate hydrate. When sodium carbonate was used, zinc could be present in the form of CaZnCO_3 .

Keywords :Portland cement; Rice husk ash; Hydrate lime; Heavy metals; Activators

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อภาษาไทย	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
สารบัญ	v
สารบัญรูป	vi
สารบัญตาราง	x
1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
3 การเตรียมวัตถุดิบ	2
4 ผลของการศึกษา	4
4.1 การพัฒนากำลังรับแรงอัด	4
4.2 การทดสอบการรื้อไหลของก้อนหล่อแข็งของเสีย	35
4.3 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายปูนซีเมนต์	40
4.4การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของก้อนของเสียหล่อแข็ง	75
5. เอกสารอ้างอิง	96
6. Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.	100
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	101
ภาคผนวก ข reprint หรือ manuscript และบทความสำหรับการเผยแพร่	120

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	ผลการวิเคราะห์ XRD ของแก้วเคลือบดำและแก้วเคลือบสังเคราะห์	3
2	การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ OPC เป็นตัวยึดประสาน	5
3	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมแก้วเคลือบดำ	6
4	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมแก้วแบบดำที่มีกากตะกอนโรงชุบ	7
5	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์	8
6	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ	10
7	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่เติมสังกะสีสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10	11
8	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมในสถานะที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต	12
9	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนขาวผสมแก้วเคลือบดำที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และเติมกากตะกอนจากโรงชุบ	14
10	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนขาวผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และเติมกากตะกอนจากโรงชุบ	15
11	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่เติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์	16
12	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม	18
13	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสม	19
14	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และปรับปรุงวิธีการผสมของซีเมนต์เฟสที่มีกากตะกอนจากโรงชุบ	20
15	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมแก้วเคลือบดำในปริมาณร้อยละ 10 และกากตะกอนจากโรงชุบ	22
16	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 และกากตะกอนจากโรงชุบ	24
17	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และปรับปรุงวิธีการผสม	22
18	การพัฒนากำลังรับแรงอัดสำหรับปูนขาวผสมแก้วเคลือบดำที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และปรับปรุงวิธีการผสม	27
19	การพัฒนากำลังรับแรงอัดสำหรับปูนขาวผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และปรับปรุงวิธีการผสม	29
20	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาว แก้วเคลือบดำ และกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 ทั้งที่มีและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์และปรับปรุงวิธีการผสม	30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
21	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาว ถั่วแกลบสังเคราะห์ และกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม	31
22	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาว ถั่วแกลบดำ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 ในสภาวะที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม	33
23	การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาว ถั่วแกลบสังเคราะห์ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 ในสภาวะที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม	34
24	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายกับระยะเวลาไฮเดรชัน	41
25	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายที่ผสมกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 กับระยะเวลาไฮเดรชัน	44
26	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักต่าง ๆ ในสารละลายที่ผสมกากตะกอนโรงชุบร้อยละ 10 กับระยะเวลาไฮเดรชัน	45
27	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายที่ผสมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาไฮเดรชัน	46
28	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์ผสมที่มีสังกะสีสังเคราะห์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาไฮเดรชัน	47
29	ความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบดำ	49
30	ความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบสังเคราะห์	51
31	ความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบดำและกากตะกอนจากโรงชุบ	53
32	ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบดำและกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10	56
33	ความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบสังเคราะห์และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10	57
34	ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบสังเคราะห์และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10	58
35	ความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบดำและสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10	59
36	ความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่าง ๆ ในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบสังเคราะห์และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
37	ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยา	61
38	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายที่ผสมจากตะกอนจากโรงชุบ	63
39	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ผสมจากตะกอนจากโรงชุบ	64
40	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายที่ผสมสังกะสีสังเคราะห์ร้อยละ 10	65
41	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น	67
42	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น	69
43	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น	70
44	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น	71
45	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น	72
46	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น	73
47	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น	74
48	ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปฏิกิริยาของสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น	75
49	สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน	77
50	สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมจากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10	77
51	สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมจากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50	78
52	สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมจากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 และจากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50	79
53	สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30	80

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
54	สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตำร้อยละ 10 และ สังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30	80
55	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50	81
56	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสารละลายโซเดียมซิลิเกต	82
57	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต	82
58	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50	83
59	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30	84
60	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 ในสภาวะที่มีโซเดียมซิลิเกต	84
61	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 ในสภาวะที่มีโซเดียมซิลิเกต	85
62	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 ในสภาวะที่มีโซเดียมคาร์บอเนต	86
63	สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30ในสภาวะที่มีโซเดียมคาร์บอเนต	86
64	โครงสร้างจุลภาคของก้อนของเสียหล่อแข็ง	87
65	โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตำร้อยละ 10	89
66	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำ	92
67	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต	93
68	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของปูนขาวผสมเถ้าแกลบตำและโซเดียมคาร์บอเนต	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ร้อยละคงค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 และค่า LOI ของถ่านแกลบ	2
2 ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมถ่านแกลบ	3
3 ความเข้มข้นสะสม สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของ ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสาน	36
4 ความเข้มข้นสะสม สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของ ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนขาวผสม BHA หรือ RHA เป็นวัสดุยึดประสาน	37
5 ความเข้มข้นสะสม สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของ ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสานและทำการปรับปรุง วิธีการผสม	38
6 ความเข้มข้นสะสม สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของ ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนขาวผสม BHA หรือ RHA เป็นวัสดุยึดประสาน และปรับปรุงวิธีการผสม	39
7 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์	88
8 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ผสมถ่านแกลบดำและกากตะกอนโรงชุบ หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์	90
9 องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวผสมถ่านแกลบดำและกากตะกอนโรงชุบ หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์	91
10 องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวผสมถ่านแกลบดำและโซเดียมซิลิเกตที่มีกากตะกอน โรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์	91
11 องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวผสมถ่านแกลบดำและโซเดียมคาร์บอเนตที่มี กากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์	94
ผ.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์	102
ผ.2 อัตราส่วนระหว่างน้ำและวัสดุยึดประสานสำหรับแต่ละอัตราส่วนผสมของ ก้อนของเสียหล่อแข็งที่ใช้ซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสาน	103
ผ.3 อัตราส่วนระหว่างน้ำและวัสดุยึดประสานสำหรับก้อนของเสียหล่อแข็งที่ใช้ ปูนขาวผสมถ่านแกลบดำหรือถ่านแกลบสังเคราะห์	104
ผ.4 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีและไม่มีปรับปรุงวิธีการผสม ของปูนซีเมนต์ผสมถ่านแกลบดำและถ่านแกลบสังเคราะห์ที่ระดับต่างๆ	105
ผ.5 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มีปรับปรุงวิธีการผสม ของปูนซีเมนต์ผสมถ่านแกลบดำและกากตะกอนโรงชุบที่ระดับต่างๆ	106
ผ.6 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มีปรับปรุงวิธีการผสม ของปูนซีเมนต์ผสมถ่านแกลบสังเคราะห์และกากตะกอนโรงชุบที่ระดับต่างๆ	107

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ผ.7 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	108
ผ.8 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมสำหรับปูนขาวและ BHA ในสภาวะที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2	109
ผ.9 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมสำหรับปูนขาวผสม RHA ในสภาวะที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2	110
ผ.10 ความเข้มข้นสะสม, สัมประสิทธิ์การแพร่ และดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสาน	111
ผ.11 ความเข้มข้นสะสม, สัมประสิทธิ์การแพร่ และดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสานที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม	112
ผ.12 ความเข้มข้นสะสม, สัมประสิทธิ์การแพร่ และดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนขาวผสม BHA หรือ RHA เป็นวัสดุยึดประสาน	113
ผ.13 ความเข้มข้นสะสม, สัมประสิทธิ์การแพร่ และดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนขาวผสม BHA หรือ RHA เป็นวัสดุยึดประสานที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม	114
ผ.14 เปรียบเทียบปริมาณการรั่วไหลสะสมของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ และเถ้าแกลบสังเคราะห์ผสมโลหะหนัก	115
ผ.15 เปรียบเทียบปริมาณการรั่วไหลสะสมของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ และเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่เตรียมโดยปรับปรุงวิธีการผสมผสมโลหะหนัก	116
ผ.16 เปรียบเทียบปริมาณการรั่วไหลสะสมของโลหะหนักจากปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ และเถ้าแกลบสังเคราะห์ผสมโลหะหนัก	117
ผ.17 เปรียบเทียบปริมาณการรั่วไหลสะสมของโลหะหนักจากปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ และเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่เตรียมโดยปรับปรุงวิธีการผสมผสมโลหะหนัก	118

สัญญาเลขที่ RMU5080007

โครงการ การลดการแทรกสอดของโลหะหนักต่อการไฮเดรชันของวัสดุยึดประสาน โดยการปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีของของผสมและวิธีผสม

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ธันวาคม 2549 ถึงวันที่ 31 พฤศจิกายน 2552

ชื่อหัวหน้าโครงการ : รศ.ดร.สุวิมล อัครพิศิษฐ์

หน่วยงาน : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

กากตะกอนโลหะหนักเป็นของเสียอันตรายที่มีความเป็นพิษ ความเป็นพิษของโลหะหนักเหล่านี้ไม่สามารถทำลายฤทธิ์ได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยการตกตะกอนด้วยสารเคมี บำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ หรือกำจัดด้วยวิธีการเผาทำลาย แต่สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยเพื่อลดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม และทำการกักเก็บไว้ภายในโครงสร้างที่เป็นของแข็ง และมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำโดยอาศัยตัวยึดประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรืออาจใช้ร่วมกับวัสดุปอสโซลาน เช่น แก้วลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้า หรือ แก้วแกลบ เป็นต้น

เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อทำการบำบัดกากตะกอนโลหะหนักโดยการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มักเกิดปัญหาในเรื่องของการแทรกสอดของโลหะหนักต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุยึดประสาน เนื่องจากโลหะไฮดรอกไซด์หลายชนิดมีสมบัติแอมโฟเทริก จึงสามารถละลายกลับได้อีกในสภาวะที่เป็นด่างค่อนข้างสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (พีเอชประมาณ 12.5-13) ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดระยะแรก (อายุ 7-14 วัน) ของก้อนหล่อแข็งของเสียต่ำมากหรือแทบไม่มีการพัฒนากำลังอัดในช่วงนี้ นอกจากนี้โลหะหนักต่างๆที่กักเก็บไว้ภายในก้อนหล่อแข็งของเสียยังถูกชะละลายออกมาได้ง่าย ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนย้ายก้อนหล่อแข็งของเสียไปยังแหล่งฝังกลบเนื่องจากไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการฝังกลบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของของผสมระหว่างวัสดุยึดประสานและกากตะกอนโลหะหนัก โดยการนำแก้วแกลบสังเคราะห์ที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยามาใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน หรือนำแก้วแกลบสังเคราะห์มาผสมกับปูนขาวเพื่อใช้เป็นวัสดุยึดประสานในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก ไม่ว่าจะเป็นโลหะไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ของสังกะสี เหล็ก และ โครเมียม หรือกากตะกอนจากโรงชุบโลหะประเภทสังกะสี-โซเดียม สิ่งที่น่าสนใจซึ่งพบจากงานวิจัยที่ผ่านมาคือเมื่อทำการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของของผสมสามารถลดการแทรกสอดของโลหะหนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งสังกะสีไฮดรอกไซด์ ต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปฏิกิริยาปอสโซลานของแก้วแกลบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตามปกติกากตะกอนโลหะหนักที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์เป็นองค์ประกอบปริมาณมากมักหน่วงหรือยับยั้งการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระดับที่รุนแรง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการลดการแทรกสอดของโลหะหนักต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุยึดประสานโดยการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของของผสม และปรับวิธีการผสม ในการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของของผสม จะทำการปรับด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์และเถ้าแกลบดำ ในขณะที่การปรับวิธีการผสมทำโดยการชะลอการเติมกากตะกอนโลหะหนัก โดยเชื่อว่าวิธีการดังกล่าวข้างต้นสามารถทำให้ก่อนหล่อแข็งของเสียที่มีวัสดุซีเมนต์เป็นตัวยึดประสานกักเก็บโลหะหนักได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังคาดว่าจะได้รับองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักและวัสดุยึดประสาน ซึ่งมีความซับซ้อนมากได้ด้วย โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์หลายอันร่วมกัน

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาปฏิสัมพันธ์ของสารละลายผสมระหว่างโลหะหนักและวัสดุยึดประสานที่ระยะเวลาไฮเดรชันต่างๆ
2. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของของผสมและการปรับปรุงวิธีการผสมต่อสมบัติของก่อนหล่อแข็งของเสีย ได้แก่ กำลังอัด และการรั่วไหลของโลหะหนัก
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของก่อนหล่อแข็งของเสียที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของของผสมและการปรับปรุงวิธีการผสม

3. การเตรียมวัตถุดิบ

เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบดำ (BHA) จากโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล จังหวัดชัยนาท และเถ้าแกลบสังเคราะห์ (sRHA) ที่เตรียมจากการเผาแกลบในเตา Furnace ที่อุณหภูมิ 500 °ซ นาน 1 ชั่วโมง เพื่อไล่คาร์บอนระเหยออกและเผาควบคุมอุณหภูมิที่ 650 °ซ นาน 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดเถ้าแกลบทั้งสองชนิดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine จนกระทั่งขนาดของอนุภาคเถ้าแกลบที่ใหญ่กว่า 45 ไมครอนคงค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกิน 34% ตามมาตรฐาน ASTM C 618-91 และทำการทดสอบหาค่า Loss on ignition ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ร้อยละคงค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 และค่า LOI ของเถ้าแกลบ

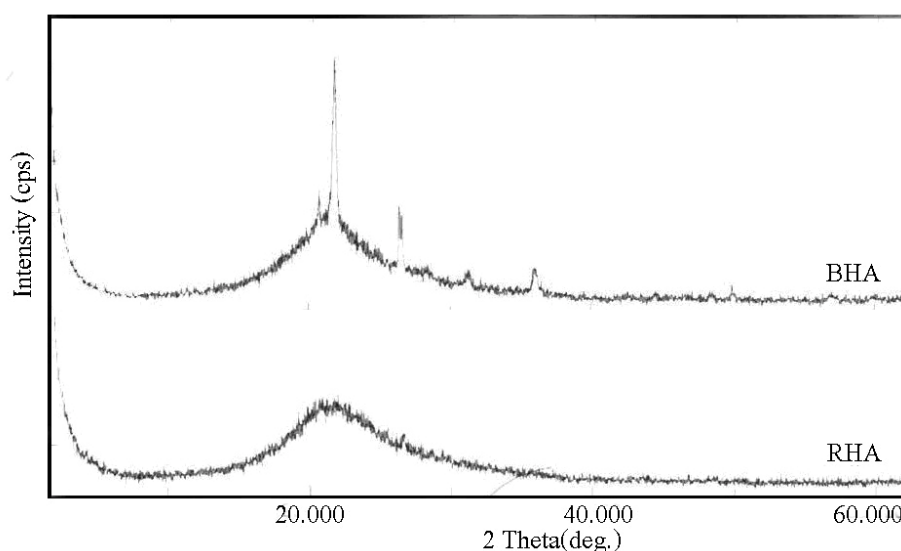
ตัวอย่าง	ร้อยละคงค้างบนตะแกรงเบอร์ 325	Loss on ignition (%)
เถ้าแกลบดำ	30	3.5
เถ้าแกลบสังเคราะห์	29	2.5

เถ้าแกลบดำและเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่ผ่านการบดลดขนาด จะนำมาทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบ เท่ากับ 80: 20 ในมอร์ตาร์ และทำการทดสอบดัชนีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน จากตารางที่ 2 พบว่าค่าดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบสังเคราะห์สูงกว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบดำ และจากผลการวิเคราะห์เถ้าแกลบสังเคราะห์และเถ้าแกลบดำด้วยเครื่อง XRD พบว่า เถ้าแกลบสังเคราะห์มีความเป็นอสัณฐานมากกว่าเถ้าแกลบดำซึ่งแสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 2 ดัชนีกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ

ตัวอย่าง	ดัชนีกำลังอัด (%)	
	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน
มอร์ตาร์ + เถ้าแกลบดำ	75.3	86.2
มอร์ตาร์ + เถ้าแกลบสังเคราะห์	92.6	97.4

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราร้าง ซึ่งมี SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 , MgO , K_2O และ CaO ในปริมาณร้อยละ 24.2, 4.35, 0.08, 3.01, 0.62, 0.62 และ 65.2 ตามลำดับ ส่วนปูนขาวเป็นชนิด Hydrated Lime จากบริษัทสยามปูนขาว จำกัด ซึ่งมีปริมาณ CaO ร้อยละ 93.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกตยี่ห้อ Fisher ซึ่งมีปริมาณ Na_2O และ SiO_2 ในปริมาณร้อยละ 14.36 และ 29.10 ส่วนโซเดียมคาร์บอเนตเป็นชนิด Anhydrous ยี่ห้อ Ajax ซึ่งมีปริมาณ Na_2O ร้อยละ 62



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ XRD ของเถ้าแกลบดำและเถ้าแกลบสังเคราะห์

การเตรียมกากตะกอนโรงชุบ กากตะกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงชุบเพชรเกษม จากนั้นทำการอบแห้งกากตะกอน และบดให้มีขนาดเล็กกว่า 500 ไมครอน ความเข้มข้นของโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนวิเคราะห์ด้วยวิธี Microwave Digestion โดยนำกากตะกอน 0.5 กรัม มาเติมกรดไนตริก (65 %) 5 มิลลิลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30%) 1 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (48 %) 2 มิลลิลิตร จากนั้นปิดฝานำตัวอย่างใส่เครื่อง Microwave Digestion นำสารละลายที่ได้มาปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

การเตรียมสังกะสีสังเคราะห์ โดยนำสารละลายสังกะสีในเตรทเข้มข้น 1 โมลาร์ นำมาทำการปรับค่าพี-เอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ จนกระทั่งมีค่าพี-เอช ของสารละลายเท่ากับ 9.5 ± 0.1 จากนั้นทำการกรอง และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °ซ นำกากตะกอนที่แห้งมาทำการบดให้มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 500 ไมครอน และทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสังกะสีที่อยู่ในกากตะกอนโดยวิธี Microwave Digestion จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ ผ 1

4. ผลของการศึกษา

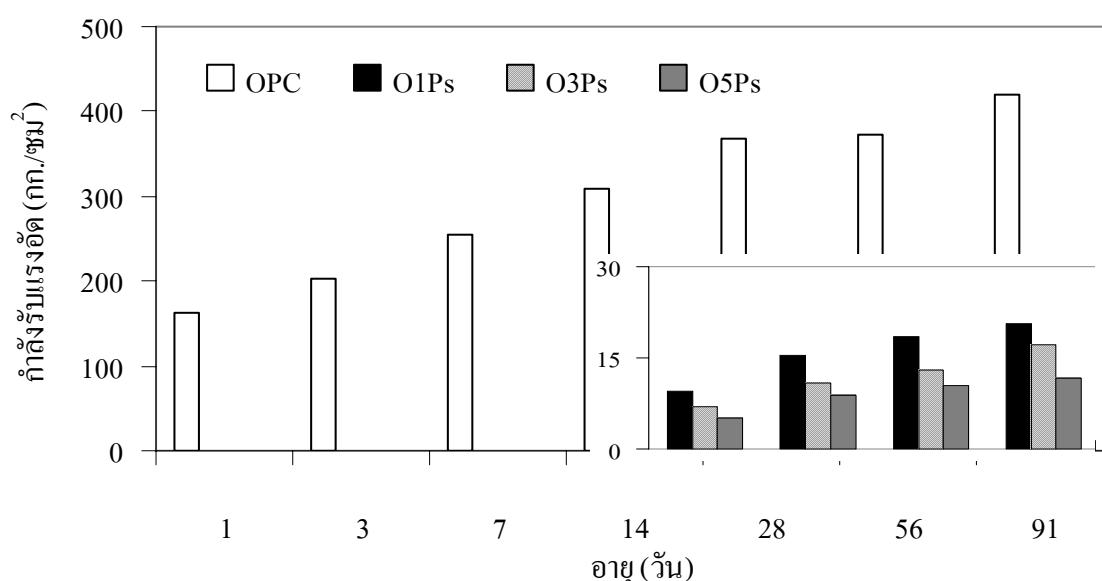
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียโดยใช้วัสดุยึดประสาน 2 ชนิดได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ผสมเถ้าแลบดำ หรือเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์: เถ้าแลบดำหรือเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 และปูนขาวผสมเถ้าแลบดำหรือ เถ้าแกลบสังเคราะห์ในอัตราส่วน 50:50 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 จากนั้นเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 ตามลำดับ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ในปริมาณร้อยละ 10

4.1 การพัฒนา กำลังรับแรงอัด

4.1.1 ผลของการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสานต่อสมบัติของก้อนหล่อแข็งของเสีย

การพัฒนา กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ OPC เป็นวัสดุยึดประสานและมีกากตะกอนโรงชุบในปริมาณต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 2 การพัฒนา กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 162 กก/ซม² และที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าเท่ากับ 368 กก/ซม² เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดเป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

(CSH) ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยามากขึ้น

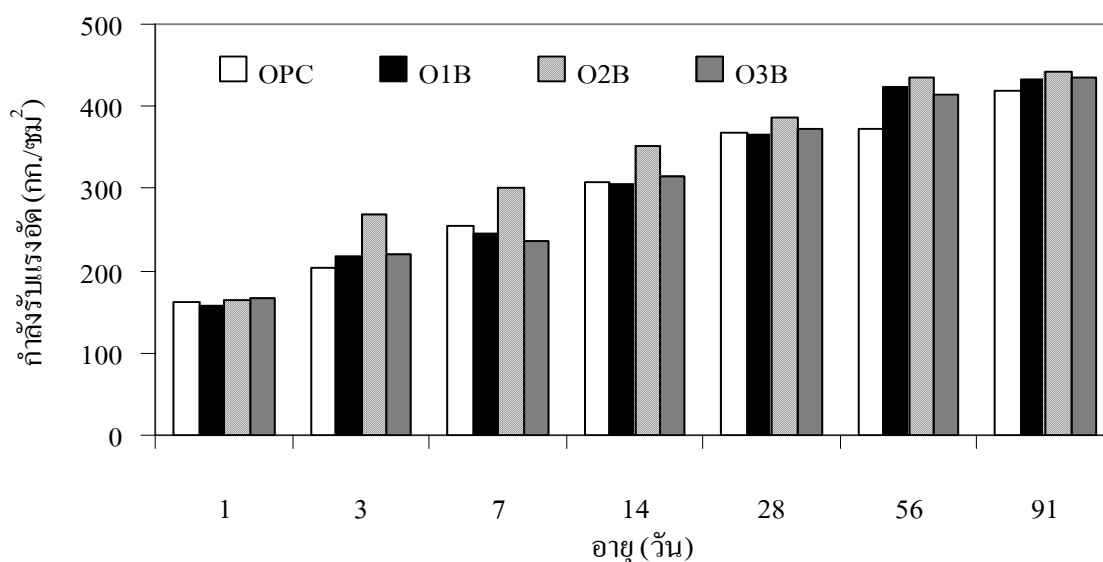


รูปที่ 2 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ OPC เป็นตัวยึดประสาน

เมื่อทำการเติมกากตะกอนโรงชุบในอัตราส่วนวัสดุยึดประสาน:กากตะกอนโรงชุบเท่ากับ 90:10, 70:30 และ 50:50 พบว่า ไม่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วง 7 วันแรก และเริ่มมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดหลังจาก 14 วัน เป็นที่ทราบกันดีว่าโลหะหนักต่างๆที่อยู่ในกากตะกอนจากโรงชุบขัดขวางหรือหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC ดังนั้นจึงไม่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วง 7 วันแรก และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ผสมกากตะกอนโรงชุบในอัตราส่วนวัสดุยึดประสาน:กากตะกอนโรงชุบที่ 90:10, 70:30 และ 50:50 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 10.77, 23.43 และ 10.53 กก/ชม² ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงเกินมาตรฐานการนำก้อนหล่อแข็งของเสียลงแหล่งฝังกลบซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 3.5 กก/ชม²

รูปที่ 3 แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำในปริมาณต่างๆกัน พบว่า กำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน ของซีเมนต์ผสมที่อัตราส่วน OPC:BHA เท่ากับ 90:10, 80:20 และ 70:30 มีค่าเท่ากับ 157, 170 และ 165 กก/ชม² ตามลำดับ และที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่าเท่ากับ 366, 387 และ 372 กก/ชม² ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าสามารถนำเถ้ากลบดำมาแทนที่ OPC ได้สูงสุดถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยให้ค่าการรับกำลังอัดของซีเมนต์ผสมสูงกว่าการแทนที่ในระดับอื่น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เกิดจากการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ และ SiO_2 จากเถ้ากลบดำ ทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นจากการไฮเดรชันตามปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบดำสูงถึงร้อยละ 30 กลับทำให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์

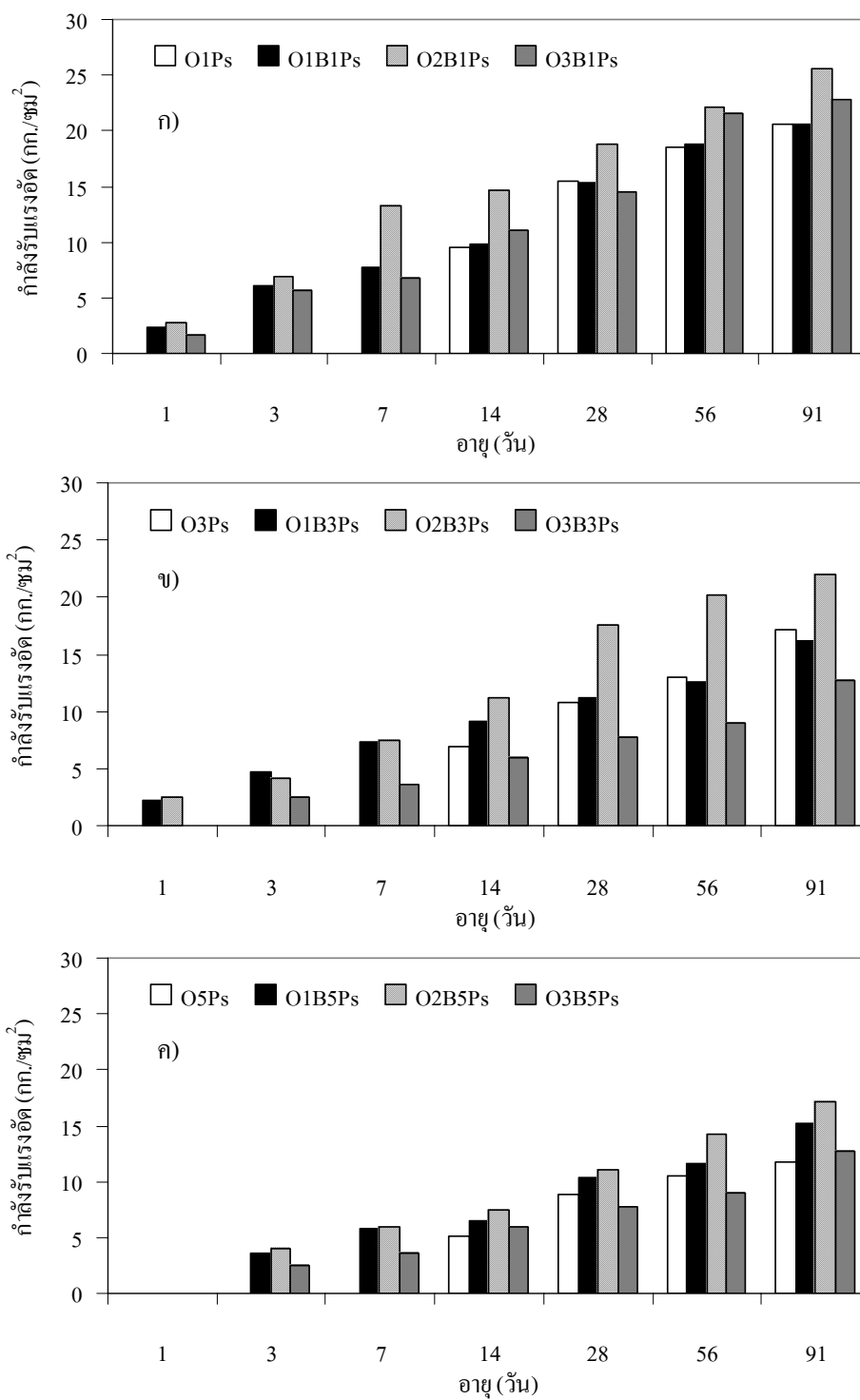
ผสมลดต่ำลงที่ทุกอายุบ่ม เนื่องจากสัดส่วนของ OPC ในส่วนผสมลดลงทำให้ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำลดลง ทำให้มีปริมาณของ Ca(OH)_2 ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบดำ



รูปที่ 3 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบดำ

เมื่อมีการเติมกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักในซีเมนต์ผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบดำดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า ก้อนหล่อแข็งที่ผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบดำที่อัตราส่วน 90:10, 80:20 และ 70:30 ที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 (รูปที่ 4 ก) สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ตั้งแต่อายุ 1 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 2.38, 2.76 และ 1.64 กก/ซม² ตามลำดับ เนื่องจากการแทนที่ OPC ด้วยเถ้าแกลบดำทำให้สภาพความเป็นด่างภายในก้อนหล่อแข็งไม่สูงมากนัก ทำให้ความสามารถในการละลายของโลหะหนักภายในก้อนหล่อแข็งของเสียลดลงจึงไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยลง และที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 15.4, 18.7 และ 14.6 กก/ซม² ตามลำดับ

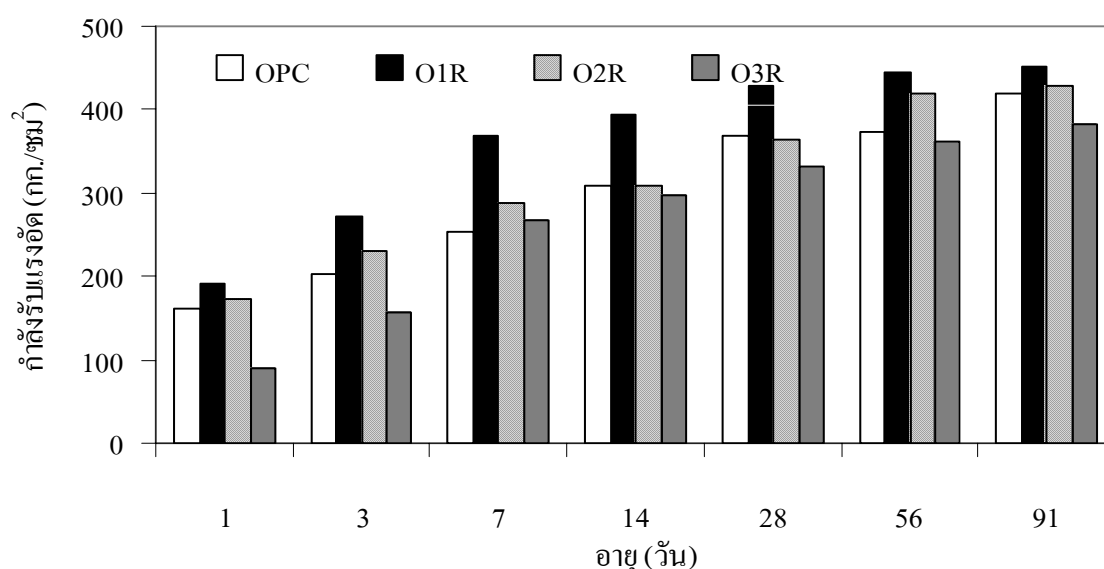
จากรูปที่ 4 ข พบว่า การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ผสมระหว่าง OPC:BHA เท่ากับ 90:10 และ 80:20 ที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 30 จะมีการพัฒนากำลังอัดที่ อายุ 1 วันเท่ากับ 2.25 และ 2.49 กก/ซม² ตามลำดับ และที่อายุ 28 วัน มีค่า 11.3 และ 17.6 กก/ซม² ตามลำดับ ส่วนก้อนหล่อแข็งของเสียที่มี OPC:BHA ที่ 70:30 ไม่สามารถถอดออกจากแบบได้เนื่องจากก้อนตัวอย่างมีความชื้นสูง และมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 และ 28 วันเท่ากับ 3.73 และ 8.11 กก/ซม²



รูปที่ 4 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำที่มีกากตะกอนโรงชุบร้อยละ 10 ข) 30 และ ค) 50 โดยน้ำหนัก

เมื่อเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 50 ในก้อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนซีเมนต์ และถ้า แกลบดำเป็นวัสดุยึดประสาน (รูปที่ 4 ข) พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งทุกอัตราส่วนมี ค่าต่ำกว่าก้อนหล่อแข็งที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 และ 30 โดยที่ อัตราส่วน OPC:BHA ที่ 90:10, 80:20 และ 70:30 จะไม่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วง 1 วัน แรก เนื่องจากปริมาณของกากตะกอนจากโรงชุบที่ผสมเพิ่ม ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์และถ้าแกลบที่เป็น วัสดุยึดประสานลดลง การพัฒนากำลังรับแรงอัดจึงลดลง และปริมาณกากตะกอนจากโรงชุบที่ เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งมีมากพอ ที่จะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 11.6, 14.2 และ 9.1 กก/ซม² ตามลำดับเป็นที่ นำสังเกตว่าโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอนโรงชุบเข้ารบกวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC ทำ ให้ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ OPC เป็นวัสดุยึดประสานเพียงชนิดเดียวไม่สามารถพัฒนากำลังอัดได้ ในช่วง 7 วันแรก แต่เมื่อมีการนำ BHA มาผสมกับ OPC โดยนำ BHA มาแทนที่ OPC ในปริมาณ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถลดการแทรกสอดของโลหะหนักต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุยึด ประสานได้ โดยสังเกตเห็นว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโลหะหนักอยู่ร้อยละ 50 ให้ค่า กำลังอัดที่อายุ 3 วันสูงกว่ามาตรฐานการฝักรูป ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายก้อนหล่อแข็งของเสียไป กำจัดในแหล่งฝังกลบได้เร็วขึ้น

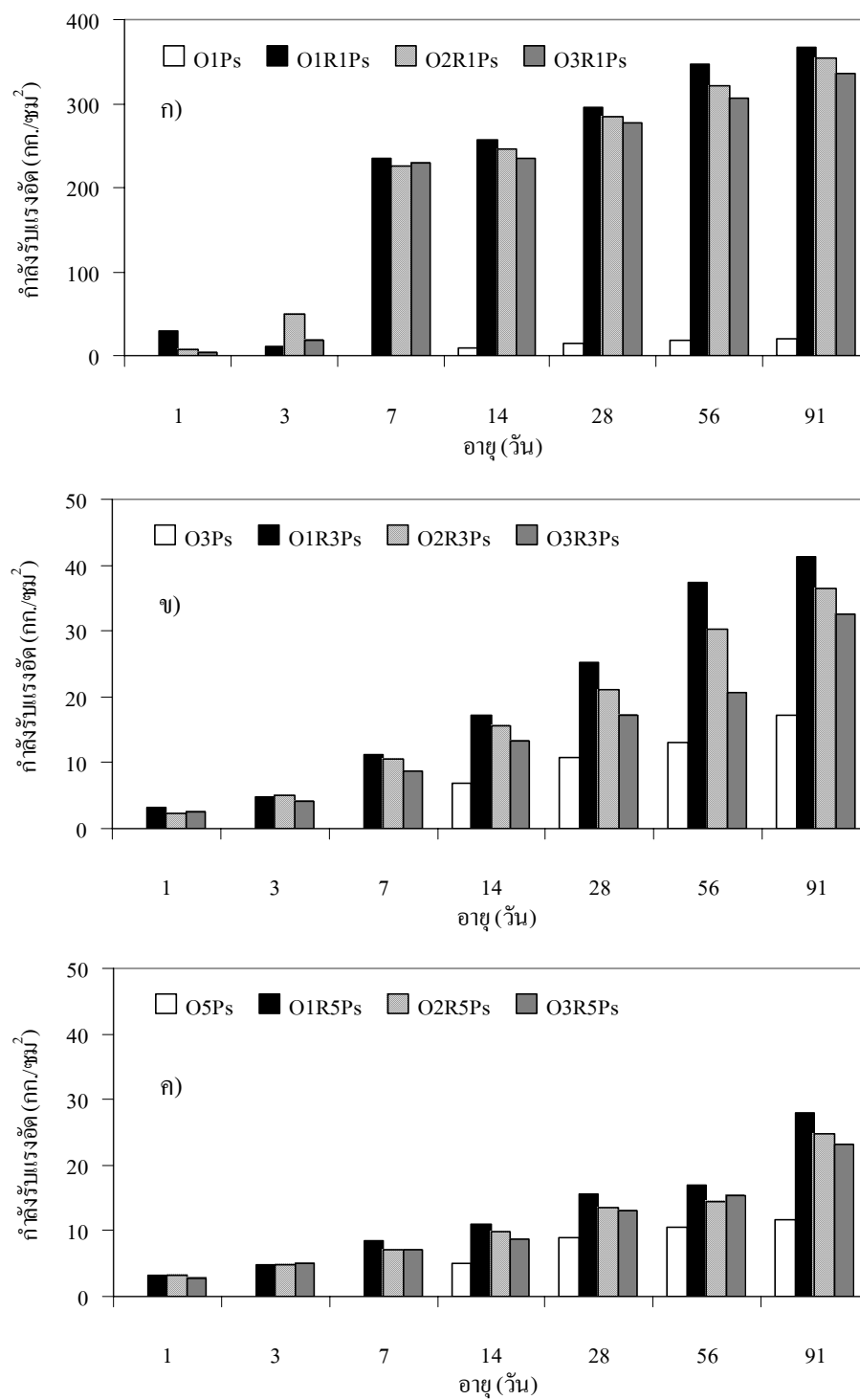
การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่มีการแทนที่ OPC ด้วย RHA ในอัตราส่วน 90:10, 80:20 และ 70:30 แสดงดังรูปที่ 5 ผลการทดลองพบว่าสามารถนำ RHA มาแทนที่ OPC สูงสุดเพียงร้อยละ 10 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อระดับการแทนที่ OPC ด้วย RHA เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำที่ ใช้ในการผสมเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดต่ำลง



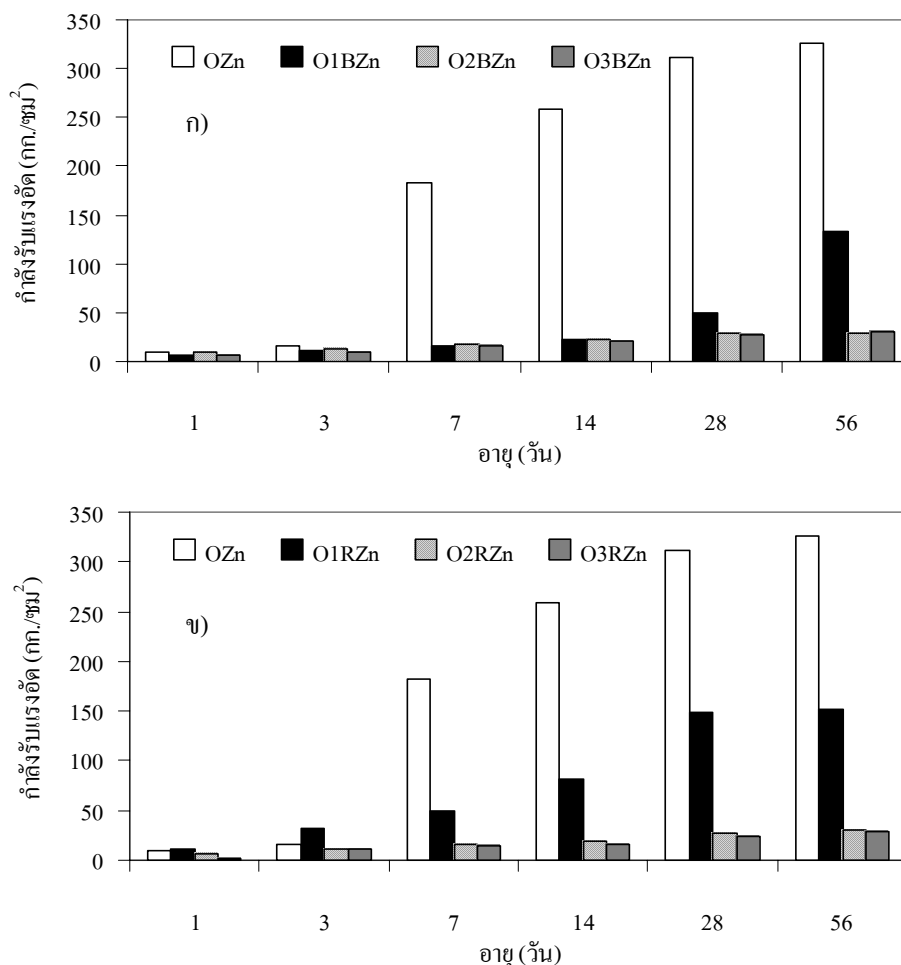
รูปที่ 5 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมถ้าแกลบสังเคราะห์

เมื่อมีการเติมกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 ในก้อนหล่อแข็งที่ใช้ OPC และ RHA เป็นวัสดุยึดประสาน (รูปที่ 6) พบว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 29.4, 8.2 และ 3.9 กก/ซม² ตามลำดับ และที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 295, 284 และ 278 กก/ซม² ตามลำดับ (รูปที่ 6 ก) เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนโรงชุบเป็นร้อยละ 30 และ 50 ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ทุกอายุการบ่มตัวอย่าง (รูปที่ 6 ก และ ข)

ในทำนองเดียวกับถ้าแลกเปลี่ยนกับ ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ OPC และ RHA เป็นวัสดุยึดประสานสามารถลดการแทรกสอดของโลหะหนักต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุยึดประสานได้ โดยสังเกตเห็นว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่ทุกระดับการแทนที่ OPC ด้วย RHA และมีกากตะกอนโลหะหนักอยู่ร้อยละ 50 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วันสูงกว่ามาตรฐานการฝังกลบ ในขณะที่ก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีการแทนที่ OPC ด้วย RHA ไม่สามารถพัฒนากำลังอัดได้ในช่วงอายุ 7 วันแรก แต่ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 14 วัน เท่ากับ 10, 7 และ 5 กก/ซม² เมื่อก้อนหล่อแข็งของเสียมีปริมาณกากตะกอนโรงชุบร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักตามลำดับ

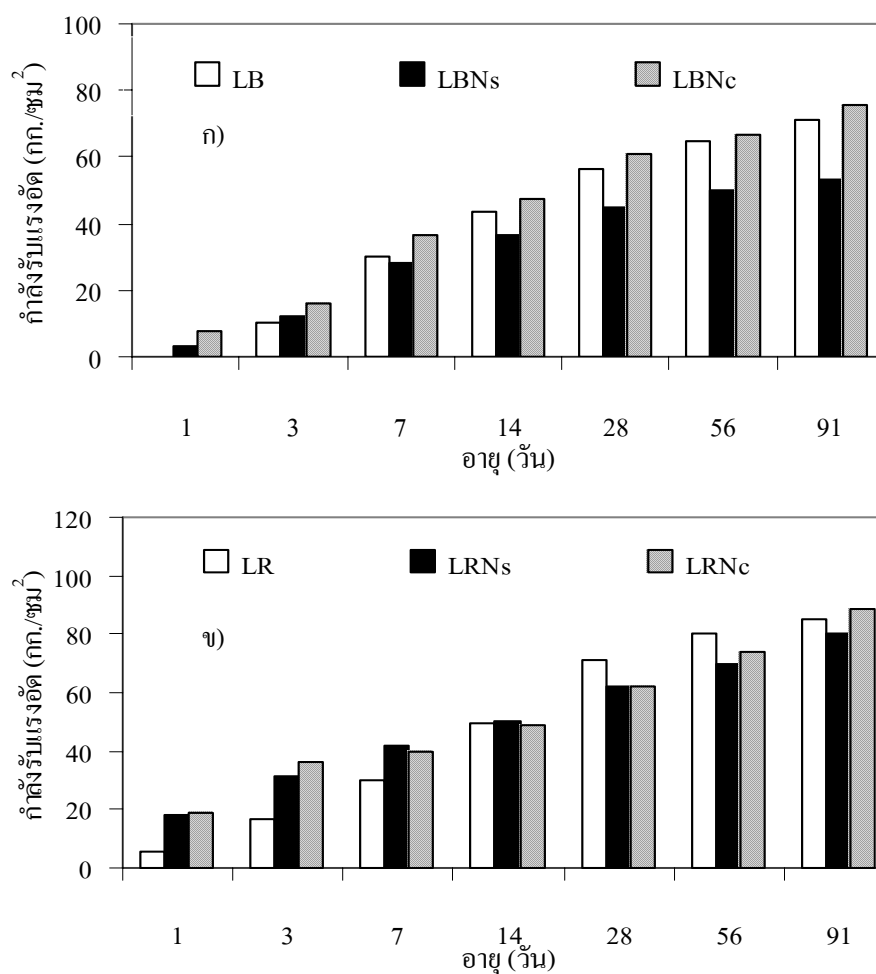


รูปที่ 6 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบล้างเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ
ร้อยละ ก) 10 ข) 30 และ ค) 50 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 7 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่เติมสังกะสีสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10
ก) OPC+BHA ข) OPC+RHA

รูปที่ 7 แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของ OPC, OPC+BHA และ OPC+RHA ที่มีการเติมสังกะสีสังเคราะห์ ($\text{Zn}(\text{OH})_2$) ร้อยละ 10 พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการแทนที่ OPC ด้วย BHA หรือ RHA ในช่วงอายุการบ่ม 1 วัน มีค่าเท่ากับ 10.2 กก/ซม² และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 312 กก/ซม² สาเหตุที่ กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมสังกะสีสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุการบ่ม 3 วันแรกต่ำ เนื่องจากสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่ละลายออกมาสามารถทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} และ OH^- เกิดเป็น Calcium Zinc Hydrate เคลือบบนผิวของเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านไปทำปฏิกิริยาได้อย่างช้าๆ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดต่ำ เมื่อเวลาผ่านไปแรงดันออสโมติกภายในอนุภาคปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้ชั้น Calcium Zinc Hydrate ที่เคลือบอยู่เกิดแตกออก และอนุภาคปูนซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ตามปกติ ทำให้ในช่วงอายุการบ่มหลังจาก 7 วัน สามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อมีการแทนที่ OPC ด้วย BHA และ RHA ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 6.5, 5.9, 2.3 และ 10.8, 9.1, 6.8 กก/ซม² ตามลำดับ และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 49.9, 27, 24.3 และ 149, 28.3, 27.2 กก/ซม² ตามลำดับ



