



ผลกระทบของระยะเวลาไฮดรชันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี
ของก้อนหล่อแข็งของเสียม

นางสาวเบญจวรรณ มหิทธิรุกษ์

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

ผลกระทบของระยะเวลาไฮดรเจนต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี
ของก้อนหล่อแข็งของเสียม

นางสาวเบญจวรรณ มหิทธิรักษ์ วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบโครงการการศึกษาวิจัย

(รศ.ดร.สุวิมล อัสวพิศิษฐ์)

ประธานกรรมการโครงการการศึกษาวิจัย

(ผศ.ดร.ศศิธร พุทธรังษ์)

ประธานร่วม

(ดร.ศิริลักษณ์ เกียรติกร)

กรรมการ

(ดร.พัฒนา รักความสุข)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผลกระทบของระยะเวลาไฮดรชันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี
ของก้อนหล่อแข็งของเสียม

นางสาวเบญจวรรณ มหิทธิรักษ์ วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

โครงการการศึกษาวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบโครงการการศึกษาวิจัย



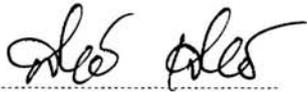
(รศ.ดร.สุวิมล อัสวพิศิษฐ)

ประธานกรรมการ โครงการการศึกษาวิจัย



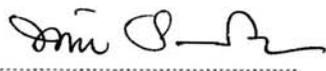
(ผศ.ดร.ศศิธร พุททวงษ์)

ประธานร่วม



(ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร)

กรรมการ



(ดร.พัฒนะ รักความสุข)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อโครงการการศึกษาวิจัย	ผลกระทบของระยะเวลาไฮดรชันต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของก้อนหล่อแข็งของเสียบ
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นางสาวเบญจวรรณ มหิทธิรักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวิมล อัสวพิศิษฐ
หลักสูตร	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
สายวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

โครงการการศึกษาวิจัยนี้ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายซีเมนต์ที่ระยะเวลาไฮดรชันต่างๆ กัน โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 0%, 10%, 20% และ 30% และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในอัตราส่วน 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต 8% และในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ 10% อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อของแข็งทั้งหมดสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์/เถ้าแกลบสังเคราะห์/โลหะหนัก เท่ากับ 10 และ ปูนขาว/เถ้าแกลบสังเคราะห์/โลหะหนัก เท่ากับ 20 ผลการทดลองพบว่า pH ของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12.35 เป็น 12.66 ในช่วงระยะเวลาการไฮดรชัน 3 วัน เมื่อเติมกากตะกอนโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ พบว่า ค่า pH ในช่วง 1 ชั่วโมงแรกของการทำปฏิกิริยามีค่าลดลงจาก 12.23 และ 12.21 เป็น 12.04 และ 11.96 หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 12.63 และ 12.54 ตามลำดับ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า pH ความเข้มข้นของซัลเฟตและแคลเซียมมีค่าลดลงจาก 1,493 และ 1,282 เหลือ 335 และ 721 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ตลอดการทดลอง สำหรับสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์นั้น เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต พบว่า ความเข้มข้นของซิลิกอนมีค่าเท่ากับ 189 มิลลิกรัมต่อลิตร ในนาที่แรกของการทำปฏิกิริยา และลดลงเหลือ 1.3 มิลลิกรัมต่อลิตรภายใน 3 วัน ในขณะที่ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายที่ไม่มีเติมโซเดียมซิลิเกตมีค่าต่ำกว่า 0.251 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดการทดลอง นอกจากนี้ ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายที่มีโซเดียมซิลิเกตมีค่าต่ำกว่าสารละลายที่ไม่มีโซเดียมซิลิเกตอย่างมีนัยสำคัญตลอดการทดลอง

คำสำคัญ : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ / ปูนขาว / เถ้าแกลบสังเคราะห์ / โลหะหนัก / สารกระตุ้นปฏิกิริยา

Research Study	Effect of Hydration Times on Variation in Chemical Compositions of the Solidified Wastes
Research Study Credits	6
Candidate	Miss Benjawan Mahittirook
Research Study Advisor	Assoc.Prof.Dr.Suwimol Asavapisit
Program	Master of Science
Field of Study	Environmental Technology
Department	Environmental Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2549

Abstract

This research study investigated variation in chemical compositions of the solidified wastes at different hydration times. The synthetic rice husk ash (sRHA) was used to replace for ordinary Portland cement (OPC) at 0%, 10%, 20%, 30% by wt. and to combine with hydrated lime at the weight ratio of 55:45. Sodium silicate and sodium carbonate were used to activate the hydration reaction of lime and sRHA at 8% by wt. The synthetic zinc hydroxide and the plating sludge were added to the cement mixes at 10% by wt. Water to solid ratios (W/S) of 10 and 20 were used for OPC/sRHA/Heavy metal and Lime/sRHA/Heavy metal mixes. Solution chemistry data shows that pH of filtrates separated from OPC slurries increased from 12.35 to 12.66 during hydration time of 3 days. When the plating sludge and the synthetic zinc hydroxide were added, pH of the filtrates decreased from 12.23 and 12.21 to 12.04 and 11.96, respectively during the first hour of hydration and increased to 12.63 and 12.54 thereafter. Concentration of OH⁻ ion varied in a similar manner to that of pH. A gradual decrease in concentration of sulfate and calcium from 1,493 and 1,282 to 335 and 721 mg/L, respectively were observed throughout the designated hydration time. For lime/sRHA mixes, concentration of Si in the filtrates containing sodium silicate was 189 mg/L during the first minute of hydration and decreased to 1.3 mg/L within 3 days. When sodium silicate was not added to the cement mixes, concentration of Si remained lower than 0.251 mg/L throughout the experiment. In addition, a considerable lower Zn concentration in the filtrates separated from the samples containing sodium silicate was found.

Keywords : Ordinary Portland Cement / Hydrated Lime / Synthetic Rice Husk Ash / Heavy Metal / Activators

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการศึกษาวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือและความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวิมล อัสวพิศิษฐ ประธานกรรมการโครงการการศึกษาวิจัย และประธานร่วม ผศ.ดร.ศศิธร พุททวงษ์ กรรมการ ดร.สิริลักษณ์ เจียรากร และ ดร.พัฒนะ รักความสุข ที่ให้ความกรุณา ในการให้แนวคิด คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนการตรวจสอบและแก้ไขปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อโครงการการศึกษาวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ โรงชุมชนเกษม จังหวัดกรุงเทพมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องกากตะกอน โลหะหนัก คุณจงกลณี มัจฉพันธ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสารเคมี คุณสุมาลี อมรเวชศิริกุล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องการใช้เครื่องวัดปริมาณโลหะหนัก รวมถึงขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องการใช้อุปกรณ์ สารเคมี และการติดต่อประสานงาน

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่และรุ่นน้องในสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ตลอดจนเพื่อนๆ และบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการทำการศึกษาวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณลุง พี่ๆ ทุกคนในครอบครัวมหิทธิรุกข์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งด้านกำลังกาย กำลังใจ และกำลังทรัพย์ ซึ่งส่งผลให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินโครงการการศึกษาวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ฉ
รายการรูปประกอบ	ญ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ของเสียอันตราย	4
2.1.1 คำนิยามของของเสียอันตราย	4
2.1.2 สมบัติของของเสียอันตราย	4
2.1.3 ประเภทของของเสียอันตราย	6
2.1.4 แหล่งที่มาของของเสียอันตราย	8
2.1.5 ปริมาณของของเสียอันตราย	8
2.1.6 การจัดการของของเสียอันตราย	9
2.2 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง	13
2.3 การตกตะกอนของ โลหะไฮดรอกไซด์	13
2.4 ปูนซีเมนต์	14
2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์	15
2.4.2 สมบัติของสารประกอบหลัก	16

	หน้า
2.4.3 สมบัติของสารประกอบรอง	20
2.4.4 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	22
2.5 ปูนขาว	22
2.5.1 Quick Lime	22
2.5.2 Hydrated Lime	23
2.6 วัสดุปอสโซลาน	23
2.7 โลหะหนัก	26
2.8 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	29
2.8.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต	29
2.8.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรคัลเซียมอลูมิเนต	30
2.8.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์	32
2.8.4 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	32
2.8.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	33
2.9 ปฏิกิริยาปอสโซลาน	35
2.10 กระบวนการกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลาน	36
2.10.1 การกระตุ้นด้วยการบดลดขนาด	36
2.10.2 การกระตุ้นด้วยความร้อน	36
2.10.3 การกระตุ้นด้วยสารเคมี	36
2.11 วารสารปริทัศน์	37
3. วิธีการดำเนินการวิจัย	40
3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย	40
3.1.1 ปูนซีเมนต์	40
3.1.2 ปูนขาว	40
3.1.3 เถ้าแกลบสังเคราะห์	40
3.1.4 กากตะกอนโลหะหนัก	40
3.1.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยา	40
3.1.6 น้ำ	41
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	41

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ	42
3.3.1 การเตรียมเถ้าแกลบสังเคราะห์	42
3.3.2 การเตรียมกากตะกอน โลหะหนัก	42
3.3.3 การเตรียมสารกระตุ้นปฏิกิริยา	44
3.4 การเตรียมตัวอย่าง	44
3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารละลาย	46
3.5.1 การวิเคราะห์หาค่า pH	46
3.5.2 การวิเคราะห์หาค่า OH ⁻	46
3.5.3 การวิเคราะห์หาค่า SO ₄ ²⁻	47
3.5.4 การวิเคราะห์หาค่า NO ₃ ⁻	47
3.5.5 การวิเคราะห์หาค่า Ca ²⁺ , Si, Zn, Cr, Fe, Cu และ Pb	47
4. ผลการศึกษาวิจัยและการวิเคราะห์ผล	48
4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เถ้าแกลบสังเคราะห์, กากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์	48
4.1.1 ค่า pH	48
4.1.2 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์	50
4.1.3 ความเข้มข้นของซัลเฟต	53
4.1.4 ความเข้มข้นของแคลเซียม	54
4.1.5 ความเข้มข้นของซิลิกอน	55
4.1.6 ความเข้มข้นของไนเตรท	60
4.1.7 ความเข้มข้นของสังกะสี	62
4.1.8 ความเข้มข้นของเหล็ก	63
4.1.9 ความเข้มข้นของโครเมียม	63
4.1.10 ความเข้มข้นของตะกั่ว	64
4.1.11 ความเข้มข้นของทองแดง	64
4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาว, เถ้าแกลบสังเคราะห์, กากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วย โซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต	70

	หน้า
4.2.1 ค่า pH	70
4.2.2 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์	71
4.2.3 ความเข้มข้นของซัลเฟต	75
4.2.4 ความเข้มข้นของแคลเซียม	76
4.2.5 ความเข้มข้นของซิลิกอน	77
4.2.6 ความเข้มข้นของไนเตรท	82
4.2.7 ความเข้มข้นของสังกะสี	84
4.2.8 ความเข้มข้นของเหล็ก	85
4.2.9 ความเข้มข้นของโครเมียม	85
4.2.10 ความเข้มข้นของตะกั่ว	85
4.2.11 ความเข้มข้นของทองแดง	86
5. สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง	94
ภาคผนวก	99
ก. ความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ สังเคราะห์ และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์	99
ประวัติผู้วิจัย	107

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การแบ่งแยกประเภทของของเสียอันตรายออกเป็นลักษณะ	7
2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	15
2.3 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	16
2.4 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักของปูนเม็ด	17
2.5 สรุปสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	19
2.6 แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่พบในประเทศไทย	26
3.1 ปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนจากโรงชุบและตั้งกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์	43
3.2 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับเถ้าแกลบสังเคราะห์	45
3.3 อัตราส่วนผสมของปูนขาวกับเถ้าแกลบสังเคราะห์	46
ก1. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%	100
ก2. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 90% เถ้าแกลบสังเคราะห์ 10% ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%	101
ก3. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 80% เถ้าแกลบสังเคราะห์ 20% ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%	102
ก4. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 70% เถ้าแกลบสังเคราะห์ 30% ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%	103
ก5. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สังเคราะห์ 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%	104
ก6. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สังเคราะห์ 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%และมีการเติม สารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมซิลิเกต 8%	105
ก7. แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สังเคราะห์ 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10% และมีการเติม สารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต 8%	106

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 แนวทางการจัดการของเสียอันตราย	10
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์กับค่า pH	14
2.3 รูปร่างของ C_3S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมสีดำ	17
2.4 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	18
2.5 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของ Ettringite และ Monosulphate	30
2.6 กระบวนการห่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A	31
2.7 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	33
2.8 ผลของความละเอียดในรูปของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	34
2.9 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	35
4.1 ค่า pH ในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	51
4.2 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	52
4.3 ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	57
4.4 ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	58
4.5 ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	59
4.6 ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	61
4.7 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	65
4.8 ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	66
4.9 ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	67
4.10 ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	68
4.11 ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก	69
4.12 ค่า pH ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	73
4.13 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	74
4.14 ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	79

รูป (ต่อ)	หน้า
4.15 ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	80
4.16 ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	81
4.17 ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	83
4.18 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	87
4.19 ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	88
4.20 ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	89
4.21 ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	90
4.22 ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก	91

ประมวลศัพท์และคำย่อ

C_2S	=	Dicalcium Silicate
C_3A	=	Tricalcium Aluminate
C_3S	=	Tricalcium Silicate
C_4AF	=	Tetracalcium Aluminoferrite
CAH	=	Calcium Aluminate Hydrate
CSH	=	Calcium Silicate Hydrate
L, Lime	=	ปูนขาว
NC, Na_2CO_3	=	Sodium Carbonate
NS, Na_2SiO_3	=	Sodium Silicate
O, OPC	=	Ordinary Portland Cement
PS	=	Plating Sludge
R, RHA, sRHA	=	Synthesis Rice Husk Ash
Zn, $Zn(OH)_2$	=	Synthesis Zinc Hydroxide

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

โลหะหนักเป็นของเสียอันตรายชนิดหนึ่ง ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยส่วนใหญ่จะมาจากภาคอุตสาหกรรม เช่น โรงงานชุบโลหะ, โรงงานผลิตสี, โรงหล่อโลหะ, สถานบริการฟันสี เป็นต้น ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มาก ทั้งทางน้ำ โดยอยู่ในรูปของสารละลาย, ทางอากาศ โดยอยู่ในรูปของสารระเหย และขยะมูลฝอย โดยอยู่ในรูปของของแข็ง ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้สามารถแพร่กระจายได้ โดยมีสาเหตุมาจากธรรมชาติ เช่น ฝนที่ตกลงมาสามารถละลายไอสารพิษในอากาศให้ตกลงมาได้ หรือจะเป็นการชะละลายของของเสียที่เป็นของแข็งออกสู่สิ่งแวดล้อม เป็นต้น โลหะหนักส่วนใหญ่ไม่สามารถทำลายฤทธิ์ได้หมด เช่น ในน้ำเสียเมื่อมีโลหะหนักผสมอยู่ อาจจะใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งจะได้กากตะกอนออกมา แต่ถ้ามีการนำกากตะกอนมาทิ้งไว้ภายนอก โดยไม่ได้ทำการบำบัดอย่างถูกวิธีแล้ว ก็จะทำให้สามารถแพร่ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ หรือถ้าของเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนมาทำการเผา ก็อาจจะมีไอพิษระเหยออกมา หรืออาจจะเหลือเถ้าที่ยังมีความเป็นพิษอยู่อีก ดังนั้น วิธีที่จะสามารถบำบัดโลหะหนักได้คือ ทำการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง

การปรับเสถียร (Stabilization) และการหล่อแข็ง (Solidification) เป็นวิธีที่นำกากของเสียอันตรายจำพวกสารอนินทรีย์ประเภทโลหะหนักมาตรึงไว้ในโครงสร้างของก้อนหล่อแข็ง ด้วยกระบวนการทางกายภาพ (Physical Process) และกระบวนการทางเคมี (Chemical Process) ซึ่งเป็นการตรึงกากของเสียอันตรายประเภทโลหะหนักโดยใช้วัสดุยึดประสาน อาทิ เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว และวัสดุปอสโซลาน เป็นต้น ทำให้โลหะหนักต่างๆ ตกตะกอนอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ และถูกกักเก็บภายในโครงสร้างของวัสดุยึดประสาน ทำให้การรั่วไหลของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมลดลง อีกทั้งยังทำให้เกิดความสะดวกในการจัดเก็บและนำไปทำการฝังกลบต่อไป

ในการหล่อแข็งของเสีย กากตะกอนโลหะหนักที่ถูกนำมาตรึงในก้อนหล่อแข็งของเสีย ส่งผลต่อคุณภาพของก้อนหล่อแข็งของเสีย เช่น ทำให้ก้อนหล่อแข็งมีกำลังรับแรงอัดลดลง, ระยะเวลาการแข็งตัวช้าลงหรือเร็วขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในก้อนหล่อแข็งของเสียเกิดจากโลหะหนักที่อยู่ในกากตะกอน ทำให้เกิดการหน่วงหรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุยึดประสาน ซึ่งกลไกการหน่วงหรือยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ดังนั้น งานวิจัยนี้

จึงศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของก้อนหล่อแข็งของเสีย ได้แก่ pH, OH⁻, ความเข้มข้นของแคทไอออนและแอนไอออน ในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นเวลาต่างๆ กัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก ที่ใช้ซีเมนต์ผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบสังเคราะห์
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก ที่ใช้ซีเมนต์ผสมระหว่างปูนขาวและเถ้าแกลบสังเคราะห์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ของส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในอัตราส่วนผสม 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ในสถานะที่ไม่มีและมิกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาไฮเดรชันต่างๆ กัน ได้แก่ 1 นาที, 10 นาที, 1 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง, 1 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ โดยทำการวิเคราะห์ค่า pH, ความเข้มข้นของ OH⁻, Ca²⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, Si และไอออนของโลหะหนักต่างๆ ในกากตะกอน

2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ของส่วนผสมระหว่างปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในอัตราส่วนผสม 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมิกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาไฮเดรชันต่างๆ กัน ได้แก่ 1 นาที, 10 นาที, 1 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง, 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน และ 10 วัน ตามลำดับ โดยทำการวิเคราะห์ค่า pH, ความเข้มข้นของ OH⁻, Ca²⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, Si และไอออนของโลหะหนักต่างๆ ในกากตะกอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยสามารถนำมาเป็นวัสดุยึดประสานในกระบวนการหล่อแข็งได้

2. ทราบกลไกการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่เกิดขึ้นในก้อนหล่อแข็งของเสี้ยที่ทำจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ และปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ได้
3. ช่วยลดปัญหาด้านการจัดเก็บและการปนเปื้อนของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยนำกากตะกอนโลหะหนักมาทำการบำบัดด้วยกระบวนการหล่อแข็ง

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของเสียอันตราย

2.1.1 คำนิยามของของเสียอันตราย

องค์การสหประชาชาติได้ให้ความหมายของของเสียอันตรายไว้ว่า อันตราย (Hazardous) หมายถึง อันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ของเสียอันตราย หมายถึง ของเสียทุกประเภททั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ อาจเป็นสารชนิดเดียว (Substance) หรือของผสมระหว่างสารหลายชนิด (Mixture) ซึ่งไม่มีคุณค่าที่จะใช้ทางเศรษฐกิจได้อีกต่อไปแล้ว ซึ่งถ้าถูกทิ้งจากแหล่งกำเนิดสู่สิ่งแวดล้อม โดยปราศจากการบำบัดที่เหมาะสม ก็จะมีศักยภาพที่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ พืช สัตว์ และสิ่งแวดล้อม อีกความหมายหนึ่งของของเสียอันตรายคือ ของเสียใดๆ ซึ่งมีพิษ (Toxic) เกิดปฏิกิริยาเคมี (Reactive) กัดกร่อน (Corrosive) ลูกไฟ (Flammable) เกิดกัมมันตรังสี (Radioactive) ติดเชื้อ (Infectious) สะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulative) ก่อมะเร็ง (Carcinogenic) ก่อให้เกิดความผิดปกติของทารกในครรภ์ (Teratogenic) และก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต (Mutagenic) [1]

สำหรับคำนิยามของประเทศไทยนั้น พระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 ระบุว่า ของเสียอันตราย หมายถึง ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต การใช้สารเคมีหรือสารอันตรายอื่นใด ในอุตสาหกรรม การเกษตร การสาธารณสุข หรือกิจกรรมอื่นใดที่ระบุไว้ในร่างของกฎหมายนี้ ของเสียอันตรายจะถูกกำหนดโดยความเห็นชอบของคณะกรรมการวัตถุอันตราย [1]

2.1.2 สมบัติของของเสียอันตราย

สมบัติของของเสียอันตราย สามารถแบ่งได้เป็น 7 ลักษณะ [1] ดังนี้

2.1.2.1 ของเสียที่ลุกติดไฟได้ ซึ่งจะมีลักษณะดังนี้

- เป็นของเหลวที่มีจุดไวไฟต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส แต่ไม่รวมถึงสารละลายในน้ำที่มีปริมาณของแอลกอฮอล์ผสมอยู่น้อยกว่าร้อยละ 24 โดยปริมาตร

- ไม่ใช่ของเหลว แต่สามารถลुकติดไฟได้ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน เมื่อมีการเสียดสี เมื่อมีการดูดความชื้น หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในสารนั้น และเมื่อเกิดลुकติดไฟ จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงและต่อเนื่องจนเกิดอันตรายได้

- เป็นก๊าซอัดที่จุกระเบิดได้

2.1.2.2 ของเสียดที่มีสมบัติในการกัดกร่อน ซึ่งจะมีลักษณะดังนี้

- ของเหลวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ มีค่า pH เท่ากับหรือต่ำกว่า 2 และค่า pH เท่ากับหรือสูงกว่า 12.5

- ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับเนื้อเยื่อทำให้เกิดอันตรายได้

- กัดกร่อนวัสดุที่ใช้บรรจุ หรือเป็นของเหลวที่สามารถกัดกร่อนเหล็กกล้า (SAE 1020) ในอัตราสูงกว่า 6.35 มิลลิเมตรต่อปี ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส

2.1.2.3 ของเสียดที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะมีลักษณะดังนี้

- สารที่มีสภาพไม่คงตัวสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงโดยไม่มีการระเบิด

- สารที่ทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำ

- สารซึ่งผสมกับน้ำทำให้เกิดก๊าซหรือไอในปริมาณที่เป็นพิษต่อมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม

- เป็นสารไซยาไนด์หรือซัลไฟด์ที่มีค่า pH ระหว่าง 2-12.5 จะทำให้เกิดสารพิษ

- เป็นสารที่ระเบิดเมื่อถูกทำให้ร้อนขึ้นในที่จำกัด

- เป็นสารที่ระเบิดได้ที่อุณหภูมิและความดันปกติ

- เป็นสารที่ไม่อนุญาตให้เกิดการระเบิดได้ ซึ่งกำหนดโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

2.1.2.4 ของเสียดที่มีความเป็นพิษ เป็นของเสียดที่เมื่อสกัดโดยวิธีที่ทางราชการกำหนด ยกเว้นหากของเสียดมีร้อยละของของแข็งอยู่น้อยกว่า 0.5 หลังจากกรองแล้ว

2.1.2.5 ของเสียดติดเชื้อ ซึ่งจะมีลักษณะดังนี้

- ของเสียดอันตรายที่สามารถทำให้ผู้รับติดเชื้อได้

- ของเสียดอันตรายที่มีเชื้อที่ก่อให้เกิดโรคได้และเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการติดเชื้อได้

2.1.2.6 ของเสียดกัมมันตภาพรังสี

- สารกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากการผลิต หรือใช้งานทางด้านนิวเคลียร์

- สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้กำหนดว่าเป็นของเสียดกัมมันตภาพรังสี

2.1.2.7 ของเสียที่มีสมบัติอื่นๆ หมายถึง สารที่อยู่ภายใต้สนธิสัญญาหรือข้อตกลงระหว่างประเทศได้กำหนดขึ้นมาแล้ว หรือจะกำหนดในอนาคต และมีผลผูกพันเป็นพันธกรณีกับประเทศไทย ระบุว่าเป็นของเสียอันตราย

2.1.3 ประเภทของของเสียอันตราย

ในการที่จะระบุแยกประเภทของของเสียอันตราย จำเป็นต้องทราบก่อนว่าของเสียนี้เป็นของเสียอันตรายหรือไม่ มีวิธีที่จะระบุว่าของเสียเป็นของเสียอันตรายอยู่ 2 วิธีหลัก คือ 1) วิธีพิจารณาสมบัติของของเสียของ RCRA โดยศึกษาว่าเป็นของเสียที่จัดอยู่ในรายการอย่างน้อยหนึ่งรายการหรือไม่ ซึ่งรายการของ RCRA ได้แก่ ติดไฟได้หรือไม่ กัดกร่อนได้หรือไม่ เกิดปฏิกิริยาได้หรือไม่ และเป็นพิษหรือไม่ และ 2) วิธีทดสอบในห้องปฏิบัติการ [2]

เมื่อทราบว่าเป็นของเสียอันตรายแล้วจากการศึกษาข้างต้น จากนั้นควรทราบว่าของเสียอันตรายเป็นประเภทอะไร ซึ่งจะมีอยู่หลายวิธีที่จะแบ่งประเภทของของเสียอันตราย ในที่นี้จะอธิบายการแบ่งแยกประเภทของของเสียอันตราย 3 วิธี [2]

2.1.3.1 การพิจารณาดูว่ามาจากแหล่งกำเนิดจากที่ใด โดยพิจารณาจากแหล่งจำเพาะ (Specific Sources) และแหล่งไม่จำเพาะ (Non-Specific Sources) คือ พิจารณาจากสมบัติของ RCRA ทั้งสี่ข้างต้น ถ้าของเสียอยู่ในข่ายหนึ่งในสี่ข้างต้นก็จัดได้ว่าเป็นของเสียอันตราย จากนั้นมาพิจารณาดูว่าเป็นของเสียจากที่ใด มาจากกลุ่มโรงงานจำเพาะ เช่น มาจากกลุ่มโรงงานเกี่ยวกับสารอินทรีย์ มาจากกลุ่มโรงงานเกี่ยวกับสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ มาจากกลุ่มโรงงานเกี่ยวกับโลหะและเหล็กกล้า มาจากกลุ่มโรงงานบำบัดน้ำเสียและโรงงานกำจัดขยะมูลฝอย มาจากกลุ่มมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ เป็นต้น ทั้งหมดนี้จัดเป็นแหล่งจำเพาะ ถ้าของเสียมาจากโรงงานผลิตสินค้าทั่วไป โดยมีของเสียอันตรายเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหลากหลายชนิด เช่น มีการชะล้างไขมันระหว่างผลิตสินค้าด้วยสารละลายกลุ่ม Halogen และมีการใช้สารไซยาไนด์ในการชุบด้วยโลหะไฟฟ้า จึงเกิดของเสียอันตรายหลากหลาย ซึ่งมาจากสารเคมีหลากหลายชนิด นอกเหนือจากแหล่งจำเพาะและแหล่งไม่จำเพาะ ยังมีพวกผลิตภัณฑ์เคมีที่ถูกทิ้งหรือถูกนำไปทิ้งเป็นถังวางอยู่บริเวณที่ทิ้งขยะมูลฝอยของเทศบาล ซึ่งโดยมากเป็นผลิตภัณฑ์เคมี อยู่ในรูปของของเหลวและอยู่ในรูปสารเคมีบริสุทธิ์

2.1.3.2 ระบุของเสียอันตราย โดยระบุเป็นระดับความรุนแรงของอันตราย (Degree of Hazard) วิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ได้บ่งชี้ถึงลักษณะของของเสียอันตรายอย่างชัดเจน ไม่ได้แสดงถึงความเข้มข้นของสารเสี่ยงภัยและลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของของเสียอันตราย ดังนั้น วิธีแยกประเภทของของเสีย

อันตรายแบบนี้ไม่สามารถบอกได้ว่าจะสามารถกำจัดสารอันตรายได้อย่างไร หรือจะนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือไม่

2.1.3.3 แแบ่งแยกประเภทของของเสียอันตรายออกเป็นลักษณะ ดังนี้ 1) ของแข็งหรือของเหลว 2) สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ 3) สารละลายหรือโลหะหนัก และ 4) ความสามารถในการบำบัด วิธีนี้เป็นวิธีที่แบ่งแยกออกอย่างชัดเจน เพื่อใช้ในการจัดการของเสียอันตรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการจัดกลุ่มประเภท และมีความชัดเจนที่สุด ปัจจุบันได้มีการใช้กันมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งแยกประเภทของของเสียอันตรายออกเป็นลักษณะ [2]

ประเภท	ลักษณะ	งานปฏิบัติ
1. น้ำเสียนินทรีย์	น้ำเสียที่มีน้ำและกรดหรือด่าง หรือโลหะหนักต่างๆ	1) ใช้กรดในงานอบสังกะสี 2) ใช้ด่างในงานชุบโลหะ 3) ใช้สารละลายในงานผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า 4) ใช้รีนน้ำในงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
2. น้ำเสียอินทรีย์	น้ำเสียที่มีสารอินทรีย์อันตรายปนเปื้อน เช่น มีสารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ปนเปื้อนในน้ำทิ้ง	1) ล้างถังบรรจุยาฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ 2) ล้างถังปฏิบัติการเคมีในโรงงานต่างๆ 3) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. ของเหลวอินทรีย์	ของเหลวที่มีสารอินทรีย์อันตราย	1) ใช้สารทำลายพวก Halogen ในงานทำความสะอาดผิวโลหะ 2) เศษเหลือจากการกลั่นเคมี
4. น้ำมัน	ของเหลวที่มีกลุ่มน้ำมันต่างๆ	1) ถ่ายน้ำมันเครื่องของรถยนต์ 2) ถ่ายน้ำมันเกียร์ของรถยนต์ 3) น้ำมันต่างๆ ที่ใช้กับเครื่องจักรของโรงงาน 4) น้ำมันหกทิ้งในสถานีจำหน่ายน้ำมัน
5. ของแข็งหรือสัจฉอนินทรีย์	ของแข็งหรือสัจฉที่มีสารอันตรายอินทรีย์	1) สัจฉจากโรงบำบัดน้ำเสียที่มีสารคลอรีนปะปนอยู่ 2) ฟุ่นที่ถูกรวบรวมได้ในโรงงานเหล็กกล้า 3) สัจฉจากกระบวนการผลิตสารเคมี 4) ฟุ่นจากงานชุบโครเมียม
6. ของแข็งหรือสัจฉอินทรีย์	ของแข็งหรือสัจฉที่มีสารอันตรายอินทรีย์	1) สัจฉจากงานผลิตสี 2) กากหลงเหลือจากการผลิตสีเชื่อม 3) สัจฉจากการผลิตยา 4) สารอันตรายอินทรีย์หกบนดิน

2.1.4 แหล่งที่มาของของเสียอันตราย

แหล่งกำเนิดของเสียอันตรายมี 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ 1) แหล่งชุมชนอันประกอบด้วย บ้านเรือน สถาบันการศึกษา โรงพยาบาล และแหล่งพาณิชยกรรม 2) โรงงานอุตสาหกรรม และ 3) แหล่งเกษตรกรรม แหล่งกำเนิดของเสียทั้ง 3 แหล่งสามารถก่อให้เกิดทั้งของเสียที่ไม่อันตราย (Non-Hazardous Waste) และของเสียอันตราย (Hazardous Waste) ทั้งนี้จะกล่าวเฉพาะที่เป็นของเสียอันตราย [3]

