



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำในการหล่อแข็งกากตะกอน
โรงหုပ်โลหะประเภทสังกะสี

โดย ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์
สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ธันวาคม 2557

สัญญาเลขที่ RMU5080007

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้กากแกลบเชื่อมคาร์ไบด์และถั่วแกลบดำในการหล่อแข็งกากตะกอน
โรงหုပ်โลหะประเภทสังกะสี

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร.สุวิมล อัสวพิศิษฐ์

ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์

สังกัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัยสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5480198
 ชื่อโครงการ : การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำในการหล่อแข็งกากตะกอน
 โรงชุมชนโลหะประเภทสังกะสี
 ชื่อนักวิจัย : ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะพานวัฒน์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
 อีเมลล์ : rungroj.piy@kmutt.ac.th
 ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

บทคัดย่อ :

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของก้อนของเสียหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงชุมชนโลหะประเภทสังกะสีที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำเป็นวัสดุยึดประสานในสภาวะที่มีและใสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาสมบัติในด้านกำลังอัด ระยะเวลาการก่อตัว และการร้าวไหลของโลหะหนักจากก้อนของเสียหล่อแข็ง โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่อัตราส่วน 70:30 60:40 50:50 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 60 : 40 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนดังกล่าวมาทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต ร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักเพื่อเป็นวัสดุยึดประสานในการตรึงกากตะกอนจากโรงชุมชนประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก

ก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น และมีระยะเวลาการก่อตัวลดลง โดยสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นอย่างรวดเร็ว โดยที่อายุการบ่ม 3 วัน แต่เมื่อมีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้งสองชนิดก้อนของเสียหล่อแข็งสามารถถอดแบบได้ตั้งแต่ 1 วัน การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 11.1 เป็น 30.5 และ 34.5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เมื่อนำมาผสมกากตะกอนจากโรงชุมชนประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง และระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ส่วนก้อนหล่อแข็งที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุมชนประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 3 วัน ไม่สามารถถอดออกจากแบบได้ และเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในก้อนของเสียหล่อแข็งในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุมชนประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดได้เท่ากับ 3.45 และ 5.58 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ส่วนผลการทดสอบการร้าวไหลของโลหะหนักจากก้อนของเสียหล่อแข็ง พบว่า ปริมาณ

ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะจากก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน (5 มิลลิกรัม/ลิตร) ยกเว้นก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ในการทดสอบความทนทานของก้อนของเสียหล่อแข็งพบว่า ฝนกรดสังเคราะห์สามารถกัดกร่อนก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาได้ทั้งก้อน ทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด ส่วนก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์และโซเดียมคาร์บอเนตในก้อนของเสียหล่อแข็งในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ฝนกรดสังเคราะห์สามารถกัดกร่อนที่ผิวได้ลึกประมาณ 5-10 มิลลิเมตร ในพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อนของก้อนของเสียหล่อแข็งมีปริมาณ SO_3 เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟูริกในฝนกรดสังเคราะห์ กับแคลเซียมจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ หรือจากการ decalcification ของ CSH ในก้อนของเสียหล่อแข็ง กลายเป็นยิปซัมได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการบวมตัวของก้อนของเสียหล่อแข็ง

คำหลัก : กากแคลเซียมคาร์ไบด์ / ถั่วแกลบดำ / สารกระตุ้น / กากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสี

Abstract

Project Code : MRG5480198

Project Title : The use of calcium carbide residue and black rice husk ash in solidification of zinc-electroplating sludge.

Investigator : Dr. Rungroj Piyaphanuwat

E-mail Address : rungroj.piy@kmutt.ac.th

Project Period : 2 years

Abstract:

This research investigated the properties of solidification of zinc-electroplating sludge using calcium carbide residue (CCR) and black rice husk ash (BHA) as binders and sodium silicate solution and sodium carbonate as activator. The compressive strength, setting time leachability using TCLP method and durability were studied. The first step studied the optimum ratio between CCR and BHA of 70:30 60:40 50:50 40:60 and 30:70 wt.%. The results showed that the highest compressive strength was found 60:40 of ratio between CCR and BHA. This ratio was activated using sodium silicate solution and sodium carbonate at the levels of 2 and 4 wt.% as binders solidified 30 and 50 wt.% of zinc-electroplating sludge.

Addition of sodium silicate solution and sodium carbonate increased the compressive strength and decreased of CCR and BHA paste. Both activators can rapid developed the early strength (3 days). The 4 wt.% of sodium silicate solution and sodium carbonate increased the compressive strength from 11.1 to 30.5 and 34.5 kg/cm². When 30 and 50 wt.% of zinc-electroplating sludge were added, the compressive strength decreased and setting time increased. At 3 days of solid wastes solidified 50 wt.% of zinc-electroplating sludge did not remolded but both activators were added, they can remolded since 1 days. Addition 4 wt.% of sodium silicate solution and sodium carbonate in solid wastes containing 50 wt.% of zinc-electroplating sludge have compressive strength of 3.45 and 5.58 kg/cm².

The leaching results (TCLP method) showed that the concentration of Cr in leachate from solid wastes containing 50 wt.% of zinc-electroplating sludge over the standard of USEPA (5 mg/L) except solid wastes with 4 wt.% of sodium carbonate. The durability resulted showed that synthesis acid rain can erode the solid wastes solidified 50 wt.% of zinc-electroplating sludge and without activators through full area that was showed in highest weight loss. In addition, solid wastes containing 4 wt.% of sodium silicate solution and sodium carbonate were eroded from external surface to inside about 5-10 mm. At erosion zone found increase of SO_3 content because of reaction between sulfuric acid from synthesis acid rain and Ca from CCR and decalcification of CSH in solid wastes to form gypsum. It resulted in swell and reduction strength of solid wastes structure.

Keywords : Calcium carbide residue / Black rice husk ash / Activator / zinc-electroplating sludge

บทสรุปผู้บริหาร

การปรับเสถียรและการหล่อแข็งเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการบำบัดของเสียอันตรายประเภทโลหะหนัก กากตะกอนโลหะจัดเป็นของเสียอันตรายที่มีความเป็นพิษ ความเป็นพิษของโลหะหนักเหล่านี้ไม่สามารถทำลายฤทธิ์ได้ด้วยวิธีทางเคมี วิธีทางชีวภาพ และวิธีการเผาทำลาย แต่สามารถที่จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย เพื่อลดการแพร่กระจายความเป็นพิษสู่สิ่งแวดล้อม การปรับเสถียรและการหล่อแข็งจะเป็นเทคนิคที่จะทำการกักเก็บกากตะกอนโลหะหนักไว้ในโครงสร้างที่เป็นของแข็ง และมีความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำโดยอาศัยตัวยึดประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรืออาจใช้ร่วมกับวัสดุปอสโซลาน หรือปูนขาวผสมวัสดุปอสโซลาน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการของเสียที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้จึงนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ่านกลบดำมาใช้เป็นวัสดุยึดประสานแทนปูนซีเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของก้อนของเสียหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงชุบโลหะประเภทสังกะสีที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ่านกลบดำเป็นวัสดุยึดประสานในสภาวะที่มีและไม่มีสารละลายโครเมียมซัลเฟตและโครเดียมคาร์บอเนตเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาสมบัติในด้านกำลังอัด ระยะเวลาการก่อตัว และการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนของเสียหล่อแข็ง โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ่านกลบดำ ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถ่านกลบดำที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 60 : 40 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนดังกล่าวมาทำการผสมสารละลายโครเดียมซัลเฟตและโครเดียมคาร์บอเนต ร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักเพื่อเป็นวัสดุยึดประสานในการตรึงกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารละลายโครเดียมซัลเฟตและโครเดียมคาร์บอเนตทำให้ค่ากำลังอัดของก้อนของเสียหล่อแข็งเพิ่มขึ้น และมีระยะเวลาการก่อตัวลดลง โดยสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วงอายุการบ่ม 3 วันแรก เมื่อนำมาผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง และระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ส่วนก้อนหล่อแข็งที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม 3 วัน ไม่สามารถถอดออกจากแบบได้ แต่เมื่อมีการเติมสารละลายโครเดียมซัลเฟตและโครเดียมคาร์บอเนตในก้อนของเสียหล่อแข็งในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดได้เท่ากับ 3.45 และ 5.58 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

ส่วนผลการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนของเสียหล่อแข็ง พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน (5 มิลลิกรัม/ลิตร) ยกเว้นก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมโครเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ส่วนการทดสอบความทนทานของก้อนของเสียหล่อแข็ง การเติมสารละลายโครเดียมซัลเฟตและโครเดียมคาร์บอเนตในก้อนของเสียหล่อแข็งในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ผนกรด

สังเคราะห์สามารถกัดกร่อนที่ผิวได้ลึกประมาณ 5- 10 มิลลิเมตร และพบปริมาณ SO_3 ในพื้นที่ที่ถูกกัดกร่อน นอกจากนั้นปริมาณ CaO ในก้อนของเสียหล่อแข็งลดลง ทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างของก้อนของเสียหล่อแข็งลดลง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
บทสรุปผู้บริหาร	จ
สารบัญ	ช
สารบัญรูป	
สารบัญตาราง	
วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
ระเบียบวิธีวิจัย	1
ผลการศึกษา	3
• การศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	3
• การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าแกลบดำ	5
• ผลของปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตต่อสมบัติ การพัฒนา กำลังอัด และการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง	8
• ผลของกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีต่อสมบัติการพัฒนา กำลังอัด และการ ก่อตัวของก้อนหล่อแข็งของเสีย	11
• ผลการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนของเสียหล่อแข็ง	18
• ผลการทดสอบความทนทานของก้อนหล่อแข็ง	19
สรุปผล	23
เอกสารอ้างอิง	25
ภาคผนวก	17
ภาคผนวก ก	28
ภาคผนวก ข	34
ภาคผนวก ค	38
ภาคผนวก ง	42

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 ส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าแกลบ	2
2 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าแกลบดำ	3
3 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำ	5
4 อัตราส่วนผสมของก้อนหล่อแข็ง	7
5 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำ	10
6 ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งของเสีย	15
7 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะ จากก้อนหล่อแข็งของเสีย	18
8 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 28 วัน	21
9 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 ที่อายุ 28 วัน	22
10 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 4 ที่อายุ 28 วัน	22

