



บทความวิจัย

การปรับปรุงคุณสมบัติด้านความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดยางด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ

ปิติ สุนทรสุขกุล และ ภัทรชัย พงศ์โสภา*

ศูนย์วิจัยวัสดุอาคารและงานก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 7106 8947 อีเมล: s6001081913010@email.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.10.003

รับเมื่อ 29 กรกฎาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 28 ตุลาคม 2565 ตอบรับเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 4 ตุลาคม 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเม็ดยางด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ งานวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวมวลรวมที่ฝังตัวด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะด้วยซิลิกาฟุ่มเพื่อศึกษาการสูญเสียวัสดุเปลี่ยนสถานะหลังได้รับความร้อนซ้ำ และศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดยางผสมมวลรวมเบาฝังตัวด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว และปรับปรุงพื้นผิวด้วยซิลิกาฟุ่ม กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.35 และแทนที่มวลรวมละเอียด (ทราย) ด้วยเม็ดยาง 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยทำการทดสอบซึ่งประกอบด้วย ในส่วนของมวลรวมเบา ได้แก่ คุณสมบัติของมวลรวมเบาก่อนและหลังปรับปรุงพื้นผิว คุณสมบัติของมวลรวมเบาหลังได้รับความร้อนซ้ำ และในส่วน of คอนกรีต ได้แก่ คุณสมบัติเชิงกล เชิงกายภาพ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ผลการทดสอบพบว่า การปรับปรุงพื้นผิวมวลรวมเบาส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมเพิ่มขึ้นและเมื่อนำมาผสมร่วมกับคอนกรีตผสมเม็ดยางส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนพบว่ามีค่าแปรผันตามสถานะของวัสดุเปลี่ยนสถานะและปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดยาง

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบา วัสดุเปลี่ยนสถานะ การปรับปรุงพื้นผิว การรั่วไหลของวัสดุเปลี่ยนสถานะ การให้ความร้อนซ้ำ



Improvement on Thermal Properties of Rubberized Lightweight Concrete with Phase Change Material

Piti Sukontasukkul and Phattharachai Pongsopha*

Construction and Building Materials Research Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 7106 8947, E-mail: s6001081913010@email.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.10.003

Received 29 July 2021; Revised 28 October 2022; Accepted 3 February 2022; Published online: 4 October 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to improve the thermal properties of rubberized concrete with Phase Change Material (PCM). The experiment was divided into two parts, Surface improvement of PCM-Lightweight aggregates with silica fume to investigate the leakage of PCM after being subjected to heat cycles and Properties of the rubberized concrete mixed with PCM-Lightweight aggregates without surface treatment (PCMA) and with surface treatment (ASF-PCMA). The water to cement ratio was set at 0.35. The replacement rate of fine aggregate (sand) with crumb rubber was varied from 10% to 30% by volume. The experiment on the aggregate part consisted of properties of light weight aggregate before and after surface treatment and properties of the lightweight aggregate after being subjected to heat cycle. For the rubberized concrete part, the experiment included mechanical properties, physical properties, and thermal conductivity. The results showed that the surface treatment caused a decrease in water absorption percentage and an increase in the specific gravity of aggregates. Compressive and flexural strength were also increased when mixed with rubberized concrete. In terms of thermal conductivity, it was found to depend mainly on the PCM state and the amount of replacement fine aggregates with crumb rubber.

Keywords: Light Weight Concrete, Phase Change Material, Surface Coating, PCM Leakage, Heat Cycles

Please cite this article as: P. Sukontasukkul and P. Pongsopha, "Improvement on thermal properties of rubberized lightweight concrete with phase change material," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 3, pp. 1–13, ID. 243-025292, Jul.–Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันภาวะโลกร้อนส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของโลกเป็นอย่างมาก เนื่องจากปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นการเผาถ่านหินและเชื้อเพลิง จึงทำให้เกิดการสะสมของก๊าซเรือนกระจก และความร้อนภายในชั้นบรรยากาศโลกมากขึ้น ซึ่งอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทยนั้นได้มีการคิดค้นนวัตกรรมเพื่อลดปัญหาโลกร้อน เช่น ระบบหลังคาและฝ้าเย็นช่วยลดการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศ ระบบผนังเย็นช่วยป้องกันแสงแดดจากภายนอกอาคาร และที่สำคัญอีกอย่างก็คือการพัฒนาวัสดุผนังคอนกรีตมวลเบาเพื่อช่วยชะลอความร้อนที่จะเข้าสู่ตัวอาคาร พบว่า จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1], [2] การนำวัสดุเปลี่ยนสถานะมาซึ่งคุณสมบัติการเป็นฉนวน เข้ามาช่วยเพื่อช่วยการกักเก็บและชะลอการส่งผ่านอุณหภูมิ อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลอีกด้วย ซึ่งเห็นได้ว่าการเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างนั้น มีความสำคัญต่ออุณหภูมิภายนอกที่เข้าสู่ตัวอาคารเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

วัสดุเปลี่ยนสถานะ [3]–[5] เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการกักเก็บ และรักษาอุณหภูมิด้วยการดูดซับและปลดปล่อยความร้อน และเปลี่ยนสถานะจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยวัสดุเปลี่ยนสถานะมีหลายประเภท เช่น ประเภทโพลิเอทิลีน ไกลคอล ประเภทพาราฟิน เป็นต้น ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวจึงนำวัสดุเปลี่ยนสถานะไปใช้งานในวัสดุก่อสร้าง โดยการผสมกับวัสดุโดยตรง บรรจุในแคปซูลพลาสติก หรือนำวัสดุเปลี่ยนสถานะไปฝังตัวในช่องว่าง หรือรูพรุนของมวลรวมเบา โดยใช้ความร้อน โดยคอนกรีตผสมด้วยมวลรวมเบาฝังตัววัสดุเปลี่ยนสถานะจะมีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติในการกักเก็บอุณหภูมิที่ดีและมีความเป็นฉนวนที่ดีขึ้น นอกจากนี้ การนำวัสดุเปลี่ยนสถานะเข้าไปฝังตัวหรือแทรกตัว ทำให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงสูงขึ้น ค่าการซึมผ่านน้ำลดต่ำลง