ตัวอย่างของเสียอันตรายจากชุมชน ได้แก่ ถ่านไฟฉายหมดอายุ กระป๋องสารปราบศัตรูพืช ยาหมดอายุ หลอดไฟหมดอายุหรือชำรุดแล้ว แบตเตอรี่หมดอายุ โทรทัศน์ วิทยุ น้ำมันเครื่องเก่า น้ำมันล้างอัดรูป นอกจากนั้นของเสียอันตรายจากชุมชนอีกประเภทหนึ่งที่ต้องมีการจัดการเฉพาะ ได้แก่ ของเสียจากโรงพยาบาล เนื่องจากเป็นของเสียที่เป็นแหล่งแพร่เชื้อโรคชนิดต่างๆ สุ่มนุษย์ได้อย่างมาก ตัวอย่างของเสียจากโรงพยาบาลได้แก่ เข็มและกระบอกฉีดยา สำลี พลาสเตอร์ สายยางให้อาหาร สายสวนปัสสาวะอุจจาระ สายน้ำเกลือ สายดูดเสมหะ ชิ้นเนื้อส่วนต่างๆ เสมหะ เลือด น้ำในช่องท้อง น้ำในไขสันหลัง เป็นต้น

ตัวอย่างของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ของสารปราบศัตรูพืช และสารเคมีต่างๆ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ตะกอนก้นถังกลั่นน้ำยาเคมีต่างๆ กากตะกอนที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ ของเสียอันตรายจากแหล่งเกษตรกรรม ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ของสารปราบศัตรูพืชต่างๆ

2.1.5 ปริมาณของของเสียอันตราย

ปริมาณของเสียอันตรายเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญต่อผู้จัดการและการวางแผนเกี่ยวกับการจัดการของของเสียอันตราย โดยที่ต้องไปเกี่ยวข้องกับอีกสามรูปคือ ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ดังนั้น วิธีการหาปริมาณของเสียจึงมีความแตกต่างกัน แต่ทั้งหมดต้องทราบปริมาณของเสียในรูปของค่ากิโลกรัมของสารปนเปื้อนต่อเวลา เช่น กิโลกรัมโทลูอินต่อวัน, กิโลกรัมคลอโรฟอร์มต่อวัน, กิโลกรัมเอ็นดรินต่อวัน และกิโลกรัมเมทิล ไอโซไซยาเนตต่อชั่วโมง เป็นต้น เนื่องจากของเสียมิได้ทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและจากชุมชนพักอาศัย ดังนั้น จึงควรพิจารณาปริมาณที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแหล่ง [2]

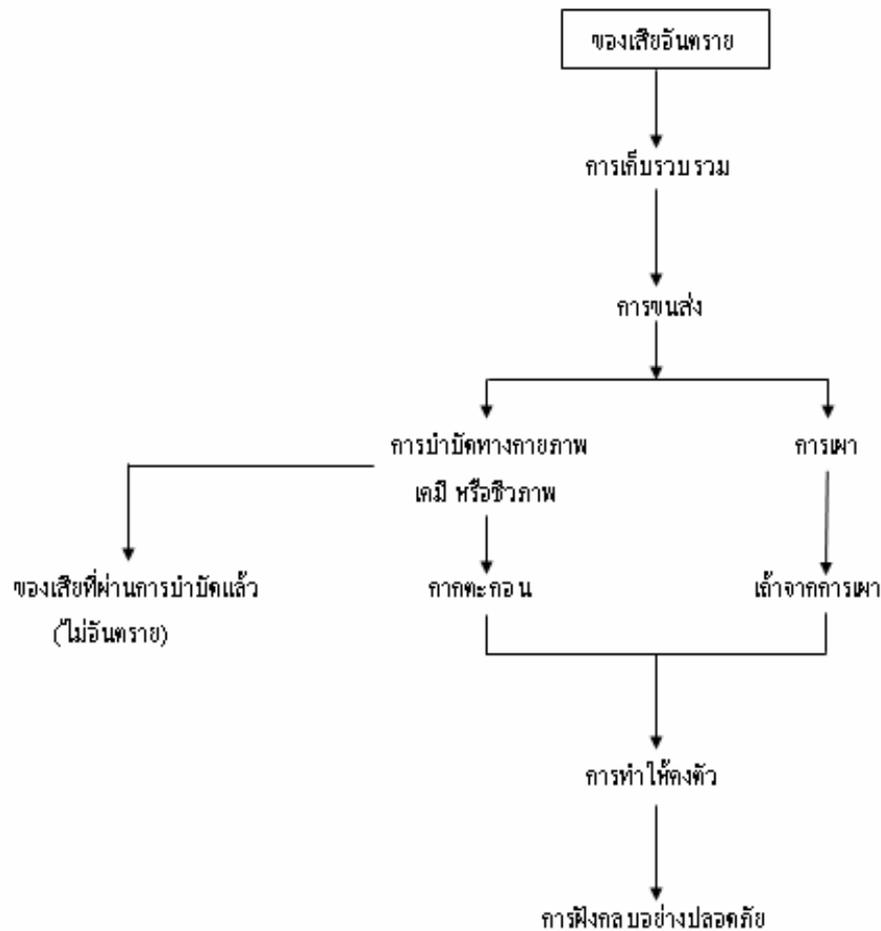
ปริมาณที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ โรงงานเคมี โรงงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า โรงงานปิโตรเลียม เหมืองถ่านหิน โรงงานผลิตโลหะ โรงงานปุ๋ยเคมี เป็นต้น โดยปริมาณที่เกิดขึ้นจะคิดคำนวณออกมา แต่ละประเทศจะมีปริมาณที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าประเทศใดมี

กิจกรรมอุตสาหกรรมหลักอะไร เช่น ที่สหรัฐอเมริกาที่มีของเสียอันตรายจากโรงงานผลิตภัณฑ์เคมีมาก ที่ประเทศญี่ปุ่นมีของเสียอันตรายจากโรงงานผลิตรถยนต์มาก ที่ประเทศไต้หวันมีของเสียอันตรายจากโรงงานผลิตเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

ปริมาณที่เกิดขึ้นจากชุมชนพักอาศัย จะมีปริมาณมากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับสภาพเศรษฐกิจของชุมชนนั้นๆ ถ้ามีเศรษฐกิจดีก็จะมีของเสียอันตรายมากขึ้นตามไปด้วย ของเสียอันตรายจากชุมชนพักอาศัย จะมีพวกกระป๋องฉีดยากันยุง น้ำมันเครื่อง กระป๋องฉีดสเปรย์ต่างๆ ถ่านไฟฉาย น้ำยาล้างห้องน้ำ ฯลฯ ถ้าพิจารณาจากปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นจากบ้านพักอาศัย เช่น จากบ้านเรือนในกรุงเทพฯ จะมีอัตราการเกิดขยะมูลฝอยเท่ากับ 0.8 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน ถ้ามี 5 คน พักอาศัยอยู่ในหนึ่งหลังคาเรือนจะมีปริมาณขยะเกิดขึ้น 4 กิโลกรัมต่อวัน ถ้าพบว่ามีของเสียอันตรายเกิดขึ้นประมาณ 20% ของขยะทั้งหมด ทำให้ของเสียอันตรายเกิดขึ้น 0.2x4 เท่ากับ 0.8 กิโลกรัมต่อวันต่อหลังคาเรือน และยังมีของเสียอันตรายในรูปของน้ำเสียคือ มีน้ำยาล้างห้องน้ำถูกปล่อยทิ้งไหลปนกับน้ำทิ้งในท่อน้ำทิ้งจากอาคาร

2.1.6 การจัดการของของเสียอันตราย

การจัดการของเสียอันตราย ต้องมีการจัดการที่เป็นขั้นตอนโดยเริ่มตั้งแต่การจัดการที่แหล่งกำเนิด คือ การเก็บรวบรวม (Collection and Storage) เพื่อรอการขนส่งต่อไป สำหรับการบำบัดนั้นอาจทำได้หลายวิธี ได้แก่ การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ทั้งนี้การเลือกวิธีการในการบำบัดนั้น ต้องขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของของเสียและการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมด้วย จากกระบวนการบำบัดเหล่านี้จะยังมีส่วนที่เหลือจากการบำบัดอยู่ ได้แก่ กากตะกอนจากการบำบัดทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ รวมถึงเถ้าจากการเผา ของเสียเหล่านี้ยังมีความเป็นอันตรายอยู่ จำเป็นต้องนำไปทำให้คงตัว (Immobilization/Stabilization) หรือทำให้เป็นก้อน (Solidification) แล้วจึงขนย้ายไปทำการฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure Landfill) ซึ่งขั้นตอนการจัดการของเสียอันตราย [1] มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แนวทางการจัดการของเสียอันตราย [1]

2.1.6.1 การเก็บรวบรวมที่แหล่งกำเนิด มีจุดประสงค์เพื่อให้มีปริมาณของเสียอันตรายมากพอที่จะนำไปบำบัดและกำจัดภายในโรงงาน (On-Site Treatment) หรือเพื่อรอการขนย้ายไปทำการบำบัดและกำจัดภายในโรงงาน และเพื่อป้องกันไม่ให้ของเสียอันตรายเกิดการรั่วไหลแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีวิธีการเก็บรวบรวมที่เหมาะสม มีการเลือกชนิดหรือประเภทและขนาดของภาชนะบรรจุให้เหมาะสม นอกจากนั้น สถานที่เก็บกักก็จะได้รับการดูแลตรวจสอบการรั่วไหลได้เป็นอย่างดีด้วย

2.1.6.2 พาหนะที่ใช้การขนส่งและระบบเอกสารกำกับกรขนส่งของเสียอันตราย พาหนะที่ใช้การขนส่งของเสียอันตรายไปทำการบำบัดหรือกำจัดภายนอกแหล่งกำเนิดอาจเป็นรถบรรทุก เรือ หรือรถไฟ ซึ่งสามารถบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์หรือแท่งบรรจุของเสียอันตรายได้ แต่ถ้าหากโรงงานได้มีการจัดเก็บของเสียอันตรายไว้ในตู้คอนเทนเนอร์อยู่แล้ว ก็สามารถจะยกตู้คอนเทนเนอร์วางไว้บน

พาหนะขนส่งได้เลย กรณีที่เป็นน้ำเสียปริมาณมากก็จะขนส่งน้ำโดยสูบลำเรือบรรทุกซึ่งมีลักษณะคล้ายรถขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง ระบบเอกสารกำกับการขนส่งของเสียอันตรายเป็นเอกสารที่แสดงการขนส่งของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดไปกำจัดอย่างถูกต้องตามกฎหมาย ระบบเอกสารนี้ทำให้ผู้ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ซึ่งได้แก่ แหล่งกำเนิด ผู้ขนส่ง ผู้รับกำจัด และหน่วยงานกำกับดูแล สามารถตรวจสอบได้อย่างเป็นระบบ และเป็นการป้องกันการลักลอบนำของเสียอันตรายไปทิ้งตามที่ต่างๆ

2.1.6.3 การบำบัดและการกำจัด สามารถทำได้ 5 วิธีใหญ่ๆ คือ (1) การบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี (2) การบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (3) การทำของเสียให้คงตัวหรือทำให้เป็นก้อน (4) การเผา และ (5) การฝังกลบอย่างปลอดภัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- การบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี

การบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีมีจุดประสงค์เพื่อให้ของเสียอันตรายลดความเป็นอันตรายลง เช่น ความเป็นพิษลดน้อยลง มีความสามารถในการละลายต่ำลง มีความคงตัวมากขึ้น กระบวนการทางกายภาพและเคมีที่สำคัญที่นำมาใช้ในการบำบัดของเสียอันตราย ได้แก่ การปรับ pH การรวมตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Chemical Oxidation) การทำปฏิกิริยารีดักชัน (Chemical Reduction) การดูดซับ (Adsorption) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การกำจัดคลอรีน (Dechlorination) การแยกของแข็งจากของเหลว (Solid/Liquid Separation) กระบวนการเยื่อกรอง (Membrane Process) การระเหย (Evaporation) การกลั่น (Distillation) และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

- การบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

ใช้ในการกำจัดของเสียที่ถูกละลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์และได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ซัลเฟต ไนเตรต ฯ ลฯ กระบวนการบำบัดทางชีวภาพที่นำมาใช้มีทั้งกระบวนการแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน วิธีนี้มีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจากของเสียอันตรายส่วนมากยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ตัวอย่างของเสียอันตรายที่สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ รวมทั้งกากตะกอนและคราบน้ำมันด้วย

- การเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง

การเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงมีจุดประสงค์หลักเพื่อการกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก หรือการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพแบบพื้นฐานได้ยาก การเผาเป็นการทำให้ของเสียอันตรายมีปริมาณลดลงอย่างมาก สามารถบำบัดของเสียทั้งที่เป็น

ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ของเสียอันตรายที่มักทำการบำบัดโดยการเผา มักเป็นของเสียที่ปะปนด้วยเชื้อโรค ของเสียที่บำบัดด้วยวิธีการพื้นฐานได้ยาก ของเสียที่มีจุดวาบไฟต่ำและไม่เกิดการระเบิดรุนแรง ตัวอย่างชนิดของของเสียที่ทำการบำบัดโดยการเผา ได้แก่ น้ำมันและไขมันที่ย่อยสลายยาก สารปราบศัตรูพืช ตัวทำละลายอินทรีย์ สารเคมีเสื่อมคุณภาพ พลาสติก ของเสียจากโรงงานปิโตรเคมี และโรงกลั่นน้ำมัน ของเสียที่ไม่ควรนำมาเผา ได้แก่ ของเสียที่ระเบิดได้ ของเสียที่ปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสี

- การทำให้คงตัวและทำให้เป็นก้อน

เป็นการบำบัดขั้นกลาง เพื่อเตรียมของเสียให้มีสภาพเหมาะสมที่จะนำไปกำจัด (Disposal) ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การฝังกลบอย่างปลอดภัย ตัวอย่างของเสียที่จะนำมาทำให้คงตัว ได้แก่ กากตะกอนที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เศษชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใต้อันที่เหลือจากการเผาในเตา ของเสียเหล่านี้ถึงแม้จะผ่านกระบวนการบำบัดต่างๆ จนมีความเป็นอันตรายลดลงแล้วก็ตาม แต่ก็ยังไม่ปลอดภัยเพียงพอในการที่จะนำไปทำการฝังกลบ ซึ่งจะต้องถูกกักเก็บเป็นเวลานานๆ ของเสียเหล่านี้อาจจะถูกฝนชะล้างซึมลงสู่ใต้ดินทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบได้ จุดประสงค์ของการทำให้คงตัวคือ เพื่อลดความเป็นพิษของสาร ลดอัตราการเคลื่อนตัวของสารอันตราย (Migration) ลดอัตราการละลาย (Solubility) การชะล้างสารอันตราย (Leaching) ออกสู่สิ่งแวดล้อม รวมทั้งเพิ่มความแข็งแกร่ง การรับแรงอัด และลดการซึมน้ำของของแข็งที่จะนำไปฝังกลบ นอกจากนี้ การทำให้คงตัวยังเป็นการลดพื้นที่ผิวที่ของเสียจะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม เป็นการลดโอกาสที่ของเสียจะกระจายสู่สิ่งแวดล้อม

หลักการทำให้คงตัวคือ การเติมสารที่สามารถเกาะยึดกับของเสีย ทำให้เกิดโครงสร้างที่ของเสียถูกจับยึดไว้ เป็นผลให้ของเสียนั้นมีการละลาย การถูกชะล้าง และการเคลื่อนตัวลดลง การทำให้คงตัวนี้ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับของเสียที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic Matters) ส่วนน้อยที่ใช้สำหรับสารอินทรีย์ (Organic Matters) เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารที่เติมลงไปเพื่อช่วยในการคงตัว (Binder) ทำให้ได้ของแข็งที่เปราะแตกง่าย นอกจากนี้ สารอินทรีย์บางชนิดยังทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวนานขึ้น

- การฝังกลบอย่างปลอดภัย

การกำจัดด้วยกระบวนการทางเคมี ชีวภาพ และการเผา เป็นการเปลี่ยนสภาพของเสียอันตรายให้มีความเป็นอันตรายน้อยลงหรือคงตัวมากขึ้น ต่อจากนั้นนำไปทำให้คงตัว แล้วจึงนำไปทำการฝังกลบอย่างปลอดภัย ซึ่งจัดเป็นการกำจัดขั้นสุดท้าย (Disposal) ของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะต้องอยู่ในหลุมฝังกลบ จึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง เริ่มต้นตั้งแต่การเลือกพื้นที่ที่จะทำหลุมฝังกลบ

การสร้างหลุมฝังกลบ การนำกากลงบรรจุ การปิดหลุมฝังกลบ และการตรวจสอบติดตามระหว่าง การฝังกลบและภายหลังการฝังกลบด้วย

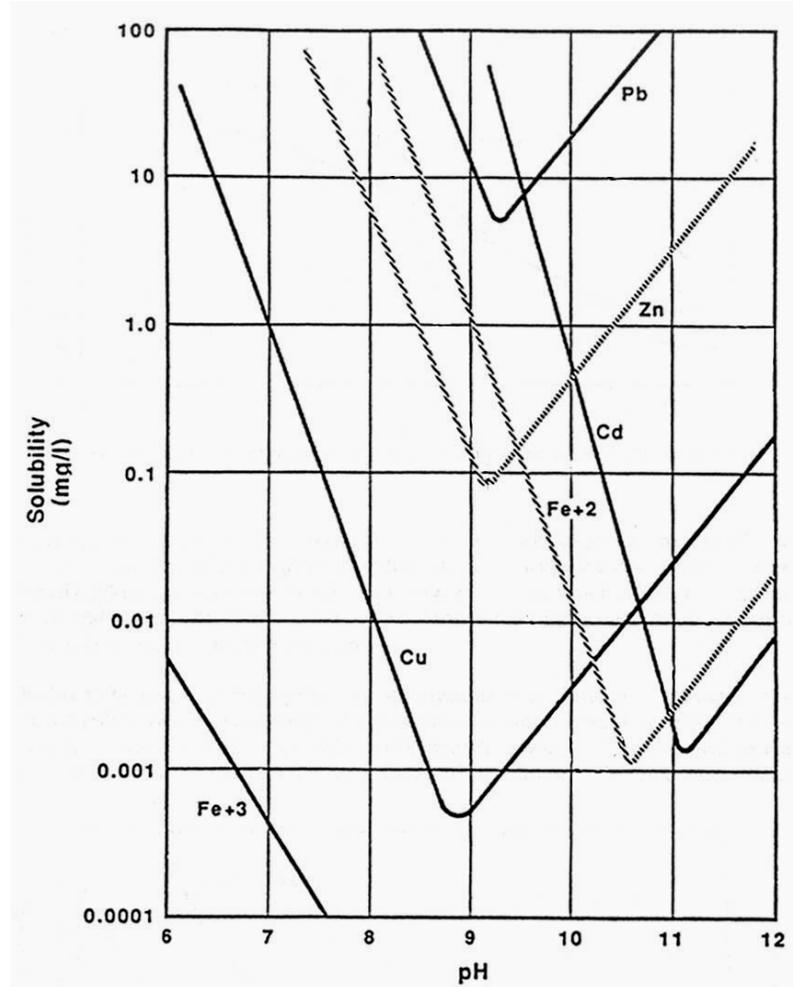
2.2 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง

การปรับเสถียรเป็นกระบวนการที่ใส่วัสดุหรือสารเพิ่มเติมที่ใช้ลดขนาดอันตรายลงของของเสีย ทำให้ลดอัตราการเคลื่อนที่ออกของสารปนเปื้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม และช่วยลดระดับความเป็นพิษด้วย เปรียบเสมือนเป็นกระบวนการบำบัดของเสีย เช่น น้ำเสียผสมกับสัจจควรทำการปรับเสถียรให้เรียบร้อยก่อนนำไปทิ้งลงบนพื้นที่ฝังกลบ สารปรับเสถียรที่ใช้ไม่ใช่สารดูดซึม เพราะจะหลุดออกได้ง่ายในบริเวณหลุมฝังกลบ และอาจมีแรงกระทำต่อพื้นที่ฝังกลบ ดังนั้น สารปรับเสถียรควรเป็นสารที่ยึดเกาะติดทางกายภาพและทางเคมีได้มั่นคงแข็งแรง แม้จะมีแรงกระทำ มีความเค้น หรือมีน้ำฝนชะอยู่ตลอดเวลา [2]

การทำก้อนแข็งเป็นกระบวนการที่ใส่สารที่ก่อให้เกิดวัสดุแข็งตัว โดยทำการใส่วัสดุก่อให้เกิดแข็งตัวผสมกับของเสียอันตราย ทำให้ได้ของแข็งที่มีความแข็งแรง รับแรงกดได้มากขึ้น และสามารถช่วยลดความสามารถของน้ำซึมผ่านได้ วัสดุที่ช่วยก่อให้เกิดแข็งตัว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เป็นต้น ส่งผลให้ของเสียอันตรายมีเสถียรภาพดีขึ้น [2]

2.3 การตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารให้เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ โดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนองค์ประกอบของตัวทำละลาย ซึ่งของแข็งที่เกิดขึ้นสามารถแยกออกจากสารละลายน้ำได้โดยการตกตะกอน หรือการกรอง สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนโลหะมีหลายชนิด เช่น การตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ โดยใช้ปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ การตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นเมื่อค่า pH ของสารละลายที่มีโลหะละลายอยู่ในระดับที่เหมาะสมของโลหะชนิดนั้น ค่า pH ที่เหมาะสมของโลหะแต่ละชนิดจะมีค่าต่างกัน [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์กับค่า pH [4]

2.4 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นคำที่มาจากภาษาละติน หมายถึง สารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็ง หรือมวลรวม เช่น หินหรือกรวด และทราย ให้แข็งติดเป็นชิ้นเดียวกัน นิยมใช้ในงานก่อสร้างเป็นหลัก โดยมีการนำปูนซีเมนต์ไปใช้งาน ทั้งในรูปของซีเมนต์เพสต์, มอร์ตาร์ และคอนกรีต โดยซีเมนต์เพสต์คือ ส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ และอาจมีสารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีตด้วย มอร์ตาร์คือ ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับทราย และคอนกรีตคือ ส่วนผสมของมอร์ตาร์กับหินหรือกรวด [5]

2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

เมื่อวัตถุดิบได้รับการเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอน [5] ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซ CO_2 จะถูกขับออกจากหินปูนหรือดินสอพอง เหลือเพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3 เกิดจากการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียม (จากหินปูนหรือดินสอพอง)

กับซิลิกา อลูมินา และเหล็ก (จากดินดำหรือดินเหนียว, หรือดินดาน)

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยกระบวนการตกผลึก เมื่อมีการทำให้เย็นลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้ จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ [5] คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 และซัลเฟอร์ ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5]

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO_2	17 – 25
Al_2O_3	3 – 8
Fe_2O_3	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5 – 1.3
TiO_2	0.1 – 0.4
P_2O_5	0.1 – 0.2
SO_3	1 - 3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิด [5] ดังแสดงในตารางที่ 2.3

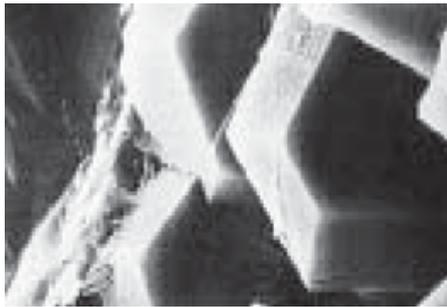
ตารางที่ 2.3 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5]

ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3CaOSiO_2	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	2CaOSiO_2	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

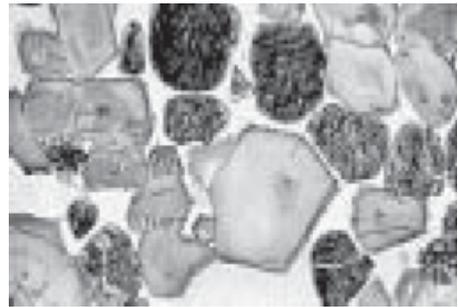
2.4.2 สมบัติของสารประกอบหลัก

สมบัติของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด [5] มีผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนี้

2.4.2.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S หรือ Alite) C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีอ่อนกว่า C_2S ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สมบัติของ C_3S จะเหมือนกับสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวภายใน 2–3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปแล้ว กำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์ของ C_3S เพิ่มขึ้น โดยปริมาณยิปซัมจะมีผลต่อกำลังอัดของ C_3S ด้วย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3S อยู่ประมาณ 50-70 % ดังแสดงในตารางที่ 2.4



ก)



ข)

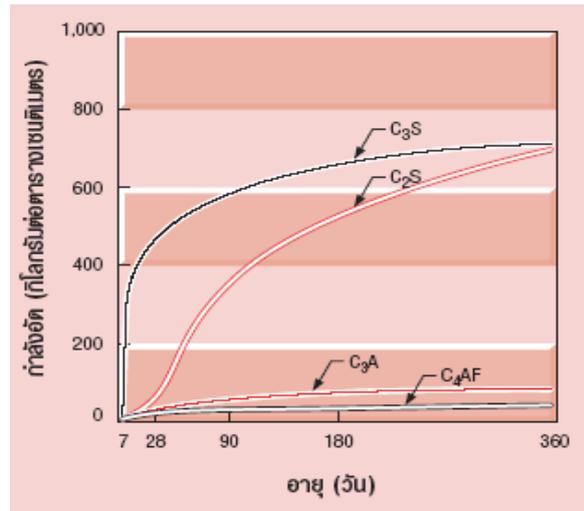
รูปที่ 2.3 รูปร่างของ C_3S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมสีดำ [5]

ก) ผลึก C_3S (Alite) ในปูนเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (ขยาย 3,000 เท่า)

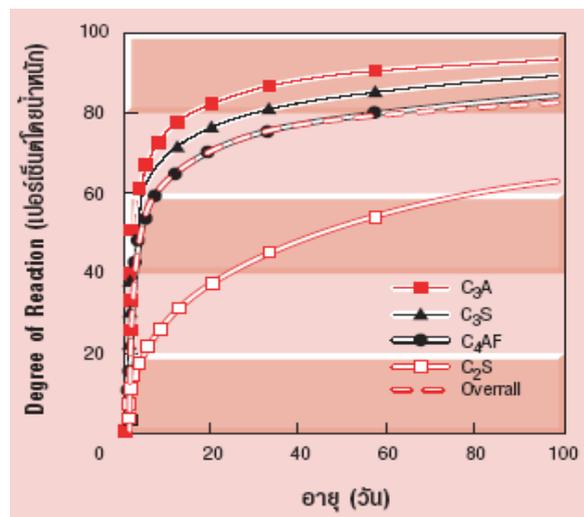
ข) ส่วนประกอบของปูนเม็ด ประกอบด้วย C_3S (Alite) ซึ่งมีสีอ่อนกว่า และรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ส่วนผลึกที่มีลักษณะกลมและมีสีทึบ คือ C_2S (Belite) (ขยาย 4,000 เท่า)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักของปูนเม็ด [5]

สารประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละของปูนเม็ด)
C_3S (Alite)	50 – 70
C_2S (Belite)	15 – 30
C_3A	5 – 10
C_4AF (Celite)	5 – 15



ก)



ข)

รูปที่ 2.4 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5]

ก) กำลังอัดของสารประกอบหลัก

ข) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.4.2.2 ไคซิลเซียมซิลิเกต (C_2S หรือ Belie) C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูป แต่มีเพียง βC_2S เท่านั้น ที่มีความเสถียร ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำ จะแข็งตัว เกิดความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ ในช่วงแรก และกำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีอายุมากกว่า 7 วัน แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_2S อยู่ประมาณ 15-30 %

2.4.2.3 ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงไปในช่วงขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ C_3A และจะพัฒนากำลังอัดในช่วง 1-2 วัน แต่มีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ประมาณ 5-10 % นอกจากนี้ยังพบว่า ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำกว่าจะสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดีกว่า

2.4.2.4 เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF หรือ Celite) C_4AF เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนซีเมนต์ และจะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา C_4AF มีสมบัติทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม ค่ากำลังอัดของ C_4AF มีค่าต่ำและไม่แน่นอน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ประมาณ 5-15%

ตารางที่ 2.5 สรุปสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5]

สมบัติ	C_3S (Alite)	C_2S (Belite)	C_3A	C_4AF (Celite)
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Rate of Hydration)	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด (Strength Development)	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย (Ultimate Strength)	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)	ปานกลาง (500 จูลต่อกรัม)	น้อย (250 จูลต่อกรัม)	สูงมาก (850 จูลต่อกรัม)	ปานกลาง (420 จูลต่อกรัม)
5. สมบัติอื่นๆ	สมบัติเหมือนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่เสถียรในน้ำ ถูกซัลเฟตทำลายง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

2.4.3 สมบัติของสารประกอบรอง

สมบัติของสารประกอบรองทั้ง 4 ชนิด [5] มีดังนี้

2.4.3.1 ยิปซัม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate หรือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

ยิปซัมเป็นหนึ่งในสามรูปแบบของสารประกอบอัลไซมิลเฟต ได้แก่

- ยิปซัม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate หรือ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Anhydrite (หรือ Anhydrous Calcium Sulphate หรือ CaSO_4)
- Plaster หรือ Hemihydrate (หรือ Plaster of Paris หรือ Bassanite หรือ Calcium Sulphate Hemihydrate หรือ $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)

โดยจะมีการเติมยิปซัมในระหว่างการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A เป็น Ettringite (Calcium Trisulphoaluminate) เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A หรือเป็นการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ถ้าไม่ได้เติมยิปซัม ปูนซีเมนต์จะเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสม เพื่อให้ปูนซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงสุด และเกิดการหดน้อยที่สุด โดยปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- ปริมาณอัลคาไลออกไซด์ ได้แก่ Na_2O และ K_2O
- ปริมาณ C_3A
- ความละเอียด (Fineness) ของปูนซีเมนต์

นอกจากนี้จะต้องมีการควบคุมปริมาณยิปซัมที่ใส่ไม่ให้มากเกินไป เพราะอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าว เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเกิด Ettringite มากเกินไป

2.4.3.2 Free Lime (CaO)

Free Lime สามารถเกิดได้ 2 กรณี ได้แก่

- เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป แต่ทำปฏิกิริยากับ SiO_2 , Al_2O_3 , และ Fe_2O_3 ได้หมด
- เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป แต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆ ไม่สมบูรณ์ Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดการขยายปริมาตรที่อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ความไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime (Unsoundness Due to Lime)”

นอกจากปริมาณ CaO ที่มีผลต่อความไม่อยู่ตัวแล้ว ขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของปูนซีเมนต์ก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลเช่นกัน

2.4.3.3 แมกนีเซียมออกไซด์ หรือแมกนีเซียม (Magnesium Oxide หรือ Magnesia หรือ MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์โดยปกติจะมี $MgCO_3$ เมื่อเผาจะเกิดการแยกตัวเป็น MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเหลวเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปในผลึก Periclase (MgO) ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ CaO คือ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness) และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์
- ขนาดของ MgO

ความไม่อยู่ตัวของ MgO จะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก เพราะถ้าผลึกมีขนาดเล็ก ปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว

ที่อุณหภูมิปกติ MgO จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ช้ามากโดยใช้เวลานานเป็นปีๆ ดังนั้น การทดสอบการขยายตัวในช่วงเวลาสั้นๆ จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้จึงได้นำวิธีการของ Autoclave มาใช้ในการทดสอบการขยายตัว อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดค่าการขยายตัวรวมอันเกิดจาก CaO และ MgO ได้อีกด้วย