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1	โครงสร้างความเป็นผลึกของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าแกลบดำ	4
2	การพัฒนากำลั้งอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำ	6
3	การพัฒนากำลั้งอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต	8
4	การพัฒนากำลั้งอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการผสมสารโซเดียมคาร์บอเนต	9
5	การพัฒนากำลั้งอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสี	11
6	การพัฒนากำลั้งอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการเติมกระตุ้นปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ ก) 30 และ ข) 50	13
7	การพัฒนากำลั้งอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการเติมกระตุ้นปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ ก) 30 และ ข) 50	14
8	การสูญเสียน้ำหนักของก้อนหล่อแข็งของเสียที่อายุ 28 วัน หลังจากกาแช่ฝนกรดสังเคราะห์	20

วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำที่ใช้เป็นวัสดุยึดประสานในการหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสี
- 2) ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงชุบโลหะประเภทสังกะสี โดยใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำเป็นวัสดุยึดประสานในสภาวะที่มีและไม่มีสารเคมีประเภทต่างกระตุ้น

ระเบียบวิธีวิจัย

การเตรียมวัตถุดิบ

นำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้ากลบ และกากตะกอนจากโรงชุบ จะนำมาทำการผึ่งตากแดดให้แห้ง และนำไปบดด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion Machine โดยใช้ ลูกเหล็กที่ใช้ในการบดจำนวน 12 ลูก น้ำหนักรวม 5,200 กรัม และนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำที่ผ่านการบดมาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ด้วยวิธีร่อนแบบเปียก โดยมีร้อยละคั่งบนตะแกรงของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ไม่เกินร้อยละ 34 ตามมาตรฐาน ASTM C 618 – 12 ส่วนกากตะกอนจากโรงชุบที่ผ่านการบดจะนำมาทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 จากนั้นนำมาทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF และความเป็นผลึกด้วยเครื่อง XRD

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบดำ

ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบดำโดยมีส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2 สำหรับปริมาณน้ำในแต่ละส่วนผสมหาได้จากการควบคุมอัตราการใช้ให้อยู่ช่วง $110 \pm 5\%$ ตามมาตรฐาน ASTM C 109-11 จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบดำที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 56 วัน ตามลำดับ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1633-07 จากนั้นนำมาทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์โดยทำการประยุกต์โดยวิธีประยุกต์การทดสอบ ASTM C191- 08

ตารางที่ 1 ส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้ากลบดำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
70	30
60	40
50	50
40	60
30	70

จากผลการทดสอบกำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 1 จะทำการเลือกอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด และมีระยะเวลาการก่อตัวสั้นที่สุดมาใช้ในการศึกษาผลของปริมาณและชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทต่างต่อสมบัติด้านกำลังอัด และการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนของเสียหล่อแข็ง

ศึกษาผลของปริมาณและชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทต่างต่อการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบดำ

การศึกษาผลของปริมาณและชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทต่างต่อการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบดำจะนำอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดจากตารางที่ 1 และมีค่าระยะเวลาการก่อตัวสั้นที่สุดมาทำการศึกษาโดยจะทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O จากนั้นทำการศึกษาการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีการกระตุ้นปฏิกิริยาที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1633-07

ศึกษาความสามารถในการรองรับกากตะกอนจากโรงชุบที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบดำเป็นตัวยึดประสานในสถานะที่มีและไม่มีสารกระตุ้นปฏิกิริยาปอสโซลาน

ศึกษาผลของการแปรเปลี่ยนปริมาณและชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทต่างต่อการพัฒนากำลังอัดและการรั่วไหลของโลหะหนักของก้อนของเสียหล่อแข็งที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบดำ

เป็นวัสดุยึดประสาน โดยนำส่วนผสมในหัวข้อที่ 3.3 มาทำการผสมกากตะกอนจากโรงชุบในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาทำการทดสอบสมบัติดังนี้

- การพัฒนาความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีอายุการบ่ม 1, 3, 7, 14, 28, 56 และ 91 วันตามลำดับ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1633-07
- การรั่วไหลของโลหะหนัก ทดสอบโดยใช้วิธี TCLP (Toxicity Characteristic Leach Test Procedure) และใช้ตัวอย่างที่มีอายุ 28 วัน
- การทดสอบความทนทานโดยการประยุกต์วิธีการทดสอบ Tank test โดยการแช่ก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีค่ากำลังอัดสูงที่อายุการบ่ม 28 วัน มาทำการแช่ในฝนกรดสังเคราะห์เป็นเวลา 0.25 1.25 2 4 9 18 36 และ 64 วัน จากนั้นทำการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็ง

การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลโดยในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดจะทำ 5 ซ้ำ สำหรับการทดลองอื่นๆจะทำ 2-3 ซ้ำ ขึ้นอยู่กับความเบี่ยงเบนของข้อมูล

ผลการวิจัย

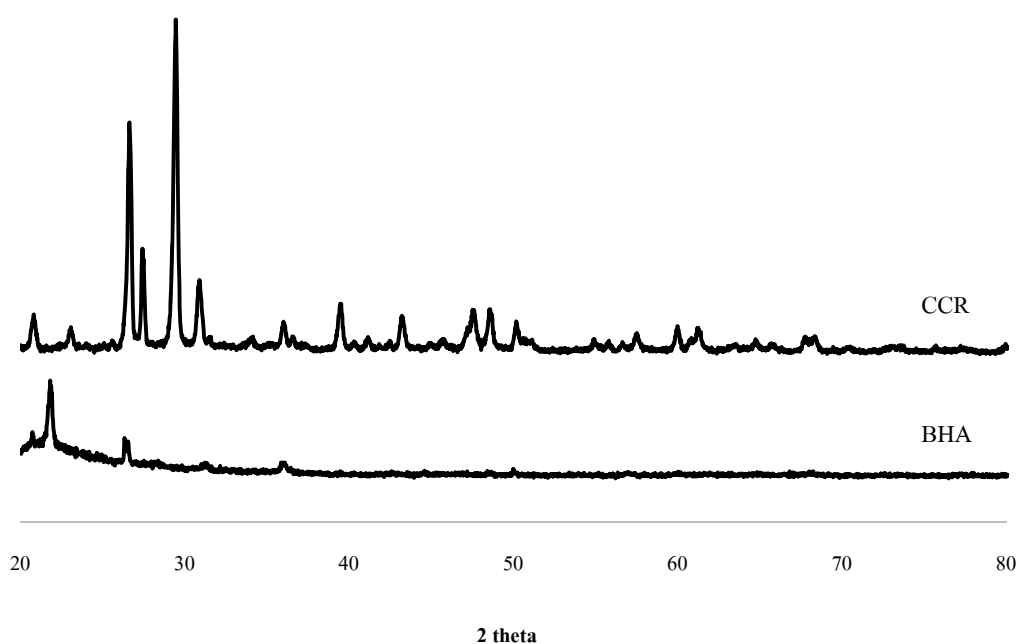
การศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และถ่านโค้กที่นำมาใช้เป็นวัสดุยึดประสานแทนปูนซีเมนต์จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมี และลักษณะความเป็นผลึกของวัสดุดิบทั้ง 2 ชนิด ด้วยเครื่องด้วยเครื่อง XRF และความเป็นผลึกด้วยเครื่อง XRD ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 1

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และถ่านโค้ก

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
BHA	93.18	0.31	0.26	0.47	0.23	0.07	1.86
CCR	28.53	3.58	3.89	59.18	3.14	0.16	1.52

จากตารางที่ 2 พบว่าถ้ำกลบดามีสารประกอบหลักคือ SiO_2 ซึ่งมีมากถึงร้อยละ 93.18 โดยน้ำหนัก ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณ CaO ในปริมาณร้อยละ 59.18 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ SiO_2 ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 28.53 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นเมื่อนำมาทำการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของสารประกอบซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ พบว่าถ้ำกลบดามีผลึกของ SiO_2 ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีสารประกอบของ CaC_2 และ SiO_2



รูปที่ 1 โครงสร้างความเป็นผลึกของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และถ้ำกลบดำ

ส่วนกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีที่นำมาใช้จะนำมาทำการย่อยสารประกอบด้วยเครื่องไมโครเวฟ หลังจากนั้นนำมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (Perkin-Elmer Model no. Optima 3000) โดยมีปริมาณโครเมียม เหล็ก และสังกะสี เท่ากับ 28.2 60.8 และ 377 กรัม/กิโลกรัมแห้งขิงตะกอน

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้ากลบดำ

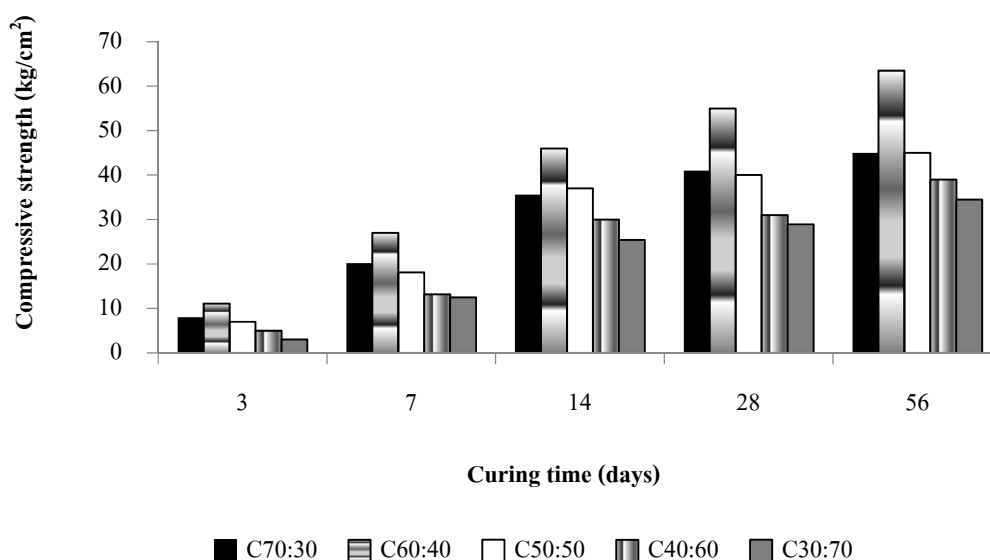
ตารางที่ 3 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำ

