กำลังอัดและการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

Compressive strength and thermal conductivity of mortar containing partial replacement of fine aggregate by bottom ash

ธัญญารัตน์ ดุษดี[1]

ด้านกำลังอัดและคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนด้านการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภท GU เป็นวัสดุประสานหลัก

2. วิธีการศึกษา

2. 2.1 วัสดุที่ใช้

ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภท GU ตามมาตรฐาน มอก.2594-2556 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 [8] ในการแทนที่วัสดุประสานบางส่วน ใช้เถ้าก้นเตาที่มีความสามารถเก็บกักน้ำร้อยละ 26.32 แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่ร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด โดยอ้างอิงตามงานวิจัย [6, 7] ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์และเถ้าลอย ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย มวลรวมละเอียด (ทราย) และเถ้าก้นเตา และตารางที่ 3 แสดงส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ โดยคิดต่อปริมาตรมอร์ตาร์หนึ่งลูกบาศก์เมตร

2.2 การทดสอบ

2.2.1 กำลังอัด

ทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ 5x5x5 เซนติเมตร^3 บ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 7, 28 และ 56 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [9]

2.2.2 การนำความร้อน

ทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ 10x10x10 เซนติเมตร^3 บ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 56 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาตัดให้มีความหนา 3 ซม. แล้วทดสอบการนำความร้อนด้วยเครื่อง Hot Disk TPS 2500 S

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	เถ้าลอย
SiO_2	13.63	28.42
Al_2O_3	2.67	13.03
Fe_2O_3	3.31	14.88
CaO	66.20	27.11
MgO	1.12	1.90
SO_3	1.90	6.11
Na_2O	0.31	1.50
K_2O	0.35	2.53
LOI	6.78	3.18

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	Absorption or water retainability (%)
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	3.14	-
เถ้าลอยแม่เมาะ	2.56	-
ทราย	2.60	0.32
เถ้าก้นเตา	1.78	26.32

ตารางที่ 3 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้

Mix id.	Mix proportion (kg/m^3)				
	Cement	Fly ash, FA	Sand (SSD)	Bottom ash, BA	Water
NC	563.0	-	1543.3	-	225.2
NCBA10	548.0	-	1356.2	150.7	219.2
FA30	275.9	166.9	1529.6	-	222.5
FA50	275.9	275.9	1517.5	-	220.7
FA30BA10	379.1	162.5	1340.3	148.9	216.6
FA30BA30	360.1	154.3	990.2	424.2	205.8
FA50BA10	268.7	268.7	1330.0	147.8	214.9
FA50BA30	255.3	255.3	982.9	421.3	204.2

หมายเหตุ: NC คือ มอร์ตาร์ควบคุม
NCBA10 คือ มอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 10
FAxx คือ มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ xx
FAxxBAyy คือ มอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ xx และแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ yy

2.2.3 ความพรุนและความหนาแน่น

ทำการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ 10x10x10 เซนติเมตร^3 บ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 28 และ 56 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบหาความพรุนและความหนาแน่นของมอร์ตาร์โดยวิธีการทดสอบสำหรับคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C642 [10]

3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 กำลังอัด

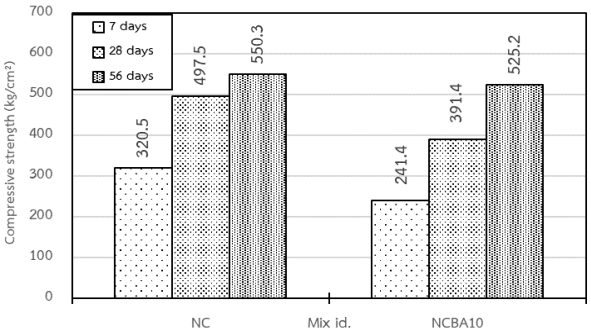
จากรูปที่ 1 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาพบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมในช่วงอายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน เนื่องจากความไม่แข็งแรงของอนุภาคเถ้าก้นเตาและปริมาณรูพรุนที่สูงขึ้นและมีโพรงภายใน [11]

