

ผลกระทบของการอัดตัวจากวัสดุที่เป็นผลึกที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนของเพสต์

ปุณณมาน นรรัตน์¹ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร² และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคที่เป็นผลึกที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน โดยใช้ทรายแม่น้ำเป็นวัสดุที่เป็นผลึกซึ่งบดให้มีความละเอียดแตกต่างกัน 2 ขนาด และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงความร้อนด้วยวิธีไอโซเทอร์มอลคอนดักชันแคลอริมิเตอร์จนถึง 72 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์อายุ 24 และ 72 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเพสต์ที่ผสมทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนของเพสต์ไม่มากนัก และเมื่อทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราที่เท่ากันพบว่าความร้อนของเพสต์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออนุภาคของทรายแม่น้ำบดมีขนาดเล็กลง เพสต์ที่ผสมทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.8 และ 32.2 ไมครอน ในช่วงอายุ 12 ถึง 72 ชั่วโมงมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคระหว่าง 4.0 ถึง 22.7 J/g โดยการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคมีค่าน้อยในช่วง 12 ชั่วโมงแรก และเพิ่มขึ้นตามอายุมากขึ้นจนมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อมีอายุระหว่าง 24 ถึง 72 ชั่วโมง ส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมทรายบดละเอียดร้อยละ 50 ถึง 70 พบว่ามีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องระหว่างอายุ 24 ถึง 72 ชั่วโมง ขณะที่การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์ที่ผสมทรายบดละเอียดร้อยละ 50 ถึง 70 มีแนวโน้มคงที่

คำสำคัญ : การเปลี่ยนแปลงความร้อน / ขนาดอนุภาค / ทรายแม่น้ำ / วัสดุที่เป็นผลึก / การอัดตัว

* Corresponding Author : Author : punnaman@scg.co.th

1 นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

3 ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Packing Effect of a Crystalline Material with Different Particle Sizes on Heat Evolution of Pastes

Punnaman Norrarat^{1*}, Weerachart Tangchirapat² and Chai Jaturapitakkul³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

Abstract

This paper investigated the heat evolution of pastes due to packing effect of a crystalline material with different particle sizes. Ground river sand was used as a crystalline material and was ground to have two different particle sizes and were used separately as a replacement of Portland cement type I at rates of 0, 50, 60, and 70% by weight of binder. Heat evolution of paste containing ground river sand was measured using an isothermal conduction calorimeter up to 72 h. In addition, the compressive strengths of mortars at the age of 24 and 74 h were investigated. The results showed that ground river sand with different particle sizes had a slight effect on the heat evolution of paste. For pastes with the same replacement rate, the heat evolution of pastes were slightly increased with the decreased of the particle size of the ground river sand. Pastes containing ground river sand with d_{50} of 4.8 μm and d_{50} of 32.2 μm at 12 and 72 h had the heat evolution due to packing effect ranging from 4.0 to 22.7 J/g. The heat evolution due to packing effect was low during the first 12 h and increased with age and was constant at the age of 24 to 72 h. The compressive strength of mortar containing ground river sand at 50-70% developed continuously at the ages of 24 to 72 h while the cumulative of heat evolution of paste containing ground river sand tended to be constant.

Keywords : Heat Evolution / Particle Size / River Sand / Crystalline Material / Packing Effect

* Corresponding Author : Punnaman@scg.co.th

¹ Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนมาก และเป็นกระบวนการที่คายความร้อน ปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต เช่น การก่อตัว การแข็งตัว การรับกำลังอัด เป็นต้น ผลผลิตหลักที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่มีสมบัติเชื่อมประสาน และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การวัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องไอโซเทอร์มอลคอนดักชันแคลอริมิเตอร์ (isothermal conduction calorimeter) ที่อุณหภูมิคงที่ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่อายุเริ่มต้น [1-2] ซึ่งเป็นประโยชน์ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงความร้อนของคอนกรีตขนาดใหญ่

Ma และคณะ [3] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยใช้เครื่องไอโซเทอร์มอลคอนดักชันแคลอริมิเตอร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงความร้อนก็สูงขึ้นด้วย ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความละเอียดของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเพราะปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มต้นเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ที่สัมผัสกับน้ำ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำมาก ส่งผลให้อัตราของปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มสูงขึ้นในช่วงอายุต้น [4] นอกจากนี้ Douglas และคณะ [5] พบว่าเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กสามารถลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงอายุเริ่มต้นได้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยที่สำคัญต่องานเทคโนโลยีคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น งานเขื่อน งานฐานรากที่มีความหนาค่อนข้างมาก ซึ่งหากคอนกรีตมีปริมาณความร้อนสะสมเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเกินไปจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่แกนกลางกับที่ผิวของคอนกรีต เพราะคอนกรีตที่อยู่แกนกลางมีการคายความร้อนออกสู่ภายนอกได้ช้า โดยทั่วไปหากอุณหภูมิแตกต่างกันเกิน 19 องศาเซลเซียส [6] อาจทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหายจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (thermal