อัตราส่วนผสมของกาก แคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบ ดำ	ระยะเวลาการก่อตัว เริ่มต้น (นาทิต)	ระยะเวลาการก่อตัว สุดท้าย (นาทิต)
70:30	120	420
60:40	127	426
50:50	135	434
40:60	219	478
30:70	222	493

จากตารางที่ 3 พบว่าระยะก่อตัวเริ่มต้นและระยะสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 120 และ 420 นาทิต เป็นอัตราส่วนที่มีระยะก่อตัวเริ่มต้นและระยะสุดท้ายต่ำที่สุด เนื่องจากอัตราส่วนผสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้ากลบดำเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงทำให้ระยะก่อตัวเริ่มต้นและระยะสุดท้ายมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ ก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำเท่ากับ 60:40 50:50 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยระยะก่อตัวเริ่มต้นและระยะสุดท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเถ้ากลบดำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเถ้ากลบดำที่เพิ่มขึ้น เป็นวัสดุปอซโซลานซึ่งมีความไวในการทำปฏิกิริยาต่ำ จึงมีผลทำให้ในอัตราส่วนผสมที่ 60:40 50:50 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก ที่มีปริมาณเถ้ากลบดำสูง มีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการทดสอบกำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำในอัตราส่วน 70:30 60:40 50:50 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 2) พบว่า การพัฒนากำลังมีความสามารถในการรับกำลังอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ตามอายุของการบ่มของก้อนหล่อแข็งที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำที่อัตราส่วนร้อยละ 60:40 โดยน้ำหนัก จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุด โดยที่อายุ 3 7 14 28 และ 56 วัน มีค่าเท่ากับ 11 27 14 55 และ 64 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนก้อนหล่อแข็งที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำในอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าที่อัตราส่วน 60:40 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีปริมาณกาก

แคลเซียมคาร์ไบด์ถึงปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และเถ้ากลบดำมีเพียงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีมากเกินไปต่อการทำปฏิกิริยาของเถ้ากลบดำ จึงทำให้ค่ากำลังอัดไม่สูง ส่วนก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำในอัตราส่วน 50:50 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่มีการเพิ่มปริมาณเถ้ากลบดำ ซึ่งซิลิกอนในเถ้ากลบดำอาจจะมากเกินไปต่อการทำปฏิกิริยา จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานลดลง ทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง



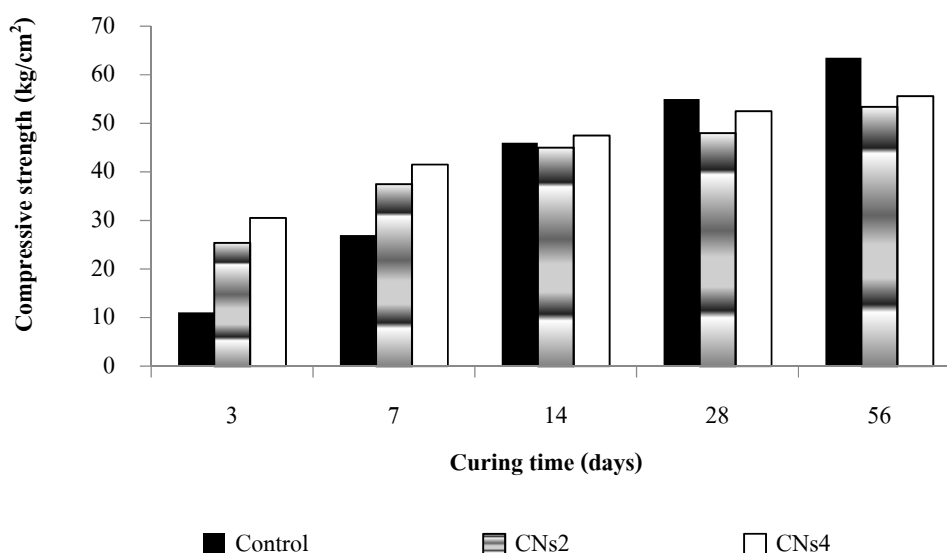
รูปที่ 2 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำ

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมของก้อนหล่อแข็ง

ตัวอย่าง	กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (ร้อยละ)	เถ้าแกลบดำ (ร้อยละ)	กากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสี (ร้อยละ)	W/S	Na ₂ SiO ₃ (ร้อยละ)	Na ₂ CO ₃ (ร้อยละ)
Control	60	40	-	0.33	-	-
CPs30	42	28	30	0.31	-	-
CPs50	30	20	50	0.29	-	-
CNs2	60	40	-	0.34	2	-
CNs2Ps30	42	28	30	0.32	2	-
CNs2Ps50	30	20	50	0.30	2	-
CNs4	60	40	-	0.35	4	-
CNs4Ps30	42	28	30	0.33	4	-
CNs4Ps50	30	20	50	0.31	4	-
CNc2	60	40	-	0.33	-	2
CNc2Ps30	42	28	30	0.31	-	2
CNc2Ps50	30	20	50	0.29	-	2
CNc4	60	40	-	0.33	-	4
CNc4Ps30	42	28	30	0.31	-	4
CNc4Ps50	30	20	50	0.29	-	4

จากผลการทดสอบกำลังอัดและระยะเวลาการก่อตัวของก้อนหล่อแข็งที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำในอัตราส่วน 70:30 60:40 50:50 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราส่วนระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีค่ากำลังอัดสูงสุด และมีระยะเวลาการก่อตัวต่ำสุดคือ ก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำเท่ากับ 60:40 โดยงานวิจัยนี้ได้นำอัตราส่วนดังกล่าวมาทำการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต ในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na₂O และนำมาทำการหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนักต่อไป โดยที่อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการผสมของก้อนหล่อแข็งแสดงดังในตารางที่ 4

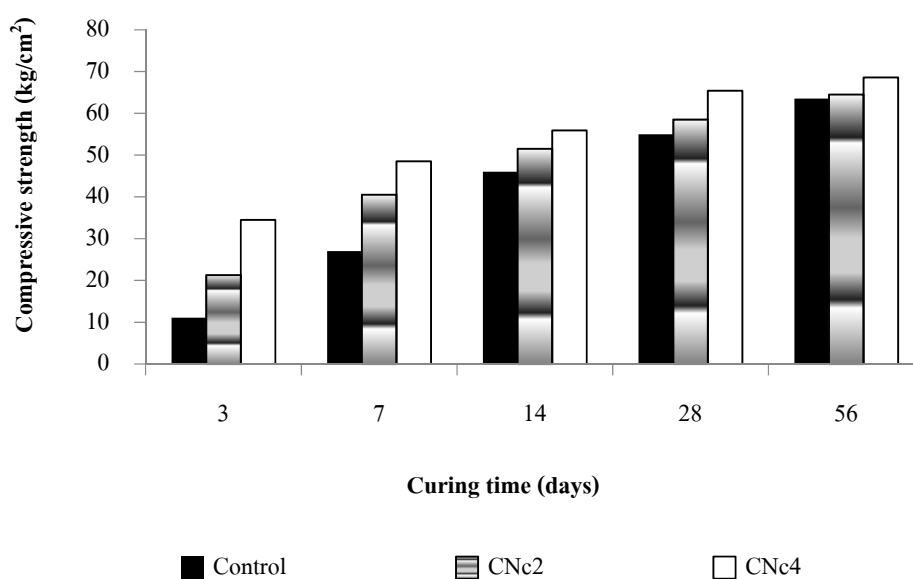
ผลของปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตต่อสมบัติการพัฒนากำลังอัด และการก่อตัวของก้อนหล่อแข็ง



รูปที่ 3 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O

เมื่อมีการนำก้อนหล่อแข็งที่มีอัตราส่วนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำในปริมาณร้อยละ 60:40 มาทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O พบว่าการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าการพัฒนากำลังอัด ในช่วงอายุ 14 วันแรก โดยอัตราส่วนที่มีการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วัน มีเท่ากับ 25 และ 31 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่ได้เติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต สาเหตุที่โซเดียมซิลิเกตสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ดีในช่วงแรก เนื่องจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ได้ผลผลิตเป็น CSH gel ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น อีกสาเหตุหนึ่งคือ การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ NaOH เป็นการเพิ่ม OH^- ในสารละลายจึงส่งผลให้ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถกัดกร่อนพันธะ Si-O bond ได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคมากขึ้น [1] และที่อายุ 14 วัน พบว่า ค่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับ 45 และ 48 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 14 วันมีค่าใกล้เคียงกับก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และหลังจากนั้น

พบว่า ก้อนหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่ได้มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด เนื่องจาก CSH gel ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกห่อหุ้มอนุภาคเถ้ากลบดำ ทำให้ออนสารละลายไม่สามารถแพร่ไปทำปฏิกิริยากับเถ้ากลบดำได้ เป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำที่มีการผสมสารโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O

จากรูปที่ 4 แสดงการพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำที่มีการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O พบว่า ค่ากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนตมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น โดยที่อายุการบ่ม 3 วัน ก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้ากลบดำที่มีการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O มีค่าเท่ากับ 21 และ 35 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และที่อายุการบ่ม 28 วันมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 59 และ 65 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่ากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O มีค่าสูงกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการเติม ตลอดอายุการบ่ม เนื่องจากการเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เป็นการเพิ่มสถานะความเป็นด่างให้กับก้อนหล่อแข็งทำให้ซิลิกอนจากเถ้ากลบดำละลายออกมาทำปฏิกิริยาได้