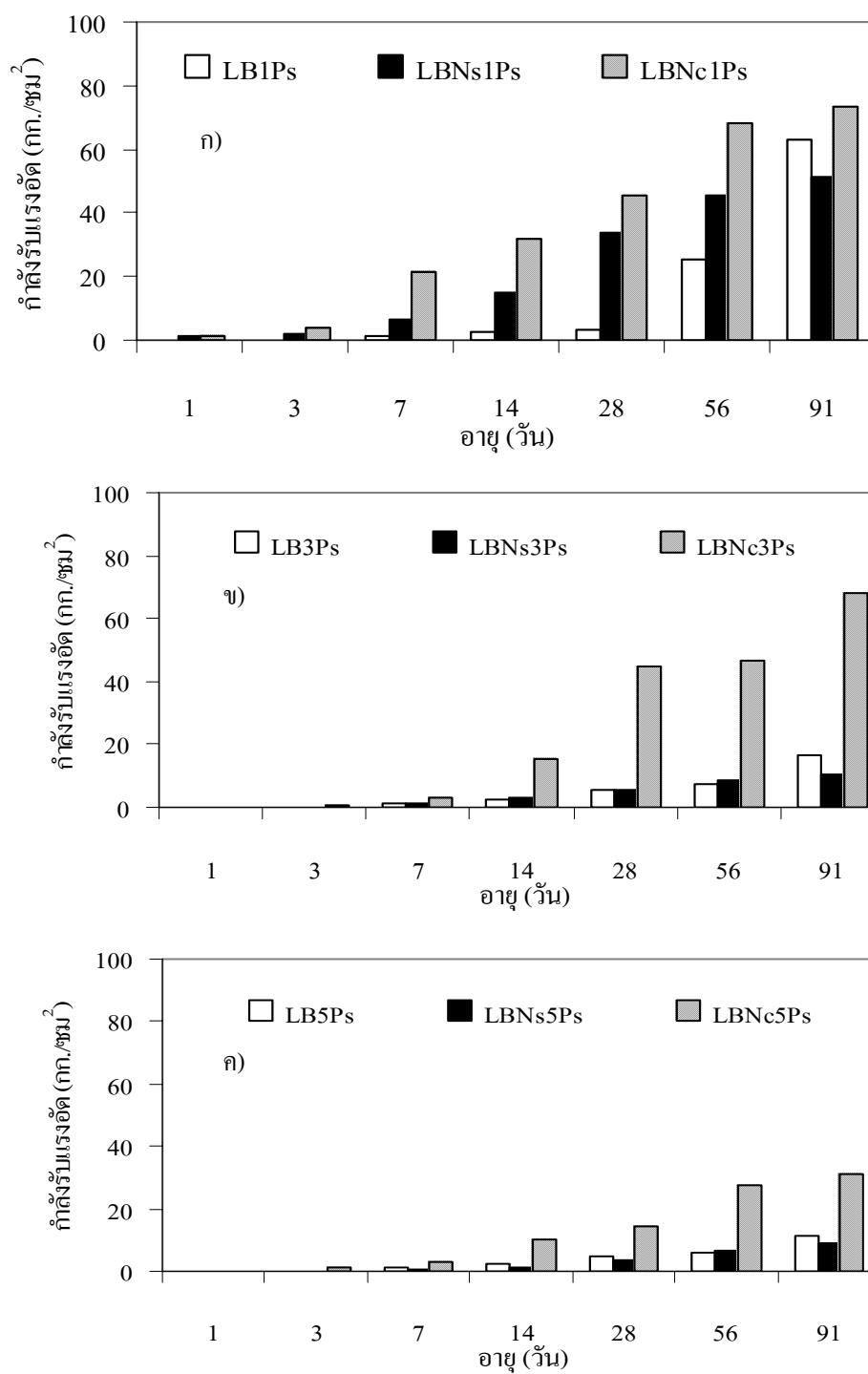
รูปที่ 8 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมในสถานะที่มีและไม่มี การเติมโซเดียมซิลิเกต (Ns) และโซเดียมคาร์บอเนต (Nc): ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ (LB) ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ (LR)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่เตรียมจากปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสถานะที่มีและไม่มี การกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 2 ของ Na_2O ดังแสดงในรูปที่ 8 ก และ ข ผลการทดสอบพบว่าที่อายุการบ่ม 1 วัน ก่อนหล่อแข็งที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในสถานะที่ไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยา ไม่สามารถถอดออกจากแบบได้ ส่วนปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 5.3 กก/ซม² ในขณะที่ซีเมนต์ผสมจากปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลานด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 1 วัน เท่ากับ 3.0 และ 18.4 กก/ซม² เนื่องจาก โซเดียมซิลิเกตสามารถเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้ผลผลิตเป็น CSH gel ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ NaOH

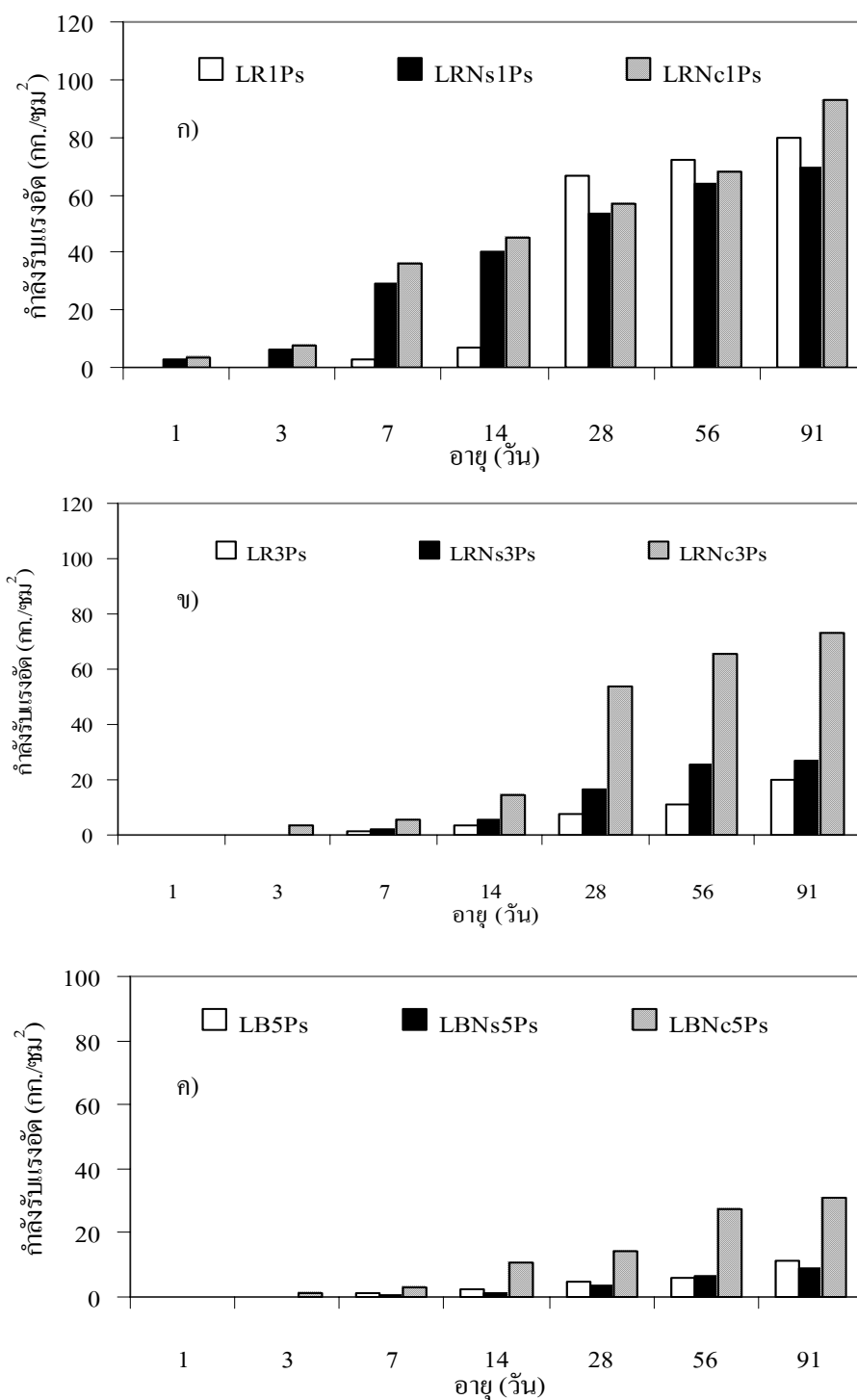
เป็นการเพิ่ม OH^- ในระบบ ทำให้ pH เพิ่มขึ้น จึงกัดกร่อนพันธะ Si-O ได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิด CSH gel อย่างรวดเร็วและตกตะกอนบนผิวหน้าของอนุภาคเถ้าแกลบดำ หรือเถ้าแกลบสังเคราะห์ ซึ่งขัดขวางการซึมผ่านของน้ำ และไอออนต่างๆ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจึงลดลงในระยะต่อมา ทำให้กำลังอัดของซีเมนต์ผสมที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุม (ไม่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต) หลังจาก 7 วันสำหรับปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและหลังจากอายุ 28 วันสำหรับปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์

การเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วง 3 วันแรกของซีเมนต์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับการเพิ่มสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างปูนขาวกับเถ้าแกลบดำและปูนขาวกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ได้ดีกว่าสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมคาร์บอเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ NaOH เป็นการเพิ่ม OH^- ในสารละลายจึงส่งผลให้ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถกัดกร่อนพันธะ Si-O ได้ดีขึ้น

เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักในซีเมนต์ผสมที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในสถานะที่มีและไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต แสดงในรูปที่ 9 และ 10 ก-ค พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียลดลงตามปริมาณกากตะกอนโรงชุบที่เพิ่มขึ้น สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตพบวาก่อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโรงชุบร้อยละ 50 ให้ค่ากำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 5.0 และ 4.6 กก/ซม² (รูปที่ 9 ค และ 10 ค) สำหรับตัวอย่างที่มีปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์เป็นวัสดุยึดประสานตามลำดับ



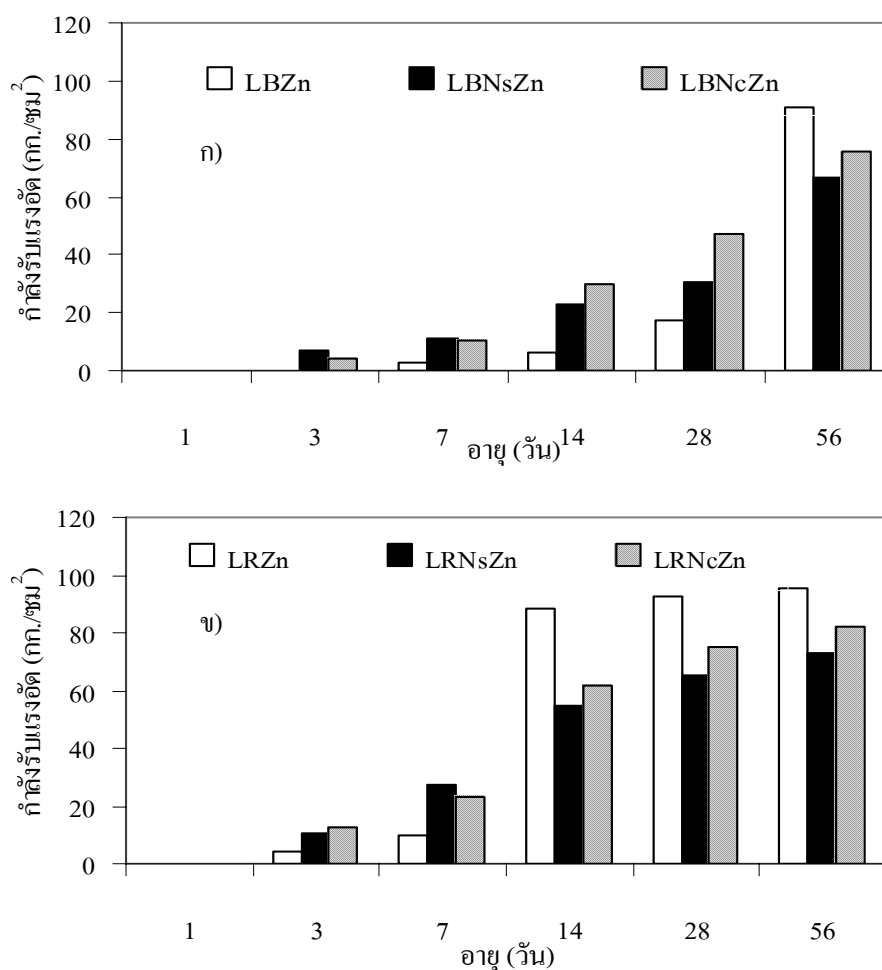
รูปที่ 9 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนาขาวผสมเก้าเกลบดำที่มีและไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา และเติมกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ ก) 10 ข) 30 และ ค) 50



รูปที่ 10 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปุนขาวผสมเก่าเกลบสังเคราะห์ที่มีและไม่มีภาระกระตุ้น
 ปฏิกริยา และเติมกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ ก) 10 ข) 30 และ ค) 50

ในขณะที่ก่อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 50 ในสภาวะที่มีการ
 กระตุ้นปฏิกริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน

เท่ากับ 3.7 และ 14.3 กก/ชม² (รูปที่ 9 ค) สำหรับตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำเป็นวัสดุยึดประสาน และเท่ากับ 13.9 และ 21.5 กก/ชม² (รูปที่ 10 ค) สำหรับตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์เป็นวัสดุยึดประสาน โดยก่อนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตให้ค่ากำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการฝังกลบเรียงตามลำดับดังนี้ ตัวอย่างที่มีสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตประมาณ 7-14 วัน สารละลายโซเดียมซิลิเกตประมาณ 14-28 วัน และที่ไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาประมาณ 28 วัน



รูปที่ 11 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่เติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10; ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์

รูปที่ 11 ก แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำเป็นวัสดุยึดประสาน ที่มีการเติมโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า ที่อายุการบ่ม 3 วันแรกไม่มีการพัฒนากำลังอัด แต่ในสภาวะที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 6.8 และ 4.0 กก/ชม² และที่อายุ 56 วัน เท่ากับ 66.9 และ 75.6 กก/ชม² ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุมซึ่งให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 90.7 กก/ชม² สำหรับก้อนหล่อแข็งสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์เป็นวัสดุยึด

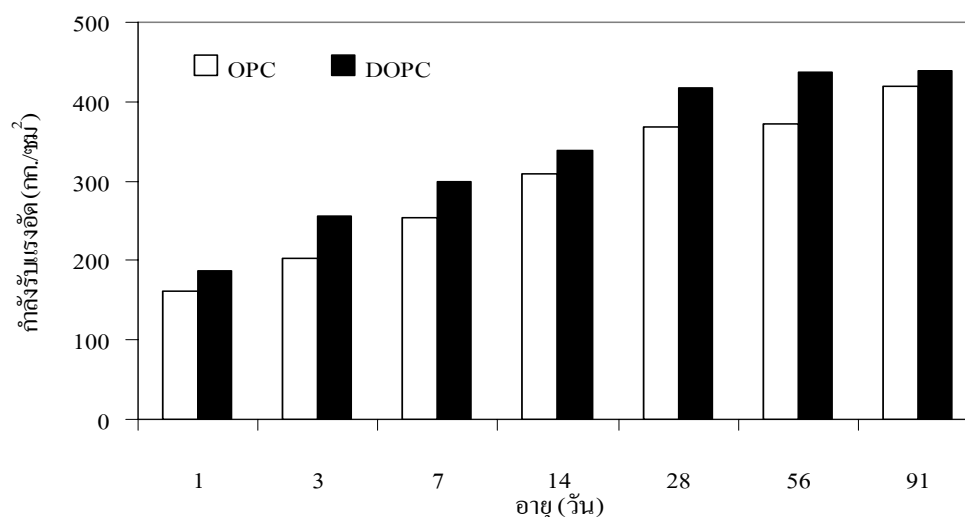
ประสาน (รูปที่ 11 ข) พบว่าที่อายุการบ่ม 3 วันตัวอย่างที่ไม่มีและมีส่วนละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 4.5, 10.8 และ 12.4 กก/ซม² ตามลำดับ และที่อายุการบ่ม 14 วัน มีค่า 88.3, 54.8 และ 61.9 กก/ซม² ตามลำดับ

เป็นที่น่าสังเกตว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์เป็นวัสดุยึดประสานมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดดีกว่าปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีส่วนละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบที่ได้จากการสังเคราะห์ในสภาวะที่มีการควบคุมมีความไวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเถ้าแกลบดำ เพราะ SiO₂ ที่อยู่ในเถ้าแกลบสังเคราะห์อยู่ในรูปอสัณฐาน (รูปที่ 1) นอกจากนี้ตัวอย่างที่มีส่วนละลายโซเดียมคาร์บอเนตให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่มีส่วนละลายโซเดียมซิลิเกต สาเหตุหนึ่งน่าจะมาจากความต้องการน้ำสำหรับตัวอย่างที่มีส่วนละลายโซเดียมซิลิเกตสูงกว่าทำให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าที่ทุกอายุบ่ม

4.1.2 ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมของวัสดุยึดประสานต่อสมบัติของก้อนหล่อแข็งของเสีย

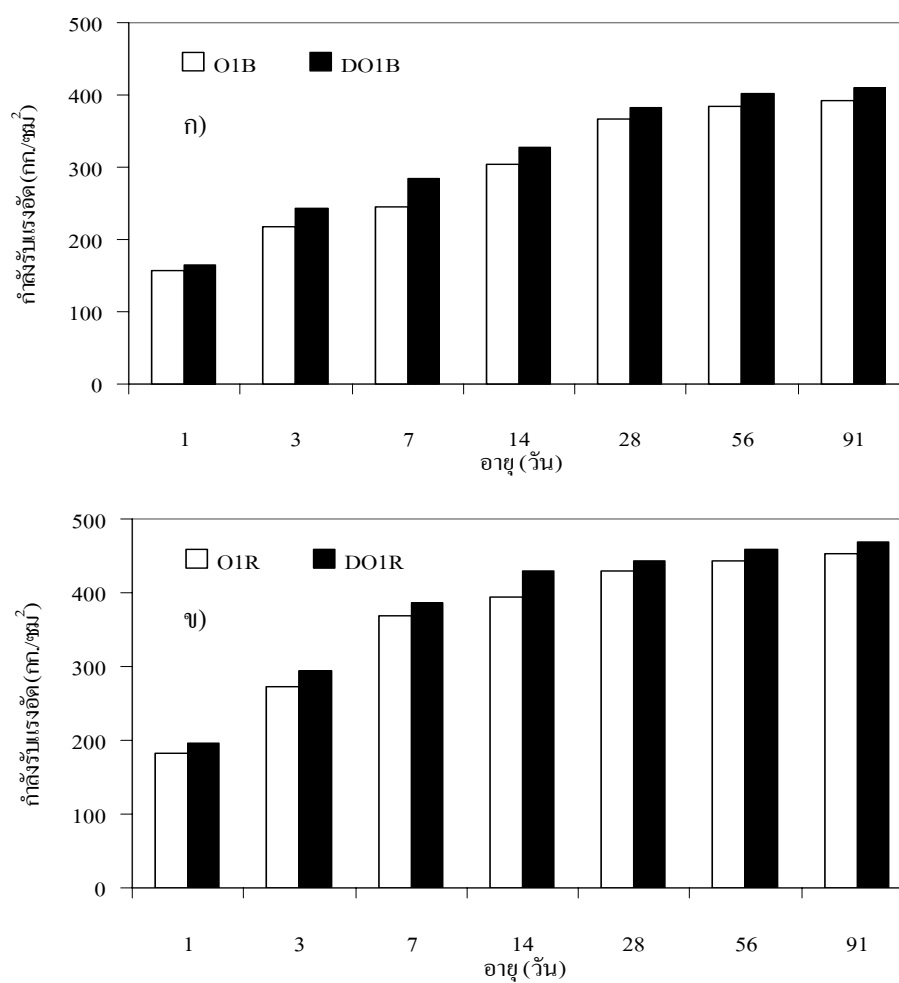
ในงานวิจัยนี้ได้นำการปรับปรุงวิธีการผสมของวัสดุยึดประสานมาใช้เพื่อลดการแทรกสอดของโลหะหนัก โดยทำการผสมวัสดุยึดประสานกับน้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงเติมกากตะกอนโลหะหนักแล้วทำการกวนผสมอีกครั้งหนึ่ง และศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียของ OPC, OPC ที่มีการแทนที่ด้วย BHA หรือ RHA ในอัตราส่วน OPC:BHA หรือ OPC:RHA ที่ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 และปูนขาวผสม BHA หรือ RHA ในอัตราส่วน 50:50 ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 จากนั้นเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 ตามลำดับ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ในปริมาณร้อยละ 10

รูปที่ 12 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของ OPC ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 และ 28 วัน เท่ากับ 187 และ 417 กก/ซม² ซึ่งมีค่าสูงกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการปรับปรุงวิธีการผสมร้อยละ 115 และ 113 เนื่องจากการกวนผสมในครั้งที่ 2 ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อีกครั้ง ทำให้ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น

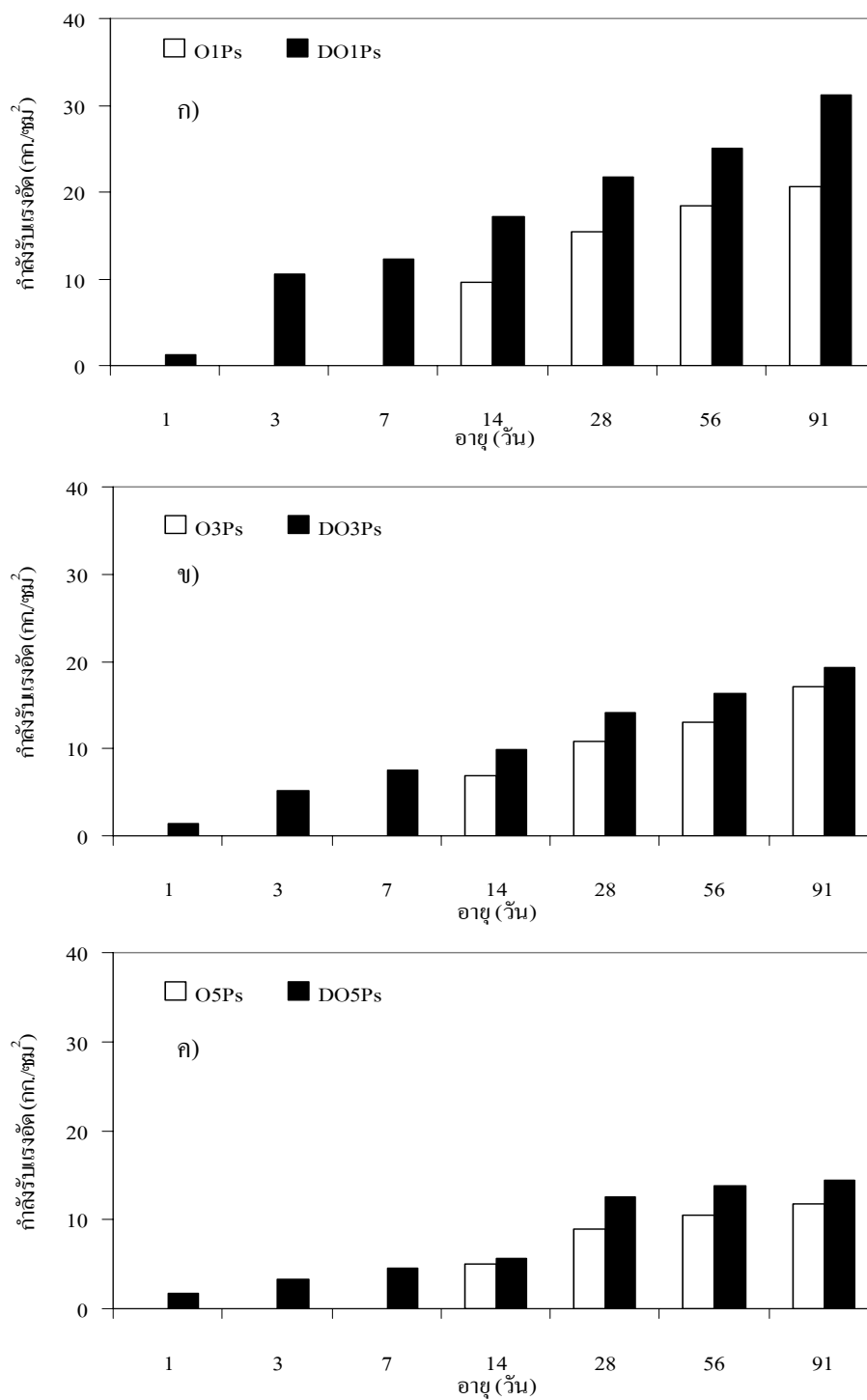


รูปที่ 12 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม
ก) ผสมแบบปกติ และ ข) ปรับปรุงวิธีการผสม

ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการแทนที่ OPC ด้วย BHA หรือ RHA ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าการปรับปรุงวิธีการผสมทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งมีค่าสูงขึ้นกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการปรับปรุงวิธีการผสมในช่วงประมาณร้อยละ 101 – 121 ดังแสดงในรูปที่ 13 ก-ข และ ภาคผนวกที่ ผ. 4 และ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 13 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้นหล่อแข็งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสม ก) 10 % ถั่วแกลบดำ และ ข) 10 % ถั่วแกลบสังเคราะห์

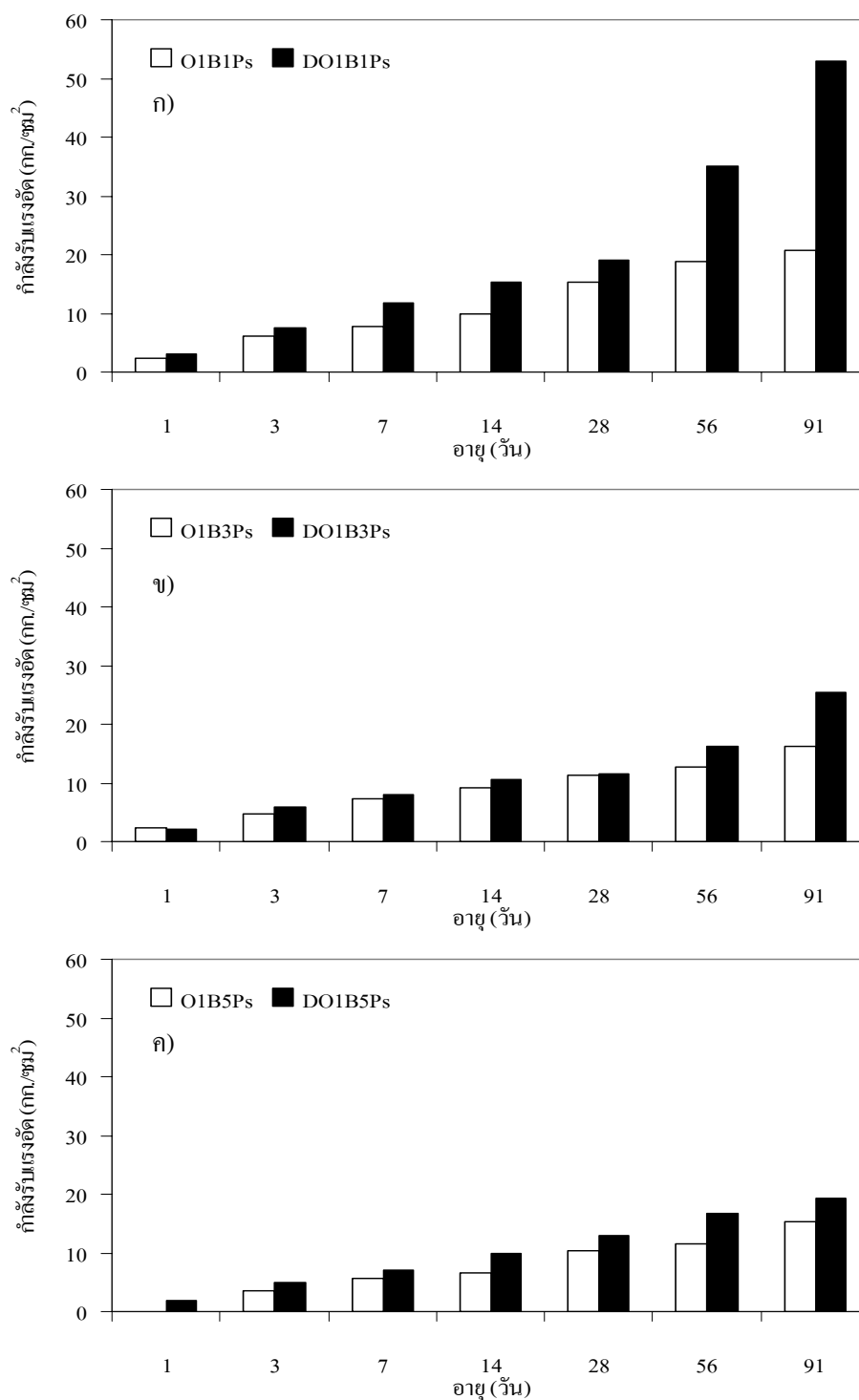


รูปที่ 14 การพัฒนากัลังรับแรงอัดของกัอนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มีการปรับปรุงวิธีการผสมของซีเมนต์เพสต์ที่มีกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ ก) 10 ข) 30 และ ค) 50 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 14 ก-ค แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 ผลการทดลองพบว่าในกรณีที่ไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมก้อนตัวอย่างไม่สามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดได้ในช่วงอายุ 7 วันแรก แต่เมื่อมีการปรับปรุงวิธีการผสมโดยการเติมกากตะกอนที่หลังพบว่าก้อนหล่อแข็งสามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดได้มากพอที่จะเคลื่อน ย้ายไปทิ้งในแหล่งฝังกลบได้ที่อายุ 3 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.5, 5.1 และ 3.4 กก/ซม² เมื่อมีกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 ตามลำดับ เนื่องจากการเติมกากตะกอนที่หลังทำให้ OPC สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ในระดับหนึ่งโดยไม่ถูกขัดขวางจากโลหะหนักในกากตะกอนเหมือนการผสมแบบปกติ เมื่อทำการเติมกากตะกอนจากโรงชุบลงไป ต้องมีการกวนผสมอีกครั้ง ทำให้ OPC ที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ตกตะกอนเคลือบอนุภาค OPC ถูกทำลาย ทำให้อนุภาค OPC สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้อีก นอกจากนี้การปรับปรุงวิธีผสมสามารถลดปริมาณความต้องการน้ำของแต่ละส่วนผสมลงได้ (ภาคผนวกที่ ผ2) ซึ่งก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อมีการแทนที่ OPC ด้วย BHA ปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และมีกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 15 ก-ค และภาคผนวก ผ. 6 จากรูป พบว่า การพัฒนา กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่เตรียมจาก OPC ผสม BHA ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการผสมแบบปกติ โดยเฉพาะก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการแทนที่ OPC ด้วย BHA ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่ผสมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 50 ไม่มีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุการบ่ม 1 วัน แต่เมื่อมีการปรับปรุงวิธีการผสมพบว่า ก้อนหล่อแข็งของเสียสามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัดได้เท่ากับ 2, 2 และ 1 กก/ซม² ตามลำดับ ที่อายุ 1 วัน

สำหรับตัวอย่างที่มีการแทนที่ OPC ด้วย BHA ในระดับที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็น 20 และ 30 ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียมีค่าลดลงตามระดับการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของ BHA ในส่วนผสมส่งผลให้สัดส่วนของ OPC ในส่วนผสมมีค่าลดลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของ BHA ในส่วนผสมยังทำให้ความต้องการน้ำในแต่ละส่วนผสมเพิ่มขึ้น (ภาคผนวกที่ ผ. 2) ซึ่งทั้งสองปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียลดลง ผลการทดลองพบว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการแทนที่ OPC ด้วย BHA ในระดับร้อยละ 20 สามารถรองรับกากตะกอนโรงชุบได้สูงถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 4 กก/ซม² (ภาคผนวก ผ. 6) ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการฝังกลบของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ที่ 3.5 กก/ซม²

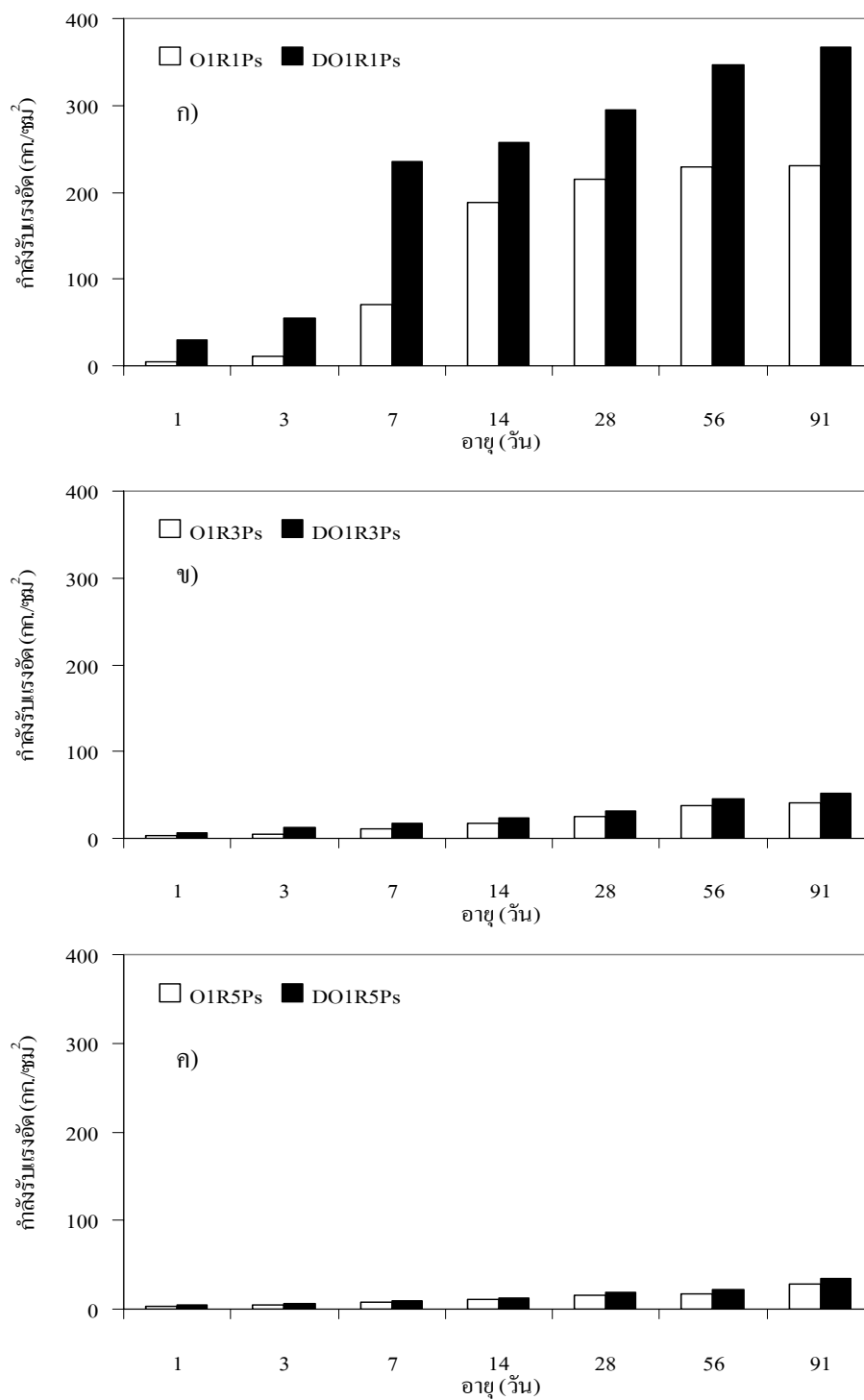


รูปที่ 15 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มี และไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำในปริมาณร้อยละ 10 และกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ ก) 10 ข) 30 และ ค) 50 โดยน้ำหนัก

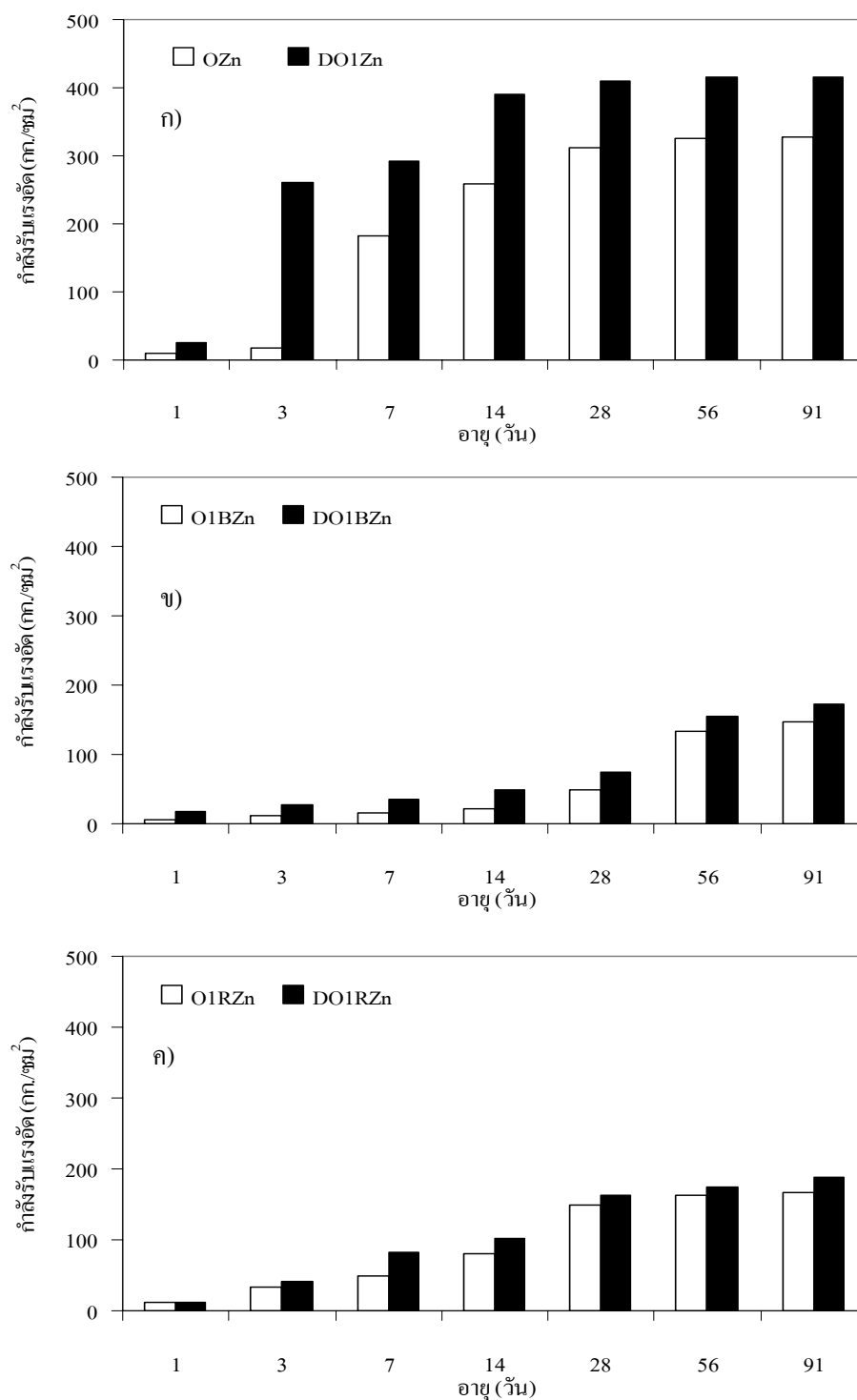
รูปที่ 16 ก - ค แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการแทนที่ OPC ด้วย RHA ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า การปรับปรุงวิธีการผสมทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียสูงกว่าตัวอย่างที่เตรียมโดยการผสมแบบปกติที่ทุกอัตราส่วนผสม โดยก้อนหล่อแข็งของเสียที่เตรียมจาก OPC ผสม RHA ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงการผสมโดยการเติมกากตะกอนที่เหลือ สามารถรองรับกากตะกอนโรงชุบได้สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 5 กก/ซม² ในขณะที่ตัวอย่างที่มีส่วนผสมเดียวกันนี้แต่ผสมตามปกติให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 3.3 กก/ซม² เท่านั้น (ภาคผนวกที่ ผ. 7)

เป็นที่น่าสังเกตว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการแทนที่ OPC ด้วย RHA ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการแทนที่ OPC ด้วย BHA ที่ทุกระดับการแทนที่และที่ทุกอายุบ่มอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งที่ตัวอย่างที่มี RHA มีความต้องการน้ำสูงกว่าตัวอย่างที่มี BHA ที่เป็นเช่นนั้นน่าจะมาจากตัวของเถ้าแกลบเองซึ่งจากการทดสอบความไวในการเกิดปฏิกิริยาโดยการทดสอบค่าดัชนีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันพบว่า RHA มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีกว่า BHA

รูปที่ 17 ก-ค แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของ OPC, OPC+BHA และ OPC+RHA ที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ($Zn(OH)_2$) ร้อยละ 10 พบว่า การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการปรับปรุงวิธีการผสมมีค่าสูงกว่าที่มีการผสมแบบปกติ กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการแทนที่ OPC ด้วย BHA หรือ RHA ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม ในช่วงอายุการบ่ม 1 วัน มีค่าเท่ากับ 26 กก/ซม² และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 410 กก/ซม² ซึ่งมีค่ามากกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการปรับปรุงวิธีการผสมร้อยละ 260 และ 132 ตามลำดับ และเมื่อมีการแทนที่ OPC ด้วย BHA และ RHA ในปริมาณร้อยละ 10 ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม มีค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน มีค่าเท่ากับ 17 และ 12.5 กก/ซม² ตามลำดับ และที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 75 และ 162 กก/ซม² ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่ได้ปรับปรุงวิธีการผสมในช่วงร้อยละ 116 - 260



รูปที่ 16 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 และกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ ก) 10 ข) 30 และ ค) 50 โดยน้ำหนัก

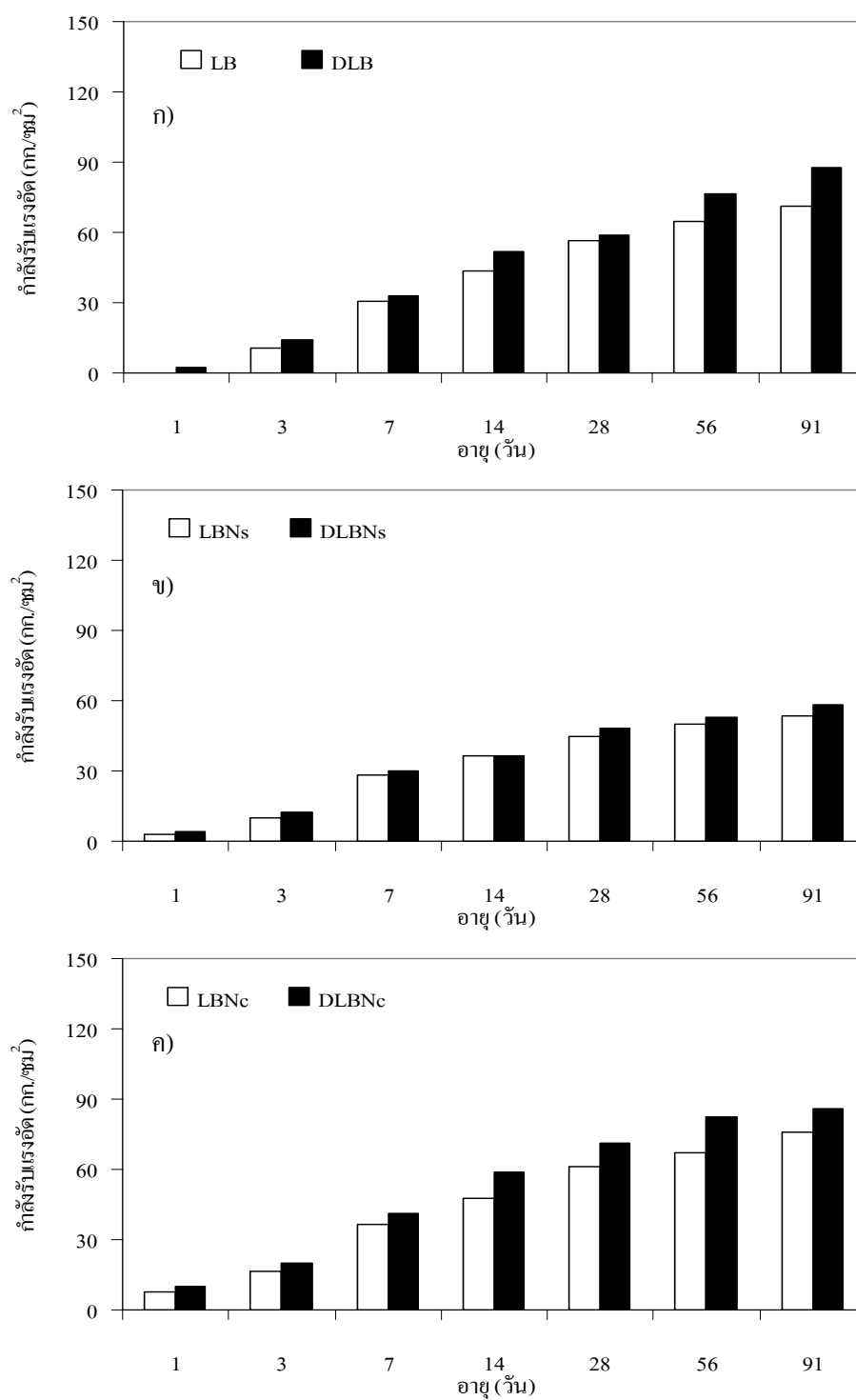


รูปที่ 17 การพัฒนากําลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมสำหรับ ก) OPC ข) OPC+10%BHA และ ค) OPC+10%RHA

