

ผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดต่อคุณสมบัติเชิงกลและการนำความร้อนของมอร์ตาร์

Effect of Using Bottom Ash as Fine Aggregate on Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Mortar

อัญชนา กิจจานนท์¹ ลีน่า ปรัก¹ ทวีชัย สำราญวานิช^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131
Aunchana Kijjanon¹ Lyna Prak¹ Taweechai Sumranwanich^{2*}

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

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Muang,
Chonburi 20131

*Corresponding author Email: twc@buu.ac.th

(Received: July 8, 2025; Revised: November 6, 2025 ; Accepted: August 11, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดต่อกำลังอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก ความพรุน ความหนาแน่น การนำความร้อนของมอร์ตาร์ และอุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างมอร์ตาร์ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริง การศึกษาใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุประสานหลัก และใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกบางส่วนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 0 10 และ 30 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียดตามลำดับ ส่วนผสมมอร์ตาร์ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 เท่ากัน

จากผลการศึกษาพบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนร้อยละ 10 (FA30BA10) มีกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกสูงสุด เนื่องจากคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำของเถ้าก้นเตาและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยช่วยเพิ่มความหนาแน่นและลดความพรุนของมอร์ตาร์ ส่งผลให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกเพิ่มขึ้น ขณะที่มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยร้อยละ 30 และเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 (FA30BA30) มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด เนื่องจากการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณสูงทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความพรุนส่งผลให้ความร้อนถูกถ่ายเทผ่านวัสดุได้ยาก จึงทำให้มอร์ตาร์มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด นอกจากนี้ อุณหภูมิภายในชิ้นส่วนโครงสร้างมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 มีอุณหภูมิต่ำที่สุด โดยช่วงความร้อนสูงสุดมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผ่นผนังควบคุมร้อยละ 1.91 – 6.63

คำสำคัญ: มอร์ตาร์ เถ้าก้นเตา เถ้าลอย กำลังอัด ความพรุน ความหนาแน่น การนำความร้อน

ABSTRACT

This research aims to study the effect of using bottom ash as a fine aggregate on the compressive strength, split tensile strength, porosity, density, thermal conductivity of mortar, and internal temperature of mortar-based structural members exposed to the real environment. Hydraulic cement was used as the principal binder, with fly ash replacing a portion of the hydraulic cement at 30% by weight of the total binder. Bottom ash was used to replace fine aggregates at 0, 10, and 30% by weight of fine aggregate, respectively. All mortar mixtures had a constant water-to-binder ratio of 0.40.

From the study results, it was found that the mortar with 30% fly ash and 10% partial fine aggregate replacement with bottom ash (FA30BA10) had the highest compressive and split tensile strength. This was due to the water retention property of bottom ash and the pozzolanic reaction of fly ash, which increased the density and decreased the porosity of the mortar, resulting in increased compressive and split tensile strength. The mortar using 30% fly ash and 30% bottom ash (FA30BA30) had the lowest thermal conductivity. The high amount of bottom ash increased the porosity of the mortar. This made it difficult for heat to transfer through the material, resulting in the lowest thermal conductivity. Furthermore, structural member formed using mortar containing 30% fly ash had the lowest internal temperature. The maximum temperature range for the structural member formed with mortar containing 30% fly ash was 1.91% - 6.63%, which was lower than that of the structural member formed using control mortar.

Keyword: Mortar, bottom ash, fly ash, compressive strength, porosity, density, thermal conductivity.

1. บทนำ

เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินแล้วลอยปนไปกับควัน เนื่องจากมีน้ำหนักเบาจึงถูกพัดพาไปตามกระแสอากาศและถูกดักจับด้วยเครื่องกรองก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ เรียกว่า เถ้าลอย (Fly ash) ขณะที่เถ้าก้นเตา (Bottom ash) เป็นส่วนที่หนักกว่าเถ้าลอย และตกตะกอนอยู่ก้นเตาเผา มีขนาดใหญ่กว่าเถ้าลอยมาก [1] ในประเทศไทย เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานหลักที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต เนื่องจากเถ้าลอยช่วยลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสด [2] ช่วยปรับปรุงกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุปลายและช่วย

เพิ่มความคงทนแก่คอนกรีต [3] ส่วนเถ้าก้นเตามีอนุภาคที่พรุน รูปร่างไม่สม่ำเสมอ และหยาบกว่าเถ้าลอย แต่องค์ประกอบทางเคมีไม่ได้แตกต่างจากเถ้าลอย ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้เถ้าก้นเตาในงานคอนกรีตโดยนำไปแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน เนื่องจากขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด [4]

ประเทศไทยตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร จัดว่าเป็นพื้นที่เขตร้อน และปัจจุบันมีอุณหภูมิความร้อนที่สูงขึ้นเนื่องจากปัญหาสภาวะโลกร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นและมีผลกระทบต่อสภาพความเป็นอยู่ของมนุษย์และสรรพสัตว์ อาคารบ้านเรือนต่าง ๆ ได้รับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ทำให้โครงสร้างของอาคารต่าง ๆ สะสมความร้อนเพิ่มมากขึ้นและถูกแพร่ไปยังส่วนต่าง ๆ ภายในอาคาร เนื่องด้วยสภาพอากาศร้อนทำให้ต้องใช้

พลังงานจำนวนมากในการรักษาอุณหภูมิภายในอาคาร ดังนั้นจึงมีการแนะนำให้ใช้คอนกรีตที่มีค่าการนำความร้อนต่ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ยอมรับได้ภายในอาคารโดยทั่วไปแล้ว ความร้อนจะถูกถ่ายเทเข้ามาในอาคารได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวัสดุและระบบผนัง เช่น ผนังอิฐมวลฉนวนจะสะสมความร้อนช่วงกลางวันและถ่ายเทเข้ามาในอาคารช่วงหัวค่ำจนถึงกลางคืน เมื่อทราบสาเหตุที่ทำให้อาคารร้อน แนวทางปรับปรุงแก้ไขที่เป็นไปได้คือการสร้างผนังกันความร้อนให้อาคารเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานจากการศึกษาพบว่าการใช้ฉนวนกันความร้อนในคอนกรีตมีส่วนช่วยให้ลดการนำความร้อนของคอนกรีตได้ [5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาสมบัติด้านกำลังสมบัติด้านกายภาพ สมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์รวมทั้งการนำความร้อนของมอร์ตาร์ โดยการใช้ฉนวนกันความร้อนที่มีมวลรวมละเอียดและใช้ฉนวนแทนที่วัสดุประสานเพื่อหาส่วนผสมมอร์ตาร์ที่มีสมบัติด้านกำลังที่ดีและมีการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับอาคารประหยัดพลังงานต่อไป

2. วิธีการศึกษา

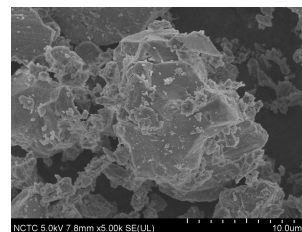
2.1 วัสดุประสาน

ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภท GU (General use) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 [6] ใช้เถ้าลอยใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [7] และอาจเทียบชั้นคุณภาพ 2 ชนิด ข ตามมาตรฐาน มอก. 2135-2545 [8] โดยพิจารณาจากปริมาณของ CaO องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและเถ้าลอยแสดงไว้ในตารางที่ 1 และลักษณะสัณฐานของอนุภาคของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 1

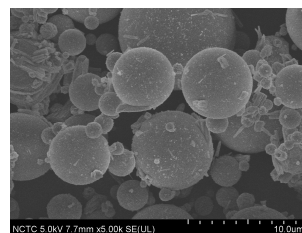
2.2 มวลรวมละเอียด

ใช้ทรายบดที่มีขนาดโตสุดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร เป็นมวลรวมละเอียด (S) และใช้เถ้ากันเตา (BA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบปนละเอียดสีเทา (รูปที่ 2) แทนที่ทรายบางส่วนโดยน้ำหนัก เถ้ากันเตาถูกเตรียมให้อยู่ในสภาพความชื้นเปียก

(Wet) ก่อนการนำไปใช้ผสมส่วนผสมมอร์ตาร์ สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพและขนาดละเอียดของทรายและเถ้ากันเตา แสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายและเถ้ากันเตาเท่ากับ 2.46 และ 2.57 ตามลำดับ



(ก)



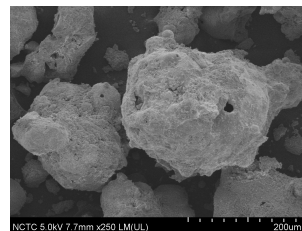
(ข)

รูปที่ 1 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคของ: (ก) GU และ

(ข) FA (x5,000)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 เถ้ากันเตา: (ก) ลักษณะอนุภาค และ

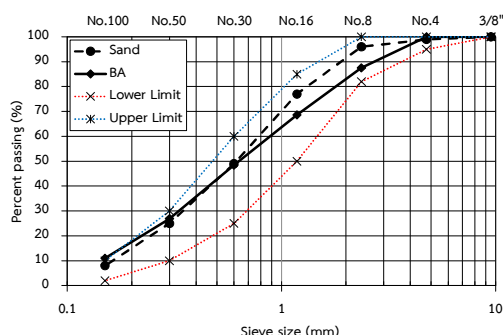
(ข) ลักษณะสัณฐานของอนุภาคเถ้ากันเตา (x250)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (GU)	เถ้าลอย (FA)
SiO ₂	13.63	28.42
Al ₂ O ₃	2.67	13.03
Fe ₂ O ₃	3.31	14.88
CaO	66.20	27.11
MgO	1.12	1.90
SO ₃	1.90	6.11
Na ₂ O	0.31	1.50
K ₂ O	0.35	2.53
LOI	6.78	3.18
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.56
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตาราง เมตรต่อกิโลกรัม)	254.3	315.7