expansion) และเกิดการแตกร้าว ส่งผลให้ความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตในระยะยาวลดลงได้ Han และคณะ [7] พบว่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ลดลงมากเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหิน Class F หรือตะกรันเตาถลุงเหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแทนที่ในปริมาณมากขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [8-10] ได้รายงานการใช้ทรายแม่น้ำเป็นวัสดุเฉื่อยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราร้อยละ 10 ถึง 40 เพื่อศึกษาผลกระทบของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาปอซโซลาน และการอัดตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ที่มีต่อกำลังอัดและความพรุน ต่อมา Tikkanen และคณะ [11] ศึกษาผลกระทบของการใช้ควอตซ์ และหินปูนบดละเอียดต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการอัดตัวของอนุภาคขนาดเล็กที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนมีน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงการเปลี่ยนแปลงความร้อนของเพสต์ผสมวัสดุที่เป็นผลึก (ทรายแม่น้ำบด) ในปริมาณสูง เพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงความร้อนของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุหลักในคอนกรีต ซึ่งสามารถนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุเชื่อมประสานเสริม (supplementary cementitious materials) ในปริมาณสูงเพื่อลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

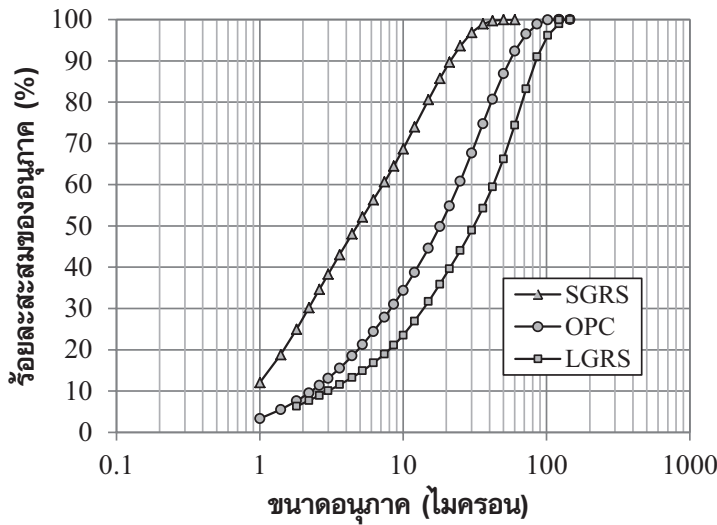
วัสดุที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ทรายแม่น้ำท้องถื่น โดย OPC นำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ส่วนทรายแม่น้ำนำมาใช้เป็นวัสดุที่เป็นผลึก

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนของวัสดุที่เป็นผลึก จึงนำทรายแม่น้ำมาล้างเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และอบให้แห้ง จากนั้นนำมาบดด้วยหม้อบดเซรามิค จนกระทั่งได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) 2 ขนาด คือ $d_{50} = 32.2$ ไมครอน ระบุให้เป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (LGRS) ขณะที่ OPC มี $d_{50} = 18.1$ ไมครอน สำหรับอนุภาคทราย

ขนาดเล็กทำการบดให้มี $d_{50} = 4.8$ ไมครอน ระบุให้เป็นอนุภาคขนาดเล็ก (SGRS) ซึ่งมี d_{50} เล็กกว่า OPC ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ใช้ GRS ให้มีขนาดเล็กเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนของเพสต์เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคของวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และการกระจายตัวของอนุภาคของ OPC, LGRS, และ SGRS วิเคราะห์โดย

ใช้เครื่องเลเซอร์ดิฟแฟรคชัน (laser diffraction) รุ่น HELOS/H2399 & RODOS โดยรูปที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาค OPC, LGRS, และ SGRS สังเกตได้ว่าการกระจายตัวของอนุภาค LGRS มี $d_{50} = 32.2$ ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า OPC ขณะที่ SGRS มี $d_{50} = 4.8$ ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า OPC



รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค SGRS, OPC, และ LGRS

2.2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะ และอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงบนเบอร์ 325 (45 ไมครอน) ของ OPC, LGRS, และ SGRS โดยความถ่วงจำเพาะ

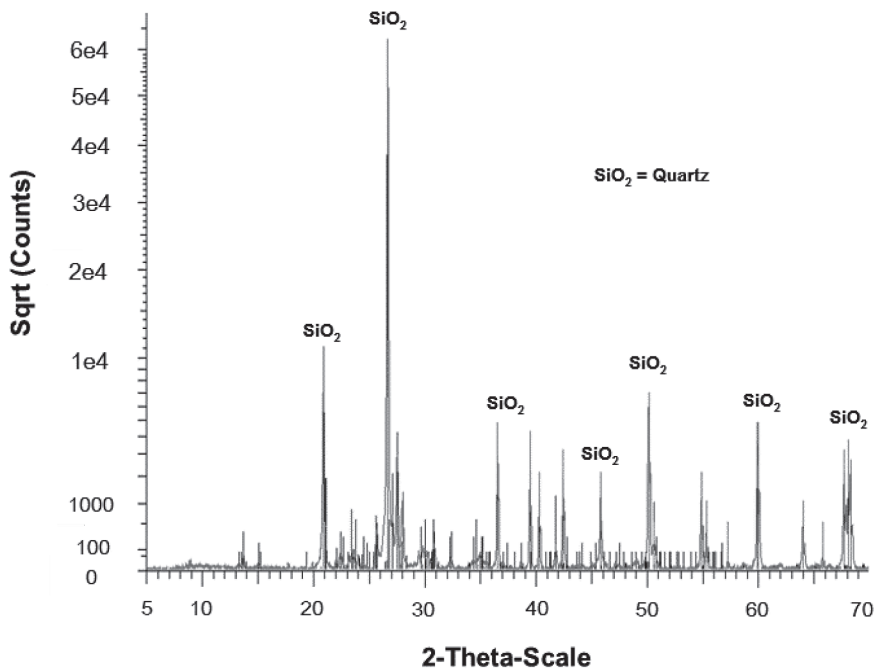
ของ LGRS และ SGRS มีค่าไม่แตกต่างกันนักอยู่ระหว่าง 2.62 และ 2.63 ตามลำดับ ขณะที่น้ำหนักของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 แตกต่างกันอย่างมากคือเท่ากับร้อยละ 38.3 และ 1.1 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

