



บทความวิจัย

กำลังอัดและการนำความร้อนของคอนกรีตผสมถ่านชีวภาพและมวลรวมดินเหนียวขยายตัว

Compressive strength and thermal conductivity of concrete containing biochar and expanded clay aggregate

อัญชานา กิจจานนท์¹ ลีน่า ปรัก¹ Mengty Toeng² สุรศักดิ์ แซ่ลิ้ม³ ทวีชัย สำราญวานิช^{3*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

² ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Aunchana Kijjanon¹ Lyna Prak¹ Mengty Toeng² Surasak Saelim³ Taweechai Sumranwanich^{3*}

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Khlong Luang, Pathum Thani, 12110

² School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Pathum Thani, 12120

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Muang, Chonburi 20131

* Corresponding author.

E-mail: twc@buu.ac.th; Telephone: 0 81862 1230

วันที่รับบทความ 29 มิถุนายน 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 7 ธันวาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ 12 กุมภาพันธ์ 2569

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งตรวจสอบกำลังอัดและการนำความร้อนของคอนกรีตที่ผสมถ่านชีวภาพและมวลรวมดินเหนียวขยายตัว ส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไปเป็นวัสดุประสานหลัก ใช้ถ่านชีวภาพผลิตจากแกลบที่ผ่านการเผาโดยกระบวนการไพโรไลซิสแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกบางส่วนที่ร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ บางส่วนที่ร้อยละ 25 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ ทุกส่วนผสมคอนกรีตควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.50 จากผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัว คอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพที่ร้อยละ 1 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพที่ร้อยละ 3 ขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพ โดยการนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมดินเหนียวขยายตัว นอกจากนี้ คอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวเพียงอย่างเดียว เนื่องจากถ่านชีวภาพและมวลรวมดินเหนียวขยายตัวเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง จึงสามารถช่วยลดการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อคอนกรีตได้

คำสำคัญ

ถ่านชีวภาพ มวลรวมดินเหนียวขยายตัว การนำความร้อน กำลังอัด คอนกรีต

Abstract

This paper investigates the compressive strength and thermal conductivity of concrete containing biochar and expanded clay aggregate. Hydraulic cement type GU was used as the main binder. Biochar produced from pyrolyzed rice

husks was used to partially replace hydraulic cement at 1% and 3% by weight of total binder. Expanded clay aggregate was used to replace natural coarse aggregate at 25 and 50% by volume of coarse aggregate. The water-to-binder ratio of all concrete mixtures was kept at a constant value of 0.50. The experimental results found that biochar-based concrete had higher compressive strength than control concrete and concrete containing expanded clay aggregate. Concrete with 1% biochar by weight of total binder exhibited higher compressive strength than concrete with 3% biochar by weight of total binder. Meanwhile, the concrete using expanded clay aggregate demonstrated less thermal conductivity than the control concrete and the concrete incorporating biochar. The thermal conductivity decreased as the percentage of expanded clay aggregate increased. Furthermore, concrete containing biochar combined with expanded clay aggregate possessed a lower thermal conductivity than concrete having only expanded clay aggregate. This is because biochar and expanded clay aggregate were highly porous materials. As a result, it could reduce heat transfer inside the concrete.

Keywords

biochar, expanded clay aggregate, thermal conductivity, compressive strength, concrete

1. บทนำ

โครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน ระบบประปา ระบบน้ำทิ้ง ระบบไฟฟ้า และ ระบบสื่อสาร ถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสินค้าหรือบริการ ปัจจุบันมีการขยายตัวของงานโครงสร้างพื้นฐานอย่างมาก เนื่องจากมีความต้องการในการใช้งานและความจำเป็นต่อการพัฒนาประเทศ ไม่ว่าจะเป็นการขยายตัวในรูปแบบของการลงทุนก่อสร้างในโครงการใหม่ หรือการบำรุงซ่อมแซมระบบเดิมที่มีอยู่แล้ว นอกจากนี้ นโยบายการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) นับว่าเป็นส่วนหนึ่งของนโยบายเศรษฐกิจที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse gases) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก [1] การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก เป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพของมนุษย์อย่างมาก [2] จากกรอบนโยบายทั้งสองด้านล้วนมีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมก่อสร้างทั้งทางตรงและทางอ้อม ด้วยเหตุนี้ การหาวิธีในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างตั้งแต่กระบวนการก่อสร้าง การเลือกใช้วัสดุ รวมทั้งการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ปูนซีเมนต์เป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน แต่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 36 ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมก่อสร้าง และมีการปล่อยในประมาณร้อยละ 8 ของการปล่อยก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด [3] ด้วยเหตุนี้ เพื่อปรับสมดุลระหว่างการใช้นิวซีเมนต์และการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน กลยุทธ์หนึ่งที่น่าสนใจในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ คือ การใช้ประโยชน์จากวัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นวัสดุหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนสูงที่ผลิตจากแกลบที่ผ่านการเผา โดยกระบวนการไพโรไลซิส (กระบวนการให้ความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจน) ซึ่งปริมาณคาร์บอนสูงสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ [4] อนุภาคของถ่านชีวภาพมีรูพรุนที่สามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในอนุภาค ช่วยทำหน้าที่ในการบ่มภายใน (Internal curing) ของคอนกรีต นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังช่วยปรับปรุงกำลังของคอนกรีตให้ดีขึ้นด้วยจากผลการเกาะตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Nucleation effect) รอบอนุภาคของถ่านชีวภาพ และการเติมแทรกช่องว่าง (Filler effect) ของถ่านชีวภาพภายในคอนกรีตอีกด้วย นอกจากนี้ อนุภาคของถ่านชีวภาพมีความพรุนและมีพื้นที่ผิวใหญ่สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพบางประการของคอนกรีตได้ เช่น คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal property) ปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร เช่น การลดการนำความร้อนจากบรรยากาศภายนอกเข้าสู่องค์อาคาร [5] มีความสามารถในการกักเก็บน้ำ (Water retention) ควบคุมความชื้น (Moisture control) รวมทั้งปรับปรุงคุณสมบัติด้านความคงทนบางประการของคอนกรีตด้วย [5-7]