จากรูปที่ 2 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยพบว่า เมื่อมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยมากขึ้นทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ก็จะทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง C-S-H และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็ลดลงเช่นกัน เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงก็อาจจะไม่เพียงพอที่เถ้าลอยจะนำไปเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกต่อไป จึงส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง

จากรูปที่ 3 แสดงผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 10 กำลังอัดของมอร์ตาร์น้อยมากในช่วง 7 วันเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มน้ำเพิ่มขึ้น กำลังอัดก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนและมีโพรงภายในซึ่งมีคุณสมบัติการกักเก็บน้ำได้ดีทำให้เกิดการบ่มภายในและเมื่อมีเถ้าลอยแทรกตัวอยู่ในโพรงของเถ้าก้นเตาซึ่งเถ้าลอยส่วนนี้อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้ช่วยเพิ่มการยึดประสานในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมี

ความทึบน้ำ ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ในระยะยาวสูงขึ้น [6] นอกจากนี้ เมื่อปริมาณเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงเนื่องจากมีเถ้าก้นเตามากเกิดไป ส่งผลให้มอร์ตาร์มีช่องว่างภายในมากเกินไป

จากรูปที่ 4 แสดงผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 พบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาในปริมาณร้อยละ 10 กำลังอัดของมอร์ตาร์น้อยมากในช่วง 7-28 วันเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอย แต่เมื่อระยะเวลาการบ่มน้ำเพิ่มขึ้น กำลังอัดของมอร์ตาร์ก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนและมีโพรงภายในซึ่งมีคุณสมบัติการกักเก็บน้ำได้ดี ทำให้เกิดการบ่มภายใน ช่วยเพิ่มการยึดประสานในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ในระยะยาวสูงขึ้น [6] นอกจากนี้ เมื่อมีการแทนที่เถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากมีเถ้าก้นเตามากเกิดไป ส่งผลให้มอร์ตาร์มีช่องว่างภายในมากเกินไป



รูปที่ 1 ผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาต่อกำลังอัด

รูปที่ 2 ผลกระทบของปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยต่อกำลังอัด

รูปที่ 3 ผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ต่อกำลังอัด

รูปที่ 4 ผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ต่อกำลังอัด

3.2 การนำความร้อน

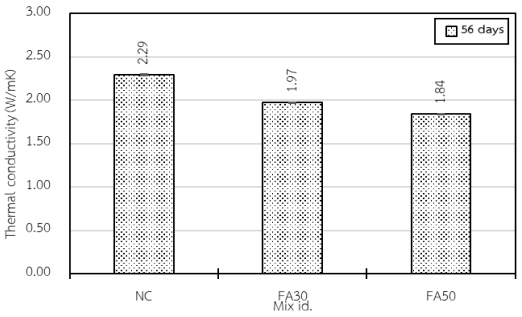
จากรูปที่ 5 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาพบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ทำให้ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งสอดคล้องกำลังอัดของมอร์ตาร์โดยเมื่อกำลังอัดลดลงเนื่องจากรูพรุนในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ทำให้การนำความร้อนลดลง เนื่องจากอากาศในรูพรุนเป็นฉนวน [12]

จากรูปที่ 6 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย พบว่า เมื่อมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยทำให้มีค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม อาจเกิดจากรูพรุนขนาดเล็กไม่ต่อเนื่องในมอร์ตาร์ทำให้การนำความร้อนต่ำลง แม้ว่าความพรุนมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมก็ตาม [12]

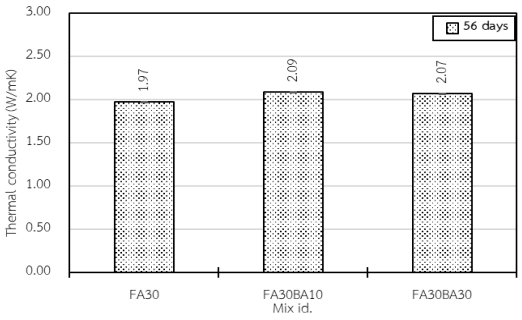
จากรูปที่ 7 แสดงผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่า เมื่อปริมาณแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาสูงขึ้นทำให้มอร์ตาร์มีการนำความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนในมอร์ตาร์ลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมเถ้าลอย ทำให้การนำความร้อนเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 8 แสดงผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 พบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาสูงขึ้นกลับทำให้มอร์ตาร์มีการนำความร้อนลดลง เนื่องจากความพรุนของเถ้าก้นเตาเมื่อแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยในปริมาณที่สูงแล้วทำให้ความพรุนของมอร์ตาร์สูงขึ้น การนำความร้อนจึงลดลง [13] โดยมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 และเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 มีการนำความร้อนต่ำที่สุด

