

วิวัฒนาการระดับความร้อนของมอร์ตาร์ผสม ดินขาวเผา/เถ้าแกลบ/เถ้าลอย*

วีระ หอสกุลโท¹⁾

¹⁾ รองศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

Email: veehor@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ได้นำเสนอผลการทดสอบวิวัฒนาการความร้อนของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ที่บ่มในสภาวะที่คงควบคุมการสูญเสียความร้อน ระยะเวลาในการบ่ม 120 ชั่วโมง สารซีเมนต์ที่ใช้เป็นส่วนผสมระหว่างดินขาวเผา-ปูนซีเมนต์ (MK-OPC), เถ้าแกลบ-ปูนซีเมนต์ (RHA-OPC) และเถ้าลอย-ปูนซีเมนต์ (FA-OPC) โดยปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยดินขาวเผา เถ้าแกลบ และเถ้าลอย ในอัตราร้อยละ 20 และ 40 จากการทดสอบพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยเพิ่มในอัตราที่ช้าที่สุด และอุณหภูมิสูงสุดจะต่ำสุด เมื่อแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากันโดยน้ำหนัก สำหรับมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมดินขาวเผาจะใช้เวลาในการเกิดอุณหภูมิสูงสุดนานสุด เมื่อแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากันโดยน้ำหนัก

คำสำคัญ : วิวัฒนาการระดับความร้อน, มอร์ตาร์, ดินขาวเผา, เถ้าแกลบ, เถ้าลอย

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 27 มิถุนายน 2548 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 12 กันยายน 2548

The Heat Evolution of Mortars Incorporating Metakaolin/Rice husk ash/Fly ash *

Veera Horsakulthai ¹⁾

¹⁾ Associate Professor, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University 40002.

Email: veehor@kku.ac.th

Abstract

The results of laboratory investigation conducted with heat evolution of blended cement mortars are presented. Heat evolution of mortar was studied by measuring the temperature increase in mortar cube under semi-adiabatic curing condition for curing time of 120 hours. The binders employed were metakaolin-Portland cement (MK-OPC), rice husk ash-Portland cement (RHA-OPC), and fly ash-Portland cement (FA-OPC) blends, with OPC replacement dosage of 20% and 40%. From the test, it was found that the cement mortar containing fly ash showed the temperature change rate and the peak temperature lowest for the same dosage by weight. The cement mortar containing metakaolin showed the time taken to reach the peak temperature with the greatest delay for the same dosage by weight.

Keyword : Heat evolution, Mortar, Metakaolin, Rice husk ash, Fly ash

* Original manuscript submitted: June 27, 2005 and Final manuscript received: September 12, 2005

บทนำ

คอนกรีตมวล (Mass concrete) เป็นคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างขนาดใหญ่ ความร้อนจากปฏิกิริยาปูนซีเมนต์กับน้ำ (Heat of hydration) จะสะสมอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้อุณหภูมิในเนื้อคอนกรีตสูงขึ้นมาก ความร้อนที่สะสมในโครงสร้างคอนกรีตนั้นจะถูกถ่ายเทสู่ภายนอก ความร้อนที่อยู่ภายในจะถ่ายเทออกได้ช้ากว่าที่บริเวณผิวคอนกรีต ก่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวและภายในโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างของคอนกรีตเกิดการหดตัวและการยึดรั้งที่แตกต่างกัน ในที่สุดคอนกรีตจะแตกร้าว (Thermal crack) เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสาเหตุหลักของการเกิดความร้อนในคอนกรีต ถ้าจะลดความร้อนต้องลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลง ดังนั้นการแทนที่ซีเมนต์ด้วยสารปอซโซลานเป็นการลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก็จะทำให้ความร้อนลดลง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ใช้สารปอซโซลาน 3 ชนิดแทนที่ในซีเมนต์ คือ ดินขาวเผา (Metakaolin) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) และเถ้าลอย (Fly ash)

วัสดุ

ซีเมนต์: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Ordinary Portland Cement Type I, OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150

ทราย: ทรายแม่น้ำร้อนผ่านแรงเบอร์ 16 ค้างแรงเบอร์ 100

ดินขาวเผา: ดินขาวระนองร้อนผ่านแรงเบอร์ 325 เผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งเป็นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ดัชนีกำลังดีที่สุดได้นำมาใช้ในการทดสอบ (S. Sayamipuk, 2000)