อีกทั้งยังมีการนำวัสดุเปลี่ยนสถานะมาใช้ร่วมกับคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ได้จากการย่อยเศษยางรถยนต์เก่า ซึ่งจากอดีตถึงปัจจุบันยางรถยนต์ใช้ปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง รายงานจำนวนรถที่จดทะเบียนกับกรมการขนส่งทางบก

พ.ศ. 2563 ประมาณ 2–3 ล้านคัน [6] สมมติว่ารถแต่ละคันเปลี่ยนยางทุกๆ สองปี จะก่อให้เกิดยางรถเก่าที่ถูกทิ้งประมาณ 8–10 ล้านเส้นต่อปี ส่งผลให้การกำจัดและย่อยสลายยางรถยนต์เป็นปัญหาหลักของสภาวะแวดล้อมโลก เนื่องจากยางรถยนต์นั้นมีความทนทานสูงยากต่อการย่อยสลาย อีกทั้งการกำจัดนั้นยังเป็นปัญหาที่ทำนาย เช่น การเผาไหม้ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ทั้งในในหลุมฝังกลบต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ และยังสร้างอันตรายจากไฟไหม้และภัยคุกคามศัตรูพืช อีกทั้งจะไม่ย่อยสลายและก่อให้เกิดปัญหาล้างแฉะเพื่อลดปริมาณเศษยางรถยนต์เก่าจึงได้มีการนำเศษยางเก่ามาใช้เป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมก่อสร้าง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่านำมาผสมคอนกรีต [7] ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นลดลงและมีคุณสมบัติด้านการเป็นฉนวนความร้อนที่ดี [8]

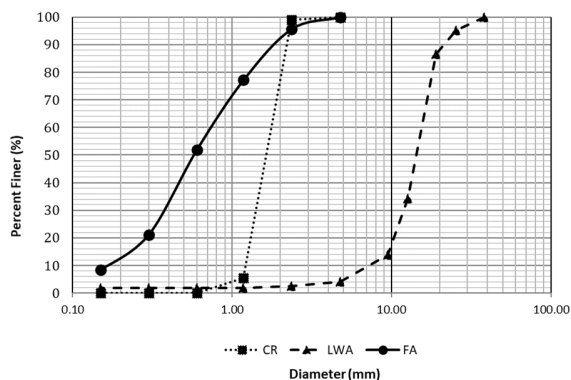
งานวิจัยนี้ เป็นการนำวัสดุเปลี่ยนสถานะมาใช้ร่วมกับคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้านอุณหภูมิของคอนกรีตผสมเม็ดยางที่ดีอยู่แล้วได้ดียิ่งขึ้นไปอีก ผ่านการเพิ่มความสามารถในการกักเก็บความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะแต่หลังจากได้รับความร้อนซ้ำๆ จากการใช้งานพบว่ามีกรั่วซึมของวัสดุเปลี่ยนสถานะออกจากมวลรวม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวของมวลรวมเพื่อลดปัญหาการรั่วซึมของวัสดุเปลี่ยนสถานะด้วยซิลิกาฟุ่มหลังจากได้รับความร้อนซ้ำ จากนั้นนำมาผสมกับคอนกรีตผสมเม็ดยางเพื่อศึกษาผลกระทบของมวลรวมที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดยาง

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ตามมาตรฐาน ASTM C150 [9]

2) มวลรวมเบา (LWA) มีขนาด 4–10 มิลลิเมตร นำมาใช้แทนมวลรวมหยาบ ซึ่งมีน้ำหนักเบา มีค่าหน่วยน้ำหนัก 732 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เปอร์เซ็นต์ดูดซึมน้ำ 16% และความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง 1.25 โดยแสดงการกระจายตัวของมวลรวมเบาดังรูปที่ 1



3% โดยน้ำหนักของคอนกรีต โดยสัดส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมคอนกรีต

Concrete Type	Mix Proportions (kg/m ³)					
	C	W	FA	CR	PCMA	ASF-PCMA
LWC/PCMA	615	215	520	-	476	-
10CR/PCMA	615	215	468	19	476	-
20CR/PCMA	615	215	417	38	476	-
30CR/PCMA	615	215	365	57	476	-
LWC/ASF-PCMA	615	215	520	-	-	528
10RC/ASF-PCMA	615	215	468	19	-	528
20RC/ASF-PCMA	615	215	417	38	-	528
30RC/ASF-PCMA	615	215	365	57	-	528

โดยที่

C คือ ปูนซีเมนต์

FA คือ มวลรวมละเอียด

W คือ น้ำสะอาด

CR คือ ปริมาณเม็ดยาง

LWC คือ คอนกรีตผสมมวลรวมเบา

RC คือ คอนกรีตผสมเม็ดยาง

PCMA คือ มวลรวม *PCM* ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว

ASF-PCMA คือ มวลรวม *PCM* ที่ผ่านการเคลือบผิว

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต เตรียมสัดส่วนผสมคอนกรีต ดังตารางที่ 1 นำไปผสมในเครื่องโม่แบบ Pan Mixer โดยใช้เวลาผสมให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน 2-5 นาที จากนั้นนำคอนกรีตสดทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักก่อนเข้าแบบหล่อ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด ใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาด 150 × 300 มิลลิเมตร การทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้แบบหล่อรูปทรงคานขนาด 100 × 100 × 350 มิลลิเมตร และการทดสอบการให้ความร้อนซ้ำและการทดสอบด้านอุณหภูมิ แบบหล่อขนาด 200 × 200 × 50 มิลลิเมตร โดยหลังจากเทคอนกรีตเข้าแบบแล้ว ทำการดำด้วยเหล็กกระทุ้งจำนวน 25 ครั้ง จากนั้นนำไปทำการ