มวลรวมดินเหนียวขยายตัว (Expanded clay aggregate) เป็นมวลรวมน้ำหนักเบาที่ช่วยลดความหนาแน่น (Density)

และค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของคอนกรีต เนื่องจากโครงสร้างพรุนสูง (High porosity) ซึ่งเกิดจากการผลิตโดยการเผาแร่ดินเหนียวที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1,100–1,200°C) ทำให้เกิดการขยายตัวและก่อให้เกิดรูพรุนภายใน คุณสมบัติพรุนนี้ช่วยลดการนำความร้อนของคอนกรีตเมื่อเทียบกับมวลรวมธรรมดา ส่งผลให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น [8] ดังนั้น มวลรวมดินเหนียวขยายตัวจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต ช่วยลดการใช้พลังงานปรับอากาศในอาคารและเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงานโดยรวมของโครงสร้าง [9]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบและมวลรวมดินเหนียวขยายตัวร่วมกันเพื่อพัฒนาคอนกรีตที่ใช้วัสดุที่ลดการปล่อย CO₂ ลดการนำความร้อนจากบรรยากาศภายนอกเข้าสู่อาคาร และลดน้ำหนักโครงสร้าง โดยมุ่งประเมินกำลังอัดและค่าการนำความร้อนทั้งในห้องปฏิบัติการและสถานะจริง ซึ่งคอนกรีตที่ศึกษาออกแบบโดยใช้ถ่านชีวภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกบางส่วนที่ร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ 25 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ และศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัว

2. การทดลอง

2.1 วัสดุและส่วนผสม

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [10] เป็นวัสดุประสานหลัก โดยใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ (RB) ซึ่งผลิตจากแกลบแห้งจากอำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงภายใต้สภาวะคงที่ จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เพื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกบางส่วน และมวลรวมดินเหนียวขยายตัว (CA) ซึ่งผลิตจากการเผาดินเหนียวที่อุณหภูมิ 1,250°C มีขนาดประมาณ 8-16 มม. ถูกใช้เป็นมวลรวมหยาบแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ (R) บางส่วน โดยองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทาง

กายภาพของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 1 องค์ประกอบธาตุของถ่านชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของทราย (S), หิน (R), มวลรวมดินเหนียวขยายตัว (CA) แสดงดังตารางที่ 3 และลักษณะอสัณฐานของอนุภาคของวัสดุแสดงดังรูปที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

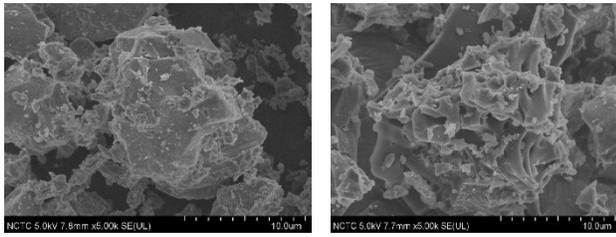
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	GU	RB
SiO ₂	13.63	35.21
Al ₂ O ₃	2.67	0.09
Fe ₂ O ₃	3.31	0.21
CaO	66.20	0.46
MgO	1.12	0.33
Na ₂ O	1.90	0.04
K ₂ O	0.31	1.89
SO ₃	0.35	0.19
Other oxides	3.70	1.30
Loss on ignition (LOI)	6.78	60.25
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	1.66
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ม. ² /กก.)	254.3	573.3
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, D ₅₀ (ไมโครเมตร)	8.86	40.8

ตารางที่ 2 องค์ประกอบธาตุของถ่านชีวภาพ

องค์ประกอบธาตุ (ร้อยละ)	RB
ไฮโดรเจน	2.25
คาร์บอน	48.56
ไนโตรเจน	0.56
ออกซิเจน	10.81
ซิลเฟอร์	0.00
เถ้า	37.82

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของทราย หิน และมวลรวมดินเหนียวขยายตัว