เจ้าแกลบ: เจ้าแกลบขาวที่ได้จากการเผาแกลบกองหนัก 20 ก.ก. บนแผ่นเหล็กเรียบ บดด้วยเครื่องลอสเองเจอลิส ความเร็วรอบ 33 รอบ/นาที โดยใช้แท่งเหล็กกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12, 15, และ 19 ม.ม. ยาว 48 ซม. อย่างละจำนวน 10 เส้น การบดแต่ละครั้งใช้เจ้าแกลบหนัก 5 ก.ก. ใช้เวลาบด 1 ชั่วโมง (ปริญา บัญญาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร, 2530)

แก้ล้อย: แก้ล้อยจากการเผาถ่านหินลิกไนท์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

วิธีการทดสอบ

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC), ดินขาวเผา (MK), เถ้าลอย (RHA), และเถ้าลอย (FA) ดังแสดงในตารางที่ 1

สารซีเมนต์ (Binder): ใช้ดินขาวเผา ถ้ำกลบเทาขาว และถ้ำลอยแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณ 0%, 20% และ 40% โดยน้ำหนัก สัตว์ลักษณะที่ใช้

- OPC = มอร์ตาร์ซีเมนต์
 MK20 = มอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมดินขาวเผา 20%
 MK40 = มอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมดินขาวเผา 40%
 RHA20 = มอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ 20%
 RHA40 = มอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ 40%
 FA20 = มอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 20%
 FA40 = มอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย 40%

Oxide	Cement ^{a)} MK (%)	RHA (%)	FA ^{a)} (%)	(%)
SiO ₂	20.8	60.3	88.4	40.1
Al ₂ O ₃	5.2	30.7	0.69	21.0
Fe ₂ O ₃	3.6	1.01	0.54	11.8
CaO	64.3	0.21	2.06	12.7
MgO	1.2	0.23	0.30	2.41
SO ₃	2.0	0.23	0.61	2.25
Na ₂ O	0.1	0.00	0.00	1.43
K ₂ O	0.4	3.76	4.80	2.83
LOI	1.3	1.01	3.70	2.28
Blaine fineness (cm ² /g)	3,100	10,600	14,200	3,000
Density	3.12	2.56	2.12	1.99

a) ข้อมูลจาก P. Chindaprasirt et al. 2004.

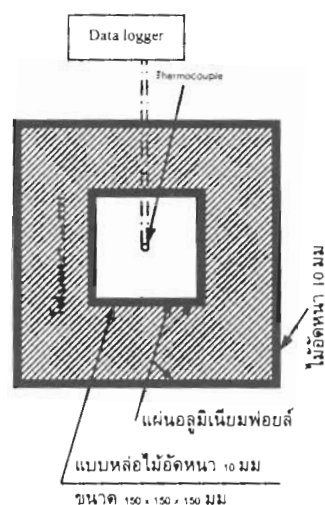
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัสดุ

มอร์ตาร์: ส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนทรายต่อสารซีเมนต์เท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมที่ทำให้ความชื้นเหลวของมอร์ตาร์มีค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5

ตัวอย่างทดสอบ: มอร์ตาร์ถูกหล่อในแบบที่ทำจากไม้อัดหนา 10 มม. ขนาดแบบหล่อ 150 x 150 x 150 มม. ภายในแบบหล่อรองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ดังแสดงในรูปที่ 1

การวัดอุณหภูมิ: ตัวอย่างทดสอบถูกเก็บไว้ในระบบกึ่งป้องกันการสูญเสียความร้อน (Semi-adiabatic system) โดยห่อแบบหล่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ชั้นต่อมาหุ้มด้วยแผ่นโฟมหนา 100 มม. ห่อด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์อีกชั้น ชั้นสุดท้ายเป็นไม้อัดหนา 10 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1 กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) การวัดอุณหภูมิจะเริ่มวัดหลังจากหล่อและติดตั้งชุดทดสอบแล้วเสร็จ 5 นาที และวัดต่อเนื่องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง

ในการทดสอบชุดทดสอบกึ่งควบคุมการสูญเสียความร้อนจะถูกเก็บและทดสอบในห้องควบคุมอุณหภูมิ $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ จนกว่าจะทดสอบแล้วเสร็จ



รูปที่ 1 ชุดทดสอบกึ่งควบคุมการสูญเสียความร้อน

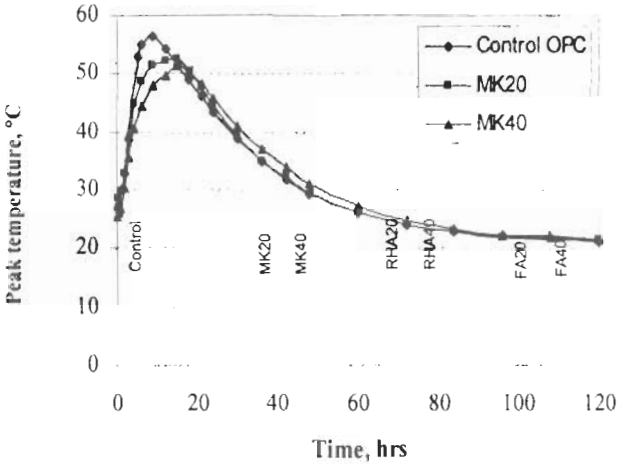
ผลการทดสอบ

ความต้องการน้ำของสารซีเมนต์ จากการทดสอบได้ควบคุมปริมาณน้ำที่ทำให้การไหลของมอร์ตาร์ร้อยละ 110 ± 5 เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ใช้พบว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมดินขาวเผาและเถ้ากลบ ต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้เนื่องจากดินขาวเผามีรูปร่างเป็นแผ่นแบน (S. Sayamipuk, 2000) และมีความละเอียดมากกว่าซีเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำให้เนื้อที่ของดินขาวมากกว่าซีเมนต์จึงต้องการปริมาณน้ำมากขึ้นในการหล่อลื่นให้มีช่วงการไหลตามที่กำหนด ส่วนเถ้ากลบจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก (ปริญา ปัญญาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร, 2530) เนื่องจากมีความละเอียดสูง จึงต้องการปริมาณน้ำเพื่อแทรกตัวในช่องว่างนั้น สำหรับมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอย ต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์เนื่องจากเถ้าลอยมีความละเอียดใกล้เคียงกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบกับอนุภาคของเถ้าลอยค่อนข้างกลมกว่า จึงทำให้หล่อลื่นได้ดีกว่า จึงต้องการปริมาณน้ำลดลงในค่าการไหลที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2

มอร์ตาร์	w/b	ค่าการไหลร้อยละ
		ละ
OPC	0.67	110
MK20	0.72	111
MK40	0.80	111
RHA20	0.79	112
RHA40	0.89	114
FA20	0.60	111
FA40	0.62	109

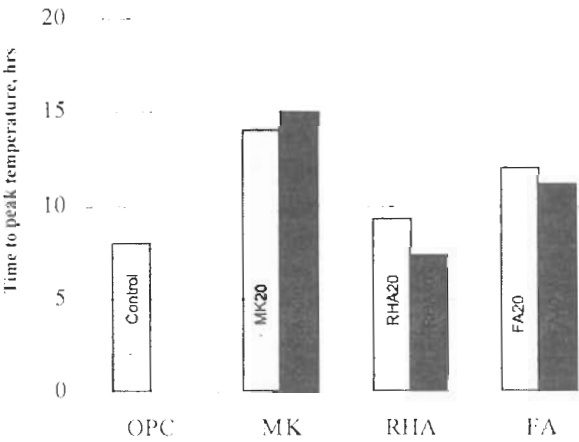
ตารางที่ 2 ความต้องการปริมาณน้ำของมอร์ดาร์ที่การไหลร้อยละ 110: 5

จากการวัดความร้อนของปฏิกิริยาซีเมนต์กับน้ำ (Heat of hydration) ในรูปของอุณหภูมิของมอร์ตาร์ OPC, MK20, MK40, RHA20, RHA40, FA20, และ FA40 วัดได้สูงสุด 56.6 °C, 52.6 °C, 51.5 °C, 49.3 °C, 42.6 °C, 47.5 °C, และ 42.8 °C ตามลำดับ จะเห็นว่ามอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานทั้ง 3 ชนิด อุณหภูมิสูงสุดจะลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิสูงสุดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่อง จากมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ลดลง ซึ่งแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ก่อให้เกิดความร้อน จึงทำให้อุณหภูมิสูงสุดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2



