

**ผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระสูง
ต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการหดตัวแบบออโตจีนัส
และแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย**
**Effect of High Free Lime Content in Fly Ash on Cementitious
Properties and Autogenous and Drying Shrinkages
of Fly Ash Mixtures**

ปิติศานต์ กร้ามาตร¹ สมโชค สุขแย้ม² ปานเทพ จุลนิพิฐวงศ์³

ราพีง ชัยหลี่เจริญ⁴ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁵

pitisan.k@en.rmutt.ac.th¹, choke_co@windowlive.com², parnthep@siit.tu.ac.th³,
rumpueng.c@en.rmutt.ac.th⁴, somnuk@siit.tu.ac.th⁵

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง ต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime ต่างกัน 3 ชนิด (เถ้าลอยตั้งต้น) และเถ้าลอยที่มีการเติมผง Free lime ให้มีปริมาณสูงร้อยละ 5 และ 10 ในเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime สูง ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น และกำลังอัดประลัยในช่วงอายุต้นดีขึ้น นอกจากนี้พบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้งที่มีปริมาณ Free lime ต่ำ และ Free lime สูง มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการเติมปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยให้มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 5 ไม่มีผลกระทบต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

คำสำคัญ: แคลเซียมออกไซด์อิสระ คุณสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์

²นักศึกษาปริญญาโท

³อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

⁵ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Abstract

This paper aims to study the effect of high free lime content in fly ash on the cementitious properties and autogenous and drying shrinkages of fly ash mortars. Three original fly ashes with different free lime content were used. The addition of free lime powder to those original fly ashes was applied for making 5% and 10% of free lime contents. The replacement ratios of fly ash in ordinary Portland cement (OPC) were 20% and 40%. The cementitious properties, autogenous shrinkages of mortar and drying shrinkage of mortar were studied. The study found that pastes with high free lime content of fly ash results in higher normal consistency, earlier setting time and higher compressive strength at early age. Moreover, the autogenous and drying shrinkages of fly ash mortars for both high and low free lime contents are lower than those of OPC mortar. The additions of free lime in fly ash without exceeding 5% content do not affect the autogenous and drying shrinkages of mortars.

Keywords: free lime, cementitious properties, autogenous shrinkage, drying Shrinkage.

1. บทนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย การนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์นั้นมีส่วนช่วยในการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง ซึ่งมีผลทำให้ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ มีส่วนช่วยในการบรรเทาปัญหาสภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ความสามารถในการทนของคอนกรีต ลดอุณหภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ลดการซึมผ่าน ลดการกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟต และเพิ่มกำลังอัดประลัยในระยะยาว และจากการสืบค้นผลงานวิจัย [1, 2, 3 และ 4] ซึ่งให้ผลในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) เช่น เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ในอัตราส่วนที่

เหมาะสม สามารถทำให้คอนกรีตมีความคงทนขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยบางอย่างก็ให้ผลในด้านลบได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะดีกว่าไม่มีการแทนที่เมื่อสัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กลับแย่กว่าเมื่อเทียบกับการไม่แทนที่ เป็นต้น

จากการพิจารณาผลวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free lime) สูงขึ้น ซึ่งการใช้เถ้าลอยเหล่านี้ในงานคอนกรีตมีข้อดีคือกำลังอัดประลัยในช่วงอายุต้นนั้นดีขึ้น [5] แต่อาจส่งผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตได้โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านการขยายตัว เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Free lime ทำให้เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้น [6] รวมทั้งมีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของคอนกรีตเช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Free lime

ในเถ้าลอยย่อมส่งผลให้ผู้ใช้น้ำไม่มั่นใจในการนำเถ้าลอยดังกล่าวไปใช้งาน

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงได้ทำการศึกษาหาปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยที่ไม่ส่งผลเสียในการนำไปใช้ในงานคอนกรีต โดยศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยที่มี Free lime สูงต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime ต่างกัน 3 ชนิด และเถ้าลอยที่มีการเติมผง Free lime ให้มีปริมาณสูงในเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด โดยใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนต่างกัน