สั่นบนโต๊ะ (Vibrating Table) เป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้ฟองอากาศให้เหลือน้อยสุด แล้วทำการหุ้มตัวอย่างทดสอบด้วยแผ่นพลาสติกใส่ทั้งแบบหล่อ เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อ แล้วทำการหุ้มแผ่นพลาสติกใส่ทั้งตัวอย่าง จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (27-32 องศาเซลเซียส) จนอายุครบ 28 วัน และทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติความร้อนต่อไป

2.4 การทดสอบ

2.4.1 คุณสมบัติของมวลรวมเบา

การทดสอบมวลรวมเบาผิวดำด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (*PCMA*) และผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (*ASF-PCMA*)

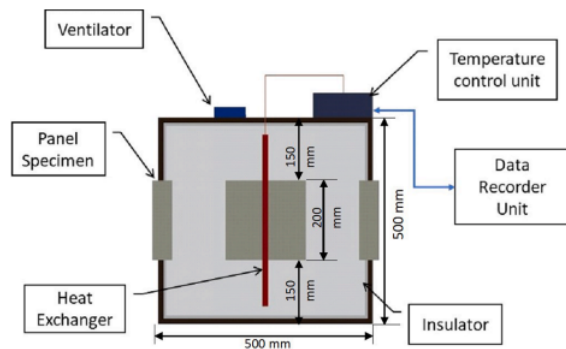
1) การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C127 [19]

2) การทดสอบการรั่วซึมของมวลรวมหลังการปรับปรุงพื้นผิว หลังการได้รับความร้อนซ้ำจำนวน 100 รอบ

เครื่องทดสอบนี้ใช้ในการให้ความร้อนซ้ำต่อมวลรวมหลังปรับปรุงพื้นผิวและตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200 × 200 × 50 มิลลิเมตร โดยกำหนดรอบการได้รับความร้อนซ้ำ 100 รอบ โดยแต่ละรอบจะแบ่งออกเป็น ช่วงการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งถึง 62 องศาเซลเซียส เมื่อถึงอุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส แล้วจะเริ่มเข้าสู่ช่วงการลดความร้อนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถือว่าเป็น 1 รอบการทดสอบ ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณเวลา 35 นาที โดยการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเครื่องทดสอบการให้ความร้อนซ้ำ

พัดลมระบายอากาศ (Ventilator)	12 V – DC, 0.30 A
ฮีตเอ็กซ์เชนเจอร์ (Heat Exchanger)	Power 600 w ช่วงอุณหภูมิ 25-55°C
เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple Wire)	Type K วัดอุณหภูมิตั้งแต่ -50 ถึง 250°C



รูปที่ 3 รูปหน้าตัดการติดตั้งอุปกรณ์และตัวอย่างคอนกรีตภายในเครื่องทดสอบ

2.4.2 คุณสมบัติของคอนกรีต

- 1) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C138 [20]
- 2) การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C39 [21] ที่อายุตัวอย่างทดสอบ 28 วัน
- 3) การทดสอบกำลังรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C78 [22] ที่อายุตัวอย่างทดสอบ 28 วัน
- 4) การทดสอบการหาค่าการนำความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM C518 [23] ที่อายุตัวอย่างทดสอบ 28 วัน

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างคอนกรีตจะกำหนดอุณหภูมิในการทดสอบให้ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิห่อหุ้มของวัสดุเปลี่ยนสถานะ ซึ่งทำให้ค่าการนำความร้อนที่ได้นั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ค่าการนำความร้อนที่วัสดุเปลี่ยนสถานะมีสถานะเป็นของแข็ง (K_s) จะทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ PCM เพื่อให้แน่ใจว่า PCM ภายในมวลรวมอยู่ในสถานะของแข็ง และค่าการนำความร้อนที่ PCM มีสถานะเป็นของเหลว (K_L) จะทดสอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของ PCM

ในการหาค่าการนำความร้อน เริ่มจากกำหนดอุณหภูมิของแผ่นความร้อนที่ด้านหนึ่งให้มีอุณหภูมิมากกว่าตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของแผ่นความร้อนจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และรีเลย์สวิตช์ในการควบคุม เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างคอนกรีตจะเกิด

การนำความร้อนเข้าสู่ตัวอย่างคอนกรีต เช่น เซอร์วอตปริมาณความร้อนจะวัดค่าความร้อนที่ขึ้นทดสอบได้รับจนกระทั่งปริมาณความร้อนอยู่ในสภาวะสมดุล (Steady-state) เมื่อถึงสภาวะสมดุลจึงสิ้นสุดการทดสอบและนำค่าที่บันทึกได้มาคำนวณหาค่าการนำความร้อนดังสมการที่ (1)

$$k = Q \cdot \left(\frac{L}{\Delta T} \right) \quad (1)$$

โดยที่

k คือ ค่าการนำความร้อน, (W/m °C)

Q คือ ค่าพลังงานความร้อนของแผ่นให้ความร้อน (W/m²)

L คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นทำความร้อนทั้งสองแผ่นในขณะการทดสอบ (m)