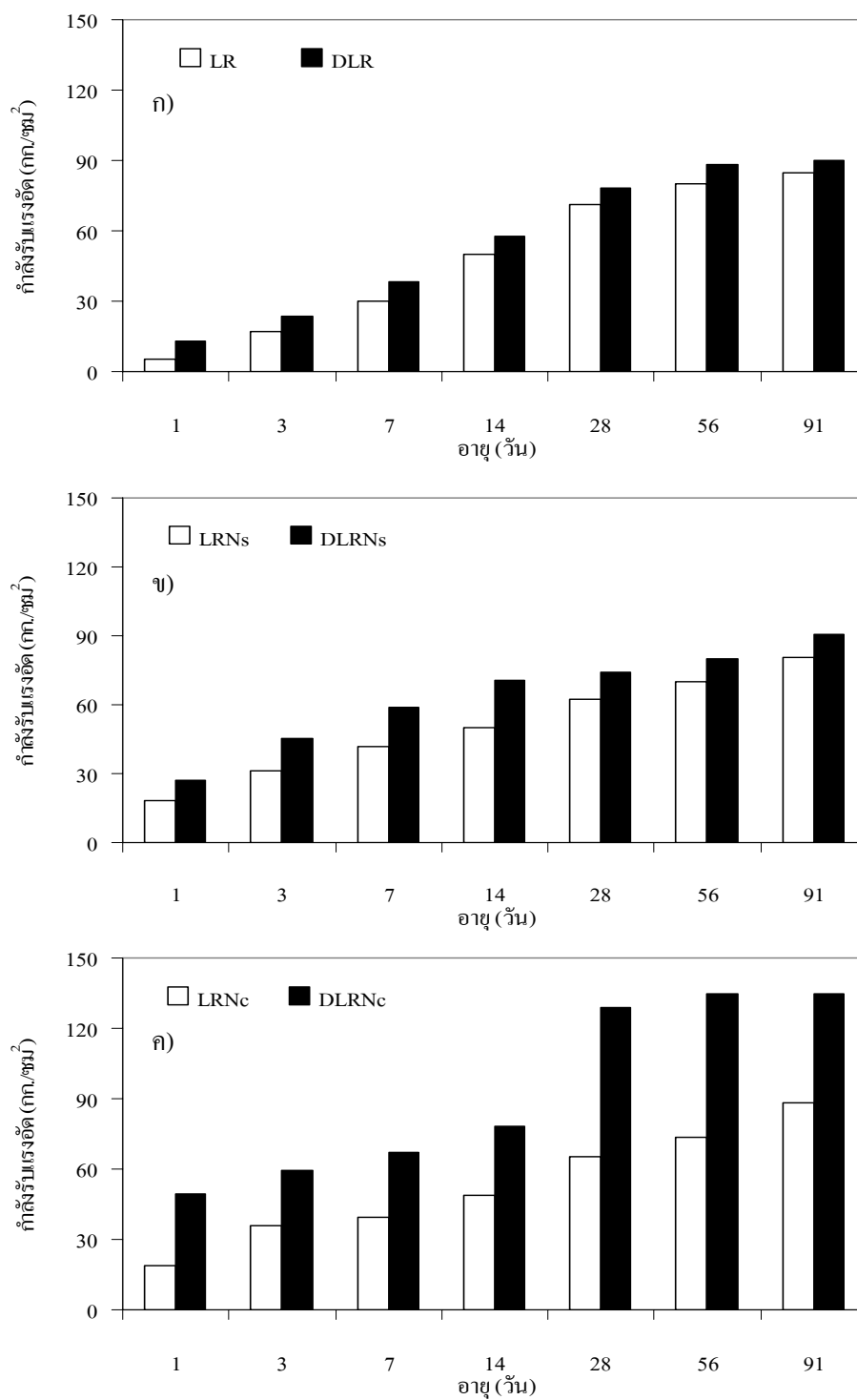
การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมที่เตรียมจากปูนขาวผสม BHA และปูนขาวผสม RHA ในอัตราส่วน 1:1 ในสถานะที่มีและไม่มีสารกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตร้อยละ 2 ของ Na_2O ที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม แสดงในรูปที่ 18 และ 19 ก-ค ผลการทดสอบพบว่าที่อายุการบ่ม 1 วัน ตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวผสม BHA ในสถานะที่ไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยา ไม่สามารถถอดออกจากแบบได้ แต่เมื่อมีการปรับปรุงวิธีการผสมตัวอย่างสามารถให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 2.42 กก/ซม^2 (รูปที่ 18 ก) ในขณะที่ปูนขาวผสม RHA ที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 12.93 และ 5.3 กก/ซม^2 (รูปที่ 19 ก)

เมื่อมีการใช้สารเคมีกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาวผสม BHA และปูนขาวผสม RHA ด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต จะเห็นได้ว่าซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาวผสม BHA และปูนขาวผสม RHA ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 1 วัน เท่ากับ 4 และ 26.82 กก/ซม^2 ตามลำดับ (รูปที่ 18 และ 19 ข) เนื่องจาก โซเดียมซิลิเกตสามารถเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้ผลผลิตเป็น CSH gel ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ NaOH เป็นการเพิ่ม OH^- ในระบบ ทำให้ pH เพิ่มขึ้น จึงกัดกร่อนพันธะ Si-O ได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิด CSH gel อย่างรวดเร็วและตกตะกอนบนผิวหน้าของอนุภาค BHA หรือ RHA ซึ่งขัดขวางการซึมผ่านของน้ำ และอ็อกไซด์อื่นๆ ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจึงลดลงในระยะต่อมา และเมื่อมีการกวนผสมอีกครั้งทำให้ CSH gel ที่ตกตะกอนบนผิวของแฉกเกลบถูกทำลาย ทำให้อนุภาคของแฉกเกลบที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาสามารถทำปฏิกิริยาต่อได้ ทำให้กำลังอัดของตัวอย่างที่เตรียมโดยการปรับปรุงวิธีการผสมมีค่ากำลังอัดสูงกว่าที่เตรียมโดยการผสมตามปกติ

อย่างไรก็ดีการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต ส่งผลให้ค่ากำลังอัดของซีเมนต์ผสมในระยะยาวมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุม (ไม่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต) โดยสังเกตเห็นว่าซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาวผสม BHA และ ปูนขาวผสม RHA ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่าชุดควบคุม (ไม่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต) หลังจาก 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ สำหรับการกระตุ้นปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตนั้นส่งผลต่อการพัฒนา กำลังอัดของซีเมนต์ผสมในลักษณะที่คล้ายกับตัวอย่างที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกตทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม แต่ส่งผลในทางบวกต่อการพัฒนา กำลังอัดมากกว่าในทุกช่วงอายุที่ทำการทดสอบ (รูปที่ 18 และ 19 ค)



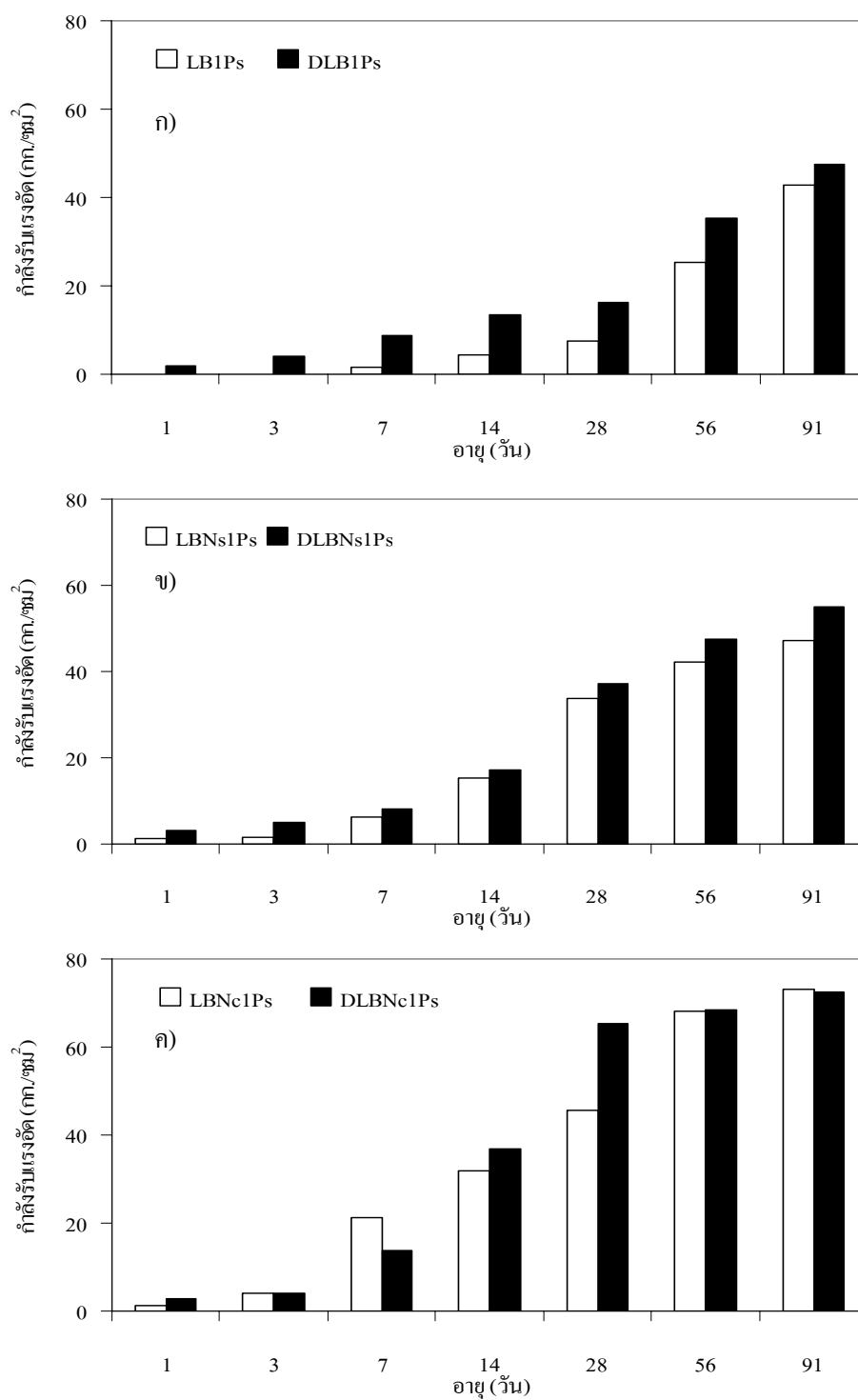
รูปที่ 18 การพัฒนากำลังรับแรงอัดสำหรับปูนาขาวผสมเก้าเกลบดำที่มีและไม่มีการปรับปรุงวิธีการผสม ก) ไม่เติมสารกระตุ้น ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



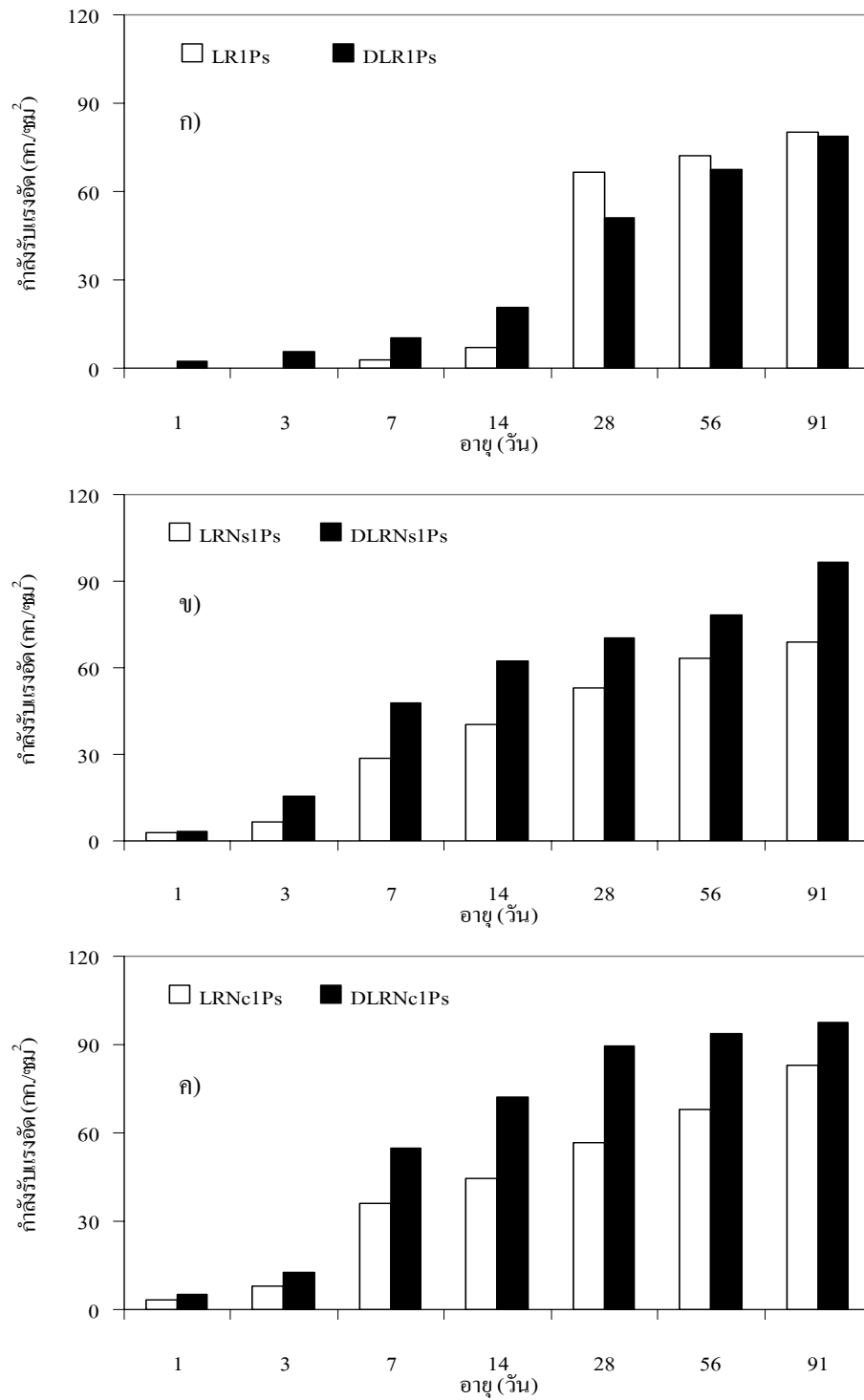
รูปที่ 19 การพัฒนากำลังรับแรงอัดสำหรับปูขาวผสมเก้าเกลบสังเคราะห์ที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม ก) ไม่เติมสารกระตุ้น ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต

เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในซีเมนต์ผสมที่ใช้ปูนขาวผสม BHA และปูนขาวผสม RHA ในสถานะที่มีและไม่มี การกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต แสดงในรูปที่ 20 และ 21 ก-ค พบว่า กำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียลดลงที่ทุกอายุการทดสอบ สำหรับตัวอย่างที่ไม่มี การกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตพบว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโรงชุบ ร้อยละ 50 และมีการปรับปรุงวิธีการผสมมีค่ากำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตั้งแต่อายุ 7 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.2 และ 5.6 กก/ซม² (ภาคผนวกที่ ผ. 9 และ 10) สำหรับตัวอย่างที่มีปูนขาวผสม BHA และปูนขาวผสม RHA เป็นวัสดุยึดประสานตามลำดับ

ในขณะที่ก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 50 ในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงวิธีการผสมให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วันเท่ากับ 3.39 และ 3.6 กก/ซม² (ภาคผนวกที่ ผ. 9) สำหรับตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวผสม BHA เป็นวัสดุยึดประสาน เท่ากับ 3.63 และ 3.89 กก/ซม² (ภาคผนวกที่ ผ. 10) สำหรับตัวอย่างที่ใช้ปูนขาวผสม RHA เป็นวัสดุยึดประสาน โดยก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตให้ค่ากำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการฝังกลบหลังจาก 14, 14 และ 3 วันตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างดังกล่าวถ้าเตรียมโดยการปรับปรุงวิธีการผสมสามารถให้ค่ากำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานหลังจาก 3, 1 และ 1 วันตามลำดับ (ภาคผนวกที่ ผ. 10)



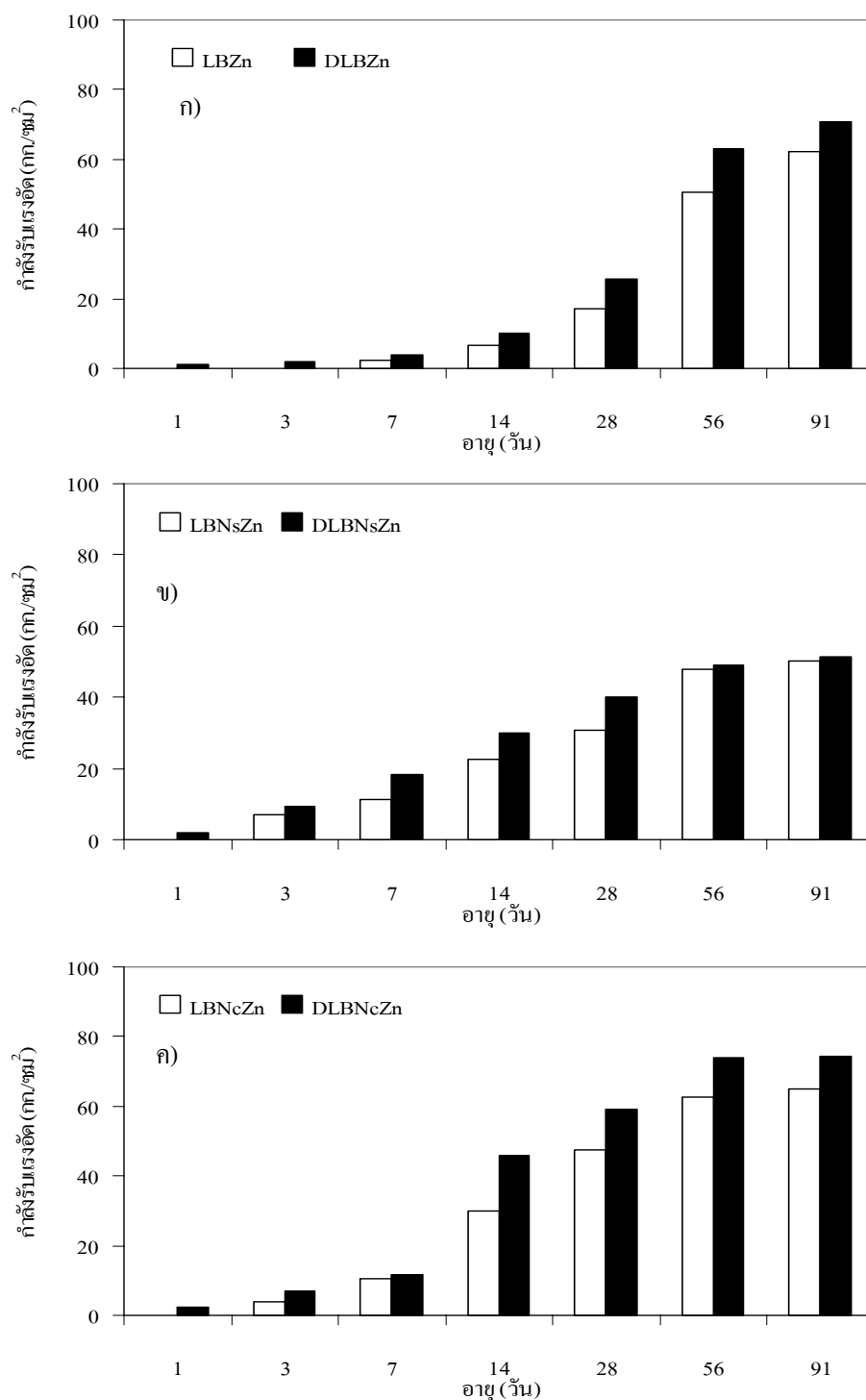
รูปที่ 20 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาว เถ้าแกลบดำ และกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม ก) ไม่เติมสารกระตุ้น ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



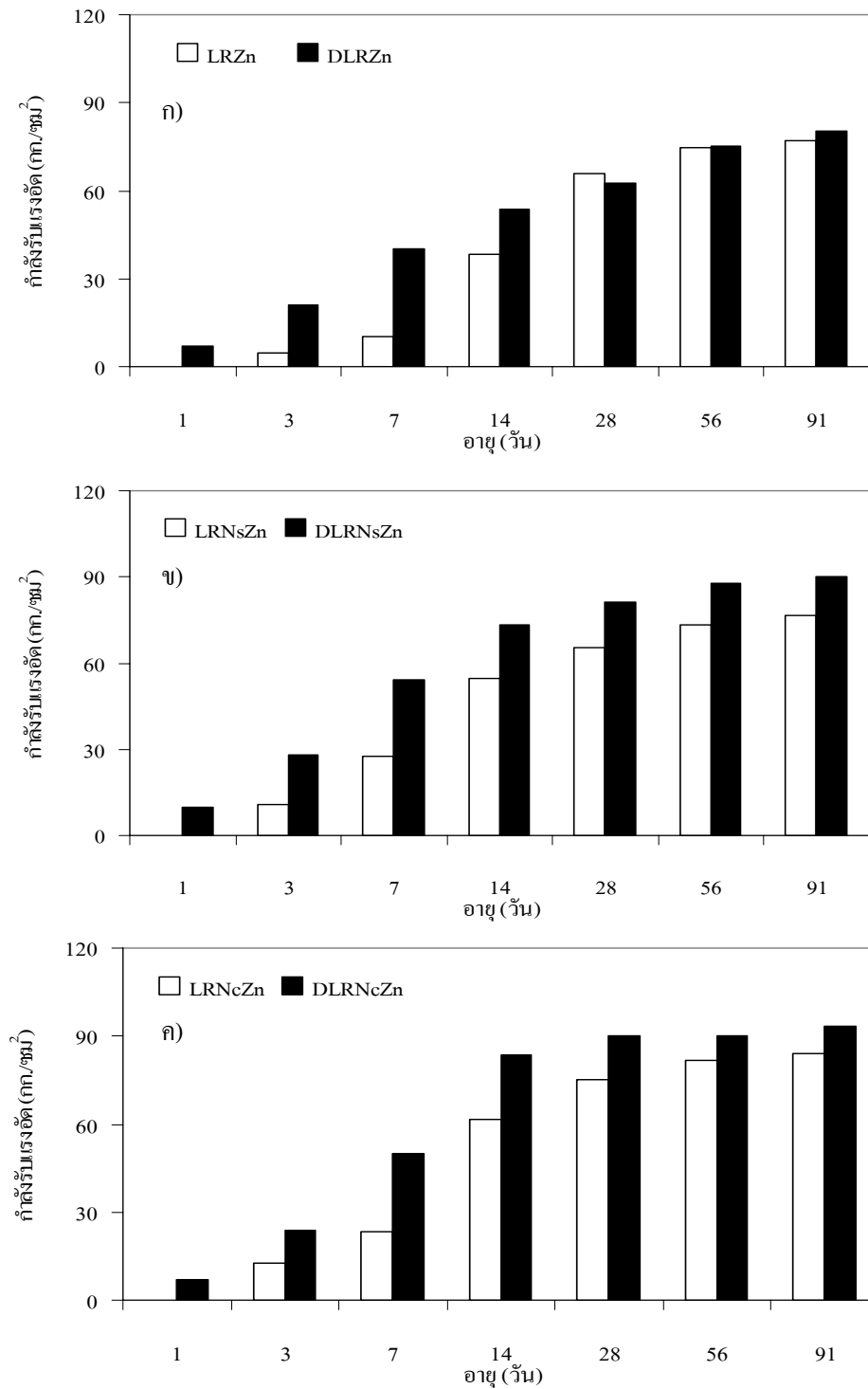
รูปที่ 21 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาว แก้วกลบสังเคราะห์ และกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 ทั้งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม ก) ไม่เติมสารกระตุ้น ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต

รูปที่ 22 ก-ค แสดงการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปูนขาวผสม BHA เป็นวัสดุยึดประสาน ที่ไม่มี และมีการเติมโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม พบว่า ก้อนหล่อแข็งสามารถพัฒนา กำลังรับแรงอัด ตั้งแต่อายุการบ่มที่ 1 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.35, 1.89 และ 2.2 กก/ซม² สำหรับก้อนหล่อแข็งสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่ใช้ปูนขาวผสม RHA เป็นวัสดุยึดประสานที่มีการปรับปรุงวิธีการผสมให้ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อายุการบ่ม 1 วันตัวอย่างเท่ากับ 6.91, 9.62 และ 6.91 กก/ซม² สำหรับตัวอย่างที่ไม่มีและมีสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตตามลำดับ (รูปที่ 23 ก-ค)

จากผลการทดสอบการพัฒนา กำลังรับแรงอัดสำหรับตัวอย่างก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ซีเมนต์ผสมระหว่าง OPC/BHA, OPC/RHA หรือ lime/BHA, lime/RHA เป็นวัสดุยึดประสานในการตรึงกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโดยการปรับปรุงวิธีการผสมด้วยการปล่อยให้วัสดุยึดประสานเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการเติมกากตะกอนโรงชุบแล้วทำการกวนผสมอีกครั้ง พบว่าการปรับปรุงวิธีการผสมโดยการเติมกากตะกอนซ้ำทำให้ก้อนหล่อแข็งของเสียมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่เตรียมโดยการผสมตามปกติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวอย่างที่เตรียมโดยการปรับปรุงวิธีการผสมมีความต้องการน้ำต่ำกว่าแต่ยังคงให้ค่าความชื้นเหลวปกติเท่ากัน นอกจากนี้การเติมกากตะกอนซ้ำยังอาจช่วยลดผลกระทบในทางลบจากกากตะกอนโลหะหนักต่อการไฮเดรชันของวัสดุยึดประสานในระยะแรกได้อีกทางหนึ่ง



รูปที่ 22 การพัฒนากําลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาว เถ้าแกลบดำ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 ในสภาวะที่มีและไม่มีการปรับปรุงวิธีการผสม ก) ไม่เติมสารกระตุ้น ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 23 การพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาว เถ้าแกลบสังเคราะห์ และ สังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 ในสภาวะที่มีและไม่มีกาปรับปรุง วิธีการผสม ก) ไม่เติมสารกระตุ้น ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต

4.2 การทดสอบการรั่วไหลของก้อนหล่อแข็งของเสีย

การทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ผสม BHA หรือ RHA ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 และก้อนหล่อแข็งที่เตรียมจากปูนขาวผสม BHA หรือ RHA ที่อัตราส่วน 50:50 ที่มีและไม่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต แสดงดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าความเข้มข้นของโครเมียม สังกะสีและเหล็กที่รั่วไหลจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสม BHA หรือ RHA และปูนขาวผสม BHA หรือ RHA ที่มีและไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยา และมีกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10, 30 และ 50 ทุกส่วนผสม มีความเข้มข้นสะสมของโครเมียม และ สังกะสีไม่เกินค่ามาตรฐานของ Tank test (สำหรับเหล็กไม่มีค่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด) การรั่วไหลของโครเมียม สังกะสีและเหล็ก อยู่ระหว่าง 2.8-4.4, 4.8-9.5 และ 1.1 - 2.2 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากตะกอนโรงชุบในก้อนหล่อแข็งของเสียพบว่าความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย BHA หรือ RHA ปริมาณการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งของเสียลดลงแต่ไม่มีนัยสำคัญ (ภาคผนวกที่ ผ. 11)

ส่วนก้อนหล่อแข็งของเสียที่เตรียมจากปูนขาวผสม BHA หรือ RHA พบว่า ความเข้มข้นสะสมของโครเมียม สังกะสีและเหล็ก ที่รั่วไหลออกมาจากก้อนหล่อแข็งของเสียมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานของ Tank test และเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า ความเข้มข้นสะสมของโลหะหนักที่รั่วไหลออกมามีค่าต่ำกว่าของก้อนแข็งของเสียที่ไม่ได้เติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาในระดับที่ไม่มีนัยสำคัญ

เมื่อมีการปรับปรุงวิธีการผสมโดยการเติมกากตะกอนจากโรงชุบหลังจากปล่อยให้วัสดุยึดประสานเกิดการไฮเดรชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าปริมาณการรั่วไหลของโครเมียม สังกะสีและเหล็กจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่ทำจากปูนซีเมนต์ ผสม BHA หรือ RHA และปูนขาวผสม BHA หรือ RHA ที่มีและไม่มีสารเติมโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต (ตารางที่ 5 และ 6) มีค่าลดลง

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นสะสม สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของก๊อหนล่อ
แข็งของเสียที่ใช้ซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสาน

ตัวอย่าง	Cr (25 มก/ตร.ม.)*			Zn (100 มก/ตร.ม.)*			Fe		
	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li
OPC	0.174			0.129			0.417		
OPC+10%PS	2.895	9.32E-14	13.49	4.885	7.27E-15	14.96	1.143	1.87E-14	14.92
OPC+30%PS	3.671	1.49E-15	15.29	6.866	1.06E-14	14.73	1.644	1.80E-14	14.63
OPC+50%PS	4.345	2.66E-15	15.17	9.437	2.29E-14	14.49	2.163	4.39E-14	14.43
OPC+10%Zn	0.144			7.008	3.47E-15	15.32	0.407		
OPC+10%BHA	0.159			0.129			0.307		
OPC+10%BHA+10%PS	2.672	8.62E-14	13.53	4.738	7.41E-15	14.95	0.899	1.38E-14	15.14
OPC+10%BHA+30%PS	3.478	1.99E-15	15.17	6.784	1.48E-14	14.58	1.338	1.98E-14	14.64
OPC+10%BHA+50%PS	4.347	3.61E-15	15.04	9.219	2.97E-14	14.38	1.99	4.68E-14	14.38
OPC+10%BHA+10%Zn	0.154			6.593	3.60E-15	15.3	0.356		
OPC+10%SRHA	0.109			0.124			0.298		
OPC+10%SRHA+10%PS	2.504	7.14E-14	13.61	4.177	5.45E-15	15.08	0.685	9.56E-15	15.46
OPC+10%SRHA+30%PS	3.161	1.31E-15	15.35	5.915	9.30E-15	14.79	1.151	1.36E-14	14.96
OPC+10%SRHA+50%PS	3.983	2.74E-15	15.15	8.35	2.21E-14	14.5	1.927	4.55E-14	14.46
OPC+10%SRHA+10%Zn	0.11			6.266	3.58E-15	15.31	0.29		

Lcu คือ ความเข้มข้นสะสม (มก./ ตร.ม.) De คือ สัมประสิทธิ์การชะละลาย (ตร.ชม./วินาที)
และLi คือ ดัชนีการรั่วไหล

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของก๊อหนล่อแข็งของเสียที่ทำจากปูนซีเมนต์, ปูนซีเมนต์ผสม BHA หรือ RHA และปูนขาวผสม BHA หรือ RHA ที่มีและไม่มีกำมะถันเสริมสารกระตุ้นปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วง 10^{-12} – 10^{-15} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และ 12.30 – 15.50 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน พบว่า ทุกส่วนผสมของก๊อหนล่อแข็งของเสีย มีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสามารถกำจัดในแหล่งฝังกลบได้ และเมื่อมีการปรับปรุงวิธีการผสม พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของก๊อหนล่อแข็งของเสีย เท่ากับ 10^{-12} – 10^{-15} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และ 12.30 – 15.50 ซึ่งมีค่าแตกต่างจากก๊อหนล่อแข็งที่ไม่มีการปรับปรุงวิธีการผสมอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นสะสม สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของก๊อหนหล่อ
แข็งของเสียที่ใช้ปูนขาวผสม BHA หรือ RHA เป็นวัสดุยึดประสาน

ตัวอย่าง	Cr (25 มก/ตร.ม.)*			Zn (100 มก/ตร.ม.)*			Fe		
	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li
Lime:BHA	0.053			0.155			0.354		
Lime:BHA +10%PS	2.567	3.31E-13	13.43	7.216	2.61E-14	14.47	5.504	2.41E-13	13.46
Lime:BHA +30%PS	4.783	1.09E-14	14.77	11.293	7.10E-14	14.02	10.312	6.63E-13	12.71
Lime:BHA +50%PS	10.176	5.15E-14	14.15	14.336	8.16E-14	13.86	18.227	2.21E-12	12.25
Lime:BHA +10%Zn	0.052			10.854	6.20E-15	14.67	0.329		
Lime:BHA +NS	0.077			0.122			0.284		
Lime:BHA +NS+10%PS	2.246	2.69E-13	13.51	6.977	2.63E-14	14.47	4.695	1.87E-13	13.58
Lime:BHA +NS+30%PS	4.614	9.68E-15	14.82	11.009	5.91E-14	14.07	9.356	5.30E-13	12.81
Lime:BHA +NS+50%PS	9.465	4.46E-14	14.22	13.933	7.69E-14	13.88	16.547	1.93E-12	12.33
Lime:BHA +NS+10%Zn	0.085			10.773	6.47E-15	14.67	0.232		
Lime:BHA +NC	0.067			0.129			0.166		
Lime:BHA +NC+10%PS	2.189	2.72E-13	13.51	6.306	2.26E-14	14.53	1.854	9.09E-14	14.37
Lime:BHA +NC+30%PS	4.536	9.88E-15	14.81	10.705	5.91E-14	14.07	4.098	2.02E-13	13.51
Lime:BHA +NC+50%PS	9.382	4.35E-14	14.22	13.413	7.10E-14	13.92	7.859	1.32E-12	13.04
Lime:BHA +NC+10%Zn	0.088			10.495	7.35E-15	14.62	0.165		
Lime:sRHA	0.066			0.149			0.144		
Lime:sRHA +10%PS	2.186	2.99E-13	13.47	6.309	2.47E-14	14.49	4.082	1.64E-13	13.7
Lime:sRHA +30%PS	4.283	8.82E-15	14.86	9.791	5.01E-14	14.14	7.46	3.51E-13	12.98
Lime:sRHA +50%PS	8.874	4.21E-14	14.24	12.62	6.77E-14	13.94	14.341	1.47E-12	12.43
Lime:sRHA +10%Zn	0.066			9.56	5.87E-15	14.71	0.254		
Lime:sRHA +NS	0.088			0.144			0.265		
Lime:sRHA +NS+10%PS	2.036	2.60E-13	13.53	6.262	2.47E-14	14.49	3.705	1.39E-13	13.79
Lime:sRHA +NS+30%PS	4.119	7.87E-15	14.91	9.459	4.49E-14	14.19	6.739	2.77E-13	13.09
Lime:sRHA +NS+50%PS	8.331	3.69E-14	14.3	11.94	5.91E-14	13.99	13.353	1.26E-12	12.49
Lime:sRHA +NS+10%Zn	0.088			9.263	5.56E-15	14.74	0.183		
Lime:sRHA +NC	0.074			0.144			0.111		
Lime:sRHA +NC+10%PS	1.979	2.26E-13	13.59	5.307	1.63E-14	14.67	3.436	1.07E-13	13.85
Lime:sRHA +NC+30%PS	4.072	8.68E-15	14.87	8.338	3.93E-14	14.24	6.244	2.76E-13	13.1
Lime:sRHA +NC+50%PS	8.232	3.79E-14	14.28	10.937	5.35E-14	14.04	12.154	1.11E-12	12.55
Lime:sRHA +NC+10%Zn	0.091			8.331	4.27E-15	14.85	0.113		

Lcu คือ ความเข้มข้นสะสม (มก./ ตร.ม.) De คือ สัมประสิทธิ์การชะละลาย (ตร.ชม./วินาที)

และ Li คือ ดัชนีการรั่วไหล

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นสะสม สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อ
แข็งของเสียที่ใช้ซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสานและทำการปรับปรุงวิธีการผสม

ตัวอย่าง	Cr (25 มก/ตร.ม.)*			Zn (100 มก/ตร.ม.)*			Fe		
	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li
DOPC	0.176			0.131			0.243		
DOPC+10%PS	2.808	9.44E-14	13.61	4.638	5.32E-15	15.09	0.675	6.40E-15	15.55
DOPC+30%PS	3.393	1.87E-15	15.2	6.494	1.43E-14	14.62	1.224	1.72E-14	14.82
DOPC+50%PS	4.004	3.06E-15	15.11	10.052	1.09E-13	14.33	1.629	3.41E-14	14.63
DOPC+10%Zn	0.146			6.709	3.06E-15	15.38	0.212		
DOPC+10%BHA	0.177			0.11			0.25		
DOPC+10%BHA+10%PS	2.687	8.18E-14	13.55	4.324	5.80E-15	15.05	0.74	9.91E-15	15.41
DOPC+10%BHA+30%PS	3.361	1.54E-15	15.28	6.112	1.04E-14	14.74	1.196	1.42E-14	14.81
DOPC+10%BHA+50%PS	3.941	2.87E-15	15.13	8.385	2.38E-14	14.47	2.793	7.07E-14	14.3
DOPC+10%BHA+10%Zn	0.107			5.799	2.55E-15	15.49	0.282		
DOPC+10%SRHA	0.107			0.096			0.101		
DOPC+10%SRHA+10%PS	2.173	5.23E-14	13.75	3.863	4.48E-15	15.16	0.42	3.87E-15	15.87
DOPC+10%SRHA+30%PS	2.929	1.06E-15	15.44	5.489	7.60E-15	14.88	0.759	7.99E-15	15.5
DOPC+10%SRHA+50%PS	3.856	2.59E-15	15.18	7.73	1.89E-14	14.57	1.273	1.82E-14	14.96
DOPC+10%SRHA+10%Zn	0.137			5.738	2.56E-15	15.45	0.751		

Lcu คือ ความเข้มข้นสะสม (มก./ ตร.ม.) De คือ สัมประสิทธิ์การชะละลาย (ตร.ชม./วินาที)
และLi คือ ดัชนีการรั่วไหล

ตารางที่ 6 ความเข้มข้นสะสม สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายและดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อ
แข็งของเสียที่ใช้ปูนขาวผสม BHA หรือ RHA เป็นวัสดุยึดประสานและปรับปรุง
วิธีการผสม

ตัวอย่าง	Cr (25 มก/ตร.ม.)*			Zn (100 มก/ตร.ม.)*			Fe		
	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li
DLime:BHA	0.055			0.157			0.3		
DLime:BHA +10%PS	2.27	2.58E-13	13.53	6.721	2.29E-14	14.53	4.364	1.54E-13	13.65
DLime:BHA +30%PS	4.632	9.36E-15	14.83	11.189	5.90E-14	14.07	8.749	4.67E-13	12.88
DLime:BHA +50%PS	9.486	4.24E-14	14.24	14.011	7.34E-14	13.9	15.576	1.87E-12	12.41
DLime:BHA +10%Zn	0.084			10.743	6.43E-15	14.67	0.227		
DLime:BHA +NS	0.124			0.141			0.197		
DLime:BHA +NS+10%PS	1.994	2.52E-13	13.55	6.805	2.90E-14	14.42	4.202	1.69E-13	13.67
DLime:BHA +NS+30%PS	4.374	8.93E-15	14.85	10.829	5.99E-14	14.07	8.678	4.85E-13	12.87
DLime:BHA +NS+50%PS	9.082	3.71E-14	14.29	13.964	7.01E-14	13.92	15.452	1.58E-12	12.43
DLime:BHA +NS+10%Zn	0.404			10.191	5.27E-15	14.74	0.184		
DLime:BHA +NC	0.085			0.122			0.232		
DLime:BHA +NC+10%PS	2.089	2.31E-13	13.58	6.186	2.02E-14	14.58	1.453	5.29E-14	14.6
DLime:BHA +NC+30%PS	4.327	7.82E-15	14.91	10.439	4.93E-14	14.14	3.494	1.07E-13	13.71
DLime:BHA +NC+50%PS	9.166	3.83E-14	14.28	12.849	6.25E-14	13.99	6.97	9.82E-13	13.19
DLime:BHA +NC+10%Zn	0.052			10.333	6.46E-15	14.68	0.118		
DLime:sRHA	0.096			0.159			0.115		
DLime:sRHA +10%PS	2.492	3.61E-13	13.38	6.029	2.13E-14	14.56	4.597	1.26E-13	13.62
DLime:sRHA +30%PS	4.752	1.07E-14	14.78	9.686	4.80E-14	14.16	8.84	4.82E-13	12.84
DLime:sRHA +50%PS	9.557	4.93E-14	14.17	12.24	6.42E-14	13.96	15.438	1.72E-12	12.36
DLime:sRHA +10%Zn	0.073			9.373	6.12E-15	14.69	0.321		
DLime:sRHA +NS	0.092			0.107			0.125		
DLime:sRHA +NS+10%PS	1.811	2.03E-13	13.65	5.558	1.87E-14	14.61	3.338	1.05E-13	13.88
DLime:sRHA +NS+30%PS	3.918	7.37E-15	14.94	8.728	3.92E-14	14.24	5.992	2.24E-13	13.18
DLime:sRHA +NS+50%PS	8.214	3.44E-14	14.33	10.965	4.89E-14	14.08	12.316	1.03E-12	12.58
DLime:sRHA +NS+10%Zn	0.071			9.077	5.34E-15	14.75	0.124		
DLime:sRHA +NC	0.073			0.111			0.077		
DLime:sRHA +NC+10%PS	1.805	1.87E-13	13.67	4.575	1.22E-14	14.8	3.07	8.69E-14	13.95
DLime:sRHA +NC+30%PS	3.913	6.87E-15	14.97	7.668	2.86E-14	14.38	5.952	2.09E-13	13.21
DLime:sRHA +NC+50%PS	7.798	3.25E-14	14.35	9.991	4.23E-14	14.14	11.212	8.98E-13	12.64
DLime:sRHA +NC+10%Zn	0.051			7.736	3.89E-15	14.89	0.073		

4.3 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายปูนซีเมนต์

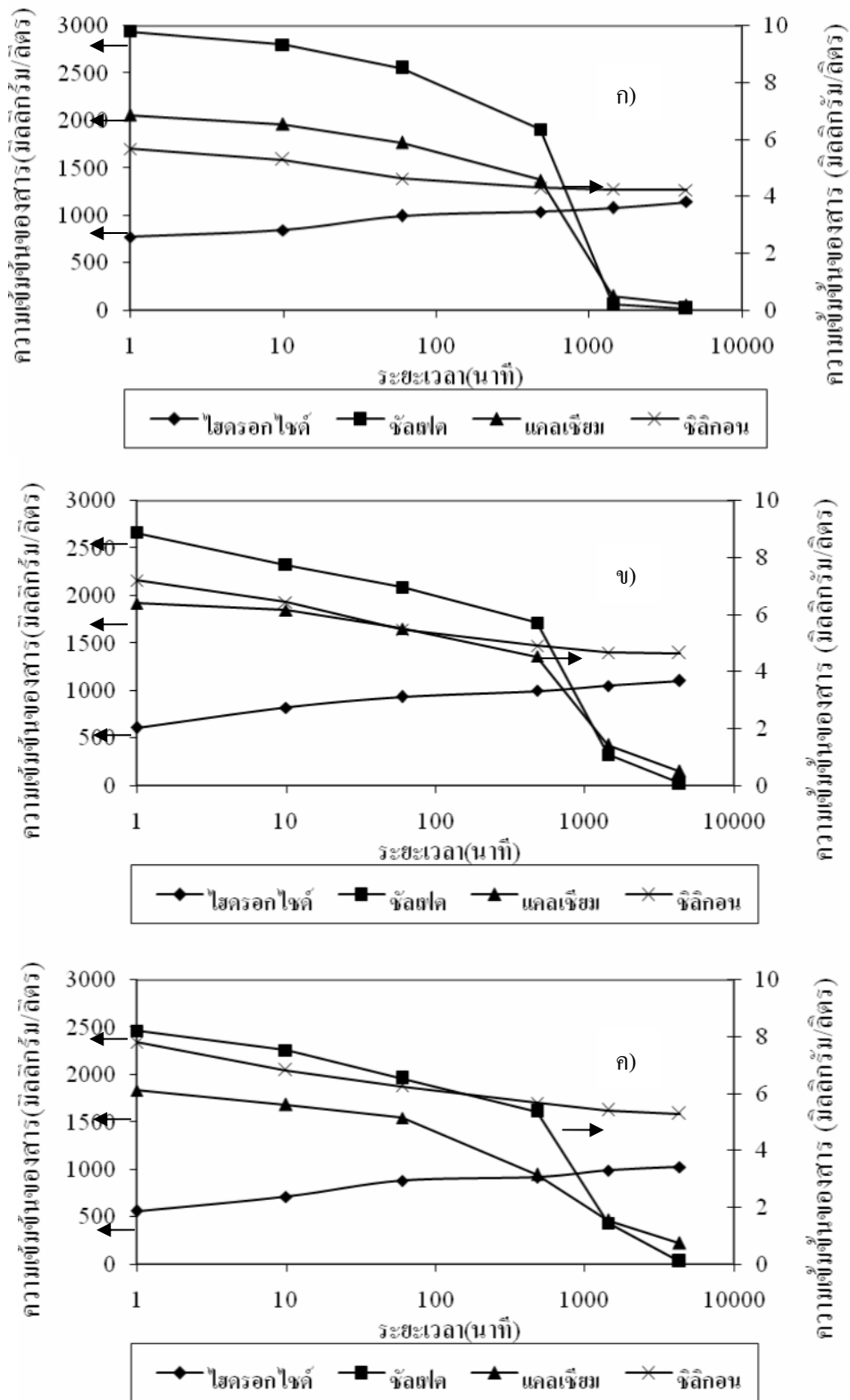
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอัดประสาธน์ ต่อความเข้มข้นของอิออนต่าง ๆ ในสารละลาย

4.3.1.1 ความเข้มข้นของอิออนต่าง ๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ ซัลเฟต แคลเซียม และซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ หรือเถ้ากลบสังเคราะห์กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แสดงดังรูปที่ 24 ก-ค โดยที่ระยะเวลาการไฮเดรชันที่ 1 นาที่ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 774 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 3 วันมีค่าเท่ากับ 1145 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 24 ก) สาเหตุที่ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่อยู่ในไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ทำปฏิกิริยาไฮดรอลิซิสกับน้ำ ทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายเพิ่มขึ้น