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง ซึ่งมี 3 ชนิดคือ F(A) มีปริมาณ Free lime ร้อยละ 1.71 F(B) มีปริมาณ Free lime ร้อยละ 3.93 และ F(C) มีปริมาณ Free lime ร้อยละ 3.06 มวลรวมใช้ทรายน้ำจืดขนาดคละทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C33

สำหรับองค์ประกอบทางเคมี (โดยวิธี X-Ray Diffractometer: XRD) ความถ่วงจำเพาะ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188) และความละเอียดโดยวิธีเบลน (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C204) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย		
		F(A)	F(B)	F(C)
SiO ₂	18.93	35.71	26.61	25.22
Al ₂ O ₃	5.51	20.44	13.60	13.88
Fe ₂ O ₃	3.31	15.54	18.34	17.39
CaO	65.53	16.52	24.97	26.25
MgO	1.24	2.00	2.33	2.38
Na ₂ O	0.15	1.15	1.75	1.40
K ₂ O	0.31	2.41	1.77	1.92
SO ₃	2.88	4.26	8.53	9.44
LOI	-	0.49	0.53	0.56
Free Lime	-	1.71	3.93	3.06

ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าลอย			ผง Free lime
		F(A)	F(B)	F(C)	
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.21	2.57	2.57	2.96
ความละเอียดเบลน, ซม. ² /ก.	3,100	2,867	2,820	2,723	3,749

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.2.1 การเตรียมเถ้าลอย

การศึกษผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระสูงต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime ต่างกัน 3 ชนิดคือ F(A) F(B) และ F(C) และเถ้าลอยที่มีการเติมผง Free lime ให้มีปริมาณสูงในเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด เท่ากับร้อยละ 5 (F(A5) F(B5) และ F(C5)) และ

ร้อยละ 10 (F(A10) F(B10)) และ F(C10)) ซึ่งการเติมผง Free lime ในเถ้าลอยสามารถทำได้และให้ผลไม่แตกต่างกับเถ้าลอยตั้งต้นที่มีปริมาณ Free lime อยู่แล้ว [1]

2.2.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติด้านซีเมนต์ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C187) ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191) และกำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109)

2.2.3 คุณสมบัติด้านการหดตัวของคอนกรีตและแบบแห้งของมอร์ตาร์

สำหรับคุณสมบัติด้านการหดตัวของคอนกรีตและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยนั้น การหดตัวของคอนกรีต (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157) เมื่อหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เสร็จแล้วให้นำมาหุ้มด้วยพลาสติก เพื่อไม่ให้น้ำระเหยออก เมื่อครบ 1 วัน แกะแบบออกแล้วหุ้มด้วยพลาสติกและห่อด้วยฟอยล์อีกชั้นหนึ่ง แล้ววัดความยาวเริ่มต้น ในขณะการหดตัวแบบแห้ง (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C596) หลังจากที่ได้หล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อเสร็จสิ้นการแช่น้ำ จะนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดด้วยผ้าแห้งแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ววัดความยาวเริ่มต้น โดยตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทดสอบ ทั้งการหดตัวของคอนกรีตและการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ หลังจากวัดความยาวเริ่มต้นแล้ว จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดการหดตัวที่อายุ 1 2 3 5

7 14 28 42 56 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ (ขนาด 2.54x2.54x28.5 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น ต่อสัดส่วนผสม)

สำหรับการทดสอบการหดตัวของคอนกรีต ออโตจีนัสของตัวอย่างมอร์ตาร์นั้น ทุกอายุของการทดสอบการหดตัว จะทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างควบคู่กันไปด้วย เพื่อเป็นการตรวจสอบการระเหยน้ำสู่บรรยากาศของตัวอย่าง