คุณสมบัติทางกายภาพ	S	R	CA
ความถ่วงจำเพาะ	2.60	2.70	0.90
ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	0.32	0.42	15.5
โมดูลัสความละเอียด	2.44	7.19	7.76



(ก)

(ข)

รูปที่ 1 ลักษณะของสัณฐานของอนุภาค: (ก) GU และ (ข) RB (X5,000)



รูปที่ 2 รูปร่างของ CA

ส่วนผสมคอนกรีตออกแบบโดยใช้ถ่านชีวภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกบางส่วนที่ร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัว (CA) แทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติ (R) บางส่วนที่ร้อยละ 25 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ ทุกส่วนผสมคอนกรีตควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.50 โดยส่วนผสมของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ส่วนผสมคอนกรีต

รหัส	สัดส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)					
	วัสดุประสาน		น้ำ	S (SSD)	R (SSD)	CA (SSD)
	GU	RB				
NC	381.2	-	190.6	775.6	1025.1	-
CA25	381.2	-	190.6	775.6	768.9	85.4
CA50	381.2	-	190.6	775.6	512.6	170.9
NCRB1	376.1	3.8	189.9	775.6	1025.1	-
NCRB3	366.0	11.3	188.6	775.6	1025.1	-
CA50RB1	376.1	3.8	189.9	775.6	512.6	170.9
CA50RB3	366.0	11.3	188.6	775.6	512.6	170.9

หมายเหตุ: NC คือ คอนกรีตควบคุม, CAxx คือ คอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมดินเหนียวขยายตัวที่ร้อยละ xx โดยปริมาตร, NCRBx คือ คอนกรีตที่แทนที่วัสดุประสานด้วยถ่านชีวภาพที่ร้อยละ x โดยน้ำหนักวัสดุประสาน, CA50RBx คือ คอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วยมวลรวมดินเหนียวขยายตัวที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร และแทนที่วัสดุประสานด้วยถ่านชีวภาพที่ร้อยละ x โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

2.2 วิธีการทดสอบ

1) กำลังอัด

ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881-116 [11] โดยใช้คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 ซม. × 10 ซม. × 10 ซม. ทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 14, 28 และ 365 วัน โดยแต่ละอายุการทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 3 ก้อน จากนั้นนำค่ากำลังอัดที่ได้คำนวณหาค่าเฉลี่ยของกำลังอัดของคอนกรีต

2) การนำความร้อน

ทำการทดสอบการนำความร้อน (Thermal conductivity) ตามมาตรฐาน ASTM D5334-14 [12] โดยทำการหล่อคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. หลังจากครบระยะเวลาบ่มน้ำที่ 365 วัน จากนั้นทิ้งตัวอย่างให้แห้งในอากาศเป็นระยะเวลา 7 วัน จึงทำการเจาะรูขนาด 4 มม. ลึก 50 มม. บริเวณกึ่งกลางด้านบนของตัวอย่าง จากนั้นทำการใส่จาระบีลงไปในส่วนที่เจาะเพื่อให้เข็มเซ็นเซอร์สัมผัสกับตัวอย่าง ทำการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตด้วยเครื่อง Transient line source (TLS-100)

3) การวัดอุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริง

จากผลการทดลองกำลังอัดและการนำความร้อนจากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 จึงสรุปได้ว่าส่วนผสม CA50RB1 และ CA50RB3 มีความเหมาะสมในการนำมาใช้หล่อเป็นแผ่นพื้นผนัง เนื่องจากค่าการนำความร้อนที่ต่ำและกำลังอัดอยู่ระดับปกติที่ 30 เมกะปาสคาล จึงทำการทดสอบการวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตขนาดจริง โดยทำการหล่อผนังคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 55x40 ซม. หนา 5 ซม. ใช้เหล็ก RB6 เป็นเหล็กเสริมหลักด้านสั้น จำนวน 3 แท่ง และเหล็กเสริมด้านยาว ดังรูปที่ 3(ก) จำนวน 3 แท่ง หลังจากหล่อผนังคอนกรีตเสริมเหล็กนำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นเตรียมกล่องไม้ (กว้าง 47 ซม. ยาว 61 ซม. หนา 32 ซม.) และกล่องโฟม (ขนาดกล่องภายใน กว้าง 43 ซม. ยาว 55.3 ซม. หนา 26.2 ซม. และ ขนาดกล่องภายนอก กว้าง 45 ซม. ยาว 60 ซม. หนา 31.5 ซม.) สำหรับใส่แผ่นผนังดังรูปที่ 3(ข) ทำการติดแผ่นฉนวนกันความร้อนภายในกล่องโฟมเพื่อให้ความร้อนเข้าสู่ภายในกล่องจากการถ่ายเทผ่านผนังคอนกรีตเสริมเหล็กเพียงทิศทางเดียว ดังรูปที่ 3(ค) หลังจากครบ