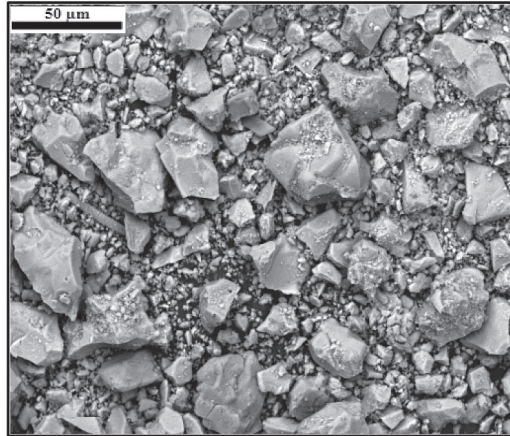
ตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	น้ำหนักค้างตะแกรงเบอร์ 325 (ร้อยละ)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)
OPC	3.15	16.6	18.1
LGRS	2.62	38.3	32.2
SGRS	2.63	1.1	4.8

องค์ประกอบทางแร่วิทยาของ GRS ได้วิเคราะห์เชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณโดยใช้วิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction) ได้ผลดังแสดงตามตารางที่ 2 LGRS และ SGRS มีเฟสที่เป็นผลึกร้อยละ 100 ได้แก่ ควอตซ์ ไมโครไคลน์ อัลไบท์ และมัสโครไวต์ เนื่องจาก LGRS และ SGRS มีเฟสที่เป็นผลึกถึงร้อยละ 100 ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับ OPC หรือ วัสดุปอซโซลาน รูปที่ 2 แสดงรูปแบบความเป็นผลึกของ SGRS ซึ่งวิเคราะห์เชิง

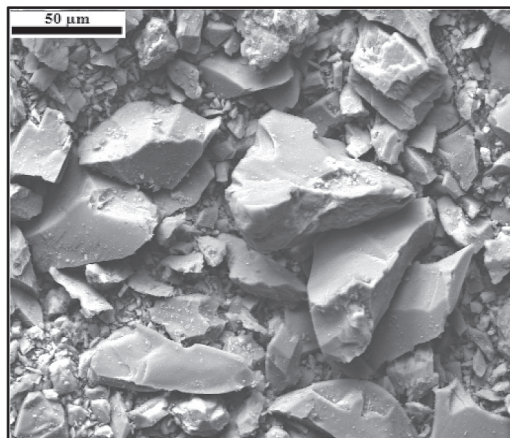
คุณภาพ จากรูปภาพแสดงให้เห็นว่า SGRS มีรูปแบบส่วนใหญ่เกือบทั้งหมดเป็นเฟสที่เป็นผลึก นอกจากนี้รูปร่างของอนุภาค OPC, LGRS, และ SGRS ถ่ายภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด Scanning Electron Microscope (SEM) ได้ผลดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่ารูปร่างของวัสดุทั้งหมดเป็นของแข็งที่มีเหลี่ยมมุมซึ่งเกิดจากการบดวัสดุให้มีขนาดเล็กลง



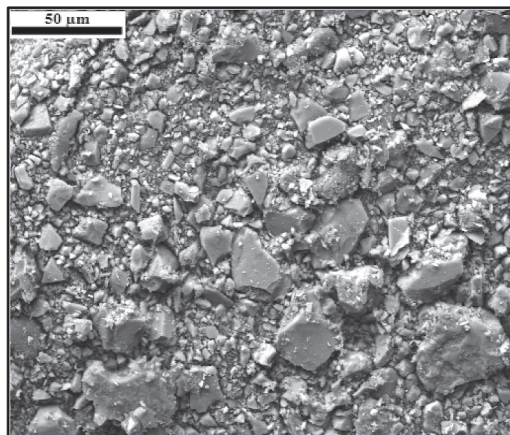
รูปที่ 2 รูปแบบความเป็นผลึกของทรายแม่น้ำบดโดยวิธี X-ray diffraction



(ก) OPC



(ข) LGRS



(ค) SGRS

รูปที่ 3 รูปร่างของอนุภาคของวัสดุโดย SEM (ก) OPC
(ข) LGRS และ (ค) SGRS

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางแร่วิทยาของ LGRS และ SGRS

ตัวอย่าง	เฟสที่เป็นผลึก (ร้อยละ)				ผลรวมของผลึก (ร้อยละ)
	ควอตซ์	ไมโครไคลน์	อัลไบท์	มัสโครไวต์	
LGRS	79.4	13.6	3.9	3.1	100
SGRS	79.4	13.8	3.8	3.0	100