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของทรายและ
เถ้าแกว

คุณสมบัติทางกายภาพ	ทราย S)	เถ้าแกว (BA)
ความถ่วงจำเพาะ	2.60	1.78
การดูดซึมน้ำหรือการกักเก็บน้ำ (ร้อยละ)	0.32	26.32



รูปที่ 3 ขนาดคละของทรายและเถ้าแกว

2.3 ส่วนผสมคอนกรีต

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ออกแบบโดยควบคุมอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนที่ร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้เถ้าแกวแทนที่ทรายบางส่วนที่ร้อยละ

0-10 และ 30 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 3 การออกแบบส่วนผสมอ้างอิงจากงานวิจัยของศิริระ อาทมาท และทวีชัย สำราญวานิช [9] ซึ่งพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกวร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์สูงสุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เถ้าแกวร้อยละ 0, 10 และ 30 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

Mix id.	ส่วนผสมคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)				
	GU	FA	S (SSD)	BA (Wet)	Water
NC	563.0	-	1543.3	-	225.2
FA30	389.4	166.9	1529.6	-	222.5
NCBA10	548.0	-	1356.2	150.7	219.2
FA30BA10	379.1	162.5	1340.3	148.9	216.6
FA30BA30	360.1	154.3	990.2	424.2	205.8

หมายเหตุ NC คือ มอร์ตาร์ควบคุม, NCBA10 คือ มอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าแกวร้อยละ 10, FAxx คือ มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ xx, FAxxBAyy คือ มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ xx และแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าแกวร้อยละ yy

2.4 การทดสอบ

2.4.1 การทดสอบกำลังอัด

หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร³ บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7, 28 และ 365 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-21 [10]

2.4.2 การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก

หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 และ 56 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C496/C496M-17 [11]

2.4.3 การทดสอบความพรุนและความหนาแน่น
หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร³ บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 และ 365 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบความพรุนและความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM C642-97 [12]

2.4.4 การทดสอบการนำความร้อน

หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 365 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบการนำความร้อนของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM D

334 [13] ด้วยเครื่อง Transient Line Source (TLS-100) ค่าการนำความร้อนอยู่ในหน่วยของ W/mK

2.4.5 การวัดอุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างมอร์ตาร์ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริง

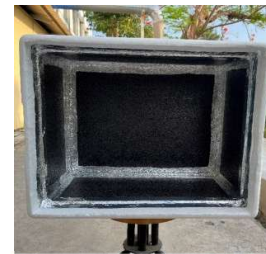
การวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตขนาดจริงดำเนินการหล่อผนังมอร์ตาร์เสริมเหล็กขนาด 55x40 ตารางเซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร ใช้เหล็ก RB6 เป็นเหล็กเสริมหลักด้านสั้น จำนวน 3 แท่ง และเหล็กเสริมด้านยาว จำนวน 3 แท่ง ดังรูปที่ 4(ก)



(ก) การเตรียมแผ่นผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก



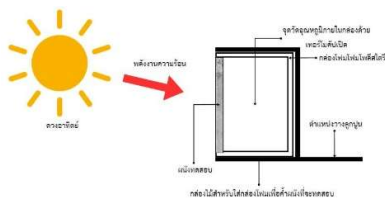
(ข) การเตรียมกล่องไม้และกล่องโฟมสำหรับใส่แผ่นผนัง



(ค) การติดแผ่นฉนวนกันความร้อนภายในกล่องโฟม



(ง) การประกอบแผ่นผนังเข้ากับกล่องโฟม



(จ) รายละเอียดการวัดอุณหภูมิภายในกล่อง

รูปที่ 4 ขั้นตอนการวัดอุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริง

หลังจากหล่อแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กนำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นเตรียมกล่องไม้ (กว้าง 47

เซนติเมตร ยาว 61 เซนติเมตร หนา 32 เซนติเมตร) และกล่องโฟม (ขนาดกล่องภายใน กว้าง 43 เซนติเมตร ยาว

55.3 เซนติเมตร หนา 26.2 เซนติเมตร และ ขนาดกล่อง ภายนอก กว้าง 45 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร หนา 31.5 เซนติเมตร) สำหรับใส่แผ่นผนังดังรูปที่ 4(ข) ทำการ ติดแผ่นฉนวนกันความร้อนภายในกล่องโฟมเพื่อให้ ความร้อนเข้าสู่ภายในกล่องจากการถ่ายเทผ่านผนังคอนกรีต เสริมเหล็กเพียงทิศทางเดียว ดังรูปที่ 4(ค) หลังจากครบ ระยะเวลาบ่มน้ำ นำแผ่นผนังประกอบเข้ากับกล่องโฟม หลังจากนั้นใช้ซิลิโคนอุดร่องระหว่างผนังกับโฟม จากนั้นใช้ แลคซันยึดติดระหว่างผนังทดสอบและกล่องโฟม ดังรูปที่ 4(ง) จากนั้นติดตั้งสายวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลไว้ใน กล่องทดสอบพร้อมกับประกอบสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับ เครื่อง Data logger multicon รูปที่ 4(จ) จากนั้นวัด อุณหภูมิภายในกล่องพร้อมบันทึกผล