ระยะเวลาบ่มน้ำ นำแผ่นผนังประกอบเข้ากับกล่องโพนหลัง จากนั้นใช้ซิลิโคนอุดร่องระหว่างผนังกับโพนจากนั้นใช้แลคซีน ยึดติดระหว่างผนังทดสอบและกล่องโพน ดังรูปที่ 3(ง) จากนั้นติดตั้งสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลไว้ในกล่องทดสอบพร้อม กับประกอบสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่อง Data logger multicon ดังรูปที่ 3(จ) จากนั้นวัดอุณหภูมิภายในกล่องพร้อม บันทึกผล จากนั้นนำค่าการนำความร้อนที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ (k) ผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและ ภายในกล่องทุก ๆ 15 นาที (ΔT) และความหนาของผนัง คอนกรีตเสริมเหล็ก (L) มาคำนวณหาอัตราการไหลของความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือ ฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ดังสมการที่ 1

$$q'' = -k \times \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

โดย q'' คือ ฟลักซ์ความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตร)

k คือ การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน)

ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและ

ภายในกล่อง ($^{\circ}\text{C}$)

L คือ ความหนาของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก (เมตร)

4) ความหนาแน่นของคอนกรีต

ทำการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต โดยใช้ คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10 ซม. × 10 ซม. × 10 ซม. โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 3 ก้อน ต่อ 1 ส่วนผสม หลังจากครบระยะเวลาบ่มน้ำที่ 365 วัน ทำการทิ้งตัวอย่างให้แห้งใน อากาศเป็นระยะเวลา 7 วัน จากนั้นนำตัวอย่างวัดขนาดและชั่ง น้ำหนักแห้ง และคำนวณค่าความหนาแน่นของคอนกรีตโดยนำ น้ำหนักหารด้วยปริมาตรของคอนกรีต

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 กำลังอัด

3.1.1 ผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วย ถ่านชีวภาพ

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ร้อยละ 1 และ 3 แสดงดังรูปที่ 4 จากรูปพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากถ่านชีวภาพมีปริมาณของซิลิกาสูง (ตารางที่ 1) ทำให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดผลผลิต เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) สูง ขณะที่อนุภาคขนาดเล็กของถ่านชีวภาพสามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างของอนุภาคเป็นรูพรุน (รูปที่ 1ข) ซึ่งรูพรุนดังกล่าวสามารถกักเก็บน้ำ (Water retention) ไว้ภายในอนุภาค เป็นผลให้เกิดการบ่มภายใน (Internal curing) เนื้อคอนกรีตได้ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวข้างต้นทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [13] เมื่อพิจารณาร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยถ่านชีวภาพที่ร้อยละ 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ เนื่องจากผลกระทบของการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ (Dilution effect) ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดลง ด้วยเหตุนี้ การเกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น CSH จึงลดลงตามไปด้วย [13-14]



(ก) การเตรียมแผ่นผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก



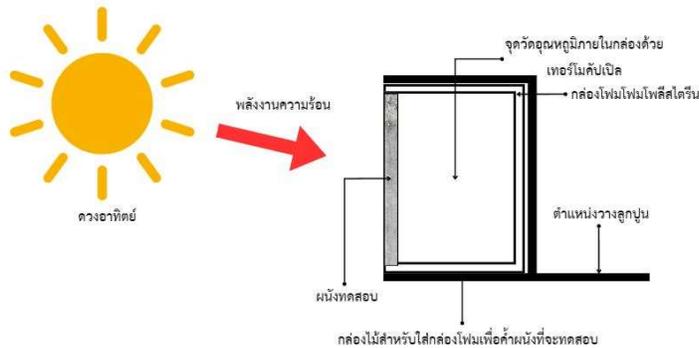
(ข) การเตรียมกล่องไม้และกล่องโฟมสำหรับใส่แผ่นผนัง



(ค) การติดตั้งแผ่นฉนวนกันความร้อนภายในกล่องโฟม

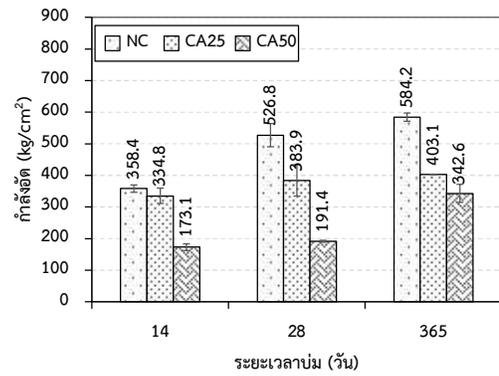
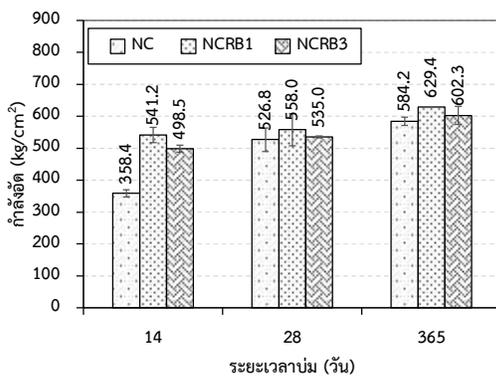