2.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของ OPC และ LGRS และ SGRS วิเคราะห์โดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) แสดงตามตารางที่ 3 พบว่า องค์ประกอบหลักของ OPC ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 65.3 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ร้อยละ 19.5 อลูมิเนียมไตรออกไซด์ (Al₂O₃) ร้อยละ 5.4 และ

เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) ร้อยละ 3.4 ส่วนองค์ประกอบหลักของ LGRS และ SGRS คือ SiO₂ ร้อยละ 92.0-92.2 Al₂O₃ ร้อยละ 4.8-5.0 SiO₂ ของ GRS ซึ่งอยู่ในรูปของควอตซ์ ดังนั้นจึงไม่จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งได้รายงานว่าองค์ประกอบทางเคมีของทรายแม่น้ำมี SiO₂ (ควอตซ์) อยู่ในช่วงร้อยละ 91.3-92.1 โดยประมาณ [12-13]

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของ OPC, LGRS และ SGRS

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	ทรายแม่น้ำบด (LGRS)	ทรายแม่น้ำบด (SGRS)
SiO ₂	19.5	92.2	92.0
Al ₂ O ₃	5.4	4.8	5.0
Fe ₂ O ₃	3.4	0.8	0.6
CaO	65.3	0.2	0.2
MgO	1.0	0.1	0.2
SO ₃	2.9	0.0	0.0
Na ₂ O	0.1	0.3	0.4
K ₂ O	0.2	0.8	0.8
LOI	1.8	0.1	0.1
C ₃ S	64.4	-	-
C ₂ S	5.8	-	-
C ₃ A	7.9	-	-
C ₄ AF	8.8	-	-

2.4 การเปลี่ยนแปลงความร้อนของเพสต์

เพื่อประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้ศึกษาเพสต์สองชนิดได้แก่ ซีเมนต์เพสต์ควบคุมที่ทำจากปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว (OPC เพสต์) และเพสต์ที่ผสมวัสดุที่เป็นผลึก (ทรายแม่น้ำบด หรือ GRS เพสต์) ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน

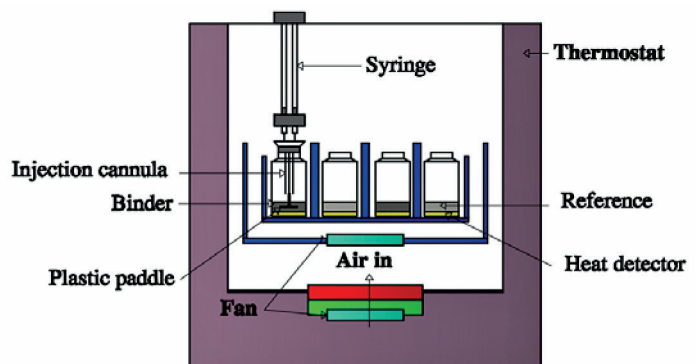
สองขนาด (LGRS และ SGRS) โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0, 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (OPC หรือ OPC+LGRS หรือ OPC+SGRS) เพื่อหล่อเพสต์โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ของเพสต์เท่ากับ 0.50 ส่วนผสมของเพสต์ทั้งหมดได้แสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของ OPC เพสต์ และ GRS เพสต์โดยน้ำหนัก

เพสต์	OPC	GRS	อัตราส่วน W/B
OPC	1.0	-	0.5
LGRS50	0.5	0.5	0.5
LGRS60	0.4	0.6	0.5
LGRS70	0.3	0.7	0.5
SGRS50	0.5	0.5	0.5
SGRS60	0.4	0.6	0.5
SGRS70	0.3	0.7	0.5

การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนของเพสต์ใช้เครื่อง thermal activity monitor (the TAM air calorimeter from TA instruments, No. 387, USA) และวิธีการทดลองตาม ASTM C 1702 [14] รายละเอียดของเครื่อง TAM air calorimeter ดังแสดงตามรูปที่ 4 ประกอบด้วยช่องใส่ตัวอย่าง และใส่วัสดุอ้างอิงจำนวน 8 ช่องขนานกันเป็นคู่ วัสดุประสานและวัสดุอ้างอิงนำมาซึ่ง

เตรียมในชุดหลอดแก้วของเครื่องมือภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นใส่ชุดหลอดแก้วเข้าไปในเครื่อง TAM air calorimeter ควบคุมอุณหภูมิในเครื่องให้เท่ากับกับอุณหภูมิห้อง วัสดุประสานคือ OPC หรือ OPC+LGRS หรือ OPC+SGRS และวัสดุอ้างอิงที่ใช้คือ ทรายอ็อตตาวา (Ottawa sand)



รูปที่ 4 เครื่อง Thermal activity monitor

สำหรับวิธีการผสม OPC หรือ OPC+LGRS หรือ OPC+SGRS และน้ำกลั่นผสมรวมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ใบกวนพลาสติกที่ประกอบอยู่ภายในหลอดแก้ว สัญญาณการไหลของความร้อนที่เกิดขึ้นควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โปรแกรม และข้อมูลที่ได้เป็นปริมาณความร้อนสะสมกับช่วงเวลา วัดการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมจนครบระยะเวลาการทดลองคือ 72 ชั่วโมงหลังจากผสม