เมื่อมีการเติมเถ้ากลบดำหรือเถ้ากลบสังเคราะห์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์มีค่าลดลงโดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ และ 3 วัน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่า 610, 563 และ 1104, 1029 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 24 ข และ ค) ทั้งนี้เนื่องจากเถ้ากลบดำ และเถ้ากลบสังเคราะห์ทำให้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ในของผสมลดลง

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่า ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ที่ระยะเวลา 1 นาที่ มีค่าเท่ากับ 2,933 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเหลือ 18 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์มาจากการละลายของยิปซัมซึ่งเป็นองค์ประกอบที่พบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารประกอบตัวนี้ทำหน้าที่หน่วงการเกิดปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) โดยทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็น Ettringite ทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายลดลง เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบดำ หรือเถ้ากลบสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของซัลเฟตมีแนวโน้มใกล้เคียงกับสารละลายปูนซีเมนต์



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอิมอนต่างๆในสารละลายกับระยะเวลาไฮเดรชัน ก) ปูนซีเมนต์ ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และ ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์

ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ลดลงเมื่อระยะเวลาการไฮเดรชันเพิ่มขึ้น พบว่าที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ มีค่าเท่ากับ 2,061 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเหลือ 64 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน แคลเซียมส่วนหนึ่งในสารละลายมาจากสารประกอบ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งมาจากยิปซัม การลดลงของแคลเซียมเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเนื่องจากแคลเซียมถูกใช้ในการเกิดเป็นสารประกอบใหม่ CSH และ CAH ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การเติมเถ้ากลบดำ หรือเถ้ากลบสังเคราะห์ในสารละลายปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ผสมมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับสารละลายปูนซีเมนต์ แต่ความเข้มข้นของแคลเซียมต่ำกว่าตลอดการทดลอง

ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ หรือเถ้ากลบสังเคราะห์มีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของซิลิกอนของสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ เท่ากับ 5.67, 7.21 และ 7.81 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การเติมเถ้ากลบดำ หรือเถ้ากลบสังเคราะห์ทำให้ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกอนในเถ้ากลบดำหรือเถ้ากลบสังเคราะห์บางส่วนละลายออกมาในสภาวะที่สารละลายมีความเป็นด่างสูง เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเป็น 3 วัน ความเข้มข้นของแคลเซียมมีค่าเท่ากับ 4.23, 4.65 และ 5.29 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การลดลงของซิลิกอนเนื่องมาถูกใช้ในการเกิดเป็นสารประกอบ CSH ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

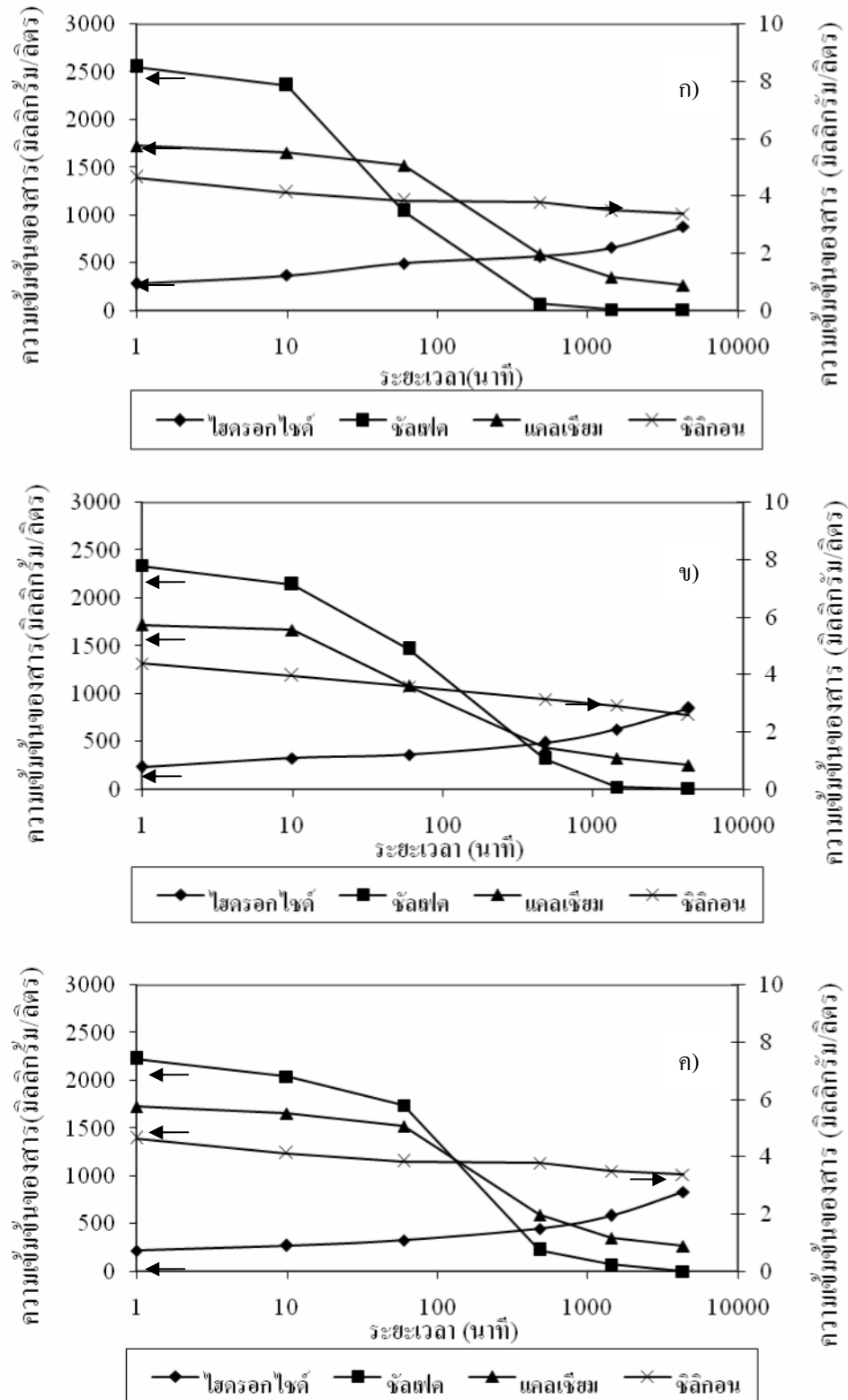
4.3.1.2 ผลของโลหะหนักต่อความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ กับระยะเวลาไฮเดรชันของสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ในสภาวะที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 25 และ 27 ก-ค ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ สารละลายปูนซีเมนต์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เท่ากับ 286 และ 187 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเท่ากับ 879 และ 657 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน (รูปที่ 25 และ 27 ก) การเติมกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ทำให้ความเข้มข้นของระบบลดลง ในทำนองเดียวกันความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ที่ทุกระยะเวลาไฮเดรชันที่ทำการสังเกตในตัวอย่างที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์

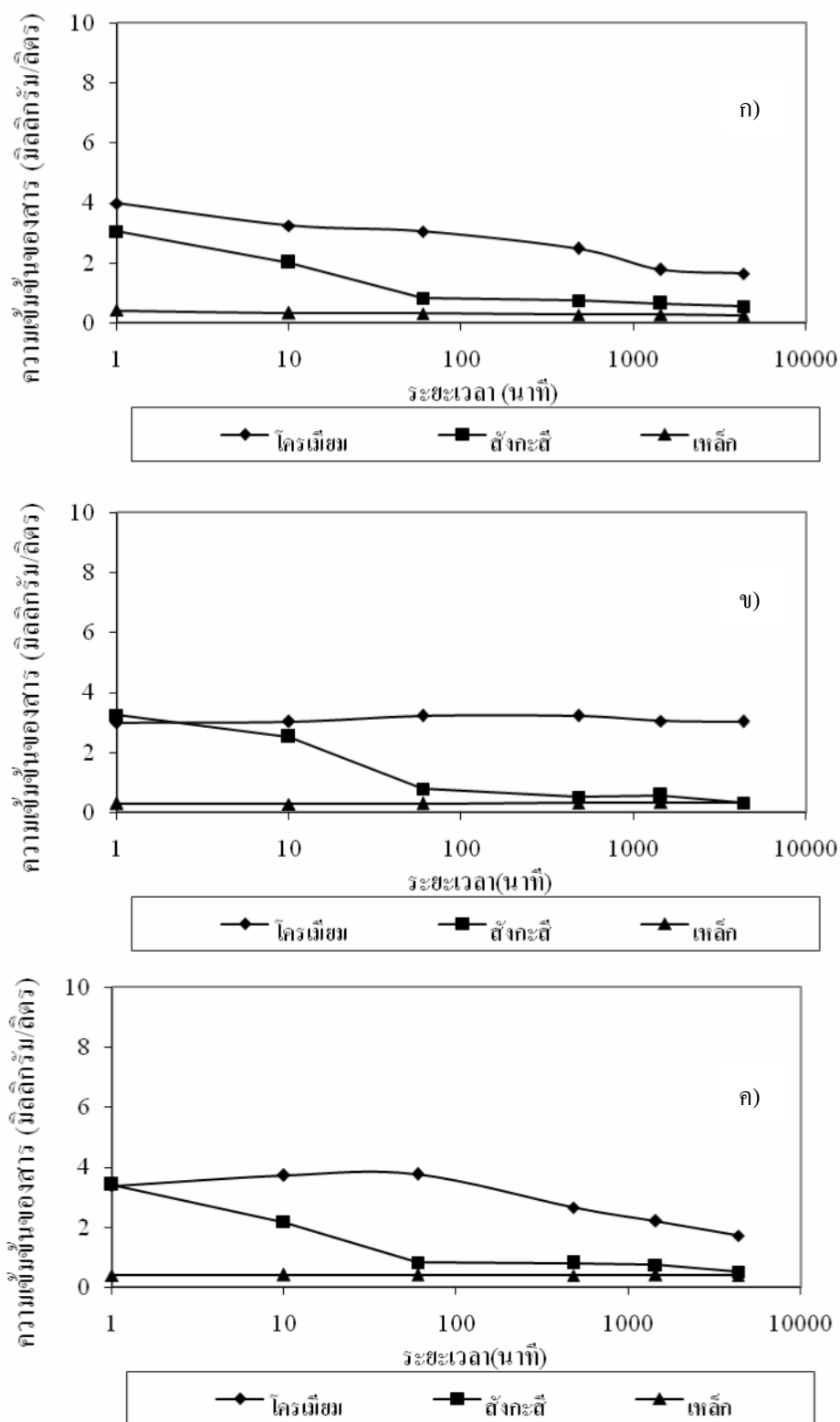
สังเคราะห์ในปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์มีค่าลดลงเล็กน้อย

การเปลี่ยนแปลงของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ (รูปที่ 25 ก-ค) พบว่าความเข้มข้นของซัลเฟตหลังจากไฮเดรชันเป็นเวลา 10 นาทีเท่ากับ 2359, 2145 และ 2022 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงจนเหลือ 73, 319 และ 273 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับหลังจากไฮเดรชันนาน 8 ชั่วโมง เป็นที่น่าสังเกตว่าตัวอย่างที่มีตะกอนโรงชุบอยู่ทำให้ซัลเฟตออกมาอยู่ในสารละลายได้น้อยลง ในขณะที่เดียวกันยังทำให้ซัลเฟตหายไปจากสารละลายเร็วกว่าในตัวอย่างที่ไม่มีตะกอนโรงชุบ สำหรับสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ พบว่าความเข้มข้นของซัลเฟตลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนกับสารละลายที่มีการเติมกากตะกอนโรงชุบ โดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 10 นาที ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 1,953, 1,855 และ 1,885 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 11.61, 362 และ 356 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง (รูปที่ 26 ก-ค) สังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตในลักษณะเดียวกันกับตะกอนโรงชุบแต่ในระดับที่รุนแรงกว่า

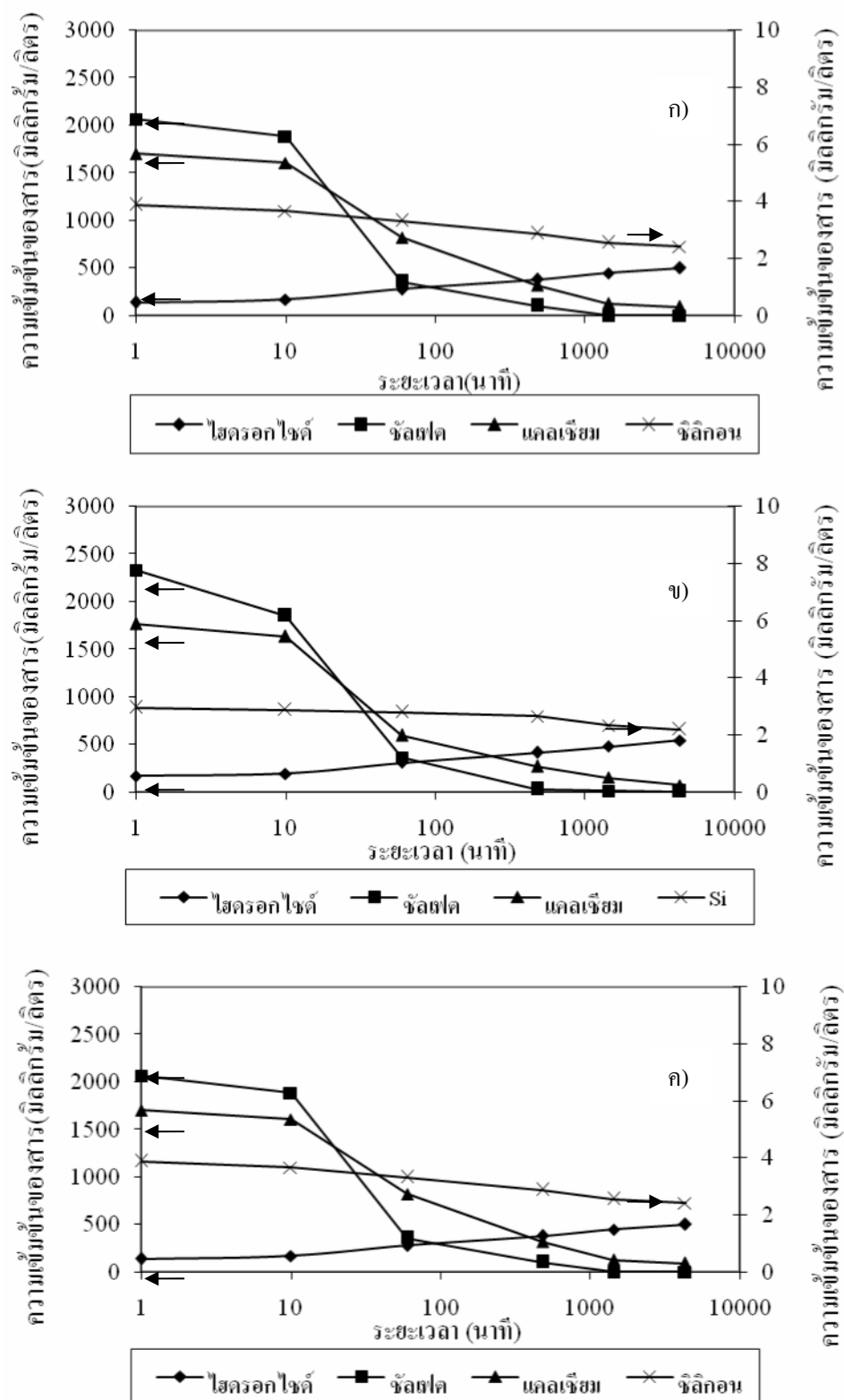
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ที่มีการเติมกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ กับระยะเวลาการไฮเดรชัน พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมลดลงเมื่อระยะเวลาการไฮเดรชันเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1,826 และ 1,833 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และลดลงเหลือ 154 และ 26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ในตัวอย่างสารละลายปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และเถ้ากลบสังเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายที่ระยะเวลาไฮเดรชันต่างๆตลอดการทดลองมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน



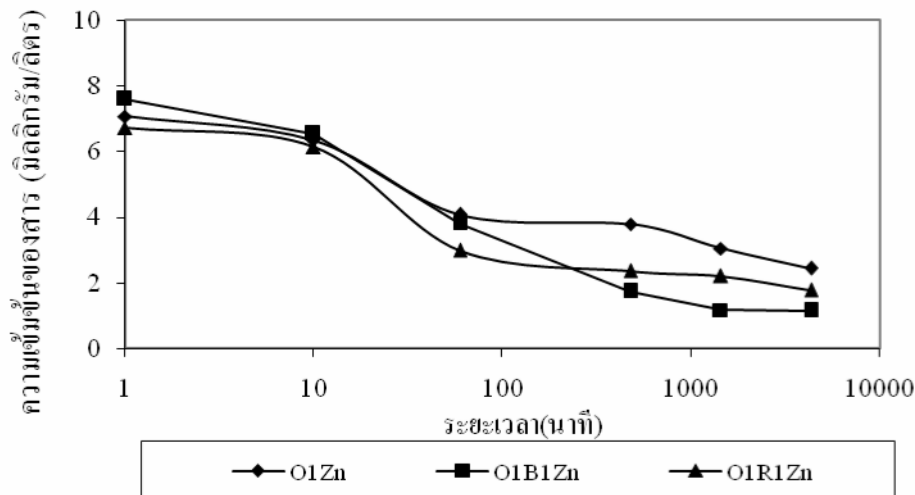
รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอิมูนต่างๆในสารละลายที่ผสมจากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 กับระยะเวลาไฮเดรชัน ก) ปูนซีเมนต์ ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ และ ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักต่างๆในสารละลายที่ผสมกากตะกอน
โรงชุบร้อยละ 10 กับระยะเวลาไฮโดรชั่น ก) ปูนซีเมนต์ ข) ปูนซีเมนต์ผสม
เถ้าแกลบดำ และ ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายที่ผสมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาไฮดรอกไซด์ ก) ปูนซีเมนต์ ข) ปูนซีเมนต์ผสมแก้วและ ค) ปูนซีเมนต์ผสมแก้วและสังกะสี



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์ผสมที่มีสังกะสีสังเคราะห์ร้อยละ 10 กับระยะเวลาไฮเดรชัน

ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ หรือเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายตลอดการทดลอง มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีกากตะกอนโรงชุบ ความเข้มข้นของซิลิกอนในทุกสารละลายตลอดระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอยู่ในช่วง 2.5 – 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็ก โครเมียม และสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีตะกอนโรงชุบ (รูปที่ 26 ก-ค) พบว่าความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง ในขณะที่ความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น สำหรับสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาฬิกาเท่ากับ 7.0 6.7 และ 7.6 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ลดลงอาจเนื่องมาจากถูกตรึงอยู่ใน CSH หรืออาจจะไปแทนที่แคลเซียมใน CSH

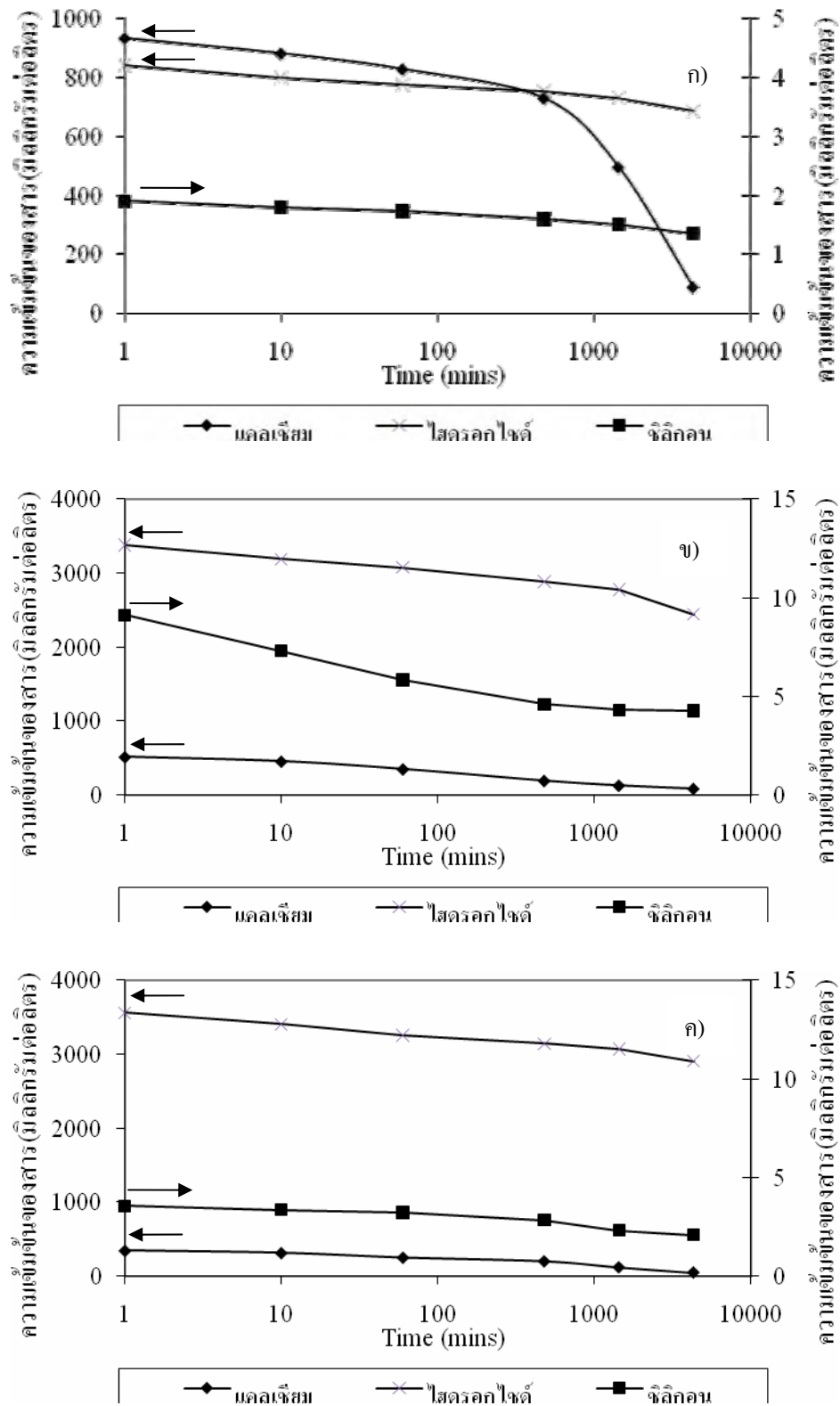
4.3.1.3 ความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ แคลเซียม และซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ ที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียม

คาร์บอนเนตกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แสดงดังรูปที่ 29 ก-ค โดยที่ระยะเวลาการไฮเดรชันสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่ 1 นาที่ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 840 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 3 วันมีค่าเท่ากับ 685 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 29 ก) ไฮดรอกไซด์ในสารละลายเกิดจากการละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนขาว เกิดเป็น Ca^{2+} และ OH^- และเมื่อเวลาการไฮเดรชันเพิ่มขึ้น OH^- จะมีค่าลดลงเนื่องจาก OH^- ถูกใช้ในการละลายพันธะของซิลิกอนจากเถ้าแกลบดำ เป็นโมโนซิลิเกต ($\text{SiO}(\text{OH})_3^-$) เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 พบว่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำมีค่าสูงขึ้นโดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ และ 3 วัน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่า 3,379, 3,558 และ 2,440, 2,904 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 29 ข และ ค) ทั้งนี้เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตที่มีค่าพีเอชสูง ทำให้ค่าไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำมีค่าสูงขึ้น

การเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่ระยะเวลา 1 นาที่พบว่ามีความเข้มข้นเท่ากับ 932 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 728 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นลดลงจนเหลือ 86 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 3 วัน สาเหตุที่ทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมลดลงอย่างช้าๆ ในช่วง 8 ชั่วโมงแรก เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของปูนขาวกับเถ้าแกลบเกิดช้า เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตพบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมที่ระยะเวลา 1 นาที่ ลดลงเหลือ 514 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 3 วัน มีค่าเท่ากับ 86 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนต มีค่าแคลเซียมที่ 1 นาที่ และ 3 วันเท่ากับ 346 และ 47 มิลลิกรัมต่อลิตร สาเหตุที่ปริมาณแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่มีการเติมโซเดียมซิลิเกตลดลงส่วนหนึ่งเนื่องจาก แคลเซียมถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับซิลิกอนที่ละลายจากเถ้าแกลบ อีกสาเหตุคือ ซิลิกอนจากโซเดียมซิลิเกตสามารถรวมกับแคลเซียมจากปูนขาวได้โดยตรง และเกิดเป็น CSH ส่วนในสารละลายที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนต แคลเซียมสามารถรวมตัวกับคาร์บอเนตเกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตได้

ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำมีค่าอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำตลอดการทดลองและมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลา 1 นาที่ มีค่า 1.90 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ 3 วันมีค่า 1.35 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อมีการเติมโซเดียมซิลิเกตในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ ที่ระยะเวลา 1 นาที่ และ 3 วันมีค่าเท่ากับ 9.11 และ 4.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณซิลิกอนในสารละลายที่เพิ่มขึ้นเกิดจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถแตกตัวเป็นโซเดียมและซิลิเกตไอออน และสภาพความเป็นต่างของสารละลายยังทำให้ซิลิกอนจากเถ้าแกลบละลายออกมาได้มากขึ้นจึงทำให้ความเข้มข้นของซิลิกอนทั้งหมดในสารละลายสูงขึ้น ส่วนการเติมโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นของซิลิกอนที่ระยะเวลา 1 นาที่ และ 3 วัน มีค่าเท่ากับ 3.54 และ 2.08 มิลลิกรัมต่อลิตร

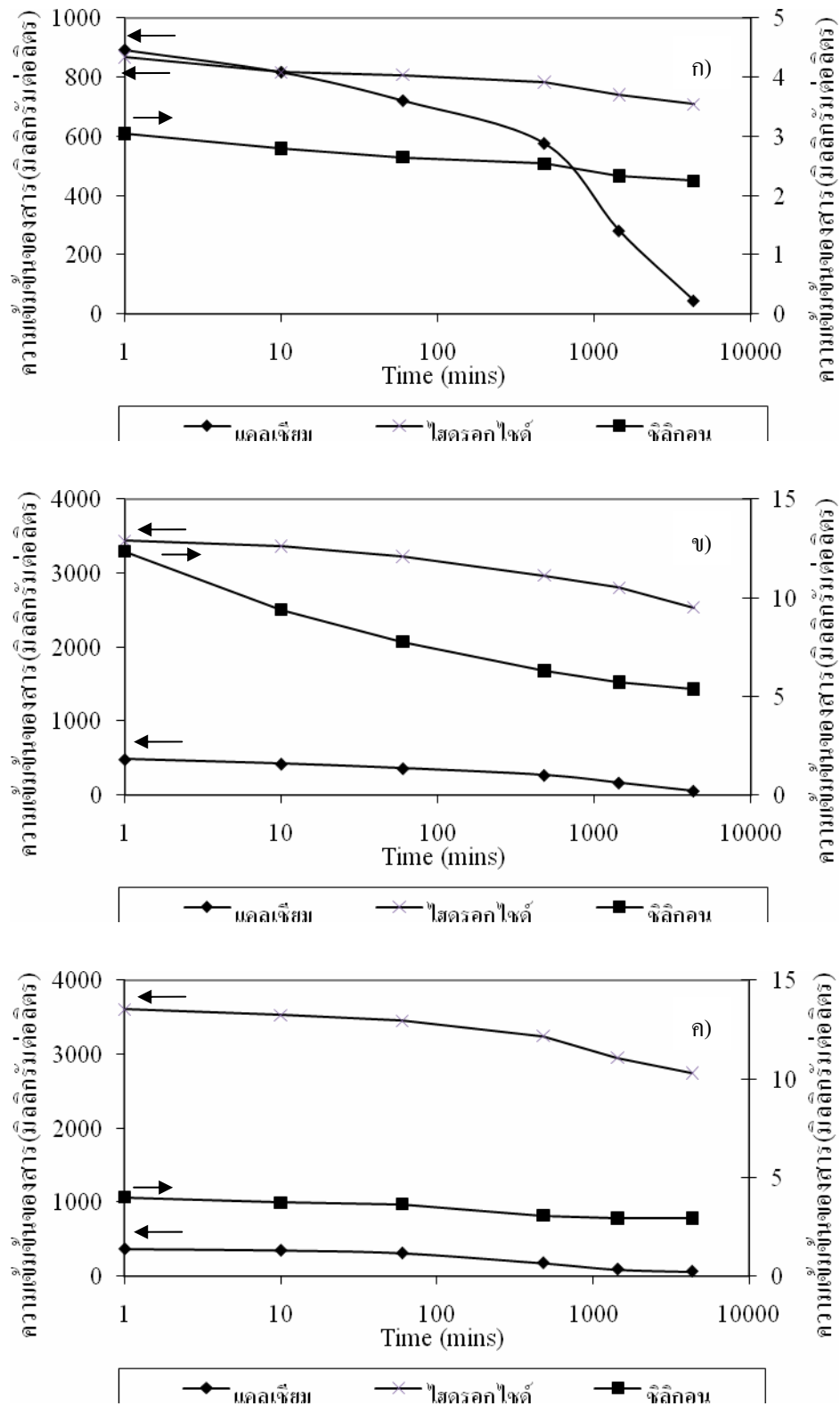


รูปที่ 29 ความเข้มข้นของอ็อนต่างๆในสารละลายพูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ ก) ชุดควบคุม
ข) โซเดียมซัลเฟต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต

ความเข้มข้นของซิลิกอนของสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนต มีค่าสูงกว่าในสารละลายควบคุม (ไม่มีโซเดียมคาร์บอเนต) เนื่องจากสภาพความเป็นต่างของ โซเดียมคาร์บอเนตทำให้ทำให้ซิลิกอนจากเถ้าแกลบละลายออกมาได้มากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ แคลเซียม และซิลิกอนใน สารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียม คาร์บอเนตมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนที่ระยะเวลาไฮดรเจนชั้นต่างๆในลักษณะ ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ เนื่องจาก องค์ประกอบหลักของเถ้าแกลบดำและเถ้าแกลบสังเคราะห์ คือ ซิลิกอนซึ่งแสดงดังรูปที่ 30 ก-ค ที่ระยะเวลาการไฮดรเจนชั้นที่ 1 นาที่ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายมีค่าเท่ากับ 867 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 3 วันมีค่าเท่ากับ 708 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 30 ก) เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 พบว่า ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำมีค่าสูงขึ้นโดยที่ ระยะเวลาไฮดรเจนชั้น 1 นาที่ และ 3 วัน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่า 3,433, 3,604 และ 2,533, 2,748 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 30 ข และ ค)

การเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่ระยะเวลา 1 นาที่พบว่ามีความเข้มข้นเท่ากับ 892 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเหลือ 576 และ 44 มิลลิกรัม ต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮดรเจนชั้น 8 ชั่วโมงและ 3 วัน ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูน ขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์มีค่าต่ำกว่าในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำเนื่องจาก ความ ไวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีความเป็นamorphous มากกว่าเถ้าแกลบดำ และเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมที่ระยะเวลา 1 นาที่ ลดลงเหลือ 482 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 3 วัน มีค่าเท่ากับ 58 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับตัวอย่างที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนต มีค่าแคลเซียมที่ 1 นาที่ และ 3 วันเท่ากับ 363 และ 63 มิลลิกรัมต่อลิตร



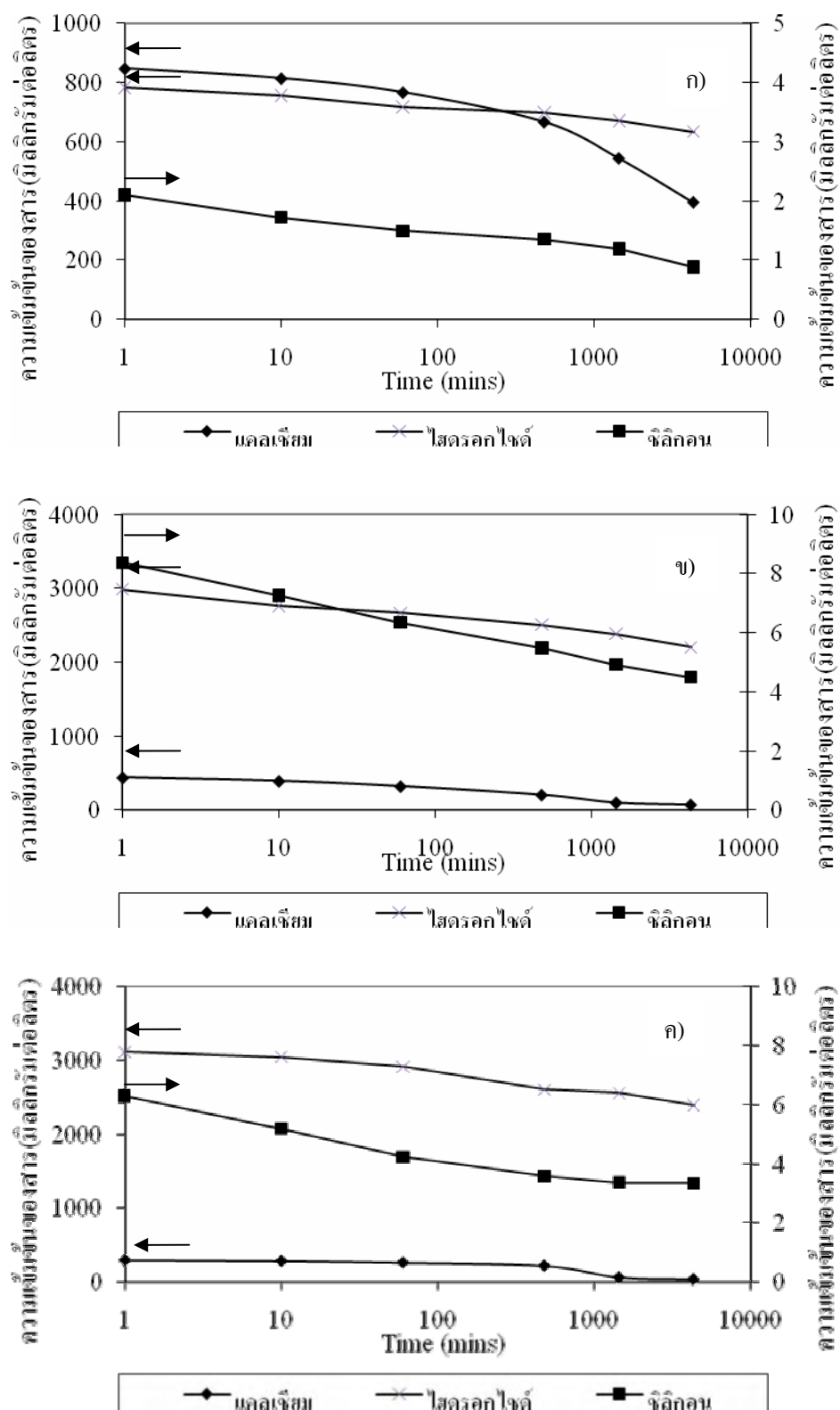
รูปที่ 30 ความเข้มข้นของอิมอนต่างๆในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต

ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์มีค่าสูงกว่าในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำเนื่องจากความความเป็น amorphous ของเถ้าแกลบสังเคราะห์ ทำให้ซิลิกอนในเถ้าแกลบสังเคราะห์สามารถละลายออกมาได้เร็วกว่า โดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่า 3.05 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ 3 วันมีค่า 2.25 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำให้ความเข้มข้นของซิลิกอนสูงกว่าตัวอย่างควบคุม โดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที และ 3 วันมีค่าเท่ากับ 12.34 และ 5.37 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการเติมโซเดียมคาร์บอเนตทำให้ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายสูงกว่าตัวอย่างควบคุมแต่ต่ำกว่าตัวอย่างที่มีโซเดียมซิลิเกตตลอดระยะเวลาไฮเดรชันที่สังเกต

4.3.1.4 ผลของโลหะหนักต่อความเข้มข้นของออลอนต่าง ๆ ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออลอนต่าง ๆ กับระยะเวลาไฮเดรชันของสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบและกากตะกอนโรงชุบ (รูปที่ 31 - 34) หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 35 - 37) ในสภาวะที่มีและไม่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที สารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์มีค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เท่ากับ 782 และ 748 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ลดลงเหลือ 633 และ 615 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน การเติมกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์ทำให้ความเป็นด่างของระบบลดลง ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ที่ทุกระยะเวลาไฮเดรชันมีค่าลดลงเล็กน้อย

เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ ในสภาวะที่มีกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในระบบสูงขึ้นโดยที่ระยะเวลา 1 นาที เท่ากับ 2,989 และ 2,602 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเหลือ 2,203 และ 1,754 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 3 วัน ในขณะที่การเติมโซเดียมคาร์บอเนตส่งผลให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในระบบมีค่าสูงกว่า จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่า 3,108 และ 2,662 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 3 วันมีค่า 2,388 และ 1,916 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทำนองเดียวกันกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสภาวะที่มีและไม่มีโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต คล้ายคลึงกันตลอดระยะเวลาไฮเดรชันที่สังเกต



รูปที่ 31 ความเข้มข้นของอออนต่างๆในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและกากตะกอนจาก โรงชุบร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซัลเฟต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต

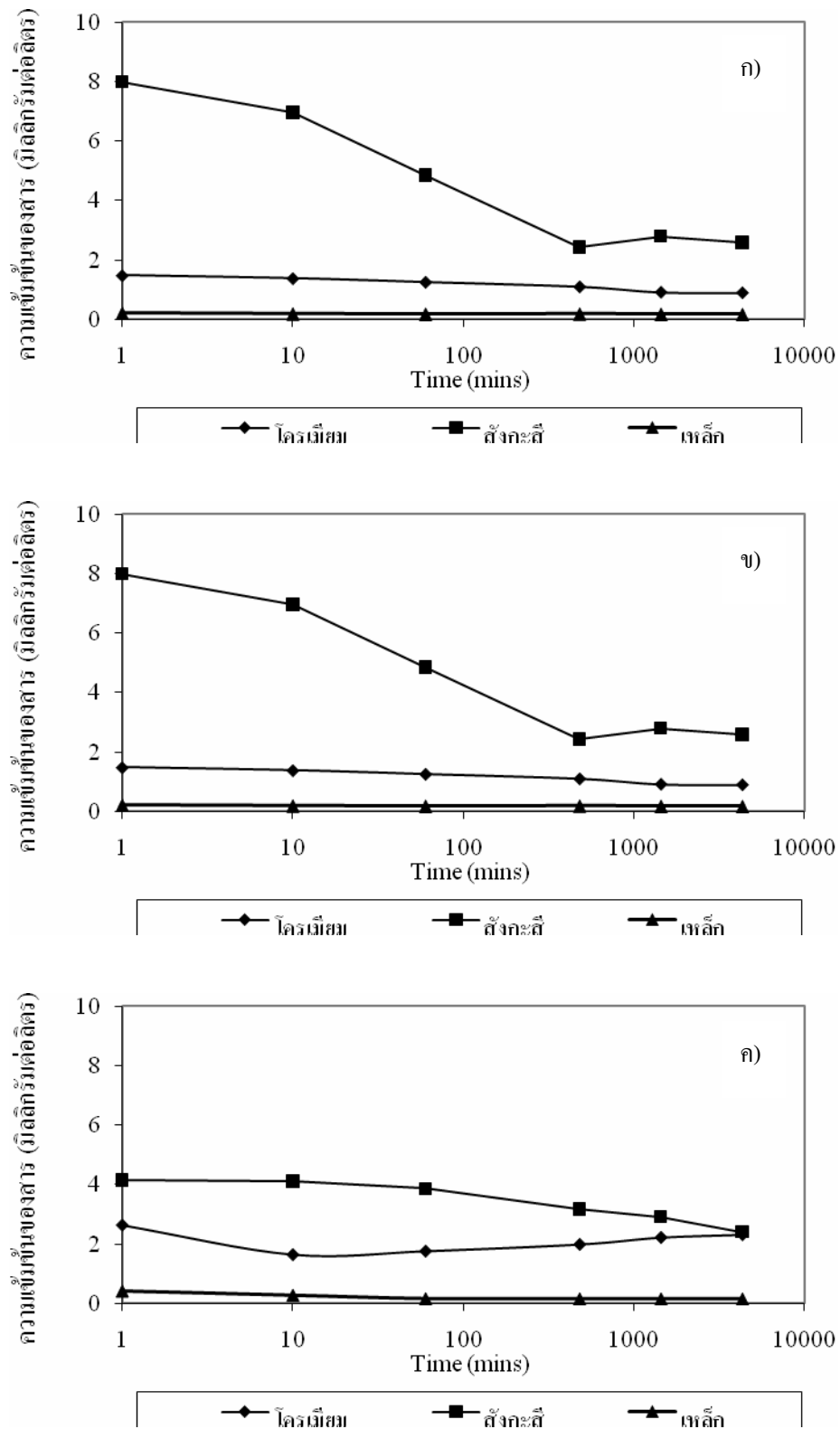
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและกากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์ พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมลดลงเมื่อระยะเวลาการไฮเดรชันเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ มีค่าเท่ากับ 847 และ 885 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และลดลงเหลือ 393 และ 354 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์และกากตะกอนโรงชุบ หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายที่ระยะเวลาไฮเดรชันต่างๆตลอดการทดลองคล้ายคลึงกัน

ในสภาวะที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต ทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและกากตะกอนจากโรงชุบ หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับในสภาวะควบคุม (ไม่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์) แต่ความเข้มข้นของแคลเซียมมีค่าต่ำกว่าเนื่องจากการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีสังเคราะห์ทำให้สัดส่วนของปูนขาวในส่วนผสมลดลง จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายลดลง ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันกับในตัวอย่างของสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ

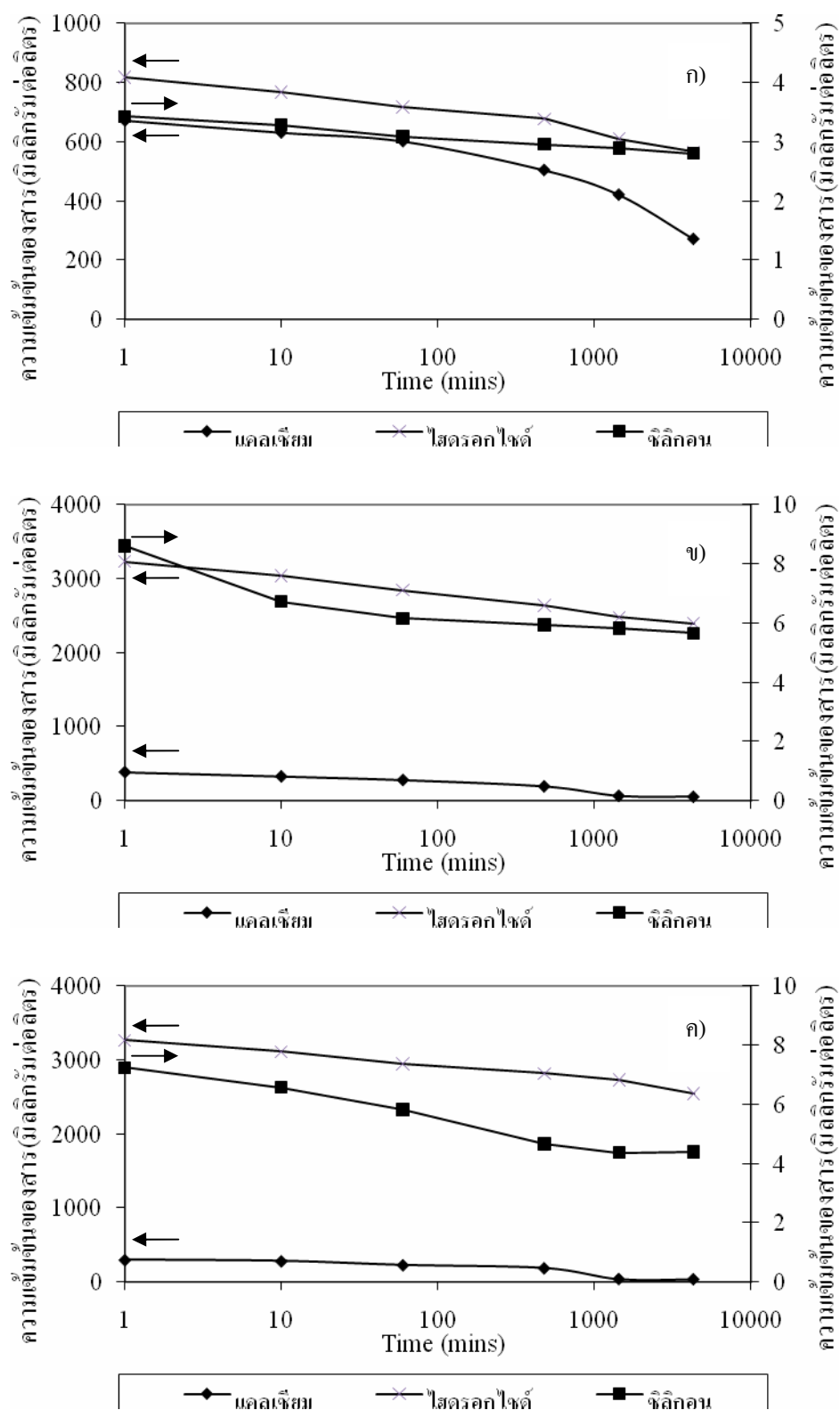
ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายตลอดการทดลอง มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีกากตะกอนโรงชุบ ความเข้มข้นของซิลิกอนในทุกสารละลายตลอดระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.88 – 2.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ความเข้มข้นของแคลเซียมมีค่าลดลงในช่วง 3 วัน โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 8.47 – 4.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่มีการเติมโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต ในสภาวะที่มีการเติมกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็ก โครเมียม และสังกะสีในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและกากตะกอนโรงชุบ หรือปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์และกากตะกอนโรงชุบ ในสภาวะที่มีและไม่มีโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต (รูปที่ 32 และ 34) พบว่า ความเข้มข้นของเหล็กมีค่าต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง ในขณะที่ความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น สำหรับสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและสังกะสีไฮดรอกไซด์ หรือ ปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์และสังกะสีไฮดรอกไซด์ พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่เท่ากับ 17.2 และ 9.1