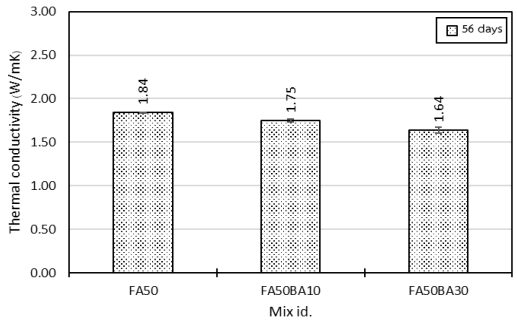
รูปที่ 5 ผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาต่อการนำความร้อน



รูปที่ 6 ผลกระทบของปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยต่อการนำความร้อน



รูปที่ 7 ผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ต่อการนำความร้อน



รูปที่ 8 ผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ต่อการนำความร้อน

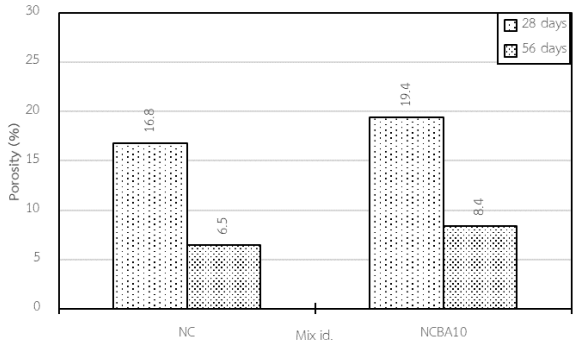
3.3 ความพรุน

จากรูปที่ 9 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาพบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตา ทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และความพรุนลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาก็มีกำลังอัดต่ำลงและมีกำลังอัดสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่มน้ำเช่นกัน

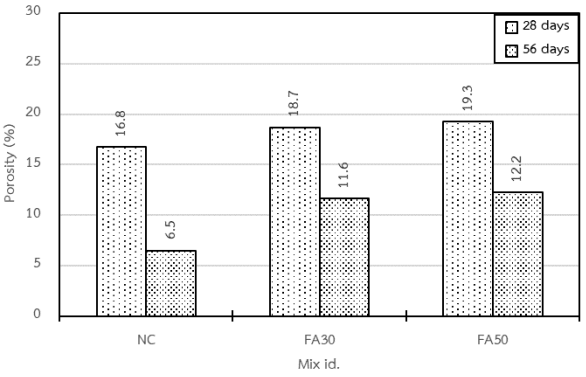
จากรูปที่ 10 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยพบว่า เมื่อมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนมากขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม

จากรูปที่ 11 แสดงผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ทำให้มีความพรุนต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเพียงอย่างเดียวและมอร์ตาร์ที่แทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 30 อาจเนื่องจากผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยและการบ่มภายในของเถ้าก้นเตาที่เหมาะสมทำให้ความพรุนของมอร์ตาร์น้อยลง

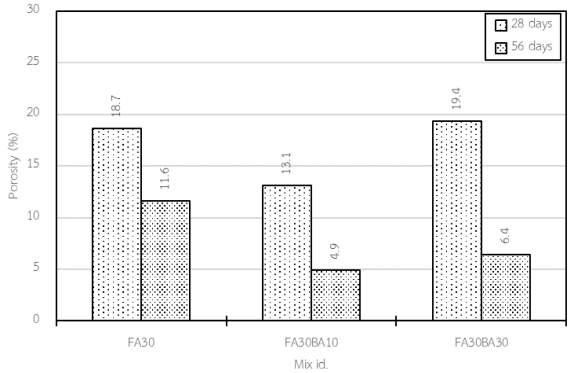
จากรูปที่ 12 แสดงผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 พบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตามากขึ้นทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่แทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 50 เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์มีปริมาณโพรงช่องว่างมากขึ้น