2.5 มอร์ตาร์

มอร์ตาร์ 2 ประเภท ที่ศึกษาในครั้งนี้ได้แก่ มอร์ตาร์ควบคุม (OPC มอร์ตาร์) และมอร์ตาร์ที่ผสมทรายแม่น้ำบด (LGRS หรือ SGRS) โดยนำทรายแม่น้ำบด

นำมาแทนที่ OPC ในอัตราร้อยละ 0, 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายละเอียด (ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ค้างตะแกรงเบอร์ 100) คงที่ตลอดคือ 1:2.75 และกำหนดค่าการไหลเผื่ออยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 โดยปรับปริมาณน้ำในส่วนผสม หล่อมอร์ตาร์ในแบบหล่อมาตรฐานทรงลูกบาศก์ (50 มิลลิเมตร) และปิดหน้าด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจนครบอายุการบ่ม 24 ชั่วโมง จากนั้นถอดแบบหล่อมอร์ตาร์ นำไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 24 และ 72 ชั่วโมง ตาม ASTM C 109 [15] ค่าเฉลี่ยของ 5 ตัวอย่างใช้เป็นตัวแทนค่ากำลังอัดในแต่ละอายุการทดสอบ ส่วนผสมของมอร์ตาร์ทั้งหมดได้แสดงตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (โดยน้ำหนัก) และค่าการไหลเผื่อของมอร์ตาร์

Control	OPC	LGRS or SGRS	ทราย	อัตราส่วน W/B	ค่าการไหล (%)
Control	1.0	-	2.75	0.54	107
LGRS50	0.5	0.5	2.75	0.54	105
LGRS60	0.4	0.6	2.75	0.54	105
LGRS70	0.3	0.7	2.75	0.55	111
SGRS50	0.5	0.5	2.75	0.54	115
SGRS60	0.4	0.6	2.75	0.55	111
SGRS70	0.3	0.7	2.75	0.54	105

ตารางที่ 6 ความร้อนสะสมของ OPC เพลสต์ และเพลสต์ที่ผสมทรายบดละเอียด

เพลสต์	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d_{50} (ไมครอน)	ความร้อนสะสม (J/g)					
		12h	24h	36h	48h	60h	72h
OPC	18.1	143.9	213.7	244.5	271.8	294.6	311.8
LGRS50	32.2	77.2	117.1	138.4	154.1	166.7	176.7
LGRS60		60.8	95.6	115.2	128.2	138.1	146.4
LGRS70		51.3	76.4	91.2	101.7	109.5	115.7
SGRS50	4.8	87.8	131.3	157.6	175.8	189.4	199.2
SGRS60		72.6	108.8	130.4	145.5	156.4	164.1
SGRS70		55.3	83.9	101.0	113.0	121.5	128.0

2.6 การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์ เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาค

การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคหาได้จากความแตกต่างระหว่างความร้อนสะสมของเพสต์ที่ผสมทรายบดขนาดเล็ก (SGRS) และขนาดใหญ่ (LGRS) ที่มีอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากัน มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน และทดสอบที่อายุเดียวกัน

3. ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

3.1 ผลกระทบของอนุภาคของ GRS ต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์ และกำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 6 แสดงค่าความร้อนสะสมของเพสต์ OPC และเพสต์ที่ผสมทรายบดละเอียดเมื่อใช้ทรายบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50, 60, และ 70 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าเพสต์ที่ผสมด้วย GRS ที่มีอนุภาคขนาดเล็กของ SGRS ($d_{50} = 4.8$ ไมครอน) และอนุภาคขนาดใหญ่ของ LGRS ($d_{50} = 32.2$ ไมครอน) ให้ค่าความร้อนสะสมน้อยกว่า OPC เพสต์มาก และมีค่าความร้อนสะสมลดลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Douglas และคณะ [5] ซึ่งทดลองโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายละเอียดร้อยละ 35 และ 50 และพบว่าความร้อนสะสมให้ค่าต่ำเมื่อเทียบกับ OPC เพสต์

การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์ LGRS และ SGRS ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากัน และอายุเดียวกันมีลักษณะคล้ายกันมากแต่การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์ LGRS มีค่าต่ำกว่าเพสต์ SGRS ตัวอย่างเช่น เพสต์ LGRS50 และ SGRS50 มีค่าความร้อนสะสม 117.1 และ 131.3 J/g ที่อายุ 24 ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 54.8 และ 61.4 ของเพสต์ OPC ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น 176.7 และ 199.2 J/g ที่อายุ 72 ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 56.7 และ 63.9 ของเพสต์ OPC ตามลำดับ ขณะที่เพสต์ OPC มีค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสม 213.7 J/g ที่อายุ 24 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นเป็น 311.8 J/g ที่อายุ 72 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sedaghat และคณะ [16] ที่พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมที่ 24 และ 72