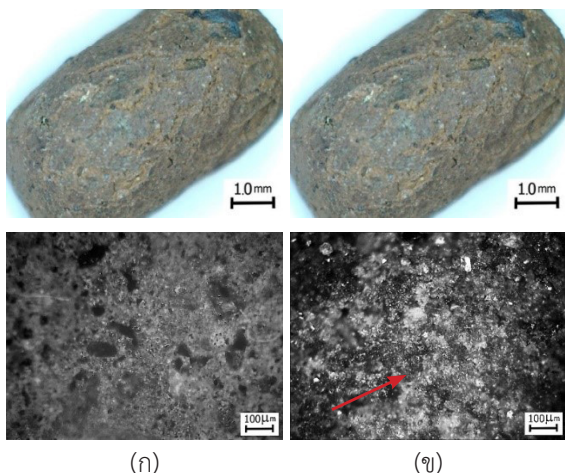
ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวอย่างคอนกรีต (°C)

3. ผลการทดสอบ

3.1 คุณสมบัติของมวลรวมก่อนและหลังการฝังตัวด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ

ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำพบว่า PCMA มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง โดยมวลรวมเบาปกติมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำอยู่ที่ 16% เมื่อฝังตัวด้วย PCM ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลงเหลือ 0.20% เนื่องจากการแทนที่ช่องว่างภายในมวลรวมด้วย PCM ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของมวลรวมลดลง และค่าความถ่วงจำเพาะพบว่า มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น จากมวลรวมเบาปกติอยู่ที่ 1.068 แต่เมื่อฝังตัวด้วย PCM มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.303 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง 22.0% เนื่องจากการลดลงของช่องว่างภายในมวลรวมเบาจากการฝังตัวด้วย PCM จึงทำให้มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3

รูปถ่ายเปรียบเทียบ มวลรวมเบา (LWA) และมวลรวมฝังตัวด้วย PCM (PCMA) พบว่า การฝังตัวของ PCM ทำให้ผิวของมวลรวมมีลักษณะแน่น วาว และมีรูพรุนภายในมวลรวมลดน้อยลง เมื่อทำการส่องภายในของมวลรวม



รูปที่ 4 เปรียบเทียบพื้นผิวและภายในของ (ก) มวลรวมเบา (ข) มวลรวมเบาฝังตัวด้วย PCM

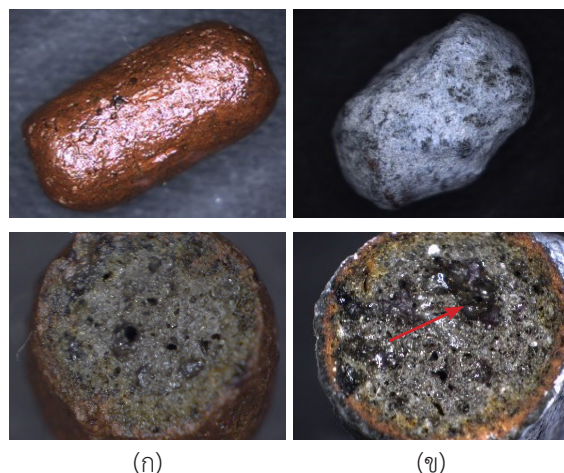
ด้วยกล้องไมโครสโคปพบว่า รูพรุนภายในมวลรวมน้อยลง เนื่องจากการแทนที่รูพรุนด้วยการฝังตัวของ PCM ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของมวลรวมก่อนและหลังการดูดซึมด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ

Properties	LWA	PCMA	% Difference
Absorption (%)	16	0.20	98.94
Bulk specific gravity (Dry)	1.068	1.303	22.0

3.2 คุณสมบัติของมวลรวมก่อนและหลังปรับปรุงพื้นผิว

ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและความถ่วงจำเพาะของ ASF-PCMA พบว่า การปรับปรุงพื้นผิวส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง โดย PCMA อยู่ที่ 0.20% แต่เมื่อปรับปรุงพื้นผิวด้วยซิลิกาฟุ่ม ลงเหลือเพียง 0.08% เนื่องจากซิลิกาฟุ่มที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เฟสไปเคลือบปิดช่องว่างพื้นผิวมวลรวม ในส่วนของค่าความถ่วงจำเพาะ (แห้ง) พบว่า การปรับปรุงพื้นผิวด้วยซิลิกาฟุ่มส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 1.30 (PCMA) เป็น 1.45 (ASF-PCMA) เนื่องจากการเคลือบพื้นผิวมวลรวม PCMA ทำให้มีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 5 เปรียบเทียบพื้นผิวและภายในของ (ก) มวลรวม PCMA (ข) มวลรวม ASF-PCMA

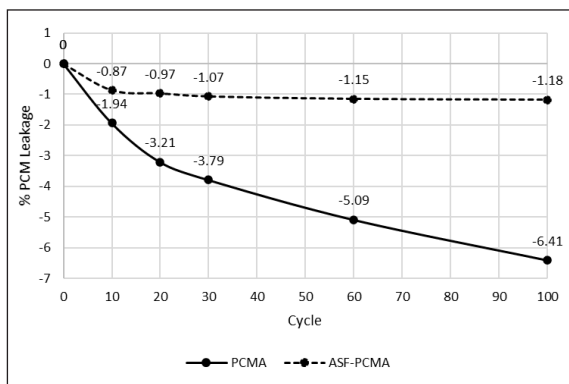
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของมวลรวมเบาก่อนและหลังปรับปรุงพื้นผิว

Properties	PCMA	ASF-PCMA
Absorption (%)	0.20	0.08
Bulk Specific Gravity (Air Dry)	1.30	1.45

3.3 ทดสอบการสูญเสียของ PCM หลังให้ความร้อนซ้ำ

3.3.1 การทดสอบการสูญเสีย PCM ออกจากมวลรวม โดยนำมวลรวม PCMA และ ASF-PCMA ใส่ไปในตู้ทดสอบการให้ความร้อนซ้ำ โดยให้ความร้อนเป็นจำนวน 100 รอบ โดยในแต่ละรอบของการให้ความร้อนนั้น กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส และให้ความร้อนจนไปถึงอุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส ก่อนจะลดระดับอุณหภูมิกลับมาที่ 30 องศาเซลเซียส ให้ถือเป็น 1 รอบการทดสอบ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 35 นาที จากนั้นจึงทำการชั่งน้ำหนักของมวลรวมที่สูญเสียไปจากการรั่วซึมของ PCM ออกจากมวลรวมรวมถึงนำไปทดสอบคุณสมบัติอื่นต่อไป