2.2.4 สัดส่วนวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนวัสดุประสานของเพสต์และของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษานั้นประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C100) และสัดส่วนผสมเถ้าลอยแต่ละประเภทแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ในส่วนของมอร์ตาร์นั้นได้ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

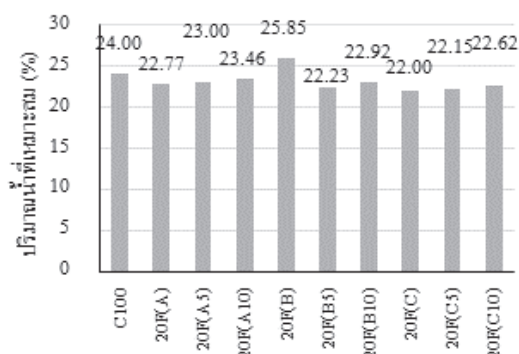
3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

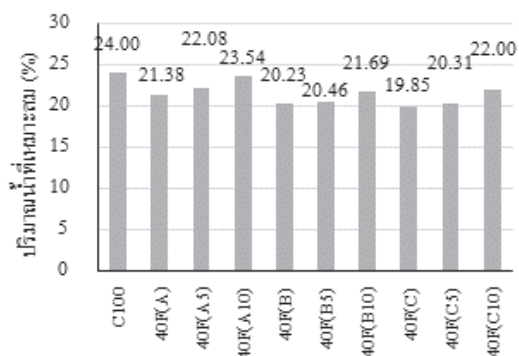
3.1.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) (รูปที่ 1) มีค่าน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 40 จะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อยกว่าใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะกลมช่วยในการหล่อทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้อยลง ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ของเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด (F(A) F(B) และ F(C)) พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอย F(A) มีค่า

มากกว่าของ F(B) และ F(C) ตามลำดับ ทั้งนี้ เพราะความละเอียดของ F(A) มีค่ามากกว่าของ F(B) และ F(C) ตามลำดับ ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าส่งผลให้มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น แต่เมื่อมีการเติมปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยแต่ละชนิด ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มของปริมาณ Free lime เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว จึงทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น แสดงว่า เมื่อมีการเติมผงปริมาณ Free lime ในเถ้าลอย มีผลกระทบต่อน้ำที่เหมาะสมของเพสต์



ก) เถ้าลอยร้อยละ 20



ข) เถ้าลอยร้อยละ 40

รูปที่ 1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40)

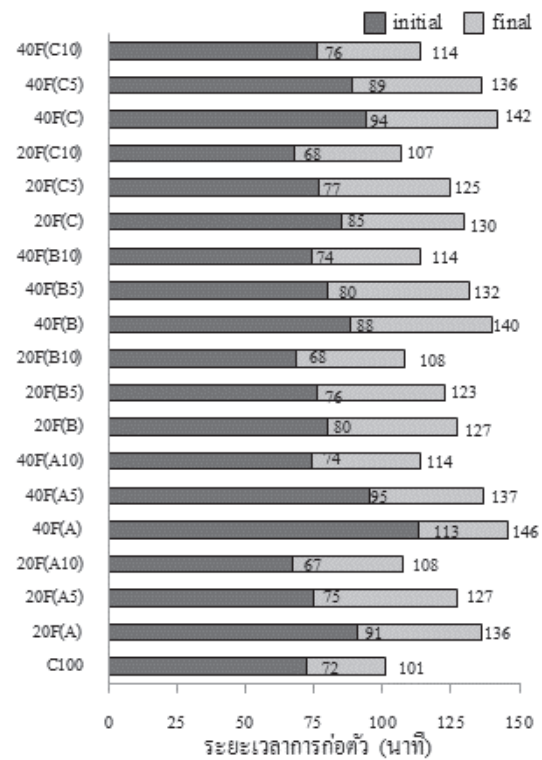
3.1.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