ชั่วโมง ของเพสต์ OPC มีค่าเท่ากับ 205 และ 306 J/g โดยประมาณ

สำหรับค่าร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมทรายแม่น้ำบดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 24 และ 72 ชั่วโมง แสดงตามตารางที่ 7 และมีกำลังอัดลดลงเมื่อแทนที่ด้วยทรายแม่น้ำบดในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้มอร์ตาร์ที่ผสมด้วยทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคขนาดเล็กของ SGRS ($d_{50} = 4.8$ ไมครอน) ให้ค่ากำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ LGRS ($d_{50} = 32.2$ ไมครอน) ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ LGRS50 และ SGRS50 มีกำลังอัด 41 และ 53 กก/ซม² ที่อายุ 24 ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 24.6 และ 31.7 ของมอร์ตาร์ควบคุม ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นเป็น 93 และ 114 กก/ซม² ที่อายุ 72 ชั่วโมง หรือ คิดเป็นร้อยละ 30.4 และ 37.3 ของมอร์ตาร์ควบคุม ตามลำดับ ขณะที่มอร์ตาร์ control มีกำลังอัด 167 กก/ซม² ที่อายุ 24 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นเป็น 306 กก/ซม² ที่อายุ 72 ชั่วโมง การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดส่งผลให้ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อแทนที่ทรายแม่น้ำบดเพิ่มมากขึ้น ซึ่ง C_3S เป็นเฟสหลักของปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดช่วงอายุต้น [17] ดังนั้น มอร์ตาร์ที่ผสมทรายบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 50-70 จึงมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ control ก่อนข้างมาก

ตารางที่ 7 กำลังอัดมอร์ตาร์

มอร์ตาร์	กำลังอัด (กก/ซม ²) - Normalized (%)	
	24 ชั่วโมง	72 ชั่วโมง
Control	167 - 100	306 - 100
LGRS50	41 - 24.6	93 - 30.4
LGRS60	32 - 19.2	66 - 21.6
LGRS70	16 - 9.6	41 - 13.4
SGRS50	53 - 31.7	114 - 37.3
SGRS60	43 - 25.7	88 - 28.8
SGRS70	25 - 15.0	52 - 17.0

จากการทดลองพบว่าอนุภาคขนาดเล็กของทรายแม่น้ำบด (SGRS) ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์ และค่าร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ของ LGRS เนื่องจากการอัดตัวของ SGRS ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก สามารถกระจายตัวได้ดีเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น มีการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมทำให้เพสต์หรือมอร์ตาร์แน่นขึ้น และอนุภาคขนาดเล็กจะไปแทรกอยู่ตามช่องว่างในระบบของเพสต์หรือมอร์ตาร์ซึ่งจะลดระยะทางระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่งผลให้ปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้อย่างทั่วถึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดียิ่งขึ้น [11, 18, 19] สังเกตได้ว่าขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันของ GRS ($d_{50} = 4.8$ ไมครอน และ 32.2 ไมครอน) มีผลไม่มากนักต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนและกำลังอัดที่อายุต้น 24 ถึง 72 ชั่วโมงแรก เนื่องจาก GRS เป็นวัสดุที่เป็นผลึกไม่ทำปฏิกิริยาเพราะ SiO_2 อยู่ในรูปของควอตซ์ ดังนั้นจึงไม่ปฏิกิริยาปฏิกิริยา [20] และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมและกำลังอัดที่อายุต้น จึงอนุมานได้ว่าได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และการอัดตัวของทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์

อย่างไรก็ตามกำลังอัดมอร์ตาร์มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดที่อายุ 24 และ 72 ชั่วโมง สูงกว่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์ ตัวอย่างเช่นมอร์ตาร์ LGRS50 และ SGRS50 มีค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์อยู่ระหว่างร้อยละ 24.6-30.4 และ 31.7-37.3 ของมอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งแตกต่างกันร้อยละ 5.8 และ 5.6 ตามลำดับ ขณะที่เพสต์ LGRS50 และ SGRS50 มีค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมอยู่ระหว่างร้อยละ 53.6-56.7 และ 61.0-63.9 ของเพสต์ควบคุมซึ่งแตกต่างกันร้อยละ 3.1 และ 2.9 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตสามารถพัฒนา กำลังอัดได้อย่างต่อเนื่องจากสารประกอบ (CSH gel) ในปูนซีเมนต์ทำหน้าที่ยึดประสานระหว่างทรายและหิน อีกทั้งยังเติมเต็มช่องว่างของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ทำให้แน่น และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม [21] ขณะที่การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมเนื่องจากอนุภาคจะมีความแตกต่างกันน้อยซึ่งเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของ

ความร้อนค่อนข้างน้อย

ขณะที่การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 24 ชั่วโมงแรก หลังจากตีปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ จากนั้นการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์ค่อนข้างคงที่ หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (C_3A , C_3S , C_2S , C_4AF) สารประกอบรอง เช่น แคลเซียมออกไซด์อิสระ อัลคาไลซิลเฟต และแคลเซียมซิลเฟต และน้ำทำปฏิกิริยาเคมีร่วมกัน และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา เช่น ถ้าปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยามากก็คายความร้อนมากตามไปด้วย ซึ่งช่วง 24 ชั่วโมงแรก จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว และภายหลังจากที่เพสต์เริ่มก่อตัว และแข็งตัว ปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มลดลง (การเปลี่ยนแปลงความร้อนลดลง) ตามปริมาณของสารประกอบหลัก และสารประกอบรองที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาซึ่งมีปริมาณลดลง และ CSH และ CAH เริ่มก่อตัวกันอย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาไฮเดรชันยังคงดำเนินต่อไปแต่ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยานี้จะมีไม่มากนักเมื่อเทียบกับช่วง 24 ชั่วโมงแรก