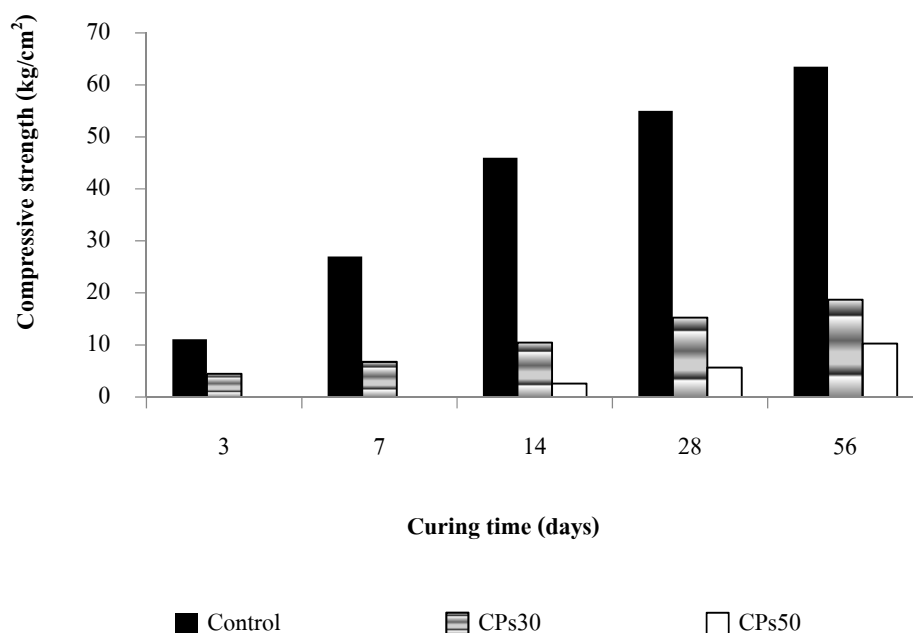
อย่างรวดเร็ว นอกจากนั้น การเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตยังสามารถทำปฏิกิริยากับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุที่เติมเต็มในช่องว่างภายในก้อนหล่อแข็งได้ จึงทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงตลอดอายุการบ่ม

ตารางที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบ ดำที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต ในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O

ตัวอย่าง	ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้น (นาท)	ระยะเวลาในการก่อตัวสุดท้าย (นาท)
Control	127	426
CNs2	101	397
CNs4	85	375
CNc2	110	403
CNc4	95	386

จากตารางที่ 5 แสดงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งที่มีและไม่มีส่วนผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของก้อนหล่อแข็งมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้การพัฒนา กำลังอัดของก้อนหล่อแข็งในช่วงอายุแรกมีค่าสูงกว่า ก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยา เนื่องจากค่าความเป็นด่างของสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด สามารถเพิ่มสภาพความเป็นด่างในก้อนหล่อแข็ง ซึ่งสามารถเร่งการละลายซิลิกอนจาก BHA ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จาก CCR กลายเป็น CSH gel ซึ่งทำโครงสร้างของก้อนหล่อแข็งมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยซิลิกอนในสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จาก CCR กลายเป็น CSH gel นอกจากนั้นการทำปฏิกิริยาของโซเดียมคาร์บอเนตกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ยังทำให้เกิด CaCO_3 ซึ่งสามารถเป็นส่วนเติมเต็มในช่องว่างทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้นอีก ซึ่งเป็นผลให้ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง

ผลของกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีต่อสมบัติการพัฒนากำลังอัด และการก่อตัวของก้อนของเสียหล่อแข็ง



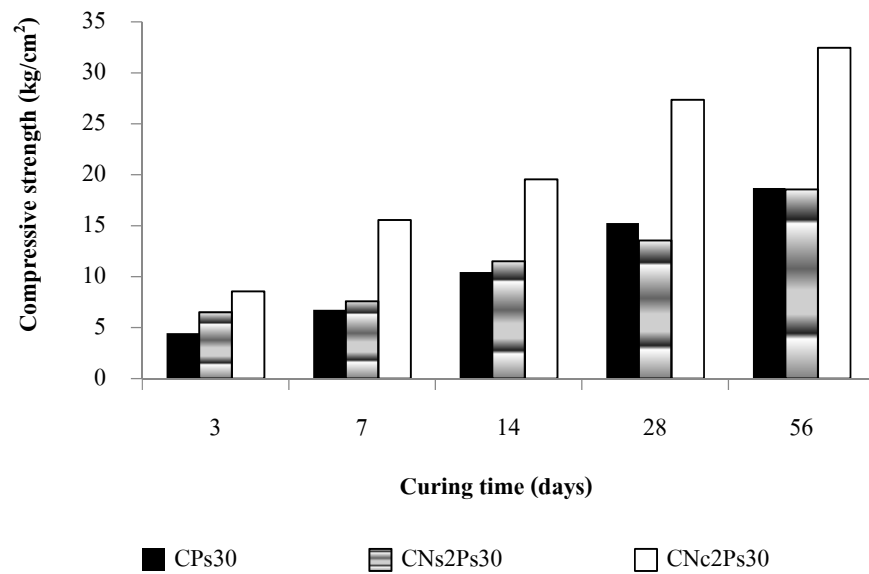
รูปที่ 5 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก

เมื่อมีการนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำมาทำการหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 พบว่า ค่ากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งมีค่าลดลง เมื่อปริมาณกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเพิ่มขึ้น โดยก้อนหล่อแข็งที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3 และ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 4.5 และ 6.8 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และเมื่อมีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า ก้อนของเสียหล่อแข็งไม่มีการพัฒนากำลังอัดในช่วง 7 วันแรก เนื่องจากโลหะหนักจะเข้าไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำไม่ให้เกิดได้สมบูรณ์ โดยกลไกการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของโลหะหนักกับ CSH gel คือ โลหะหนักที่เติมลงในก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีประจุบวก (M^+) จะรวมตัวกับ OH^- ที่ในน้ำ อยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนอยู่บนผิวของเถ้าแกลบดำทำให้ความสามารถในการซึมผ่านตัว Ca^{2+} จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ละลายจึงเข้าไปทำปฏิกิริยากับเถ้าแกลบดำลดลง ทำให้การการพัฒนากำลังรับแรงอัดช้าลง [2] และหลังจาก 14 วัน ค่ากำลังอัดของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลัง

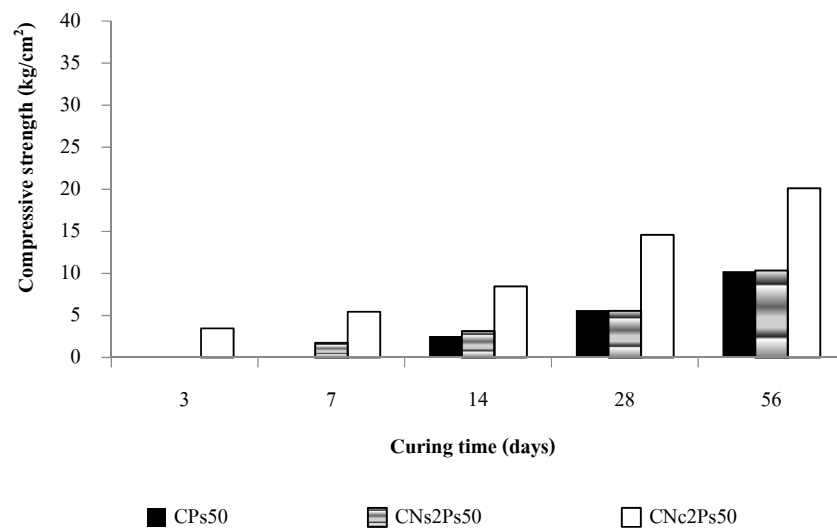
อัดเท่ากับ 2.55 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และมีค่ามากกว่า 3.5 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เมื่ออายุมากกว่า 28 วัน

เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในก้อนของเสียหล่อแข็ง พบว่า การเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด สามารถเพิ่มกำลังอัดของก้อนของเสียหล่อแข็งในช่วงอายุการบ่มเริ่มต้น โดยก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของ Na_2O ที่มีการผสมจากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 3 วัน มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 4.5 เป็น 6.5 และ 8.6 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และเมื่อเพิ่มจากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถพัฒนากำลังอัดได้ แต่เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก สามารถพัฒนากำลังอัดได้เท่ากับ 1.25 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ส่วนก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมจากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และมีการผสมโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของ Na_2O ที่อายุ 3 วัน สามารถพัฒนากำลังอัดได้เท่ากับ 3.45 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

เมื่ออายุการบ่ม 7 วันก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของ Na_2O และมีการผสมจากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เริ่มมีการพัฒนากำลังอัดโดยมีค่าเท่ากับ 1.74 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของ Na_2O และมีการผสมจากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนักจะสามารถทิ้งลงแหล่งฝังกลบได้ หลังจากอายุการบ่มมากกว่า 28 และ 14 วัน โดยรายละเอียดการพัฒนากำลังอัดของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของ Na_2O และนำมาทำการหล่อแข็งจากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเป็นร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนักแสดงดังรูปที่

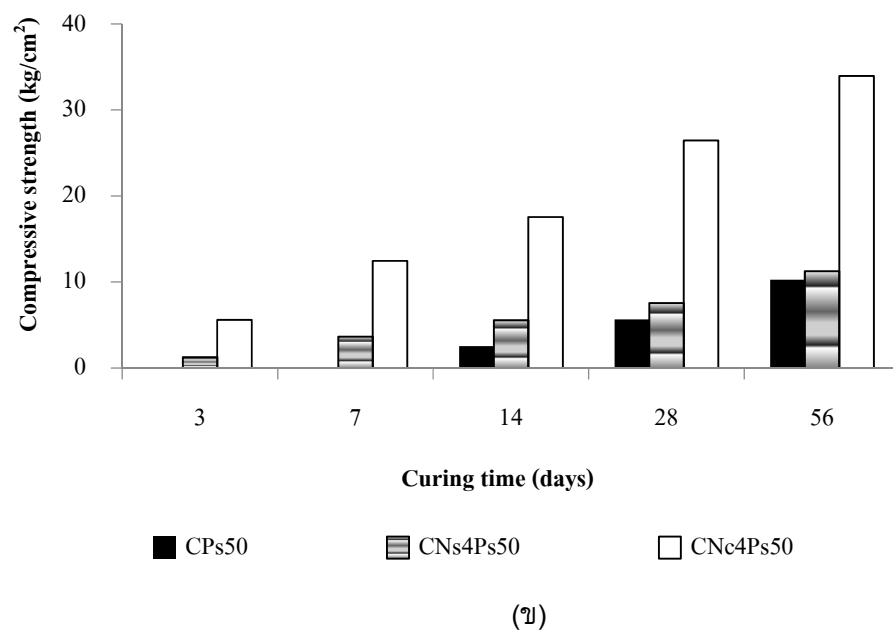
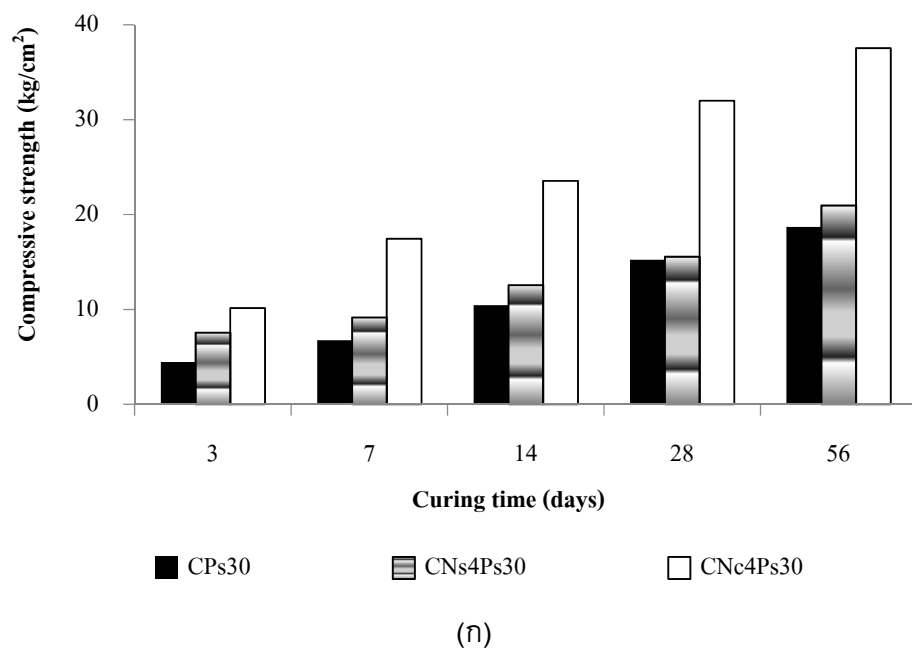