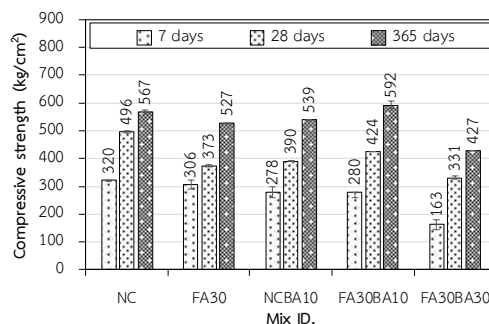
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 กำลังอัด

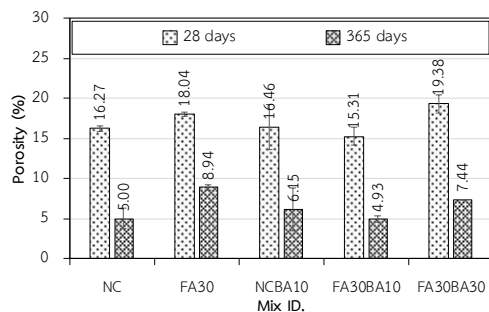
กำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงดังรูปที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบ กำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม (NC) และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้า ลอยร้อยละ 30 (FA30) พบว่า NC มีกำลังอัดสูงกว่า FA30 ทุกระยะเวลาบ่มน้ำ เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณ ปูนซีเมนต์ในระบบลดลง ส่งผลให้เกิดผลผลิตจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ช้าลง เช่น CSH และ CAH ลดลงไปด้วย ดังนั้นกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอย ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม [14]

เมื่อพิจารณาการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายร้อยละ 10 ในมอร์ตาร์ที่ใช้และไม่ใช้เถ้าลอย พบว่า NCBA10 มีกำลัง อัดต่ำกว่า NC ทุกระยะเวลาบ่มน้ำ ขณะที่ FA30BA10 มี กำลังอัดต่ำกว่า FA30 ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน เมื่อ ระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น กำลังอัดของ FA30BA10 มีค่าสูง กว่า FA30 เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนและมีโพรง ภายในซึ่งมีคุณสมบัติการกักเก็บน้ำได้ดีทำให้เกิดการบ่ม ภายใน และเมื่อมีเถ้าลอยแทรกตัวอยู่ในโพรงของเถ้าก้น เต่า เถ้าลอยส่วนนี้อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ กับน้ำทำให้ช่วยเพิ่มการยึดประสานในมอร์ตาร์ ส่งผลให้ มอร์ตาร์มีความแข็งแรง (รูปที่ 6) ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์

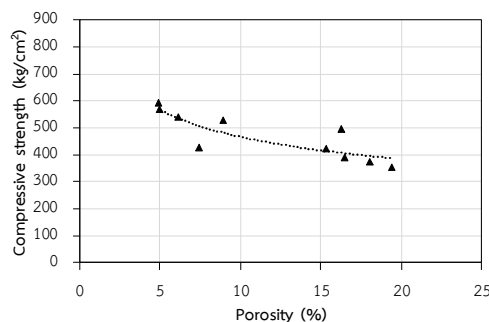
สูงขึ้นในระยะยาว และเมื่อมีการผสมเถ้าก้นเตา เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็น 30 พบว่า FA30BA30 มีกำลัง อัดต่ำกว่า FA30 และ FA30BA10 เนื่องจากการมีปริมาณ ของเถ้าก้นเตามากเกินไป ส่งผลให้มอร์ตาร์มีช่องว่าง ภายในสูงขึ้น ความสามารถในการรับกำลังของมอร์ตาร์จึง ลดลง โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อความพรุน เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 7



รูปที่ 5 กำลังอัดของมอร์ตาร์



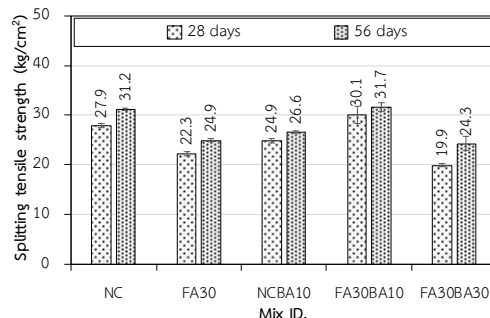
รูปที่ 6 ความพรุนของมอร์ตาร์



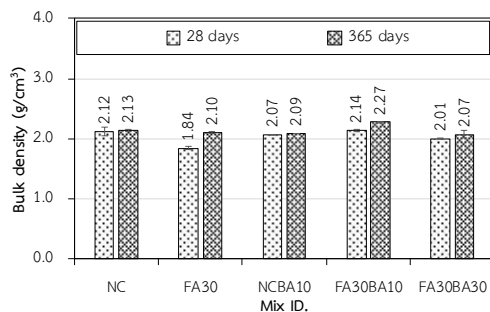
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของ มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 และ 365 วัน