รูปที่ 2 แสดงระยะการก่อตัว (Setting time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยจากแม่เถ้าจำนวน 3 ชนิด คือ F(A) F(B) และ F(C) ซึ่งเป็นเถ้าลอยตั้งต้น จากการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) นั้น จะส่งผลให้การก่อตัวช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณมากขึ้น (ร้อยละ 40) ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ช้าลง ทั้งนี้ เพราะการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์ลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด พบว่าเพสต์เถ้าลอย F(B) มีแนวโน้มว่าการก่อตัวเร็วกว่าของ F(C) และ F(A) ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณ Free lime สูงกว่าตามลำดับ จึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์เร็วกว่า เนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนเมื่อมีการเติมปริมาณ Free lime ลงในเถ้าลอยให้มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 5 และ 10 ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์เร็วขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเพิ่มปริมาณ Free lime ร้อยละ 10 ในเถ้าลอยนั้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ในอัตราส่วนทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แสดงว่าปริมาณ Free lime มีผลทำให้เร่งระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

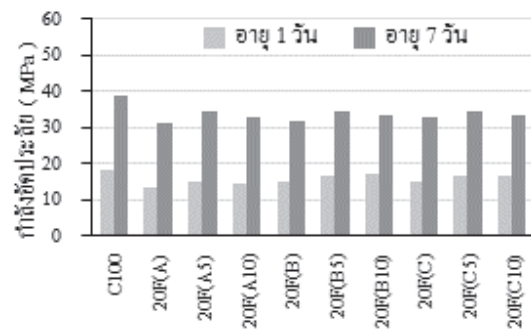
3.1.3 กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์

ส่วนการศึกษากำลังอัดประลัย (Compressive strength) ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด (รูปที่ 3) พบว่ากำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) ทั้งอายุ 17 และ 28 วัน ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

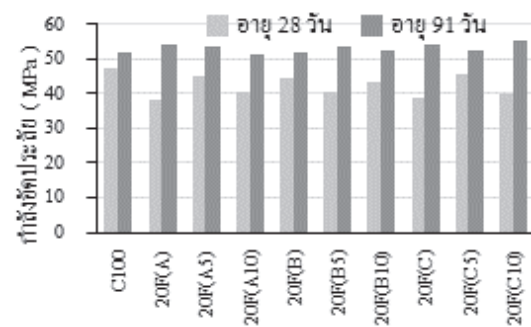
ทั้ง 3 ชนิด มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเมื่อแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40 จะให้ค่ากำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์น้อยกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 20 เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์ลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ส่วนเมื่ออายุ 91 วัน กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากเถ้าลอยเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด พบว่ามอร์ตาร์ของเถ้าลอย F(B) ในช่วงอายุต้นมีแนวโน้มกำลังอัดประลัยมากกว่าของ F(C) และ F(A) ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะปริมาณ Free lime ของเถ้าลอยที่สูงกว่า ทำให้กำลังอัดประลัยมากกว่าและเมื่อมีการเติมปริมาณ Free lime ลงไปในเถ้าลอยให้สูงขึ้น (เท่ากับร้อยละ 5 และ 10) กำลังอัดประลัยที่อายุ 1 และ 7 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยตั้งต้นเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเมื่ออายุ 28 และ 91 วันนั้น พบว่ากำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยตั้งต้น



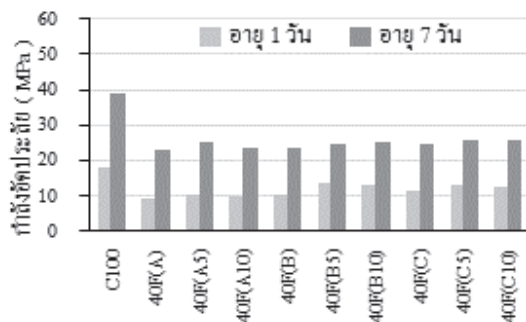
รูปที่ 2 ระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40)