(ก)



(ข)

รูปที่ 6 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการเติมกระตุ้นปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ ก) 30 และ ข) 50



รูปที่ 7 การพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และถั่วกลบดำที่มีการเติมกระตุ้นปฏิกิริยาในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ ก) 30 และ ข) 50

จากรูปที่ 7 แสดงการพัฒนากำลังอัดของก้อนหล่อแข็งจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีการเติมกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ทำให้ก้อนของเสียหล่อแข็งมีการพัฒนากำลังอัดตั้งแต่ 3 วันแรก โดยก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักโดยน้ำหนักของ Na_2O และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดสูงกว่าการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของ Na_2O โดยก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ที่ผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วัน เท่ากับ 1.25 และ 5.58 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [3-8]

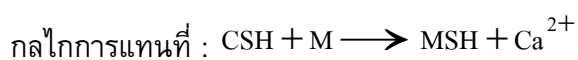
ตารางที่ 6 ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา

ตัวอย่าง	ระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้น(นาท)	ระยะเวลาในการก่อตัวสุดท้าย(นาท)
CPs30	173	502
CNs2Ps30	155	488
CNc2Ps30	150	470
CNs4Ps30	146	467
CNc4Ps30	135	421
CPs50	255	631
CNs2Ps50	213	553
CNc2Ps50	179	511
CNs4Ps50	199	567
CNc4Ps50	169	498

จากตารางที่ 6 แสดงระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีและไม่มี การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า ก้อน

หล่อแข็งของเสียที่ไม่มีการผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้งสองชนิดที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายเท่ากับ 173 502 และ 155 351 นาที ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของก้อนของเสียหล่อแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากโลหะหนักที่ผสมอยู่ในกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสี ได้แก่ สังกะสี โครเมียม และเหล็ก ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และแก้วกลบดำ โดยกลไกการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของโลหะหนักกับ CSH gel มี 2 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 คือ โลหะหนักที่เติมลงในก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีประจุบวก (M^+) จะรวมตัวกับ OH^- ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับน้ำ อยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนอยู่บนผิวของแก้วกลบดำทำให้ความสามารถในการซึมผ่านตัว Ca^{2+} ที่อยู่ในสารละลายจึงเข้าไปทำปฏิกิริยากับแก้วกลบดำได้น้อยลง ทำให้การการพัฒนากำลังรับแรงอัดช้าลง [9]

รูปแบบที่ 2 คือ โดยปกติโลหะหนักนั้นเป็นสารแอมโฟเทอริก ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำในช่วง pH แคบๆ (pH 9 – 11) เกิดการละลายกลับออกมาบางส่วน เนื่องจากสภาวะภายในก้อนหล่อแข็งมีความเป็นด่างสูง โลหะหนักซึ่งมีประจุบวก (M^+) จะสามารถเข้าไปแทนที่ Ca^{2+} ใน CSH gel ทำให้ CSH มีปริมาณลดลงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลง กลไกการเกิดแสดงดังสมการ [10]



$M =$ ไอออนของโลหะหนักประเภทต่างๆ

อีกสาเหตุหนึ่งอาจจะเกิดจากการเพิ่มปริมาณตะกอนโลหะหนักทำให้สัดส่วนของวัสดุยึดประสานมีค่าลดลง ทำให้สารตั้งต้นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลงตามไปด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่ง สังกะสี ซึ่งมีรายงานการวิจัยที่ผ่านมา พบว่า สังกะสีเป็นโลหะที่มีผลกระทบต่อการพัฒนา กำลังของก้อนของเสียหล่อแข็งมากที่สุด โดยสังกะสีจะละลายออกมาอยู่ในรูป $Zn(OH)_2$ และ $Zn(OH)_3^-$ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ได้ Calcium Zinc Hydrate ($CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายต่ำ จึงส่งผลให้สังกะสีที่ละลายกลับออกมาในสภาวะที่สารละลายเป็นด่างรั่วไหลออกมาไม่มาก และอีกสาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากเกลือของสังกะสีเมื่อสัมผัสกับโซเดียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากัน แล้วก่อตัวในรูป Insoluble Zinc Silicate Gelatin ซึ่งมีค่าการละลายที่ต่ำ [11,12]

ก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายต่ำกว่าก้อนของเสียที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา ที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (173 และ 502 นาที) ค่าระยะเวลาการก่อตัวของก้อนของเสียหล่อแข็งมีค่าลดลง เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น

โดยก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายเท่ากับ 146 และ 467 นาที เนื่องจากการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีด้วยกัน 3 สาเหตุ คือ สาเหตุที่ 1 สารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้ผลผลิตเป็น CSH gel ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น สาเหตุที่ 2 การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ NaOH เป็นการเพิ่ม OH^- ในสารละลายจึงส่งผลให้ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นจากการเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียว ทำให้สามารถกัดกร่อนพันธะ Si-O bond ได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิคมากขึ้น [13] และสาเหตุที่ 3 ค่าความเป็นต่างของสารละลายโซเดียมซิลิเกต เพิ่มสภาวะความเป็นต่างให้กับก้อนหล่อแข็งมากกว่า $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของ CCR กับน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Shi และ Day [14,15] ที่กล่าวว่า การเติมปูนขาวเพียงอย่างเดียวทำให้ค่าความเป็นต่างของสารละลายไม่มากพอที่จะทำลายพันธะ Si-O bond ดังนั้น pH เริ่มต้นของสารละลายจึงมีผลต่อกำลังรับแรงอัดในระยะแรก จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด

ส่วนก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าระยะเวลาในการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายลดลง เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เหมือนของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยมีค่าเท่ากับ 135 และ 421 นาที เนื่องจากโซเดียมคาร์บอเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ NaOH เป็นการเพิ่ม OH^- ในสารละลายจึงส่งผลให้ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถกัดกร่อนพันธะ Si-O ได้ดีขึ้น นอกจากนั้น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เมื่อทำปฏิกิริยากับ โซเดียมคาร์บอเนต เกิด CaCO_3 ซึ่งสามารถเป็นตัวเติมภายในช่องว่างภายในก้อนของเสียหล่อแข็งจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัว และการพัฒนากำลังอัดมีค่าสูง

เมื่อมีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มี และไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา มีค่าสูงกว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และมีค่าลดลง เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น โดยก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ที่มีผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 13 421 และ 169 498 นาที ตามลำดับ

ผลการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนของเสียหล่อแข็ง

ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะจากก้อนของเสียหล่อแข็งของเสียที่ผ่านการทดสอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) โดยทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งที่มีอายุการบ่มที่ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 7 ก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าเข้มข้นของเหล็ก สังกะสี และโครเมียมในน้ำชะ 3.82 6.44 4.04 และ 8.42 9.02 7.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเพิ่มขึ้น [16] โดยค่าความเข้มข้นของเหล็ก และสังกะสีในน้ำชะไม่มีเกินมาตรฐานระบุไว้ แต่โครเมียมมีการระบุไว้ในมาตรฐานการทดสอบ TCLP ของกรมโรงงาน ซึ่งก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าเกินมาตรฐาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาเพื่อปรับปรุงความสามารถของก้อนของเสียหล่อแข็ง

ตารางที่ 7 ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะ จากก้อนหล่อแข็งของเสีย

ตัวอย่าง	ค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	เหล็ก	สังกะสี	โครเมียม
ค่ามาตรฐาน	-	-	5 *
CPs30	3.82	6.44	4.04
CNs2Ps30	3.39	4.87	3.56
CNc2Ps30	2.77	4.43	3.06
CNs4Ps30	3.55	4.46	3.07
CNc4Ps30	2.81	4.06	2.62
CPs50	8.42	9.02	7.24
CNs2Ps50	6.66	6.62	6.23
CNc2Ps50	6.05	4.95	6.20
CNs4Ps50	6.76	6.07	5.69
CNc4Ps50	6.14	4.54	3.75