3.2 ผลกระทบของการอัดตัวของอนุภาค GRS ต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์

การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคที่ศึกษาในครั้งนี้ สามารถหาจากความแตกต่างระหว่างค่าความร้อนสะสมของเพสต์ที่ผสมทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (SGRS) และอนุภาคขนาดใหญ่ (LGRS) โดยพิจารณาจากเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากัน และอายุเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคของเพสต์ SGRS50 ที่อายุ 72 ชั่วโมง สามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าความร้อนสะสมของเพสต์ SGRS50 (199.2 J/g) ตามตารางที่ 6 ลบค่าความร้อนสะสมของเพสต์ LGRS50 (176.7 J/g) ตามตารางที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.5 J/g ตารางที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคที่ผสมทรายบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน

ตารางที่ 8 ความร้อนสะสมเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคของเพสต์ที่ผสมทรายบดละเอียดที่มีอนุภาคแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ความร้อนสะสมเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาค (J/g) - ร้อยละของความร้อนสะสมเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคเมื่อเทียบกับเพสต์ OPC					
	12h	24h	36h	48h	60h	72h
OPC	143.9	213.7	244.5	271.8	294.6	311.8
SGRS50-LGRS50	10.6 - 7.4	14.2 - 6.6	19.2 - 7.9	21.7 - 8.0	22.7 - 7.7	22.5 - 7.2
SGRS60-LGRS60	11.8 - 8.2	13.2 - 6.2	15.2 - 6.2	17.3 - 6.4	18.3 - 6.2	17.7 - 5.7
SGRS70-LGRS70	4.0 - 2.8	7.5 - 3.5	9.8 - 4.0	11.3 - 4.2	12.0 - 4.1	12.3 - 3.9

จากตารางที่ 8 ความแตกต่างของความร้อนสะสมของเพสต์เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคระหว่างเพสต์ SGRS50 และเพสต์ LGRS50 (SGRS50-LGRS50) ที่อายุ 12, 24, 36, 48, 60, และ 72 ชั่วโมง คือ 10.6, 14.2, 19.2, 21.7, 22.7, และ 22.5 J/g. หรือคิดเป็นร้อยละ 7.4, 6.6, 7.9, 8.0, 7.7, และ 7.2 ของเพสต์ OPC ตามลำดับ ความแตกต่างระหว่าง SGRS60-LGRS60 มีค่าเท่ากับ 11.8, 13.2, 15.2, 17.3, 18.3, และ 17.7 J/g หรือคิดเป็นร้อยละ 8.2, 6.2, 6.2, 6.4, 6.2, และ 5.7 ของเพสต์ OPC ตามลำดับ ขณะที่ความแตกต่างระหว่าง SGRS70-LGRS70 มีค่าเท่ากับ 4.0, 7.5, 9.8, 11.3, 12.0, และ 12.3 J/g หรือคิดเป็นร้อยละ 2.8, 3.5, 4.0, 4.2, 4.1, และ 3.9 ของเพสต์ OPC ตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคมีแนวโน้มลดลงเมื่อแทนที่ด้วยทรายบดในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้ค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคมีค่าต่ำในช่วง 12 ชั่วโมงแรก และเพิ่มขึ้นตามอายุมากขึ้นจนมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเพสต์มีอายุระหว่าง 48 ถึง 72 ชั่วโมง ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับงานคอนกรีตขนาดใหญ่เมื่อใช้วัสดุที่มีความละเอียดสูง เช่น วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพราะจะได้กำจัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานและกำลังอัดจากการอัดตัวของอนุภาคในช่วงอายุต้น

4. สรุป

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.8 ไมครอน ที่อัตราร้อยละ 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมที่อายุ 24 ชั่วโมงแรกเท่ากับ 131.3, 108.8, และ 83.9 J/g และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 199.2, 164.1, และ 128.0 J/g ที่อายุ 72 ชั่วโมงตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคเฉลี่ย 32.2 ไมครอนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราร้อยละ 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมที่อายุ 24 ชั่วโมงแรกเท่ากับ 117.1, 95.6, และ 76.4 J/g และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 176.7, 146.4, และ 115.7 J/g ที่อายุ 72 ชั่วโมง ตามลำดับ

2. เมื่อใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณเท่ากัน (ร้อยละ 50 ถึง 70) พบว่าทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคเฉลี่ย 4.8 ไมครอน มีค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์สูงกว่าเพสต์ที่ผสมทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคเฉลี่ย 32.2 ไมครอน เล็กน้อย แสดงว่าการลดความร้อนสะสมในเพสต์ด้วยการลดปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ความร้อนสะสมลดลงอย่างมาก ขณะที่ความร้อนสะสมเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคมีค่าน้อยกว่ามาก ดังนั้นการลดความร้อนของคอนกรีต จึงควรลดปริมาณปูนซีเมนต์เป็นหลัก

3. การใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.8 ไมครอน และ 32.2 ไมครอน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในอัตราร้อยละ 50, 60, และ 70 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคอยู่ในช่วงร้อยละ 2.8 ถึง 8.2 ของเพสต์ OPC ที่อายุ 12 ถึง 72 ชั่วโมง