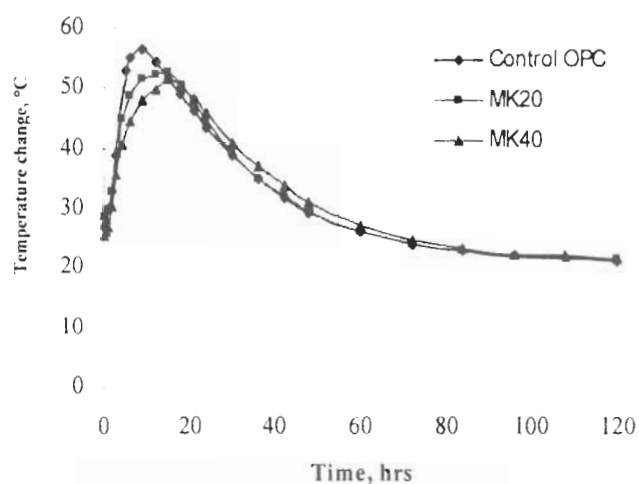
รูปที่ 2 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิสูงสุดของมอร์ตาร์

ระยะเวลาปฏิกิริยาที่ทำให้ค่าอุณหภูมิของมอร์ตาร์ OPC, MK20, MK40, RHA20, RHA40, FA20, และ FA40 สูงสุด เท่ากับ 8 ชั่วโมง, 14 ชั่วโมง, 15 ชั่วโมง, 9 ชั่วโมง, 7 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, และ 11 ชั่วโมง ตามลำดับ จะเห็นว่ามอร์ตาร์ MK20, MK40, FA20, และ FA40 เวลาที่ทำให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดจะช้ากว่า OPC ส่วน RHA20 และ RHA40 เวลาที่ทำให้อุณหภูมิสูงสุดจะใกล้เคียง OPC ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภูมิแสดงเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดของมอร์ตาร์

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาของมอร์ตาร์ OPC, MK20, และ MK40, จากการสังเกตพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของมอร์ตาร์ทั้ง 3 ชนิดใกล้เคียงกัน กล่าวคือความชันของเส้นกราฟแทบที่จะทับซ้อนกัน แต่ช่วงของอุณหภูมิสูงสุดของมอร์ตาร์ทั้ง 3 ชนิดจะแตกต่างกัน ช่วงอุณหภูมิสูงสุดของ OPC ในช่วง $56.6 \pm 2^\circ\text{C}$ เกิดขึ้นในช่วงเวลา 5 – 12 ชั่วโมงหลังจากหลอมมอร์ตาร์ ช่วงอุณหภูมิสูงสุดของ MK20 ในช่วง $52.6 \pm 2^\circ\text{C}$ เกิดขึ้นในช่วงเวลา 7 – 18 ชั่วโมงหลังจากหลอมมอร์ตาร์ และช่วงอุณหภูมิสูงสุดของ MK40 ในช่วง $51.5 \pm 2^\circ\text{C}$ เกิดขึ้นในช่วงเวลา 11 – 20 ชั่วโมงหลังจากหลอมมอร์ตาร์ จะเห็นว่าช่วงอุณหภูมิสูงสุดของ MK20 และ MK40 ช่วงอุณหภูมิสูงสุดจะมีช่วงเวลาที่กว้างกว่า

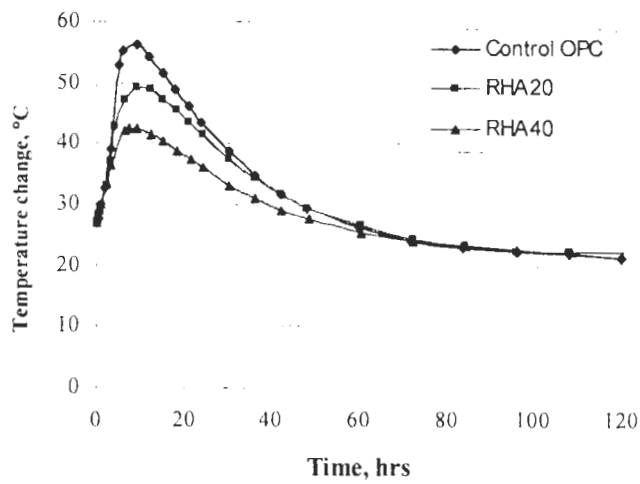


รูปที่ 4 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาของ OPC, MK20, และ MK40