2.4.3.4 อัลคาไลออกไซด์ (Alkali Oxides หรือ Na_2O , K_2O)

อัลคาไลออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลหรือด่างในปูนซีเมนต์มาผสมเป็นคอนกรีต จะทำให้เกิด “ปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวม (Alkali – Aggregate Reaction หรือ AAR)” ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ขาดต่อการแก้ไข ในกรณีที่ต้องจำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยาอัลคาไล ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ กล่าวคือ ปริมาณอัลคาไลในปูนซีเมนต์ หรือ Total Alkalis จะต้องไม่เกิน 0.6 % โดยสามารถคำนวณหาค่า Total Alkalis ได้จากสูตร

$$\text{Total Alkalis} = N_2O + 0.658 (K_2O)$$

2.4.4 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทของปูนซีเมนต์ตามลักษณะการใช้งาน แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม หลักๆ [5] ได้แก่

- ปูนซีเมนต์สำหรับงาน โครงสร้างและงานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีต เช่น ปูนตราช้าง, ปูนตราช้างรับกำลังอัดเร็ว, ปูนตราช้างทนซัลเฟตสูง, ปูนตราช้างทนน้ำเค็ม ดินเค็ม, และปูนตราช้างงานหล่อ เป็นต้น
- ปูนซีเมนต์สำหรับงานก่อ งานฉาบ เช่น ปูนตราเสือ, ปูนตราแรด, และปูนตราเสือพลัส เป็นต้น
- ปูนซีเมนต์สำหรับงานพิเศษ เช่น ปูนตราช้างขูดเจาะน้ำมัน, ปูนซีเมนต์ขาวตราช้างเผือก, และปูนซีเมนต์ขาวตราเสือ เป็นต้น

2.5 ปูนขาว

ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่เก่าแก่ที่สุดที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยนำมาเป็นวัสดุยึดประสานในการก่อสร้างอาคารหรือถนนมาตั้งแต่สมัยกรีก โรมัน และอียิปต์โบราณ โดยทั่วไปนิยามของปูนขาว คือ สารที่มีองค์ประกอบของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียมและแมกนีเซียม เป็นผลผลิตที่ได้มาจากการเผาหินปูน มีชื่อทางเคมีว่า แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สามารถขูดพบหินที่ใช้ผลิตปูนขาวได้ทั้งในสภาพที่บริสุทธิ์และไม่บริสุทธิ์ ปูนขาวสามารถแบ่งตามลักษณะทางเคมีได้เป็น 2 ประเภท คือ Quick Lime และ Hydrated Lime [6]

2.5.1 Quick Lime

Quick Lime คือ ปูนขาวที่มี Calcium Oxide (CaO) เป็นส่วนประกอบหลัก และมี Magnesium Oxide (MgO) เป็นส่วนประกอบรอง Quick Lime สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท

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

กรรมวิธีในการผลิต คือ การเผา Limestone โดยใช้อุณหภูมิสูงเพื่อขับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ที่มีอยู่ใน Limestone ให้เหลือแต่ CaO

ส่วนกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต Dolomitic Quicklime คือ การเผา Dolomitic Quicklime ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ MgO และ CO₂ แต่อาจจะต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1100 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการแตกตัวของ CO₂ ที่สมบูรณ์

Quick Lime เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ผลของปฏิกิริยาจะทำให้ Quick Lime แตกตัวออกเป็น Hydrated Lime และมีความร้อนเกิดขึ้น

2.5.2 Hydrated Lime

เมื่อ Quick Lime รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrations กลายเป็น Hydrated Lime จำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

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

ปูนขาวประเภท Hydrate Lime จะนิยมใช้กันมากกว่าประเภท Quick Lime ทั้งนี้เป็นเพราะ Hydrate Lime เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะคายความร้อนออกมาน้อยกว่า มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนเครื่องจักร และเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้อยกว่า Quick Lime

2.6 วัสดุปอสโซลาน

วัสดุปอสโซลานคือ วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินา มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่อุณหภูมิปกติ ร่วมกับความชื้น ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานใหม่ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน นั่นคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate) เพิ่มขึ้น เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาปอสโซลาน (Pozzolanic Reaction)” [5]

การใช้วัสดุปอสโซลาน อาจใช้อยู่ในรูปของสารผสมเพิ่มในคอนกรีต เช่น คอนกรีตปอสโซลาน (Pozzolanic Concrete) เป็นต้น หรืออาจใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมสารปอสโซลานก็ได้ เช่น ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอสโซลาน (Portland-Pozzolanic Concrete) เป็นต้น

การใช้สารปอสโซลานโดยทั่วไป จะช่วยเพิ่มความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตสดที่มีปริมาณปูนซีเมนต์อยู่น้อย มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรก แต่กำลังจะสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นและจะสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอายุมากกว่า 28 วัน และยังช่วยทำให้คอนกรีตมีความคงทนต่อสารเคมีสูงขึ้น เพราะปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลง นอกจากนี้สารปอสโซลานยังช่วยลดปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้สามารถใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมสารผสมเพิ่มชนิดนี้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4 สำหรับงานคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete)

สมบัติของคอนกรีตผสมสารปอสโซลานจะขึ้นอยู่กับประเภทและปริมาณสารปอสโซลานในส่วนผสมคอนกรีต การบ่ม และอุณหภูมิ การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตอาจจำเป็นต้องมีการทดลองผสม ต้องควบคุมการบ่มให้ได้ดีและนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 3 วันแรก และควรมีการทดสอบคุณภาพคอนกรีตก่อนใช้งานจริงด้วย

ปริมาณการใช้ข้อมขึ้นอยู่กับประเภทและลักษณะงาน โครงสร้าง และชนิด รวมทั้งสมบัติของสารปอสโซลาน โดยอาจใช้ได้ปริมาณมากถึง 15–40 % โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ หรืออาจมากกว่านี้

สารปอสโซลาน [5] เช่น เถ้าลอย, ซิลิกาฟูม, วัสดุปอสโซลานธรรมชาติ และ Metakaolin เป็นต้น

- เถ้าลอย (Coal Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash หรือ PFA) เป็นเถ้าอินทรีย์ที่เหลือมาจากการเผาถ่านหิน วัสดุนี้เป็นที่นิยมมาก เพราะมีลักษณะเป็นผงละเอียดอยู่แล้ว เถ้าลอยที่มีสมบัติที่ดี จะสามารถใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต เช่น เพิ่มความสามารถในการเทได้, ลดปริมาณน้ำ, ลดปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน, เพิ่มกำลังในระยะยาว, ลดการหดตัว, เพิ่มความทึบน้ำ และเพิ่มความคงทนต่อสารเคมี เป็นต้น แต่เนื่องจากสมบัติของเถ้าลอยจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดและแหล่งของถ่านหินและกระบวนการเผาไหม้ ดังนั้น เถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีตจึงควรมีสมบัติสอดคล้องกับข้อกำหนด

- ซิลิกาฟูม (Silica Fume หรือ Microsilica) คือ สารปอสโซลานประเภทหนึ่งที่ได้จากกระบวนการผลิต Silicon Alloy เนื่องจากซิลิกาฟูมมีลักษณะเป็นผงที่มีความละเอียดสูงมากกว่าปูนซีเมนต์มาก ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการในคอนกรีตเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรใช้ร่วมกับสารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) โดยสามารถใช้ผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต เช่น เพิ่มกำลังในคอนกรีตกำลังสูง, ลดการเอี่ยม, ลดการแยกตัว, เพิ่มความทึบน้ำ และเพิ่มความคงทนต่อสารเคมี เป็นต้น

- วัสดุปอสโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) คือ วัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่สามารถทำปฏิกิริยาปอสโซลานได้ เช่น แก้วภูเขาไฟและหิน Tuff, Pumicite, Opaline, Chert, ดินเหนียว และหิน Shale เป็นต้น โดยปกติต้องนำมาบดให้ละเอียดและเผา

- Metakaolin เป็นสารปอสโซลานประเภทหนึ่งที่ได้จากดิน Kaolin ซึ่งผ่านกระบวนการ Calcined และเผาที่อุณหภูมิสูง มีลักษณะเป็นผงที่มีความละเอียดสูงมากกว่าปูนซีเมนต์มาก และกระจายตัวในน้ำได้ดีกว่าซิลิกาฟุ่ม สามารถใช้ผสมในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต เช่น เพิ่มกำลังในคอนกรีตกำลังสูง, ช่วยทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากขึ้น, เพิ่มความทึบน้ำ และเพิ่มความคงทนต่อสารเคมี เป็นต้น

จากงานวิจัยนี้ ได้มีการนำแกลบมาทำการควบคุมสภาวะในการเผาที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้เป็นเถ้าแกลบสังเคราะห์ เถ้าแกลบที่นำมาใช้นี้ จัดเป็นวัสดุปอสโซลานชนิดหนึ่ง สามารถใช้เป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนขาว ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของก้อนหล่อแข็งของเสียด

ประเทศไทยได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตันของข้าวเปลือก เมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กิโลกรัม และเมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบ หรือประมาณ 40 กิโลกรัม การเผาแกลบที่อุณหภูมิในช่วง 600-800 องศาเซลเซียส จะทำให้ SiO_2 อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาปอสโซลาน ถ้าเผาแกลบที่อุณหภูมิต่ำเกินไป จะทำให้มีสารอินทรีย์เหลืออยู่และไม่เหมาะสมกับการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไป ซิลิกาที่ได้จะเป็นผลึก ซึ่งจะเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาปอสโซลาน และไม่เหมาะสมต่อการนำไปผสมทำคอนกรีตเช่นกัน การเผาแกลบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 600-800 องศาเซลเซียส สามารถทำได้โดยการเผาแกลบกองเล็กๆ โดยใช้แกลบหนักประมาณ 20 กิโลกรัม แกลบที่ได้จะมีสีเทาขาว [7]

นอกจากนี้ ยังนิยมใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในโรงสี ซึ่งเถ้าแกลบที่ได้จากโรงสีมีสีดำ และอุณหภูมิของการเผาแกลบจะสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากเวลาในการเผาค่อนข้างสั้น คือต่ำกว่า 10 นาที ทำให้เถ้าแกลบดำที่ได้ยังอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ และสามารถใช้ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้เช่นกัน แต่การบดละเอียดต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อนำไปบดให้ละเอียดจะทำปฏิกิริยาปอสโซลานได้ดี การบดเถ้าแกลบให้ละเอียดเป็นการเพิ่มความไวในการทำปฏิกิริยาปอสโซลาน เถ้าแกลบเทาหรือเทาขาวบดละเอียดได้ง่ายกว่าเถ้าแกลบดำ ความละเอียดของเถ้าแกลบที่บดละเอียดแล้วมีค่าประมาณ 8,000-15,000 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม เมื่อวัดโดยวิธีของเบลน ซึ่งค่อนข้างสูง เนื่องจากเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวมากเพราะ โครงสร้างมีรูพรุนสูง ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบบดละเอียด

จะมีความหลากหลาย คือ มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 100 ไมโครเมตร โดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการบดเข้าเกลบ [7] องค์ประกอบทางเคมีของเข้าเกลบแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเข้าเกลบที่พบในประเทศไทย [7]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	90
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	0.5
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	2.0
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.5
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.2
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	1.5
ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	4.7

2.7 โลหะหนัก

โลหะ (Metal) เป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่มีประจุไฟฟ้าบวก เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งส่วนใหญ่จะพบอยู่ในดินและหิน มีสมบัติเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอท ที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) ทึบแสงสามารถนำไฟฟ้าได้ ผิวหน้ามีลักษณะเป็นเงาและมันวาว เหนียว ดัดงอได้ มีจุดแข็งตัวและจุดหลอมละลายที่แน่นอน โลหะแต่ละชนิดจะมีสมบัติเฉพาะแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะ โดยถ้าจำแนกตามวัสดุ ประเภทของโลหะจะแบ่งเป็น โลหะที่เป็นเหล็ก ซึ่งมีเนื้อเหล็กเป็นส่วนใหญ่ และโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก ซึ่งไม่มีธาตุเหล็กผสมอยู่ ถ้าจำแนกตามความหนาแน่น โลหะจะแบ่งเป็น โลหะหนักซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า 4 กรัมต่อมิลลิเมตร โลหะเบาซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่า 4 กรัมต่อมิลลิเมตร และถ้าจำแนกตามสมบัติทางกายภาพและ โครงสร้างของอิเล็กตรอน จะแบ่งเป็น กลุ่มโลหะที่อยู่ในเขตเอส-ออร์บิทัล กลุ่มโลหะที่อยู่ในเขตดี-ออร์บิทัล และกลุ่มโลหะที่อยู่ในเขตเอฟ-ออร์บิทัล [8]

โลหะแต่ละชนิดจะมีแหล่งกำเนิดและปริมาณมากน้อยที่แตกต่างกันออกไป โลหะส่วนใหญ่กำเนิดมาจากแร่โลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบ และมีส่วนน้อยที่เกิดในรูปของโลหะบริสุทธิ์ โลหะเหล่านี้ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมเกี่ยวกับเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ประมาณ อุปกรณ์การก่อสร้าง เครื่องมือและอุปกรณ์การติดต่อสื่อสาร และเครื่องมือใช้สอยอื่นๆ [8]

จากงานวิจัยได้มีการใช้กากตะกอนโลหะหนัก 2 ชนิด คือ

- กากตะกอนที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนในการทำงาน 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การทำความสะอาดก่อนชุบ โดยขั้นตอนนี้เป็นการนำชิ้นงานจากลูกค้า มาทำการล้างคราบไขมัน และชิ้นงานให้สะอาด

2. การชุบสังกะสี เป็นการนำชิ้นงานที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว มาทำการชุบสังกะสีในบ่อชุบ หลังจากนั้นก็ล้างทำความสะอาดชิ้นงาน

3. การเคลือบสี เป็นการนำชิ้นงานที่ชุบสังกะสีแล้ว มาทำการเคลือบสี ล้างน้ำ เป่าลมหรืออบแห้งชิ้นงาน

- สังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ได้จากการตกตะกอนสังกะสีในเตรทด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการกรองและอบแห้งได้ออกมาเป็นสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

จากกากตะกอนโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด ประกอบไปด้วยธาตุ 5 ชนิด ดังต่อไปนี้

- สังกะสี มีเลขอะตอมเท่ากับ 30, น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 65.37, จุดหลอมเหลวเท่ากับ 419.5 องศาเซลเซียส, จุดเดือดเท่ากับ 907 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นเท่ากับ 7.133 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยสังกะสีสามารถใช้ประโยชน์ได้ในรูปของโลหะเจือ เช่น กับทองแดงและอะลูมิเนียม ในการผลิตแผ่นโลหะเจือ, ใช้ในการเคลือบผิวเหล็กกล้าเพื่อป้องกันการขึ้นสนิมของเหล็กกล้า หรือใช้เป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ ไฟล์ไฟฟ้า อะโนดของเซลล์ไฟฟ้า ถ่านไฟฉาย เป็นต้น สังกะสีในรูปธาตุไม่ปรากฏความเป็นพิษ โดยความเป็นจริงแล้ว สังกะสีเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของคนและสัตว์ แต่สารประกอบของสังกะสีหลายชนิดอาจเป็นพิษ แต่อาจเป็นพิษค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถถูกขจัดออกจากร่างกายได้อย่างรวดเร็ว สังกะสีในรูปผงอาจติดไฟและเกิดการระเบิดได้ [8, 9]

- เหล็ก มีเลขอะตอมเท่ากับ 26, น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 55.847, จุดหลอมเหลวเท่ากับ 1,536.5 ± 1 องศาเซลเซียส, จุดเดือดเท่ากับ 3,000 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นเท่ากับ 7.8733 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เหล็กเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีประโยชน์มากที่สุดในโลกปัจจุบัน เหล็กเกือบทั้งหมดที่ผลิตได้จะใช้ประโยชน์ในรูปของโลหะและโลหะเจือ โดยใช้เป็นโครงสร้างในการก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องจักร เป็นต้น เหล็กไม่ปรากฏความเป็นพิษต่อร่างกาย และยังเป็นธาตุที่ร่างกายเราต้องการในปริมาณเล็กน้อย เป็นโลหะที่จำเป็นสำหรับระบบการย่อยอาหาร เม็ดเลือดแดงของคนและสัตว์ มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ โดยทำหน้าที่นำออกซิเจนไปสู่เซลล์ต่างๆ ของร่างกาย [8, 9]

- โครเมียม มีเลขอะตอมเท่ากับ 24, น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 51.996, จุดหลอมเหลวเท่ากับ 1,875 องศาเซลเซียส, จุดเดือดเท่ากับ 2,199 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นเท่ากับ 7.19 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ประโยชน์ของโครเมียมคือ ใช้ทำโลหะเจือโดยผสมกับโลหะอื่นๆ เช่น ผสมกับเหล็กและนิกเกิลเพื่อทำเหล็กปลอดสนิม หรืออาจจะนำโครเมียมมาเคลือบโลหะหรือพลาสติกต่างๆ เช่น เหล็กและเหล็กกล้า เพื่อป้องกันการผุกร่อนของโลหะ โครเมียมและสารประกอบโครเมียมที่มีเลขออกซิเดชัน +3 ไม่ปรากฏความเป็นพิษต่อร่างกาย แต่สารประกอบของโครเมียมที่มีเลขออกซิเดชัน +6 จะทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง เป็นพิษต่อร่างกาย การหายใจเอาฝุ่นของโครเมตหรือไอกรดโครมิกเข้าไป จะเป็นอันตรายต่อระบบการหายใจ [8, 9]

- ตะกั่ว มีเลขอะตอมเท่ากับ 82, น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 207.19, จุดหลอมเหลวเท่ากับ 327 องศาเซลเซียส, จุดเดือดเท่ากับ 1,737 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นเท่ากับ 11.34 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ตะกั่วใช้ประโยชน์มากที่สุดในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และใช้ในรูปของเตตระเอทิลเลดซึ่ง ใช้เติมใส่น้ำมันเพื่อเพิ่มเลขออกเทนของน้ำมัน การใช้งานอื่นๆ ได้แก่ ใช้ในงานบัดกรี ทำโลหะเจือ ใช้ในการทำท่อในอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น ตะกั่วเป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการ คือ ไม่มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบเผาผลาญอาหาร ยิ่งไปกว่านั้น ตะกั่วยังเป็นพิษต่อร่างกายอย่างแรง ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณสูง โดยปกติร่างกายคนเราสามารถทนต่อตะกั่วในปริมาณสูงพอสมควร แต่ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในปริมาณมากและทันทีทันใด จะเกิดอาการเป็นพิษอย่างฉับพลัน เช่น เกิดอาการปวดท้องอย่างแรง อุจจาระมีสีดำ เกิดอาการช็อก ตื่นเต้นง่าย ความจำเสื่อม และทำอันตรายต่อไต [8, 9]

- ทองแดง มีเลขอะตอมเท่ากับ 29, น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 63.54, จุดหลอมเหลวเท่ากับ 1,083 องศาเซลเซียส, จุดเดือดเท่ากับ 2,582 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นเท่ากับ 8.94 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทองแดงเป็นโลหะที่มีประโยชน์มากที่สุดและใช้มากที่สุด โลหะหนึ่ง รองจากเหล็ก โดยสามารถนำมาใช้ทำเส้นลวดไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าและเครื่องมือไฟฟ้าต่างๆ ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ใช้ในการผลิตหม้อต้มน้ำ กาน้ำ ถังน้ำ ท่อน้ำ และใช้ในการเคลือบผิวของโลหะ เป็นต้น ทองแดงเป็นโลหะที่ร่างกายเราต้องการในปริมาณเล็กน้อย เช่น จำเป็นสำหรับกระบวนการเผาผลาญอาหาร โลหิตของเราก็มีทองแดงอยู่ด้วย การสร้างฮีโมโกลบินต้องอาศัยทองแดง นอกจากนี้การสังเคราะห์เอ็นไซม์หลายชนิดต้องอาศัยทองแดงด้วย จะเห็นได้ว่าทองแดงในปริมาณเล็กน้อยไม่เพียงแต่ไม่เป็นพิษ ยังเป็นสิ่งที่ร่างกายเราต้องการ แต่ถ้ามีในปริมาณสูงก็จะให้โทษและเป็นพิษได้ เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต 27 กรัม ทำให้ตายได้ ถ้ารับประทานปริมาณน้อยกว่านี้ จะเกิดอาการอาเจียน เหน็บชา และลำไส้ [8, 9]

2.8 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของปูนซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้น 2 ลักษณะ [5] คือ

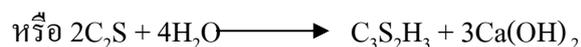
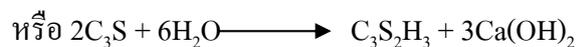
- อาศัยสารละลาย ปูนซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิด Ions ในสารละลาย และ Ions นี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น
- การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ปูนซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้น ในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดของปูนซีเมนต์ [5]

2.8.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

คัลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด “คัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$ หรือ CSH)” ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังสมการต่อไปนี้

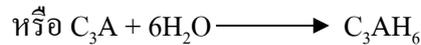
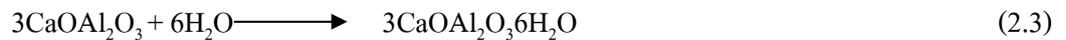


จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิด Gel เมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะ 2 ประการ คือ มีรูพรุนและ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ โดยองค์ประกอบทางเคมีของ CSH ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

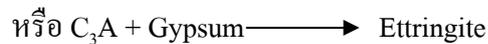
$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างมาก คือ มี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างดีมาก

2.8.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

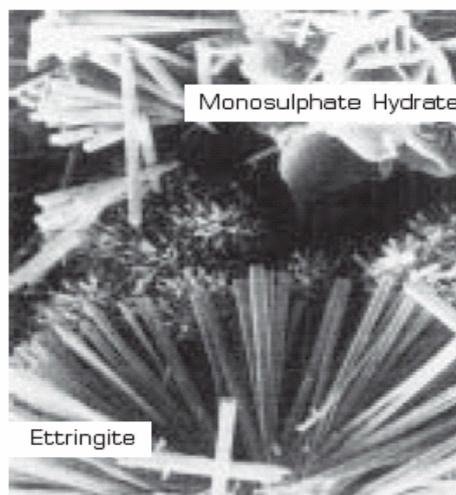
ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดขึ้นที่ และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการต่อไปนี้



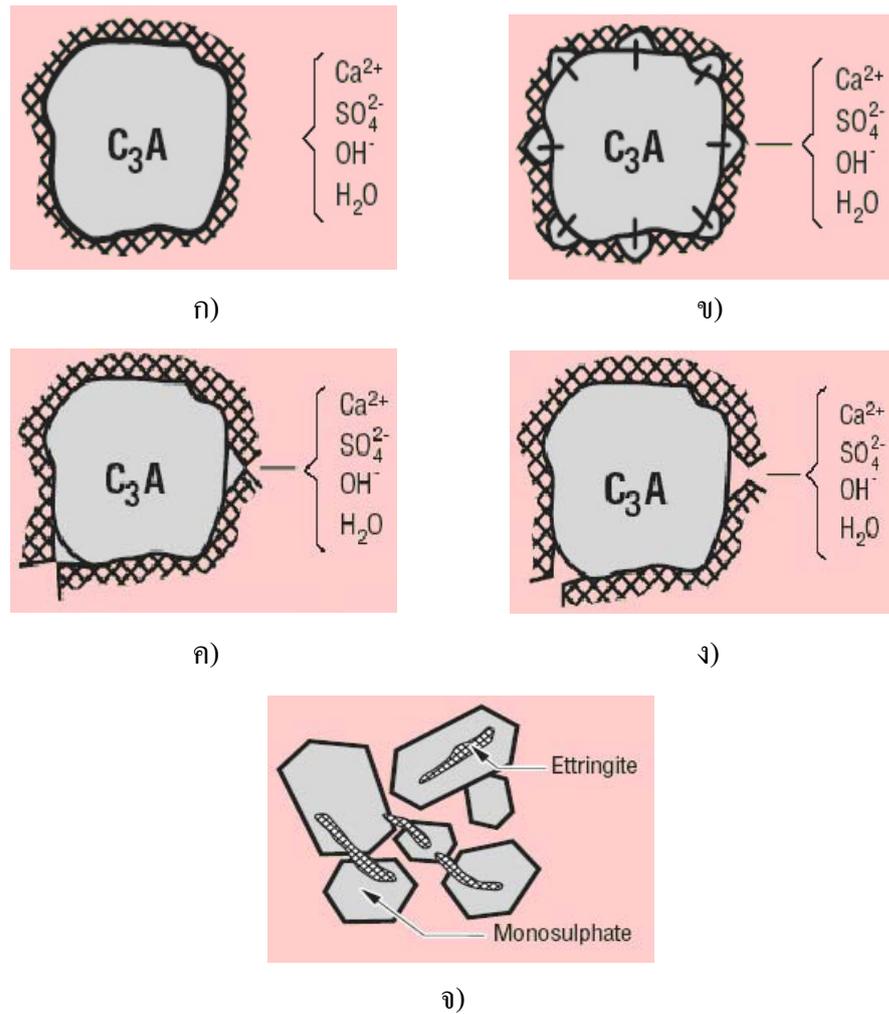
ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์ จะมีการใส่ยิปซัมเข้าไป เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ไม่ให้เกิดเร็วเกินไป โดยยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการต่อไปนี้



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_3A เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่ เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของ Ettringite และ Monosulphate [5]

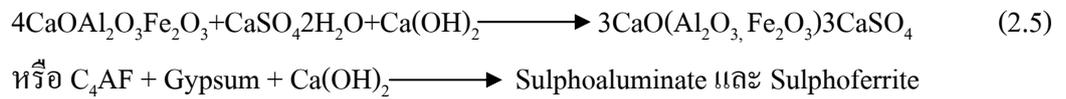


รูปที่ 2.6 กระบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A [5]

ก) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดขึ้นหลังจากที่มีการผสมน้ำในปูนซีเมนต์, ข) ยิปซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A (เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A), ค) แรงดันจากผลึกของ Ettringite จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก, ง) ส่วนที่แตกออกจะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่ (เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A อีกครั้งหนึ่ง) และ จ) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดสมบูรณ์ โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate และจะหยุดเมื่อ SO_4^{2-} มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite

2.8.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C₄AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₄AF นี้ จะเกิดช่วงต้น โดย C₄AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ Ca(OH)₂ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการต่อไปนี้

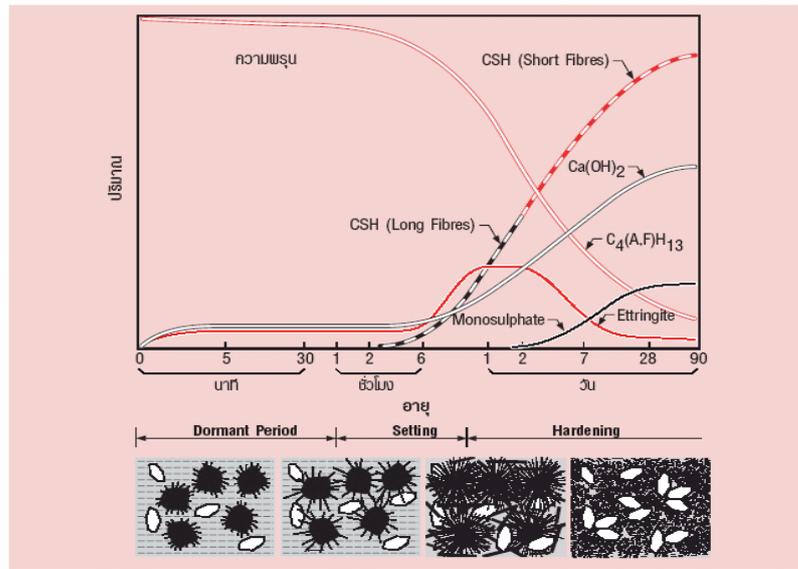


2.8.4 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยรวมของสารประกอบทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH Gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์ และเป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิด “Dormant Period” อันเป็นช่วงเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่ยังคงสภาพเหลวและสามารถไหลได้ ในช่วง 1–2 ชั่วโมง

เมื่อสิ้นสุดช่วง Dormant Period จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) โดย CSH ที่เคลือบอยู่บนอนุภาคปูนซีเมนต์จะเกิดการแตกออกด้วยแรงดัน Osmotic ซึ่งแรงดันนี้เกิดจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนในสารละลายที่อยู่ระหว่าง Gel กับอนุภาคปูนซีเมนต์ และไอออนในสารละลายที่อยู่รอบๆ CSH ทำให้เกิดการทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป

ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของปูนซีเมนต์ก่อนทำปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ที่ละน้อย จนเกิดผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากขึ้น ทำให้เกิดจุดเชื่อมมากขึ้น จนถึงอนุภาคปูนซีเมนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และกลายเป็นของแข็งในที่สุด ซึ่งว่าเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ [5]

จากแผนภาพในรูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ โดยอนุภาคปูนซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่ $Ca(OH)_2$ จะแสดงด้วยรูปหกเหลี่ยม ส่วน Ettringite และ CSH จะแสดงด้วยเส้นสั้นทึบ และเส้นสั้นบาง ตามลำดับ ซึ่งในช่วง Dormant Period อนุภาคปูนซีเมนต์จะอยู่แยกกัน และจะเกิด $Ca(OH)_2$ กับ Ettringite เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง CSH Gel จะเริ่มเกิดขึ้น โดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัวของ CSH Gel นี้ ก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ของแข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนของซีเมนต์เพสต์จะลดลง และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว Sulphate Ions ถูกใช้หมดไป ออกไซด์อลูมิเนียมและเหล็กเริ่มก่อตัว และ Ettringite ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็น Monosulphate ส่วน C_3S และ C_2S จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของซีเมนต์เพสต์ลดลงในระยะยาว

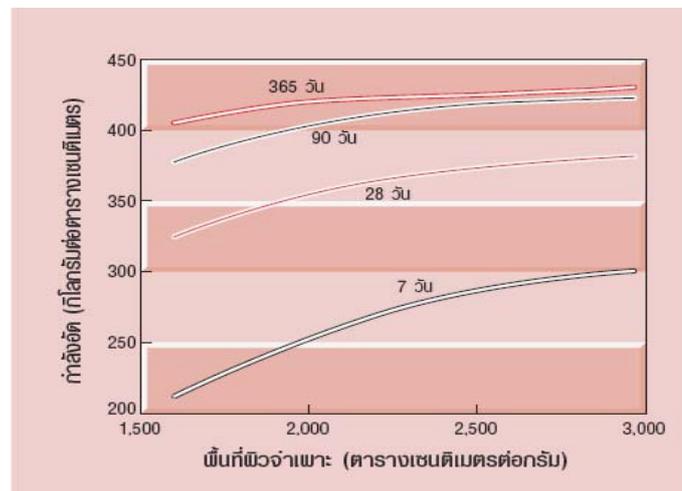
2.8.5 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก็จะส่งผลกระทบต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วด้วยเช่นกัน ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [5] ได้แก่

2.8.5.1 อายุของซีเมนต์เพสต์ ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุด ในช่วงแรก และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งเมื่อถึงจุดๆ หนึ่งปฏิกิริยาจะสิ้นสุดโดยสมบูรณ์