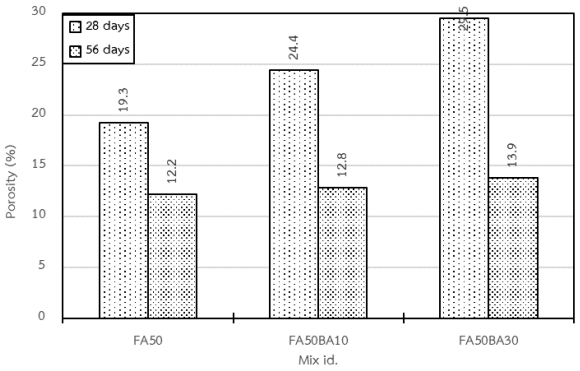
รูปที่ 9 ผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาต่อความพรุน



รูปที่ 10 ผลกระทบของปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยต่อความพรุน



รูปที่ 11 ผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ต่อความพรุน



รูปที่ 12 ผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ต่อความพรุน

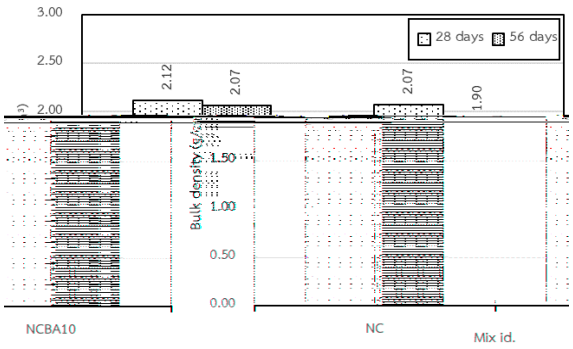
3.4 ความหนาแน่น

จากรูปที่ 13 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาพบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และเมื่อระยะเวลาการบ่มน้ำเพิ่มขึ้นความหนาแน่นลดลง

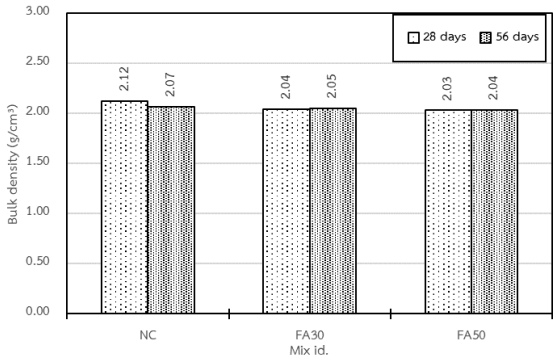
จากรูปที่ 14 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยพบว่า เมื่อมีการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอย แนวโน้มของความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเล็กน้อย

จากรูปที่ 15 แสดงผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 พบว่า เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 30 มีความหนาแน่นมากกว่ามอร์ตาร์ส่วนผสมอื่นเล็กน้อย

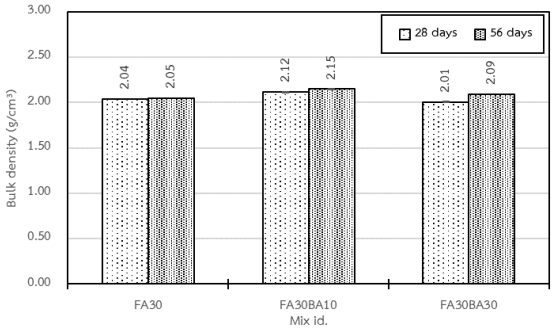
จากรูปที่ 16 แสดงผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 พบว่า ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน เมื่อมีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาทำให้มีความหนาแน่นมอร์ตาร์น้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 เพียงอย่างเดียว แต่ที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 56 วัน กลับมีความหนาแน่นของมอร์ตาร์มากกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 เพียงอย่างเดียว