4. เมื่อใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.8 และ 32.2 ไมครอนแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 50-70 พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ทรายบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.8 ไมครอน ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมทรายบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 32.2 ไมครอน ในช่วงประมาณร้อยละ 4 ถึง 7 ที่อายุ 24 และ 72 ชั่วโมง และการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายบดละเอียดส่งผลให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุขนาดละเอียด เช่น วัสดุพอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ต้องมีความละเอียดสูงเพราะจะได้กำลังอัดจากปฏิกิริยาพอซโซลานและการอัดตัวของอนุภาค

5. กำลังอัดมอร์ตาร์ผสมทรายบดละเอียดร้อยละ 50 ถึง 70 มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดที่อายุ 24 และ 72 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่องขณะที่การเปลี่ยนแปลงความร้อนสะสมของเพสต์มีแนวโน้มคงที่

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนการทำวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยและวิชาการตามแผนและกลยุทธ์เพื่อการพัฒนา (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 5903) และขอขอบคุณบริษัทสยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Tydlitat, V., Zakoutsky, J. and Cerny, R., 2014, "Early-stage Hydration Heat Development in Blended Cements Containing Natural Zeolite Studied by Isothermal Calorimetry," *Thermochimica Acta*, 582, pp. 53-58.

2. Zhang, T., Yu, Q., Wei, J., Gao, P. and Zhang, P., 2012, "Study on Optimization of Hydration Process of Blended Cement," *Thermal Analysis and Calorimetry*, 107, pp. 489-498.

3. Ma, W., Sample, D., Martin, R. and Brown, P.W., 1994, "Calorimetric Study of Cement Blends Containing Fly Ash, Silica Fume, and Slag at Elevated Temperatures," *Cement, Concrete and Aggregates*, 16, pp. 93-99.

4. American Concrete Institute, 2012, "ACI 207.1R-05 : Guide to Mass Concrete," *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, pp. 1-30.

5. Douglas, E., Wilson, H. and Malhotra, V.M., 1988, "Production and Evaluation of a New Source of Granulated Blast Furnace Slag," *Cement, Concrete and Aggregates*, 10, pp. 75-87.

6. Gajda, J. and Geem, M.V., 2002, "Controlling Temperatures in Mass Concrete," *Concrete International*, 24, pp. 59-62.

7. Han, F., Zhang, Z., Wang, D. and Yan, P., 2014, "Characteristics of the Hydration Heat Evolution of Composite Binder at Atdifferent Hydrating Temperature," *Thermochimica Acta*, 586, pp. 52-57.

8. Jaturapitakkul, C., Tangpagasit, J., Songmue, S. and Kiattikomol, K., 2011, "Filler effect and Pozzolanic Reaction of Ground Palm Oil Fuel Ash," *Construction and Building Materials*, 25, pp. 4287-4293.

9. Sinsiri, T., Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C., 2010, "Influence of Fly Ash Fineness and Shape on the Porosity and Permeability of Blended Cement Pastes," *International Journal of Mineral, Metal, metallurgy and Materterials*, 17, pp. 683-690.

10. Tangpagasit, J., Cheerarot, R., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2005, "Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Fly Ash in Mortar," *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1145-1151.

11. Tikkanen, J., Cwirzen, A. and Penttala, V., 2014, "Effects of Mineral Powders on Hydration Process and Hydration Products in Normal Strength Concrete," *Construction and Building Materials*, 72, pp. 7-14.
12. Cheerarot, R., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2003, "Effect of Particle Size of Mae Moh Fly Ash on Strength Activity Index of Mortar," *KMUTT Research and Development Journal*, 26 (3), pp. 295-310. (In Thai)
13. Yang, Q., Zhang, S., Huang, S. and He, Y., 2000, "Effect of Ground Quartz Sand on Properties of High Strength Concrete in the Steam Autoclaved Curing," *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 1993-1998.
14. American Society for Testing and Materials, 2014, "ASTM C1702-13a Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials using Isothermal Conduction Calorimetry," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.01, pp. 716-723.
15. American Society for Testing and Materials, 2014, "ASTM C109/109M-13 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.01, pp. 81-90.
16. Sedaghat, A., Zayed, A. and Sandberg, P., 2013, "Measurement and Prediction of Heat of Hydration of Portland Cement Using Isothermal Conduction Calorimetry," *Journal of Testing and Evaluation*, 41, pp. 943-950.
17. Taylor, H.F., 1997, *Cement Chemistry*, Tomas Helford, London.
18. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindapasirt, P., 2011, "Effect of Palm Oil Fuel Ash Fineness on the Microstructure of Blended Cement Paste," *Construction and Building Materials*, 25, pp. 4095-4104.
19. Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindapasirt, P., 2012, "A Study Microstructure of Blended Cement Paste," *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (2), pp. 187-200. (In Thai)
20. Tangpagasit, J., Songmue, S., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2005, "A Study of Packing Effect on Strength Activity Index of Mortar as Specified by ASTM C 618 by Using Ground River Sand," *KMUTT Research and Development Journal*, 30 (1), pp. 141-151. (In Thai)
21. Srisen, A., Tangchirapat, W., and Jaturapitakkul, C., 2014, "Properties of Concrete Using Fly Ash and Calcium Carbide Residue as a Cementitious Material," *KMUTT Research and Development Journal*, 37 (2), pp. 166-175. (In Thai)