(ง) การประกอบแผ่นผนังเข้ากับกล่องโฟม



(จ) รายละเอียดการวัดอุณหภูมิภายในกล่อง

รูปที่ 3 ขั้นตอนการวัดอุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริง



รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

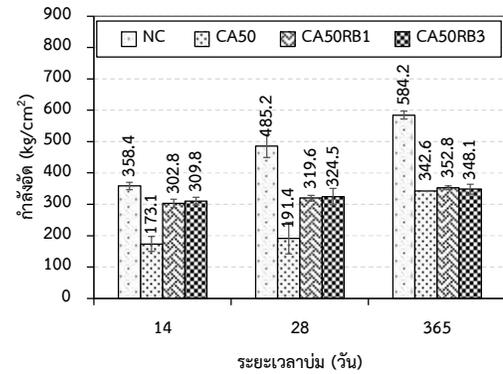
รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 25 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ

3.1.2 ผลกระทบของการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมดินเหนียวขยายตัว

รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 25 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ จากรูปพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้มวลรวมหยาบธรรมชาติ นอกจากนี้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของมวลรวมดินเหนียวขยายตัวเพิ่มมากขึ้น โดย CA25 มีกำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 6.58 ถึง 31.00 ขณะที่ CA50 กำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 41.36 ถึง 63.67 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม (NC) เนื่องจากมวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีความพรุนสูง (รูปที่ 2) ส่งผลให้มีความสามารถในการรับกำลังต่ำกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติ ซึ่งผลกำลังอัดสอดคล้องกับงานวิจัยของ [15]

3.1.3 ผลกระทบของการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมดินเหนียวขยายตัว

รูปที่ 6 แสดงกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ จากรูปพบว่า คอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวทุกส่วนผสมมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เนื่องจากมวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีความพรุนสูง ส่งผลให้มีความสามารถในการรับกำลังต่ำ [15] แต่การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวเพียงอย่างเดียว โดยปัจจัยที่ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นมีดังนี้ (1) การทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของถ่านชีวภาพกับ CH ก่อให้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยา เช่น CSH เพิ่มมากขึ้น (2) อนุภาคขนาดเล็กของถ่านชีวภาพช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต (3) การใช้ถ่านชีวภาพก่อให้เกิดการบ่มภายในเนื้อคอนกรีต [13] นอกจากนี้ การแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยถ่านชีวภาพที่ร้อยละ 1 (NCRB1) ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ร้อยละ 3 (NCRB3)



รูปที่ 6 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ

3.2 การนำความร้อน

3.2.1 ผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยถ่านชีวภาพ

การนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 7 จากรูปพบว่า คอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพที่ร้อยละ 1 และ 3 มีการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 3.5 และ 4.6 ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของถ่านชีวภาพมีความพรุนสูง จึงส่งผลให้เกิดช่องทางการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น [16] กล่าวคือ ถ่านชีวภาพที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตทำให้ความร้อนเกิดการแพร่ในเนื้อคอนกรีตอย่างกระจุกกระจาย โดยกลไกดังกล่าวทำให้เกิดการกระจายความร้อนในหลากหลายทิศทาง ซึ่งสามารถลดความถี่ของการแพร่กระจายของความร้อนภายในเนื้อคอนกรีตได้ [16-17] ค่าการนำความร้อนที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ [18] ซึ่งพบว่า มอร์ตาร์ผสมถ่านชีวภาพมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 2.38 ถึง 1.17 W/m.K และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ถ่านชีวภาพจากร้อยละ 3 เป็นร้อยละ 10

3.2.2 ผลกระทบของการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมดินเหนียวขยายตัว

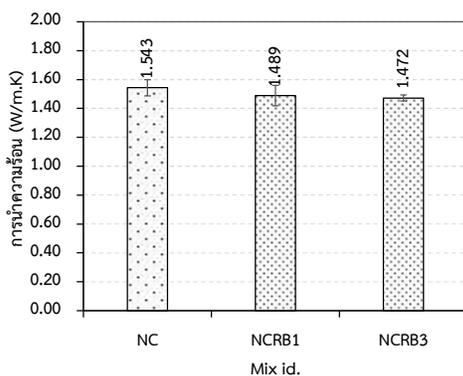
การนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 25 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ แสดงดังรูปที่ 8 จากรูปพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และการนำความร้อนมีค่า

ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วย เนื่องจากมวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีความพรุนสูงส่งผลให้มีฟองอากาศอยู่ในมวลรวมสูง ซึ่งฟองอากาศมีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ด้วยเหตุนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวจึงมีค่าการนำความร้อนต่ำไปด้วย [19] ค่าการนำความร้อนที่วัดได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ [20] ที่พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 1.4889 ถึง 1.0410 W/m.K และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มวลรวมดินเหนียวขยายตัวจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 30

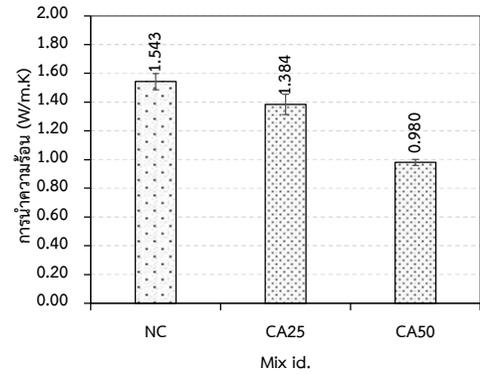
3.2.3 ผลกระทบของการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัว

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวเพียงอย่างเดียว เนื่องจากทั้งถ่านชีวภาพและมวลรวมดินเหนียวขยายตัวเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ด้วยเหตุนี้ วัสดุทั้งสองจึงสามารถช่วยลดการนำความร้อนของคอนกรีตได้

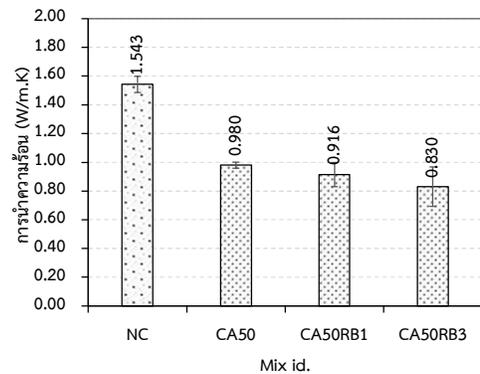
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตและค่าการนำความร้อน จากรูปพบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการนำความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำ (ประมาณ 2,150–2,250 kg/m³) ให้ค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1.0 W/m.K ขณะที่คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงกว่า (ประมาณ 2,450 ถึง 2,550 kg/m³) มีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ 1.45 ถึง 1.55 W/m.K



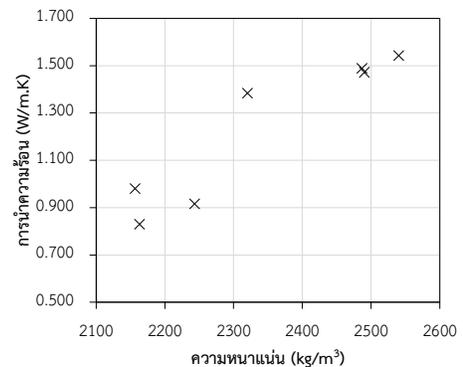
รูปที่ 7 การนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน



รูปที่ 8 การนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติที่ร้อยละ 0, 25 และ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ



รูปที่ 9 การนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวที่ร้อยละ 50 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ



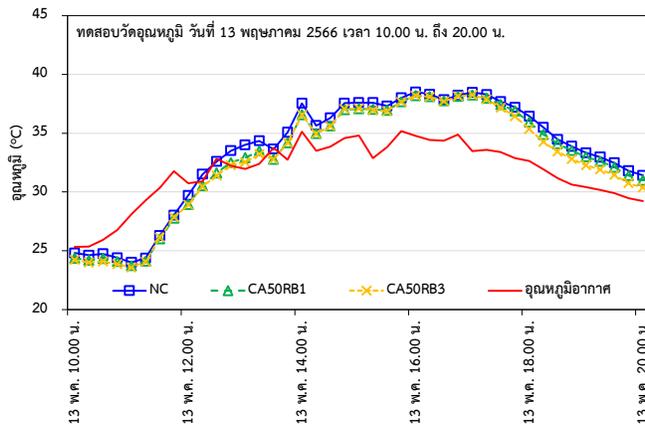
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและการนำความร้อนของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 365 วัน

3.3 อุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริง

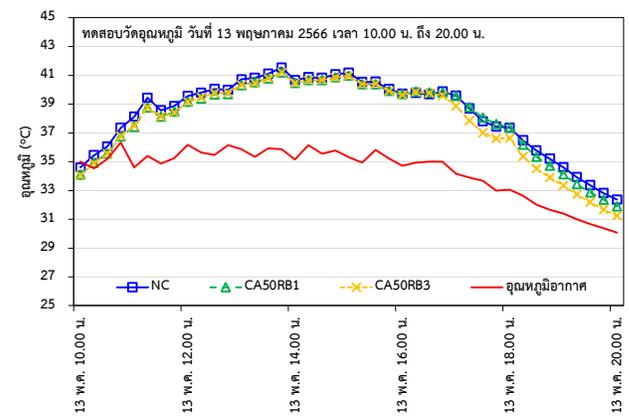
การวัดอุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริงดำเนินการในช่วงวันที่ 12 พฤษภาคม ถึง 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 โดยอุณหภูมิภายในของชิ้นส่วน

โครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริงแสดงดังรูปที่ 11 จากรูปพบว่า เมื่อผนังทุกชนิดได้รับความร้อนในตอนเช้าทำให้ผนังด้านนอกได้รับความร้อนมากขึ้นและมีการสะสมความร้อนในเนื้อวัสดุจึงทำให้อุณหภูมิภายในกล่องที่ทดสอบสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ ในตอนเย็นเมื่ออุณหภูมิลดลงวัสดุเกิดการคายความร้อนที่สะสมออกมาจึงทำให้อุณหภูมิภายในกล่องลดลง ซึ่งจากรูปพบว่า CA50RB3 มีอุณหภูมิภายในกล่องต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการนำความร้อนในหัวข้อที่ 3.2.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิ 3 ช่วงเวลาในช่วงวันที่ 12, 13