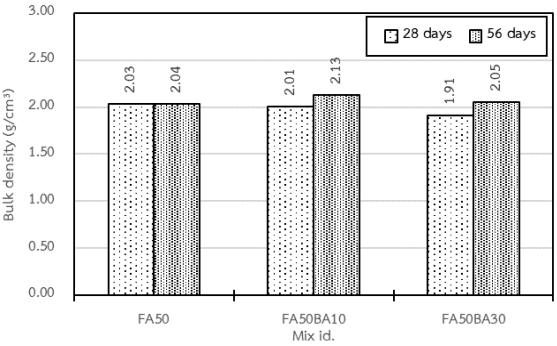
รูปที่ 13 ผลกระทบของปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาต่อความหนาแน่น



รูปที่ 14 ผลกระทบของปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยต่อความหนาแน่น



รูปที่ 15 ผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 ต่อความหนาแน่น



รูปที่ 16 ผลกระทบของปริมาณเถ้าก้นเตาของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ต่อความหนาแน่น

4. สรุปผล

จากผลการศึกษากำลังอัดและการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าก้นตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนและเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานบางส่วน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาและมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมซีเมนต์ไฮดรอลิกล้วน ทั้งนี้มอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีกำลังอัดมากที่สุด
2. มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาและมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยมีการนำความร้อนน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมซีเมนต์ไฮดรอลิกล้วน ทั้งนี้มอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตา

แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 และเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีการนำความร้อนน้อยที่สุด

3. มอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 30 มีความพรุนน้อยที่สุด ขณะที่มอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 และเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 มีความพรุนมากที่สุด
4. มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาและมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยมีความหนาแน่นน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมซีเมนต์ไฮดรอลิกล้วน
5. การประยุกต์ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายบางส่วนในส่วนผสมมอร์ตาร์สามารถช่วยลดการนำความร้อนของมอร์ตาร์ลงได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยบูรพา “ผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ.2565 งบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.)” เลขที่สัญญา ววน 27/2565 และขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและการจัดการจราจร (CONTRA) มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2562). รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2562. https://drive.google.com/file/ d/1I76wJc 0jQl CfOX-wtU8Gvh38VdOaeacd/view

[2] Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Si, B., Dong, X., Wang, T., Yao, Z. (2022). Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. Science of the Total Environment, 804, 149985.

[3] Sutcu, M., Erdogmus, E., Gencel, O., Gholampour, A., Atan, E., Ozbakkaloglu, T. (2019). Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production. Journal of Cleaner Production, 233, 753-764.

[4] Lawane, A., Minane, J.R., Vinai, R., Pantet, A. (2019). Mechanical and physical properties of stabilised compressed coal bottom ash blocks with inclusion of lateritic soils in Niger. Scientific African, 6, e00198.

[5] Kim, G.W., Khan, M.I., Kim, P.J., Gwon, H.S. (2020). Unexpectedly higher soil organic carbon accumulation in the evapotranspiration cover of a coal bottom ash mixed landfill. Journal of Environmental Management, 268, 110659.

[6] ศิระ อาทมาท และทวีชัย สำราญวานิช. (2562). กำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, 17(2), 113-125.

[7] ศิระ อาทมาท และทวีชัย สำราญวานิช. (2565). ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดวิกฤต ระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็กเสริมและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 32(2), 366-374.

[8] ASTM C618-19, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.

[9] ASTM C109/C109M, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens).

[10] ASTM C642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete.

[11] Rodríguez-Álvaro, R., González-Fonteboa, B., Seara-Paz, S. & Rey-Bouzón, E.J. (2021). Masonry mortars, precast concrete and masonry units using coal bottom ash as a partial replacement for conventional aggregates. Construction and Building Materials, 283, 122737.

[12] Ghosh, A., Ghosh, A. & Neogi, S. (2018). Reuse of fly ash and bottom ash in mortars with improved thermal conductivity performance for buildings. Heliyon, 4(11), e00934

[13] Muthusamy, K., Rasid, M.H., Jokhio, G.A., Budiea, A.M.A., Hussin, M.W. & Mirza, J. (2019). Coal bottom ash as sand replacement in concrete: a review. Construction and Building Materials, 236, 117507.