3.2 กำลังดึงแบบผ่าซีก

รูปที่ 8 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาร้อยละ 10 พบว่าเมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตา (NCBA10) ทำให้มีค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำกว่ามวลรตารควบคุม (NC) ที่อายุ 28 และ 56 วัน เนื่องจากเถ้ากันเตามีความพรุนสูง (รูปที่ 6) ทำให้มอร์ตาร์มีโพรงมากขึ้น ความหนาแน่นลดลง (รูปที่ 9) และเมื่อระยะเวลาในการบ่มน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 และใช้เถ้ากันเตาร้อยละ 0 10 และ 30 พบว่า FA30BA10 ให้ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีกดีที่สุด รองลงมาเป็น FA30 และ FA30BA30 ตามลำดับ เนื่องจากมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 และเถ้ากันเตาร้อยละ 10 มีความพรุนต่ำที่สุด (รูปที่ 6) ซึ่งส่งผลให้มีความหนาแน่นสูงที่สุด (รูปที่ 9) ด้วยเหตุนี้ FA30BA10 จึงมีกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกสูงที่สุด



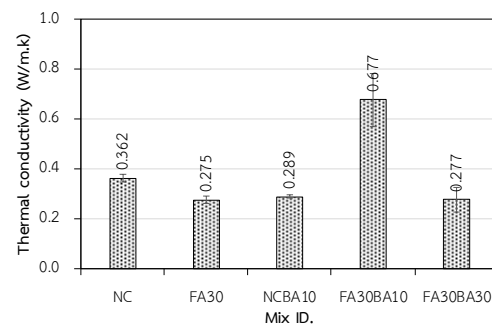
รูปที่ 8 กำลังดึงแบบผ่าซีกของมอร์ตาร์



รูปที่ 9 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์

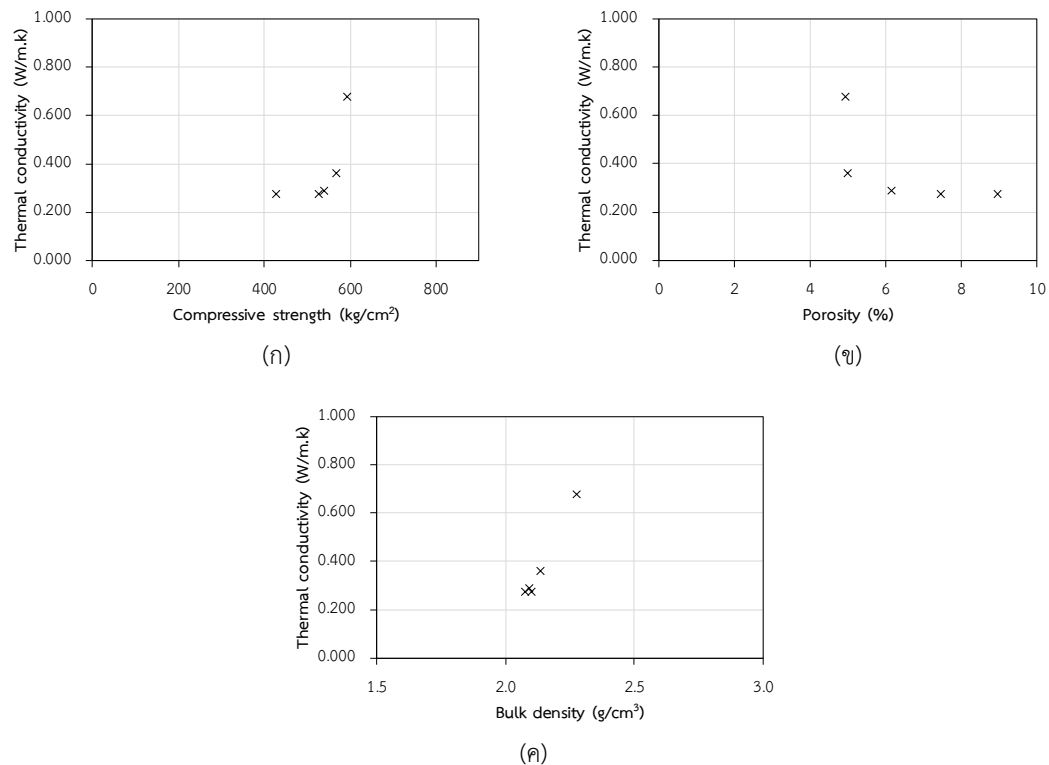
3.3 การนำความร้อน

รูปที่ 10 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาร้อยละ 10 จากรูปพบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้ากันเตาร้อยละ 10 (NCBA10) ทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่ามวลรตารควบคุม (NC) ที่อายุ 365 วัน ซึ่งสอดคล้องกับกำลังอัด ความพรุน และความหนาแน่น กล่าวคือ เมื่อกำลังอัดลดลง การนำความร้อนก็จะลดลง (รูปที่ 11ก) ขณะที่ความพรุนในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น การนำความร้อนมีค่าลดลง (รูปที่ 11ข) เนื่องจากอากาศในรูพรุนเป็นฉนวนกันความร้อน [15] การนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อมอร์ตาร์มีความหนาแน่นลดลง (รูปที่ 11ค)