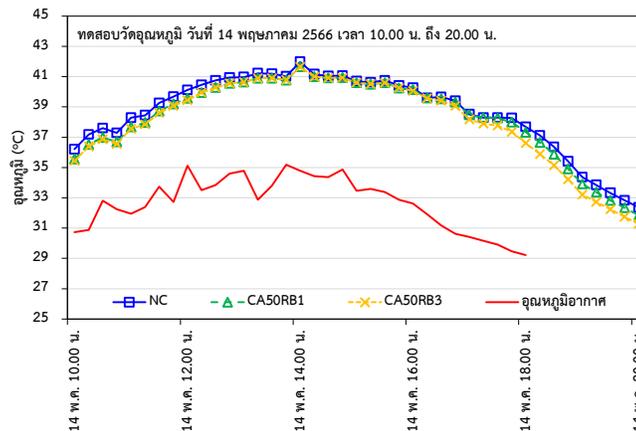
และ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ได้แก่ การสะสมความร้อนที่เวลา 10.00 น. ความร้อนสูงสุด และการคายความร้อนที่เวลา 20.00 น. ที่แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า ในช่วงการทดสอบตัวอย่างแผ่นผนัง NC มีการสะสมความร้อนสูงสุด เนื่องจาก NC มีความหนาแน่นมากกว่าผนังที่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพ และมวลรวมดินเหนียวขยายตัวจึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในกล่องได้สูงกว่า นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิภายในกล่องภายหลังจากแผ่นผนังเกิดการคายความร้อนพบว่า CA50RB3 มีอุณหภูมิภายในกล่องต่ำที่สุด



(ก) วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2566



(ข) วันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2566



(ค) วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2566

รูปที่ 11 อุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริง

ตารางที่ 5 ค่าอุณหภูมิภายในกล่องตัวอย่างแผ่นผนัง

วัน เดือน ปี	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	NC	CA50RB1	CA50RB3
12 พฤษภาคม พ.ศ. 2566	เริ่มสะสมความร้อน (°C)	29.69	28.94	28.91
	ความร้อนสูงสุด (°C)	37.55	36.56	36.56
	คายความร้อน (°C)	31.41	31.00	30.37
	ฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย (W/m. ²)	77.81	36.85	28.39
13 พฤษภาคม พ.ศ. 2566	เริ่มสะสมความร้อน (°C)	34.59	34.09	34.06
	ความร้อนสูงสุด (°C)	41.54	41.19	41.19
	คายความร้อน (°C)	32.02	31.52	30.93
	ฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย (W/m. ²)	122.07	67.51	55.05
14 พฤษภาคม พ.ศ. 2566	เริ่มสะสมความร้อน (°C)	36.20	35.57	35.44
	ความร้อนสูงสุด (°C)	41.97	41.64	41.64
	คายความร้อน (°C)	31.64	31.12	30.58
	ฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย (W/m. ²)	129.88	71.14	59.44

เมื่อพิจารณาฟลักซ์ความร้อน พบว่า ผนังคอนกรีต NC มีค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดทุกวัน มีค่าประมาณ 77.81, 122.07 และ 129.88 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ แสดงว่าความร้อนจากภายนอกไหลผ่านผนังคอนกรีต NC เข้าสู่ภายในกล่องได้มากที่สุด สำหรับส่วนผสม CA50RB1 และ CA50RB3 พบว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่ำกว่า NC ทุกวัน โดย CA50RB3 ต่ำที่สุดในทุกกรณี โดยเมื่อเทียบกับ NC ส่วนผสม CA50RB1 ลดค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยได้ประมาณร้อยละ 44 ถึง 53 ขณะที่ CA50RB3 ลดได้ประมาณร้อยละ 54 ถึง 64 ขึ้นกับสภาพอากาศในแต่ละวัน

4. สรุปผล

จากการศึกษากำลังอัดและการนำความร้อนของคอนกรีตผสมถ่านชีวภาพและมวลรวมดินเหนียวขยายตัว สามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ผสมถ่านชีวภาพมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมในทุกอายุการบ่ม โดยส่วนผสมที่ใช้ถ่านชีวภาพร้อยละ 1 ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร้อยละ 3 และคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวให้

กำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวเพียงอย่างเดียว

2. มวลรวมดินเหนียวขยายตัวทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ แต่กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับถ่านชีวภาพ เนื่องจากถ่านชีวภาพสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก การเติมเติมช่องว่าง และการบ่มภายในเนื้อคอนกรีต

3. คอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และค่าการนำความร้อนลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกด้วยถ่านชีวภาพ

4. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และค่าการนำความร้อนลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่มวลรวมหยาบธรรมชาติด้วยมวลรวมดินเหนียวขยายตัว เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีความหนาแน่นต่ำส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลงด้วย

5. คอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวมีการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมดินเหนียวขยายตัวเพียงอย่างเดียว