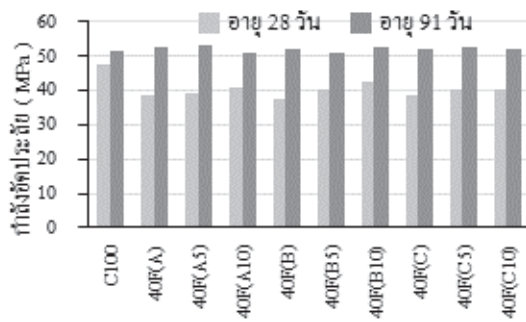
ก) เถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อายุ 1 และ 7 วัน



ข) เถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อายุ 28 และ 91 วัน



ค) แก้วลอยร้อยละ 40 ที่อายุ 1 และ 7 วัน



ง) แก้วลอยร้อยละ 40 ที่อายุ 28 และ 91 วัน

รูปที่ 3 กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมแก้วลอยร้อยละ 20 และ 40 ที่อายุ 1, 7, 28 และ 91 วัน

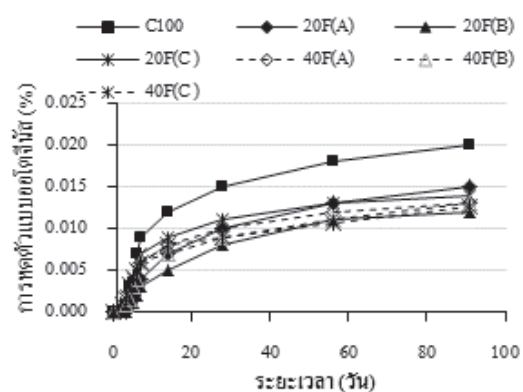
3.2 การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

3.2.1 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์

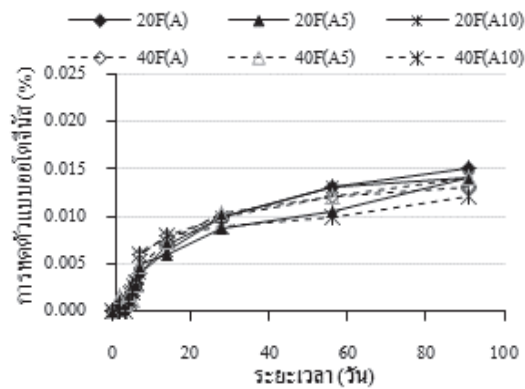
สำหรับการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยนั้น พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยทั้ง 3 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยทั้ง 3 ชนิด มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4) นั้นแสดงว่าการใช้แก้วลอยสามารถลดการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ได้ เนื่องจากการใช้แก้วลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การสูญเสีย น้ำในช่องว่างคาปิลลารีจึงลดลงตามไปด้วย

รวมทั้งการใช้แก้วลอยทำให้ปริมาณน้ำอิสระในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดจากการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากช่องว่างคาปิลลารี ดังนั้นเมื่อมีน้ำอิสระเพิ่มขึ้นการหดตัวจึงลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้มอร์ตาร์ผสมแก้วลอยร้อยละ 40 มีแนวโน้มให้การหดตัวแบบออโตจีนัสต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมแก้วลอยร้อยละ 20 เนื่องจากแก้วลอยในปริมาณมาก ส่งผลให้น้ำอิสระในมอร์ตาร์มากขึ้นด้วย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมปริมาณเท่ากัน