รูปที่ 10 การนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ 365 วัน

เมื่อพิจารณาการใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้ากันเตาร้อยละ 0 10 และ 30 พบว่า FA30BA10 มีการนำความร้อนสูงที่สุด รองลงมาเป็น FA30 และ FA30BA30 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของการนำความร้อนของ FA30BA10 สอดคล้องความพรุนและความหนาแน่นของมอร์ตาร์ กล่าวคือ ความร้อนจะถูกถ่ายเทอย่างรวดเร็วในวัสดุที่มีความพรุนต่ำและความหนาแน่นสูง [5] ขณะเดียวกัน FA30BA30 มีการใช้ปริมาณของเถ้ากันเตาสูง ส่งผลให้มีความพรุนสูง และมีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้เกิดการนำความร้อนต่ำลงไปด้วย ดังรูปที่ 11(ข) และ 11(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง: (ก) กำลังอัดและการนำความร้อน, (ข) ความพรุนและการนำความร้อน และ (ค) ความหนาแน่นและการนำความร้อน

3.4 อุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างมอร์ตาร์ที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริง

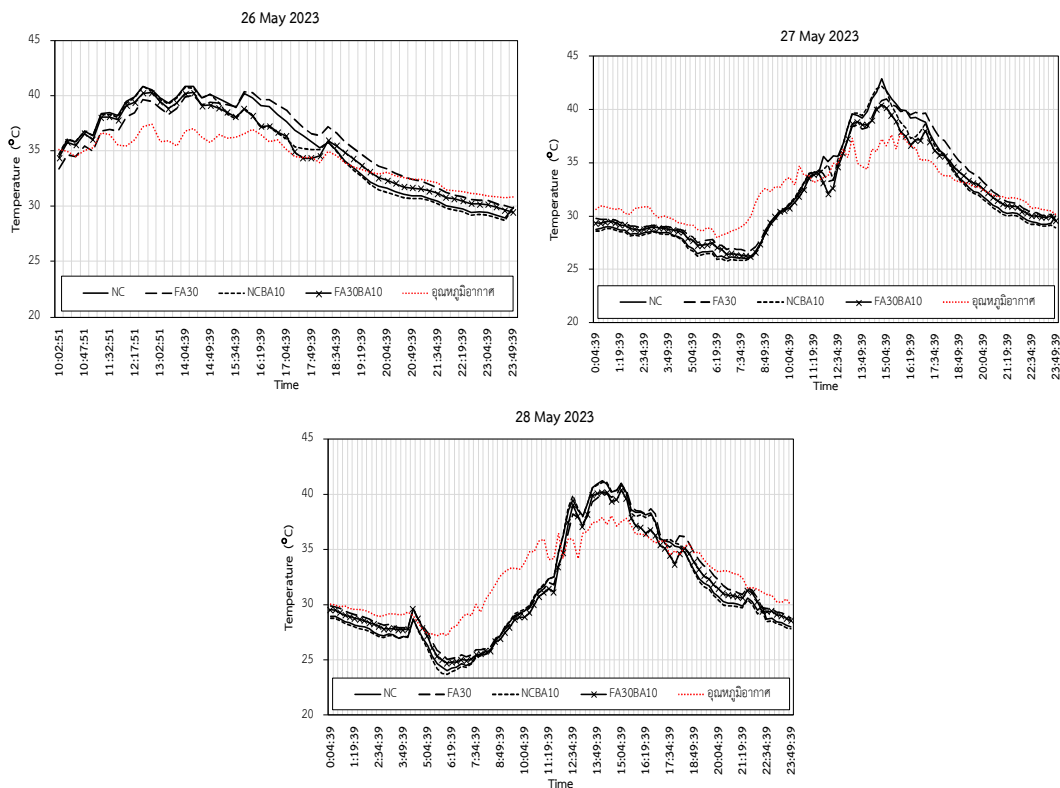
จากผลการทดสอบให้ห้องปฏิบัติการสามารถสรุปได้ว่าส่วนผสม NC, FA30, NCBA10 และ FA30BA10 มีความเหมาะสมในการนำมาใช้หล่อเป็นแผ่นพื้นผนังเนื่องจากกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน มีค่ามากกว่าร้อยละ 65 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน รูปที่ 12 แสดงอุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริงระหว่างวันที่ 26-28 พฤษภาคม 2566 พบว่า ในช่วงเวลาประมาณ 10.00 น. ถึง 18.00 น. ผนังทุกชนิดได้รับความร้อนและมีการสะสมความร้อนในเนื้อวัสดุ จึงทำให้อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ มีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกกล่อง ในช่วงเวลาตั้งแต่ 20.00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิอากาศมีการเย็นตัวลง ทำให้ผนังทุกชนิดเกิดการคายความร้อนที่สะสมอยู่ ทำให้อุณหภูมิภายในกล่องลดลง