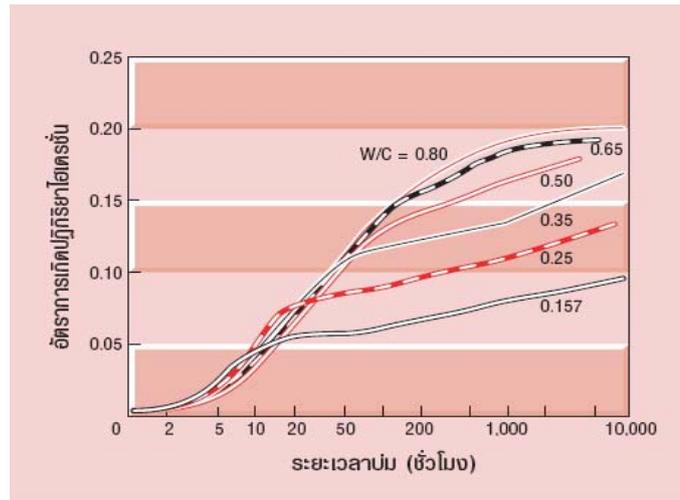
2.8.5.2 องค์ประกอบของซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกเท่านั้นขึ้นอยู่กับ สารประกอบหลักแต่ละสาร โดยปูนซีเมนต์ที่มี C_3S และ C_3A มากจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงไฮเดรชันในช่วงปลายของแต่ละสารประกอบหลักจะไม่แตกต่างกันนัก

2.8.5.3 ความละเอียดของปูนซีเมนต์ เมื่อความละเอียดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ความละเอียดจะไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วงปลาย



รูปที่ 2.8 ผลของความละเอียดในรูปของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต [5]

2.8.5.4 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ในช่วงหลัง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ส่งผลให้ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉลี่ยและอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงด้วย



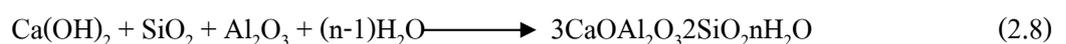
รูปที่ 2.9 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [5]

2.8.5.5 อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เฟส

2.8.5.6 สารผสมเพิ่ม มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น สารจำพวกน้ำตาล, กรดและเกลือของ Lignosulphonic และประเภทเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น CaCl_2

2.9 ปฏิกิริยาปอสโซลาน

วัสดุปอสโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำได้ หรือทำปฏิกิริยากับปูนขาวที่ประกอบไปด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดเป็น CSH หรือ CAH ก่อให้เกิดการแข็งตัวและมีสมบัติในการยึดประสานได้ [10, 11] ปฏิกิริยาเกิดดังสมการต่อไปนี้



2.10 กระบวนการกระตุ้นปฏิกิริยาปอส์โซลาน

เนื่องจากปฏิกิริยาปอส์โซลานระหว่างปูนขาวกับวัสดุปอส์โซลานจะเกิดขึ้นช้า ทำให้มีการพัฒนา กำลังอัดและการก่อตัวที่ช้า เพราะชั้นที่ผิวหน้าของอนุภาควัสดุปอส์โซลานนั้นมีความเสถียรภาพทางเคมี มีพันธะ Silica-Alumina ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงเป็นองค์ประกอบ ในการทำปฏิกิริยาจึงต้องทำลายพันธะเหล่านั้นก่อน เพื่อเป็นการช่วยให้ปฏิกิริยาปอส์โซลานเกิดขึ้นได้ดี ดังนั้น จึงต้องมีการกระตุ้นปฏิกิริยาปอส์โซลาน [5, 12] โดยกระบวนการที่สำคัญที่นำมาใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยามี 3 วิธี [13] ดังต่อไปนี้

2.10.1 การกระตุ้นด้วยการบดลดขนาด (Mechanical Activation)

เป็นวิธีการที่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาปอส์โซลานได้ดี เนื่องจากความละเอียดของวัสดุทำให้มีพื้นที่ผิวที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาสูง ดังนั้น จึงเพิ่มโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาได้ดี เช่น จากงานวิจัยที่ได้มีการนำเถ้าลอยที่ผ่านการบดมาผสมในปูนซีเมนต์ทำเป็นคอนกรีต และทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่าคอนกรีตที่ทำการผสมเถ้าลอยที่ผ่านการบด จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ทำการผสมเถ้าลอยที่ไม่ผ่านการบด เนื่องจากเถ้าลอยที่ผ่านการบดจะมีความละเอียดและสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า

2.10.2 การกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermal Activation)

ในสภาวะที่เหมาะสมหรืออุณหภูมิที่พอเหมาะ สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ได้ เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการรับแรงอัดพบว่า การกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงสามารถเร่งปฏิกิริยาในช่วงแรกได้ดี แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป ความสามารถในการรับแรงจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซีเมนต์ในช่วงแรกให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การลดลงในช่วงหลังนี้อาจเกิดจากความร้อนที่ป้อนทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่คงตัวและสูญเสียความแข็งแรงไป เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้น ความสามารถในการรับแรงอัดในระยะยาวจึงลดลง

2.10.3 การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activation)

การกระตุ้นด้วยสารเคมีเป็นวิธีที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอส์โซลานได้ดีขึ้น และมีอัตราการพัฒนากำลังอัดที่เร็วขึ้น ส่วนใหญ่ใช้วิธีการเติมสารเคมีในการกระตุ้น เพราะเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ยุ่งยากเหมือนวิธีอื่น

โดยสารเคมีที่นิยม ได้แก่ สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบส เนื่องจากสามารถกัดกร่อนพันธะ Silica-Alumina ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เป็นต้น ซึ่งสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยลดระยะเวลาก่อตัวให้น้อยลง โดยสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นจัดเป็นสารผสมเพิ่มในประเภทสารเร่งการก่อตัว

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาปอสรุขลานระหว่างปูนขาวและเถ้าแกลบสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต 8% ของน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน

2.11 วารสารปริทัศน์

Asavapisit and Macphee (2007) [14] ศึกษาการตรึงกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบประเภทสังกะสี-ไซยาไนด์ โครเมียม เหล็ก และสังกะสีสังเคราะห์ ด้วยปูนขาวผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วนผสม 45:55 มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3$) และกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ในปริมาณร้อยละ 8 ของน้ำหนักวัสดุยึดประสาน ผลการศึกษาพบว่า ปูนขาวผสมเถ้าแกลบที่ไม่มีและมีการเติมโซเดียมซิลิเกตที่ผสมสังกะสีสังเคราะห์ จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดหลังจาก 14 วัน และปูนขาวผสมเถ้าแกลบที่ผสมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดหลังจาก 28 วัน เนื่องมาจากในช่วงแรกสังกะสีจากกากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีสังเคราะห์ จะดึง Ca^{2+} จากปูนขาว และก่อตัวอยู่ในรูป Calcium Zincate ซึ่งทำให้ปริมาณ Ca^{2+} ลดลง ส่งผลให้เกิดหน่วงการก่อตัวและไม่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัด แต่หลังจากนั้น การละลายของ Calcium Zincate และสังกะสี จะทำให้เกิดการก่อตัวอยู่ในรูป C-S-Z-H ซึ่งเป็นของแข็งทำให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัด แต่สำหรับปูนขาวผสมเถ้าแกลบที่มีการกระตุ้นด้วยโซเดียมคาร์บอเนตจะไม่เกิดการหน่วงปฏิกิริยา ซึ่งเกิดจากปริมาณของ สังกะสี:แคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะยับยั้งการเกิด Calcium Zincate และ C-S-Z-H แม้ว่าจะมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบถึงร้อยละ 30

Asavapisit and Ruengrit (2005) [15] ได้ทำการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับเถ้าแกลบที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และทำการผสมกากตะกอนโรงชุบประเภทสังกะสี-ไซยาไนด์ในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และผสมโลหะสังเคราะห์ประเภทโครเมียม, เหล็ก และสังกะสี ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าสังกะสีสังเคราะห์ และกากตะกอนโรงชุบทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์เริ่มต้นเร็ว แต่เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบทำให้ระยะเวลาก่อตัวช้าลง สาเหตุเนื่องมาจากสังกะสีที่เป็นองค์ประกอบหลักของสังกะสีสังเคราะห์ และกากตะกอนโรงชุบจะไปทำปฏิกิริยากับซัลเฟต ทำให้

C_3A ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ส่วนการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีสังกะสีสังเคราะห์ และกากตะกอนโรงชุบจะช้าในช่วงอายุการบ่ม 14 วันแรก แต่ก้อนหล่อแข็งที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 ที่เติมสังกะสีสังเคราะห์ และกากตะกอนโรงชุบในปริมาณร้อยละ 10 จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างรวดเร็วเมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน เนื่องจากในช่วงอายุการบ่ม 1-28 วันแรก ในสถานะที่เป็นต่างมากมาย สังกะสีสามารถรวมตัวกับแคลเซียมเกิดการตกตะกอนเป็น Calcium Zincate อยู่รอบผิวเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการขัดขวางปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น อิทธิพลของสังกะสีลดลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน การพัฒนากำลังรับแรงอัดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปกติ

Asavapisit และคณะ (1997) [16] ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงแรกที่มีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยมีการเติมโลหะไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ 3 ชนิด คือ ตะกั่ว, สังกะสี และแคลเซียม และทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารละลายที่สกัดออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่า ในสารละลายจะมีความเข้มข้นของตะกั่วออกมาในปริมาณที่มากในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้การเกิด CSH ช้าลง เนื่องจากตะกั่วจะก่อตัวในรูป $Pb(OH)_3^-$ ส่วนความเข้มข้นของ Ca^{2+} และ SO_4^{2-} จะลดลงเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์เพียงอย่างเดียว สังกะสีสังเคราะห์ที่เติมลงไป ในสารละลายปูนซีเมนต์ ทำให้ปริมาณ Ca^{2+} และ SO_4^{2-} ลดลงอย่างรวดเร็ว และพบสังกะสีตกตะกอนอยู่ในรูป Calcium Zincate

Fowler และคณะ (1995) [17] ทำการศึกษาผลกระทบของโลหะไฮดรอกไซด์ต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีของสารละลายปูนซีเมนต์และโลหะหนักสังเคราะห์ ได้แก่ ตะกั่ว, โครเมียม, สังกะสี และเหล็ก ในอัตราส่วน 90:10 และใช้ W/S เท่ากับ 3 พบว่า การเติมสังกะสีสังเคราะห์ในปูนซีเมนต์จะยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และพบว่าในสารละลายปูนซีเมนต์ที่มีการผสมสังกะสีสังเคราะห์จะมีค่า pH อยู่ในช่วง 11.90-13.04 ซึ่งค่า pH ช่วงนี้ จะพบสังกะสีอยู่ในรูป $Zn(OH)_3^-$ และ $Zn(OH)_4^{2-}$ เป็นส่วนใหญ่ในสารละลาย และสามารถก่อตัวเป็น Calcium Zincate ที่มีความสามารถในการละลายต่ำ อยู่บนผิวของเม็ดปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และยังพบปริมาณของ Ca^{2+} และ SO_4^{2-} ลดลงอย่างรวดเร็ว

Thomas and Double (1981) [18] ทำการศึกษาความเข้มข้นของแคลเซียมและซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์และไตรแคลเซียมซิลิเกต พบว่า แคลเซียมและซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์และไตรแคลเซียมซิลิเกตจะอยู่ในรูป $CaO-SiO_2-H_2O$ โดยความเข้มข้นของซิลิกอนจะมีค่าต่ำมาก ค่าความเป็นต่างของสารละลายจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณของแคลเซียมและซัลเฟตจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น

Thomas และคณะ (1981) [19] ทำการศึกษาผลของตะกั่วไนเตรตต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า ตะกั่วไนเตรตจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก และจะตกตะกอนอย่างรวดเร็วในรูปสารประกอบของตะกั่วกับไนเตรต หรือซัลเฟต โดยห่อหุ้มบนผิวของปูนซีเมนต์ เป็นผลให้น้ำซึมผ่านเข้าทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์น้อยลง ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง

ชาตินัย โคนาวิทย์ (2544) [20] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารละลาย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซิลิกาฟูมควบแน่นและตะกั่วไนเตรตห่อหุ้มเหล็กที่มีการเติมกากตะกอนจาก โรงชุบ พบว่า ในสารละลายปูนซีเมนต์มีค่าความเข้มข้นของแคลเซียมและซัลเฟตลดลง ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ส่วนสารละลายปูนซีเมนต์ผสมซิลิกาฟูม ควบแน่นและตะกั่วไนเตรตห่อหุ้มเหล็กจะมีค่าความเข้มข้นของแคลเซียม ซัลเฟต และไฮดรอกไซด์ ต่ำกว่าสารละลายปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในสารละลายลดลง และเมื่อมีการเติม กากตะกอนโลหะหนัก พบว่า ปริมาณของแคลเซียมลดลงถึงร้อยละ 70 ส่วนปริมาณซัลเฟตลดลงอย่าง รวดเร็ว เนื่องมาจากการสังกะสีในกากตะกอนจากโรงชุบ รบกวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่วลดลง ส่วนสังกะสีมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น

มานพ บุญแจ่ม (2544) [21] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ และมีการผสมโครเมียมและตะกั่วสังเคราะห์ พบว่า ในสารละลายปูนซีเมนต์มีค่าความ เข้มข้นของแคลเซียมและซัลเฟตลดลง ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลา ไฮเดรชันเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการผสมโครเมียมและตะกั่วสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 พบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในสารละลายมีค่าความเป็นด่างสูง ส่วนความเข้มข้นของ โครเมียมมีค่าลดลง เนื่องจากอาจจะถูกตรึงอยู่ในพันธะของปูนซีเมนต์บางส่วนได้

วีณา นันทมนตรี (2543) [22] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ผสมฝุ่นซิลิกาควบแน่น และมีการผสมโครเมียมและตะกั่วสังเคราะห์ พบว่า ในสารละลายปูนซีเมนต์ ความเข้มข้นของแคลเซียมและซัลเฟตลดลง ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ เพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ส่วนสารละลายปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นซิลิกาควบแน่น ความเข้มข้นของแคลเซียม ซัลเฟต และไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มเหมือนกับสารละลายปูนซีเมนต์แต่มี ค่าต่ำกว่า เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในสารละลายลดลง เมื่อมีการเติมโครเมียมและตะกั่วสังเคราะห์ พบว่า ความเข้มข้นของโครเมียมมีค่าค่อนข้างลดลง แต่ความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าสูงขึ้น

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement) ตราช้าง

3.1.2 ปูนขาว

ปูนขาวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นปูนขาวประเภท Hydrate Lime ซึ่งนำมาใช้เป็นวัสดุยึดประสานร่วมกับ เถ้าแกลบสังเคราะห์

3.1.3 เถ้าแกลบสังเคราะห์

เถ้าแกลบสังเคราะห์ ได้มาจากการนำแกลบของโรงสีข้าว จังหวัดฉะเชิงเทรา มาทำการเผาเพื่อลด ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยได้ และเผาควบคุมสถานะที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.1.4 กากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มี 2 ชนิด คือ กากตะกอนที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสีย โรงชุบโลหะ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

3.1.5 สารกระตุ้นปฏิกิริยา

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยามี 2 ชนิด คือ โซเดียมซิลิเกต มีสูตรทางเคมี คือ Na_2SiO_3 ยี่ห้อ Panreac และ โซเดียมคาร์บอเนต มีสูตรทางเคมี คือ Na_2CO_3 ยี่ห้อ Ajax Finechem ความบริสุทธิ์ 99.8%

3.1.6 น้ำ

น้ำที่ใช้เป็นน้ำที่ปราศจากไอออนสำหรับการผสมในสารละลาย อินดิเคเตอร์และสารเคมี

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เตาเผาแก๊ส (Furnace)
- 2) เครื่องบดลดขนาดอนุภาค (Los Angeles Abrasion Machine)
- 3) เครื่องย่อยตัวอย่างสาร (Microwave)
- 4) เครื่องมือวิเคราะห์โลหะหนัก (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission

Spectroscopy, ICP-AES)

- 5) เครื่อง UV Visible Spectrophotometer
- 6) เครื่องอ่างน้ำ (Water Bath)
- 7) เครื่องให้ความร้อน (Hot Plate)
- 8) เครื่องชั่งสาร
- 9) เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)
- 10) เครื่องดูดสูญญากาศ (Vacuum Pump)
- 11) เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
- 12) ตู้บ่มไนโตรเจน
- 13) ตะแกรงเบอร์ 40 และเบอร์ 325
- 14) ก๊าซไนโตรเจน (N_2 Gas)
- 15) กรดไนตริก (HNO_3)
- 16) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 17) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
- 18) กรดซัลฟานิลิก (Sulphanilic Acid)
- 19) กรดบอริก (H_3BO_3)
- 20) กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)
- 21) กlycerol (Glycerol)
- 22) เอทานอล (C_2H_6O)
- 23) สังกะสีไนเตรท ($Zn(NO_3)_2$)
- 24) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

- 25) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)
- 26) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
- 27) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- 28) โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF)
- 29) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- 30) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)
- 31) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
- 32) แบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2)
- 33) บรูซินซัลเฟต
- 34) ฟีนอล์ฟทาลีน
- 35) เมทิลเรด
- 36) กระดาษกรอง Whatman No. 1, 50

3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบ

3.3.1 การเตรียมแผ่นกลบสังเคราะห์

นำกลบจากโรงสีข้าว มาทำการเผาเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยได้ และเผาควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการบดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine ให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 ไมครอน และนำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยใช้วิธีการร่อนแบบเปียก ให้มีเปอร์เซ็นต์คั่งค้างบนตะแกรงไม่เกิน 34 % ตามมาตรฐาน ASTM C 618-91 [23]

3.3.2 การเตรียมกากตะกอนโลหะหนัก

กากตะกอนโลหะหนักที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียจาก โรงชุมชน นำมาตากแห้งจนมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ให้มีอนุภาคเล็กกว่า 500 ไมครอน ส่วนสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ได้จากการปรับ pH ของสารละลายสังกะสีในเตรทความเข้มข้น 1 โมลาร์ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จนกระทั่ง pH ของสารละลายเท่ากับ 8.9 ± 0.1 จากนั้นทำการกรองเพื่อแยกน้ำออกจากตะกอน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งตะกอนแห้งจึงนำไปบดจนมีอนุภาคเล็กกว่า 500 ไมครอน แล้วทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบโลหะหนักของกากตะกอนทั้ง 2 ชนิด

กากตะกอนโลหะหนักที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงชุมชน ทำการย่อยด้วยวิธี Microwave Digestion โดยนำกากตะกอนโลหะหนักมาบดให้ละเอียด 0.5 มิลลิกรัม ใส่ลงในหลอดย่อย เติมกรดไนตริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 มิลลิลิตร ปิดฝาให้เรียบร้อย นำไปย่อยในเครื่อง Microwave นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ด้วยกรดบอริกเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์

ส่วนสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ทำการย่อยด้วยวิธี Nitric Acid Digestion โดยนำตะกอนของสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์มาบดให้ละเอียด 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร และเติมกรดไนตริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำไปต้มบนเครื่องทำความร้อนภายในเครื่องดูดควัน ปล่อยให้ระเหยไปเรื่อยๆ แต่อย่าให้สารละลายเดือด จนกระทั่งสารละลายมีปริมาตรลดลงเหลือ 15-20 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายเย็น แล้วนำมาทำการกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 50 ปรับปริมาตรของสารละลายในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร นำกากตะกอนโลหะหนักทั้ง 2 ชนิด ไปวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนจากโรงชุมชนและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

องค์ประกอบ	ปริมาณโลหะหนัก (กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)	
	กากตะกอนจากโรงชุมชน	สังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์
สังกะสี (Zn)	316	703
เหล็ก (Fe)	93	-
โครเมียม (Cr)	42	-
ตะกั่ว (Pb)	6.32	-
ทองแดง (Cu)	0.45	-

3.3.3 การเตรียมสารกระตุ้นปฏิกิริยา

สารกระตุ้นปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ก่อนการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาจะต้องทำให้สารกระตุ้นปฏิกิริยาอยู่ในรูปของสารละลาย โดยคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสมแต่ละครั้ง จากนั้นคำนวณปริมาณสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่ต้องใช้แล้วนำมาผสมรวมกับน้ำ และใช้เครื่องกวนผสมกวนสารละลายให้เข้ากันดี ก่อนนำสารละลายที่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาไปผสมกับวัสดุยึดประสานในการทดลองต่อไป

สารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมซิลิเกตที่นำมาใช้ พบว่า มีปริมาณโซเดียมออกไซด์ร้อยละ 9.219, ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 26.674 และน้ำร้อยละ 64.107 ส่วนสารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต มีปริมาณโซเดียมออกไซด์ต่อโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 62:106 จะเห็นได้ว่าสารทั้ง 2 ชนิด มีโซเดียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกัน ดังนั้น จึงต้องมีการเทียบอัตราส่วนในการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาให้มีปริมาณโซเดียมออกไซด์ที่เท่ากัน

จากการทดลองต้องการสารกระตุ้นปฏิกิริยา 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ซึ่งวัสดุยึดประสานที่ใช้ 7.5 กรัม ดังนั้น ถ้าต้องการสารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมซิลิเกต จะต้องใช้ปริมาณโซเดียมซิลิเกต 6.508 กรัม ผสมในน้ำจนครบ 150 มิลลิลิตร และถ้าต้องการสารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต จะต้องใช้โซเดียมคาร์บอเนต 1.026 กรัม ผสมในน้ำจนครบ 150 มิลลิลิตร

3.4 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมของผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ในอัตราส่วนผสม 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ในสถานะที่ไม่มีและมีการกักตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมระหว่างปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ในอัตราส่วนผสม 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมีการกักตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.2-3.3 (จากนี้จะขอใช้สัญลักษณ์ดังนี้ คือ OPC แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, LIME แทนปูนขาว, RHA แทนเถ้าแกลบสังเคราะห์, PS แทนกากตะกอนจากโรงชุบ, $\text{Zn}(\text{OH})_2$ แทนสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์, Na_2SiO_3 แทนโซเดียมซิลิเกต และ Na_2CO_3 แทนโซเดียมคาร์บอเนต)

โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำและของแข็งของผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับ
 ฝ้าเคลบสังเคราะห์เท่ากับ 10 ทำการผสมเป็นระยะเวลา 1 นาที, 10 นาที, 1 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง, 1 วัน
 และ 3 วัน และอัตราส่วนระหว่างน้ำและของแข็งของผสมระหว่างปูนขาวผสมกับฝ้าเคลบ
 สังเคราะห์เท่ากับ 20 ทำการผสมเป็นระยะเวลา 1 นาที, 10 นาที, 1 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง, 1 วัน, 3 วัน,
 7 วัน และ 10 วัน จากนั้นทำการกรองโดยผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 50 นำสารละลายที่ได้มา
 ทำการตรวจวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH Meter, OH⁻ โดยวิธีอินดิเคเตอร์, SO₄²⁻ โดยวิธีวัดความขุ่น, NO₃⁻
 โดยวิธีบรูซัน และหาค่า Ca²⁺, Si, Zn, Fe, Cr, Pb, Cu ด้วยเครื่อง ICP-AES

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับฝ้าเคลบสังเคราะห์

OPC (%)	RHA (%)	PS (%)	Zn(OH) ₂ (%)	W/S
100	0	0	0	10
90	0	10	0	10
90	0	0	10	10
90	10	0	0	10
81	9	10	0	10
81	9	0	10	10
80	20	0	0	10
72	18	10	0	10
72	18	0	10	10
70	30	0	0	10
63	27	10	0	10
63	27	0	10	10

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของปูนขาวกับเถ้าแกลบสังเคราะห์

LIME (%)	RHA (%)	Na ₂ SiO ₃ (%)	Na ₂ CO ₃ (%)	PS (%)	Zn(OH) ₂ (%)	W/S
45	55	0	0	0	0	20
40.5	49.5	0	0	10	0	20
40.5	49.5	0	0	0	10	20
45	55	8	0	0	0	20
40.5	49.5	8	0	10	0	20
40.5	49.5	8	0	0	10	20
45	55	0	8	0	0	20
40.5	49.5	0	8	10	0	20
40.5	49.5	0	8	0	10	20

หมายเหตุ : สารกระตุ้นปฏิกิริยาที่เติมลงไป คิดเป็น 8% ของปริมาณของวัสดุยึดประสาน

3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารละลาย

งานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของสารละลาย ได้แก่ pH, OH⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, Ca²⁺, Si, Zn, Fe, Cr, Pb และ Cu ซึ่งแสดงวิธีการวิเคราะห์ [24] ดังต่อไปนี้

3.5.1 การวิเคราะห์หาค่า pH

นำสารละลายที่ได้จากการกรองมาทำการวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH Meter

3.5.2 การวิเคราะห์หาค่า OH⁻

วิธีการวิเคราะห์ คือ นำตัวอย่างสารละลายที่ผ่านการกรองมา 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย หยดฟีนอล์ฟทาเลอินอินดิเคเตอร์ 2 หยด ทำการไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.1 N จากสีชมพูจนเป็นใสไม่มีสี จดปริมาตรกรดที่ใช้ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า OH⁻

3.5.3 การวิเคราะห์หาค่า SO_4^{2-}

วิธีการวิเคราะห์ คือ นำตัวอย่างสารละลายที่ผ่านการกรองมา 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวยเติมคอนดิชันนิงรีเอเจนต์ 2.5 มิลลิลิตร ผสมและกวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก ในขณะเดียวกันก็เติมฟลิกแบเรียมคลอไรด์ ประมาณ 1 ซ้อน เริ่มจับเวลาที่ทันที ตั้งกวนไว้จนครบ 1 นาที หยุดกวน แล้วนำไปวัดค่าความขุ่นด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร อ่านค่าปริมาณของซัลเฟตจากกราฟมาตรฐาน

3.5.4 การวิเคราะห์หาค่า NO_3^-

วิธีการวิเคราะห์ คือ นำตัวอย่างสารละลายที่ผ่านการกรองมา 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 1 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟูริก (4+1) 5 มิลลิลิตร คนให้ทั่ว นำหลอดทดลองที่ร้อนไปแช่น้ำเพื่อระบายความร้อน จากนั้นนำมาเติมสารละลายบรูซัน-กรดซัลฟานิลิก 0.25 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน นำหลอดทดลองไปใส่ในเครื่องอังน้ำซึ่งมีอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที นำขึ้นมาและทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปวัดค่าไนเตรทด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร อ่านค่าปริมาณของไนเตรทจากกราฟมาตรฐาน

3.5.5 การวิเคราะห์หาค่า Ca^{2+} , Si, Zn, Fe, Cr, Pb และ Cu

นำสารละลายที่ได้จากการกรองมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณ Ca^{2+} , Si, Zn, Fe, Cr, Pb และ Cu ด้วยเครื่อง ICP-AES

บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัยและการวิเคราะห์ผล

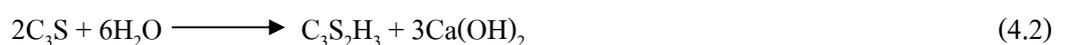
งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของก้อนหล่อแข็งจากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์เป็นวัสดุยึดประสาน โดยทำการทดลอง 2 ชั่วโมง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เถ้าแกลบสังเคราะห์, กากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

เตรียมของผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในอัตราส่วนผสม 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ในสถานะที่ไม่มีและมีกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำและของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 10 ทำการผสมเป็นระยะเวลา 1 นาที, 10 นาที, 1 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง, 1 วัน และ 3 วัน (จากรูปต่อไปนี้จะขอใช้สัญลักษณ์ ดังนี้ O แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, R แทนเถ้าแกลบสังเคราะห์, PS แทนกากตะกอนจากโรงชุบ และ Zn แทนสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์)

4.1.1 ค่า pH

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) โดย pH ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่าเท่ากับ 12.35 และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันนานขึ้น pH ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน มีค่าเท่ากับ 12.66 สาเหตุที่ค่า pH เพิ่มขึ้น เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีไคแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อ C_2S และ C_3S ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ดังแสดงในสมการข้างล่าง



$Ca(OH)_2$ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ C_2S และ C_3S มีสมบัติเป็นด่างมาก จะทำให้สารละลายมีค่า pH สูงขึ้น เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น [5]

เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ ค่า pH ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าค่า pH ของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ เนื่องจากในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 10%, 20% และ 30% จะมีปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อยกว่าสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว ดังนั้น เมื่อสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ทำปฏิกิริยากับน้ำจึงมีปริมาณ Ca(OH)_2 น้อยกว่า ทำให้ pH ของสารละลายมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ Ca(OH)_2 ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันยังสามารถไปทำปฏิกิริยาปอสโซลานกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่อยู่ในเถ้าแกลบสังเคราะห์และเกิดเป็น CSH ได้อีกด้วย [11] ดังแสดงในสมการ



ดังนั้น Ca(OH)_2 ที่เหลือจึงมีน้อยกว่า ค่า pH จึงมีค่าต่ำกว่า โดยค่า pH ของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 30% มีค่า pH ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที เท่ากับ 12.23 และที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน pH มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 12.58

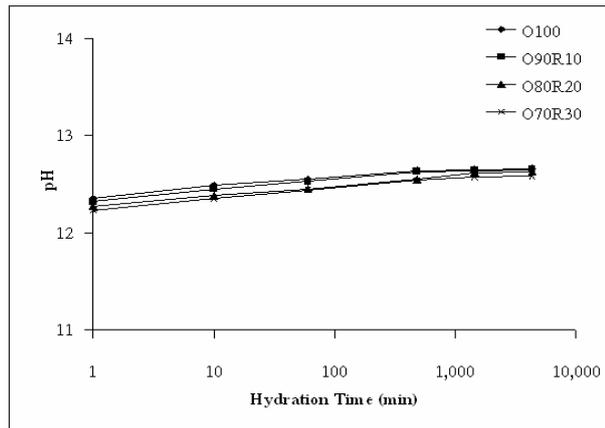
เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงไป พบว่า ค่า pH ในช่วง 1 ชั่วโมงแรกจะมีค่าลดลง และหลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข)-(ค) โดยค่า pH ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่า pH ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที เท่ากับ 12.23 และ 12.21 ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง pH ลดลงเหลือ 12.04 และ 11.96 หลังจากนั้น pH จะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน pH มีค่าเท่ากับ 12.63 และ 12.54 ตามลำดับ โดยอาจมีสาเหตุมาจากสังกะสีที่มีอยู่ปริมาณมากในกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ จากรายงานของ Asavapisit และ Ruengrit [15] และ Asavapisit และคณะ [16] พบว่า สังกะสีสังเคราะห์จะรบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะยับยั้งสารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับ ทำให้ไม่มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงแรก Yousof และคณะ [25] พบว่า เมื่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดเป็น CSH และ Ca(OH)_2 โดย CSH จะห่อหุ้มอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Ca^{2+} จะอยู่รอบๆ ชั้นของ CSH เมื่อมีการเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไป ที่ค่า pH สูงๆ คือ pH ประมาณ 12-13 สังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับ OH^- ในสารละลายเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ Zn(OH)_3^- และ Zn(OH)_4^{2-} จึงส่งผลให้ปริมาณของ OH^- ในสารละลายลดลง ทำให้ pH มีค่าต่ำลง โดยประจุลบของ Zn(OH)_3^- และ Zn(OH)_4^{2-} จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ที่อยู่บริเวณรอบๆ อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้เกิดเป็นชั้นของ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่น้ำจะสามารถซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ตามปกติ เมื่อเวลาผ่านไป น้ำจะยังคงซึมผ่านชั้นของ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}$ เข้าไปทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันหลังจาก 1 ชั่วโมง น้ำในสารละลายบางส่วนสามารถซึมผ่านชั้นของ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}$ เข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ตามปกติ

ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็น CSH ปริมาตรภายในเกิดการขยายตัว เกิดแรงดันออสโมติก ดันให้
 ชั้นของ CSH และ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}$ แยกออก ดังนั้น ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้ตามปกติ
 เปลี่ยนเป็น CSH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ค่า pH ของสารละลายจึงสูงขึ้น

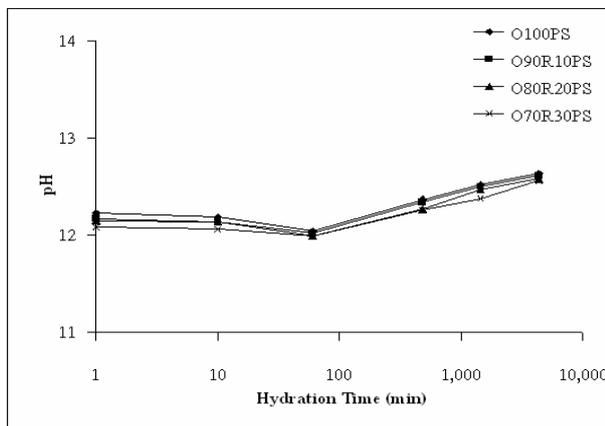
4.1.2 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบ
 สังกะสี ในสถานะที่ไม่มีและมิกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ กับ
 ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก)-(ค) พบว่า ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์
 ที่ได้สอดคล้องกับค่า pH ในทุกอัตราส่วนผสม ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์
 ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 10%, 20% และ 30% จะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของ
 ไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ โดยความ
 เข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 0%, 10%,
 20% และ 30% มีค่าที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที เท่ากับ 553, 548, 502 และ 446 มิลลิกรัมต่อลิตร
 และเพิ่มขึ้นเป็น 986, 978, 973 และ 961 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ตามลำดับ
 ซึ่งเป็นไปในแนวเดียวกับงานวิจัยของชาตินัย โคนาวิทช์ [20], มานพ บุญแจ่ม [21] และวิมา
 นันทมณตรี [22] ที่ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะสูงขึ้น
 เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันนานขึ้น และเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย
 วัสดุปอสโซลาน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์จะมีค่าน้อยกว่าสารละลายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
 เพียงอย่างเดียว

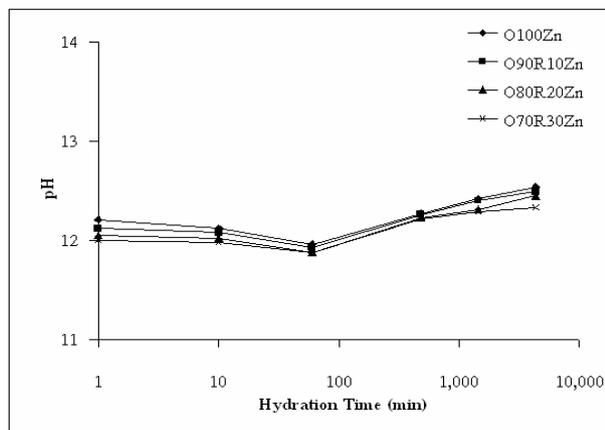
ส่วนความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อมีการผสมกากตะกอนจาก
 โรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ สอดคล้องกับงานวิจัยของชาตินัย โคนาวิทช์ [20] ว่า
 กากตะกอนโลหะหนักจะเข้ารบกวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงแรก ทำให้ความ
 เข้มข้นของไฮดรอกไซด์ลดลง โดยความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์จากการทดลองในสารละลาย
 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อมีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ที่
 ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่าเท่ากับ 442 และ 442 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 ชั่วโมง
 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ลดลงเหลือ 281 และ 272 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นเป็น 897 และ
 791 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ใน
 สารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ เมื่อมีการผสมกากตะกอน
 จากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ จะมีค่าลดลงไปตามปริมาณเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่เพิ่ม
 มากยิ่งขึ้น



(ก)



(ข)



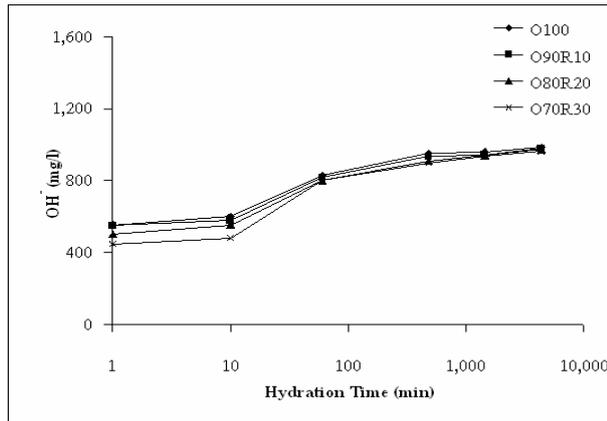
(ค)

รูปที่ 4.1 ค่า pH ในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

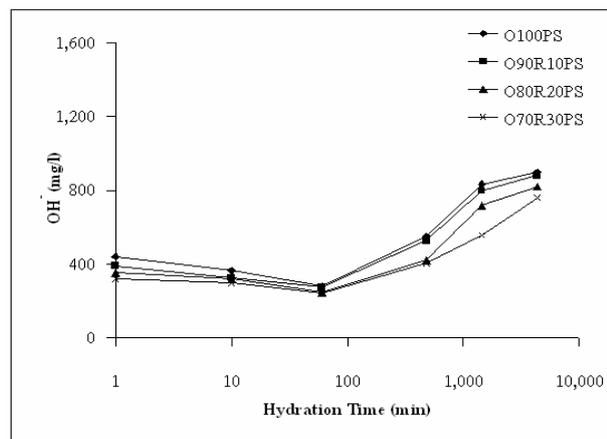
(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

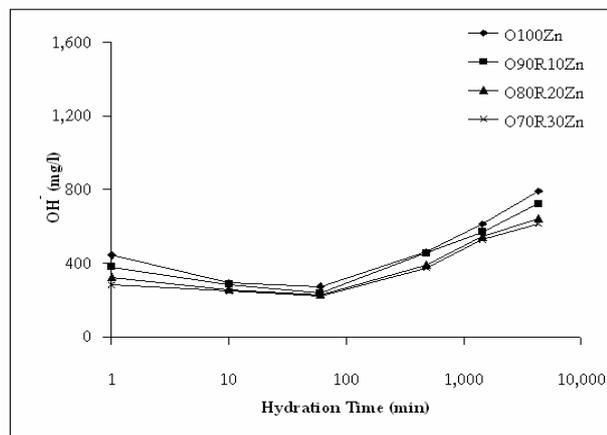
(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

4.1.3 ความเข้มข้นของซัลเฟต

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) พบว่า ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1,493 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ซัลเฟตลดลงเหลือ 335 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยซัลเฟตที่พบในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาจากยิปซัมที่เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อทำการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเร็วเกินไป ซึ่งซัลเฟตในยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็นชั้นของ Ettringite บนผิวของ C_3A ทำให้ปริมาณของซัลเฟตในสารละลายค่อยๆ ลดลง ดังสมการ



เมื่อระยะเวลาการไฮเดรชันนานขึ้น น้ำในสารละลายจะค่อยๆ ซึมผ่านชั้นของ Ettringite ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของ C_3A และทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้ภายในชั้นของ Ettringite เกิดแรงดัน ชั้นของ Ettringite จึงแตกออก ทำให้อนุภาคของ C_3A สามารถทำปฏิกิริยาต่อไป และเกิดเป็น Ettringite ใหม่ โดยปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดสมบูรณโดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate และจะหยุด เมื่อซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite ได้อีก [5] ดังนั้น เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันนานขึ้น ปริมาณซัลเฟตจึงลดน้อยลง [16-22, 26]

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ 10%, 20% และ 30% พบว่า ซัลเฟตจะมีความเข้มข้นต่ำกว่าซัลเฟตของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่ระยะเวลาไฮเดรชันเดียวกัน เนื่องจากสัดส่วนของยิปซัมในส่วนผสมมีปริมาณลดลง โดยซัลเฟตของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 30% มีซัลเฟตที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที เท่ากับ 1,476 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ซัลเฟตลดลงเหลือ 168 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์จะมีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาการไฮเดรชันนานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข)-(ค) โดยความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีซัลเฟตที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที เท่ากับ 1,619 และ 1,623 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 288 และ 281 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณของซัลเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็วในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัย

ของ Asavapisit และคณะ [16] พบว่า สารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการผสมสังกะสีสังเคราะห์ ปริมาณของซัลเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็ว และจากงานวิจัยของ Asavapisit และ Rurngrit [15] พบว่า ก้อนหล่อแข็งของเสียบที่มีการเติมสังกะสีสังเคราะห์ลงไปปริมาณ 10% มีระยะเวลาการก่อตัวเร็วกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากปริมาณของซัลเฟตลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ C_3A ที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเร็วที่สุด สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และได้ CAH ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว อีกทั้งซัลเฟตยังสามารถจับตัวกับสังกะสีที่อยู่ในภาคตะกอนโลหะหนัก เกิดเป็นสังกะสีซัลเฟตได้ [27] ดังสมการ



และเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ ความเข้มข้นของซัลเฟตที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ในปริมาณ 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ

4.1.4 ความเข้มข้นของแคลเซียม

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) พบว่า เมื่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนานขึ้น ความเข้มข้นของแคลเซียมจะมีค่าลดลง แคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1,283 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะลดลงจนเหลือ 721 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน โดยแคลเซียมในสารละลายเกิดมาจากสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือมี C_2S , C_3S และ C_3A เป็นองค์ประกอบหลัก และบางส่วนอาจเกิดจากการละลายของ C_4AF และยิปซั่ม [5] เมื่อระยะเวลาไฮเดรชันของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ปริมาณของแคลเซียมจะลดลงอย่างต่อเนื่อง สาเหตุมาจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสารละลายจะใช้แคลเซียมในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเปลี่ยนไปเป็น CSH และ CAH [16, 18-22]

เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ 10%, 20% และ 30% พบว่า จะมีความเข้มข้นของแคลเซียมต่ำกว่าในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ เนื่องมาจากปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสารละลายลดลง แคลเซียมที่มาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงลดลง และการใส่เถ้าแกลบสังเคราะห์ซึ่งเป็นวัสดุปอสโซลาน SiO_2 ที่อยู่ในเถ้าแกลบสังเคราะห์ ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาปอสโซลานขึ้นได้อีก [11] ทำให้ปริมาณแคลเซียมในสารละลายมีน้อยกว่าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ และเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ปริมาณแคลเซียมจะลดลงเหมือนกับสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว โดยความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 30% มีแคลเซียมที่

ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ เท่ากับ 1,202 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน แคลเซียมลดลงเหลือ 501 มิลลิกรัมต่อลิตร

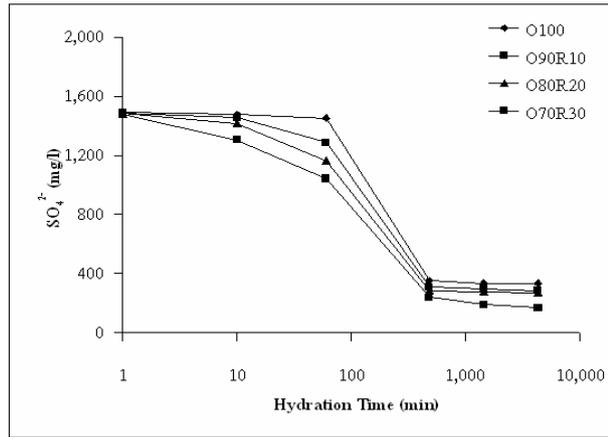
การผสมกากตะกอนจากโรงหุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงไปในแคลเซียมที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ มีความเข้มข้นต่ำกว่าสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีการผสมกากตะกอนโลหะหนัก เพราะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของแต่ละอัตราส่วนในสารละลายมีปริมาณลดลง จึงทำให้มีความเข้มข้นของแคลเซียมที่ระยะเวลาไฮเดรชันที่ 1 นาที่ต่ำกว่า และเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันนานขึ้น ปริมาณของแคลเซียมจะลดลงเหมือนกับสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่า สารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการเติมสังกะสีสังเคราะห์จะมีปริมาณซัลเฟต และแคลเซียมลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเป็นเพราะว่า สังกะสีสังเคราะห์เข้าไปทำปฏิกิริยากับซัลเฟต ทำให้ปริมาณของซัลเฟตลดลง [16] ซึ่งทำให้ C_3A ที่เป็นสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อยู่ในสารละลายสามารถทำปฏิกิริยาและเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว [15] ปริมาณแคลเซียมจึงลดลง โดยปริมาณแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากตะกอนจากโรงหุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ มีค่าเท่ากับ 1,042 และ 1,162 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน แคลเซียมลดลงเหลือ 421 และ 461 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข)-(ค)

4.1.5 ความเข้มข้นของซิลิกอน

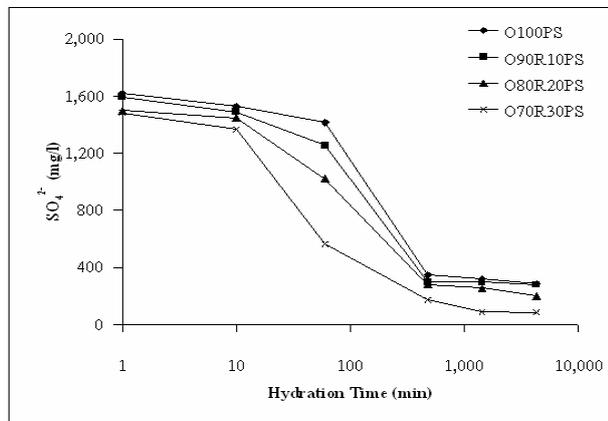
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในสภาวะที่ไม่มีและมีการกากตะกอนจากโรงหุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน พบว่า ซิลิกอนจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น [22] ซิลิกอนของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 0%, 10%, 20% และ 30% ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) มีค่าที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที่ เท่ากับ 2.626, 2.930, 3.529 และ 4.411 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนความเข้มข้นของซิลิกอนที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน มีค่าเท่ากับ 0.986, 1.027, 1.043 และ 1.072 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สาเหตุที่ซิลิกอนมีค่าลดลงเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_2S , C_3S ที่เกิดเป็น CSH [5] หรือในกรณีที่มีการเติมเถ้าแกลบสังเคราะห์ก็จะมีการทำปฏิกิริยาปอสโซลานได้อีกด้วย [11] ดังนั้นเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น ซิลิกอนจึงมีค่าลดลง และเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ จะพบได้ว่า มีความเข้มข้นของซิลิกอนมากกว่าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ เนื่องจากปริมาณซิลิกอนที่เพิ่มขึ้นส่วนหนึ่งน่าจะมาจากการชะละลายซิลิกอนของ SiO_2 ที่อยู่บนผิวของเถ้าแกลบสังเคราะห์ออกมาทำปฏิกิริยาปอสโซลาน และองค์ประกอบหลักของ

แก้วเคลือบสังเคราะห์เป็น SiO_2 ซึ่งมีปริมาณของซิลิกอนมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้น ซิลิกอนของสารละลายที่มีการแทนที่ด้วยแก้วเคลือบสังเคราะห์ 10%, 20% และ 30% จึงมีค่ามากกว่าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยแก้วเคลือบสังเคราะห์

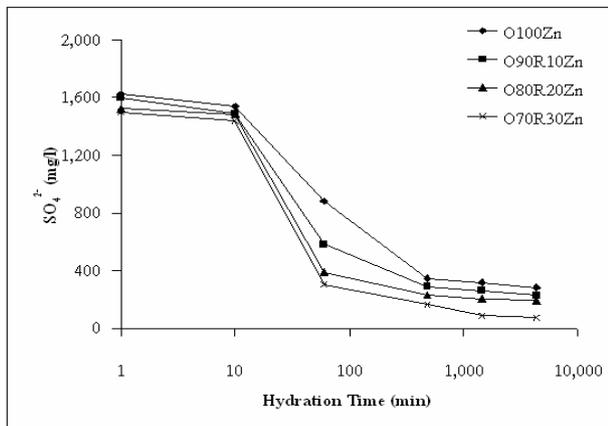
เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงไป พบว่า ซิลิกอนในสารละลายจะมีค่าต่ำกว่าสารละลายที่ไม่มีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก เนื่องจากการเติมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงไป ทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแก้วเคลือบสังเคราะห์ลดลง ปริมาณของ Ca(OH)_2 ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง สภาพความเป็นต่างของสารละลายจึงลดลง ซิลิกอนที่จะละลายออกมาจากแก้วเคลือบสังเคราะห์ลดลง ทำให้ซิลิกอนของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าเริ่มต้นที่ต่ำกว่า โดยซิลิกอนของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่าเท่ากับ 2.439 และ 1.151 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน ซิลิกอนลดลงเหลือ 0.477 และ 0.231 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข)-(ค) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Asavapisit และ Rungrit [15] และอรพร จันทร์เพ็ญกุล [28] ที่พบว่า การเติมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10 ในก้อนหล่อแข็งที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่า ก้อนหล่อแข็งของเสียยังมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างช้าๆ ในช่วงแรก แสดงให้เห็นว่ายังมีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่ ทำให้ปริมาณซิลิกอนในสารละลายลดลง อีกทั้งซิลิกอนในสารละลายอาจเกิดการรวมตัวกับสังกะสีที่อยู่ในกากตะกอนโลหะหนักเกิดเป็น Insoluble Zinc Silicate Gel [29] ได้อีกด้วย



(ก)



(ข)



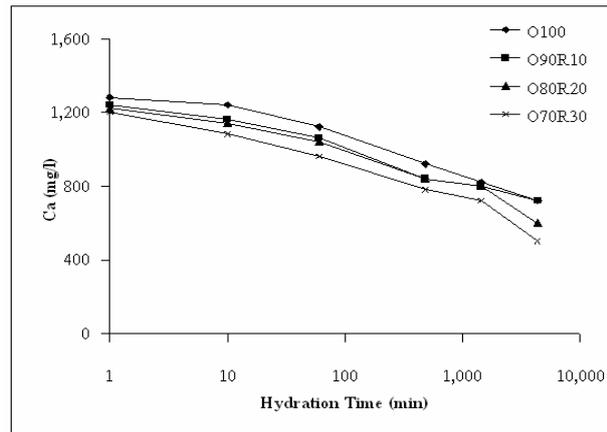
(ค)

รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

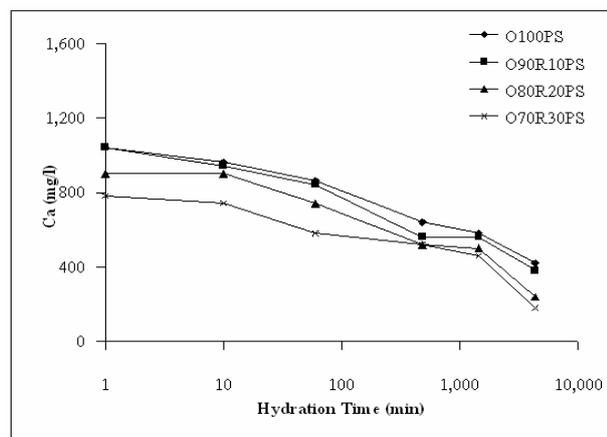
(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

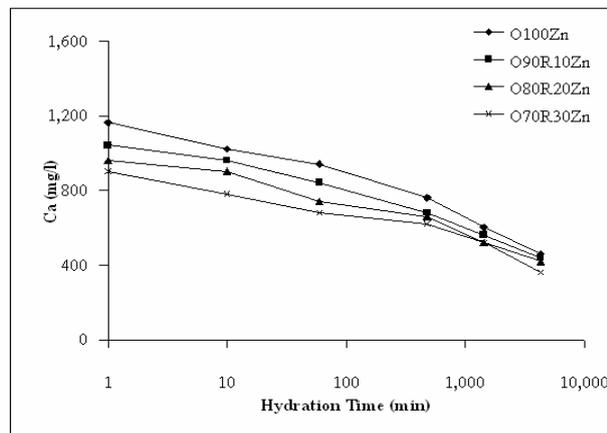
(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



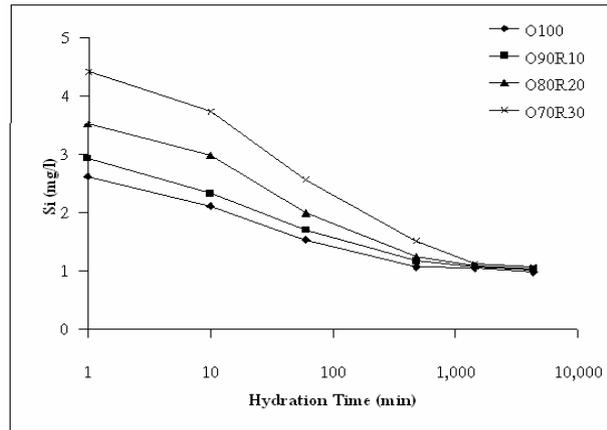
(ค)

รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

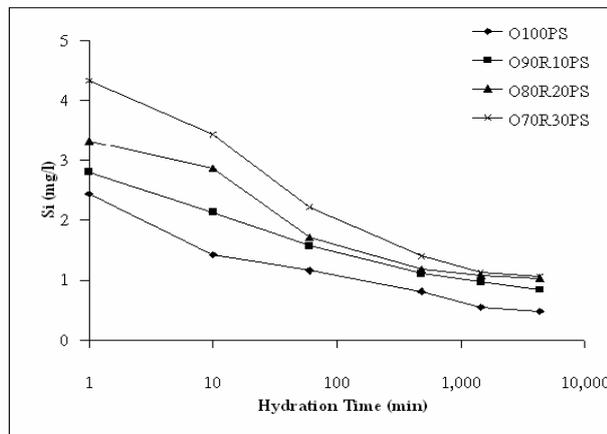
(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

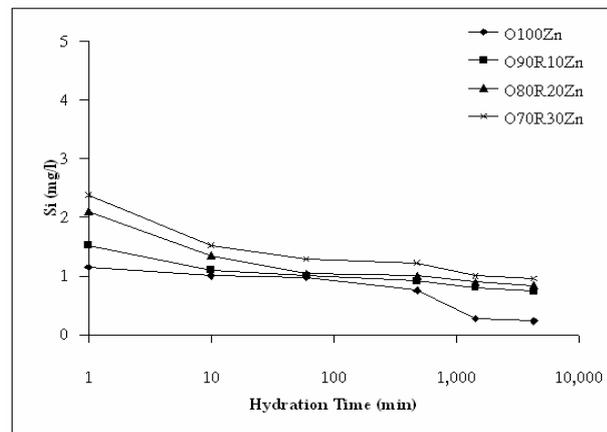
(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

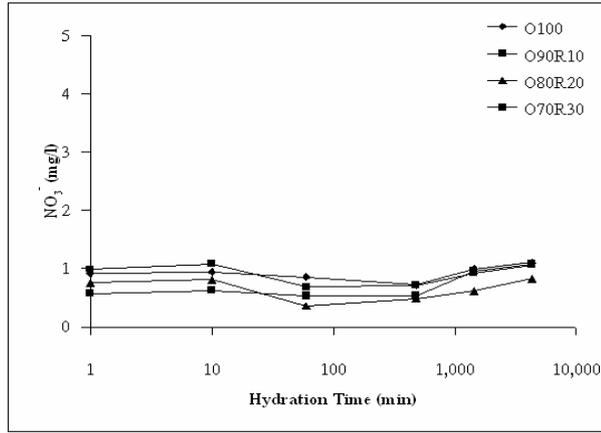
(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

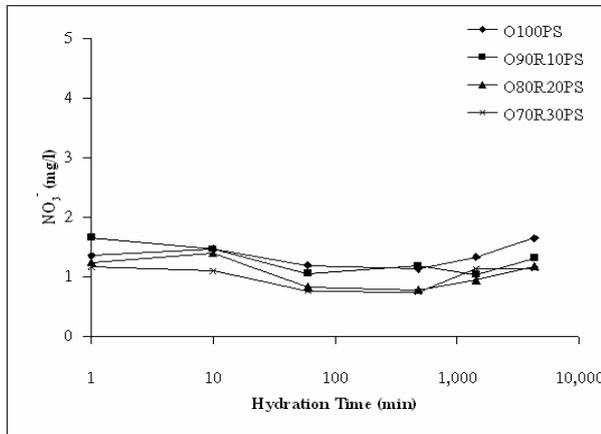
4.1.6 ความเข้มข้นของไนเตรท

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) จะเห็นได้ว่าไนเตรทที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความเข้มข้นของไนเตรทที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่าเท่ากับ 0.913 มิลลิกรัมต่อลิตร และหลังจากนั้นค่าที่ได้ก็มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ โดยไนเตรทที่ได้มาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งงานวิจัยของ Diez และคณะ [30] ได้ทำการศึกษา Pore Solution พบว่า สารละลายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณของไนเตรทอยู่ด้วย เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ 10%, 20% และ 30% พบว่า ไนเตรทที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าค่าไนเตรทของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว และแนวโน้มที่ได้ก็มีลักษณะเดียวกัน คือมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาไฮเดรชัน ไนเตรทในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ 10%, 20% และ 30% มีค่าที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที เท่ากับ 0.990, 0.755 และ 0.577 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ในเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่นำมาแทนที่ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีไนเตรทเป็นองค์ประกอบที่น้อยกว่าสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว

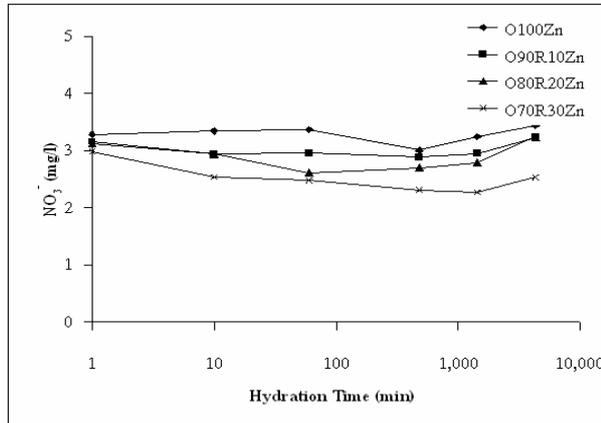
เมื่อมีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข)-(ค) ค่าไนเตรทที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีและมีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ โดยปริมาณของไนเตรทที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ จะมีค่าที่ระยะเวลาไฮเดรชันที่ 1 นาที เท่ากับ 1.352 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าค่าไนเตรทที่ไม่มีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก และไนเตรทในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ จะมีค่าที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที เท่ากับ 3.281 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบและไม่มีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก และหลังจาก 1 นาที แนวโน้มที่ได้ก็มีค่าค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกัน โดยไนเตรทของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ จะมีค่าสูงกว่าสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่ไม่มีและมีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบ เนื่องจากสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ที่นำมาผสม ได้สังเคราะห์มาจากสังกะสีในเตรท ซึ่งตกตะกอนโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยสังกะสีไฮดรอกไซด์นี้อาจจะมีผลึกของ Zinc Nitrate Hydroxide Hydrate ($Zn_5(NO_3)_2(OH)_8 \cdot 2H_2O$), ZnO และ $NaNO_3$ [16] ไนเตรทที่ได้จึงมีค่าสูงกว่า และอาจเกิดจากการละลายของสารดังกล่าวในสภาวะที่มีค่า pH สูงๆ จากการทดลอง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และตั้งกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

4.1.7 ความเข้มข้นของสังกะสี

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) พบว่า สังกะสีมีค่าต่ำตลอดการทดลอง โดยที่สารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 0%, 10%, 20% และ 30% มีความเข้มข้นของสังกะสีที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที เท่ากับ 0.093, 0.088, 0.068 และ 0.067 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชันที่ 3 วัน มีค่าเท่ากับ 0.127, 0.112, 0.117 และ 0.115 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสังกะสีที่มีอยู่อาจมาจากการปนเปื้อนของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Murat และ Sorrentino [31] ได้มีการผสมโครเมียม, ตะกั่ว, แคลเซียม และสังกะสีในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยพบว่าโลหะหนักทั้ง 4 จะจับอยู่บน C_2S , C_3S และ C_3A เป็นส่วนใหญ่ และเมื่อนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาทำการทดสอบพบว่า มีการรั่วไหลของโลหะออกมบางส่วน สำหรับสังกะสีจะมีการรั่วไหลออกมาประมาณ 0.007 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบสังเคราะห์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่า มีค่าความเข้มข้นของสังกะสีลดลง เนื่องจากสัดส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในสารละลายมีค่าลดลง

ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 0%, 10%, 20% และ 30% ที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที มีค่าเท่ากับ 0.207, 0.099, 0.071 และ 0.071 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาไฮเดรชันที่ 3 วัน มีค่าเท่ากับ 0.637, 0.558, 0.374 และ 0.460 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในสารละลายมีค่า pH อยู่ในช่วง 12-13 ทำให้สังกะสีไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในกากตะกอน โลหะหนักละลายกลับออกมาได้ และเมื่อเวลาผ่านไปอาจจะเกิดกลไกการตรึงของสังกะสี ความเข้มข้นของสังกะสีในช่วงท้ายจึงมีค่าต่ำลง

ส่วนสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ 0%, 10%, 20% และ 30% ที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ค) พบว่า ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 1 นาที สังกะสีมีค่าค่อนข้างสูง เท่ากับ 36.150, 6.953, 4.380 และ 4.039 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากสังกะสีในสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์มีปริมาณมากถึง 703 กรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง และสารละลายมีค่า pH ที่สูง ดังนั้น จึงมีปริมาณสังกะสีละลายออกมาได้ทันทีเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันนานขึ้น ปริมาณสังกะสีจะลดลงเรื่อยๆ ที่ระยะเวลาไฮเดรชัน 3 วัน มีความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 2.042, 1.930, 1.795 และ 1.770 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพราะสังกะสีจะถูกตรึงอยู่ภายในโครงสร้างของสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qian และคณะ [29] พบว่า สังกะสีจะถูกตรึงได้ 3 ลักษณะ คือ

1. สังกะสีอาจรวมตัวกับซิลิกอน ไปอยู่ในรูป Insoluble Zinc Silicate Gel

2. สังกะสีอาจรวมตัวกับ CSH ซึ่งแสดงดังสมการ



3. สังกะสีอาจจะรวมตัวกับ Ca^{2+} ในสารละลายไปอยู่ในรูป $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}$

4.1.8 ความเข้มข้นของเหล็ก

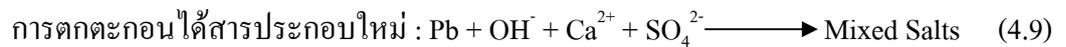
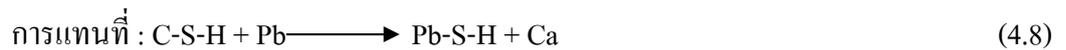
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายตลอดการทดลองมีค่าต่ำ และค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก)-(ค) โดยความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในสถานะที่ไม่มีและมีกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.028-0.100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายที่ไม่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ อาจมาจากองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนที่เป็น C_4AF โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและยิปซัมจะกลายเป็น Sulphoferrite [5] ส่วนความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบมาจากเหล็กที่อยู่ในกากตะกอน ซึ่งมีถึง 93 กรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง โดยในสารละลายเหล็กอาจจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ [27] ได้