6. จากการทดสอบแผ่นผนังคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมจริงพบว่า แผ่นผนังคอนกรีตควบคุมมีอุณหภูมิภายในกล่องและฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยสูงสุด ในขณะที่แผ่นผนังคอนกรีตที่ใช้ถ่านชีวภาพร้อยละ 3 ร่วมกับมวลรวมดินเหนียวขยายตัวร้อยละ 50 ให้ค่าอุณหภูมิภายในกล่องและฟลักซ์ความร้อนต่ำที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา “งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ.2566” เลขที่สัญญา 9.2/2566 และขอขอบคุณศูนย์ความยั่งยืนวิศวกรรมระบบเมืองและการขนส่ง (SUSET) และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนการศึกษานี้ สุดท้ายขอขอบคุณนายศุภกฤษณ์ แซ่เลา และ นางสาวแสงรวี กิ่งแลบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ร่วมเป็นส่วนหนึ่งในการดำเนินงานในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Semieniuk G, Yakovenko VM. Historical evolution of global inequality in carbon emissions and footprints versus redistributive scenarios. *Journal of Cleaner Production*. 2020;264: 121420. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121420.
- [2] Weilhhammer V, Schmid J, Mittermeier I, Schreiber F, Jiang L, Pastuhovic V, et al. Extreme weather events in Europe and their health consequences: a systematic review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2021;233: 113688. DOI:10.1016/j.ijheh.2021.113688.
- [3] Habert G, Miller SA, John VM, Provis JL, Favier A, Horvath A, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2020;1(11):559–573.
- [4] Mona S, Malyan SK, Saini N, Deepak B, Pugazhendhi A, Kumar SS. Towards sustainable agriculture with carbon sequestration and greenhouse gas mitigation using algal biochar. *Chemosphere*. 2021;275:129856. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.129856.
- [5] Park JH, Kim YU, Jeon J, Yun BY, Kang Y, Kim S. Analysis of biochar–mortar composite as a humidity control material to improve the building energy and hygrothermal performance. *Science of the Total Environment*. 2021;775: 145552. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.145552.
- [6] Gupta S, Kua HW, Pang SD. Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*. 2020; 234:117338. DOI:10.1016/j.conbuildmat. 2019. 117338.
- [7] Tan K, Qin Y, Wang J. Evaluation of the properties and carbon sequestration potential of biochar-modified pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2022;314:125648. DOI:10. 1016/j.conbuildmat.2021.125648.
- [8] Nahhab AH, Ketab AK. Influence of content and maximum size of light expanded clay aggregate on fresh, strength, and durability properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with micro steel fibers. *Construction and Building Materials*. 2020;233:117922. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2019.117922.
- [9] Real S, Gomes MG, Moret Rodrigues A, Bogas JA. Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings. *Construction and Building Materials*. 2016;121:460–470.
- [10] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มอก. 2594-2556*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม; 2556.
- [11] British Standards Institution. *BS 1881-116:1983 Method for determination of compressive*

- strength of concrete cubes*. London: British Standards Institution; 1983.
- [12] ASTM International. *ASTM D5334-22 Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure*. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2022.
- [13] Haris Javed M, Ali Sikandar M, Ahmad W, Tariq Bashir M, Alrowais R, Bilal Wadud M. Effect of various biochar on physical, mechanical, and microstructural characteristics of cement pastes and mortars. *Journal of Building Engineering*. 2022;57:104850. DOI:10.1016/j.jobe.2022.104850.
- [14] Asadi Zeidabadi Z, Bakhtiari S, Abbaslou H, Ghanizadeh AR. Synthesis, characterization and evaluation of biochar from agricultural waste biomass for use in building materials. *Construction and Building Materials*. 2018;181:301–308.
- [15] Ahmadi SF, Reisi M, Sajadi SM. Comparing properties of foamed concrete and lightweight expanded clay aggregate concrete at the same densities. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;19:e02539. DOI:10.1016/j.cscm.2023.e02539.
- [16] Xiong T, Ok YS, Dissanayake PD, Tsang DC, Kim S, Kua HW, et al. Preparation and thermal conductivity enhancement of a paraffin wax-based composite phase change material doped with garlic stem biochar microparticles. *Science of the Total Environment*. 2022;827:154341. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.154341.
- [17] Jiang D, Qin J, Zhou X, Li Q, Yi D, Wang B. Improvement of thermal insulation and compressive performance of Al₂O₃-SiO₂ aerogel by doping carbon nanotubes. *Ceramics International*. 2022;48(11):16290–16299.
- [18] Singh S, Shekaran KR, Agarwal R, Kalpana VG, Athar H, Kumar R, et al. Enhancing the strength and durability of mixed biochar-blended mortars after accelerated carbonation curing. *Journal of Building Engineering*. 2025;100:111743. DOI:10.1016/j.jobe.2024.111743.
- [19] Demirboğa R, Gül R. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(5):723–727.
- [20] Abdullah AH, Mohammed SD. Effect of lightweight expanded clay aggregate as partial replacement of coarse aggregate on the mechanical properties of fire-exposed concrete. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023;32:20220299. DOI:10.1515/jmbm-2022-0299.