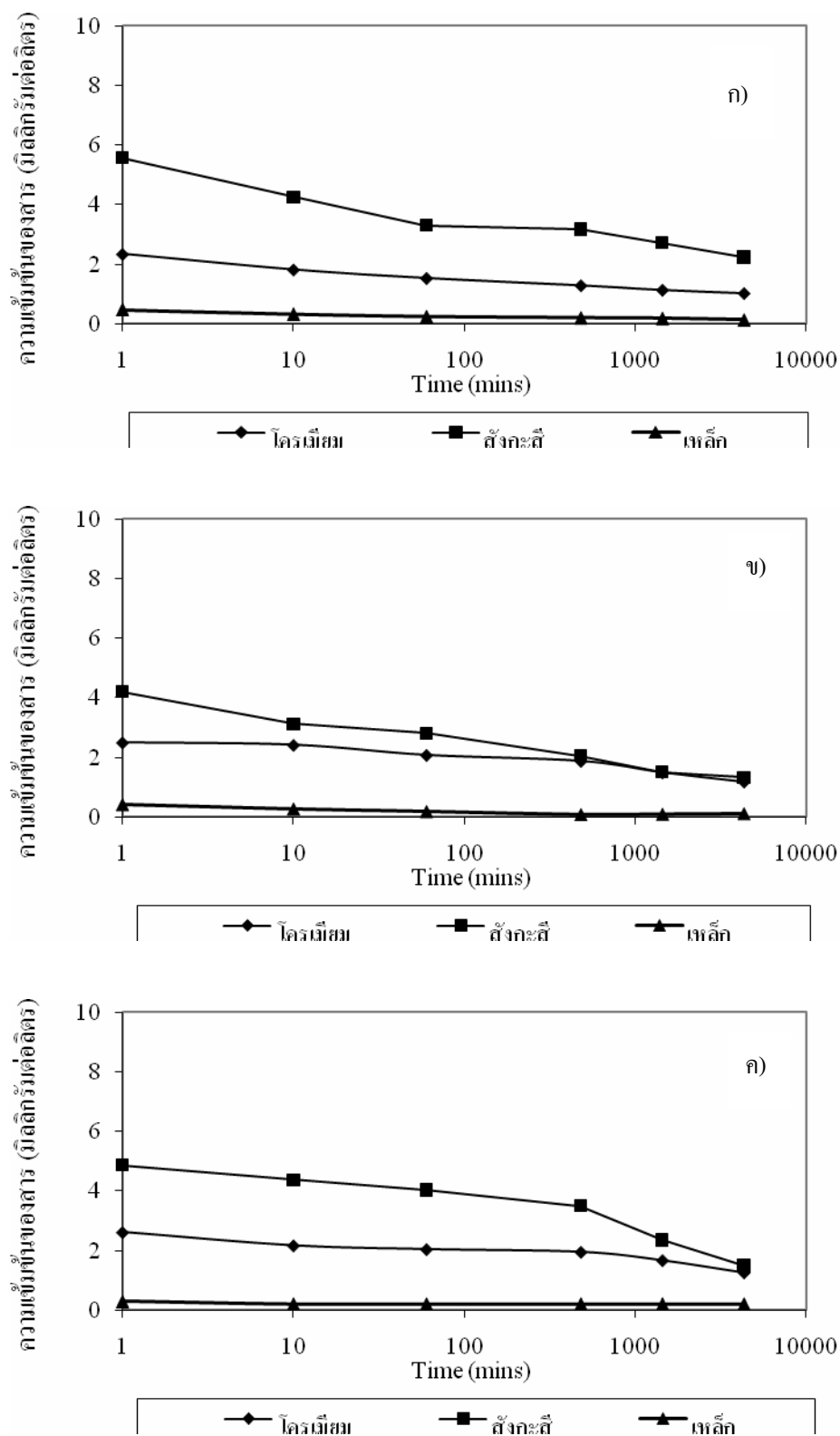
มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลา 3 วัน มีค่าเท่ากับ 10.08 และ 3.98 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อมีการเติมโซเดียมซัลเฟต และโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำมีค่าเท่ากับ 8.31 และ 7.79 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ระยะเวลา 1 นาที และในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 6.79 และ 6.64 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ความเข้มข้นของสังกะสีสังเคราะห์ในสารละลายมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ลดลงอาจเนื่องมาจากถูกตรึงอยู่ใน CSH หรืออาจจะไปแทนที่แคลเซียมใน CSH [\[ref\]](#)



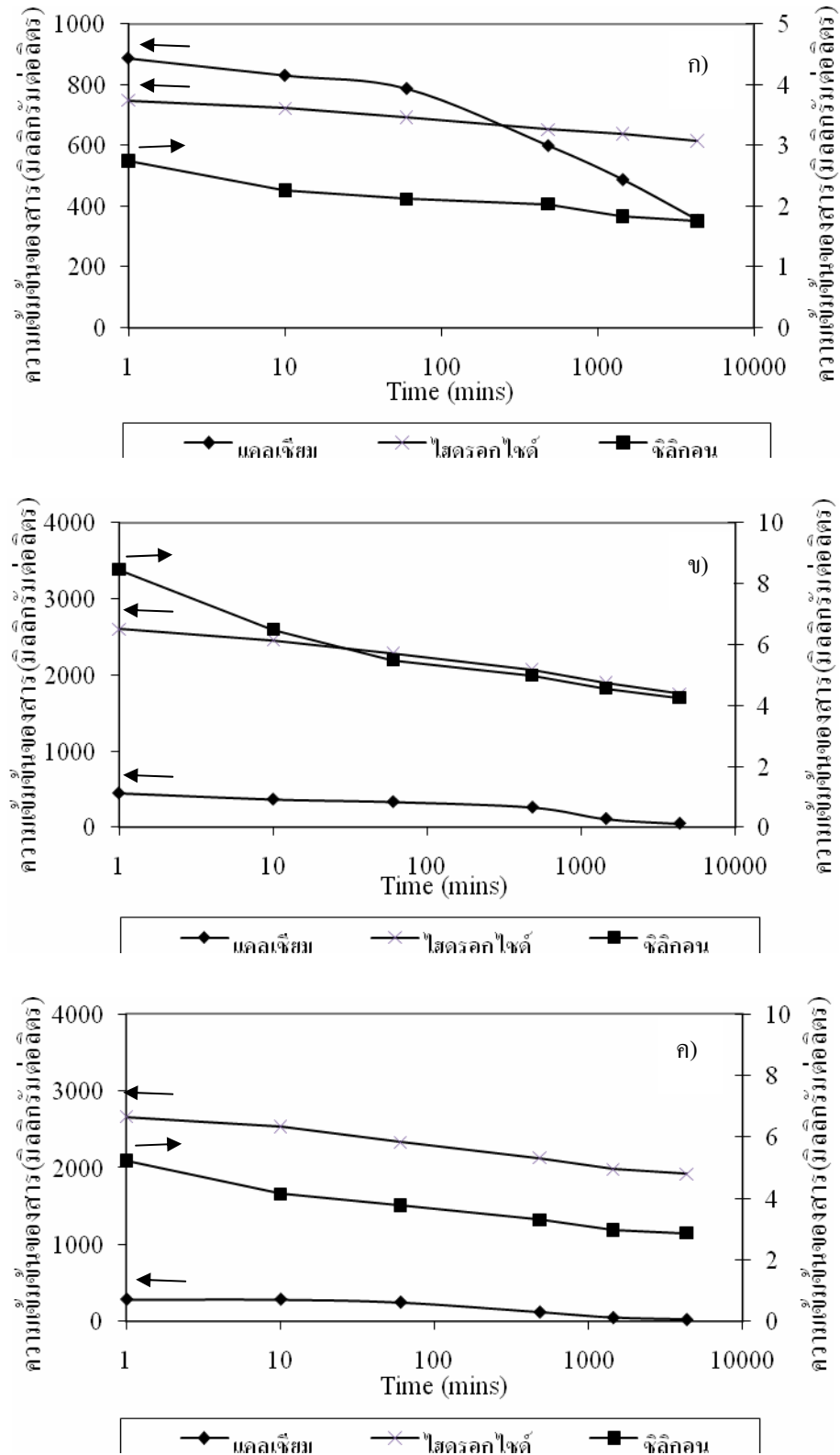
รูปที่ 32 ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายปูนขาวผสมถั่วแกลบดำและกากตะกอนจากโรงสุบร่อยละ 10 ก)ชุดควบคุม ข) โซเดียมซัลเฟต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



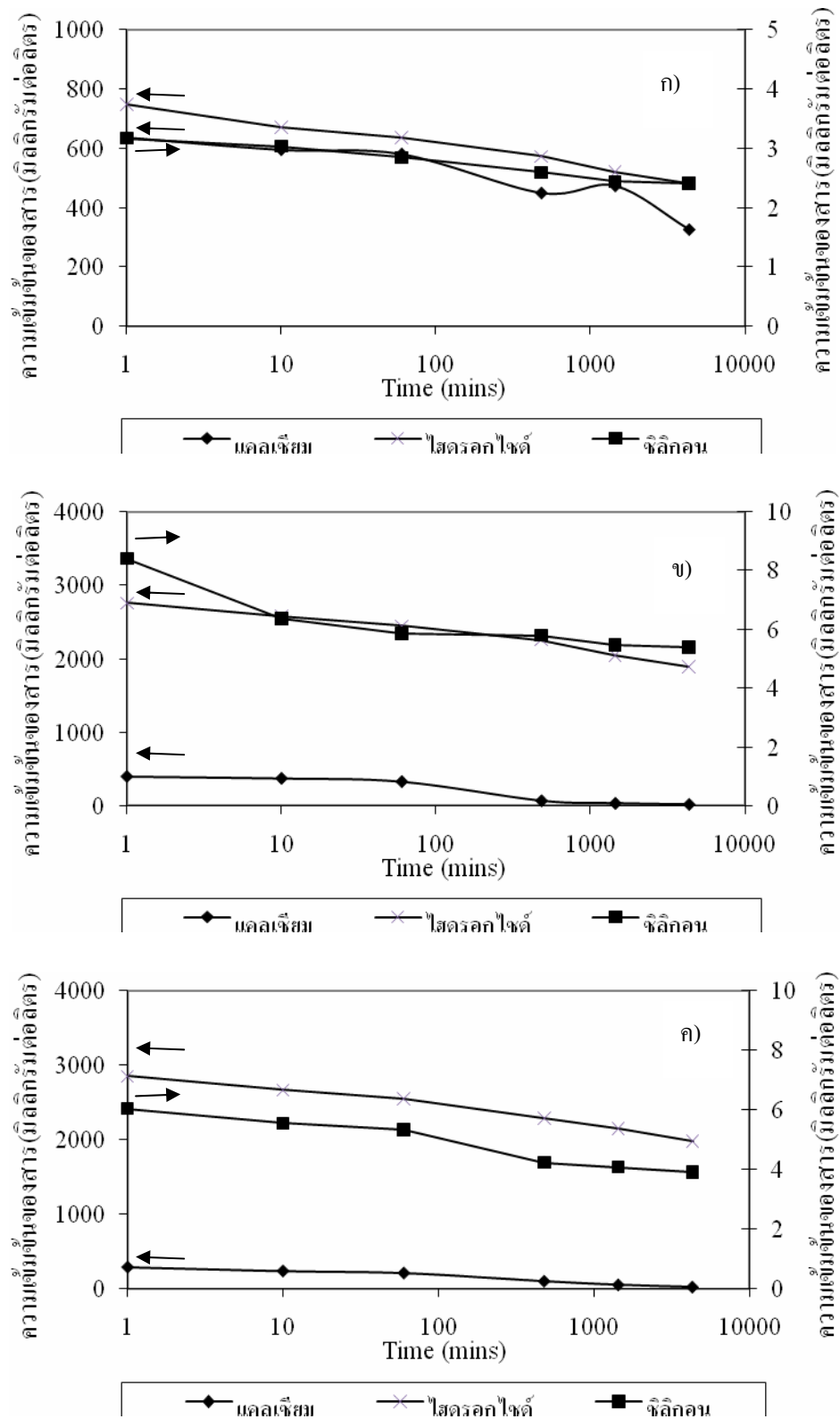
รูปที่ 33 ความเข้มข้นของอีดอนต่างๆในสารละลายปุ๋ยหมักผสมถั่วแกลบสังเคราะห์และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซัลเฟต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



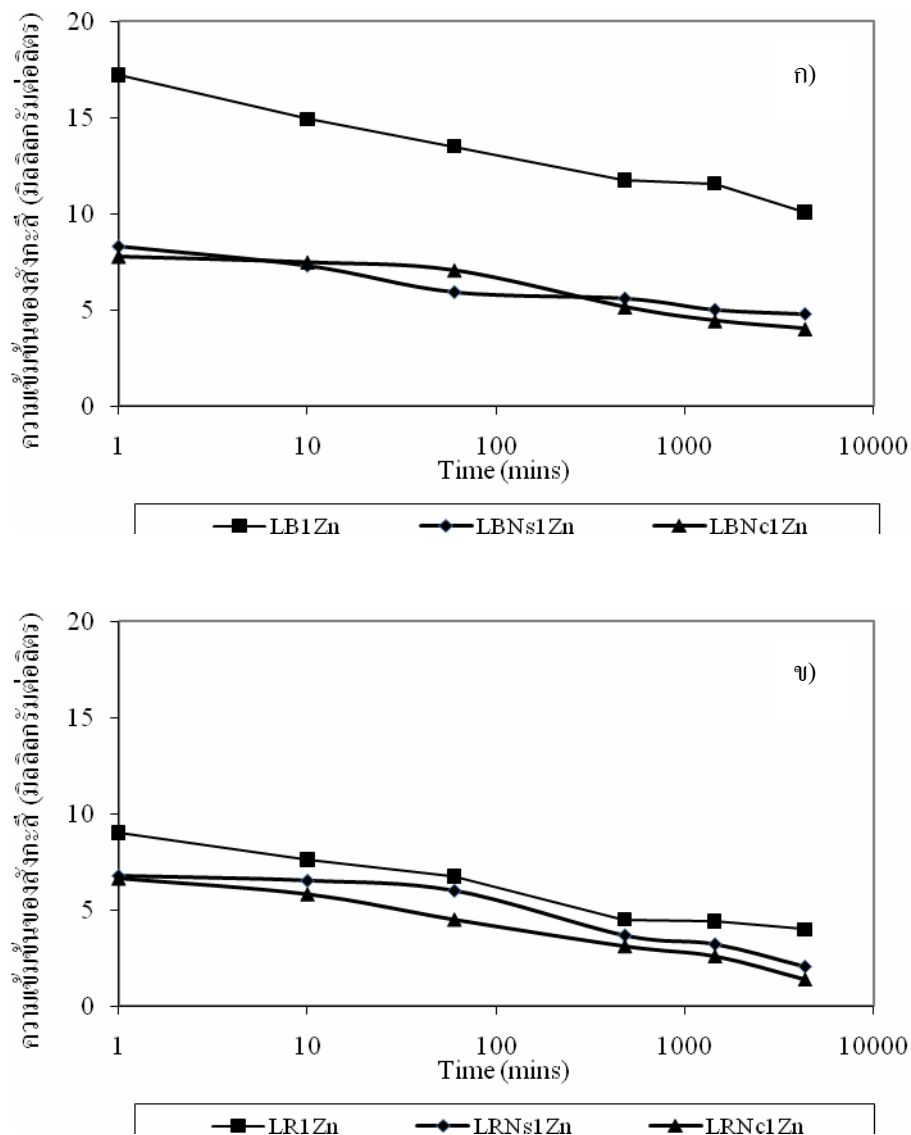
รูปที่ 34 ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายปุ๋ยหมักจากมูลสัตว์และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซัลไฟด์ และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 35 ความเข้มข้นของอ๊อนต่างๆในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 36 ความเข้มข้นของอออนต่างๆในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์และ
สังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียม
คาร์บอเนต



รูปที่ 37 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบในสถานะที่มีและไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยา ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ และ ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์

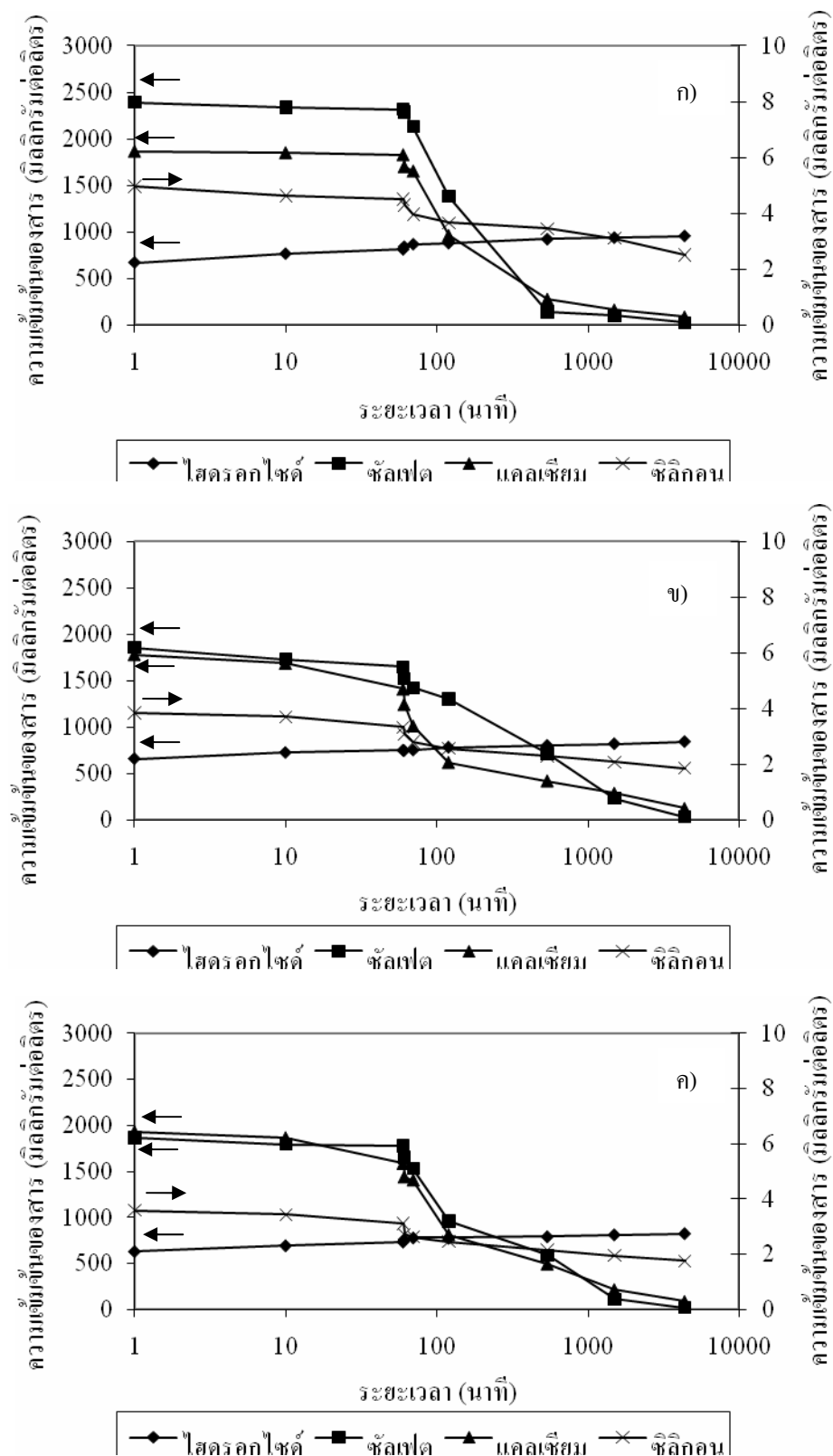
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยึดประสาน ต่อความเข้มข้นของอิออนต่างๆ ในสารละลาย

ในการศึกษาการปรับปรุงวิธีการผสมต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอิออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบและกากตะกอนจากโรงชุบ หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์ ในสถานะที่มีและไม่มีสารเติมโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต โดยทำการผสมวัสดุยึดประสานกับน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการเติมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์

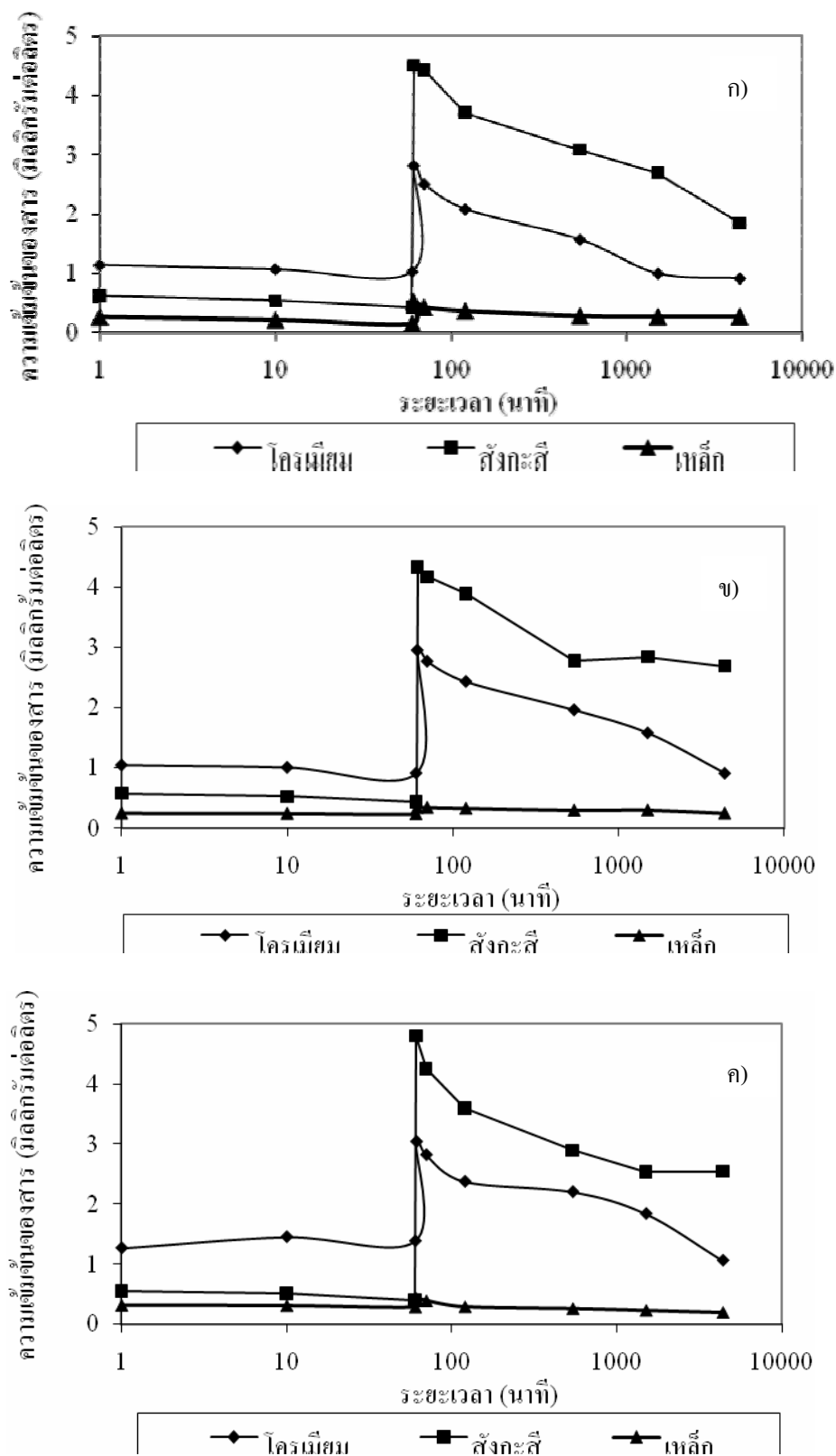
4.3.2.1 ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอ็อกซาลิโนในสารละลายปูนซีเมนต์ และ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอ็อกซาลิโนต่างๆกับระยะเวลาไฮเดรชันของสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ในสถานะที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม แสดงในรูปที่ 38 และ 40 ก-ค การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ แคลเซียม ซัลเฟต และ ซิลิกอนในช่วงระยะเวลาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมงแรกเหมือนกับในสารละลายที่ไม่ได้มีการปรับปรุงวิธีการผสม แต่มีค่าน้อยกว่า เนื่องมาจากในช่วงการผสม 1 ชั่วโมงแรกยังไม่ได้มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ ทำให้ปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ หรือเถ้ากลบสังเคราะห์สามารถทำปฏิกิริยาได้ตามปกติ เมื่อหลังจากที่เติมกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์พบว่าสารละลายปูนซีเมนต์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์มีค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เท่ากับ 840 และ 824 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเท่ากับ 957 และ 921 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน (รูปที่ 38 ก) ในทำนองเดียวกันความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ที่ทุกระยะเวลาไฮเดรชันที่ทำการสังเกตในตัวอย่างที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น

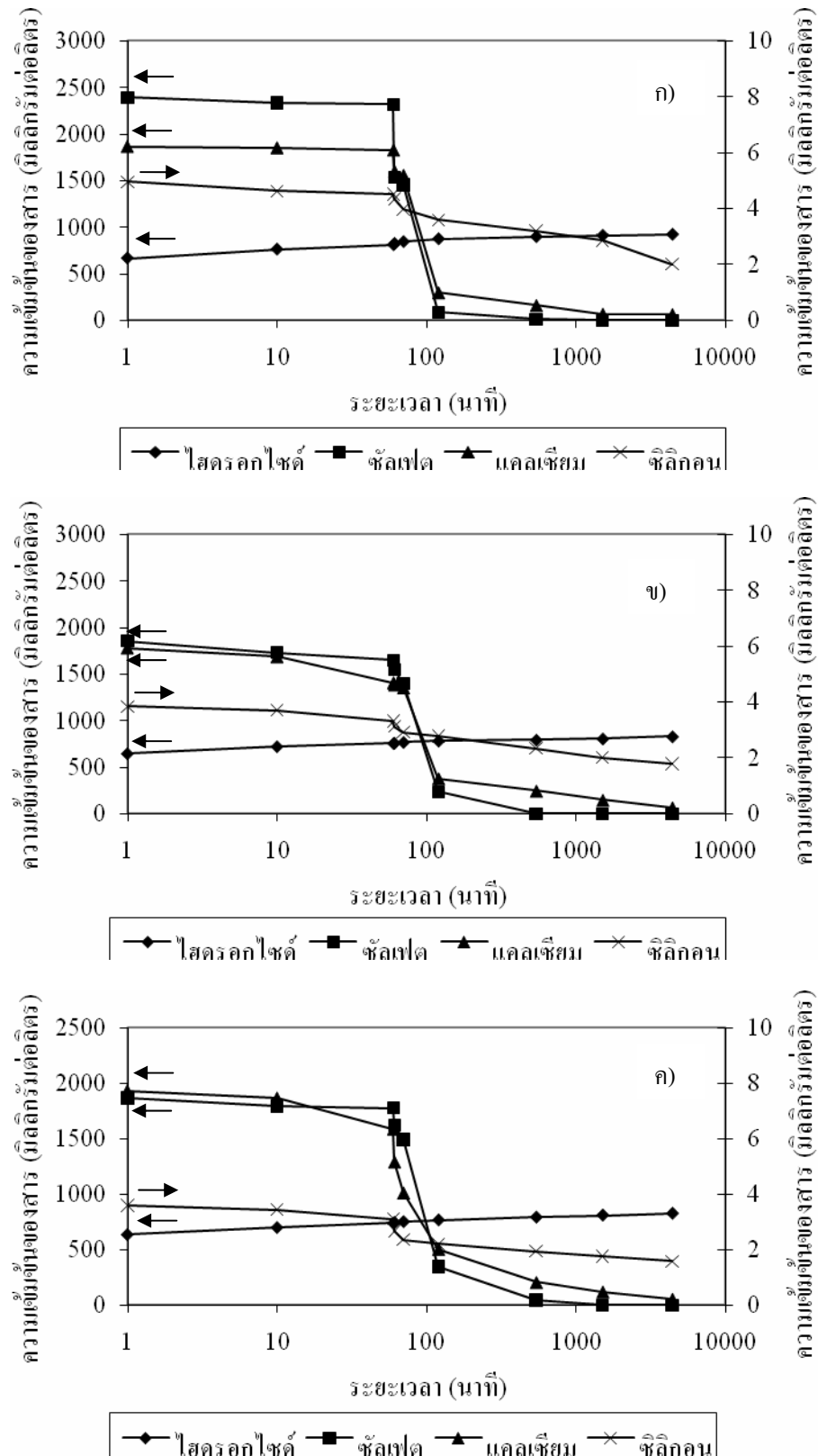
การเปลี่ยนแปลงของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ (รูปที่ 38 ก-ค) พบว่าความเข้มข้นของซัลเฟตหลังจากเติมกากตะกอน (61 นาที่) เท่ากับ 2,287, 1,519 และ 1,650 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงจนเหลือ 139, 717 และ 591 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากไฮเดรชันนาน 9 ชั่วโมง เป็นที่น่าสังเกตว่าตะกอนโรงชุบส่งผลให้ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่มีตะกอนโรงชุบ สำหรับสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์ที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์ พบว่าความเข้มข้นของซัลเฟตลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน โดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 60 นาที่ (ก่อนเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์) ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 2,318, 1,647 และ 1,775 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 85.3, 235 และ 345 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการไฮเดรชัน 2 ชั่วโมง (รูปที่ 40 ก-ค) สังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตในลักษณะเดียวกันกับตะกอนโรงชุบแต่ในระดับที่รุนแรงกว่า



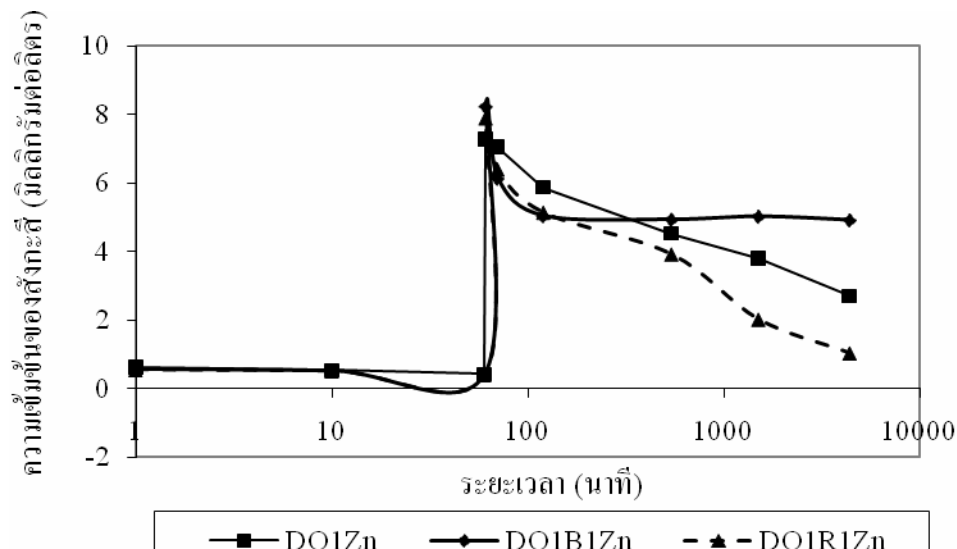
รูปที่ 38 ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของอิออนต่างๆในสารละลายที่ผสม
จากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 ก) ปูนซีเมนต์ ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ และ
ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์



รูปที่ 39 ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่ผสมจากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 ก) ปูนซีเมนต์ ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ และ ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์



รูปที่ 40 ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่างๆในสารละลายที่ผสม
สังกะสีสังเคราะห์ร้อยละ 10 ก) ปูนซีเมนต์ ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ และ ค)
ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังกะสี



รูปที่ 41 ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์ผสม
เถ้าแกลบและสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10

ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ที่มีการเติมกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 38 และ 40 ก-ค) พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมลดลงเมื่อระยะเวลาการไฮเดรชันเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาทีหลังจากเติมกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์ มีค่าเท่ากับ 1,704 และ 1,604 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และลดลงเหลือ 89 และ 64 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ และเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน

ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ หรือเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่มีการปรับปรุงวิธีการผสมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายแต่ละชนิดแตกต่างกันเล็กน้อยโดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตลอดระยะเวลาไฮเดรชันที่ทำการสังเกตอยู่ในช่วง 1.5 – 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 38 และ 40 ก-ค)

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็ก โครเมียม และสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีตะกอนโรงชุบ (รูปที่ 39 ก-ค) พบว่าความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายทั้ง 3 ชนิดมีค่าต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง ในขณะที่ความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น (หลังจากเติมกากตะกอนจากโรงชุบ) สำหรับสารละลายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์

ผสมเข้าเกลบดำ ปูนซีเมนต์ผสมเข้าเกลบสังเคราะห์ที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์ พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีหลังจากการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์ในสารละลายนาน 1 นาทีเท่ากับ 7.3, 8.3 และ 7.9 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น (รูปที่ 41)

4.3.2.2 ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของอออนในสารละลายปูนขาวผสมเข้าเกลบในสภาวะที่มีและไม่มีโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต

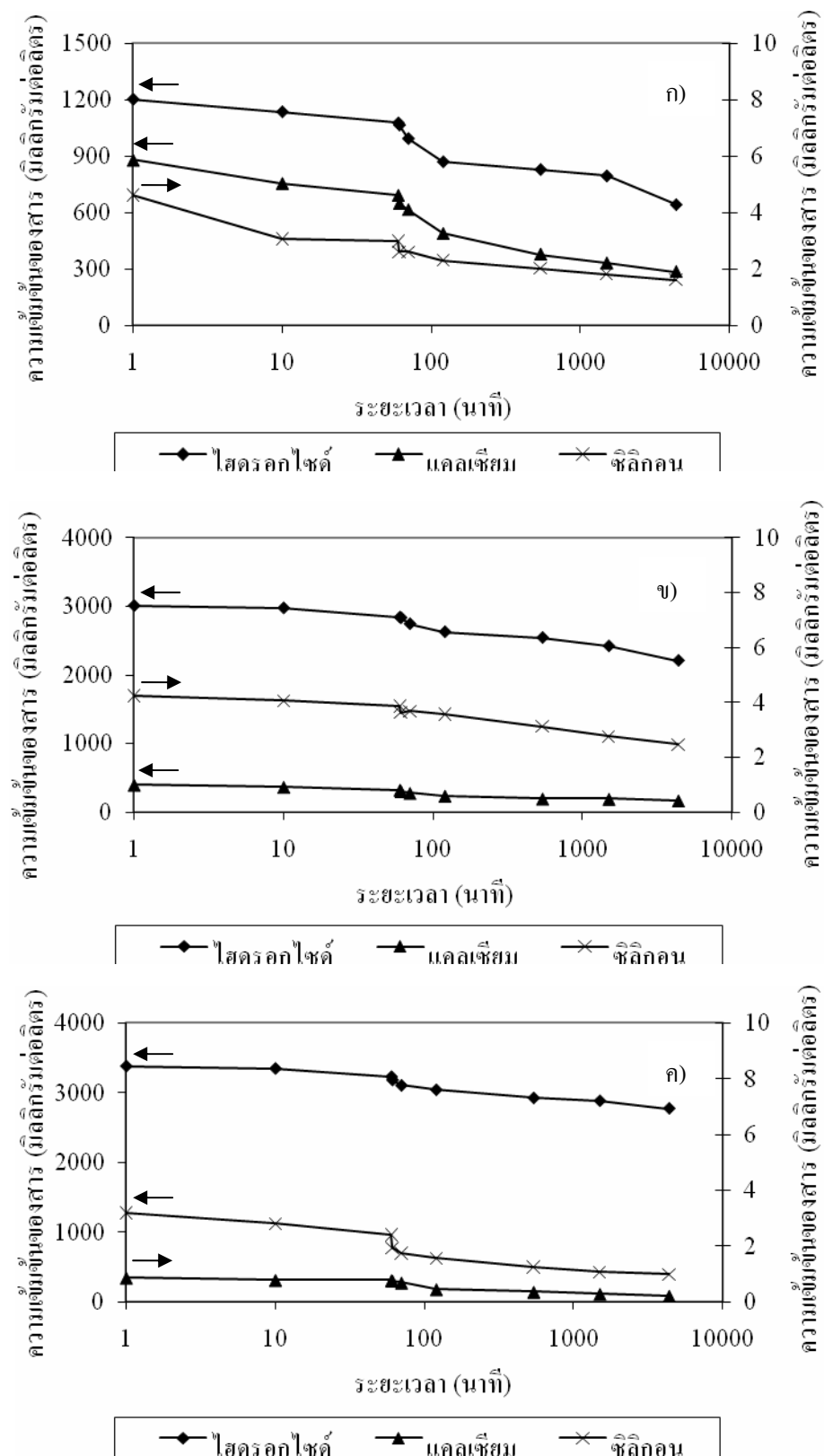
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอออนต่างๆกับระยะเวลาไฮเดรชันของสารละลายปูนขาวผสมเข้าเกลบดำและกากตะกอนโรงชุบ (รูปที่ 42 และ 43) หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 46 และ 48 ก) ในสภาวะที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการปรับปรุงวิธีการผสมโดยให้ปูนขาวและเข้าเกลบดำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจากนั้นจึงเติมกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ พบว่าที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาทีค่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายผสมเท่ากับ 1,065 และ 1,040 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ลดลงเท่ากับ 645 และ 625 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน (รูปที่ 42 ก) ในกรณีที่สารละลายผสมมีโซเดียมซิลิเกต ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์จะสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 2,833 และ 2,827 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที และลดลงเหลือ 2,208 และ 2,187 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 3 วัน (รูปที่ 42 ข) และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์สูงสุดเมื่อในสารละลายผสมมีโซเดียมคาร์บอเนต โดยที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่า 3,183 และ 3,185 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเหลือ 2,773 และ 2,648 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ 3 วัน (รูปที่ 42 ค) ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอออนต่างๆในสารละลายปูนขาวผสมเข้าเกลบสังเคราะห์และกากตะกอนจากโรงชุบ (รูปที่ 44 และ 45 ก-ค) หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 47 ก-ค และ 48 ข) ในสภาวะที่มีและไม่มีโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับกรณีของสารละลายปูนขาวผสมเข้าเกลบดำ

ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเข้าเกลบดำและกากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์ในกรณีที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียมลดลงเมื่อระยะเวลาการไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ในสภาวะที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ที่เติมเข้าไปในส่วนผสมทำให้สัดส่วนของปูนขาวในส่วนผสมลดลง จึงส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายลดลง ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเข้าเกลบสังเคราะห์และตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮ

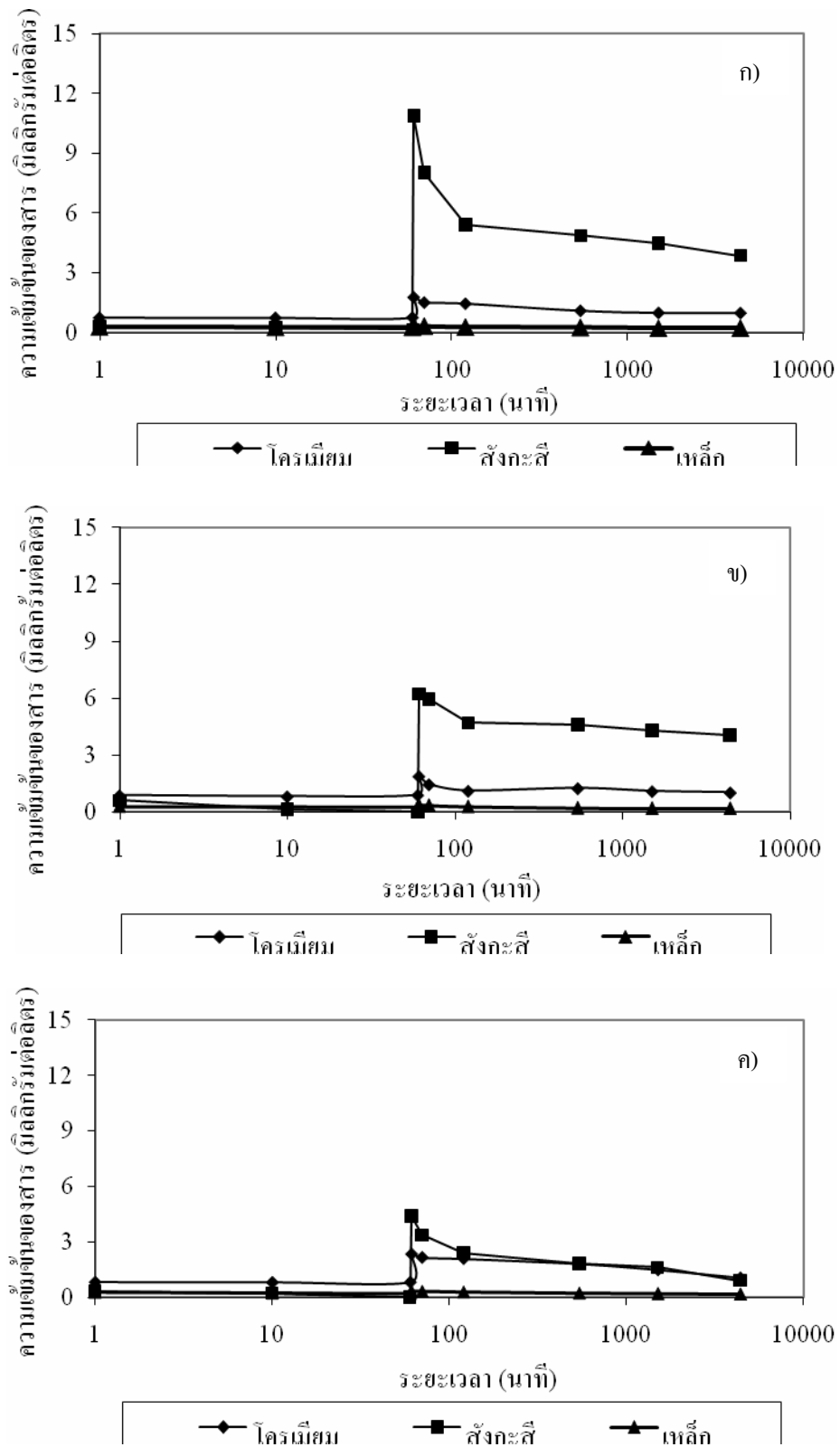
ดรอกรอกไซด์ ในสภาวะที่มีและไม่มีโซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมคาร์บอเนต มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะคล้ายกับที่เกิดขึ้นในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ

ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและกากตะกอนโรงชุบ หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์ ในสภาวะที่มีและไม่มีโซเดียมซัลไฟด์ หรือ โซเดียมคาร์บอเนต พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยตลอดระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอยู่ในช่วง 4.62 – 0.90 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์มีค่าความเข้มข้นของซิลิกอนอยู่ในช่วง 5.43 - 0.88 มิลลิกรัมต่อลิตร

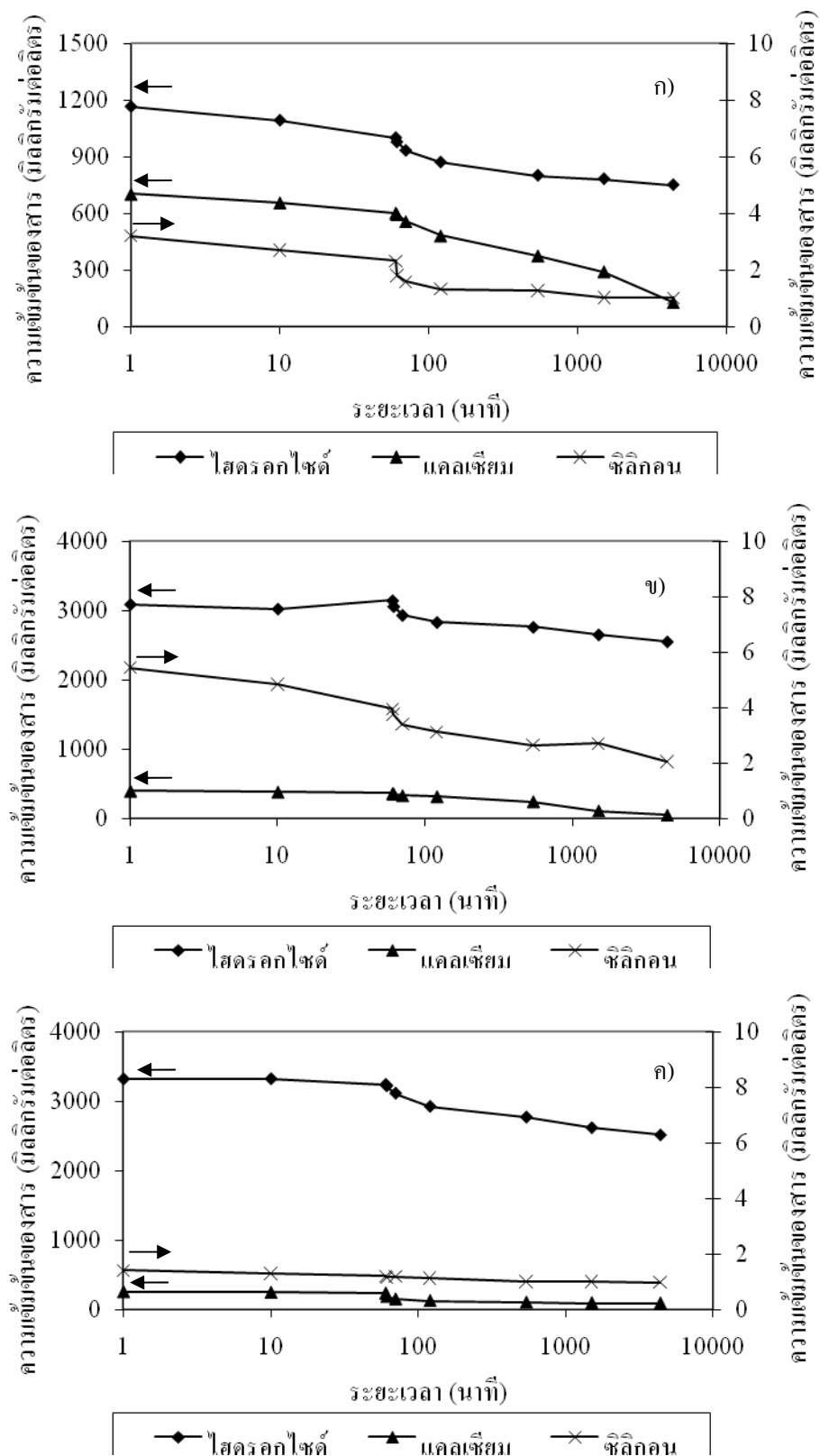
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็ก โครเมียม และสังกะสีในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีกากตะกอนโรงชุบ ในสภาวะที่มีและไม่มีโซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมคาร์บอเนต แสดงในรูปที่ 43 ก-ค และ 45 ก-ค โดยผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายแต่ละชนิดมีค่าต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรตลอดการทดลอง ในขณะที่ความเข้มข้นของโครเมียมและสังกะสีมีค่าสูงในช่วงแรกของการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ และลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น สำหรับสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์ พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่เท่ากับ 16.08 และ 13.41 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และลดลงเหลือ 5.64 และ 1.36 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน และในสภาวะที่มีโซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำเท่ากับ 8.9 และ 9.08 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ และในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 6.03 และ 5.79 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสังกะสีสังเคราะห์ในสารละลายมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าโซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมคาร์บอเนตส่งผลให้ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายลดลง ซึ่งเป็นผลดีเนื่องจากสังกะสีไปรบกวนการไฮเดรชันของวัสดุยึดประสานลดลง ทำให้ก้อนหล่อแข็งของเสียสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้เร็วขึ้น