ผลการทดสอบการรั่วซึมพบว่า หลังจากได้รับความร้อนซ้ำ 100 รอบ พบการลดลงของน้ำหนักเนื่องจากการสูญเสียของ PCM ออกจากมวลรวมดังรูปที่ 6 นำน้ำหนักมวลรวมไปคำนวณเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก พบว่า PCMA,



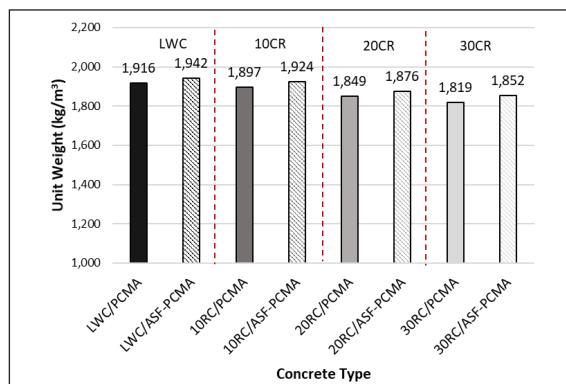
รูปที่ 6 การสูญเสียน้ำหนักของ PCM ออกจากมวลรวม

ASF-PCMA มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก 6.41% และ 1.18% ตามลำดับ โดยเห็นได้ว่าคุณสมบัติการสูญเสียน้ำหนักของ ASF-PCMA มีค่าลดลง เนื่องจากการสูญเสีย PCM ลดลงจากการเคลือบผิวด้วยซิลิกาฟุ่ม เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่า การสูญเสียของ PCM จากมวลรวม PCMA มีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องตามจำนวนรอบของการได้รับความร้อนซ้ำ แต่ใน ASF-PCMA มีแนวโน้มคงที่ เมื่อครบ 100 รอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเคลือบผิวเป็นอย่างดี

3.3.2 คุณสมบัติของมวลรวมหลังได้รับความร้อนซ้ำ

ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของมวลรวมหลังได้รับความร้อนซ้ำพบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน โดยค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ PCMA และ ASF-PCMA เพิ่มขึ้นเป็น 0.31% และ 0.12% ตามลำดับ เนื่องจากการได้รับความร้อนซ้ำในช่วงอุณหภูมิที่ PCM เปลี่ยนสถานะ ส่งผลให้ PCM ละลายและสูญเสียออกจากมวลรวมทำให้เกิดช่องว่างและน้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในมวลรวมได้พบอีกว่าการเปลี่ยนแปลงของ ASF-PCMA มีค่าต่ำกว่าของ PCMA มาก เนื่องจากการเคลือบผิวทำให้การรั่วซึมลดน้อยลง

ในส่วนของคุณสมบัติการกักเก็บน้ำพบว่า มวลรวมเบาทั้งสองชนิดมีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงหลังการได้รับความร้อนซ้ำ โดยลดลงจาก 0.1305 เป็น 0.127 สำหรับ PCMA และ จาก 0.145 เป็น 0.1425 สำหรับ ASF-PCMA ทั้งนี้เนื่องจากการรั่วไหลของ PCM ทำให้มวลรวมเบาสูญเสียน้ำหนักและส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง การลดลง



รูปที่ 7 ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

ของค่าความถ่วงจำเพาะของ ASF-PCMA มีค่าต่ำกว่าของ PCMA อันเนื่องมาจากผลของการเคลือบผิว ดังแสดงในตารางที่ 5

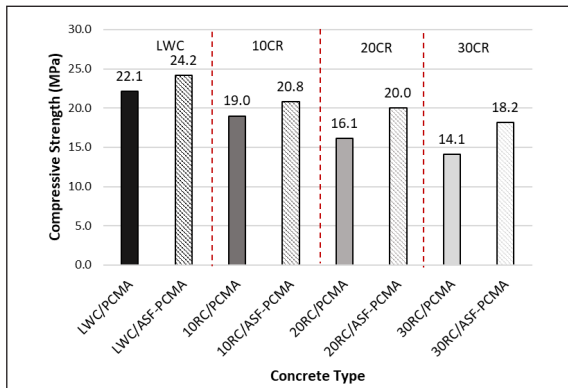
ตารางที่ 5 คุณสมบัติของมวลรวมก่อนและหลังได้รับความร้อนซ้ำ

Properties	Before	After
PCMA		
Absorption (%)	0.20	0.31
Bulk Specific Gravity (Air Dry)	1.30	1.27
ASF-PCMA		
Absorption (%)	0.08	0.10
Bulk Specific Gravity (Air Dry)	1.45	1.425

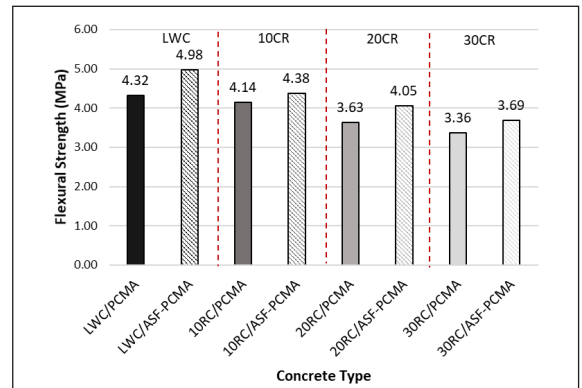
3.3 คุณสมบัติคุณสมบัติของคอนกรีต

3.3.1 ค่าหน่วยน้ำหนัก

จากรูปที่ 7 ผลการทดสอบพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักจะลดลงตามปริมาณเม็ดทรายที่เพิ่มขึ้น โดยค่าหน่วยน้ำหนักของ LWC/PCMA มีค่า 1,916 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดทราย 30% โดยปริมาตร ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลงเหลือประมาณ 1,819 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเม็ดทรายนั้นเบาว่ามวลรวมละเอียดมาก เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยมวลรวมที่เบาว่า ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลง [17], [18], [24]–[26].