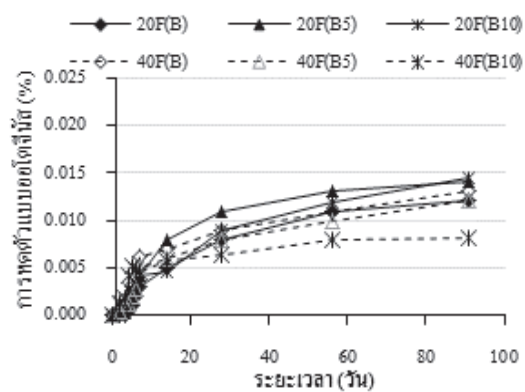
อย่างไรก็ตาม เมื่อศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณ Free lime ในแก้วลอยแต่ละชนิดต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ พบว่าเมื่อเติมปริมาณ Free lime ลงไปในแก้วลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดเป็นร้อยละ 5 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงกันหรือมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อยกับของมอร์ตาร์แก้วลอยตั้งต้น (รูปที่ 5) แต่เมื่อเติมในปริมาณร้อยละ 10 ให้ค่าการหดตัวที่ต่ำกว่าของมอร์ตาร์แก้วลอยตั้งต้น นั้นแสดงว่าการเติมปริมาณ Free lime ในแก้วลอยให้มีปริมาณมากพอ (>ร้อยละ 10) แนวโน้มมีผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์



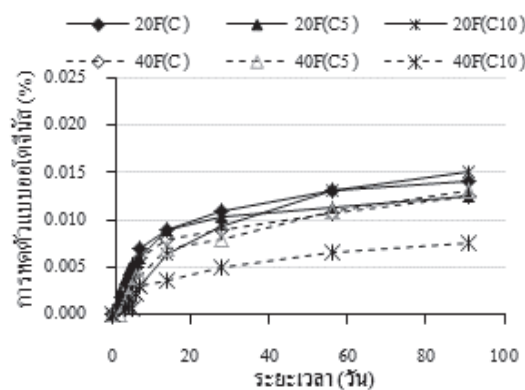
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมแก้วลอย



ก) ใล้ลอย F(A)



ข) ใล้ลอย F(B)



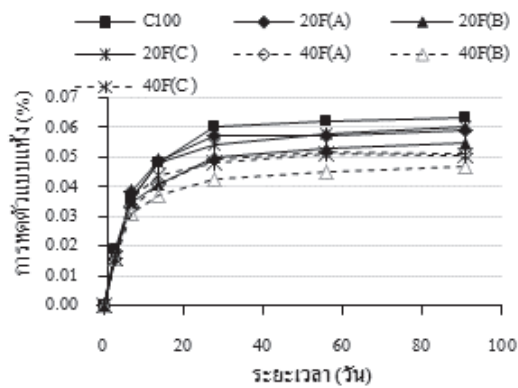
ค) ใล้ลอย F(C)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออตจินัสกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมใล้ลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และมอร์ตาร์ผสมใล้ลอยที่มีการเติมผง Free lime

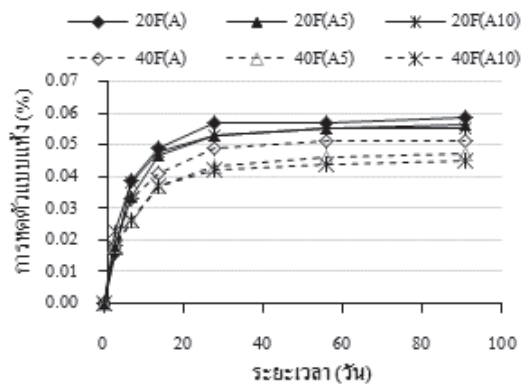
3.2.2 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

ส่วนการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมใล้ลอย พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมใล้ลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าต่ำกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมอร์ตาร์ผสมใล้ลอยทั้ง 3 ชนิด จะม้ค่าการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 6) นั้นแสดงว่าการใช้ใล้ลอยสามารถลดการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ได้ เนื่องจากการใช้ใล้ลอยจะมีส่วนทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยาโดยใล้ลอยที่ปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ซึ่ง CSH และอุดช่องว่างซีเมนต์เฟสให้มีความหนาแน่นขึ้น ส่วนใล้ลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือน Micro aggregates ในการช่วยลดช่องว่างของมอร์ตาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นขึ้นสามารถต้านทานการหดตัวได้ ส่วนมอร์ตาร์ผสมใล้ลอยร้อยละ 40 มีค่าการหดตัวแบบแห้งต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้ใล้ลอยร้อยละ 20 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการใช้ใล้ลอยในปริมาณมากขึ้นจะช่วยทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก รวมทั้งสามารถเติมเต็มได้มากขึ้นทำให้น้ระเหยได้ยากขึ้น