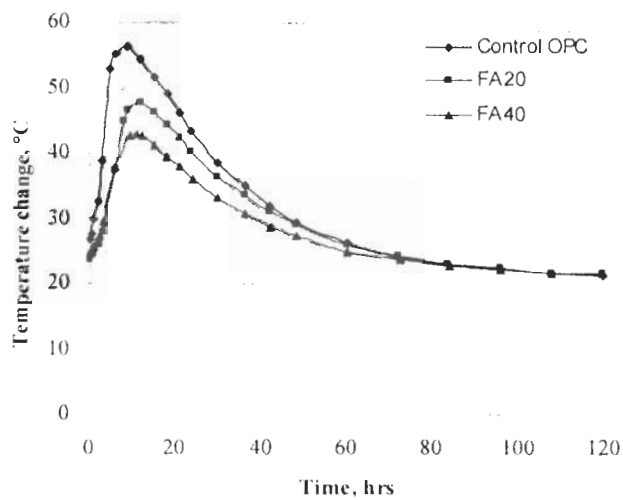
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาของมอร์ตาร์ OPC, RHA20, และ RHA40 จากการสังเกตพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของมอร์ตาร์ RHA20 และ RHA40 จะช้ากว่า OPC กล่าวคือความชันของเส้นกราฟของ RHA20 และ RHA40 จะมีความชันน้อยกว่า OPC สำหรับช่วงของอุณหภูมิสูงสุด $\pm 2^\circ\text{C}$ ของ RHA20 อยู่ในช่วง $49.3 \pm 2^\circ\text{C}$ เกิดขึ้นในช่วงเวลา 6 – 15 ชั่วโมงหลังจากหลอมมอร์ตาร์ และช่วงอุณหภูมิสูงสุด $\pm 2^\circ\text{C}$ ของ RHA40 อยู่ในช่วง $42.6 \pm 2^\circ\text{C}$ เกิดขึ้นในช่วง 5 – 15 ชั่วโมงหลังจากหลอมมอร์ตาร์ จะเห็นว่าเวลาเริ่มต้นของช่วงอุณหภูมิสูงสุดจะใกล้เคียงกับ OPC แต่ช่วงเวลาของช่วงอุณหภูมิสูงสุดจะกว้างกว่า

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาของมอร์ตาร์ OPC, FA20, และ FA40 จากการสังเกตพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของมอร์ตาร์ FA20 และ FA40 จะช้ากว่า OPC และช้ากว่า MK20 และ MK40 ในรูปที่ 5 สำหรับช่วงของอุณหภูมิสูงสุด $\pm 2^\circ\text{C}$ ของ FA20 อยู่

ในช่วง $47.5 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ เกิดขึ้นในช่วงเวลา 8 – 16 ชั่วโมงหลังจากหลอมอร์ตาร์ และช่วงอุณหภูมิสูงสุด $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของ FA40 อยู่ในช่วง $42.8 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ เกิดขึ้นในช่วง 7 – 16 ชั่วโมงหลังจากหลอมอร์ตาร์



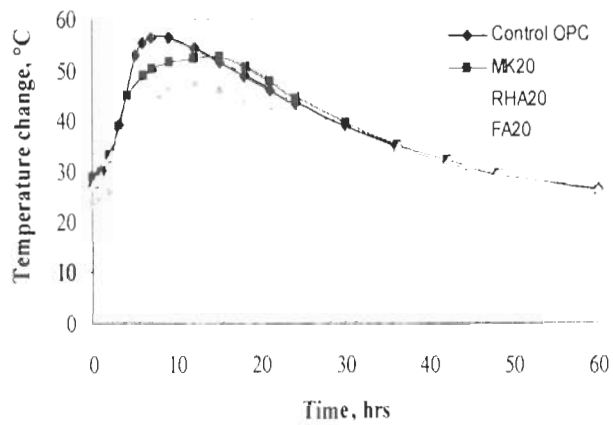
รูปที่ 5 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาของ OPC, RHA20, และ RHA40