รูปที่ 8 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



รูปที่ 9 ค่ากำลังแรงดัดของคอนกรีต

ในส่วนของคอนกรีต *PCMA* และ *ASF-PCMA* พบว่าค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต *ASF-PCMA* มีค่าสูงกว่าคอนกรีต *PCMA* เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีต *PCMA* และ *ASF-PCMA* ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต *ASF-PCMA* มีค่าสูงกว่าคอนกรีต *PCMA* ประมาณ 1.35–1.81% เนื่องจากมวลรวม *ASF-PCMA* มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า *PCMA* ดังนั้นเมื่อแทนที่มวลรวม *PCMA* ด้วยมวลรวม *ASF-PCMA* ส่งผลให้มีค่าหน่วยน้ำหนักที่สูงขึ้น

3.3.2 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด

ผลการทดสอบพบว่า *LWC/PCMA* มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยประมาณ 22.1 เมกะปาสกาล และเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดยางเพิ่มขึ้น 10–30% โดยปริมาตร ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง โดยกำลังรับแรงอัดต่ำสุดเท่ากับ 14.1 เมกะปาสกาล (*30RC/PCMA*) เนื่องจากคุณสมบัติของเม็ดยางมีกำลังต่ำกว่ามวลรวมละเอียด การแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดยางจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงระหว่าง 14–36% [18], [26]–[27]

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมมวลรวม *PCMA* และ *ASF-PCMA* ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าคอนกรีต *ASF-PCMA* มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีต *PCMA* ประมาณ 9.3–29.0% จากการแทนที่เม็ดยาง 10–30% โดยปริมาตร ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดส่วนหนึ่งเป็นผลจากความหนาแน่นของมวลรวมที่เพิ่มขึ้น และอีกเหตุผลหนึ่งอาจมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นจาก

การเคลือบซิลิกาฟุ่มขั้นตอนสุดท้ายที่พื้นผิวของมวลรวม ซึ่งช่วยปรับปรุงผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟสให้มีการยึดติดที่ดีขึ้น [28], [29]

ในส่วนค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัด โดยกำลังรับแรงดัดลดลงตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้นจาก 3.8% เป็น 22.2% นอกจากนี้ เมื่อแทนที่มวลรวม *PCMA* ด้วย *ASF-PCMA* ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นจาก 5.7% เป็น 15.3% ดังแสดงรูปที่ 9

3.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือค่าการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ *PCM* มีสถานะเป็นของแข็ง (K_S) จะทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ *PCM* เพื่อให้แน่ใจว่า *PCM* ภายในมวลรวมอยู่ในสถานะของแข็ง และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ *PCM* มีสถานะเป็นของเหลว (K_L) จะทดสอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมเหลวของ *PCM*

1) ผลกระทบการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดยางจากตารางที่ 6 ผลการทดสอบค่า K ของคอนกรีตผสมเม็ดยาง (*RC*) และคอนกรีตผสมมวลรวมเบา (*LWC*) ก่อนได้รับความร้อนพบว่า *RC* มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่า *LWC* และเมื่อพิจารณาสถานะของ *PCM* พบว่า ค่า K_S และ K_L ของ *RC/PCMA* มีค่าลดลงตามปริมาณเม็ดยางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มที่คล้ายกันนี้ยังพบใน *RC/ASF-PCMA*

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

Concrete Type	K_s (W/m°C)			K_L (W/m°C)		
	0 Cycle	100 Cycles	%Diff	0 Cycle	100 Cycles	%Diff
LWC/PCMA	0.877	0.842	-4.0%	0.479	0.498	4.0%
10RC/PCMA	0.849	0.812	-4.4%	0.459	0.479	4.4%
20RC/PCMA	0.828	0.787	-5.0%	0.439	0.459	4.6%
30RC/PCMA	0.788	0.753	-4.4%	0.426	0.447	4.9%
LWC/ASF-PCMA	0.894	0.882	-1.3%	0.495	0.503	1.6%
10RC/ASF-PCMA	0.875	0.859	-1.8%	0.487	0.496	1.8%
20RC/ASF-PCMA	0.840	0.832	-1.0%	0.481	0.490	1.9%
30RC/ASF-PCMA	0.827	0.815	-1.5%	0.463	0.470	1.5%

ดังนั้นเมื่อแทนที่ปริมาณทรายบางส่วนด้วยเม็ดยางค่าการนำความร้อนจะลดลงตามปริมาณเม็ดยาง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [30] โดยสาเหตุอาจเป็นเพราะความร้อนจำเพาะของเม็ดยางสูงกว่าทรายในทางทฤษฎีที่มีความร้อนจำเพาะประมาณ 2,005 จูล หรือเคลวินกิโลกรัม ในขณะที่ทรายมีความร้อนจำเพาะน้อยกว่าถึงสามเท่า (ประมาณ 780 จูล หรือเคลวินกิโลกรัม) [31]