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในกล่องตัวอย่างแผ่นผนังในสามช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเริ่มสะสมความร้อน (10.00–12.00 น.) ช่วงอุณหภูมิสูงสุด (13.00–16.00 น.) และช่วงคายความร้อน (ตั้งแต่เวลา 20.00 น. เป็นต้นไป) ดังตารางที่ 4 พบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวรวมกับการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตา (NCBA10) มีอุณหภูมิภายในกล่องต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (NC) ในทุกช่วงเวลา โดยมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 0.63–2.67 ในช่วงเริ่มสะสมความร้อน ร้อยละ 1.53–6.22 ในช่วงอุณหภูมิสูงสุด และร้อยละ 1.03–1.51 ในช่วงคายความร้อน เนื่องจากเถ้าก้นเตามีโครงสร้างเป็นรูพรุนและค่าการนำความร้อนต่ำกว่าทรายธรรมชาติ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวภายนอกเข้าสู่ภายในกล่องเกิดขึ้นช้าลง อีกทั้งการแทนที่ทรายด้วยเถ้าก้นเตายังช่วยลดความหนาแน่นรวมของมอร์ตาร์ ทำให้ความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุลดลง ขณะที่มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่

ปูนซีเมนต์บางส่วน (FA30) มีอุณหภูมิภายในกล่องต่ำกว่า NC อย่างชัดเจน โดยลดลงร้อยละ 0.94–3.80 ในช่วงเริ่มสะสมความร้อน ร้อยละ 1.91–6.63 ในช่วงอุณหภูมิสูงสุด และร้อยละ 1.21–1.97 ในช่วงคายความร้อน สำหรับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับเถ้าก้นเตา (FA30BA10) แม้จะมีอุณหภูมิภายในกล่องต่ำกว่า NC เช่นกัน แต่กลับสูงกว่า FA30 เล็กน้อย อันเป็นผลจากการใช้วัสดุทดแทนสองชนิดร่วมกันที่ทำให้ค่าการนำความร้อนและความหนาแน่น

เปลี่ยนไป ส่งผลให้อุณหภูมิภายในไม่ต่ำเท่า FA30 เพียงอย่างเดียว

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตามีค่าการนำความร้อนต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมอย่างต่อเนื่องในทุกช่วงเวลา ดังนั้น จากผลการทดสอบที่พบว่า มอร์ตาร์ซึ่งใช้เถ้าก้นเตามีค่าการนำความร้อนต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม จึงสามารถสรุปได้ว่าเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาอาคารประหยัดพลังงาน



รูปที่ 12 อุณหภูมิภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างที่เผชิญสิ่งแวดล้อมจริงระหว่างวันที่ 26-28 พฤษภาคม 2566

ตารางที่ 4 ค่าอุณหภูมิภายในกล่องตัวอย่างแผ่นผนัง ตั้งแต่วันที่ 26 - 28 พฤษภาคม 2566

วันที่ทดสอบ	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	NC	FA30	NC BA10	FA30 BA10
26 พฤษภาคม 2566	เริ่มสะสมความร้อน (°C)	36.82	35.42	35.76	36.52
	ความร้อนสูงสุด (°C)	42.87	40.03	40.20	40.23
	คายความร้อน (°C)	31.60	31.22	31.27	31.48
	ผลต่างการเปลี่ยนแปลงความร้อนเมื่อเทียบกับ NC (ร้อยละ)				
	เริ่มสะสมความร้อน	0.00	3.80	2.87	0.81
	ความร้อนสูงสุด	0.00	6.63	6.22	6.16
	คายความร้อน	0.00	1.21	1.03	0.37
27 พฤษภาคม 2566	เริ่มสะสมความร้อน (°C)	33.22	32.91	33.01	33.14
	ความร้อนสูงสุด (°C)	41.44	39.48	40.10	40.21
	คายความร้อน (°C)	31.83	31.20	31.38	31.46
	ผลต่างการเปลี่ยนแปลงความร้อนเมื่อเทียบกับ NC (ร้อยละ)				
	เริ่มสะสมความร้อน	0.00	0.94	0.63	0.24
	ความร้อนสูงสุด	0.00	4.73	3.23	2.98
	คายความร้อน	0.00	1.97	1.40	1.15
28 พฤษภาคม 2566	เริ่มสะสมความร้อน (°C)	32.08	31.55	31.65	31.78
	ความร้อนสูงสุด (°C)	40.63	39.85	40.01	40.18
	คายความร้อน (°C)	30.92	30.35	30.45	30.75
	ผลต่างการเปลี่ยนแปลงความร้อนเมื่อเทียบกับ NC (ร้อยละ)				
	เริ่มสะสมความร้อน	0.00	1.64	1.34	0.92
	ความร้อนสูงสุด	0.00	1.91	1.53	1.11
	คายความร้อน	0.00	1.84	1.51	0.53