4.1.9 ความเข้มข้นของโครเมียม

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมมีค่าต่ำตลอดการทดลองเช่นเดียวกับความเข้มข้นของเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก)-(ค) โดยโครเมียมในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในสถานะที่ไม่มีและมีกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.475-0.862 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยโครเมียมในสารละลายที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบมาจากกากตะกอนซึ่งมีปริมาณโครเมียม 42 กรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง แนวโน้มความเข้มข้นของโครเมียมเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันนานขึ้นคือ มีค่าลดลงเล็กน้อย โดยโครเมียมอาจจะซ่อนอยู่ในเส้นใยของ CSH [32] หรือรวมกับ Ca^{2+} ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็น CaCrO_4 [27, 33] ได้

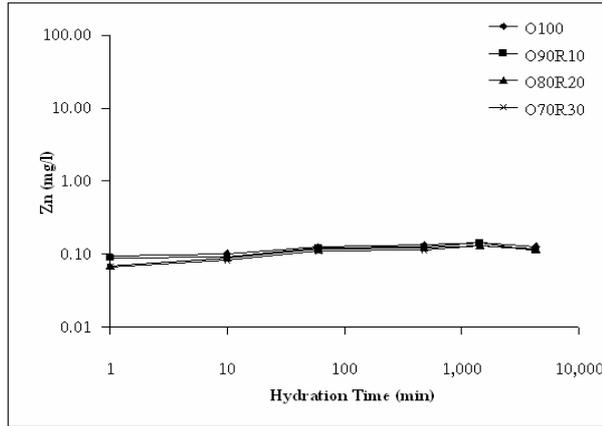
4.1.10 ความเข้มข้นของตะกั่ว

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก)-(ค) โดยความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในสถานะที่ไม่มีและมีกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.118-0.418 มิลลิกรัมต่อลิตร ตะกั่วในสารละลายที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบมาจากกากตะกอนซึ่งมีปริมาณตะกั่ว 6.32 กรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง แนวโน้มความเข้มข้นของตะกั่วเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นคือ มีค่าค่อนข้างลดลง เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไป ตะกั่วจากกากตะกอนบางส่วนอาจถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thevenin และ Pera [34] ได้ทำการศึกษาผลของตะกั่วในเตรทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุปอลิโซลานพบว่า ตะกั่วถูกตรึงอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีกลไกการตรึงดังนี้

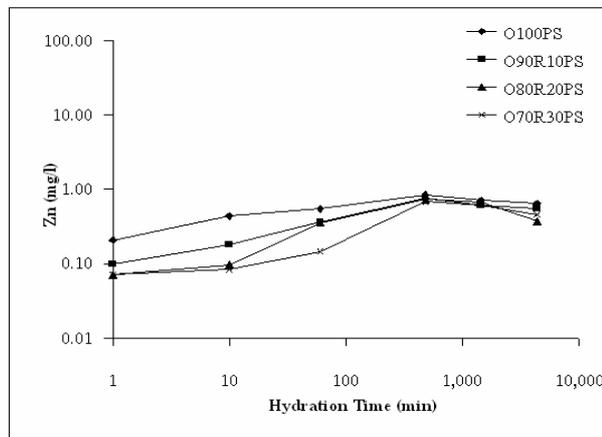


4.1.11 ความเข้มข้นของทองแดง

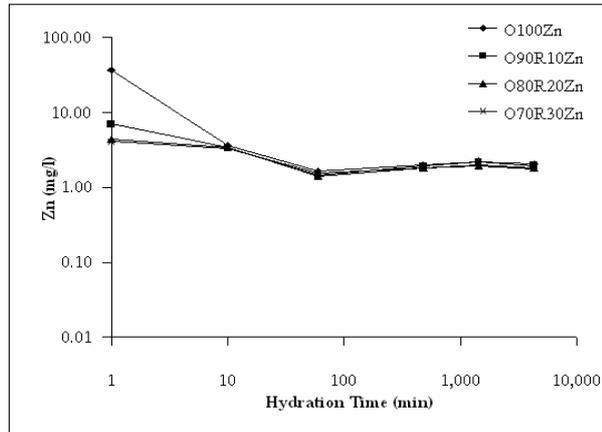
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของทองแดงมีค่าต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก)-(ค) โดยความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในสถานะที่ไม่มีและมีกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.008-0.051 มิลลิกรัมต่อลิตร ทองแดงในสารละลายที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบมาจากกากตะกอนซึ่งมีปริมาณทองแดง 0.45 กรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง แนวโน้มความเข้มข้นของทองแดงมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง จากงานวิจัยของ Mijno และคณะ [35] พบว่า ทองแดงจะตกตะกอนโดยไปแทนที่ Ca^{2+} ที่อยู่ใน CSH กลายเป็น CuH_2SiO_4



(f)



(g)



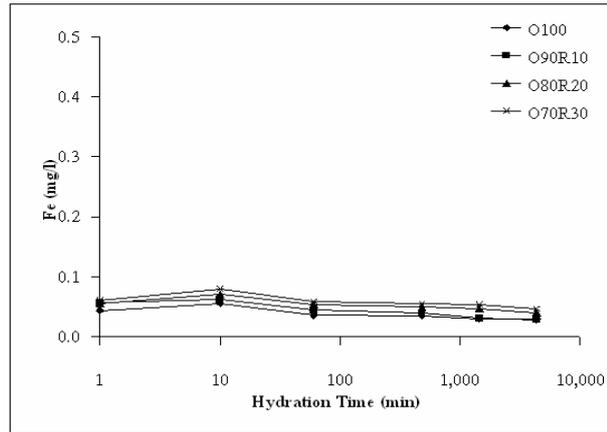
(h)

รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

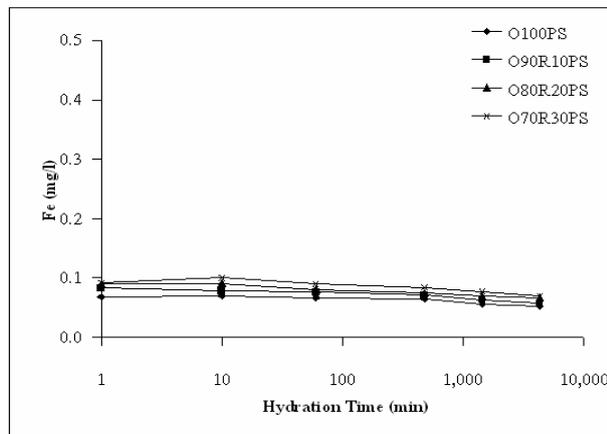
(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

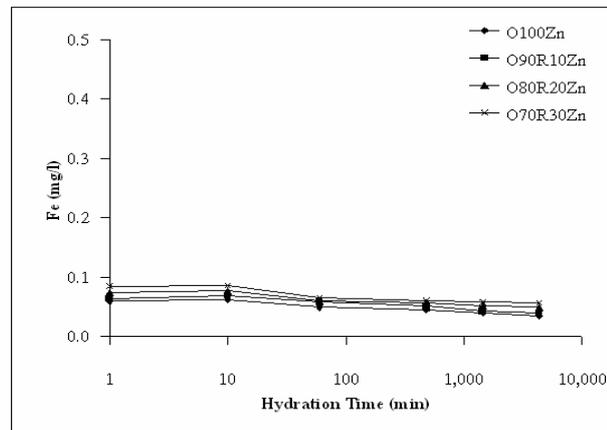
(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



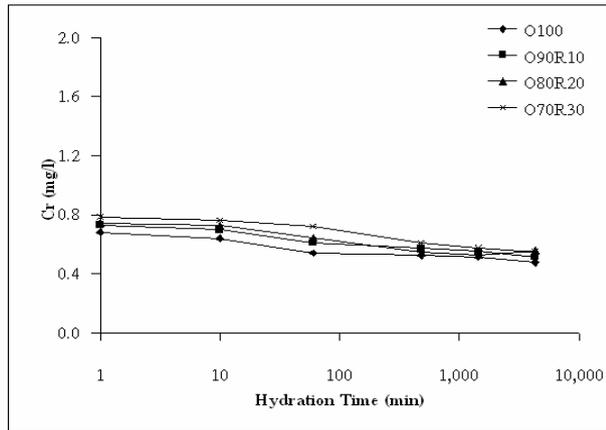
(ค)

รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

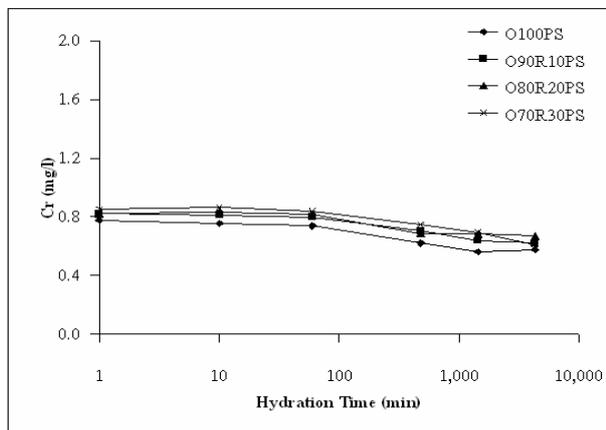
(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

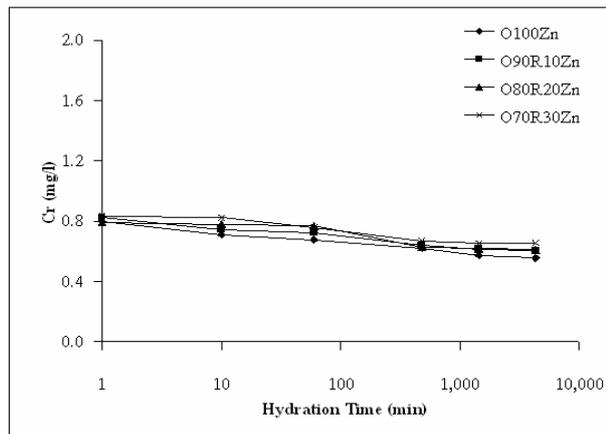
(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และถังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(f)



(g)



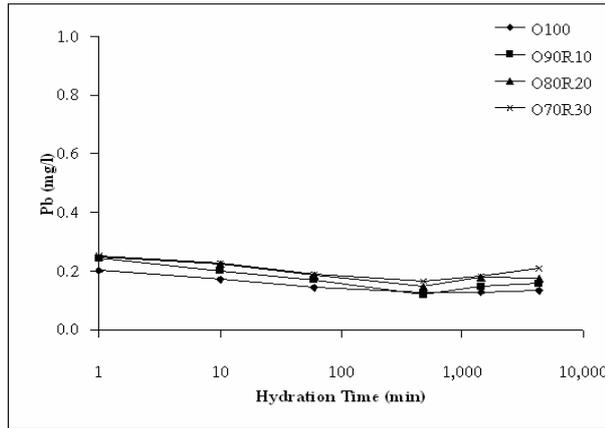
(h)

รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

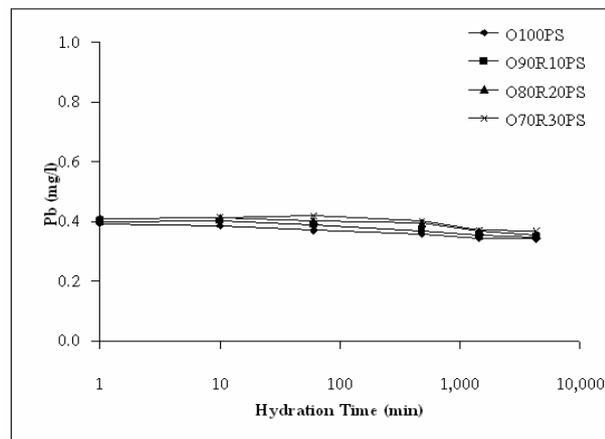
(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

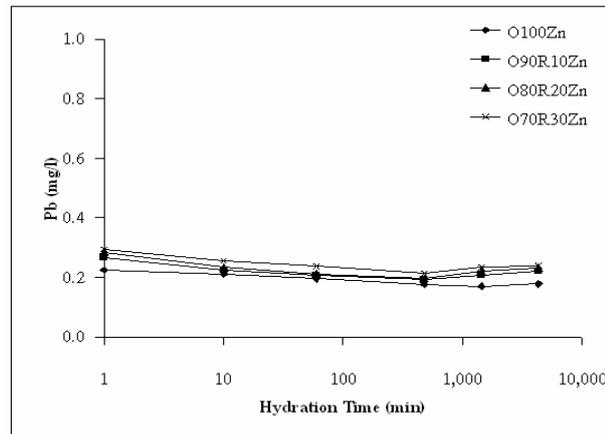
(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



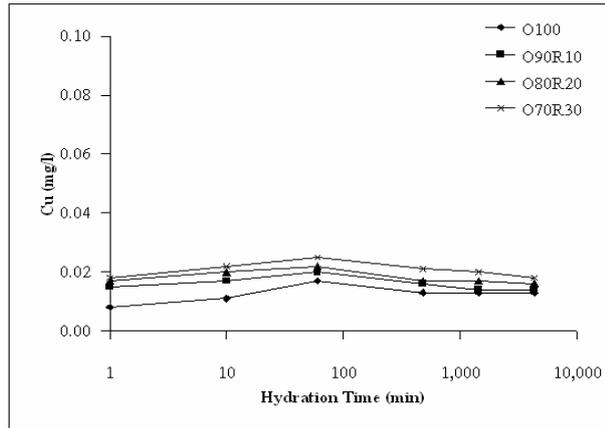
(ค)

รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

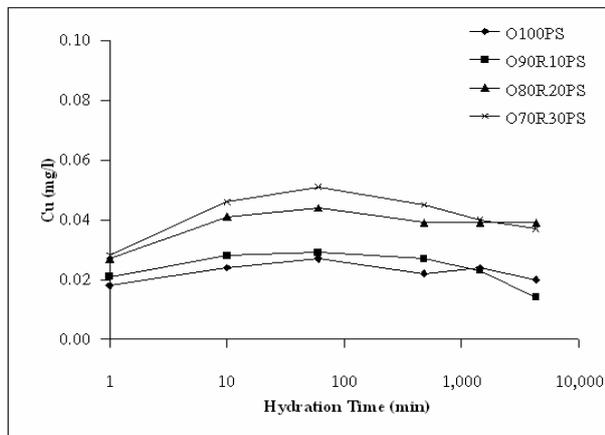
(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

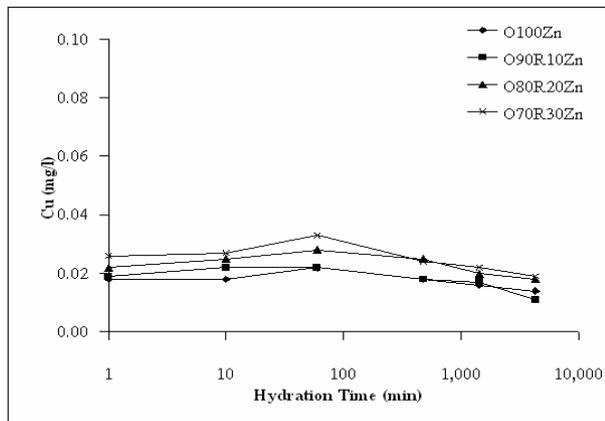
(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และถังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(f)



(g)



(h)

รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายปูนซีเมนต์, เถ้าแกลบ และกากตะกอนโลหะหนัก

(ก) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(ข) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ

(ค) ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ และตั้งกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาว, เถ้าแกลบสังเคราะห์, กากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต

เตรียมของผสมระหว่างปูนขาวผสมกับเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในอัตราส่วนผสม 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมีกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำและของแข็งทั้งหมด เท่ากับ 20 ทำการผสมเป็นระยะเวลา 1 นาที, 10 นาที, 1 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง, 1 วัน, 3 วัน, 7 วัน และ 10 วัน (จากรูปต่อไปนี้จะขอใช้สัญลักษณ์ ดังนี้ L แทนปูนขาว, R แทนเถ้าแกลบสังเคราะห์, PS แทนกากตะกอนจากโรงชุบ, Zn แทนสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์, NS แทนโซเดียมซิลิเกต และ NC แทนโซเดียมคาร์บอเนต)

4.2.1 ค่า pH

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ก) พบว่า ที่ระยะเวลา 1 นาที สารละลายมีค่า pH เท่ากับ 12.76, 12.90 และ 13.22 ที่ระยะเวลา 10 วัน pH ลดลงเหลือ 12.31, 12.45 และ 13.03 ตามลำดับ ซึ่งค่า pH เริ่มต้นมีค่าสูงกว่า 12.50 เพราะในสารละลายที่มีปูนขาวจะมีส่วนประกอบของ Ca(OH)_2 ซึ่งสามารถแตกตัวได้ [36] ดังสมการ



จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมคาร์บอเนตจะมีค่า pH สูงสุด รองลงมาคือ สารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต และสุดท้ายคือสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่ไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยา โดยค่า pH ของโซเดียมคาร์บอเนตเมื่อผสมกับน้ำจะมีค่า pH เท่ากับ 11.15 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของโซเดียมซิลิเกตที่ผสมกับน้ำที่มีค่าเท่ากับ 11.01 และเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น ค่า pH ของสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในทุกสถานะจะมีแนวโน้มลดลง โดยค่า pH ของสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมคาร์บอเนตจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะค่า pH สูงมาก ทำให้เกิดการทำลายพันธะของ SiO_2 ในเถ้าแกลบสังเคราะห์ออกมาได้ทันที Ca(OH)_2 ในปูนขาวจึงทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ได้ ส่งผลให้ค่า pH ลดลงเรื่อยๆ แต่ค่า pH ของสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา

ด้วยโซเดียมซิลิเกตและไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่า ในช่วง 1 ชั่วโมงแรก pH มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่า pH เกิดจากการแตกตัวของปูนขาวในช่วงแรกยังไม่เพียงพอต่อการทำลายพันธะ SiO_2 ของแก้วเคลือบสังเคราะห์ เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้น ปูนขาวสามารถแตกตัวได้มากขึ้น ทำให้ค่า pH สูงขึ้น จนเพียงพอต่อการทำลายพันธะ SiO_2 ในแก้วเคลือบสังเคราะห์ ดังนั้น Ca^{2+} และ SiO_2 จึงเริ่มทำปฏิกิริยาปอสโซลานกันตามปกติ [11] ดังสมการ



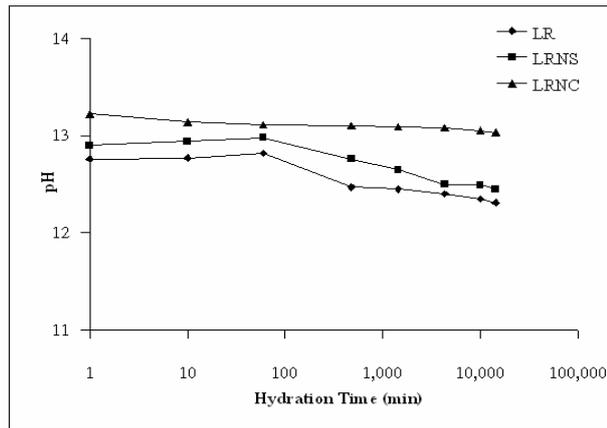
ส่งผลให้ Ca(OH)_2 ที่เหลืออยู่มีค่าน้อยลงเรื่อยๆ pH จึงมีค่าลดลง

เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ข)-(ค) พบว่า ค่าที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่ไม่มีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก แต่ส่วนใหญ่จะมีค่า pH ต่ำกว่าที่ไม่มีการเติมกากตะกอนโลหะหนักเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ากากตะกอนโลหะหนักไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อค่า pH ของสารละลายปูนขาวผสมกับแก้วเคลือบสังเคราะห์ โดยค่า pH ในสารละลายปูนขาวผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ ในสถานะไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 12.73, 12.81 และ 13.18 ที่ระยะเวลา 10 วัน pH ลดลงเหลือ 12.28, 12.48 และ 13.00 ตามลำดับ และค่า pH ในสารละลายปูนขาวผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ในสถานะไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 12.56, 12.83 และ 13.13 ที่ระยะเวลา 10 วัน pH ลดลงเหลือ 12.11, 12.70 และ 12.85 ตามลำดับ

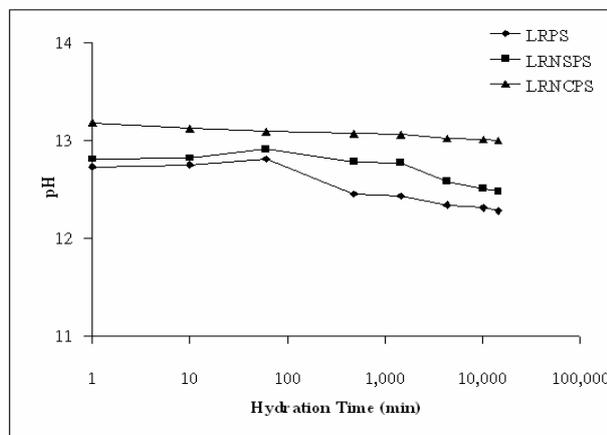
4.2.2 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ ที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก)-(ค) โดยพบว่า ค่าที่ได้จะสอดคล้องกับค่า pH ในทุกๆ สถานะ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมแก้วเคลือบสังเคราะห์ที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 744, 1,547 และ 2,244 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ลดลงเหลือ 509, 1,098 และ 2,040 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

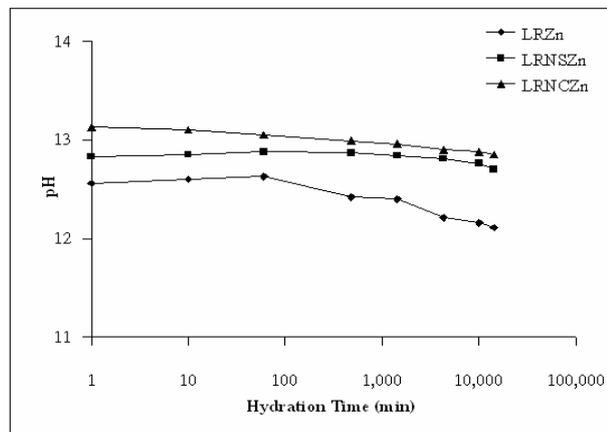
ส่วนสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ ในสถานะไม่มี และมีการกระตุ้นปฏิกิริยาค้ำโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 727, 1,471 และ 2,214 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ลดลงเหลือ 506, 1,305 และ 2,006 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์เมื่อมีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ในสถานะไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาค้ำโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 714, 1,505 และ 2,134 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ลดลงเหลือ 553, 1,280 และ 1,760 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



(f)



(g)



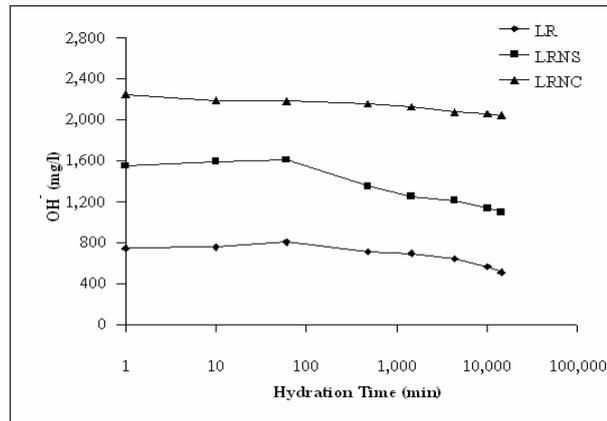
(h)

รูปที่ 4.12 ค่า pH ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก

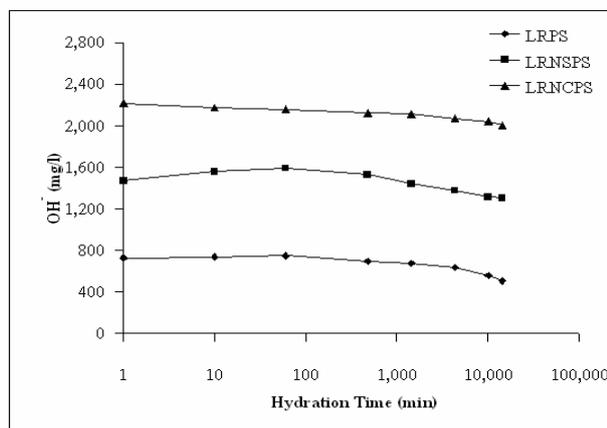
(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

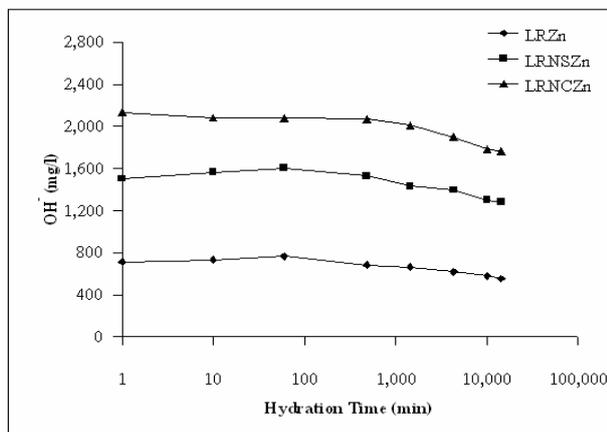
(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก

(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

4.2.3 ความเข้มข้นของซัลเฟต

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) โดยที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 452, 516 และ 486 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 10 วัน ซัลเฟตลดลงเหลือ 252, 295 และ 288 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปริมาณของซัลเฟตจะลดลง โดยซัลเฟตในสารละลายอาจมาจากปูนขาวและเถ้าแกลบสังเคราะห์ เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายที่มีปูนขาวหรือเถ้าแกลบสังเคราะห์เพียงอย่างเดียว พบว่ามีซัลเฟตอยู่ประมาณ 355 และ 294 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ซัลเฟตมีค่าลดลง เพราะซัลเฟตจะสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวแล้วตกตะกอนเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้ [36] ดังแสดงในสมการ



ซัลเฟตในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา มีค่าต่ำกว่าที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมซิลิเกต เพราะในสภาวะที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา ซัลเฟตจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมจากปูนขาว เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟตได้มากกว่าในสารละลายที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา เนื่องจากการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมซิลิเกต ทำให้ค่า pH ของสารละลายสูงขึ้น พันธะของ SiO_2 ของเถ้าแกลบสังเคราะห์จึงสามารถละลายออกมาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมได้มากขึ้น [37] ทำให้อัตราการเกิดแคลเซียมซัลเฟตลดลง ค่าซัลเฟตจึงมีค่าสูงกว่าในสภาวะที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา ซึ่งในสารละลายที่มีการเติมโซเดียมซิลิเกตจะมีค่าซัลเฟตสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ เนื่องมาจากโซเดียมซิลิเกตสามารถทำลายพันธะ SiO_2 ของเถ้าแกลบสังเคราะห์ได้เหมือนกับการเติมโซเดียมคาร์บอเนต และยังมี $(\text{SiO}_4)^{4-}$ อิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมได้ทันที [37, 38] ดังนั้น ปริมาณของแคลเซียมที่จะไปทำปฏิกิริยากับซัลเฟตจึงลดลง ปริมาณซัลเฟตจึงเหลืออยู่มากกว่า

ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต และมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับไม่เติมกากตะกอนโลหะหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข)-(ค) ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต และมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 428, 509 และ 461 มิลลิกรัมต่อลิตร และซัลเฟตจะค่อยๆ ลดลง จนถึง

ระยะเวลา 1 วัน มีค่าเท่ากับ 317, 370 และ 333 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ระยะเวลา 10 วัน ซัลเฟตลดลงเหลือ 20, 42 และ 34 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต และมีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ที่ระยะเวลา 1 นาที่ มีค่าเท่ากับ 400, 458 และ 417 มิลลิกรัมต่อลิตร ซัลเฟตจะค่อยๆ ลดลง จนถึงระยะเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 308, 355 และ 323 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ระยะเวลา 10 วัน ซัลเฟตลดลงเหลือ 15, 37 และ 29 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การลดลงอย่างรวดเร็วของซัลเฟต เนื่องมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ที่มีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก โดยมีปริมาณของสังกะสีอยู่ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสังกะสีกับซัลเฟตเกิดเร็วขึ้น จึงทำให้ซัลเฟตลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการลดลงอย่างรวดเร็วของซัลเฟต ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Asavapisit และคณะ [16] ที่พบว่า สารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการผสมสังกะสีสังเคราะห์ ปริมาณของซัลเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็ว และซัลเฟตยังสามารถจับตัวกับสังกะสีที่อยู่ในกากตะกอนโลหะหนัก เกิดเป็นสังกะสีซัลเฟตได้ [27] ดังสมการ



4.2.4 ความเข้มข้นของแคลเซียม

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์กับระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) แคลเซียมที่ระยะเวลา 1 นาที่ มีค่าเท่ากับ 1,042 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีปริมาณลดลง ที่ระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 240 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแคลเซียมที่มีอยู่ในสารละลายมาจากปูนขาว และจะถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาปอสโซลานกับซิลิกอนในเถ้าแกลบสังเคราะห์ แคลเซียมจึงลดลงเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น [11] ดังแสดงในสมการ



และเมื่อมีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตลงไป พบว่า สารละลายที่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา จะมีค่าแคลเซียมน้อยกว่าที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา โดยสารละลายที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมคาร์บอเนตจะมีค่าแคลเซียมสูงกว่า สารละลายที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกต โดยความเป็นต่างของสารละลายที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยามีค่าสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาปอสโซลานสูง ทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมเหลือต่ำกว่า [37] ส่วนความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตจะมีค่า

น้อยที่สุด เพราะในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ยังมีซิลิกอนอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมในสารละลายได้ทันที ซึ่งสอดคล้องกับการผลการทดลองของ Fan และคณะ [38] ที่ใช้เกลือผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ พบว่า เมื่อปริมาณของโซเดียมซัลไฟด์สูงขึ้น ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะลดลง โดยแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลไฟด์หรือโซเดียมคาร์บอเนตที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 108 และ 184 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่ระยะเวลา 10 วัน ไม่พบปริมาณแคลเซียมเหลืออยู่เลย

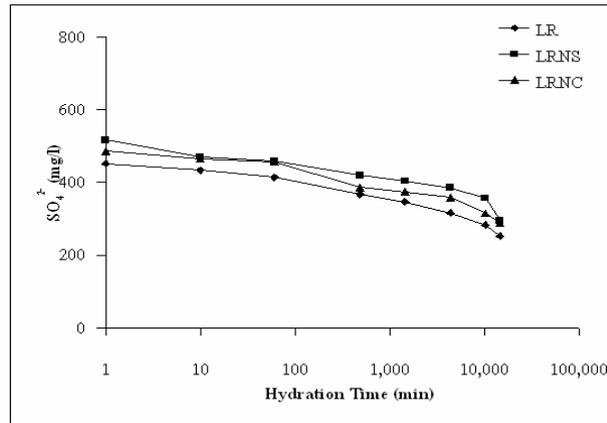
เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงในสารละลาย พบว่า แคลเซียมมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น เช่นเดียวกับการไม่เติมกากตะกอนโลหะหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข)-(ค) สารละลายที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในสถานะที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 942 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 10 วัน แคลเซียมลดลงเหลือ 281 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลไฟด์และโซเดียมคาร์บอเนต ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 52 และ 176 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 10 วัน ไม่พบปริมาณแคลเซียมเหลืออยู่ สารละลายที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ในสถานะที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1,022 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 10 วัน แคลเซียมลดลงเหลือ 361 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลไฟด์และโซเดียมคาร์บอเนต ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 80 และ 184 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 10 วัน ไม่พบปริมาณของแคลเซียมเลย