2) ผลกระทบของการปรับปรุงพื้นผิวมวลรวมเบา ผลการทดสอบพบว่า ค่า K ของทั้ง $LWC/ASF-PCMA$ และ $RC/ASF-PCMA$ พบว่า มีค่าสูงกว่าที่ผสมกับ $PCMA$ เล็กน้อย สำหรับ K_s ประมาณ 1.9–4.3% และ K_L ประมาณ 3.4–8.6% เนื่องจากความหนาแน่นของ $ASF-PCMA$ สูงกว่า $PCMA$ และการแทนที่ $PCMA$ ด้วย $ASF-PCMA$ ทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้การศึกษาที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นว่าการเคลือบซิลิกาฟุ่มที่พื้นผิวของมวลรวมสามารถปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และลดความหนาและความพรุนของ ITZ ระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟส [32]–[34] การปรับปรุงดังกล่าวทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงขึ้น มีการยึดเกาะที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามยังเพิ่มค่าการนำความร้อนของคอนกรีตอีกด้วย ในทางทฤษฎีความร้อนจำเพาะของวัสดุแปรผกผันกับค่าการนำความร้อน [35]

3) ผลกระทบของการให้ความร้อนซ้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ PCM ในสถานะของแข็ง (K_s) พบว่า

มีค่าลดลงหลังจากผ่านความร้อนซ้ำ จาก 1.0–5.0% ขึ้นอยู่กับประเภทของมวลรวม เนื่องจากการสูญเสียของ PCM บางส่วนออกจากมวลรวมนั้นทำให้เกิดช่องว่างที่เป็นอากาศภายในมวลรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งการส่งผ่านความร้อนในอากาศภายในมวลรวมช้าลงส่งผลให้ค่า K_s ลดลง สำหรับค่า K_s พบว่า LWC มีค่าน้อยกว่า $PCMA$ จากการศึกษาก่อนหน้านี้ [5], [15], [16] พบว่า มวลรวม LWA มีช่องว่างภายในเต็มไปด้วยอากาศแต่ใน $PCM-LWA$ นั้น เต็มไปด้วย PCM ที่เป็นของแข็งซึ่งอากาศภายในช่องว่างของมวลรวมนำความร้อนได้น้อยกว่า PCM ที่เป็นของแข็งเนื่องจากมีระยะห่างระหว่างอนุภาคมากกว่า จึงทำให้ค่า K_s ของ LWA มีค่าน้อยกว่า $ASF-PCMA$ ในสถานะของแข็ง สำหรับค่า K_L พบว่า ค่า K_L เพิ่มขึ้นเนื่องจาก PCM บางส่วนรั่วออกจากมวลรวม ทำให้ปริมาณ PCM ภายในมวลรวมลดลง และส่งผลให้ค่า K_L เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 1.5% ถึง 4.9% ขึ้นอยู่กับประเภทของมวลรวม ซึ่ง ค่า K_L แปรผันตรงกับปริมาณ PCM เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บความร้อนแฝงระหว่างเปลี่ยนสถานะ ซึ่งมีบทบาทในการชะลอการนำความร้อน ดังนั้นค่า K_L จึงลดลง

ในส่วนของผลกระทบจากการเคลือบผิวด้วยซิลิกาฟุ่ม ซึ่งมีความสำคัญในการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อน (K) หลังจากผ่านความร้อนซ้ำ เนื่องจาก $PCMA$ เมื่อได้รับความร้อนทำให้ PCM รั่วไหลออกมาในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้ระดับการเปลี่ยนแปลงใน K_s สูงขึ้นจาก -4.0%

เป็น -5.0% และ ค่า K_L จาก 4.0% เป็น 4.9% ในกรณี *ASF-PCMA* การเคลือบพื้นผิวทำให้ *PCM* ร่วออกมาในปริมาณที่น้อยลงอย่างมาก โดยพบว่า ค่า K_S มีระดับการเปลี่ยนแปลงการจาก -1.0% ถึง -1.8% และค่า K_L มีระดับการเปลี่ยนแปลงการจาก 1.5% ถึง 1.9%

4. สรุป

คุณสมบัติของมวลรวมซึ่งทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพโดยพบว่า การเคลือบผิวมวลรวมด้วยซิลิกาฟุ่มที่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพลสแล้วส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลงและความถ่วงจำเพาะของมวลรวมเพิ่มขึ้น และลดการสูญเสียของ *PCM* ออกจากมวลรวม โดยหลังจากผ่านความร้อนซ้ำ 100 รอบ พบว่า *ASF-PCMA* มีการสูญเสียลดน้อยลงประมาณ 5.4 เท่าเมื่อเทียบกับ *PCMA*

ในส่วนของการคอนกรีตผสมเม็ดยาง (*RC*) พบว่า จากการผสมด้วย *ASF-PCMA* ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลทั้งกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด เนื่องจากความหนาแน่นของมวลรวมที่เพิ่มขึ้น และปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นจากการเคลือบซิลิกาฟุ่มชั้นตอนสุดท้ายที่พื้นผิวของมวลรวม ซึ่งช่วยปรับปรุงผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพลสให้มีการยึดติดที่ดีขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K) พบว่า ค่า K_L และ K_S ของคอนกรีต *RC* มีค่าต่ำกว่า LWC ในทุกสัดส่วนผสม เนื่องจากการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเม็ดยางซึ่งมีความร้อนจำเพาะสูงกว่ามวลรวมละเอียด

ผลกระทบของการเคลือบผิวทำให้ค่า K ของคอนกรีตผสมด้วยมวลรวมที่ผ่านการเคลือบผิว ($LWC/ASF-PCMA$ และ $RC/ASF-PCMA$) มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ($LWC/PCMA$ และ $RC/PCMA$) อันเป็นผลมาจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นและของมวลรวมที่ผ่านการเคลือบผิว