หมายเหตุ มาตรฐานการทดสอบ TCLP ของกรมโรงงาน

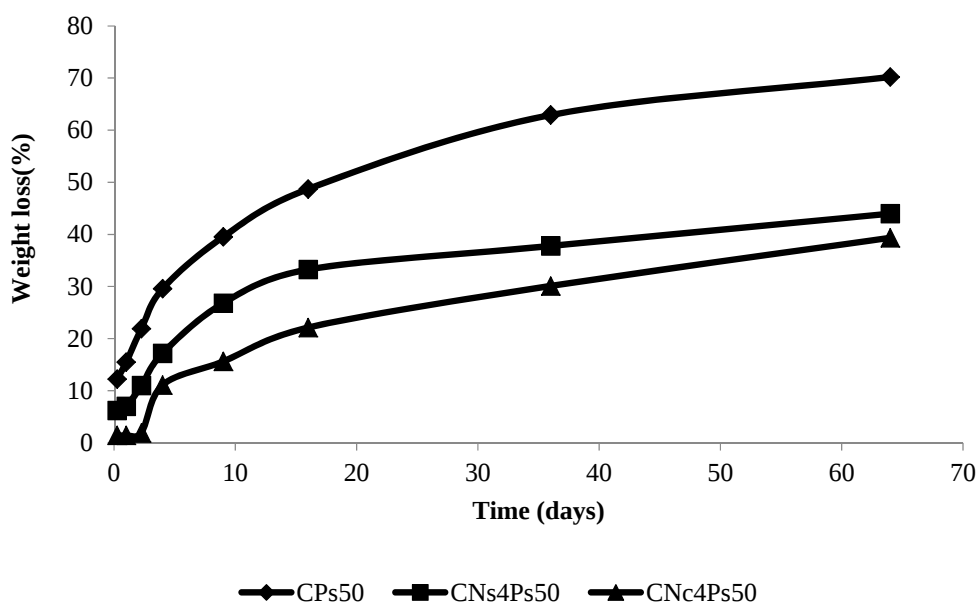
ก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 2 และ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O และมีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก (เหล็ก สังกะสี และโครเมียม) ในน้ำชะ มีค่าน้อยกว่าก้อนหล่อแข็งของเสียที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยา โดยที่ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O และผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะต่ำสุด จะเห็นได้ว่า การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตทำให้ค่าความเข้มข้นของโครเมียมลดลงร้อยละ 25-35 และ 35 -50 ตามลำดับ

การรั่วไหลของเหล็ก สังกะสี และโครเมียม จากน้ำชะของก้อนของเสียหล่อแข็ง เนื่องจากโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด สามารถตกตะกอนได้ดีในช่วงพีเอชแคบ เช่น เหล็ก สามารถตกตะกอนได้ดีที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 – 12 และ มากกว่า 7.5 สำหรับเหล็กในรูป Fe^{+2} และ Fe^{+3} ตามลำดับ สังกะสีสามารถตกตะกอนได้ดีที่ค่าพีเอชประมาณ 9 และโครเมียมสามารถตกตะกอนได้ดีที่ค่าพีเอชในช่วง 7 – 8 แต่ก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยามีค่า pH เท่ากับ 12.12 และเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนต จะมีค่าเท่ากับ 12.75 และ 12.98 ซึ่งมีค่าสูงกว่าสภาวะการตกตะกอนของโลหะหนักทำให้เหล็ก สังกะสี และโครเมียมถูกชะละลายออกมาจากก้อนของเสียหล่อแข็งบางส่วน

ผลการทดสอบความทนทานของก้อนหล่อแข็ง

การทดสอบความทนทานของก้อนของเสียหล่อแข็งจะนำก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่มีและไม่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O มาทำการทดสอบความทนทานโดยประยุกต์วิธีการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักด้วยวิธี Tank test มาทำการแช่ในฝนกรดสังเคราะห์ที่เตรียมจากกรดซัลฟิวริกผสมกรดไนตริกที่อัตราส่วน 60:40 โดยปริมาตร และทำการเปลี่ยนฝนกรดสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 0.25 1.25 2 4 9 16 32 และ 64 วัน จากนั้นนำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบมาทำการลดความชื้นในตู้อบภายใต้สภาวะไนโตรเจน จนกว่าจะมีน้ำหนักคงที่ และนำมาวัดหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางการยภาพของก้อนของเสียหล่อแข็ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

การสูญเสียน้ำหนักของก้อนของเสียหล่อแข็ง



รูปที่ 8 การสูญเสียน้ำหนักของก้อนของเสียหล่อแข็งของเสียที่อายุ 28 วัน หลังจากกาแช่ฝนกรดสังเคราะห์

จากรูปที่ 8 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่มีและไม่มี การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ผลการศึกษาพบว่า ก้อนของเสียหล่อแข็งที่ไม่มีและไม่มีการผสมสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการแช่ในฝนกรดสังเคราะห์เพิ่มขึ้น โดยก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักที่ระยะเวลาการแช่ฝนกรดสังเคราะห์ 64 วัน ลดลงเท่ากับร้อยละ 70.2 โดยน้ำหนัก และเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O พบว่าค่าการสูญเสียน้ำหนักของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 44 และ 39 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตเป็นการเร่งการก่อตัวของก้อนของเสียหล่อแข็งโดยสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดจะเพิ่มสถานะความเป็นต่างในก้อนของเสียหล่อแข็ง ทำให้ซิลิกอนจากแก้วกลบดำละลายออกมาเกิดเป็น CSH ทำให้

โครงสร้างของก้อนของเสียหล่อแข็งมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นซิลิกอนในสารละลายโซเดียมซิลิเกตยังสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เกิดเป็น CSH ได้เพิ่มขึ้น ส่วนโซเดียมคาร์บอเนตยังสามารถรวมกับแคลเซียมในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ กลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีสมบัติเป็นส่วนเติมเต็มในช่องว่างทำให้ความหนาแน่นของก้อนของเสียหล่อแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น และยังเพิ่มความสามารถในการทนทานต่อการกัดเพิ่มขึ้นอีกด้วย

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็ง

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่มีและไม่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ที่อายุการบ่ม 28 วัน หลังจากสัมผัสฝนกรดสังเคราะห์เป็นเวลา 64 วัน จากนั้นนำมาทำการดูความชื้นด้วย ซิลิกาเจล ภายใต้สภาวะที่ที่เต็มไปด้วยก๊าซไนโตรเจน เพื่อป้องกันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน หลังจากนั้นนำก้อนของเสียหล่อแข็งมาทำการตัดผ่านกลาง และนำส่วนที่เป็นผิว และแกนกลางของก้อนของเสียหล่อแข็งมาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางด้วยเคมี ด้วยเทคนิค XEF ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 8-10

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 28 วัน

CPs50								
Before soaked		Picture	after soaked		Surface	after soaked		Core
Chemical composition			Chemical composition			Chemical composition		
CaO	61.43		CaO	29.02		CaO	29.43	
SiO ₂	14.58		SiO ₂	31.63		SiO ₂	31.13	
Al ₂ O ₃	5.12		Al ₂ O ₃	0.11		Al ₂ O ₃	0.15	
Fe ₂ O ₃	3.31		Fe ₂ O ₃	0.29		Fe ₂ O ₃	0.22	
SO ₃	4.35		SO ₃	38.76		SO ₃	38.89	
MgO	0.51		MgO	0.05		MgO	0.05	
K ₂ O	0.28		K ₂ O	0.00		K ₂ O	0.00	
ZnO	9.51		ZnO	0.00		ZnO	0.00	
Na ₂ O	0.91		Na ₂ O	0.14		Na ₂ O	0.14	

จากตารางที่ 8 แสดงลักษณะทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทั้งก่อนและสัมผัสฝนกรดสังเคราะห์เป็นเวลา 64 วัน ผลการศึกษาพบว่า ก้อนของเสียหล่อแข็งก่อนการสัมผัสฝนกรดสังเคราะห์มี CaO และ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 61.43 และ 14.58 นอกจากนั้นยังมี Al_2O_3 Fe_2O_3 SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง ซึ่งมีปริมาณไม่เกินร้อยละ 10 โดย CaO เป็นสารตั้งต้นที่อยู่ในกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ส่วน SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักของเถ้าแกลบดำ ซึ่งสารทั้งสองชนิดจะรวมกับน้ำและเกิดเป็นสารประกอบคล้ายปูนซีเมนต์ นั่นคือ CSH และหลังจากสัมผัสฝนกรดสังเคราะห์เป็นเวลา 64 วัน ก้อนของเสียหล่อแข็งถูกฝน

เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ในก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงดังตารางที่ 9 และ 10 ผลการศึกษาพบว่า ก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ฝนกรดสังเคราะห์กัดกร่อนผิวของก้อนของเสียหล่อแข็งจากผิวภายนอกเข้าสู่ด้านใน โดยมีความลึกในการกัดกร่อนประมาณ 5 มิลลิเมตร และเมื่อนำผิวภายนอกที่เกิดการกัดกร่อนมาทำการวิเคราะห์ พบว่า มีปริมาณ SO_3 เพิ่มขึ้นเป็นปริมาณร้อยละ 38 ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา decalcification ที่ผิว ส่วนด้านในของก้อนของเสียหล่อแข็งไม่ได้ถูกกัดกร่อน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าก้อนของเสียหล่อแข็งที่ไม่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนต แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O มีความแข็งแรง และมีความหนาแน่นสูงขึ้น จึงทำให้ฝนกรดสังเคราะห์ไม่สามารถกัดกร่อนภายในของก้อนของเสียหล่อแข็งได้

จากตารางที่ 10 แสดงลักษณะทางกายภาพของก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมละลายโซเดียมซิลิเกต ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าฝนกรดสังเคราะห์สามารถกัดกร่อนจากผิวภายนอกเข้าสู่ด้านใน โดยมีความลึกในการกัดกร่อนประมาณ 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีความลึกในการกัดกร่อนมากกว่าก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของ Na_2O ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด และระยะเวลาการก่อตัวของก้อนของเสียหล่อแข็ง นอกจากนั้นยังในผิวของก้อนของเสียหล่อแข็งที่สัมผัสกับฝนกรดสังเคราะห์จะมีปริมาณ SO_3 เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียม และ SO_3 เป็น แคลเซียมซัลเฟตและตกตะกอนบนผิวของก้อนของเสียหล่อแข็งได้

สรุปผล

- 1) อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่ใช้เป็นวัสดุยึดประสานในการหล่อแข็งกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสี คือ ก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีอัตราส่วนของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าแกลบดำที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดคือ 60 : 40 โดยน้ำหนัก
- 2) การเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมคาร์บอเนตทำให้ค่ากำลังอัดของก้อนของเสียหล่อแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีระยะเวลาการก่อตัวลดลง โดยสารกระตุ้นปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดสามารถพัฒนา กำลังอัดในช่วงต้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุการบ่ม 3 วัน และสามารถถอดแบบได้ตั้งแต่ 1 วัน