4.2.5 ความเข้มข้นของซิลิกอน

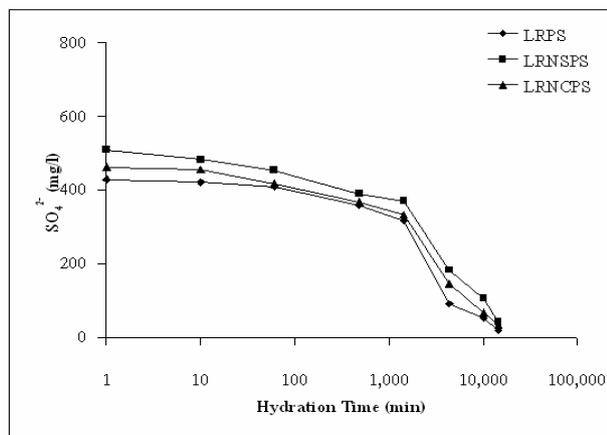
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก) ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 0.251 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 0.139 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของซิลิกอนเกิดจากสภาพความเป็นด่างของปูนขาวผสมกับน้ำไปทำลายพันธะของ SiO_2 จากผิวของเถ้าแกลบสังเคราะห์ ทำให้ซิลิกอนละลายออกมา แต่สภาพความเป็นด่างของปูนขาวยังไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างช้าๆ ซิลิกอนที่ละลายออกมาจึงมีปริมาณน้อย [37] ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลไฟด์และโซเดียมคาร์บอเนตที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 189.070 และ 0.572 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 0.365 และ 0.034 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลไฟด์และโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าสูงกว่าสถานะที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยา โดยสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ

ตั้งเคราะห์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาคู่ไฮดรอกซิลิกมีค่าสูงสุด รองลงมาคือในสถานะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาคู่ไฮดรอกซิลิกคาร์บอน เนื่องจากไฮดรอกซิลิกมีซิลิกอนอิสระ [37] และสถานะความเป็นต่างของไฮดรอกซิลิกยังสามารถทำลายพันธะ SiO_2 จากเก้าแถบตั้งเคราะห์ได้อีก แต่ไฮดรอกซิลิกคาร์บอนสามารถที่จะทำลายพันธะ SiO_2 จากเก้าแถบตั้งเคราะห์ได้เพียงอย่างเดียว

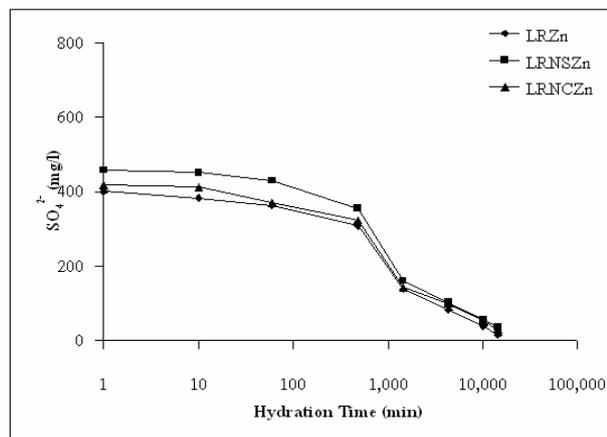
เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบหรือสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงในสารละลาย พบว่าซิลิกอนมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นเช่นเดียวกับการไม่เติมกากตะกอนโลหะหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข)-(ค) สารละลายที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาคู่ไฮดรอกซิลิกและไฮดรอกซิลิกคาร์บอน ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 0.200, 144.955 และ 0.404 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 10 วัน ซิลิกอนลดลงเหลือ 0.088, 0.319 และ 0.006 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนสารละลายที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาคู่ไฮดรอกซิลิกและไฮดรอกซิลิกคาร์บอน ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 0.140, 83.220 และ 0.375 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 10 วัน ซิลิกอนลดลงเหลือ 0.051, 0.278 และ 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



(ก)



(ข)



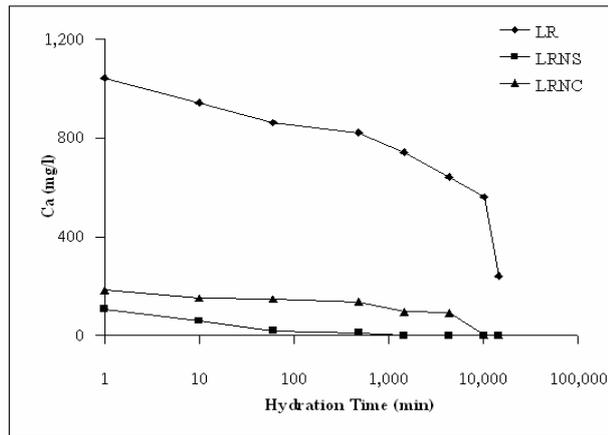
(ค)

รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก

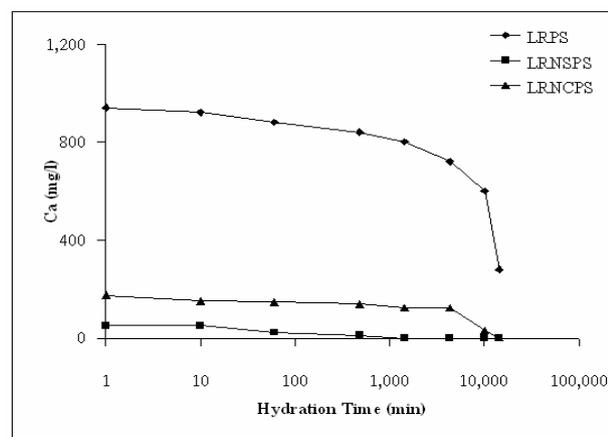
(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

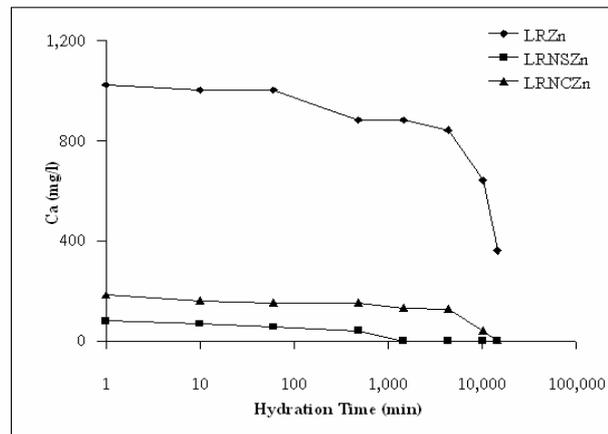
(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



(ค)

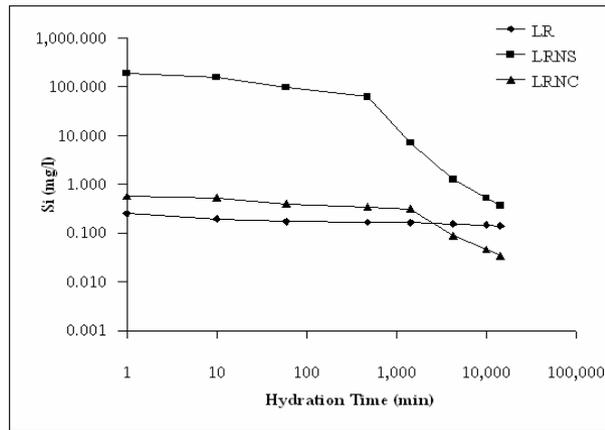
รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

และกากตะกอนโลหะหนัก

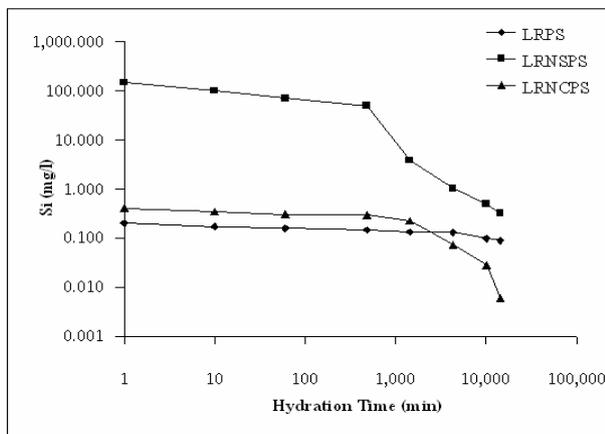
(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

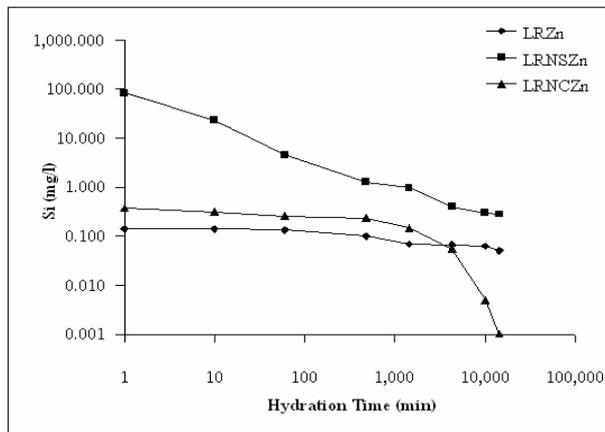
(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของซิลิกอนในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอน โลหะหนัก

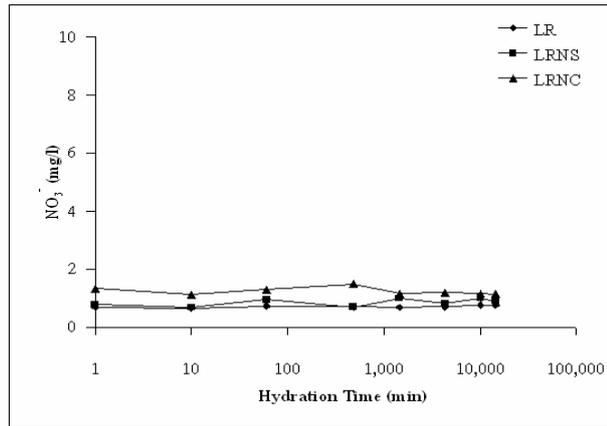
(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

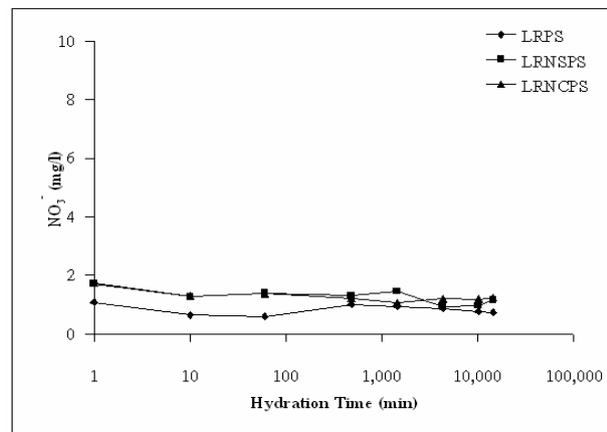
(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

4.2.6 ความเข้มข้นของไนเตรท

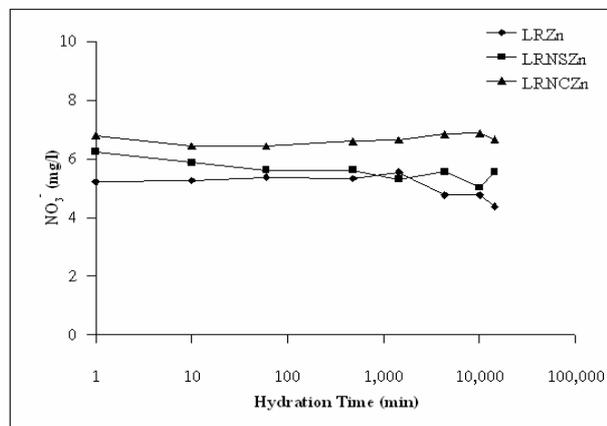
ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปุ๋ยขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในสภาวะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนต กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ก) มีค่าเริ่มต้นที่ระยะเวลา 1 นาที เท่ากับ 0.689, 0.770 และ 1.321 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปุ๋ยขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสภาวะที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตจะมีค่าสูงกว่าสารละลายปุ๋ยขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่ไม่มีกระตุ้นปฏิกิริยา เนื่องจากค่า pH เริ่มต้นที่สูงกว่า อาจทำให้ไนเตรทสามารถละลายออกมาได้มากกว่า และในสารละลายปุ๋ยขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนตที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ จะมีค่าสูงกว่าในสารละลายที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบและไม่มีเติมกากตะกอนโลหะหนัก เนื่องมาจากสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ที่ผสมลงไป อาจอยู่ในรูปผลึกของ Zinc Nitrate Hydroxide Hydrate ($Zn_5(NO_3)_2(OH)_8 \cdot 2H_2O$) และ $NaNO_3$ [16] เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ความเข้มข้นของไนเตรทมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาของปุ๋ยขาวและเถ้าแกลบสังเคราะห์ ในสภาวะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนต Ca^{2+} จากปุ๋ยขาว และ Na^+ จากสารกระตุ้นปฏิกิริยาสามารถรวมตัวกับไนเตรทเป็น $Ca(NO_3)_2$ [39] และ $NaNO_3$ [16] ได้อีกด้วย โดยความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปุ๋ยขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนต ที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 1.082, 1.714 และ 1.735 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปุ๋ยขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซัลเฟตและโซเดียมคาร์บอเนต ที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 5.214, 6.235 และ 6.796 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ข)-(ค)



(f)



(g)



(h)

รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นของไนเตรทในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

และกากตะกอน โลหะหนัก

(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

4.2.7 ความเข้มข้นของสังกะสี

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปฏิกิริยาของปฏิกิริยาของสังกะสีกับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) พบว่า สังกะสีมีค่าต่ำตลอดการทดลอง ที่ระยะเวลา 1 นาที มีความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 0.217 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 0.207 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปฏิกิริยาของสังกะสีกับระยะเวลาที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ข) พบว่า สังกะสีมีค่าต่ำตลอดการทดลอง ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 0.121 และ 0.150 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 0.093 และ 0.108 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสังกะสีที่มีอยู่อาจจะมาจากการปนเปื้อนของกระบวนการผลิตปฏิกิริยาของสังกะสี เพราะเมื่อนำปฏิกิริยาของสังกะสีมาทำการวิเคราะห์ พบว่า มีความเข้มข้นของสังกะสี, เหล็ก, โครเมียม, ตะกั่ว และทองแดงปะปนอยู่ด้วย แต่มีอยู่ในปริมาณที่น้อย ความเข้มข้นของสังกะสีที่ไม่มีการกระตุ้นปฏิกิริยามีค่าสูงกว่าในสารละลายที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ค) เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสังกะสีกับระยะเวลาของปฏิกิริยาของสังกะสีกับระยะเวลาเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้เกิด CSH ที่มีสมบัติในการยึดประสานและตรึงโลหะหนักในปริมาณที่ต่ำกว่า [37] ความสามารถในการตรึงสังกะสีจึงต่ำ

ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปฏิกิริยาของสังกะสีกับระยะเวลา เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังกะสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ข)-(ค) ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปฏิกิริยาของสังกะสีกับระยะเวลาที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบ ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 28.551, 2.258 และ 5.428 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 1.863, 0.288 และ 0.852 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สารละลายปฏิกิริยาของสังกะสีกับระยะเวลาที่มีการเติมสังกะสีไฮดรอกไซด์สังกะสีในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ค) พบว่า สังกะสีมีค่าต่ำตลอดการทดลอง ที่ระยะเวลา 1 นาที มีค่าเท่ากับ 49.950, 8.985 และ 10.805 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระยะเวลา 10 วัน มีค่าเท่ากับ 1.846, 0.360 และ 0.861 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยปริมาณของสังกะสีในกากตะกอนจากโรงชุบมีค่า 316 กรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสังกะสีในสังกะสีไฮดรอกไซด์สังกะสีคือ 703 กรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง

ความเข้มข้นของสังกะสีที่ลดลงอาจสัมพันธ์กับการลดลงของความเข้มข้นของซัลเฟต โดยสังกะสีอาจจะรวมตัวกับซัลเฟตเกิดเป็น $ZnSO_4$ [27] และสังกะสียังอาจถูกตรึงอยู่กับ CSH โดยมีกลไกการตรึงได้มี 3 ลักษณะ [29] คือ

1. สังกะสีอาจรวมตัวกับซิลิกอน ไปอยู่ในรูป Insoluble Zinc Silicate Gel

2. สังกะสีอาจรวมตัวกับ CSH ซึ่งแสดงดังสมการ



3. สังกะสีอาจจะรวมตัวกับ Ca^{2+} ในสารละลายไปอยู่ในรูป $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}$

4.2.8 ความเข้มข้นของเหล็ก

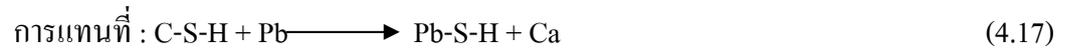
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายตลอดการทดลองมีค่าต่ำและค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ก)-(ค) โดยความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต และในสถานะที่ไม่มีและมีการกักตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.014-0.136 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2.9 ความเข้มข้นของโครเมียม

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก)-(ค) โดยความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต และในสถานะที่ไม่มีและมีการกักตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.382-0.931 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณโครเมียมจะมีความเข้มข้นลดลงเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยโครเมียมอาจจะซ่อนอยู่ในเส้นใยของ CSH [32] หรือรวมกับ Ca^{2+} ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์เกิดเป็น CaCrO_4 [27, 33] ได้

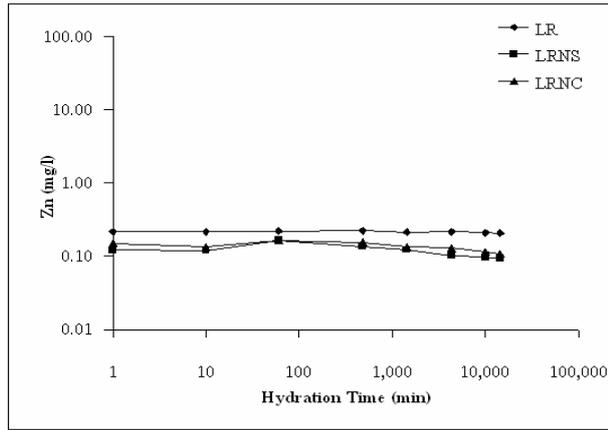
4.2.10 ความเข้มข้นของตะกั่ว

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ก)-(ค) โดยความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต และในสถานะที่ไม่มีและมีการกักตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.121-0.380 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าต่ำ มีสาเหตุมาจากตะกั่วถูกตรึงอยู่ในปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ ซึ่งน่าจะมีกลไกการตรึงเหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [34] คือ

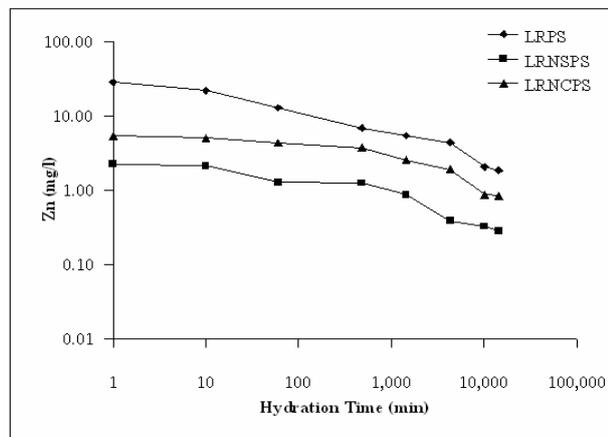


4.2.11 ความเข้มข้นของทองแดง

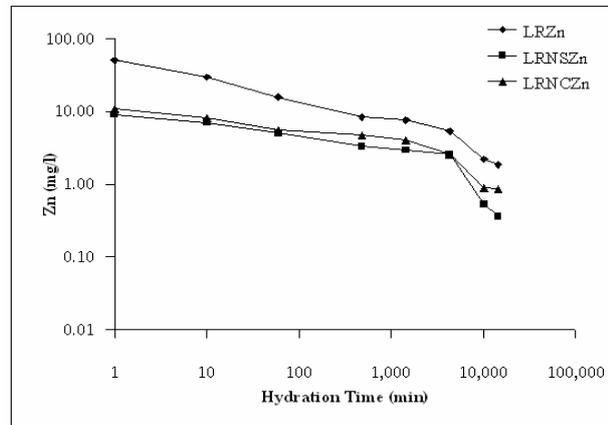
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของทองแดงมีค่าต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก)-(ค) โดยความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ในสถานะที่ไม่มีและมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต และในสถานะที่ไม่มีและมีการกักตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.008-0.040 มิลลิกรัมต่อลิตร แนวโน้มความเข้มข้นของทองแดงมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง โดยทองแดงอาจจะไปแทนที่ Ca^{2+} ที่อยู่ใน CSH เป็น Cu_2SiO_4 [35] ได้



(ก)



(ข)



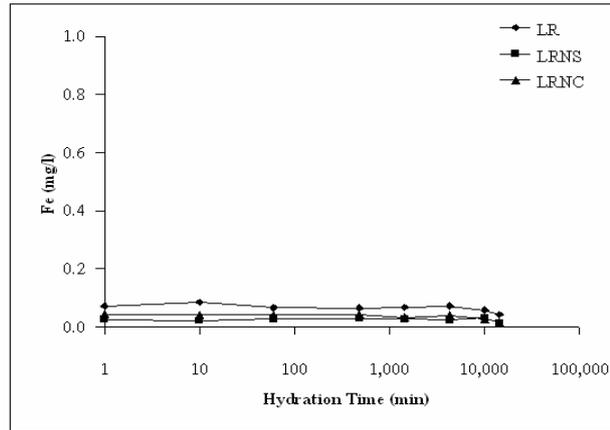
(ค)

รูปที่ 4.18 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และ กากตะกอนโลหะหนัก

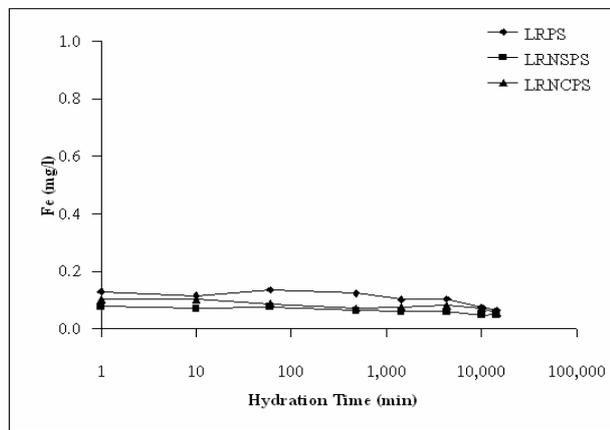
(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

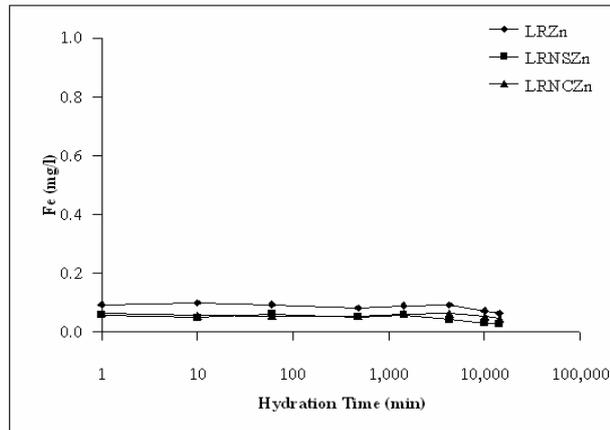
(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(f)



(g)



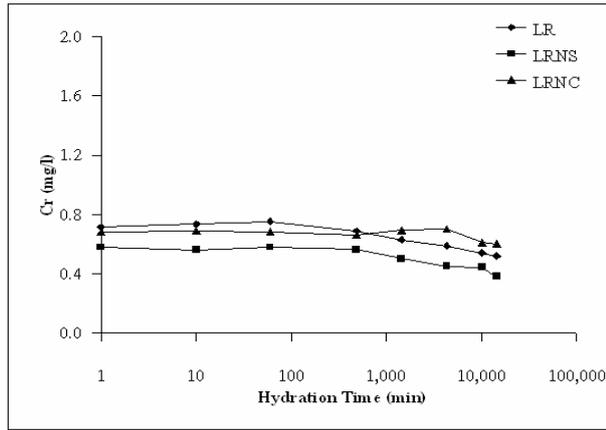
(h)

รูปที่ 4.19 ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอน โลหะหนัก

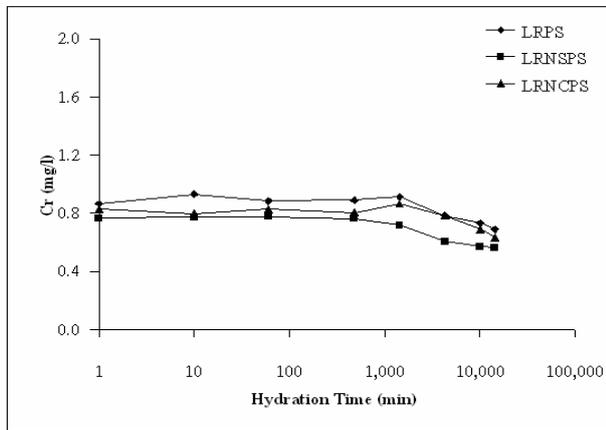
(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

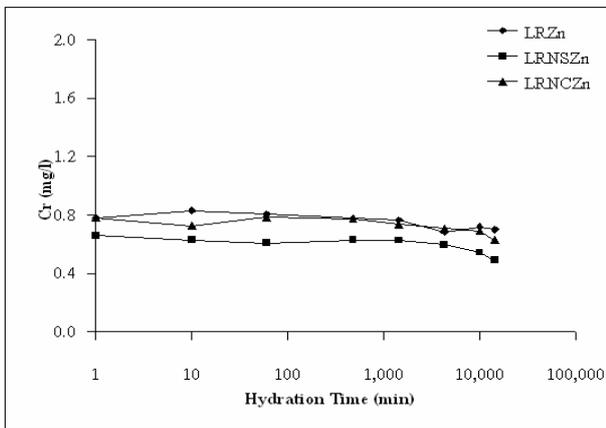
(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



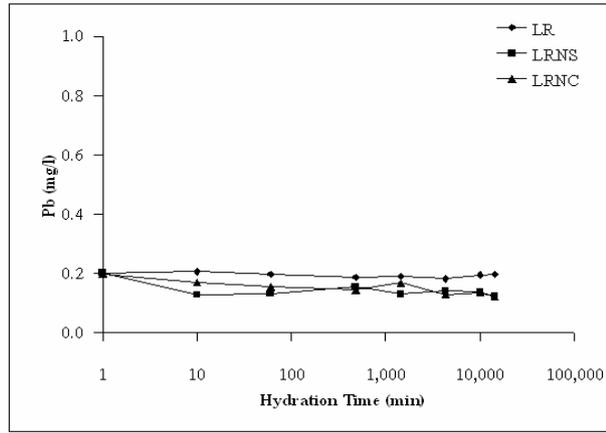
(ค)

รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก

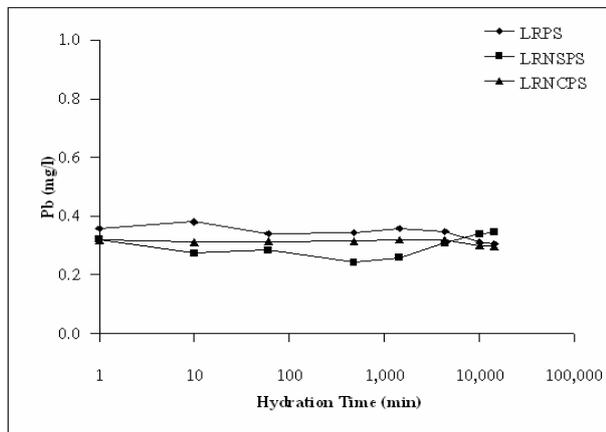
(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

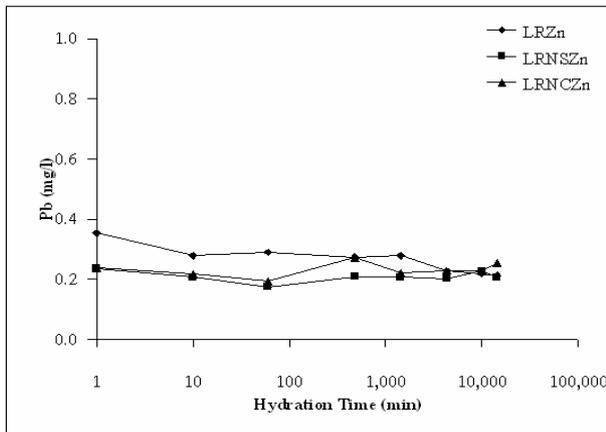
(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(ก)



(ข)



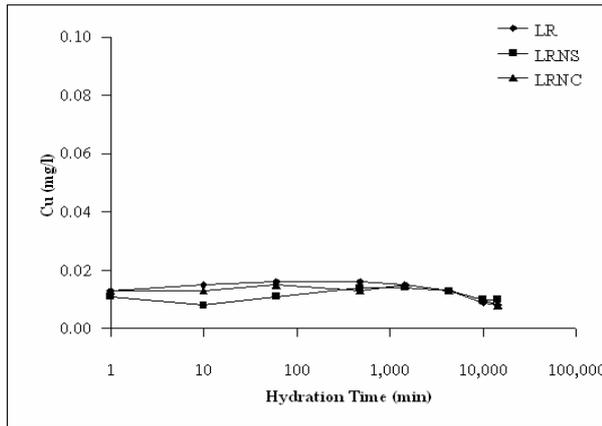
(ค)

รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก

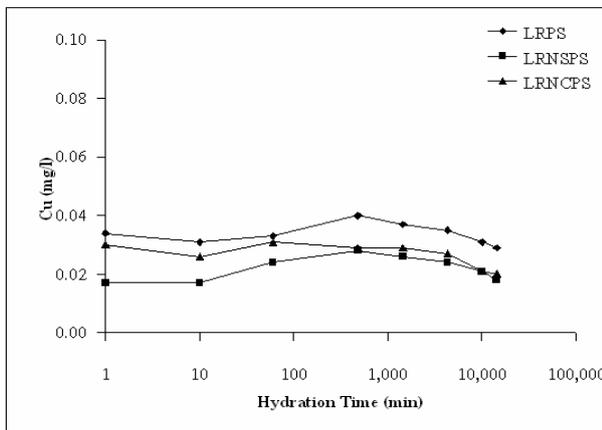
(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

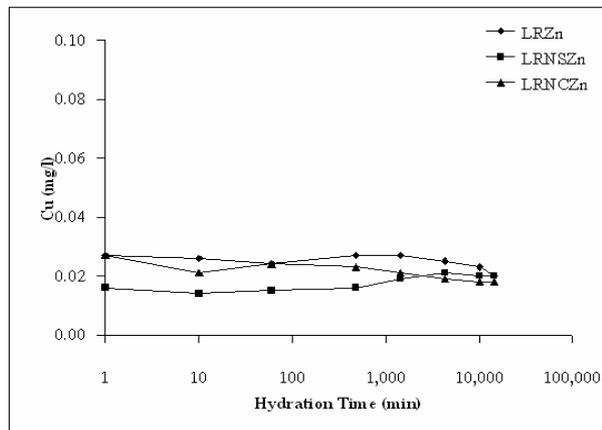
(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์