4. สรุปผล

จากการศึกษาการนำความร้อนและความคงทนของมอเตอร์ที่แทนที่ทรายด้วยถั่วกันเตา สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) มอเตอร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยถั่วกันเตาร้อยละ 10 และแทนที่วัสดุประสานด้วยถั่วลอยร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดและกำลังดึงแบบผ่าซิกสูงที่สุด

เนื่องจากถั่วกันเตามีความพรุนและมีโพรงภายในซึ่งมีคุณสมบัติการกักเก็บน้ำได้ดี จึงทำให้เกิดการบ่มภายใน และเมื่อมีถั่วลอยแทรกตัวอยู่ในโพรงของถั่วกันเตา ถั่วลอยส่วนนี้อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิด CSH ที่ช่วยเพิ่มการยึดประสานในมอเตอร์ ส่งผลให้มอเตอร์มีความทึบน้ำเพิ่มขึ้น

2) มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 มีการนำความร้อนสูงสุด โดยการเพิ่มขึ้นของการนำความร้อนเกิดจากเนื้อมอร์ตาร์มีความพรุนต่ำและมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้ความร้อนสามารถถ่ายเทผ่านเนื้อมอร์ตาร์ได้ง่าย

3) มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 และแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด เนื่องจากการนำเถ้าก้นเตามาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณสูง ทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนสูงขึ้น อนุภาคของเถ้าก้นเตาที่มีช่องว่างภายในจำนวนมาก ส่งผลให้ความร้อนถูกถ่ายเทผ่านวัสดุได้ยากขึ้น จึงทำให้มอร์ตาร์มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด

4) อุณหภูมิภายในกล่องตัวอย่างแผ่นผนังมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 เพียงอย่างเดียว มีอุณหภูมิต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างแผ่นผนังควบคุมและแผ่นผนังตัวอย่างอื่น ๆ โดยช่วงความร้อนสูงสุดมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผ่นผนังควบคุมร้อยละ 1.91 – 6.63

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา “งบประมาณเงินอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ปีงบประมาณ พ.ศ.2566” เลขที่สัญญา ววน 9.1/2566 และขอขอบคุณศูนย์ความยั่งยืนวิศวกรรมระบบเมืองและการขนส่ง (SUSET) และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนการศึกษานี้ สุดท้ายขอขอบคุณนายธนกร เอี่ยมจำรัส และนางสาวรณิดา นิยมดี บัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ร่วมเป็นส่วนหนึ่งในการดำเนินงานในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Argiz, A. Moragues, and E. Menéndez, “Use of ground coal bottom ash as cement constituent in concretes exposed to chloride environments”, *J. Clean. Prod.*, vol. 170, pp. 25-33, Jan. 2018.
- [2] F. Moghaddam, V. Sirivivatnanon, and K. Vessalas, “The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes”, *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 10, art. no. e00218, Jun. 2019.
- [3] M. Uysal and V. Akyuncu, “Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 170–178, Sep. 2012.
- [4] R. Kasemchaisiri and S. Tangtermsirikul, “Properties of self-compacting concrete in incorporating bottom ash as a partial replacement of fine aggregate”, *ScienceAsia*, vol. 34, pp. 087-095, 2008.
- [5] I. H. Yang and J. Park, “A study on the thermal properties of high-strength concrete containing CBA fine aggregate”, *Materials*, vol. 13, art. no. 149, 2020.
- [6] *Hydraulic Cement*, Thai Industrial Standard TIS 2594-2556, 2013.
- [7] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618-19, 2019.
- [8] *Coal Fly Ash for Use as an Admixture in Concrete*, Thai Industrial Standard TIS 2135-2545, 2002.

- [9] S. Artmat and T. Sumranwanich, "Compressive strength and chloride penetration resistance of concrete containing fly ash and limestone powder and partially replaced fine aggregate with bottom ash," *RMUTT Eng. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 113–125, 2019.
- [10] *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C496/C496M-17, 2017.
- [11] *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM C642-97, 1997.
- [12] *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*, ASTM D5334-22, 2022.
- [13] A. Harison, V. Srivastava, and A. Herbert, "Effect of fly ash on compressive strength of Portland pozzolona cement concrete", *J. Acad. Ind. Res.*, vol. 2, pp.476-479, 2014.
- [14] A. Ghosh, A. Ghosh and S. Neogi, "Reuse of fly ash and bottom ash in mortars with improved thermal conductivity performance for buildings", *Heliyon*. vol. 4, art. no. e00934, Nov. 2018.