- 3) เมื่อนำมาผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง และระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีเพิ่มขึ้น และไม่สามารถถอดออกจากแบบได้ในช่วง 3 วันแรก แต่เมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในก้อนของเสียหล่อแข็งในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ก้อนของเสียหล่อแข็งสามารถถอดออกจากแบบได้ตั้งแต่ 1 วัน โดยมีค่ากำลังอัดได้เท่ากับ 3.45 และ 5.58 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
- 4) การทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักจากก้อนของเสียหล่อแข็ง ปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะจากก้อนหล่อแข็งของเสีย มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ยกเว้นก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการเติมโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก
- 5) ในการทดสอบความทนทานของก้อนของเสียหล่อแข็ง ฝนกรดสังเคราะห์สามารถกัดกร่อนก้อนของเสียหล่อแข็งที่มีการเติมที่มีการเติมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่ไม่มีการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาได้ทั้งก้อน ทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุดเมื่อมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนตในก้อนของเสียหล่อแข็งในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ฝนกรดสังเคราะห์สามารถกัดกร่อนที่ผิวได้ลึกประมาณ 5- 10 มิลลิเมตร

เอกสารอ้างอิง

1. Fan,Y.,Yin S., Wen, Z. and Zhong J., 1999, "Activation of Fly Ash and its Effects on cement properties", Cement and Concrete Research, Vol.29, pp.467-472.
2. 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.
3. Ilic, M., Miletic, S., Milic, D. and Brceski, I., 2000, "Solidification of lead ions in Portland cement matrix, in: G.R. Woolley, J.J.J.M. Goumans, P.J. Wainwright (Eds.), Waste Materials in Construction, pp. 87–97.
4. Arliguie,G., Grandet, J., 1990, "Etude de l'hydratation du ciment en presence de zinc, influence de la teneur en gypse", Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp.346– 354.
5. Arliguie,G., Grandet, J., 1990, "Influence de la composition d'un ciment Portland sur son hydratation en presence de zinc", Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp.517– 524.
6. Hamilton, I. W. and Sammes N. M., 1999, "Encapsulation of steel foundry bag house dusts in cement mortar", Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 55-61.
7. Qiao, X.C., Poon, C.S., Cheeseman, C.R., 2007, "Investigation into the stabilization/solidification performance of Portland cement through cement clinker phases", Journal of Hazardous Materials, Vol. B139, pp. 238–243.
8. Asavapisit S., Naksrichum S., Harnwajanawong N., 2005, "Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge", Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 1042-1049.
9. 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
10. Conner, J.R.,1990 ,Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Waste, New York, Van Nostrand Reinhold, pp.638-651
11. Qian, G.R. , Sun, D.D. and Tay, J.W., 2003, "Characterization of Mercury- and Zinc-doped Alkali-activated Slag Matrix Part II. Zinc", Cement and Concrete Research, vol.33, pp. 1257-1262.

12. Li, X.D., Zhang, Y.M., Poon, C.S. and Lo, I.M.C., 2001, "Study of zinc in cementitious material stabilization /solidified wastes by sequential chemical extraction and microstructural analysis", *Chemical Speciation and Bioavailability*, Vol.13, No.1, pp. 1-7.]
13. Fan,Y.,Yin S., Wen, Z. and Zhong J., 1999, "Activation of Fly Ash and its Effects on cement properties", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, pp.467-472.
14. Shi, C, and Day, R.L., 1995, "A chemical activation of lime-slag blend, *Proceedings Fifty International Conference Milwaukee*", Wilconsin, USA, SP 153-61, pp. 1168-1177.
15. Shi, C., 1996, "Strength, Pore Structure and Permeability of Alkali – Activated Slag Mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.12, pp.1789-1799
16. Asavapisit, S., and Chotklang, D., 2004, "Solidification of Electroplating Sludge using Alkali-Activated Pulverized Fuel Ash as cementitious binder", *Cement and Concrete Research*, vol.34, pp. 349-353

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าการรั่วไหลของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP

ตารางที่ ก.1 ค่าการรั่วไหลของเหล็กจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 7 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	4.35	4.43	4.55	4.68	4.81	4.90	4.95	5.10
CNs2Ps30	3.86	3.93	4.04	4.15	4.27	4.35	4.39	4.53
CNc2Ps30	3.15	3.21	3.30	3.39	3.48	3.55	3.59	3.70
CPs50	9.58	9.75	10.03	10.31	10.59	10.79	10.90	11.24
CNs2Ps50	7.58	7.72	7.93	8.15	8.38	8.53	8.63	8.90
CNc2Ps50	6.88	7.00	7.20	7.40	7.61	7.75	7.83	8.07
CNs4Ps30	3.78	3.85	3.92	4.03	4.14	4.26	4.34	4.46
CNc4Ps30	3.09	3.14	3.20	3.29	3.38	3.48	3.54	3.64
CNs4Ps50	7.43	7.56	7.70	7.91	8.14	8.36	8.51	8.75
CNc4Ps50	6.74	6.86	6.99	7.18	7.39	7.59	7.73	7.95

ตารางที่ ก.2 ค่าการรั่วไหลของสังกะสีจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 7 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	7.25	7.38	7.59	7.72	7.94	8.08	8.30	8.54
CNs2Ps30	5.48	5.58	5.73	5.84	6.00	6.11	6.28	6.48
CNc2Ps30	4.98	5.07	5.21	5.30	5.45	5.55	5.70	5.89
CPs50	10.15	10.33	10.62	10.81	11.11	11.31	11.63	12.00
CNs2Ps50	7.45	7.58	7.79	7.94	8.16	8.30	8.53	8.81
CNc2Ps50	5.57	5.67	5.83	5.93	6.10	6.21	6.38	6.59
CNs4Ps30	5.43	5.58	5.76	5.86	6.03	6.13	6.25	6.36
CNc4Ps30	4.93	5.07	5.23	5.33	5.48	5.57	5.68	5.78
CNs4Ps50	7.38	7.58	7.83	7.97	8.19	8.34	8.49	8.64
CNc4Ps50	5.52	5.67	5.85	5.96	6.13	6.24	6.35	6.46

ตารางที่ ก.3 ค่าการรั่วไหลของโครเมียมจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 7 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	4.55	4.68	4.81	4.89	5.03	5.12	5.26	5.41
CNs2Ps30	4.01	4.12	4.24	4.31	4.43	4.51	4.64	4.77
CNc2Ps30	3.44	3.54	3.64	3.70	3.80	3.87	3.98	4.09
CPs50	8.15	8.38	8.61	8.77	9.01	9.17	9.43	9.69
CNs2Ps50	7.01	7.21	7.41	7.54	7.75	7.89	8.11	8.34
CNc2Ps50	6.98	7.18	7.38	7.51	7.72	7.86	8.08	8.30
CNs4Ps30	3.45	3.51	3.61	3.67	3.78	3.85	3.91	3.99
CNc4Ps30	2.95	3.00	3.09	3.14	3.23	3.29	3.35	3.41
CNs4Ps50	6.40	6.52	6.70	6.82	7.01	7.13	7.26	7.39
CNc4Ps50	4.22	4.30	4.42	4.49	4.62	4.70	4.79	4.87

ตารางที่ ก.4 ค่าการรั่วไหลของเหล็กจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 14 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	4.32	4.29	4.41	4.48	4.63	4.72	4.85	4.98
CNs2Ps30	3.83	3.80	3.91	3.98	4.11	4.18	4.32	4.46
CNc2Ps30	3.13	3.10	3.19	3.25	3.35	3.41	3.53	3.64
CPs50	9.51	9.44	9.70	9.88	10.20	10.38	10.72	11.07
CNs2Ps50	7.52	7.47	7.68	7.81	8.07	8.22	8.48	8.76
CNc2Ps50	6.83	6.78	6.97	7.09	7.33	7.46	7.70	7.95
CNs4Ps30	4.00	4.11	4.25	4.33	4.45	4.53	4.61	4.69
CNc4Ps30	3.20	3.29	3.40	3.46	3.56	3.62	3.69	3.75
CNs4Ps50	7.71	7.93	8.19	8.33	8.56	8.72	8.88	9.04
CNc4Ps50	6.93	7.12	7.36	7.49	7.70	7.84	7.98	8.12

ตารางที่ ก.5 ค่าการรั่วไหลของสังกะสีจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 14 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	7.20	7.33	7.53	7.66	7.88	8.02	8.17	8.31
CNs2Ps30	5.44	5.54	5.72	5.79	5.98	6.09	6.20	6.31

CNc2Ps30	4.94	5.03	5.19	5.26	5.44	5.53	5.63	5.73
CPs50	10.07	10.26	10.59	10.73	11.08	11.28	11.48	11.69
CNs2Ps50	7.39	7.53	7.77	7.88	8.13	8.28	8.43	8.58
CNc2Ps50	5.53	5.63	5.81	5.89	6.08	6.19	6.30	6.41
CNs4Ps30	5.28	5.37	5.47	5.57	5.67	6.09	6.29	6.40
CNc4Ps30	4.80	4.88	4.97	5.06	5.15	5.53	5.71	5.82
CNs4Ps50	7.18	7.31	7.44	7.57	7.71	8.28	8.55	8.70
CNc4Ps50	5.37	5.46	5.56	5.66	5.76	6.19	6.39	6.50

ตารางที่ ก.6 ค่าการรั่วไหลของโครเมียมจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 14 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	4.52	4.60	4.72	4.81	4.90	5.08	5.17	5.32
CNs2Ps30	3.98	4.05	4.16	4.24	4.32	4.48	4.56	4.69
CNc2Ps30	3.41	3.48	3.57	3.64	3.70	3.84	3.91	4.02
CPs50	8.09	8.23	8.46	8.62	8.77	9.10	9.27	9.53
CNs2Ps50	6.96	7.08	7.28	7.41	7.54	7.83	7.97	8.19
CNc2Ps50	6.93	7.05	7.25	7.38	7.51	7.80	7.94	8.16
CNs4Ps30	3.42	3.49	3.60	3.65	3.71	3.82	3.94	3.96
CNc4Ps30	2.93	2.98	3.08	3.12	3.17	3.26	3.37	3.38
CNs4Ps50	6.35	6.47	6.68	6.77	6.89	7.08	7.31	7.34
CNc4Ps50	4.19	4.26	4.40	4.46	4.54	4.67	4.82	4.84

ตารางที่ ก.7 ค่าการรั่วไหลของเหล็กจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 28 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	3.82	3.96	4.07	4.20	4.35	4.43	4.58	4.71
CNs2Ps30	3.39	3.51	3.62	3.74	3.87	3.94	4.08	4.19
CNc2Ps30	2.77	2.87	2.96	3.05	3.16	3.22	3.33	3.42
CPs50	8.42	8.71	9.00	9.29	9.61	9.79	10.13	10.41
CNs2Ps50	6.66	6.89	7.12	7.35	7.61	7.74	8.01	8.24
CNc2Ps50	6.05	6.26	6.46	6.67	6.90	7.03	7.27	7.48