(f)



(g)



(h)

รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนโลหะหนัก

(ก) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา

(ข) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และกากตะกอนจากโรงชุบ

(ค) ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ สารกระตุ้นปฏิกิริยา และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

5.1.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอิออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เถ้าแกลบสังเคราะห์, กากตะกอนจากโรงชุบ และสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์

ความเข้มข้นของอิออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อระยะเวลาไฮเดรชันนานขึ้น ค่า pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก C_2S และ C_3S ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็น CSH และ $Ca(OH)_2$ โดย $Ca(OH)_2$ มีสมบัติเป็นด่าง ทำให้ค่า pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ความเข้มข้นของซัลเฟต, แคลเซียม และซิลิกอนจะมีค่าลดลง เพราะซัลเฟตถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็น Ettringite แคลเซียมและซิลิกอนทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็น CSH ส่วนความเข้มข้นของไนเตรทและโลหะหนักต่างๆ มีค่าต่ำตลอดการทดลอง

เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า ค่า pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ลดลงในช่วง 1 ชั่วโมงแรก โดยในช่วง pH 12-13 สังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับ OH^- ในสารละลายเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของ $Zn(OH)_3^-$ และ $Zn(OH)_4^{2-}$ ส่งผลให้ pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำลง ซึ่งสังกะสีทั้ง 2 รูป จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ที่อยู่รอบๆ ชั้นของ CSH ชัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดเป็นชั้นของ $CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$ ตกตะกอนอยู่บนบริเวณอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หลังจาก 1 ชั่วโมง น้ำสามารถซึมผ่านชั้นของ $CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$ เข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้เกิดการไฮเดรชันตามปกติ ค่า pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์จึงมีค่าสูงขึ้น

และเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ พบว่า ค่า pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ เพราะมีปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์น้อยลง ส่วนความเข้มข้นของซิลิกอนจะมีค่ามากกว่าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบสังเคราะห์ โดยปริมาณซิลิกอนที่เพิ่มขึ้นส่วนหนึ่งมาจากการชะละลายซิลิกอนของ SiO_2 ที่อยู่บนผิวของเถ้าแกลบสังเคราะห์ออกมาทำปฏิกิริยาปอสโซลานได้อีก สำหรับความเข้มข้นของอิออนอื่นๆ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกากตะกอนโลหะหนัก

5.1.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาว, เถ้าแกลบสังเคราะห์, กากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต

การเปลี่ยนแปลงค่า pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้น เนื่องจากค่า pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ถูกนำมาใช้ในการทำลายพันธะของ SiO_2 ในเถ้าแกลบสังเคราะห์ให้ละลายออกมาทำปฏิกิริยาปอสโซลานกับแคลเซียมและน้ำ เกิดเป็น CSH ความเข้มข้นของซัลเฟต แคลเซียม และซิลิกอนจะมีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้น ส่วนความเข้มข้นของไนเตรทและโลหะหนักมีค่าต่ำตลอดการทดลอง เมื่อมีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบและสังกะสีไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ลงไป พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์

เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า ค่า pH และความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เริ่มต้นสูงกว่าที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา และเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น จะมีแนวโน้มลดลง ความเข้มข้นของซัลเฟต แคลเซียม และซิลิกอน จะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการทำปฏิกิริยานานขึ้น โดยในสภาวะที่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาจะทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมเริ่มต้นมีค่าที่ต่ำกว่า เนื่องจากความเป็นต่างของสารกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้ SiO_2 ละลายออกมาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมเกิดเป็น CSH ได้มาก ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์ที่มีการเติมโซเดียมซิลิเกต จะมีความเข้มข้นของซิลิกอนสูงที่สุด เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตมีซิลิกอนอิสระ และความเป็นต่างที่สูงทำให้สามารถทำลายพันธะของ SiO_2 ในเถ้าแกลบสังเคราะห์ได้มาก อีกทั้งยังไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมได้เป็น CSH ทำให้แคลเซียมที่เหลือจะไปทำปฏิกิริยาซัลเฟตมีค่าน้อย ซัลเฟตจึงมีปริมาณเหลืออยู่มากกว่าด้วย ส่วนความเข้มข้นของไนเตรทและโลหะหนักมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสารละลายที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เครื่องมือที่ใช้ในการกวนผสมสารละลาย ควรมีการควบคุมความเร็วรอบในการกวนผสม เพราะจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายแต่ละชนิดเท่ากัน

2) ศึกษาเพิ่มเติมโดยการนำของแข็งที่ได้จากการกรองมาทำการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM เพื่อศึกษาว่าในส่วนที่เป็นของแข็งและเกิดปฏิกิริยาแล้ว สารประกอบอยู่ในสภาวะและรูปแบบใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง

1. มัลลิกา ปัญญาอะโป, 2544, การจัดการของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม, หน้า 160 – 193.
2. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546, ของเสียอันตราย, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ, หน้า 29 – 34, 528 - 529.
3. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, Available : <http://www.environnet.in.th>, [2005 April 20]
4. Conner, J.R.,1990, **Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Waste**, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 36, 82 – 83, 358.
5. บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, 2547, ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน, กรุงเทพฯ, หน้า 2, 24 – 34, 47, 181 - 183.
6. สมพงษ์ ภาวกรพันธุ์, 2543, การปรับปรุงคุณภาพของเถ้าลอยและทรายโดยการผสมปูนขาว, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 13 – 16.
7. ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547, “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต”, สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ, หน้า 290 - 295.
8. พรทิพย์ เกตุรานนท์, 2544, เอกสารการสอนชุดวิชาพิษวิทยาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและอาชีวอนามัย, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, กรุงเทพฯ, หน้า 194.
9. ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, Available : <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/periodic1.html>, [2007 February 7]

10. ทศพล ตุงคนาคกร, 2546, การหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์โดยการกระตุ้นวัสดุยึดประสานประเภทปูนขาวและซีเมนต์ด้วยสารเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 34 – 35.
11. Spence, R.D. and Shi, C., 2005, **Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive and Mixed Wastes**, CRC press, New York, pp.55.
12. Cheerarot, R. and Jaturapitukkul, C., 2004, “A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement” **Waste Management**, Vol. 24, pp. 701 - 709.
13. รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์, 2548, การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักโดยการกระตุ้นปูนขาวผสมซีเมนต์ด้วยสารเคมีและความร้อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 25 - 28.
14. Asavapisit, S. and Macphee, D.E., 2007, “Immobilization of metal-containing waste in alkali-activated lime-RHA cementitious matrices”, **Cement and Concrete Research**, Article in Press.
15. Asavapisit, S. and Ruengrit, N., 2005, “The role of RHA-blended cement in stabilizing metal-containing waste”, **Cement and Concrete Composites**, Vol. 27, pp. 782 - 787.
16. Asavapisit, S., Fowler, G. and Cheeseman, C.R., 1997, “Solution chemistry during cement hydration in the presence of metal hydroxide wastes”, **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, pp. 1249 - 1260.
17. Fowler, G.D., Asavapisit, S., Cheeseman, C.R. and Perry, R., 1995 “A study of the chemical effects of metal hydroxides upon cement hydration reactions”, **Waste Solidification-Stabilization Processes** , 28 November – 1st December 1995, Nancy, France, pp. 40 – 45.

18. Thomas, N.L. and Double, D.D., 1981, "Calcium and silicon concentrations in solution during the early hydration of portland cement and tricalcium silicate" **Cement and Concrete Research**, Vol. 11, pp. 675 - 687.
19. Thomas, N.L., Jameson, D.A. and Double, D.D., 1981, "The effect of lead nitrate on the early hydration of portland Cement" **Cement and Concrete Research**, Vol. 11, pp. 143 - 153.
20. ชาตินัย โคนานาวิทย์, 2544, การหล่อแข็งกากตะกอนโรงชุบโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซิลิกาฟูมควบแน่นและตะกัณฑ์เตาหลอมเหล็ก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 48 – 55.
21. มานพ บุญแจ่ม, 2544, การศึกษากระบวนการหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์โดยใช้ปูนซีเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 56 – 60.
22. วิภา นันทมนตรี, 2543, การศึกษากระบวนการหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์สังเคราะห์โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นซิลิกาควบแน่น, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 62 – 69.
23. American Society for Testing and Materials, 1991, "ASTM C 618 - 91 : Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcine Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", **In Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, Pa.,pp. 303 – 305.
24. มั่นสิน ตันทุลเวศม์, 2543, คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ, บริษัท แชน อี 68 แลป จำกัด, กรุงเทพฯ, หน้า 2/5, 10/7, 20/14 – 20/15, 22/4.
25. Yousuf, M., Mollah, A., Vampati, R.K., Lin, T.C. and Cocke, D.L., 1995, "The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metals in cement and pozzolanic material systems", **Waste Management**, Vol. 15, pp. 137 - 148.

26. Lee, D., Swarbrick, G. and Waite, T.D., 2005, "Effect of calcite on lead-rich cementitious solid waste forms", **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, pp. 1027 - 1037.
27. Karamalidis, A.K. and Voudrias, E.A., 2006, "Release of Zn, Ni, Cu, SO_4^{2-} and CrO_4^{2-} as a function of pH from cement-based stabilized/solidified refinery oily sludge and ash from incineration of oily sludge" **Journal of Hazardous Materials**, Article in press.
28. อรพร จันทร์เพ็ญกุล, 2545, การหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์สังเคราะห์โดยใช้ซีเมนต์ที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 58 – 59.
29. Qian, G., Sun, D.D. and Tay, J.H., 2003, "Characterization of mercury-and zinc-doped alkali-activated slag matrix part II. Zinc" **Cement and Concrete Research**, Vol. 33, pp. 1257 - 1262.
30. Diez, J.M., Madrid, J. and Macias, A., 1997, "Characterization of cement-Stabilized Cd wastes" **Cement and Concrete Research**, Vol. 27, pp. 479 – 485.
31. Murat, M. and Sorrentino, F., 1996, "Effect of large additions of Cd, Pb, Cr, Zn to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement" **Cement and Concrete Research**, Vol. 26, pp. 377 - 385.
32. Omotoso, O.E., Ivey, D.G. and Mikula, R., 1995, "Characterization of chromium doped tricalcium silicate using SEM/EDS, XRD and FTIR" **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 42, pp. 87 - 102.
33. Wang, S. and Vipulanandan, C., 2000, "Solidification/Stabilization of Cr(VI) with cement Leachability and XRD analyses" **Cement and Concrete Research**, Vol. 30, pp. 385 - 389.
34. Thevenin, G. and Pera, J., 1999, "Interactions between lead and different binders", **Cement and Concrete Research**, Vol. 29, pp. 1605 - 1610.

35. Mijno, V., Catalan, L.J.J., Martin, F. and Bollinger, J.C., 2004, "Compositional changes in cement-stabilized waste during leach tests-comparison of SEM/EDX data with predictions from geochemical speciation modeling" **Journal of Colloid and Interface Science** Vol. 280, pp. 465 - 477.
36. Shi, C. and Day, R.L., 2000, "Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators Part II. Reaction products and mechanism" **Cement and Concrete Research**, Vol. 30, pp. 607 - 613.
37. Shi, C. and Day, R.L., 1995, "A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements" **Cement and Concrete Research**, Vol. 25, pp. 1333 - 1346.
38. Fan, Y., Yin, S., Wan, Z. and Zhong, J., 1999, "Activation of fly ash and its effects on cement properties" **Cement and Concrete Research**, Vol. 29, pp. 467 - 472.
39. Schneider, U. and Chen, S.W., 2005, "Deterioration of high-performance concrete subjected to attack by the combination of ammonium nitrate solution and flexure stress", **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, pp. 1705 - 1713.

ภาคผนวก ก

ความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์
และปูนขาวผสมเถ้าแกลบสังเคราะห์

ตารางที่ ก1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%

Mixture	Time	pH	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Si	NO ₃ ⁻	Zn	Fe	Cr	Pb	Cu
	(min)											
OPC	1	12.35	553	1,493	1,283	2.626	0.913	0.093	0.044	0.681	0.201	0.008
	10	12.49	599	1,478	1,242	2.111	0.944	0.101	0.056	0.639	0.171	0.011
	60	12.55	829	1,451	1,122	1.537	0.857	0.124	0.036	0.541	0.143	0.017
	480	12.64	952	352	922	1.073	0.719	0.134	0.035	0.524	0.125	0.013
	1,440	12.65	960	335	822	1.050	0.995	0.143	0.030	0.516	0.127	0.013
	4,320	12.66	986	335	721	0.986	1.102	0.127	0.029	0.475	0.133	0.013
OPC +PS10%	1	12.23	442	1,619	1,042	2.439	1.352	0.207	0.068	0.777	0.391	0.018
	10	12.19	366	1,526	962	1.425	1.464	0.440	0.070	0.754	0.386	0.024
	60	12.04	281	1,417	862	1.161	1.189	0.548	0.067	0.737	0.370	0.027
	480	12.37	553	348	641	0.809	1.124	0.850	0.065	0.620	0.358	0.022
	1,440	12.52	833	318	581	0.548	1.328	0.713	0.056	0.560	0.343	0.024
	4,320	12.63	897	288	421	0.477	1.643	0.637	0.053	0.577	0.342	0.020
OPC +Zn(OH) ₂ 10%	1	12.21	442	1,623	1,162	1.151	3.281	36.150	0.060	0.799	0.224	0.018
	10	12.12	293	1,537	1,022	1.003	3.342	3.568	0.063	0.710	0.210	0.018
	60	11.96	272	882	942	0.979	3.367	1.613	0.050	0.676	0.195	0.022
	480	12.27	459	345	762	0.755	3.005	1.964	0.046	0.619	0.177	0.018
	1,440	12.42	612	318	601	0.275	3.245	2.191	0.040	0.574	0.170	0.016
	4,320	12.54	791	281	461	0.231	3.444	2.042	0.035	0.557	0.178	0.014

ตารางที่ ก2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 90% เถ้าแกลบสังเคราะห์ 10% ในสภาวะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%

Mixture	Time	pH	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Si	NO ₃ ⁻	Zn	Fe	Cr	Pb	Cu
	(min)		(mg/l)									
OPC90% +RHA10%	1	12.32	548	1,487	1,242	2,930	0.990	0.088	0.057	0.729	0.243	0.015
	10	12.45	578	1,455	1,162	2,334	1.082	0.092	0.062	0.697	0.200	0.017
	60	12.53	816	1,287	1,062	1,709	0.689	0.122	0.045	0.610	0.169	0.020
	480	12.63	935	308	842	1,177	0.714	0.126	0.040	0.572	0.118	0.016
	1,440	12.64	944	300	802	1,077	0.918	0.142	0.031	0.552	0.147	0.014
	4,320	12.65	978	286	721	1,027	1.066	0.112	0.028	0.512	0.157	0.014
OPC90% +RHA10% +PS10%	1	12.17	391	1,594	1,042	2,802	1.653	0.099	0.083	0.824	0.400	0.021
	10	12.14	327	1,489	942	2,131	1.459	0.181	0.078	0.813	0.402	0.028
	60	12.02	276	1,254	842	1,571	1.051	0.363	0.076	0.799	0.388	0.029
	480	12.34	527	297	561	1,111	1.184	0.766	0.071	0.704	0.367	0.027
	1,440	12.50	799	297	561	0.968	1.031	0.616	0.063	0.637	0.354	0.023
	4,320	12.61	880	279	381	0.838	1.311	0.558	0.057	0.620	0.347	0.014
OPC90% +RHA10% +Zn(OH) ₂ 10%	1	12.12	378	1,596	1,042	1,519	3.158	6.953	0.064	0.823	0.267	0.019
	10	12.08	285	1,490	962	1,099	2.939	3.377	0.069	0.744	0.224	0.022
	60	11.93	238	582	842	1,011	2.954	1.431	0.059	0.726	0.205	0.022
	480	12.26	455	290	681	0.919	2.883	1.895	0.051	0.637	0.192	0.018
	1,440	12.40	570	261	561	0.802	2.949	2.148	0.043	0.616	0.208	0.017
	4,320	12.49	723	228	441	0.738	3.230	1.930	0.040	0.605	0.221	0.011

ตารางที่ ก3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 80% เถ้าแกลบสังเคราะห์ 20% ในสภาวะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%

Mixture	Time	pH	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Si	NO ₃ ⁻	Zn	Fe	Cr	Pb	Cu
	(min)											
OPC80% +RHA20%	1	12.27	502	1,482	1,222	3.529	0.755	0.068	0.056	0.743	0.248	0.017
	10	12.38	553	1,417	1,142	2.985	0.811	0.089	0.071	0.725	0.223	0.020
	60	12.45	799	1,164	1,042	2.000	0.362	0.117	0.054	0.644	0.185	0.022
	480	12.55	910	286	842	1.246	0.490	0.122	0.050	0.546	0.146	0.017
	1,440	12.62	939	279	802	1.096	0.612	0.131	0.047	0.527	0.178	0.017
	4,320	12.63	973	272	601	1.043	0.827	0.117	0.041	0.557	0.174	0.016
OPC80% +RHA20% +PS10%	1	12.15	353	1,498	902	3.323	1.235	0.071	0.090	0.822	0.410	0.027
	10	12.14	319	1,448	902	2.865	1.388	0.097	0.091	0.833	0.412	0.041
	60	11.99	247	1,022	741	1.715	0.827	0.358	0.081	0.815	0.402	0.044
	480	12.27	421	279	521	1.180	0.776	0.727	0.075	0.687	0.394	0.039
	1,440	12.47	718	257	501	1.081	0.939	0.661	0.070	0.682	0.367	0.039
	4,320	12.58	820	201	240	1.031	1.173	0.374	0.067	0.670	0.353	0.039
OPC80% +RHA20% +Zn(OH) ₂ 10%	1	12.05	323	1,522	962	2.100	3.122	4.380	0.074	0.794	0.284	0.022
	10	12.02	255	1,486	902	1.345	2.939	3.388	0.077	0.778	0.234	0.025
	60	11.88	230	389	741	1.039	2.612	1.420	0.060	0.767	0.212	0.028
	480	12.23	391	231	661	1.001	2.699	1.805	0.057	0.628	0.197	0.025
	1,440	12.31	544	206	521	0.894	2.786	1.958	0.052	0.617	0.221	0.020
	4,320	12.45	642	193	421	0.840	3.235	1.795	0.050	0.610	0.232	0.018

ตารางที่ ก4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 70% เถ้าแกลบสังเคราะห์ 30% ในสภาวะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%

Mixture	Time	pH	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Si	NO ₃ ⁻	Zn	Fe	Cr	Pb	Cu
	(min)											
OPC70% +RHA30%	1	12.23	446	1,476	1,202	4.411	0.577	0.067	0.061	0.786	0.252	0.018
	10	12.35	480	1,306	1,082	3.727	0.628	0.082	0.080	0.762	0.227	0.022
	60	12.44	799	1,044	962	2.568	0.536	0.110	0.059	0.721	0.187	0.025
	480	12.54	897	241	782	1.519	0.536	0.113	0.055	0.608	0.165	0.021
	1,440	12.57	935	188	721	1.129	0.959	0.129	0.054	0.578	0.181	0.020
	4,320	12.58	961	168	501	1.072	1.077	0.115	0.047	0.550	0.209	0.018
OPC70% +RHA30% +PS10%	1	12.08	319	1,483	782	4.330	1.163	0.071	0.092	0.848	0.408	0.028
	10	12.06	298	1,366	741	3.427	1.087	0.083	0.100	0.862	0.414	0.046
	60	11.99	242	564	581	2.215	0.760	0.147	0.090	0.840	0.418	0.051
	480	12.26	404	173	521	1.401	0.740	0.686	0.084	0.745	0.402	0.045
	1,440	12.38	557	89	461	1.125	1.122	0.613	0.077	0.694	0.370	0.040
	4,320	12.56	761	86	180	1.056	1.128	0.460	0.070	0.609	0.368	0.037
OPC70% +RHA30% +Zn(OH) ₂ 10%	1	12.00	281	1,500	902	2.377	2.985	4.039	0.085	0.834	0.294	0.026
	10	11.98	247	1,439	782	1.521	2.536	3.285	0.086	0.823	0.255	0.027
	60	11.87	221	305	681	1.289	2.474	1.535	0.065	0.758	0.237	0.033
	480	12.22	374	165	621	1.225	2.311	1.795	0.061	0.668	0.213	0.024
	1,440	12.29	527	88	521	1.001	2.270	1.913	0.058	0.652	0.234	0.022
	4,320	12.33	612	73	361	0.955	2.531	1.770	0.057	0.656	0.239	0.019

ตารางที่ ก5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าแกลบ
 สังกะหรณ์ 45:55 ในสภาวะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%

Mixture	Time	pH	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Si	NO ₃ ⁻	Zn	Fe	Cr	Pb	Cu
	(min)											
LIME45% +RHA55%	1	12.76	744	452	1,042	0.251	0.689	0.217	0.072	0.714	0.201	0.013
	10	12.77	757	433	942	0.194	0.643	0.217	0.085	0.735	0.206	0.015
	60	12.82	802	414	862	0.172	0.719	0.220	0.066	0.753	0.197	0.016
	480	12.47	710	367	822	0.166	0.709	0.222	0.065	0.689	0.187	0.016
	1,440	12.45	693	346	741	0.163	0.679	0.214	0.067	0.629	0.190	0.015
	4,320	12.40	642	316	641	0.152	0.699	0.216	0.072	0.590	0.182	0.013
	10,080	12.35	563	283	561	0.146	0.755	0.209	0.058	0.540	0.195	0.009
	14,400	12.31	509	252	240	0.139	0.745	0.207	0.043	0.520	0.197	0.008
LIME45% +RHA55% +PS10%	1	12.73	727	428	942	0.200	1.082	28.551	0.129	0.867	0.358	0.034
	10	12.75	735	421	922	0.170	0.643	21.908	0.115	0.931	0.380	0.031
	60	12.81	748	407	882	0.158	0.597	12.900	0.136	0.884	0.341	0.033
	480	12.45	693	359	842	0.146	1.020	6.900	0.124	0.891	0.344	0.040
	1,440	12.43	676	317	802	0.132	0.934	5.435	0.102	0.912	0.358	0.037
	4,320	12.34	638	91	721	0.130	0.878	4.408	0.104	0.784	0.347	0.035
	10,080	12.31	557	51	601	0.098	0.776	2.063	0.075	0.732	0.311	0.031
	14,400	12.28	506	20	281	0.088	0.734	1.863	0.065	0.688	0.305	0.029
LIME45% +RHA55% +Zn(OH) ₂ 10%	1	12.56	714	400	1,022	0.140	5.214	49.950	0.093	0.777	0.354	0.027
	10	12.60	731	383	1,002	0.140	5.265	29.575	0.099	0.830	0.278	0.026
	60	12.63	763	363	1,002	0.133	5.378	15.710	0.093	0.806	0.290	0.024
	480	12.42	684	308	882	0.100	5.332	8.325	0.081	0.776	0.274	0.027
	1,440	12.40	663	138	882	0.069	5.546	7.555	0.089	0.766	0.278	0.027
	4,320	12.21	616	82	842	0.066	4.760	5.310	0.092	0.684	0.228	0.025
	10,080	12.16	578	39	641	0.062	4.765	2.197	0.072	0.720	0.220	0.023
	14,400	12.11	553	15	361	0.051	4.378	1.846	0.063	0.701	0.212	0.020

ตารางที่ ก6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าเคลบ
 สังกะระห์ 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%
 และมีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมซิลิเกต 8%

Mixture	Time	pH	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Si	NO ₃ ⁻	Zn	Fe	Cr	Pb	Cu
	(min)											
LIME45% +RHA55% +Na ₂ SiO ₃ 8%	1	12.90	1,547	516	108	189.070	0.770	0.121	0.026	0.580	0.202	0.011
	10	12.94	1,590	470	60	155.511	0.673	0.119	0.022	0.562	0.129	0.008
	60	12.98	1,609	459	20	96.870	0.939	0.165	0.028	0.578	0.132	0.011
	480	12.76	1,352	420	12	61.910	0.689	0.136	0.030	0.564	0.155	0.014
	1,440	12.65	1,250	404	ND.	7.076	0.990	0.123	0.028	0.503	0.131	0.014
	4,320	12.50	1,209	385	ND.	1.271	0.806	0.102	0.024	0.451	0.141	0.013
	10,080	12.49	1,135	357	ND.	0.519	1.000	0.098	0.033	0.445	0.137	0.010
	14,400	12.45	1,098	295	ND.	0.365	0.888	0.093	0.014	0.382	0.123	0.010
LIME45% +RHA55% +Na ₂ SiO ₃ 8% +PS10%	1	12.81	1,471	509	52	144.955	1.714	2.258	0.078	0.766	0.321	0.017
	10	12.82	1,556	482	52	99.645	1.270	2.138	0.071	0.774	0.274	0.017
	60	12.91	1,588	453	24	69.650	1.398	1.275	0.077	0.777	0.283	0.024
	480	12.78	1,528	389	12	49.428	1.306	1.258	0.064	0.764	0.243	0.028
	1,440	12.77	1,441	370	ND.	3.784	1.464	0.875	0.061	0.716	0.259	0.026
	4,320	12.58	1,377	182	ND.	1.028	0.939	0.388	0.060	0.607	0.308	0.024
	10,080	12.51	1,314	105	ND.	0.489	0.969	0.330	0.049	0.570	0.339	0.021
	14,400	12.48	1,305	42	ND.	0.319	1.163	0.288	0.050	0.564	0.345	0.018
LIME45% +RHA55% +Na ₂ SiO ₃ 8% +Zn(OH) ₂ 10%	1	12.83	1,505	458	80	83.220	6.235	8.985	0.058	0.661	0.236	0.016
	10	12.85	1,564	452	68	23.335	5.872	7.035	0.048	0.629	0.207	0.014
	60	12.88	1,607	430	56	4.537	5.612	4.975	0.061	0.609	0.175	0.015
	480	12.87	1,530	355	40	1.271	5.612	3.270	0.051	0.630	0.209	0.016
	1,440	12.84	1,430	160	ND.	0.977	5.306	2.925	0.058	0.627	0.207	0.019
	4,320	12.81	1,394	103	ND.	0.402	5.561	2.540	0.042	0.597	0.203	0.021
	10,080	12.76	1,301	56	ND.	0.300	5.020	0.531	0.030	0.543	0.228	0.020
	14,400	12.70	1,280	37	ND.	0.278	5.561	0.360	0.028	0.490	0.206	0.020

หมายเหตุ : ND. คือความเข้มข้นของแคลเซียมเท่ากับหรือต่ำกว่าน้ำกลั่นที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง ICP

ตารางที่ ก7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายปูนขาวผสมเถ้าเคลบ
 สังกะระห์ 45:55 ในสถานะที่ไม่มีและมีการเติมกากตะกอนโลหะหนัก 10%
 และมีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต 8%

Mixture	Time	pH	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Si	NO ₃ ⁻	Zn	Fe	Cr	Pb	Cu
	(min)		(mg/l)									
LIME45% +RHA55% +Na ₂ CO ₃ 8%	1	13.22	2,244	486	184	0.572	1.321	0.150	0.044	0.683	0.198	0.013
	10	13.14	2,185	465	152	0.528	1.112	0.135	0.041	0.688	0.170	0.013
	60	13.11	2,180	457	148	0.394	1.291	0.164	0.041	0.685	0.155	0.015
	480	13.10	2,155	387	136	0.346	1.485	0.156	0.043	0.662	0.145	0.013
	1,440	13.09	2,125	374	96	0.312	1.143	0.134	0.034	0.693	0.169	0.015
	4,320	13.08	2,074	359	92	0.088	1.179	0.129	0.040	0.703	0.130	0.013
	10,080	13.05	2,057	315	ND.	0.046	1.153	0.116	0.027	0.610	0.136	0.010
	14,400	13.03	2,040	288	ND.	0.034	1.133	0.108	0.017	0.603	0.121	0.008
LIME45% +RHA55% +Na ₂ CO ₃ 8% +PS10%	1	13.18	2,214	461	176	0.404	1.735	5.428	0.102	0.830	0.319	0.030
	10	13.12	2,172	455	152	0.346	1.286	5.088	0.102	0.798	0.312	0.026
	60	13.09	2,159	417	148	0.301	1.372	4.350	0.087	0.829	0.314	0.031
	480	13.07	2,121	367	140	0.296	1.214	3.750	0.072	0.804	0.315	0.029
	1,440	13.06	2,112	333	124	0.225	1.077	2.564	0.077	0.866	0.320	0.029
	4,320	13.02	2,070	146	124	0.073	1.197	1.933	0.081	0.782	0.320	0.027
	10,080	13.01	2,040	66	32	0.028	1.194	0.878	0.072	0.690	0.300	0.021
	14,400	13.00	2,006	34	ND.	0.006	1.242	0.852	0.056	0.634	0.298	0.020
LIME45% +RHA55% +Na ₂ CO ₃ 8% +Zn(OH) ₂ 10%	1	13.13	2,134	417	184	0.375	6.796	10.805	0.064	0.783	0.237	0.027
	10	13.10	2,083	412	160	0.314	6.439	8.085	0.056	0.727	0.217	0.021
	60	13.05	2,078	370	152	0.258	6.439	5.455	0.055	0.785	0.193	0.024
	480	12.99	2,070	323	152	0.236	6.602	4.710	0.053	0.773	0.272	0.023
	1,440	12.96	2,010	143	132	0.146	6.643	3.999	0.061	0.736	0.222	0.021
	4,320	12.90	1,900	99	128	0.055	6.842	2.540	0.063	0.707	0.229	0.019
	10,080	12.88	1,785	54	40	0.005	6.878	0.889	0.052	0.691	0.227	0.018
	14,400	12.85	1,760	29	ND.	0.001	6.653	0.861	0.045	0.630	0.253	0.018

หมายเหตุ : ND. คือความเข้มข้นของแคลเซียมเท่ากับหรือต่ำกว่าน้ำกลั่นที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง ICP

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวเบญจวรรณ มหิทธิรุกข์
วัน เดือน ปีเกิด	30 กรกฎาคม พ.ศ. 2525
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจอมสุรางค์อุปถัมภ์ พ.ศ.2543
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏสวนดุสิต พ.ศ. 2547
ระดับปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549
ทุนการศึกษาวิจัย	ทุนสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ปีงบประมาณ 2548
ประวัติการทำงาน	-
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2548

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) เบญจวรรณ มหิทธิรุกข์ รหัสประจำตัว 47401105

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา โท เอก ประ.ค

หลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ

อยู่บ้านเลขที่ 6 หมู่ 3 ต.รอก/ซอย ถนน พรเทพฯ

ตำบล/แขวง พรเทพฯ อำเภอ/เขต พระนคร กรุงเทพมหานคร จังหวัด พระนคร กรุงเทพมหานคร

รหัสไปรษณีย์ 13000 ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน ตำแหน่ง คณบดีคณะพลังงานและวัสดุ

เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลง ดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “ผลกระทบของระยะเวลาไฮดรเจนต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของก้อนหล่อแข็งของเสียม”

ชื่ออยู่ในความควบคุม รศ.ดร.สุวิมล อัสวาศิวล

ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือคัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ นางสาวเบญจวรรณ มหิทธิรุกข์ ผู้โอนลิขสิทธิ์

(นางสาวเบญจวรรณ มหิทธิรุกข์)

ลงชื่อ รศ.ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(รศ.ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน)

ลงชื่อ รศ.ดร.สุวิมล อัสวาศิวล พยาน

(รศ.ดร.สุวิมล อัสวาศิวล)

ลงชื่อ ดร.ศศิธร พุทธวงษ์ พยาน

(ดร.ศศิธร พุทธวงษ์)