ผลกระทบของการให้ความร้อนซ้ำพบว่า $LWC/ASF-PCMA$ และ $RC/ASF-PCMA$ มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_L และ K_S ที่ต่ำกว่า $LWC/PCMA$ และ $RC/PCMA$ เนื่องจากการเคลือบผิวมวลรวมช่วยลดการสูญเสีย *PCM* ออกจากมวลรวม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา วช.อว(อ)(กบง)/569/2563 และโครงการดุขภูมิบัณฑิต มจพ. จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภายใต้สัญญาเลขที่ KMUTNB-61-PHD-013 และได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ บว.(วช.) /04/2565

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Intawong, "Properties of concrete mixed with light weight aggregate impregnated with paraffin type phase changed materials," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2013 (in Thai).
- [2] N. Nonthiyutsirikul, "Properties of geopolymers mixed with lightweight aggregate impregnated with paraffin type phase changed materials," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2014 (in Thai).
- [3] M. Pania, X. Yunping, and L. Yue, "Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 713–721, 2012.
- [4] J. Paris, M. Falardeau, and C. Villeneuve, "Thermal storage by latent heat: A viable option for energy conservation in buildings," *Energy Sources*, vol. 15, no. 1, pp. 85–93, 1993.
- [5] P. Sukontasukkul, P. Uthaichotirat, T. Sangpet, K. Sisomphon, M. Newlands, A. Siripanichgorn, and P. Chindaprasirt, "Thermal properties of lightweight



- concrete incorporating high contents of phase change materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 207, pp. 431–439, 2019.
- [6] The Department of Land Transport. (2021, October). Number of Vehicles. The Department of Land Transport. Bangkok, Thailand [Online] (in Thai). Available: <https://web.dlt.go.th/statistics/>
- [7] F. Azevedo, F. Pacheco-Torgal, C. Jesus, J. L. B. de Aguiar, and A. F. Camões, “Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes,” *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 186–191, 2012.
- [8] P. Sukontasukkul, “Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel,” *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 1084–1092, 2009.
- [9] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM C150-20, 2020.
- [10] *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures West Conshohocken*, ASTM C1240-20, 2020.
- [11] *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM C494/C494M-19, 2019.
- [12] V. H. Cao, S. Pilehvar, C. Salas-Bringas, A. M. Szczotok, J. F. Rodriguez, M. Carmona, N. Al-Manasir, and A. Kjøniksen, “Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of Portland cement concrete and geopolymers concrete for passive building applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 133, pp. 56–66, 2017.
- [13] S. Ramakrishnan, J. Sanjayan, X. Wang, M. Alam, and J. Wilson, “A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites,” *Applied Energy*, vol. 157, pp. 85–94, 2015.
- [14] P. Sukontasukkul, N. Nontiyutsirikul, S. Songpiriyakij, K. Sakai, and P. Chindaprasirt, “Use of phase change material to improve thermal properties of lightweight geopolymers panel,” *Materials and Structures*, vol. 49, no. 11, pp. 4637–4645, 2016.
- [15] P. Sukontasukkul, T. Sangpet, M. Newlands, D.Y. Yoo, W. Tangchirapat, S. Limkatanyu, and P. Chindaprasirt, “Thermal storage properties of lightweight concrete incorporating phase change materials with different fusion points in hybrid form for high temperature applications,” *Heliyon*, vol. 6, no. 9, 2020.
- [16] P. Pongsopha, P. Sukontasukkul, T. Phoo-ngernkham, T. Imjai, P. Jamsawang, and P. Chindaprasirt, “Use of burnt clay aggregate as phase change material carrier to improve thermal properties of concrete panel,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, 2019.
- [17] Z. K. Khatib and F. M. Bayomy, “Rubberized portland cement concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 206–213, 1999.
- [18] C. Chaikaew, P. Sukontasukkul, U. Chaisakulkiet, V. Sata, and P. Chindaprasirt, “Properties of concrete pedestrian blocks containing crumb rubber from recycle waste tyres reinforced with steel fibres,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, 2019, Art. no. e00304.
- [19] *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM C127 – 15, 2015.

- [20] *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*, ASTM C 138-17, 2017.
- [21] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C39-21, 2021.
- [22] *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, ASTM C78-21, 2021.
- [23] *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*, ASTM C518-17, 2017.
- [24] I. B. Topçu, "The properties of rubberized concretes," *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 2, pp. 340–310, 1995,
- [25] N. N. Eldin and A. B. Senouci, "Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 16, no. 4, pp. 287–298, 1994.
- [26] C. A. Issa and G. Salem, "Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design," *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 48–52, 2013.
- [27] P. Sukontasukkul and C. Chaikaew, "Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber," *Journal of Construction and Building Materials (JCBM)*, vol. 20, no. 7, pp. 450–457, 2006.
- [28] X. Ping and J. J. Beaudoin, "Modification of transition zone microstructure silica fume coating of aggregate surfaces," *Cement and Concrete Research*, vol. 22, no. 4, pp. 597–604, 1992.
- [29] G. Adil, J. T. Kevern, and D. Mann, "Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 247, 2020, Art. no. 118453.
- [30] I. Marie, "Thermal conductivity of hybrid recycled aggregate Rubberized concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 133, pp. 516–524, 2017.
- [31] P. Evans. (2016, October). Specific heat capacity of materials. Specific Heat Capacity of common materials. The Engineering Mindset. [Online]. Available: <http://theengineeringmindset.com/specific-heat-capacity-of-materials/>
- [32] X. Ping and J. J. Beaudoin, "Modification of transition zone microstructure silica fume coating of aggregate surfaces," *Cement and Concrete Research*, vol. 22, no. 4, pp. 597–604, 1992.
- [33] G. Adil, J. T. Kevern, and D. Mann, "Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 247, 2020.
- [34] V. Nežerka, P. Bílý, V. Hrbeka, and J. Fládr, "Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 103, pp. 252–262, 2019.
- [35] J. H. Leinhard IV and J. H. Leinhard V, *A Heat Transfer Textbook*. 5th ed. Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, 2019.