รูปที่ 6 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา OPC, FA20, และ FA40

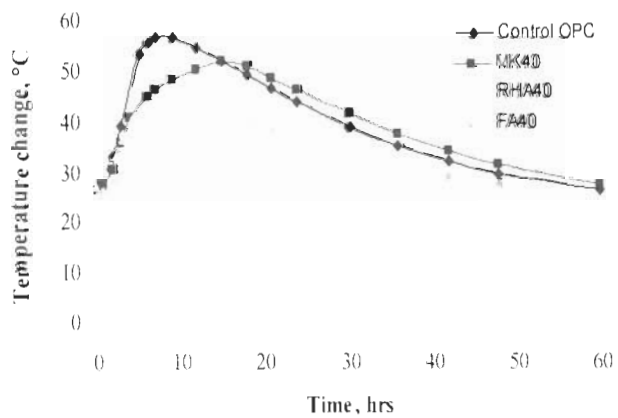
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาของมอร์ตาร์ OPC, MK20, RHA20, และ FA20, จากสังเกตพบว่าช่วงอุณหภูมิสูงสุดจากมากไปหาน้อยคือ OPC, MK20, RHA20, และ FA20 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความร้อนที่เกิดกับมอร์ตาร์ OPC จะเป็นความร้อนจากปฏิกิริยา

ซีเมนต์กับน้ำ ส่วน MK20, RHA20, และ FA20 จะต่ำกว่าเนื่องจากได้แทนที่ซีเมนต์ด้วยดินขาวเผา, เถ้าแกลบ และเถ้าลอย 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ทำให้แคลเซียมออกไซด์มีปริมาณลดน้อยลงต่ำกว่า OPC ส่วนมอร์ตาร์ MK20 มีอุณหภูมิสูงกว่า RHA20 และ FA20 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาซีเมนต์กับน้ำ ควบคู่กับปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงเวลาดังกล่าว (J. Bai and S. Wild, 2002) ทำให้พัฒนาความร้อน สูงกว่า



รูปที่ 7 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา OPC, MK20, RHA20 และ FA20

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาของมอร์ตาร์ OPC, MK40, RHA40, และ FA40, จากสังเกตพบว่าช่วงอุณหภูมิของ OPC สูงสุด รองลงมาเป็น MK40 ส่วน RHA40, และ FA40 มีการพัฒนาความร้อนคล้ายคลึงกัน ซึ่งให้ช่วงอุณหภูมิสูงสุดมีค่าต่ำสุด แต่ RHA40 จะพัฒนาให้ช่วงความร้อนสูงสุดก่อน FA40



รูปที่ 8 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา OPC, MK40, RHA40 และ FA40

สรุปผลทดสอบ

จากการศึกษาพบว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มเพิ่มในอัตราที่น้อยที่สุดและอุณหภูมิสูงสุดจะต่ำสุด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นน้อยมากมีเพียงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำให้ความร้อนต่ำลง สำหรับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมดินขาวเถ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มในอัตราที่มากที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นควบคู่กัน ส่วนอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ ถ้าผสมในปริมาณมากมีแนวโน้มเพิ่มในอัตราคล้ายกับมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

เอกสารอ้างอิง

- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร. 2530. การศึกษาปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมซีเถ้ากลบและซีเถ้าลอย. สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- C.D. Atis. 2002. **Heat evolution of high-volume fly ash concrete**. Cement and Concrete research. Vol.32: 751-756.
- C.S. Poon, S. Azhar, Y.L. Wong. 2003. **Performance of metakaolin concrete at evaluated temperatures**. Cement & Concrete Composites. Vol.25: 83-89.
- J. Bai, S. Wild (2002). **Investigation of temperature change and heat evolution of mortar incorporating PFA and metakaolin**. Cement & Concrete Composites. Vol.24: 201-209.
- P. Chindaprasit, S. Homwuttivong, V. Sirivivatnanon. 2004. **Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar**. Cement and Concrete research. Vol.34: 1087-1092.
- S. Sayamipuk. 2000. **Development of durability mortar and concrete incorporating metakaolin from Thailand**. Ph.D. Thesis. Asian Institute of Technology, Thailand.