CNs4Ps30	3.55	3.67	3.79	3.91	4.04	4.17	4.29	4.40
CNc4Ps30	2.81	2.91	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.49
CNs4Ps50	6.76	7.00	7.22	7.46	7.70	7.95	8.17	8.40
CNc4Ps50	6.14	6.35	6.56	6.77	6.99	7.22	7.42	7.63

ตารางที่ ก.8 ค่าการรั่วไหลของสีกะสีจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 28 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	6.44	6.56	6.68	6.80	6.92	7.05	7.17	7.30
CNs2Ps30	4.87	4.96	5.05	5.14	5.23	5.33	5.42	5.52
CNc2Ps30	4.43	4.51	4.59	4.67	4.75	4.84	4.93	5.02
CPs50	9.02	9.18	9.35	9.52	9.69	9.86	10.04	10.22
CNs2Ps50	6.62	6.74	6.86	6.99	7.11	7.24	7.37	7.50
CNc2Ps50	4.95	5.04	5.13	5.22	5.32	5.41	5.51	5.61
CNs4Ps30	4.46	4.54	4.63	4.71	4.79	4.88	4.97	5.11
CNc4Ps30	4.06	4.13	4.20	4.28	4.36	4.43	4.51	4.64
CNs4Ps50	6.07	6.18	6.29	6.40	6.52	6.63	6.75	6.94
CNc4Ps50	4.54	4.62	4.70	4.79	4.87	4.96	5.05	5.19

ตารางที่ ก.9 ค่าการรั่วไหลของโครเมียมจากก้อนของเสียหล่อแข็งที่อายุ 28 วัน

Samples	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
CPs30	4.04	4.16	4.29	4.37	4.45	4.53	4.66	4.81
CNs2Ps30	3.56	3.68	3.80	3.87	3.94	4.01	4.14	4.28
CNc2Ps30	3.06	3.16	3.26	3.32	3.38	3.44	3.55	3.67
CPs50	7.24	7.48	7.72	7.86	8.01	8.15	8.41	8.69
CNs2Ps50	6.23	6.43	6.64	6.76	6.89	7.01	7.24	7.47
CNc2Ps50	6.20	6.41	6.62	6.73	6.86	6.98	7.21	7.44
CNs4Ps30	3.07	3.12	3.18	3.24	3.34	3.40	3.46	3.52
CNc4Ps30	2.62	2.67	2.72	2.77	2.86	2.91	2.96	3.01
CNs4Ps50	5.69	5.79	5.90	6.00	6.20	6.31	6.42	6.54

CNc4Ps50	3.75	3.82	3.89	3.96	4.09	4.16	4.23	4.31
----------	------	------	------	------	------	------	------	------

ภาคผนวก ข

ตารางผลการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก และค่าเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
ของซีเมนต์เพสต์ ทั้ง 3 ชุดการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนัก และค่าเปลี่ยนแปลง Diameter ของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

Sample	Diameter (cm)	Diameter (cm)	High (cm)	Volume (cm)	Volume Solution (ml)	Water (ml)	Weight 1	Weight 2
	d ก่อน	d หลัง	h ก่อน				ก่อน (g)	หลัง (g)
C1-1	2.710	2.710	2.500	14.426	288.518	277.021	31.500	31.100
C1-2	2.917	3.270	2.800	18.720	374.391	359.472	40.100	39.520
C1-3	2.933	3.193	2.600	17.574	351.473	337.467	35.850	35.310
C1-4	2.923	3.133	2.700	18.125	362.507	348.061	38.900	34.540
C1-5	2.900	3.203	2.600	17.180	343.609	329.916	36.700	31.420
C1-6	2.650	3.200	2.600	14.346	286.919	275.486	31.400	25.320
C1-7	2.807	3.800	2.600	16.096	321.924	309.095	37.590	26.430
C1-8	2.900	3.783	2.700	17.841	356.824	342.605	38.280	22.240
C2-1	2.933	2.957	2.700	18.250	364.991	350.446	39.200	38.560
C2-2	2.900	3.033	2.700	17.841	356.824	342.605	38.200	37.660
C2-3	2.717	3.123	2.700	15.661	313.211	300.730	37.550	36.700
C2-4	2.750	3.167	2.800	16.638	332.750	319.490	38.800	34.550
C2-5	2.907	3.338	2.600	17.263	345.269	331.510	36.800	30.600
C2-6	2.907	3.333	2.800	18.591	371.829	357.011	38.800	29.150
C2-7	2.817	3.633	2.700	16.835	336.691	323.274	38.800	26.960
C2-8	2.983	3.827	2.700	18.877	377.542	362.497	37.150	23.480

ตารางที่ ข.2 ค่าการสูญเสียน้ำหนัก และค่าเปลี่ยนแปลง Diameter ของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่มีการผสมสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

Sample	Diameter (cm)	Diameter (cm)	Hight (cm)	Volume (cm)	Volume Solution (ml)	Water (ml)	Weight 1	Weight 2
	d ก่อน	d หลัง	h				ก่อน (g)	หลัง (g)
A1-1	2.917	3.077	2.700	18.047	360.938	346.554	33.980	31.810
A1-2	2.907	3.200	2.800	18.587	371.743	356.929	35.490	32.920
A1-4	2.917	3.253	2.700	18.047	360.938	346.554	36.120	32.290
A1-5	3.000	3.193	2.600	18.386	367.714	353.061	34.230	28.470
A1-6	2.950	3.113	2.700	18.462	369.235	354.521	36.080	26.260
A1-7	2.973	3.117	2.800	19.450	388.991	373.490	36.150	23.950
A1-8	2.973	3.287	2.500	17.366	347.314	333.473	32.960	20.900
A1-9	2.983	3.277	2.700	18.881	377.626	362.578	34.500	20.540
A2-1	3.000	3.107	2.600	18.386	367.714	353.061	33.350	31.330
A2-2	2.957	3.193	2.600	17.858	357.168	342.935	34.680	31.300
A2-3	2.993	3.197	2.700	19.008	380.162	365.012	35.000	31.020
A2-4	3.000	3.207	2.700	19.093	381.857	366.640	35.680	39.420
A2-5	2.983	3.207	2.700	18.881	377.626	362.578	35.860	26.390
A2-6	2.983	3.100	2.600	18.182	363.640	349.149	32.970	22.160
A2-7	2.917	3.217	2.700	18.047	360.938	346.554	34.090	22.850
A2-8	2.987	3.2	2.700	18.924	378.470	363.388	34.640	20.960

ตารางที่ ข.3 ค่าการสูญเสียน้ำหนัก และค่าเปลี่ยนแปลง Diameter ของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่มีการผสมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

Sample	Diameter (cm)	Diameter (cm)	Hight (cm)	Volume (cm)	Volume Solution (ml)	Water (ml)	Weight 1	Weight 2
	d ก่อน	d หลัง	h				ก่อน (g)	หลัง (g)
B1-1	2.983	3.100	2.700	18.881	377.626	362.578	34.840	30.580
B1-2	3.000	3.200	2.800	19.800	396.000	380.219	36.390	30.690
B1-3	2.973	3.177	2.700	18.755	375.099	360.151	34.630	27.010
B1-4	2.983	3.267	2.600	18.182	363.640	349.149	33.850	24.340
B1-5	2.987	3.133	2.700	18.924	378.470	363.388	35.560	21.910
B1-6	2.967	3.110	2.700	18.671	373.419	358.538	34.450	18.810
B1-8	2.987	3.343	2.700	18.924	378.470	363.388	35.660	13.850
B1-9	3.000	3.233	2.700	19.093	381.857	366.640	35.580	7.380
B2-1	3.000	3.100	2.700	19.093	381.857	366.640	34.930	30.660
B2-2	2.970	3.120	2.700	18.713	374.258	359.344	37.220	31.520
B2-3	2.983	3.200	2.600	18.182	363.640	349.149	34.790	27.200
B2-4	2.983	3.107	2.600	18.182	363.640	349.149	34.820	24.010
B2-6	2.973	3.100	2.500	17.366	347.314	333.473	33.320	19.770
B2-7	2.983	3.133	2.700	18.881	377.626	362.578	35.200	16.890
B2-8	2.993	3.340	2.800	19.712	394.242	378.531	36.260	12.820
B2-10	2.907	3.183	2.700	17.923	358.467	344.182	35.540	13.810

ภาคผนวก ก

ลักษณะทางกายภาพของก้อนเนื้อแข็ง ทั้ง 3 ชุดการทดลอง



ที่อายุ 0 วัน



ที่อายุ 0.25 วัน



ที่อายุ 1 วัน



ที่อายุ 2.25 วัน



ที่อายุ 4 วัน



ที่อายุ 9 วัน



ที่อายุ 16 วัน



ที่อายุ 36 วัน



ที่อายุ 64 วัน

รูปที่ ค.1 ลักษณะทางกายภาพก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสี ในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการแช่ฝนกรดสังเคราะห์เป็นเวลา 64 วัน



ที่อายุ 0 วัน



ที่อายุ 0.25 วัน



ที่อายุ 1 วัน



ที่อายุ 2.25 วัน



ที่อายุ 4 วัน



ที่อายุ 9 วัน



ที่อายุ 16 วัน



ที่อายุ 36 วัน



ที่อายุ 64 วัน

รูปที่ ค.2 ลักษณะทางกายภาพของก้อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากกากตะกอนจากโรงชุบประเภท สังกะสีในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่มีการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณร้อยละ 4 โดย น้ำหนัก ที่ผ่านการแช่ฝนกรดสังเคราะห์เป็นเวลา 64 วัน



ที่อายุ 0 วัน



ที่อายุ 0.25 วัน



ที่อายุ 1 วัน



ที่อายุ 2.25 วัน



ที่อายุ 4 วัน



ที่อายุ 9 วัน



ที่อายุ 16 วัน



ที่อายุ 36 วัน



ที่อายุ 64 วัน

รูปที่ ค.3 ลักษณะทางกายภาพก่อนหล่อแข็งของเสียที่มีการผสมกากกากตะกอนจากโรงชุบประเภทสังกะสี ในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่มีการผสมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 4 โดย น้ำหนัก ที่ผ่านการแช่ฝนกรดสังเคราะห์เป็นเวลา 64 วัน