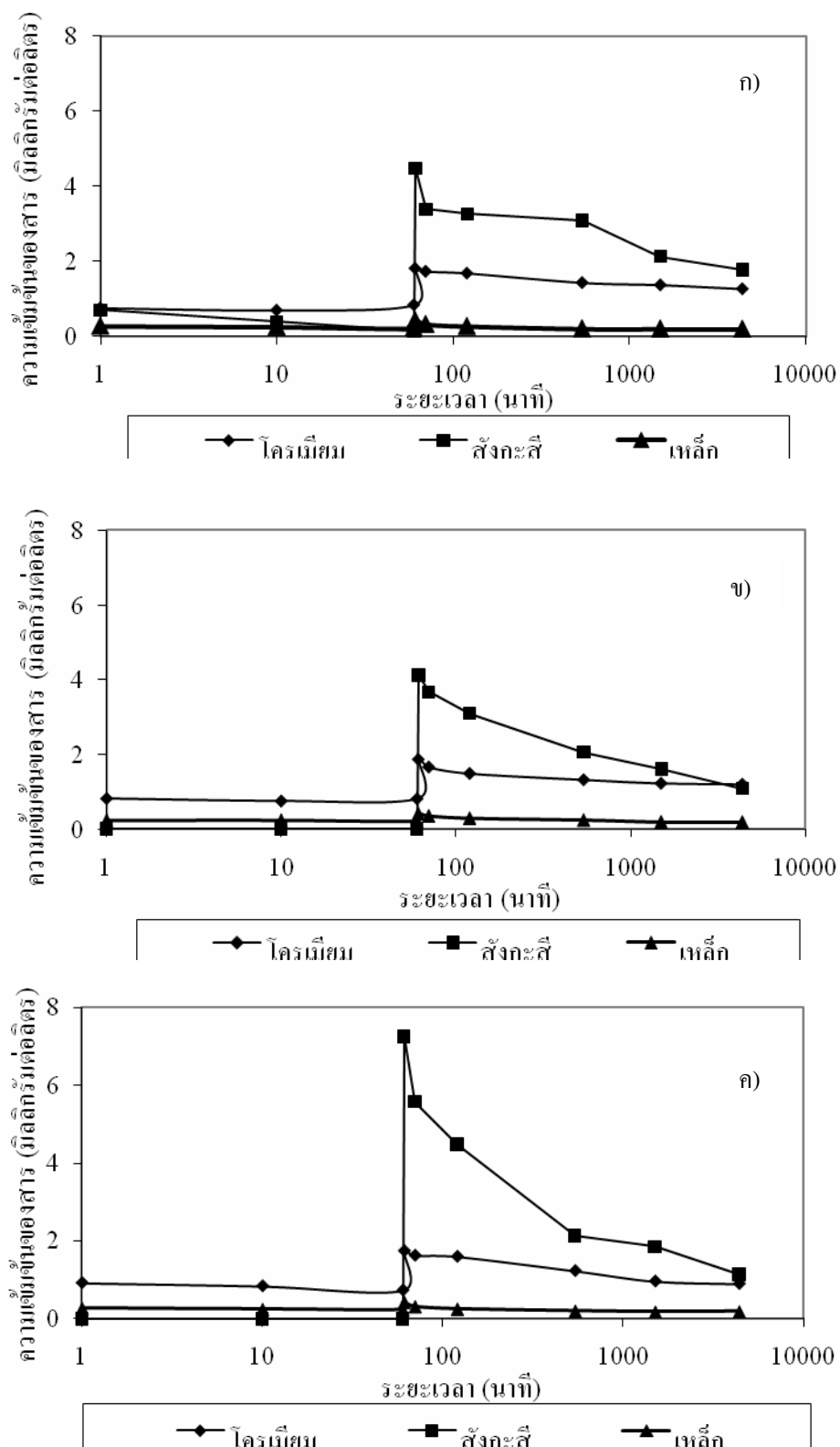
รูปที่ 42 ผลของการปรับปรุงวิธีการผสมต่อความเข้มข้นของอียอนต่างๆในสารละลายพูนขาว ผสมแก้แกลบดำและกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซัลเฟต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



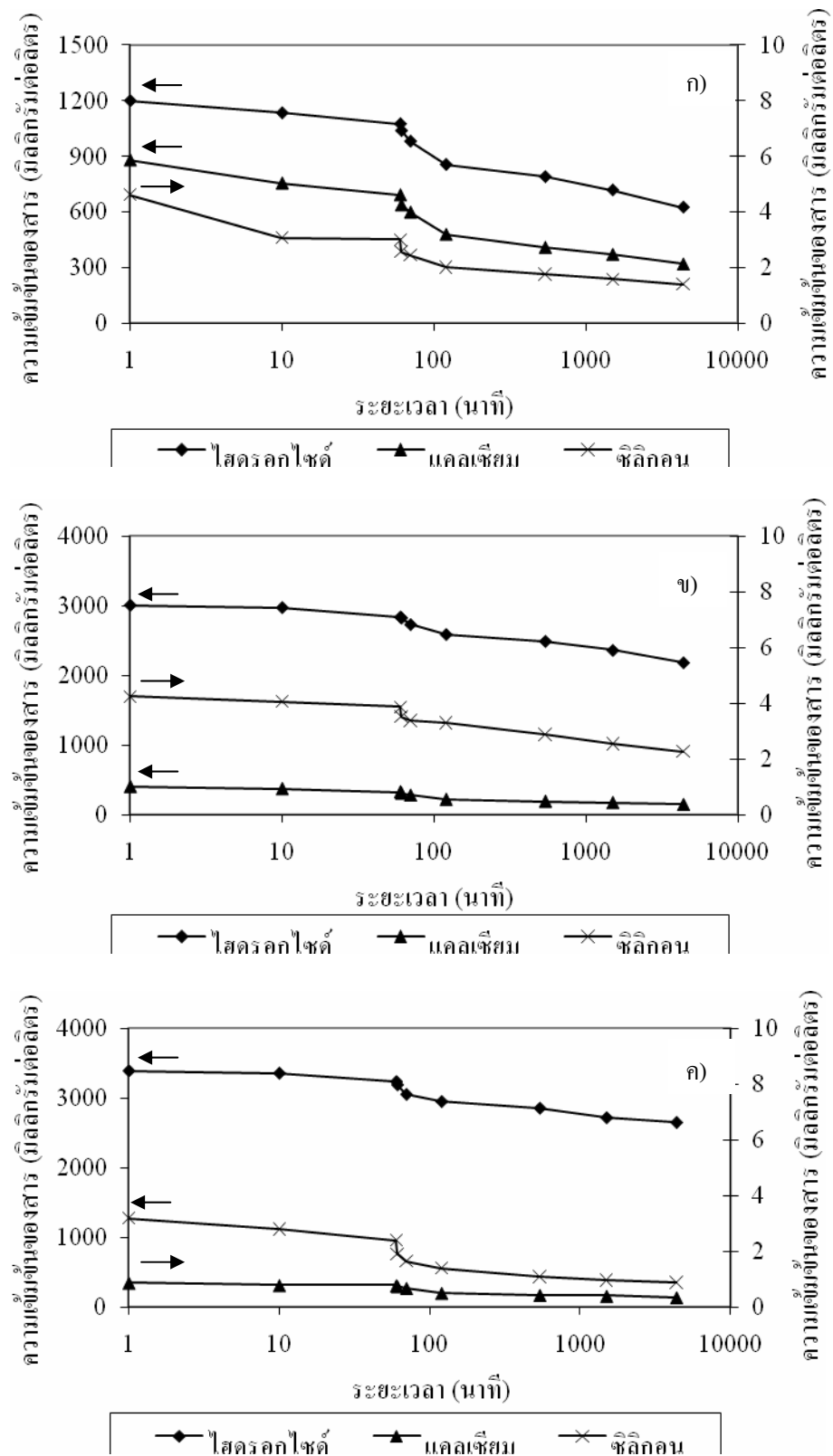
รูปที่ 43 ผลของการปรับปรุงวิธีผสมต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายยาปนขาวผสม
 ถั่วแกลบดำและกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซัลไฟเกต
 และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



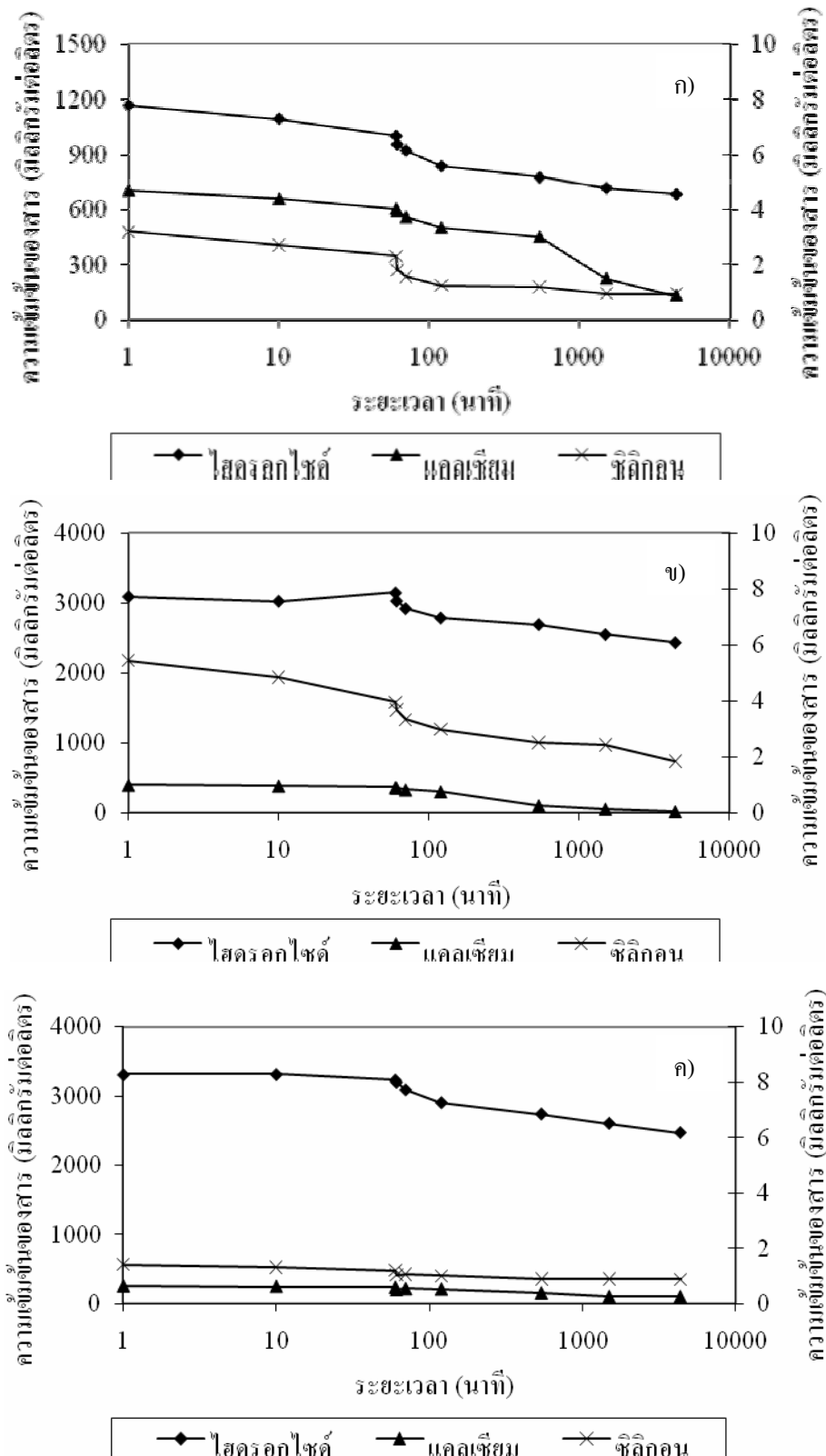
รูปที่ 44 ผลของการปรับปรุงวิธีผสมต่อความเข้มข้นของอ็อกไซด์ต่างๆในสารละลายปูนขาวผสม
 แก้วและบดสังเคราะห์และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซิลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



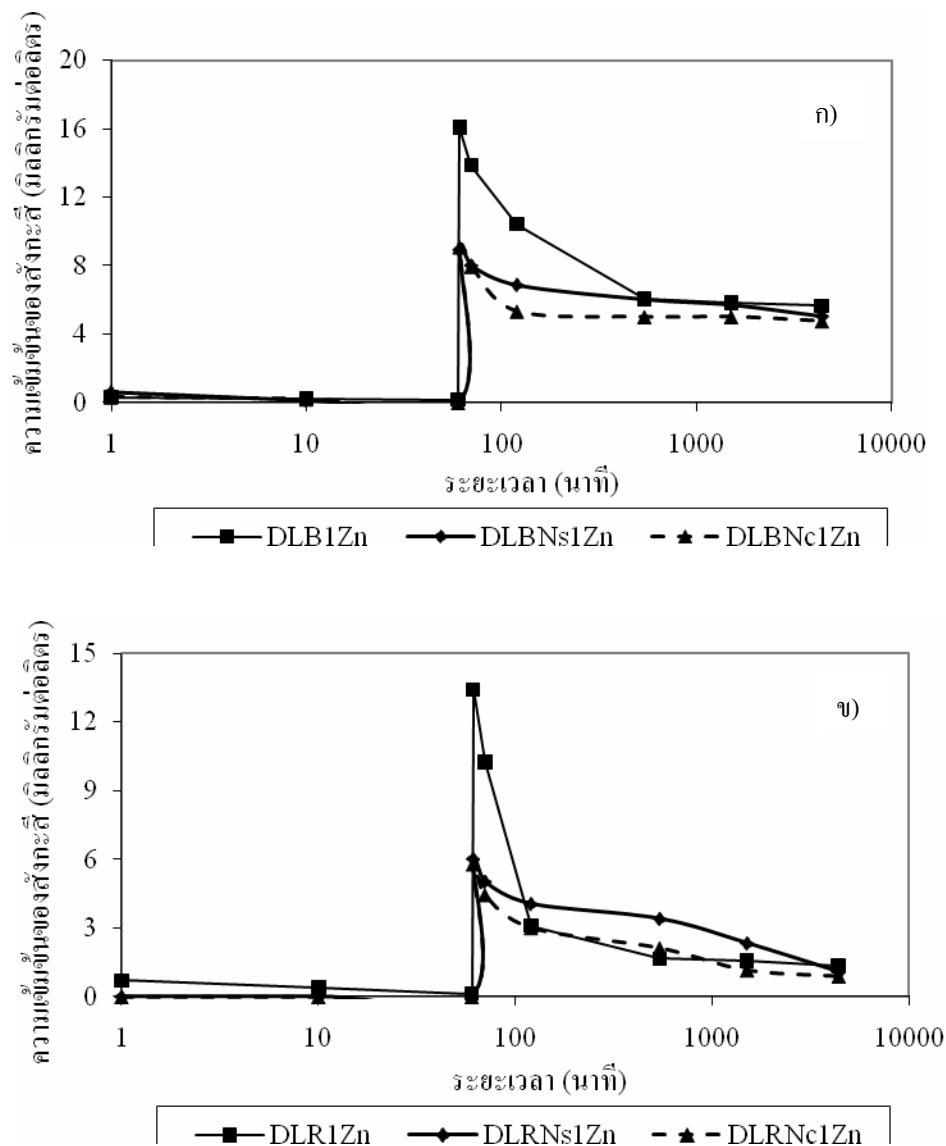
รูปที่ 45 ผลของการปรับปรุงวิธีผสมต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายปูนขาวผสม
 ถั่วแกลบสังเคราะห์และกากตะกอนซากโรงชุบร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซิ
 ลิเกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 46 ผลของการปรับปรุงวิธีผสมต่อความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายปูนขาวผสม
 แก้วและด่างและสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ก) ขูดควบคุม ข) โซเดียมซิลิเกต และ
 ค) โซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 47 ผลของการปรับปรุงวิธีผสมต่อความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายปูนขาวผสม
 แก้วกลบสังเคราะห์และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ก) ชุดควบคุม ข) โซเดียมซิลิ
 เกต และ ค) โซเดียมคาร์บอเนต



รูปที่ 48 ผลของการปรับปรุงวิธีผสมต่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนขาวผสมเถ้า
 แกลบและสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ในสภาวะที่มีและไม่มีสารกระตุ้น ก) ปูนขาว
 ผสมเถ้าแกลบดำ ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์

4.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของก้อนของเสียหล่อแข็ง

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด การรั่วไหลของโลหะหนัก และ การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี พบว่าก้อนของเสียหล่อแข็งที่ใช้ปูนขาวและเถ้าแกลบดำเป็นวัสดุยึดประสานมีคุณภาพใกล้เคียงกับก้อนของเสียหล่อแข็งที่ใช้ปูนขาวและเถ้าแกลบสังเคราะห์เป็นวัสดุยึดประสาน แสดงให้เห็นว่า เถ้าแกลบดำสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุยึดประสานแทนเถ้าแกลบสังเคราะห์ในการกักเก็บของเสียประเภทโลหะหนัก จากอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ดังนั้นในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของก้อนของเสียหล่อแข็งจึงได้เลือกตัวอย่างที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำในปริมาณร้อยละ 10 และ ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วน 50:50 เป็นวัสดุอัดประสานในการตั้งรังกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 50 และสังกะสีไฮดรอกไซด์ในปริมาณร้อยละ 30 ในสภาวะที่มีและไม่มีโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต

ผลการทดสอบความเป็นผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิค x-ray diffraction (XRD) พบสารประกอบหลายชนิดในตัวอย่างก้อนของเสียหล่อแข็ง ดังนั้นจึงได้ให้สัญลักษณ์ของสารประกอบแต่ละชนิด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

A = Calcium zinc silicate hydrate

B = Calcium zinc hydroxide hydrate

C = Di- and Tri-calcium silicate

D = CaZnCO_3

E = ettringite

H = Calcium silicate hydrate

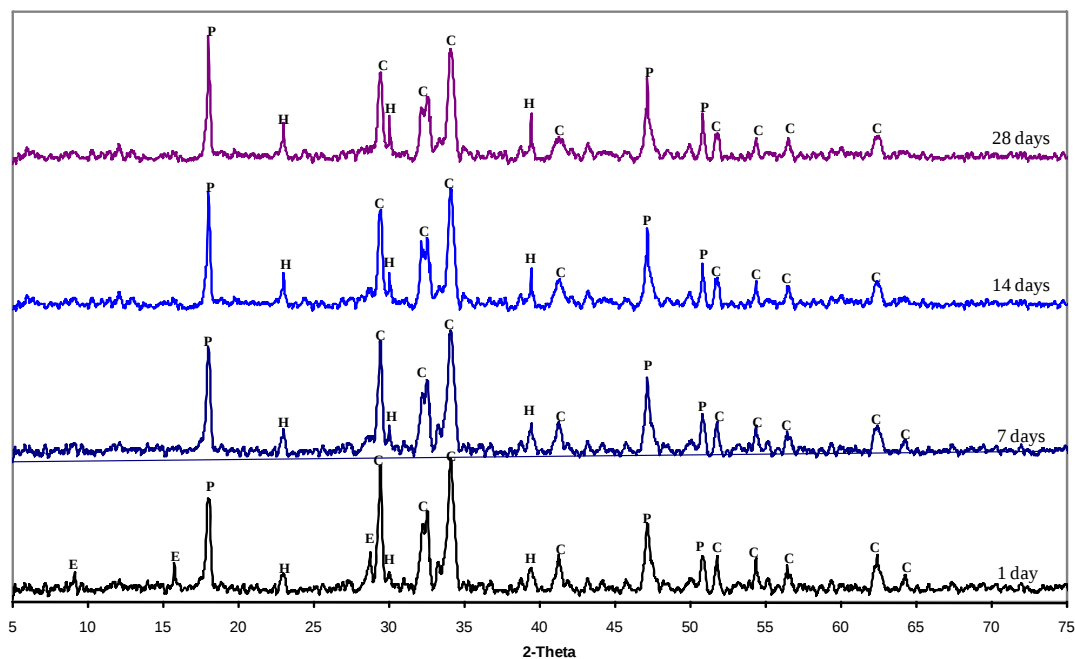
P = Portlandite (Ca(OH)_2)

O = Calcium carbonate (CaCO_3)

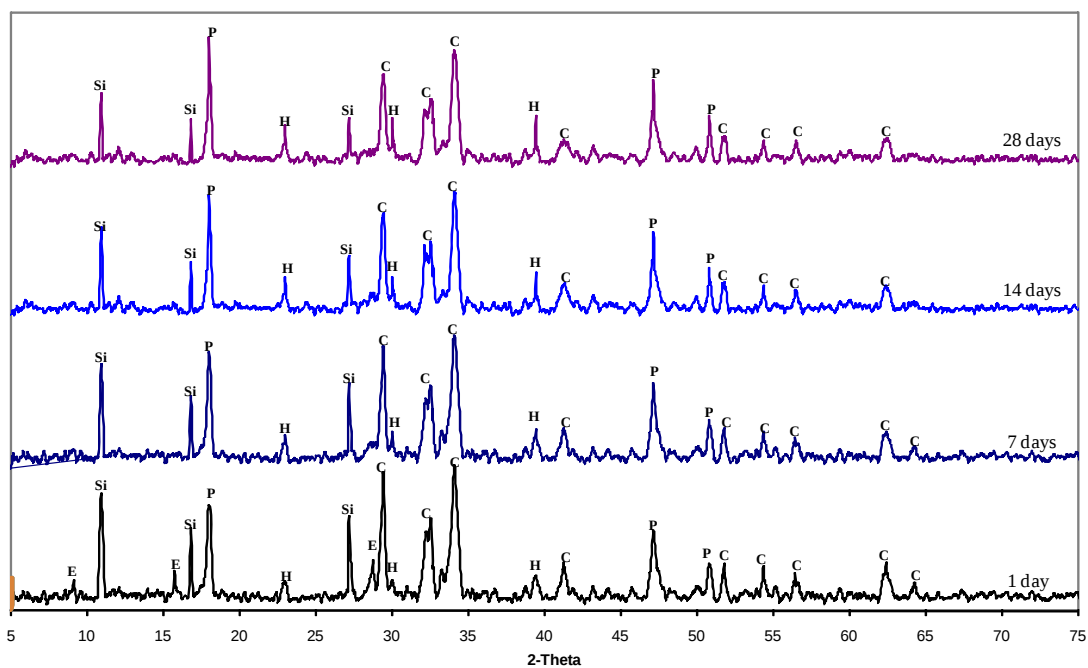
Si = Silicon dioxide

Z = Zinc oxide

รูปที่ 49 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ใดและไตรแคลเซียมซิลิเกต และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารประกอบหลักที่อยู่ในซีเมนต์เฟสต์ นอกจากนี้ยังพบ ettringite ที่อายุการบ่ม 1 วัน เมื่ออายุของตัวอย่างมากขึ้นความสูงของพีคใดและไตรแคลเซียมซิลิเกต (C) ลดลง เนื่องจากทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำกลายเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (P และ H) ดังนั้นความสูงของพีคทั้งสองจึงเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่าง เนื่องจากเทคนิค XRD ที่ใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบต่าง ๆ นั้นไม่สามารถบอกปริมาณของสารแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นได้โดยตรง ดังนั้นจึงอาศัยความสูงของพีคในการเปรียบเทียบเชิงปริมาณ ซึ่งบอกได้เพียงคร่าว ๆ เท่านั้น



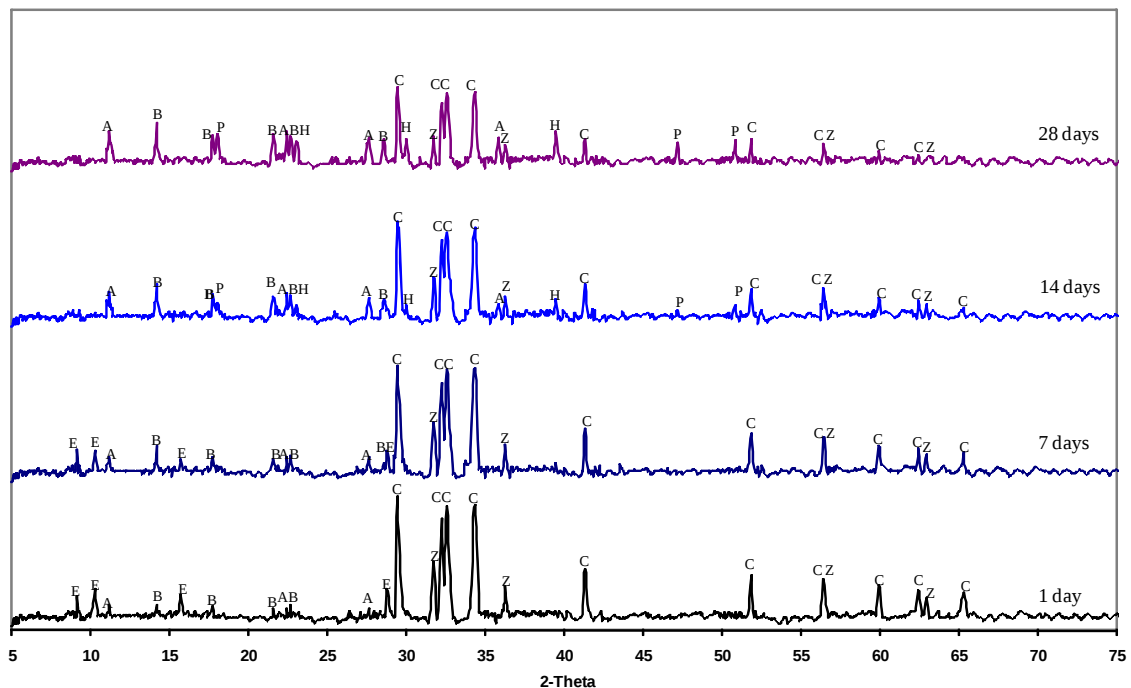
รูปที่ 49 สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์เพสต์ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 50 สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำร้อยละ 10 ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำร้อยละ 10 (รูปที่ 50) พบว่าพีคของสารประกอบหลักต่างๆที่พบในซีเมนต์เพสต์ยังคงปรากฏอยู่ในตำแหน่งเดิม ยกเว้นพีคของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ปรากฏเพิ่มขึ้นมา เนื่องจากเถ้าแกลบดำมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์สูง

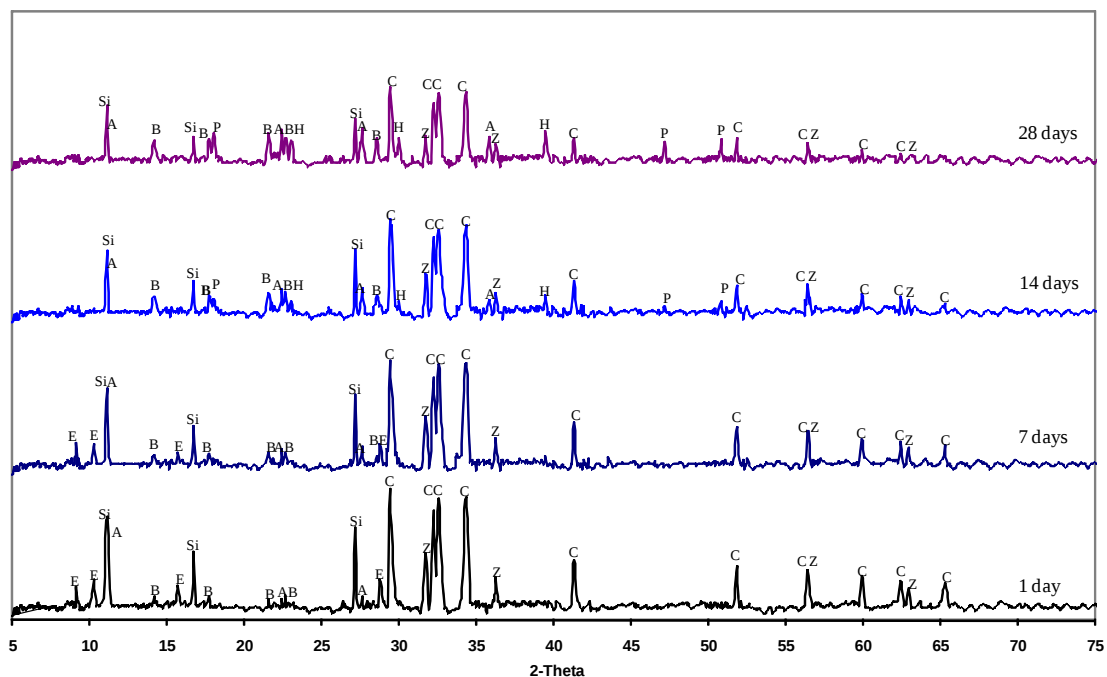
อย่างไรก็ดีความสูงของพีคสำหรับซิลิกอนไดออกไซด์ (Si) ลดลงเมื่ออายุของตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในแก้วกลบตาถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาปอโซซานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต



รูปที่ 51 สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

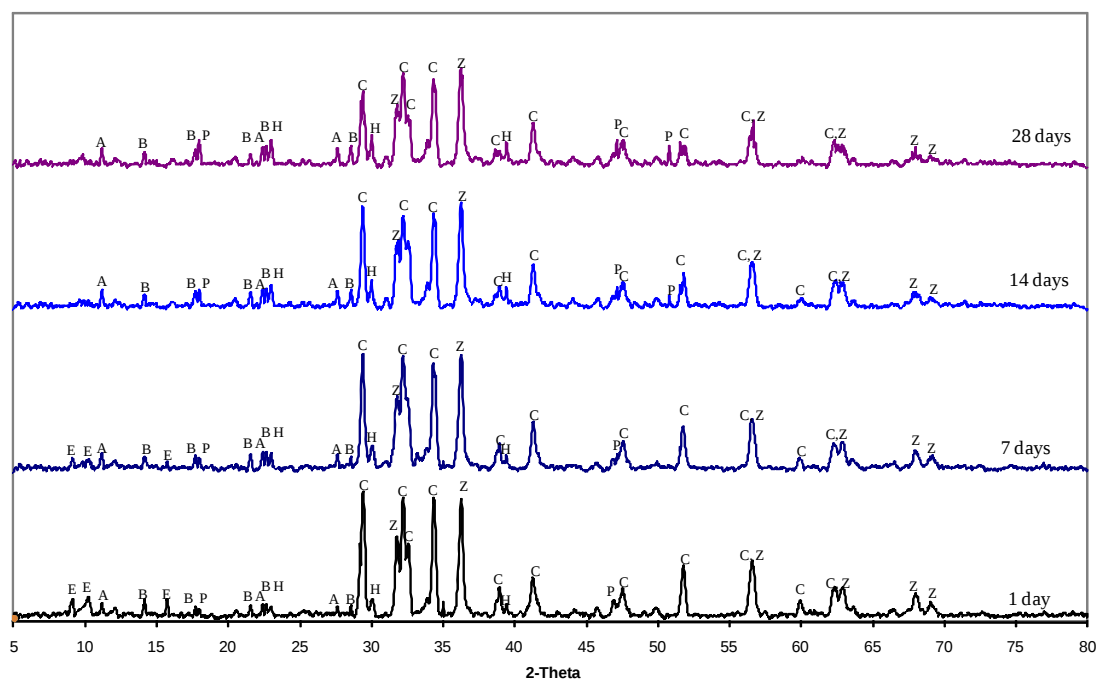
รูปที่ 51 แสดงสารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 1 และ 7 วันปรากฏพีคของสารประกอบ ettringite และพีคนี้ไม่ปรากฏในตัวอย่างที่มีอายุ 14 วัน ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบ ettringite เปลี่ยนเป็น monosulfate อาจจะเป็นไปได้ว่ากากตะกอนจากโรงชุบทำให้ ettringite เปลี่ยนไปเป็น monosulfate ได้น้อยลง นอกจากนี้ยังพบสังกะสีออกไซด์ (ZnO, Z) ในตัวอย่างที่ทุกอายุการบ่ม เนื่องจากกากตะกอนจากโรงชุบมีสังกะสีออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ความสูงของพีคสำหรับสังกะสีออกไซด์ลดลง นอกจากสังกะสีออกไซด์ยังปรากฏพีคที่เป็นสารประกอบของสังกะสีอีก 2 ชนิดได้แก่ calcium zinc hydroxide hydrated ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, B) และ calcium zinc silicate hydrate ($\text{CaZnSiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, A) ตั้งแต่อายุ 1 วัน การเกิดสารประกอบของ calcium zinc hydroxide hydrated ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคลเซียม และไฮดรอกไซด์ในระบบลดลง ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลาย และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ลดลง นอกจากนี้ยังอาจเกิดได้จากการตกตะกอนของ

calcium zinc hydroxide hydrated บนผิวหน้าของอนุภาคปูนซีเมนต์ทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นพีคของ calcium zinc hydroxide hydrated และ calcium zinc silicate hydrate มีความสูงเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารประกอบของโลหะหนักชนิดอื่น เช่น โครเมียม และเหล็กมีอยู่ในกากตะกอนโรงชุบในปริมาณน้อย จึงมองไม่เห็นด้วยเทคนิคของ XRD เนื่องจากความสูงของพีคต่ำจึงถูกบดบังด้วยพีคที่สูงกว่า ในทำนองเดียวกันตัวอย่างที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบดำในปริมาณร้อยละ 10 พบสารประกอบต่างๆปรากฏในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 52

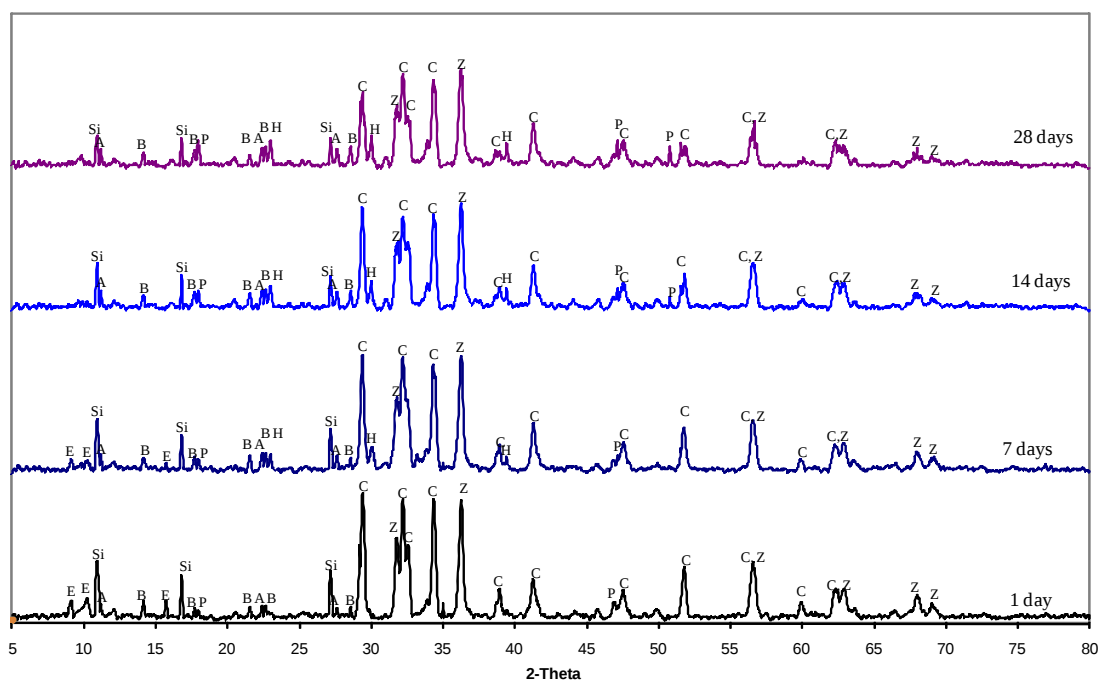


รูปที่ 52 สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำร้อยละ 10 และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

เมื่อมีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 ในก้อนหล่อแข็งของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ (รูปที่ 53) และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบดำร้อยละ 10 (รูปที่ 54) เป็นวัสดุยึดประสาน พบพีคของ calcium zinc hydroxide hydrated และ calcium zinc silicate hydrate เช่นเดียวกับที่พบในตัวอย่างที่มีกากตะกอนจากโรงชุบ โดยพีคของสารประกอบทั้งสองชนิดปรากฏอยู่ในตัวอย่างที่ทุกอายุการบ่ม และความสูงของพีคสำหรับสารประกอบ calcium zinc silicate hydrate ต่ำกว่าพีคของ calcium zinc hydroxide hydrated

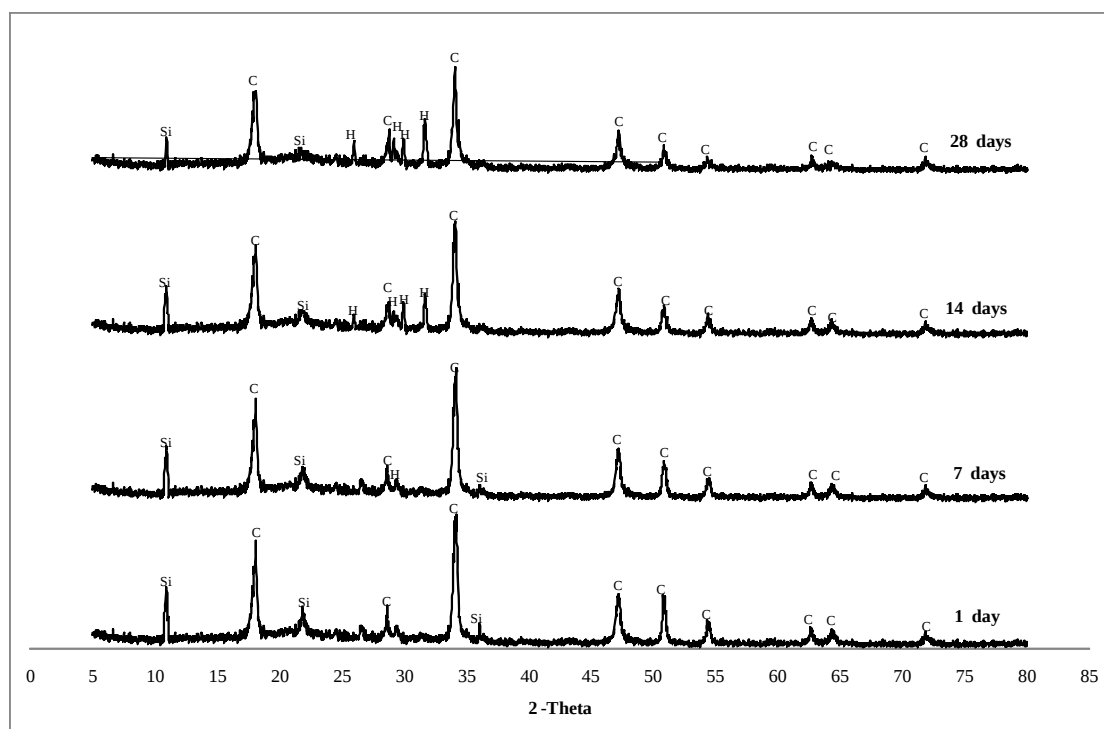


รูปที่ 53 สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน



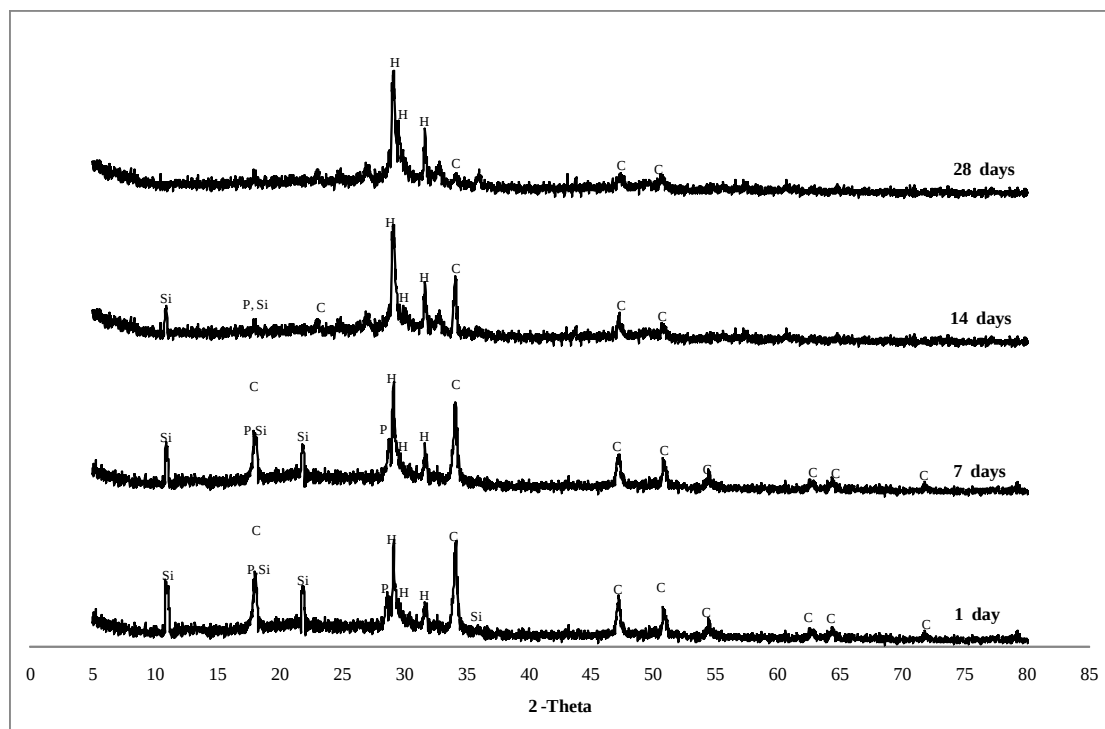
รูปที่ 54 สารประกอบต่างๆที่พบในซีเมนต์ผสมแร่แกลบดำร้อยละ 10 และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำเป็นวัสดุยึดประสาน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างปูนขาวและเถ้าแกลบดำค่อนข้างช้า จึงไม่พบ CSH (H) ในตัวอย่างที่มีอายุ 1 วัน แต่เมื่ออายุของตัวอย่างมากขึ้น ความสูงของพีคสำหรับ CSH สูงขึ้นตามลำดับ (รูปที่ 55) และเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (รูปที่ 56) พีคสำหรับ CSH ปรากฏตั้งแต่อายุหนึ่งวัน เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตทำให้ความเป็นด่างในระบบสูงขึ้น ส่งผลให้ซิลิกาในเถ้าแกลบละลายออกมาได้เร็วขึ้นและสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับปูนขาว อีกสาเหตุหนึ่งเกิดจาก ซิลิกาที่มีอยู่ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวโดยตรงแล้วก่อตัวเป็น CSH ได้อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการพัฒนากำลังรับแรงอัด

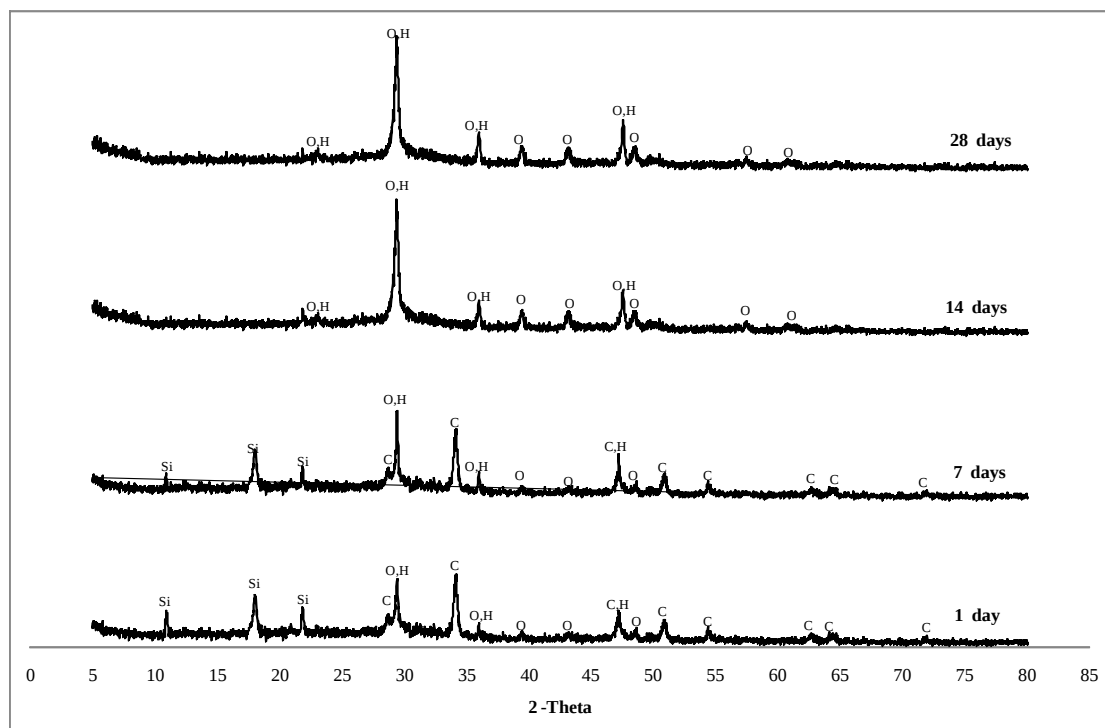


รูปที่ 55 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

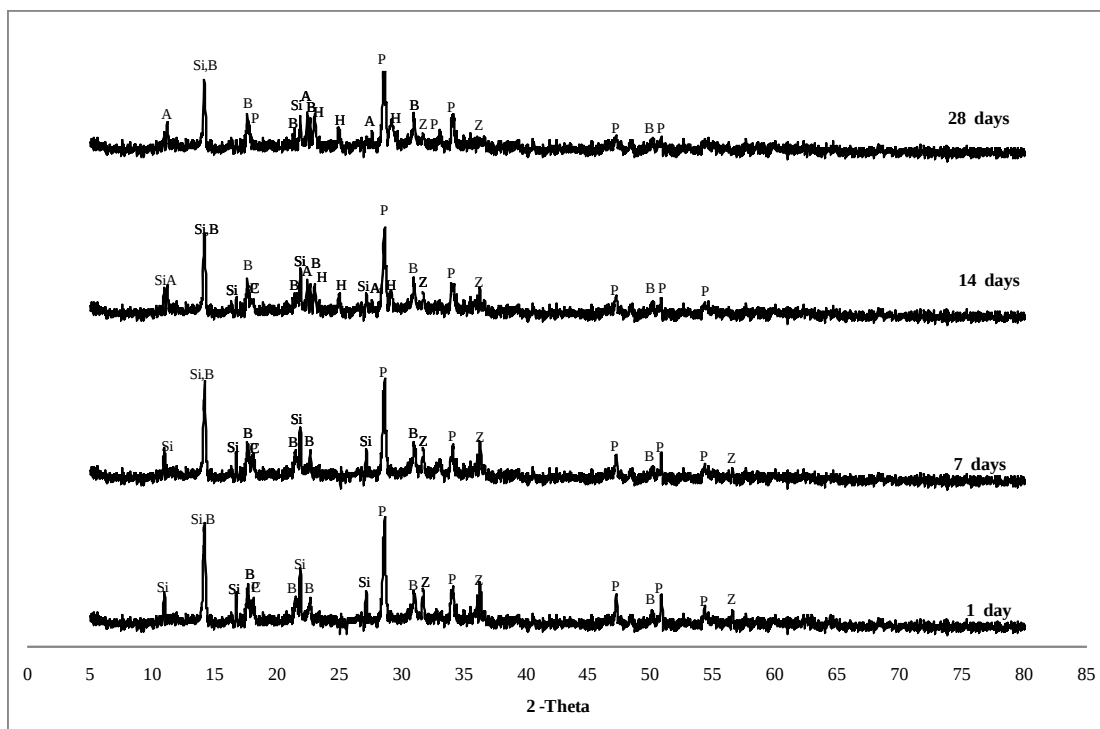
รูปที่ 57 แสดงการเกิดสารประกอบต่างๆในตัวอย่างปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต จะเห็นได้ว่าปรากฏพีคของ CSH ตั้งแต่วันแรกของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นเดียวกับตัวอย่างที่มีโซเดียมซิลิเกต นอกจากนี้ยังพบแคลเซียมคาร์บอเนต (O) ซึ่งเกิดจากโซเดียมคาร์บอเนตทำปฏิกิริยากับปูนขาว



รูปที่ 56 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

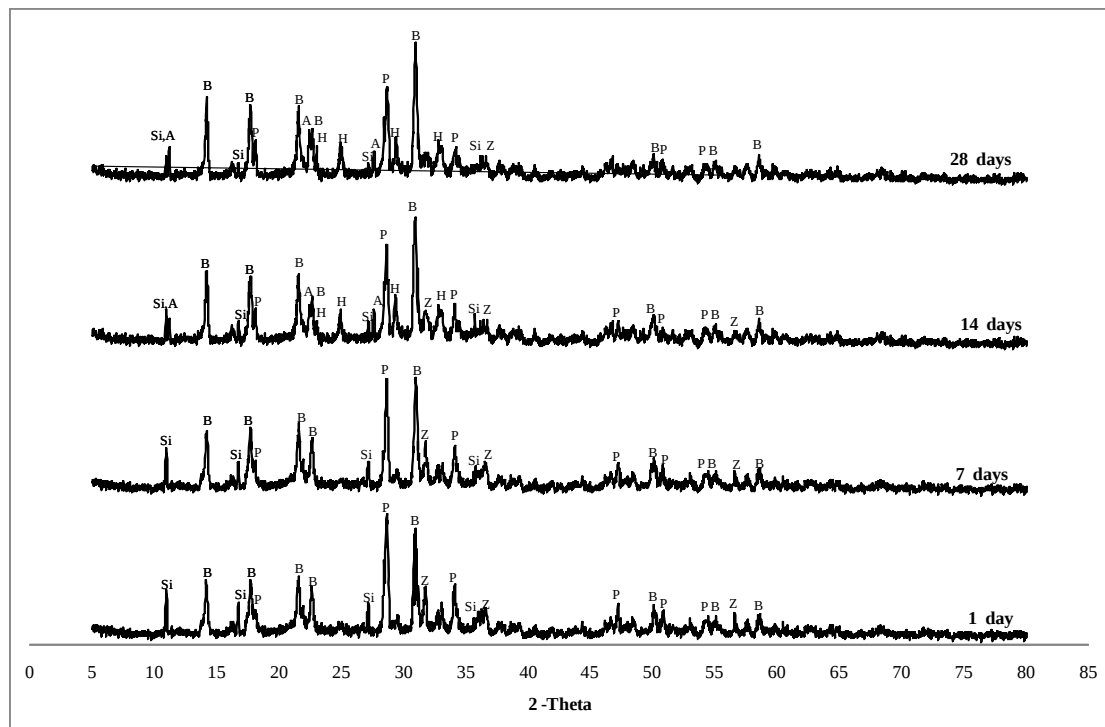


รูปที่ 57 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

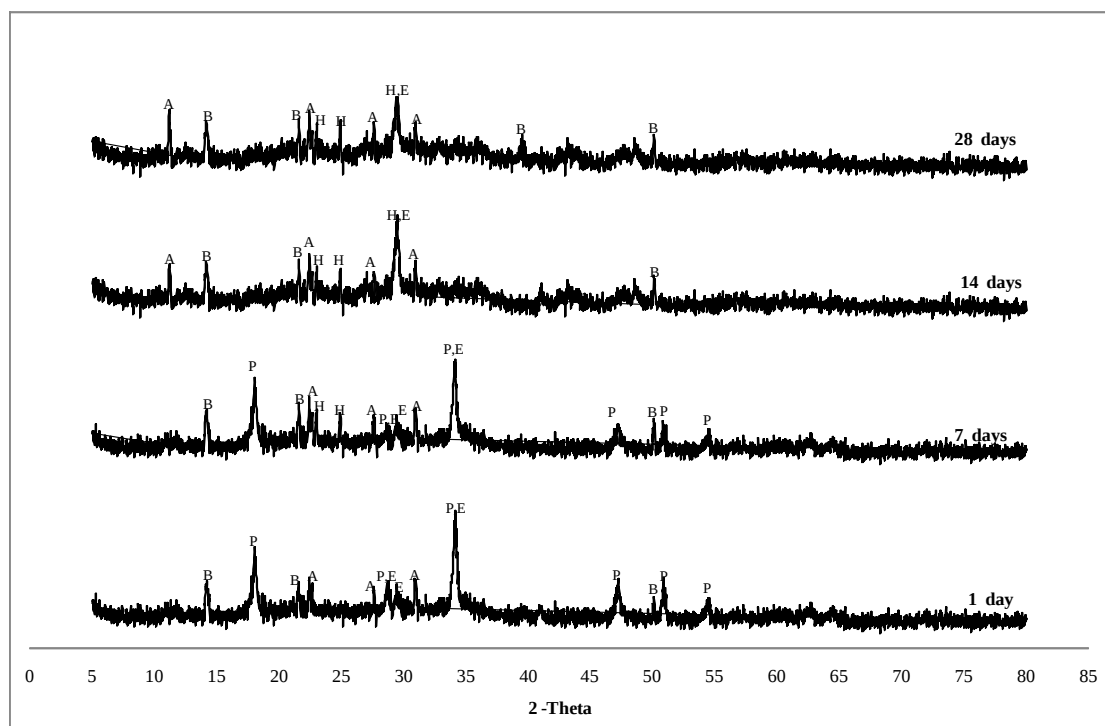


รูปที่ 58 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และกากตะกอนจากโรงชูปร้อยละ 50 ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

รูปแบบของพีคสำหรับสารประกอบต่างๆที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD สำหรับก้อนของเสี้ยวหล่อแข็งที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำเป็นวัสดุยึดประสานและกากตะกอนจากโรงชูปร้อยละ 50 แสดงในรูปที่ 58 สำหรับตัวอย่างก้อนของเสี้ยวหล่อแข็งที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 แสดงในรูปที่ 59 จะเห็นได้ว่าความสูงของพีคสำหรับซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในเถ้าแกลบดำ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาวลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุมากขึ้นเนื่องจากถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดเป็น CSH ในทำนองเดียวกันความสูงของพีคสำหรับสังกะสีออกไซด์ลดลงเมื่อตัวอย่างมีอายุมากขึ้น โดยสังกะสีออกไซด์ส่วนหนึ่งอาจจะรวมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำเกิดเป็นสารประกอบของ calcium zinc hydroxide hydrated และอีกส่วนหนึ่งสามารถถูกตรึงอยู่ใน CSH ในรูปของ Calcium zinc silicate hydrate

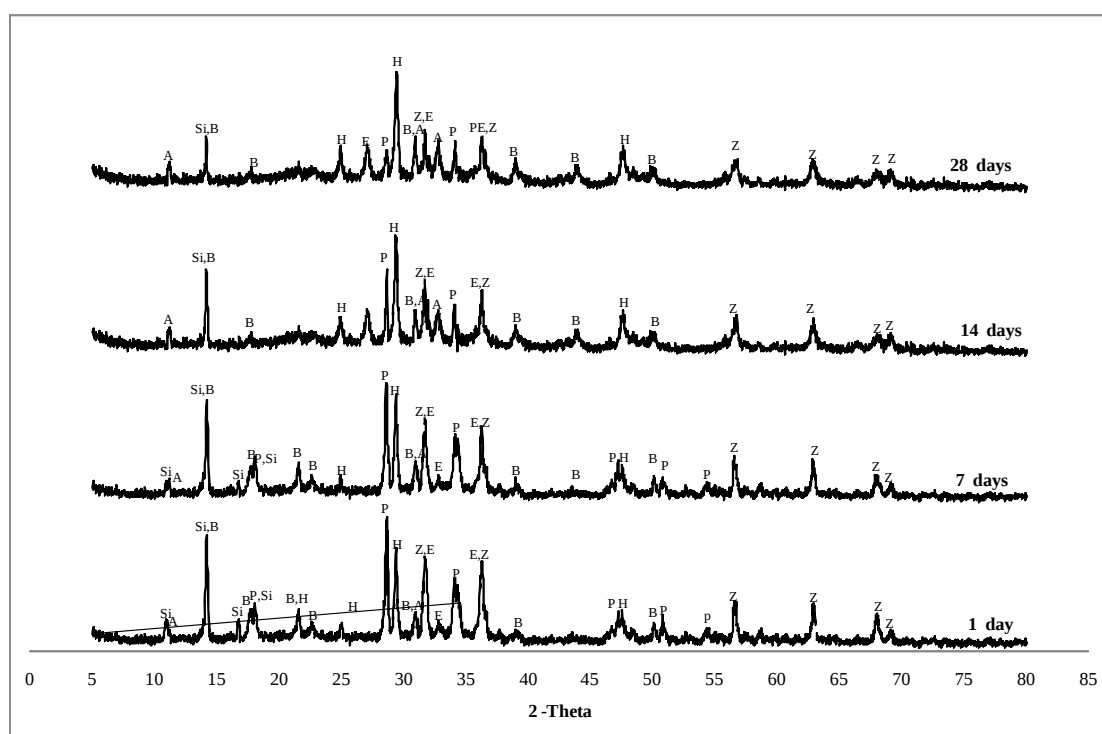


รูปที่ 59 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน



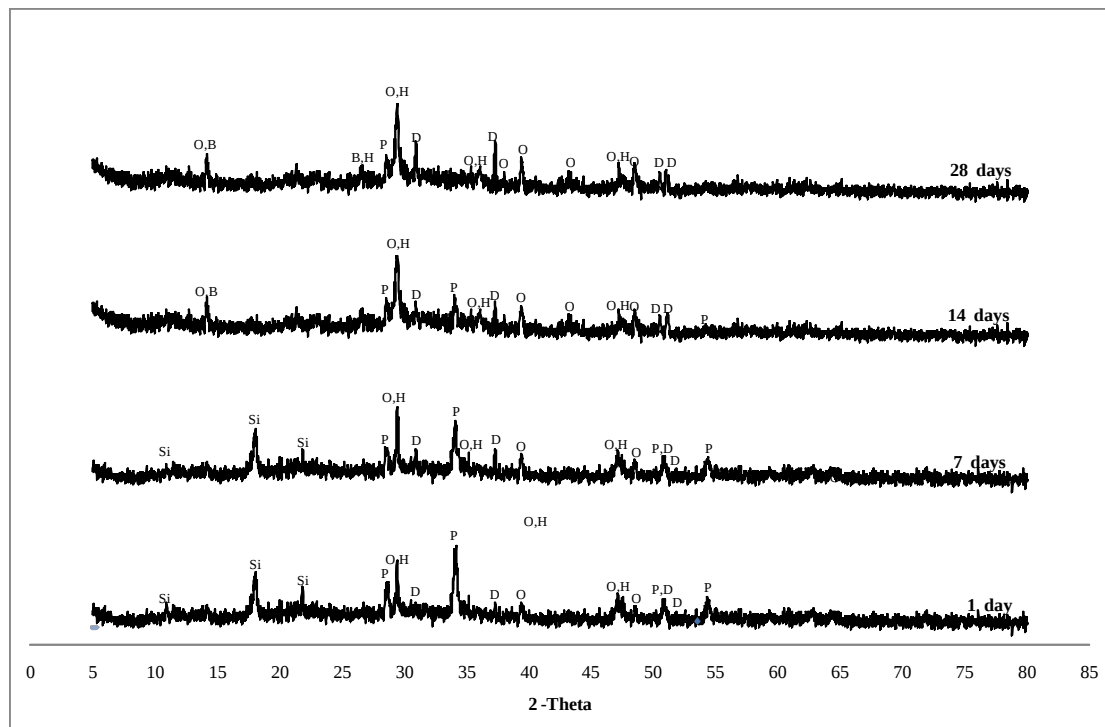
รูปที่ 60 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 ในสภาวะที่มีโซเดียมซิลิเกต ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในก้อนของเสียหล่อแข็งที่ใช้ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 (รูปที่ 60) หรือสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 (รูปที่ 61) จะสังเกตเห็นฟีดของ calcium zinc silicate hydrate และ calcium zinc hydroxide hydrated ในตัวอย่างที่ทุกอายุการบ่ม เป็นที่น่าสังเกตว่าฟีดของ calcium zinc hydroxide hydrated (B) มักพบในตำแหน่งที่ทับซ้อนกับฟีดของซิลิกอนไดออกไซด์ (Si) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า calcium zinc hydroxide hydrated ที่เกิดขึ้นนั้นไปเคลือบอยู่บนผิวของอนุภาคเถ้าแกลบดำ ทำให้พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาของเถ้าแกลบดำลดลง

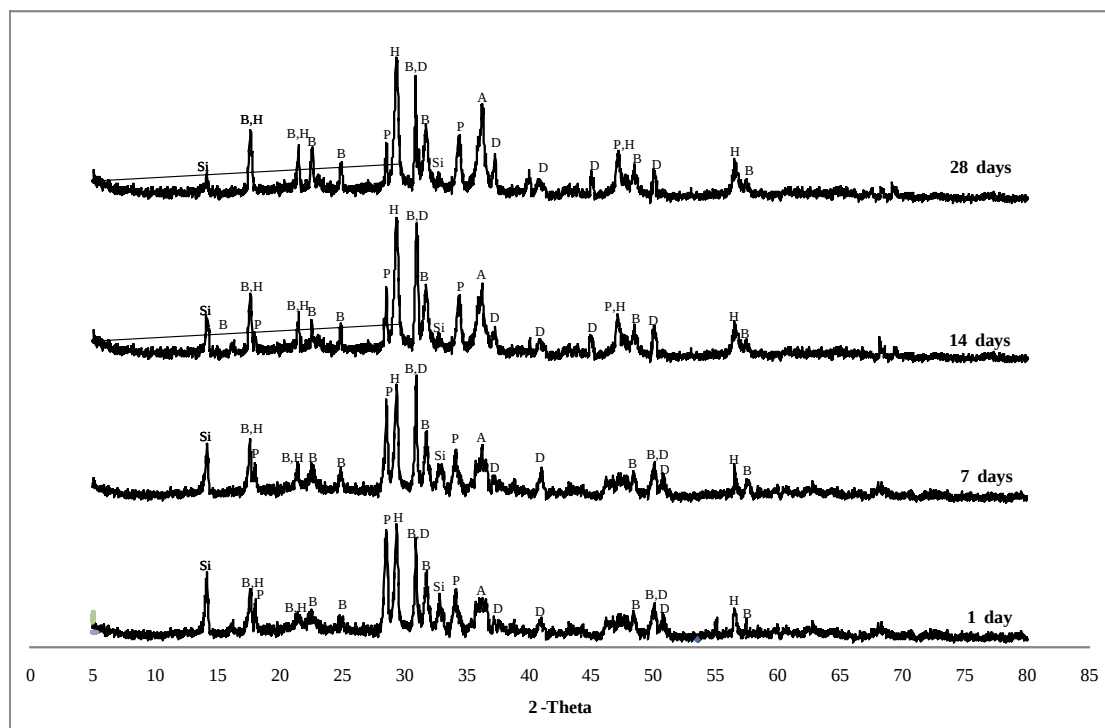


รูปที่ 61 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 ในสภาวะที่มีโซเดียมซิลิเกต ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน

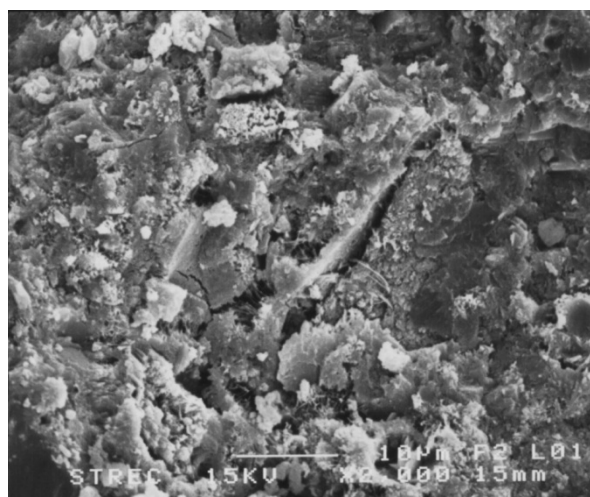
สำหรับก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 (รูปที่ 62) หรือ สังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 (รูปที่ 63) ในสภาวะที่มีโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า สังกะสีที่อยู่ในกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ นอกจากจะสามารถรวมตัวกับสารอื่นเกิดเป็นสารประกอบของ calcium zinc silicate hydrate และ calcium zinc hydroxide hydrated แล้วยังสามารถทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} จากปูนขาว และ CO_3 จากโซเดียมคาร์บอเนตเกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ CaZnCO_3 (D) ซึ่งพบได้ในตัวอย่างที่ทุกอายุการบ่ม และความสูงของฟีดเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่างด้วย



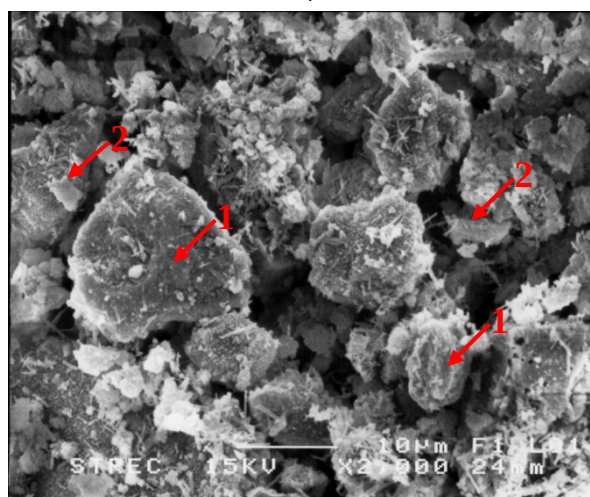
รูปที่ 62 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 ในสถานะที่มีโซเดียมคาร์บอเนต ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน



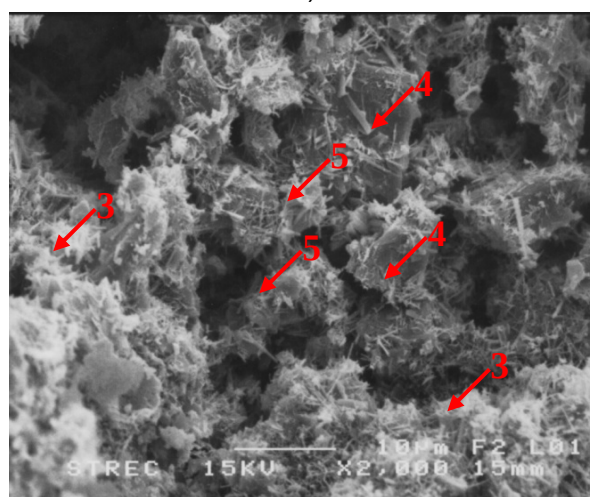
รูปที่ 63 สารประกอบต่างๆที่พบในปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 ในสถานะที่มีโซเดียมคาร์บอเนต ที่อายุการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วัน



ก)



ข)



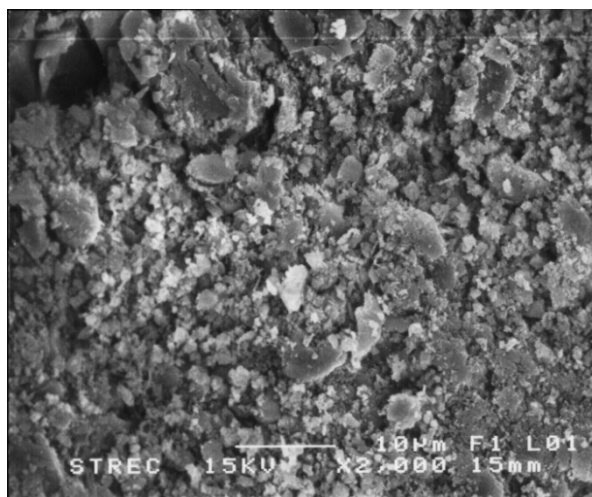
ค)

รูปที่ 64 โครงสร้างจุลภาคของก้อนของเสียหล่อแข็ง: ก) ซีเมนต์เพสต์ ข) กากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 และ ค) สังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30

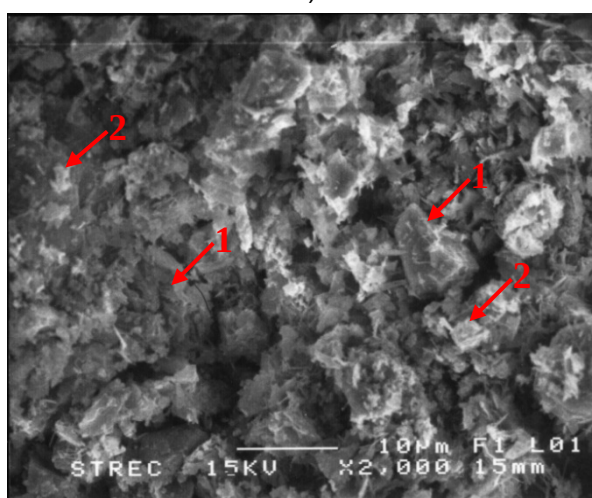
รูปที่ 64 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM สำหรับซีเมนต์เพสต์ (รูปที่ 64 ก) และกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 (รูปที่ 64 ข) และ ที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 (รูปที่ 64 ค) จากรูปที่ 64 ก สามารถสังเกตเห็น C-S-H และ Ca(OH)_2 ในซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 7 วัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีลักษณะค่อนข้างแน่นและมีรูพรุนน้อย สำหรับตัวอย่างที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์และกากตะกอนจากโรงชุบ(รูป 64 ข และ ค) จะเห็นได้ว่าตัวอย่างทั้งสองเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม (รูปที่ 64 ก) เนื่องจากมีอนุภาคปูนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเหลืออยู่ค่อนข้างมาก ทำให้มีรูพรุนหรือช่องว่างขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบ ettringite ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายเข็มกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์ เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของบริเวณที่สนใจด้วยเทคนิค EDX พบว่าในแต่ละตำแหน่งที่แสดงในภาพด้วยเครื่องหมายลูกศรมีองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 7 สำหรับตัวอย่างที่มีกากตะกอนจากโรงชุบ (รูปที่ 64 ข) พบว่าตำแหน่งที่ 1 มี Zn, Fe, Cr เป็นองค์ประกอบร่วมกับ O, Ca และ Si และตำแหน่งที่ 2 พบ Zn อยู่ร่วมกับ Ca และ O บริเวณผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ ส่วนตัวอย่างที่มีการเติมสังกะสีสังเคราะห์พบว่าตำแหน่งที่ 3 มี Zn และ O เป็นองค์ประกอบซึ่งน่าจะเป็น ZnO ที่เป็นสารประกอบหลักในสังกะสีไฮดรอกไซด์ ในขณะที่ตำแหน่งที่ 4 มี O, Ca และ Zn เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งน่าจะเป็นสารประกอบของ calcium zinc hydroxide hydrate สำหรับตำแหน่งที่ 5 มี O, Ca, Si, Zn เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งน่าจะเป็นสารประกอบของ calcium zinc silicate hydrate และ

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ผสมกากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์

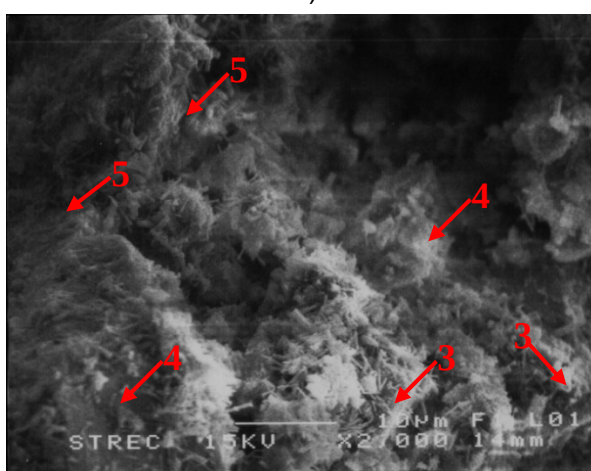
จุดที่	องค์ประกอบทางเคมี (%)					
	O	Ca	Si	Zn	Cr	Fe
1	59.03	18.25	3.15	9.71	2.95	3
2	54.23	30.21	-	18.74	-	-
3	46.57	2.05	1.56	49.32	-	-
4	55.63	27.31	-	17.24	-	-
5	57.93	22.23	12.82	7.04	-	-



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 65 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำร้อยละ 10: ก) ชุดความคม ข) กากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 และ ค) สังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำและกากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์

จุดที่	องค์ประกอบทางเคมี (%)					
	O	Ca	Si	Zn	Cr	Fe
1	60.03	18.85	4.15	11.52	2.95	2.5
2	52.12	29.88	0	18	0	0
3	41.47	2.8	2.5	53.23	0	0
4	53.63	28.41	0	17.96	0	0
5	57.23	22.93	12.62	7.14	0	0

รูปที่ 65 ก-ค แสดงภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำที่อายุ 7 วัน ในสภาวะที่มีและไม่มีกากตะกอนจากโรงชุบ และ สังกะสีสังเคราะห์ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้ากลบดำมีช่องว่างหรือโพรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอายุเดียวกัน (รูปที่ 65 ก) เนื่องจากเถ้ากลบดำเป็นวัสดุปอสโซลานที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ช้า ดังนั้นที่อายุ 7 วันเถ้ากลบดำจึงยังไม่เกิดปฏิกิริยาปอสโซลานหรือเกิดได้ก็น้อยมากเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 50 (รูปที่ 65 ข) พบว่าตัวอย่างมีช่องว่างหรือโพรงมากกว่าตัวอย่างควบคุม และมีอนุภาคปูนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่มาก แสดงว่ากากตะกอนจากโรงชุบทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุยึดประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้ากลบดำ) เกิดได้น้อยลง และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในบริเวณที่ถูกสรูขึ้นในตำแหน่งที่ 1 พบโลหะหนักหลายชนิดได้แก่ Zn, Fe, Cr ในขณะที่ตำแหน่งที่ 2 พบ Zn อยู่ร่วมกับ Ca และ O ดังแสดงในตารางที่ 8 สำหรับตัวอย่างที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 (รูป 65 ค) ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างจุลภาคที่มีกากตะกอนโรงชุบ เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในบริเวณที่ถูกสรูขึ้นที่ตำแหน่งที่ 3 พบ Zn และ O เป็นสารประกอบหลักซึ่งน่าจะเป็นสารประกอบ ZnO ที่เป็นสารประกอบหลักที่อยู่ในสังกะสีไฮดรอกไซด์ ซึ่งสามารถพบ ZnO กระจายอยู่ตามผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์เช่นเดียวกันกับในตำแหน่งที่ 4 ซึ่งพบ Zn อยู่ร่วมกับ O และ Ca หรือตำแหน่งที่ 5 ซึ่งพบ Zn อยู่ร่วมกับ O, Ca และ Si (ตารางที่ 8)

ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมจากปูนขาวผสมเถ้ากลบดำ (รูปที่ 66 ก) จะเห็นได้ว่ามีช่องว่างและโพรงมากกว่า เนื้อซีเมนต์มีความแน่นน้อยกว่าในตัวอย่างของซีเมนต์เพสต์หรือซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำ แสดงว่าปูนขาวผสมเถ้ากลบดำมีการพัฒนาโครงสร้างที่ช้ากว่าจึงให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าที่อายุ 7 วัน และตัวอย่างที่มีกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 66 ข และ ค) สังเกตเห็นโครงสร้างจุลภาคของทั้งสอง

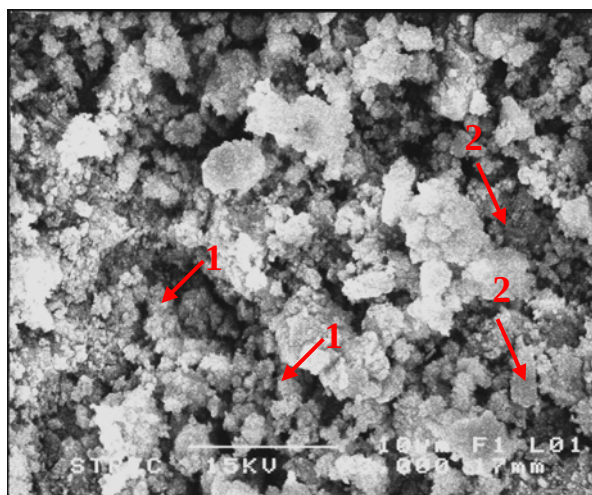
ตัวอย่างมีช่องว่างหรือโพรงจำนวนมากเทียบกับตัวอย่างควบคุม เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตำแหน่งที่ 1 พบเพียง Si และ O ซึ่งเชื่อน่าจะเป็นแก้วเคลือบดำซึ่งเป็นวัสดุยึดประสานที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยา และพบ Ca และ O ที่ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งน่าจะเป็นปูนขาว ในขณะที่ตัวอย่างที่มีกากตะกอนจากโรงชุบ (รูปที่ 66 ข) พบ Zn, Fe, Cr กระจายอยู่ทั่วไปบริเวณผิวของปูนขาว และ แก้วเคลือบดำ (จุดที่3) และตัวอย่างที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์ (รูป 66 ค) สามารถพบ Zn ทั้งตำแหน่งที่ 4 และ 5 ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวผสมแก้วเคลือบดำและกากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์

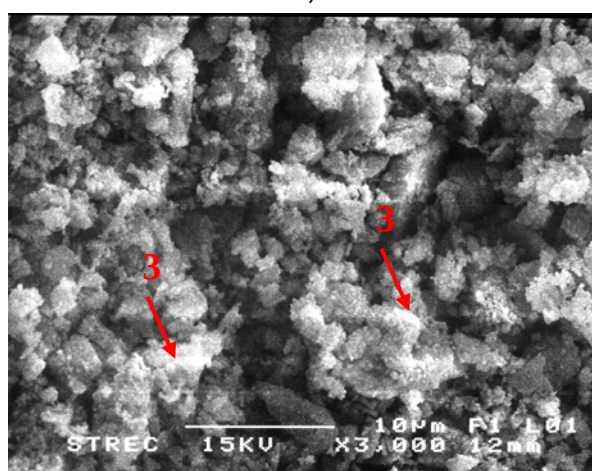
จุดที่	องค์ประกอบทางเคมี (%)					
	O	Ca	Si	Zn	Cr	Fe
1	45.03	-	54.34	-	-	-
2	52.12	46.98	-	-	-	-
3	62.47	3.8	4.7	22.16	2.56	3.55
4	54.23	4.41	-	40.96	-	-
5	56.23	29.93	-	13.14	-	-

ตารางที่ 10 องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวผสมแก้วเคลือบดำและโซเดียมซิลิเกตที่มีกากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์

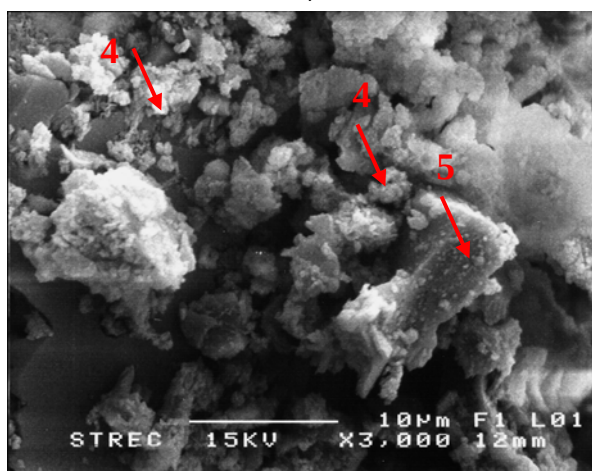
จุดที่	องค์ประกอบทางเคมี (%)					
	O	Ca	Si	Zn	Cr	Fe
1	60.03	18.85	4.15	11.52	2.95	2.5
2	52.12	9.44	-	39.44	-	-
3	41.47	39.8	-	17.23	-	-
4	47.63	25.91	9.45	13.16	-	-



ก)

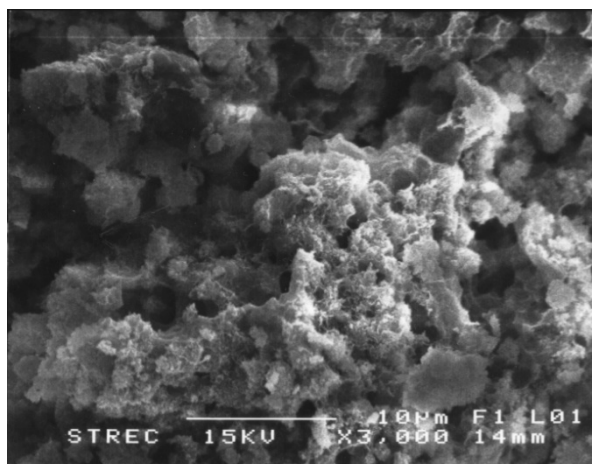


ข)

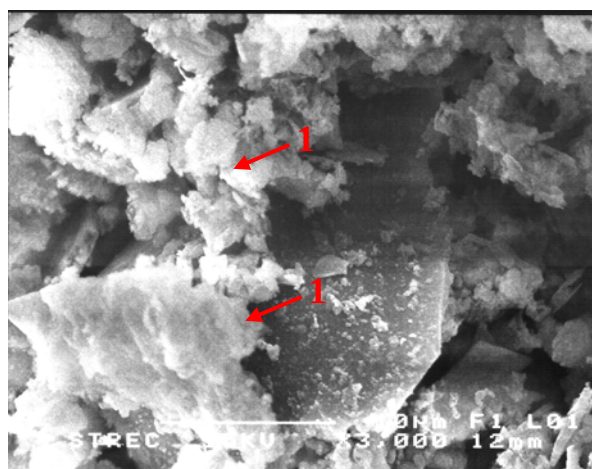


ค)

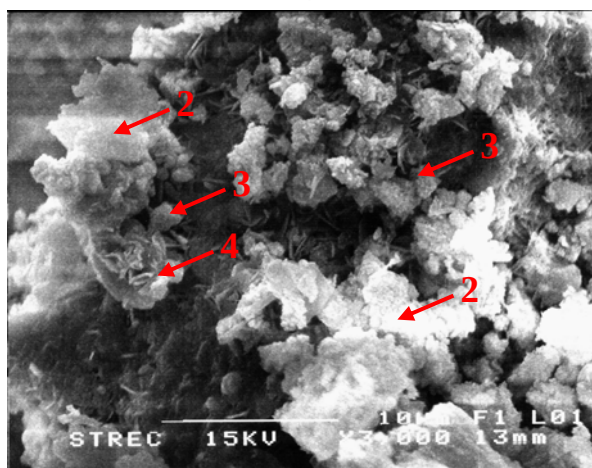
รูปที่ 66 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำ: ก) ชุดควบคุม, ข) ผสมกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 และ ค) สังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30



ก)



ข)



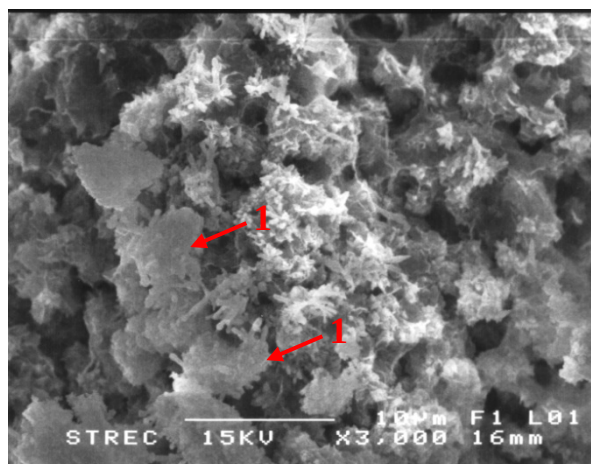
ค)

รูปที่ 67 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำที่มีสารละลายโซเดียมซิลิเกต:
 ก) ชุดควบคุม, ข) ทากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 และ ค) สังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30

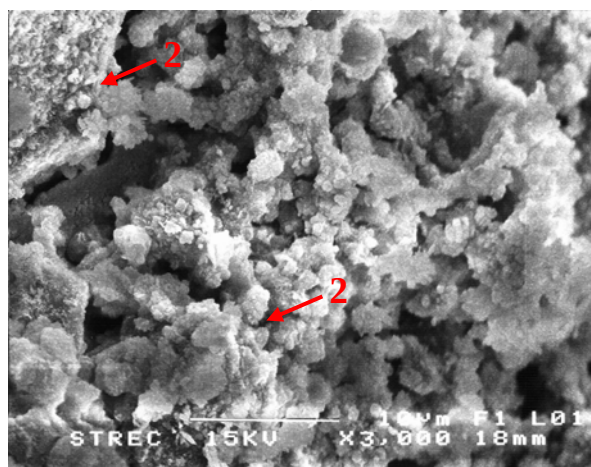
เมื่อมีการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลานระหว่างปูนขาวและเถ้าแกลบดำ สังเกตเห็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอสโซลานได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจำนวนมากและอยู่กันอย่างหนาแน่น (รูปที่ 67 ก) สำหรับตัวอย่างที่มีกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 (รูปที่ 67ข) และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 (รูปที่ 67ค) สังเกตเห็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งมีสีขาวขุ่นตกตะกอนอยู่บริเวณผิวหน้าอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ในตำแหน่งที่ 1 พบว่า มีโลหะหนักหลายชนิดที่อยู่ในกากตะกอนเข้าไปแทรกอยู่ในผลิตภัณฑ์เหล่านี้ด้วยเช่นกัน (ตารางที่ 10) ในขณะที่ตัวอย่างที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์พบ Zn อยู่ร่วมกับ Ca และ O กระจายอยู่ทั่วบริเวณผิวหน้าของ CSH ปูนขาว และเถ้าแกลบดำ ในบริเวณตำแหน่งที่ 2 และ 3 ของรูปที่ 67 ค และพบ Zn อยู่ร่วมกับ O, Ca และ Si ในตำแหน่งที่ 4

เมื่อมีการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลานระหว่างปูนขาวและเถ้าแกลบดำ สังเกตเห็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอสโซลานได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจำนวนมากและอยู่กันอย่างหนาแน่น (รูปที่ 67 ก) สำหรับตัวอย่างที่มีกากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 (รูปที่ 67ข) และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 (รูปที่ 67ค) สังเกตเห็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งมีสีขาวขุ่นตกตะกอนอยู่บริเวณผิวหน้าอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ในตำแหน่งที่ 1 พบว่า มีโลหะหนักหลายชนิดที่อยู่ในกากตะกอนเข้าไปแทรกอยู่ในผลิตภัณฑ์เหล่านี้ด้วยเช่นกัน (ตารางที่ 10) ในขณะที่ตัวอย่างที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์พบ Zn อยู่ร่วมกับ Ca และ O กระจายอยู่ทั่วบริเวณผิวหน้าของ CSH ปูนขาว และเถ้าแกลบดำ ในบริเวณตำแหน่งที่ 2 และ 3 ของรูปที่ 67 ค และพบ Zn อยู่ร่วมกับ O, Ca และ Si ในตำแหน่งที่ 4

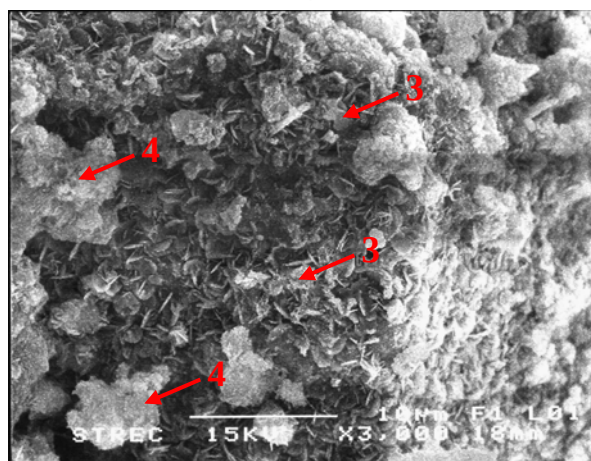
เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลานระหว่างปูนขาวและเถ้าแกลบดำด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (รูปที่ 68 ก) สังเกตเห็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอสโซลานได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจำนวนมากและอยู่กันอย่างหนาแน่นเช่นเดียวกับตัวอย่างที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตำแหน่งที่ 1 พบว่ามี O, Ca และ C ร้อยละ 60.03 23.85 และ 17.1 ตามลำดับ (ตารางที่ 11) ซึ่งน่าจะเป็นองค์ประกอบของ CaCO_3 และเมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ พบว่า โลหะหนักหลายชนิดที่อยู่ในกากตะกอนอยู่ร่วมกับ O และตกตะกอนอยู่บนผิวหน้าของปูนขาว และเถ้าแกลบดำ (ตำแหน่งที่ 2 ของรูปที่ 68 ข) สำหรับตัวอย่างที่มีสังกะสีไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 68 ค) พบ Zn อยู่ร่วมกับ O ในตำแหน่งที่ 3 หรือสามารถอยู่ร่วมกับ O, Ca และ C ในตำแหน่งที่ 4 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า Zn สามารถรวมตัวกับ CaCO_3 เกิดเป็นสารประกอบ CaZnCO_3 ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นผลึกที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นจำนวนมากอีกด้วย



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 68 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและโซเดียมคาร์บอเนต: ก) ชุดควบคุม, ข) ทากตะกอนจากโรงชุบร้อยละ 50 และ ค) สังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ

ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำและโซเดียมคาร์บอเนตที่มีกากตะกอนโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์

จุดที่	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	O	Ca	Si	Zn	Cr	Fe	C
1	60.03	23.85	1.2	-	-	-	17.1
2	52.12	0.23	-	37.44	2.12	8.21	-
3	42.42	1.42	-	50.43	0	0	-
4	47.63	25.91	-	13.16	0	0	9.31

6. เอกสารอ้างอิง

1. Eamsakulrat, P.P., "Hazardous Wastes Management in Thailand: Present and Future. Pacific Basin Conference on Hazardous Waste", pp. 12, May 7-12, 1990.
2. Conner, J.R., "Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes". Van Nostrand Reinhold, New York (1990).
3. S. Asavapisit, W. Nanthamontry and C. Polprasert., "Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes", Cem. Concr. Res. (in press).
4. J.H. Boy, T.D. Race, K.A. Reinbold, J. Bukowski and X. Zhu., "Chromium stabilization chemistry of paint removal wastes in portland cement and blast furnace slag", Haz. Waste & Haz. Mater., 12, no. 1, pp.83-95 (1995).
5. C.H. Weng and C.P. Huang., "Treatment of metal industrial wastewater by fly ash and cement fixation", J. Env. Eng., Vol. 120, no. 6, pp. 1470-1487 (1994).
6. A. Roy and H.C. Eaton., "Solidification/stabilization of a synthetic electroplating waste in lime-fly ash binder", Cem. Concr. Res., Vol. 22, no. 4, pp.589-596 (1992).
7. A. Roy, H.C. Eaton, F.K. Cartledge and M.E. Tittlebaum., "Solidification/stabilization of a heavy metal sludge by a portland cement/fly ash binding mixture", Haz. Waste & Haz. Mater., Vol.8, no. 1, pp. 33-41 (1991).
8. C.S. Poon and R. Perry., "Studies of zinc, cadmium and mercury stabilization in OPC/PFA mixtures. Material Research Symposium Proceedings: Fly Ash and Coal Conversion By-Products: Characterization, Utilization and Disposal III", Material Research Society, Pittsburgh, PA, Vol. 86, pp. 67-76 (1987).
9. บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิमितยงสกุล, "การผลิตซีเมนต์จากขี้เถ้ากลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาและการประยุกต์ใช้ในบล็อกซีเมนต์ผสมดินแบบอัดแน่น", วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, เล่มที่ 4 (2), หน้า 119-137 (2537)
10. Cook, D.J., "Using rice-husk for making cement-like materials. In: Appropriate Technology", Vol 6, pp. 9-11 (1980).
11. Prinya Chindaprasirt., "Low Cost Cement for Rural Area. Office of Technology for Rural Development", Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand (1983)
12. Cook, D.J., "Rice husk ash. In Concrete Technology and Design: Cement replacement materials", Swamy, R.N. Ed., Surrey University Press, Great Britain, vol. 3, pp.171-195 (1986)

13. C. Shi and L.R Day., "Chemical activation of blended cement made with lime and natural pozzolans", *Cem. Concr. Res.*, Vol.23, no.6, pp.1389-1396 (1993).
14. C. Shi and L.R Day., "Acceleration of strength gain of lime-pozzolan cements by thermal activation", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 23, pp. 824-832 (1993).
15. D.M. Roy., "Alkali-activated cements opportunities and challenges", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 29, pp. 249-254 (1999).
16. T. Bakharev, J.G. Sanjayan and Y. Cheng., "Alkali activation of Australian slag cements", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 29, pp. 113-120 (1999).
17. F. Collins and J.G. Sanjayan., "Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na₂CO₃", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 28, pp. 655-664 (1998).
18. F. Collins and J.G. Sanjayan., "Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 29, pp. 455-458 (1999).
19. J. Malolepszy, W. Brylicki and J. Deja. , "The granulated foundry slag as a valuable raw material in the concrete and lime-sand brick production", *Waste Materials in Construction*, pp. 475-478 (1991).
20. S. Song and H.M. Jennings., "Pore solution chemistry of alkali-activated ground granulated blast-furnace slag", *Cem. Concr. Res.*, Vol.29, pp. 159-170 (1999).
21. C. Shi. Strength, "Pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars", *Cem. Concr. Res.*, Vol.26, no.12, pp. 1789-1799 (1996).
22. C. Shi and L.R Day., "A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cement", *Cem. Concr. Res.*, Vol.25, no.6, pp. 1333-1346 (1993).
23. Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G. and Moraes, R., 2003, "Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete", *Cem.& Concr. Comp.*, 25, pp. 69-76.
24. Asavapisit, S., Fowler, G.D. and Cheeseman, C.R., 1997, "Solution Chemistry During Cement Hydration in the Presence of Metal Hydroxide Wastes", *Cem.& Concr. Res.*, 27, pp. 1249-1260.
25. Odler, I. And Schmidt, O., 1980, "Structure and Properties of Portland Cement Clinker Doped with Zinc Oxide", *J. Am. Cer. Soc.*, 63, pp. 13-16.
26. Deja, J., 2002, "Immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ and Pb²⁺ in alkali-activated slag binders", *Cem.& Concr. Res.*, 32, pp.1971-1979.

27. Olmo, I.F., Chacon, E. and Irabien, A., 2001, "Influence of lead, zinc, iron(III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement", *Cem.& Concr. Res.*, 31, pp. 1213-1219.
28. Stephan, D., Mallmann, R., Knofel, D. and Hardtl, R., "High intakes of Cr, Ni, and Zn in clinker Part II. Influence on the hydration properties", *Cem.& Concr. Res.*, 29, pp. 1959-1967.
29. Cheng, K.Y. and Bishop, P.L., 1992, "Leaching boundary movement in solidified/stabilized waste forms", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 42, pp. 164-168.
30. Santhanam, M., Cohen, M.D. and Olek, J., 2003, "Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack", *Cem.& Concr. Res.*, 33, pp. 325-332.
31. Santhanam, M., Cohen, M.D. and Olek, J., 2003, "Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed mechanisms", *Cem.& Concr. Res.*, 33, pp. 341-346.
32. Lawrence, C.D., 1992, "The influence of binder type on sulfate resistance", *Cem.& Concr. Res.*, 22, pp. 1047-1058.
33. Collepardi, M., 2003, "A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete", *Cem.& Concr. Res.*, 33, pp. 401-407.
34. Pavlik, V., 1994, "Corrosion of hardened cement paste by acetic acid and nitric acids. Part I: Calculation of corrosion depth", *Cem.& Concr. Res.*, 24, pp. 551-562.
35. Ma Whinney, H.G. and Cocke, A.L., 1993, "A surface study of the chemistry of zinc, cadmium, and mercury in portland cement", *Waste Management*, 13, pp. 117-123.
36. Shi, C. and Stegemann, J.A., 2000, "Acid corrosion resistance of different cementing materials", *Cem.& Concr. Res.*, 30, pp. 803-808.
37. Pavlik, V., 1996, "Corrosion of hardened cement paste by acetic acid and nitric acids. Part II: Influence of water/cement ratio", *Cem.& Concr. Res.*, 26, pp. 475-490.
38. Shi, C., and Day, R.L., 1995, "A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements", *Cem.& Concr. Res.*, 25, pp. 1333-1346.
39. The National Bureau Standards, 1982, *Tables of Thermodynamic Properties* 11(2)
40. Yousuf, M., et al., 1995, "The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metals in cement and pozzolanic material systems," *Waste Management*, Vol.15, No.2, pp.137-148.
41. P. Kumar Mehta, 2001, <http://www.ce.berkeley.edu> , [10 มกราคม 2547]

42. Pavlik, V., 2000, "Effect of Carbonatrs on the Corrosion Rate of Cement Mortars in Nitric Acid", Cement and Concrete Research, vol. 30, pp. 481-489.

6. Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

Nipon Tanpaiboonkul , Suwimol Asavapisit , and Wichai Sungwornpatansakul, **Effect of Chemical and Thermal Activations on The Properties of Rice Husk Ash-Based Solidified Wastes**, Environmental science (editing)

Rungroj Piyaphanuwat¹, Suwimol Asavapisit, **Immobilization of plating sludge in alkali-activated lime-rice husk ash matrices** (preparing)

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

-

3. อื่น ๆ

3.1 International conference

Rungroj Piyaphanuwat, Suwimol Asavapisit, **Solution Chemistry and Microstructure of cement-based solidified zinc-containing wastes**, The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD2010), Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand, 4-6 March 2010

3.2 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการภายในประเทศ

Rungroj Piyaphanuwat, Suwimol Asavapisit, 2009, "Effect of Black Rice Husk Ash Substituted OPC on Strength and Leaching of Solidified Plating Sludge", Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol.19 No.2 pp.85-89

ภาคผนวก

ตารางที่ ผ. 1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

องค์ประกอบทางเคมี (กรัม/กิโลกรัมตะกอนแห้ง)	กากตะกอนโลหะหนัก	สังกะสีไฮดรอกไซด์ สังเคราะห์
สังกะสี	282	504
เหล็ก	65.3	-
โครเมียม	31.6	-
ตะกั่ว	0.06	-
ทองแดง	0.09	-

ตารางที่ ผ. 2 อัตราส่วนระหว่างน้ำและวัสดุยึดประสานสำหรับแต่ละอัตราส่วนผสมของก้อนของ
เสียหล่อแข็งที่ใช้ซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสาน

ตัวอย่าง	W/S (ผสมปกติ)	W/S (ปรับปรุง วิธีผสม)	ตัวอย่าง	W/S (ผสมปกติ)	W/S (ปรับปรุง วิธีผสม)
OPC	0.31	0.31	OPC+10%SRHA	0.37	0.37
OPC+10%PS	0.31	0.29	OPC+10%SRHA+10%PS	0.36	0.34
OPC+30%PS	0.28	0.25	OPC+10%SRHA+30%PS	0.32	0.29
OPC+50%PS	0.26	0.23	OPC+10%SRHA+50%PS	0.29	0.26
OPC+10%Zn	0.31	0.29	OPC+10%SRHA+10%Zn	0.37	0.34
OPC+10%BHA	0.33	0.33	OPC+20%SRHA	0.44	0.44
OPC+10%BHA+10%PS	0.33	0.31	OPC+20%SRHA+10%PS	0.43	0.41
OPC+10%BHA+30%PS	0.32	0.29	OPC+20%SRHA+30%PS	0.39	0.36
OPC+10%BHA+50%PS	0.27	0.24	OPC+20%SRHA+50%PS	0.36	0.33
OPC+10%BHA+10%Zn	0.33	0.31	OPC+20%SRHA+10%Zn	0.44	0.41
OPC+20%BHA	0.35	0.35	OPC+30%SRHA	0.52	0.52
OPC+20%BHA+10%PS	0.35	0.33	OPC+30%SRHA+10%PS	0.52	0.5
OPC+20%BHA+30%PS	0.33	0.3	OPC+30%SRHA+30%PS	0.46	0.43
OPC+20%BHA+50%PS	0.30	0.27	OPC+30%SRHA+50%PS	0.41	0.39
OPC+20%BHA+10%Zn	0.35	0.33	OPC+30%SRHA+10%Zn	0.52	0.5
OPC+30%BHA	0.37	0.37			
OPC+30%BHA+10%PS	0.36	0.34			
OPC+30%BHA+30%PS	0.35	0.33			
OPC+30%BHA+50%PS	0.33	0.31			
OPC+30%BHA+10%Zn	0.36	0.33			

ตารางที่ ผ. 3 อัตราส่วนระหว่างน้ำและวัสดุยึดประสานสำหรับก้อนของเสียหล่อแข็งที่ใช้
ปูนขาวผสมเถ้าแกลบดำหรือเถ้าแกลบสังเคราะห์

ตัวอย่าง	W/S (ผสมปกติ)	W/S (ปรับปรุง วิธีผสม)	ตัวอย่าง	W/S (ผสมปกติ)	W/S (ปรับปรุง วิธีผสม)
Lime:BHA	0.66	0.66	Lime:sRHA	0.87	0.87
Lime:BHA +10%PS	0.66	0.63	Lime:sRHA +10%PS	0.85	0.82
Lime:BHA +30%PS	0.65	0.61	Lime:sRHA +30%PS	0.77	0.73
Lime:BHA +50%PS	0.56	0.52	Lime:sRHA +50%PS	0.67	0.63
Lime:BHA +10%Zn	0.66	0.63	Lime:sRHA +10%Zn	0.85	0.82
Lime:BHA +NS	0.73	0.73	Lime:sRHA +NS	0.91	0.91
Lime:BHA +NS+10%PS	0.73	0.71	Lime:sRHA +NS+10%PS	0.89	0.87
Lime:BHA +NS+30%PS	0.69	0.65	Lime:sRHA +NS+30%PS	0.81	0.77
Lime:BHA +NS+50%PS	0.60	0.56	Lime:sRHA +NS+50%PS	0.71	0.68
Lime:BHA +NS+10%Zn	0.73	0.71	Lime:sRHA +NS+10%Zn	0.89	0.87
Lime:BHA +NC	0.63	0.63	Lime:sRHA +NC	0.84	0.84
Lime:BHA +NC+10%PS	0.63	0.61	Lime:sRHA +NC+10%PS	0.84	0.82
Lime:BHA +NC+30%PS	0.62	0.58	Lime:sRHA +NC+30%PS	0.74	0.71
Lime:BHA +NC+50%PS	0.56	0.54	Lime:sRHA +NC+50%PS	0.64	0.61
Lime:BHA +NC+10%Zn	0.63	0.61	Lime:sRHA +NC+10%Zn	0.84	0.82

ตารางที่ ผ. 4 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีและไม่มีการปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำและเถ้ากลบสังเคราะห์ที่ระดับต่างๆ

กำลังรับแรงอัด (กก/ซม ²)							
อายุ (วัน)	1	3	7	14	28	56	91
OPC	162	204	254	308	368	373	419
DOPC	188	256	300	339	417	438	439
OPC+10%BHA	157	218	244	305	366	384	393
DOPC+10%BHA	165	243	284	327	383	402	410
OPC+20%BHA	165	270	301	351	387	405	422
DOPC+20%BHA	187	289	333	386	406	423	434
OPC+30%BHA	166	220	236	314	362	384	406
DOPC+30%BHA	200	249	279	334	382	410	422
OPC+10%RHA	182	272	369	395	429	444	452
DOPC+10%RHA	197	294	386	429	443	458	468
OPC+20%RHA	174	231	287	308	365	419	428
DOPC+20%RHA	182	247	305	364	396	425	435
OPC+30%RHA	89	156	267	298	331	361	382
DOPC+30%RHA	105	171	274	320	359	368	375

หมายเหตุ D = delayed mixing

ตารางที่ ผ. 5 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบดำและกากตะกอนโรงชุบที่ระดับต่างๆ

กำลังรับแรงอัด (กก/ซม ²)							
อายุ (วัน)	1	3	7	14	28	56	91
OPC+10%Ps	-	-	-	9.6	15.5	18.5	20.7
DOPC+10%Ps	1.3	10.5	12.3	17.2	21.7	25	31.2
OPC+10%BHA+10%Ps	2.4	6.1	7.8	9.9	15.4	18.8	20.7
DOPC+10%BHA+10%Ps	3	7.5	11.8	15.3	19	35	53
OPC+20%BHA+10%Ps	2.8	7	13.2	14.6	18.8	22.2	25.5
DOPC+20%BHA+10%Ps	5	10	16.4	22.64	30.8	49	63
OPC+30%BHA+10%Ps	1.64	5.64	6.84	114	14.6	21.6	22.8
DOPC+30%BHA+10%Ps	3	8	12	17	25	27.5	32.2
OPC+30%Ps	-	-	-	7	10.8	13	17.1
DOPC+30%Ps	1.5	5.1	7.6	10	14.1	16.4	19.4
OPC+10%BHA+30%Ps	2.3	4.7	7.4	9.2	11.3	12.62	16.2
DOPC+10%BHA+30%Ps	2.2	6	8.1	10.6	11.6	16.2	25.5
OPC+20%BHA+30%Ps	2.5	4.1	7.5	11.3	17.6	20.3	22
DOPC+20%BHA+30%Ps	4	7	10	13.2	22	27	33.8
OPC+30%BHA+30%Ps	-	3	4.8	6.2	8.1	11.2	13.7
DOPC+30%BHA+30%Ps	0.7	5	6.9	10.3	13	17.2	27.8
OPC+50%Ps	-	-	-	5.1	8.9	10.5	11.7
DOPC+50%Ps	1.7	3.4	4.5	5.7	12.5	13.8	14.4
OPC+10%BHA+50%Ps	-	3.56	5.75	6.52	10.39	11.56	15.19
DOPC+10%BHA+50%Ps	2	5	7	10	13	16.76	19.37
OPC+20%BHA+50%Ps	0	4	6	7.4	11.1	14.2	17.1
DOPC+20%BHA+50%Ps	2	6	9	12	15	19	23
OPC+30%BHA+50%Ps	-	2.5	3.6	6	7.7	9.1	12.7
DOPC+30%BHA+50%Ps	1	4	6	7.8	10	14	17.7

หมายเหตุ Ps = plating sludge

ตารางที่ ผ. 6 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกวบสังเคราะห์และกากตะกอนโรงชุบที่ระดับต่างๆ

กำลังรับแรงอัด (กก/ซม ²)							
อายุ (วัน)	1	3	7	14	28	56	91
OPC+10%Ps	-	-	-	9.6	15.5	18.5	20.7
DOPC+10%Ps	1.3	10.5	12.3	17.2	21.7	25	31.2
OPC+10%RHA+10%Ps	4.2	11.4	70.6	189	215	229	230
DOPC+10%RHA+10%Ps	29.4	55	235	258	295	346	367
OPC+20%RHA+10%Ps	4	14	57.4	179	205	220	221
DOPC+20%RHA+10%Ps	8.2	50.2	225	245	284	322	329
OPC+30%RHA+10%Ps	-	4.2	70.4	151	193	208	240
DOPC+30%RHA+10%Ps	3.9	18.6	229	236	278	307	335
OPC+30%Ps	-	-	-	7	10.8	13	17.1
DOPC+30%Ps	1.5	5.1	7.6	10	14.1	16.4	19.4
OPC+10%RHA+30%Ps	3.1	4.8	11.2	17.3	25.3	37.4	41.3
DOPC+10%RHA+30%Ps	7	12	17	23.7	31	46	52
OPC+20%RHA+30%Ps	2.3	5	10.5	15.7	21	30.2	36.5
DOPC+20%RHA+30%Ps	3.5	6.7	12	19	27	39	42.4
OPC+30%RHA+30%Ps	-	4.2	6.9	10.3	18	19.7	24.7
DOPC+30%RHA+30%Ps	2.5	6	8.7	13.3	21	26	32.5
OPC+50%Ps	-	-	-	5.1	8.9	10.5	11.7
DOPC+50%Ps	1.7	3.4	4.5	5.7	12.5	13.8	14.4
OPC+10%RHA+50%Ps	3.2	4.9	8.4	11.1	15.5	17.1	28
DOPC+10%RHA+50%Ps	4	7	10	12.3	19	22.7	35
OPC+20%RHA+50%Ps	3.3	4.7	7.1	9.8	13.4	14.5	24.7
DOPC+20%RHA+50%Ps	5	8	10	13.4	17	21	32
OPC+30%RHA+50%Ps	-	3.6	6.2	7.5	12.4	17.4	19.2
DOPC+30%RHA+50%Ps	2.8	7	9	14	19	20.4	23.2

ตารางที่ ผ. 7 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสมของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

กำลังรับแรงอัด (กก/ซม ²)							
อายุ (วัน)	1	3	7	14	28	56	91
OPC+Zn	10.2	16.7	183	259	312	326	327
DOPC+Zn	26	261	292	391	410	416	416
OPC+10%BHA+ Zn	6.5	11	15.4	22.1	50	133	147
DOPC+10%BHA+ Zn	17	28	35	50	75	154	173
OPC+20%BHA+ Zn	5.9	11.7	16.6	19.0	27.0	30.2	30.6
DOPC+20%BHA+ Zn	11.3	15.6	23.2	28.6	34.5	37.0	38.7
OPC+30%BHA+ Zn	2.3	11.5	13.7	16.8	24.3	28.6	31.1
DOPC+30%BHA+ Zn	7.8	12.9	18.0	23.5	31.4	34.1	36.2
OPC+10%RHA+ Zn	10.8	32.4	49.2	81	149	162	167
DOPC+10%RHA+ Zn	12.5	41.6	83	102	162	175	188
OPC+20%RHA+ Zn	9.1	12.1	17.2	23.3	28.3	35.9	43
DOPC+20%RHA+ Zn	15	27	37	42	50	56	63
OPC+30%RHA+ Zn	6.8	10.2	16.3	21.2	27.2	29.8	30
DOPC+30%RHA+ Zn	8.0	14.9	22.4	31.5	38	43	55

ตารางที่ ผ. 8 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีและไม่มี การปรับปรุง
วิธีการผสมสำหรับปูนขาวและ BHA ในสภาวะที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซึ
ลิกเตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2

กำลังรับแรงอัด (กก/ซม ²)							
อายุ (วัน)	1	3	7	14	28	56	91
Lime+BHA	0	10.6	30.4	43.6	56.7	64.9	71.1
DLime+BHA	2.4	13.9	32.8	51.8	59.1	76.5	87.4
Lime+BHA+10%Ps	0	0	1.5	4.5	7.5	25.4	42.7
DLime+BHA+10%Ps	1.9	4.1	8.9	13.6	16.2	35.3	47.5
Lime+BHA+30%Ps	0	0	1.3	2.6	5.8	7.7	16.8
DLime+BHA+30%Ps	1.7	3.8	5.7	7.6	12.4	28	37
Lime+BHA+50%Ps	0	0	1.3	2.2	5	5.8	11.2
DLime+BHA+50%Ps	1.2	2.9	4.2	6	10.9	13	20
Lime+BHA+N _s	3	10	28.2	36.6	44.7	49.7	53.3
DLime+BHA+N _s	4	12.4	29.8	36.5	48	53	58
Lime+BHA+N _s +10%Ps	1.3	1.7	6.3	15.2	33.7	42.3	47.2
DLime+BHA+N _s +10%Ps	3	5.	8.2	17.1	37.1	47.6	55
Lime+BHA+N _s +30%Ps	0	0	1.2	3.1	5.4	8.7	10.7
DLime+BHA+N _s +30%Ps	2.3	4.5	6.9	11.3	16.3	26.3	47.2
Lime+BHA+N _s +50%Ps	0	0	0.7	1.1	3.7	6.5	9
DLime+BHA+N _s +50%Ps	2	3.4	6	8.3	12.8	19.4	30.3
Lime+BHA+N _c	7.9	16.2	36.3	47.5	61	66.9	75.6
DLime+BHA+N _c	10.1	20.2	41.1	58.8	71.1	82.3	85.7
Lime+BHA+N _c +10%Ps	1.4	4.2	21.2	32	45.6	68.2	73.1
DLime+BHA+N _c +10%Ps	2.8	4.1	13.7	37	65.2	68.4	72.6
Lime+BHA+N _c +30%Ps	0	0.9	3.1	15.6	35.1	46.6	63.2
DLime+BHA+N _c +30%Ps	2.5	4.1	8.4	14	47.3	53.9	66.2
Lime+BHA+N _c +50%Ps	0	1.3	2.8	10.4	14.3	27.4	30.9
DLime+BHA+N _c +50%Ps	2.0	3.6	6.5	9.1	20.9	30.1	37.9

ตารางที่ ผ. 9 การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มี การปรับปรุงวิธีการผสม สำหรับปูนขาวผสม RHA ในสภาวะที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและ โซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2

กำลังรับแรงอัด (กก/ซม ²)							
อายุ (วัน)	1	3	7	14	28	56	91
Lime+RHA	5.3	16.9	30.1	49.9	71	80	85.0
DLime+RHA	12.9	23.7	38.0	57.4	78	88.4	90.2
Lime+RHA+10%Ps	0	0	2.8	7	66.3	72	80
DLime+RHA+10%Ps	2.1	5.7	10.1	20.5	51	67.4	78.9
Lime+RHA+30%Ps	0	0	1.6	3.7	7.9	11	20
DLime+RHA+30%Ps	1.7	4	6	10.1	15.9	32.5	39.6
Lime+RHA+50%Ps	0	0.	1.3	2.6	4.6	6.3	14
DLime+RHA+50%Ps	1.4	2.9	5.6	6.8	13.9	15.3	22.1
Lime+RHA+N _s	18.4	31.5	42	50	62.3	69.7	80.3
DLime+RHA+N _s	26.8	456	58.7	70.5	73.9	80	90.6
Lime+RHA+N _s +10%Ps	2.8	6.5	28.8	40.1	53.1	63.5	69.1
DLime+RHA+N _s +10%Ps	3.5	15.5	47.9	62.4	70.2	78.5	96.6
Lime+RHA+N _s +30%Ps	0	0	2.1	5.3	16.6	25.8	27.1
DLime+RHA+N _s +30%Ps	2.1	6.3	8.1	13.6	20.6	27.4	33.5
Lime+RHA+N _s +50%Ps	0	0	1.2	2.5	13.9	22.7	25.4
DLime+RHA+N _s +50%Ps	1.8	3.6	6.7	8.6	16.8	18.9	22
Lime+RHA+N _c	18.8	36.2	39.42	49.00	65.1	73.6	88.4
DLime+RHA+N _c	49.7	59.2	67.11	78.37	128.7	134.6	134.5
Lime+RHA+N _c +10%Ps	3.3	7.9	35.86	44.76	56.6	68.2	83.1
DLime+RHA+N _c +10%Ps	5	12.6	55.00	72.01	89.6	93.7	97.5
Lime+RHA+N _c +30%Ps	0	3.2	5.19	14.78	54	65.3	73.0
DLime+RHA+N _c +30%Ps	2.4	5.5	10.34	27.45	64.9	77.6	81.9
Lime+RHA+N _c +50%Ps	0	2.2	4.47	14.03	21.5	29.2	31.9
DLime+RHA+N _c +50%Ps	2.2	3.9	6.50	18.95	25.7	37.9	42.2

ตารางที่ ผ. 10 ความเข้มข้นสะสม, สัมประสิทธิ์การแพร่ และดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อแข็ง
ของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสาน

ตัวอย่าง	Cr (25 มก/ตร.ม.)*			Zn(100 มก/ตร.ม.)*			Fe		
	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li
OPC	0.174			0.129			0.417		
OPC+10%PS	2.895	9.32E-14	13.49	4.885	7.27E-15	14.96	1.143	1.87E-14	14.92
OPC+30%PS	3.671	1.49E-15	15.29	6.866	1.06E-14	14.73	1.644	1.80E-14	14.63
OPC+50%PS	4.345	2.66E-15	15.17	9.437	2.29E-14	14.49	2.163	4.39E-14	14.43
OPC+10%Zn	0.144			7.008	3.47E-15	15.32	0.407		
OPC+10%BHA	0.159			0.129			0.307		
OPC+10%BHA+10%PS	2.672	8.62E-14	13.53	4.738	7.41E-15	14.95	0.899	1.38E-14	15.14
OPC+10%BHA+30%PS	3.478	1.99E-15	15.17	6.784	1.48E-14	14.58	1.338	1.98E-14	14.64
OPC+10%BHA+50%PS	4.347	3.61E-15	15.04	9.219	2.97E-14	14.38	1.99	4.68E-14	14.38
OPC+10%BHA+10%Zn	0.154			6.593	3.60E-15	15.3	0.356		
OPC+20%BHA	0.129			0.115			0.222		
OPC+20%BHA+10%PS	2.459	7.66E-14	13.58	4.553	7.15E-15	14.96	0.764	1.10E-14	15.45
OPC+20%BHA+30%PS	3.391	1.86E-15	15.2	6.117	1.23E-14	14.67	1.186	1.71E-14	14.77
OPC+20%BHA+50%PS	4.08	3.38E-15	15.06	8.423	2.63E-14	14.43	1.813	4.23E-14	14.45
OPC+20%BHA+10%Zn	0.145			6.393	3.76E-15	15.28	0.401		
OPC+30%BHA	0.141			0.1			0.588		
OPC+30%BHA+10%PS	2.767	1.21E-13	13.38	5.137	1.15E-14	14.76	1.011	1.11E-14	14.97
OPC+30%BHA+30%PS	3.599	1.88E-15	15.19	6.835	1.38E-14	14.62	1.448	1.90E-14	14.63
OPC+30%BHA+50%PS	4.238	3.62E-15	15.03	9.438	3.30E-14	14.33	2.304	4.84E-14	14.2
OPC+30%BHA+10%Zn	0.11			7.108	4.87E-15	15.17	0.507		
OPC+10%SRHA	0.109			0.124			0.298		
OPC+10%SRHA+10%PS	2.504	7.14E-14	13.61	4.177	5.45E-15	15.08	0.685	9.56E-15	15.46
OPC+10%SRHA+30%PS	3.161	1.31E-15	15.35	5.915	9.30E-15	14.79	1.151	1.36E-14	14.96
OPC+10%SRHA+50%PS	3.983	2.74E-15	15.15	8.35	2.21E-14	14.5	1.927	4.55E-14	14.46
OPC+10%SRHA+10%Zn	0.11			6.266	3.58E-15	15.31	0.29		
OPC+20%SRHA	0.085			0.144			0.299		
OPC+20%SRHA+10%PS	2.369	7.07E-14	13.61	4.334	6.47E-15	15	1.565	3.81E-14	14.88
OPC+20%SRHA+30%PS	3.107	1.39E-15	15.32	6.31	1.17E-14	14.69	2.258	4.79E-14	14.26
OPC+20%SRHA+50%PS	3.506	2.83E-15	15.23	8.732	2.76E-14	14.42	2.546	6.87E-14	14.11
OPC+20%SRHA+10%Zn	0.103			6.655	4.49E-15	15.21	0.786		
OPC+30%SRHA	0.144			0.115			1.564		
OPC+30%SRHA+10%PS	2.518	9.04E-14	13.5	4.87	9.29E-15	14.85	2.058	6.11E-14	14.49
OPC+30%SRHA+30%PS	3.502	1.97E-15	15.17	7.135	1.67E-14	14.54	2.775	7.76E-14	14.01
OPC+30%SRHA+50%PS	4.201	3.62E-15	15.04	10.156	3.86E-14	14.26	3.431	9.34E-14	13.83
OPC+30%SRHA+10%Zn	0.999			7.374	6.34E-15	15.06	1.985		

Lcu คือ ความเข้มข้นสะสม (มก./ ตร.ม.), De คือ สัมประสิทธิ์การชะละลาย (ตร.ชม./วินาที)
และLi คือ ดัชนีการรั่วไหล

ตารางที่ ผ. 11 ความเข้มข้นสะสม, สัมประสิทธิ์การแพร่ และดัชนีการรั่วไหลของก๊อหนหล่อแข็ง
ของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ผสมเป็นวัสดุยึดประสานที่มีการปรับปรุงวิธีการผสม

ตัวอย่าง	Cr (25 มก/ตร.ม.)*			Zn(100 มก/ตร.ม.)*			Fe		
	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li
DOPC	0.176			0.131			0.243		
DOPC+10%PS	2.808	9.44E-14	13.61	4.638	5.32E-15	15.09	0.675	6.40E-15	15.55
DOPC+30%PS	3.393	1.87E-15	15.2	6.494	1.43E-14	14.62	1.224	1.72E-14	14.82
DOPC+50%PS	4.004	3.06E-15	15.11	10.052	1.09E-13	14.33	1.629	3.41E-14	14.63
DOPC+10%Zn	0.146			6.709	3.06E-15	15.38	0.212		
DOPC+10%BHA	0.177			0.11			0.25		
DOPC+10%BHA+10%PS	2.687	8.18E-14	13.55	4.324	5.80E-15	15.05	0.74	9.91E-15	15.41
DOPC+10%BHA+30%PS	3.361	1.54E-15	15.28	6.112	1.04E-14	14.74	1.196	1.42E-14	14.81
DOPC+10%BHA+50%PS	3.941	2.87E-15	15.13	8.385	2.38E-14	14.47	2.793	7.07E-14	14.3
DOPC+10%BHA+10%Zn	0.107			5.799	2.55E-15	15.49	0.282		
DOPC+20%BHA	0.134			0.13			0.193		
DOPC+20%BHA+10%PS	2.287	7.06E-14	13.62	4.117	6.16E-15	15.02	0.679	9.22E-15	15.47
DOPC+20%BHA+30%PS	3.04	1.15E-15	15.41	5.807	8.55E-15	14.83	1.052	1.08E-14	15.01
DOPC+20%BHA+50%PS	3.633	2.69E-15	15.16	8.16	2.47E-14	14.45	1.624	3.58E-14	14.58
DOPC+20%BHA+10%Zn	0.088			5.596	2.70E-15	15.43	0.191		
DOPC+30%BHA	0.136			0.085			0.474		
DOPC+30%BHA+10%PS	2.687	1.12E-13	13.4	4.668	9.68E-15	14.83	0.882	9.94E-15	15.11
DOPC+30%BHA+30%PS	3.488	1.96E-15	15.18	6.302	1.30E-14	14.65	1.285	1.61E-14	14.7
DOPC+30%BHA+50%PS	4.068	3.01E-15	15.11	8.823	2.59E-14	14.44	1.702	3.56E-14	14.59
DOPC+30%BHA+10%Zn	0.119			6.648	4.05E-15	15.25	0.431		
DOPC+10%SRHA	0.107			0.096			0.101		
DOPC+10%SRHA+10%PS	2.173	5.23E-14	13.75	3.863	4.48E-15	15.16	0.42	3.87E-15	15.87
DOPC+10%SRHA+30%PS	2.929	1.06E-15	15.44	5.489	7.60E-15	14.88	0.759	7.99E-15	15.5
DOPC+10%SRHA+50%PS	3.856	2.59E-15	15.18	7.73	1.89E-14	14.57	1.273	1.82E-14	14.96
DOPC+10%SRHA+10%Zn	0.137			5.738	2.56E-15	15.45	0.751		
DOPC+20%SRHA	0.144			0.122			0.218		
DOPC+20%SRHA+10%PS	2.12	9.75E-14	13.47	3.846	8.80E-15	14.87	1.323	4.01E-14	14.98
DOPC+20%SRHA+30%PS	2.765	1.10E-15	15.42	5.737	9.69E-15	14.77	1.825	3.66E-14	14.44
DOPC+20%SRHA+50%PS	3.465	2.26E-15	15.24	8.161	2.31E-14	14.49	2.107	4.25E-14	14.3
DOPC+20%SRHA+10%Zn	0.094			6.454	3.98E-15	15.26	0.558		
DOPC+30%SRHA	0.089			0.089			0.61		
DOPC+30%SRHA+10%PS	2.455	8.14E-14	13.56	4.714	8.19E-15	14.9	1.623	4.13E-14	14.75
DOPC+30%SRHA+30%PS	3.154	1.60E-15	15.26	7.259	1.73E-14	14.52	2.476	7.01E-14	14.11
DOPC+30%SRHA+50%PS	4.083	3.37E-15	15.06	9.24	3.17E-14	14.35	3.068	7.72E-14	13.94
DOPC+30%SRHA+10%Zn	0.142			7.212	5.94E-15	15.09	0.888		

Lcu คือ ความเข้มข้นสะสม (มก./ ตร.ม.), De คือ สัมประสิทธิ์การชะละลาย (ตร.ชม./วินาที)
และLi คือ ดัชนีการรั่วไหล

ตารางที่ ผ. 12 ความเข้มข้นสะสม, สัมประสิทธิ์การแพร่ และดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อแข็ง
ของเสียที่ใช้ปูนขาวผสม BHA หรือ RHA เป็นวัสดุยึดประสาน

ตัวอย่าง	Cr (25 มก/ตร.ม.)*			Zn(100 มก/ตร.ม.)*			Fe		
	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li
Lime:BHA	0.053			0.155			0.354		
Lime:BHA +10%PS	2.567	3.31E-13	13.43	7.216	2.61E-14	14.47	5.504	2.41E-13	13.46
Lime:BHA +30%PS	4.783	1.09E-14	14.77	11.293	7.10E-14	14.02	10.312	6.63E-13	12.71
Lime:BHA +50%PS	10.176	5.15E-14	14.15	14.336	8.16E-14	13.86	18.227	2.21E-12	12.25
Lime:BHA +10%Zn	0.052			10.854	6.20E-15	14.67	0.329		
Lime:BHA +NS	0.077			0.122			0.284		
Lime:BHA +NS+10%PS	2.246	2.69E-13	13.51	6.977	2.63E-14	14.47	4.695	1.87E-13	13.58
Lime:BHA +NS+30%PS	4.614	9.68E-15	14.82	11.009	5.91E-14	14.07	9.356	5.30E-13	12.81
Lime:BHA +NS+50%PS	9.465	4.46E-14	14.22	13.933	7.69E-14	13.88	16.547	1.93E-12	12.33
Lime:BHA +NS+10%Zn	0.085			10.773	6.47E-15	14.67	0.232		
Lime:BHA +NC	0.067			0.129			0.166		
Lime:BHA +NC+10%PS	2.189	2.72E-13	13.51	6.306	2.26E-14	14.53	1.854	9.09E-14	14.37
Lime:BHA +NC+30%PS	4.536	9.88E-15	14.81	10.705	5.91E-14	14.07	4.098	2.02E-13	13.51
Lime:BHA +NC+50%PS	9.382	4.35E-14	14.22	13.413	7.10E-14	13.92	7.859	1.32E-12	13.04
Lime:BHA +NC+10%Zn	0.088			10.495	7.35E-15	14.62	0.165		
Lime:sRHA	0.066			0.149			0.144		
Lime:sRHA +10%PS	2.186	2.99E-13	13.47	6.309	2.47E-14	14.49	4.082	1.64E-13	13.7
Lime:sRHA +30%PS	4.283	8.82E-15	14.86	9.791	5.01E-14	14.14	7.46	3.51E-13	12.98
Lime:sRHA +50%PS	8.874	4.21E-14	14.24	12.62	6.77E-14	13.94	14.341	1.47E-12	12.43
Lime:sRHA +10%Zn	0.066			9.56	5.87E-15	14.71	0.254		
Lime:sRHA +NS	0.088			0.144			0.265		
Lime:sRHA +NS+10%PS	2.036	2.60E-13	13.53	6.262	2.47E-14	14.49	3.705	1.39E-13	13.79
Lime:sRHA +NS+30%PS	4.119	7.87E-15	14.91	9.459	4.49E-14	14.19	6.739	2.77E-13	13.09
Lime:sRHA +NS+50%PS	8.331	3.69E-14	14.3	11.94	5.91E-14	13.99	13.353	1.26E-12	12.49
Lime:sRHA +NS+10%Zn	0.088			9.263	5.56E-15	14.74	0.183		
Lime:sRHA +NC	0.074			0.144			0.111		
Lime:sRHA +NC+10%PS	1.979	2.26E-13	13.59	5.307	1.63E-14	14.67	3.436	1.07E-13	13.85
Lime:sRHA +NC+30%PS	4.072	8.68E-15	14.87	8.338	3.93E-14	14.24	6.244	2.76E-13	13.1
Lime:sRHA +NC+50%PS	8.232	3.79E-14	14.28	10.937	5.35E-14	14.04	12.154	1.11E-12	12.55
Lime:sRHA +NC+10%Zn	0.091			8.331	4.27E-15	14.85	0.113		

Lcu คือ ความเข้มข้นสะสม (มก./ ตร.ม.), De คือ สัมประสิทธิ์การชะละลาย (ตร.ชม./วินาที)
และLi คือ ดัชนีการรั่วไหล

ตารางที่ ผ. 13 ความเข้มข้นสะสม, สัมประสิทธิ์การแพร่ และดัชนีการรั่วไหลของก้อนหล่อแข็ง
ของเสียที่ใช้ปูนขาวผสม BHA หรือ RHA เป็นวัสดุยึดประสานที่มีการปรับปรุง
วิธีการผสม

ตัวอย่าง	Cr (25 มก/ตร.ม.)*			Zn(100 มก/ตร.ม.)*			Fe		
	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li	Lcu	De	Li
DLime:BHA	0.055			0.157			0.3		
DLime:BHA +10%PS	2.27	2.58E-13	13.53	6.721	2.29E-14	14.53	4.364	1.54E-13	13.65
DLime:BHA +30%PS	4.632	9.36E-15	14.83	11.189	5.90E-14	14.07	8.749	4.67E-13	12.88
DLime:BHA +50%PS	9.486	4.24E-14	14.24	14.011	7.34E-14	13.9	15.576	1.87E-12	12.41
DLime:BHA +10%Zn	0.084			10.743	6.43E-15	14.67	0.227		
DLime:BHA +NS	0.124			0.141			0.197		
DLime:BHA +NS+10%PS	1.994	2.52E-13	13.55	6.805	2.90E-14	14.42	4.202	1.69E-13	13.67
DLime:BHA +NS+30%PS	4.374	8.93E-15	14.85	10.829	5.99E-14	14.07	8.678	4.85E-13	12.87
DLime:BHA +NS+50%PS	9.082	3.71E-14	14.29	13.964	7.01E-14	13.92	15.452	1.58E-12	12.43
DLime:BHA +NS+10%Zn	0.404			10.191	5.27E-15	14.74	0.184		
DLime:BHA +NC	0.085			0.122			0.232		
DLime:BHA +NC+10%PS	2.089	2.31E-13	13.58	6.186	2.02E-14	14.58	1.453	5.29E-14	14.6
DLime:BHA +NC+30%PS	4.327	7.82E-15	14.91	10.439	4.93E-14	14.14	3.494	1.07E-13	13.71
DLime:BHA +NC+50%PS	9.166	3.83E-14	14.28	12.849	6.25E-14	13.99	6.97	9.82E-13	13.19
DLime:BHA +NC+10%Zn	0.052			10.333	6.46E-15	14.68	0.118		
DLime:sRHA	0.096			0.159			0.115		
DLime:sRHA +10%PS	2.492	3.61E-13	13.38	6.029	2.13E-14	14.56	4.597	1.26E-13	13.62
DLime:sRHA +30%PS	4.752	1.07E-14	14.78	9.686	4.80E-14	14.16	8.84	4.82E-13	12.84
DLime:sRHA +50%PS	9.557	4.93E-14	14.17	12.24	6.42E-14	13.96	15.438	1.72E-12	12.36
DLime:sRHA +10%Zn	0.073			9.373	6.12E-15	14.69	0.321		
DLime:sRHA +NS	0.092			0.107			0.125		
DLime:sRHA +NS+10%PS	1.811	2.03E-13	13.65	5.558	1.87E-14	14.61	3.338	1.05E-13	13.88
DLime:sRHA +NS+30%PS	3.918	7.37E-15	14.94	8.728	3.92E-14	14.24	5.992	2.24E-13	13.18
DLime:sRHA +NS+50%PS	8.214	3.44E-14	14.33	10.965	4.89E-14	14.08	12.316	1.03E-12	12.58
DLime:sRHA +NS+10%Zn	0.071			9.077	5.34E-15	14.75	0.124		
DLime:sRHA +NC	0.073			0.111			0.077		
DLime:sRHA +NC+10%PS	1.805	1.87E-13	13.67	4.575	1.22E-14	14.8	3.07	8.69E-14	13.95
DLime:sRHA +NC+30%PS	3.913	6.87E-15	14.97	7.668	2.86E-14	14.38	5.952	2.09E-13	13.21
DLime:sRHA +NC+50%PS	7.798	3.25E-14	14.35	9.991	4.23E-14	14.14	11.212	8.98E-13	12.64
DLime:sRHA +NC+10%Zn	0.051			7.736	3.89E-15	14.89	0.073		

Lcu คือ ความเข้มข้นสะสม (มก./ ตร.ม.), De คือ สัมประสิทธิ์การชะละลาย (ตร.ชม./วินาที)
และ Li คือ ดัชนีการรั่วไหล

ตารางที่ ผ.14 เปรียบเทียบปริมาณการรั่วไหลสะสมของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ผสมเถ้า
 แกลบดำ และเถ้าแกลบสังเคราะห์ผสมโลหะหนัก

อัตราส่วน	ค่า t ($t_{critical}=1.812$)		
	Fe	Zn	Cr
OPC+10%BHA และ OPC+10%SRHA			
- 10 wt.% Plating sludge	1.719	1.126	0.403
- 30 wt.% Plating sludge	1.502	1.744	0.761
- 50 wt.% Plating sludge	0.506	1.744	0.873
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	-	0.656	-
OPC+20%BHA และ OPC+20%SRHA	1.295	0.439	0.216
- 10 wt.% Plating sludge	1.733	0.275	0.681
- 30 wt.% Plating sludge	1.185	0.785	1.375
- 50 wt.% Plating sludge	-	1.080	-
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	1.192	0.536	0.597
OPC+30%BHA และ OPC+30%SRHA	1.511	1.405	0.233
- 10 wt.% Plating sludge	1.283	0.566	0.089
- 30 wt.% Plating sludge	-	1.473	-
- 50 wt.% Plating sludge			
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide			

ตารางที่ ผ.15 เปรียบเทียบปริมาณการรั่วไหลสะสมของโลหะหนักจากปูนซีเมนต์ผสมแก้ว
 แกลบดำ และแก้วแกลบสังเคราะห์ที่เตรียมโดยปรับปรุงวิธีการผสมผสม
 โลหะหนัก

อัตราส่วน	ค่า t ($t_{critical}=1.812$)		
	Fe	Zn	Cr
DOPC+10%BHA และ			
DOPC+10%sRHA	0.795	0.925	1.233
- 10 wt.% Plating sludge	1.085	1.250	1.037
- 30 wt.% Plating sludge	1.788	1.314	0.204
- 50 wt.% Plating sludge	-	0.122	-
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	0.215	0.544	0.401
DOPC+20%BHA และ	1.337	0.14	0.660
DOPC+20%sRHA	1.725	1.744	0.403
- 10 wt.% Plating sludge	-	1.778	-
- 30 wt.% Plating sludge	0.750	1.714	0.557
- 50 wt.% Plating sludge	1.604	1.770	0.801
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	1.632	1.772	1.644
DOPC+30%BHA และ	-	1.718	-
DOPC+30%sRHA			
- 10 wt.% Plating sludge			
- 30 wt.% Plating sludge			
- 50 wt.% Plating sludge			
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide			

ตารางที่ ผ.16 เปรียบเทียบปริมาณการรั่วไหลสะสมของโลหะหนักจากปูนขาวผสมเถ้าแกลบ
ดำ และเถ้าแกลบสังเคราะห์ผสมโลหะหนัก

อัตราส่วน	ค่า t ($t_{critical}=1.812$)		
	Fe	Zn	Cr
Lime:BHA และ Lime:sRHA			
- 10 wt.% Plating sludge	1.067	0.937	0.517
- 30 wt.% Plating sludge	1.389	1.552	0.678
- 50 wt.% Plating sludge	1.415	1.773	1.630
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	-	1.337	-
Lime:BHA+NS และ Lime:sRHA+NS	1.018	0.669	0.323
- 10 wt.% Plating sludge	1.663	1.451	0.762
- 30 wt.% Plating sludge	2.074	1.584	1.745
- 50 wt.% Plating sludge	-	2.428	-
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	1.639	1.016	0.504
Lime:BHA+NC และ Lime:sRHA+NC	1.620	1.695	1.113
- 10 wt.% Plating sludge	1.963	1.735	1.752
- 30 wt.% Plating sludge	-	1.776	-
- 50 wt.% Plating sludge			
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide			

ตารางที่ ผ.17 เปรียบเทียบปริมาณการรั่วไหลสะสมของโลหะหนักจากปูนขาวผสมเถ้าแกลบ
ดำ และเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่เตรียมโดยปรับปรุงวิธีการผสมผสมโลหะหนัก

อัตราส่วน	ค่า t ($t_{critical}=1.812$)		
	Fe	Zn	Cr
D Lime:BHA และ D Lime:sRHA			
- 10 wt.% Plating sludge	0.780	0.807	1.572
- 30 wt.% Plating sludge	1.766	1.666	1.583
- 50 wt.% Plating sludge	1.750	1.750	1.741
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	-	1.597	-
D Lime:BHA+NS และ D Lime:sRHA+NS			
- 10 wt.% Plating sludge	0.911	1.775	0.225
- 30 wt.% Plating sludge	1.777	1.757	0.561
- 50 wt.% Plating sludge	1.830	1.717	1.068
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	-	1.772	-
D Lime:BHA+NC และ D Lime:sRHA+NC			
- 10 wt.% Plating sludge	1.414	1.445	1.729
- 30 wt.% Plating sludge	1.760	1.588	1.698
- 50 wt.% Plating sludge	1.777	1.739	1.753
- 10 wt.% Synthesis zinc hydroxide	-	1.880	-