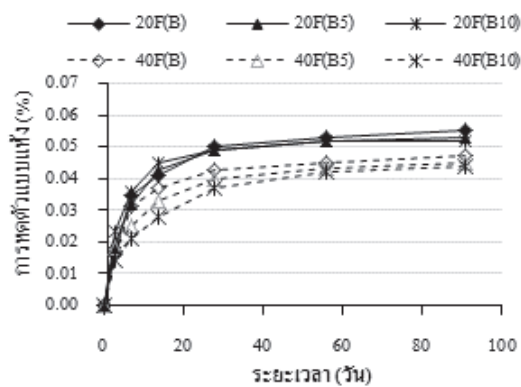
เมื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณ Free lime ในใล้ลอยแต่ละชนิดต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์พบว่าเมื่อเติมปริมาณ Free lime ลงไปในใล้ลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดเป็นร้อยละ 5 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงกันหรือมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อยกับของมอร์ตาร์ใล้ลอยตั้งต้น (รูปที่ 7) แต่เมื่อเติมในปริมาณร้อยละ 10 ให้ค่าการหดตัวที่ต่ำกว่าของมอร์ตาร์ใล้ลอยตั้งต้น นั้นแสดงว่าการเติมปริมาณ Free lime ในใล้ลอยให้มีปริมาณมากพอ (> ร้อยละ 10) แนวโน้มมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์เช่นเดียวกับการหดตัวแบบออตจินัส



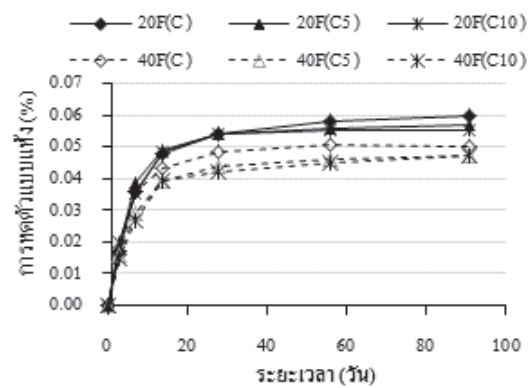
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด



ก) เถ้าลอย F(A)



ข) เถ้าลอย F(B)



ค) เถ้าลอย F(C)

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีการเติมผง Free lime

4. สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์และการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime สูงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime สูง ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นและกำลังอัดประลัยในช่วงอายุต้นดีขึ้น

2. การหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้งที่มีปริมาณ Free lime ต่ำ และ Free lime สูง มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการเติมปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยให้มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 5 จะไม่มีผลกระทบต่อการหดตัวแบบบอโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณประจำปี 2558 ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tangtermsirikul S. and Bumrungwong C, Conceptual Model for Determining Optimum Proportion of Fly Ash in Sulfate resisting Concrete, Proceedings of the 3rd National Convention on Civil Engineering, Thailand, January, 1997, pp. MAT 4-1 to 4-9.
- [2] Pitisan K. and Somnuk T., Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution, ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V21, 2004.
- [3] เจต นาจารย์ และปิติศานต์ กร้ามาตร, การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด, วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปี 11 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม), 2556.

- [4] ยงยุทธ วัฒนกุล ปิติศานต์ กร้ามาตร อธิธิพร ศิริสวัสดิ์ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, คุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการขยายตัวในสารละลายไฮเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน, วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม), 2553.
- [5] Krittiya Kaewmanee, Pitisan Krammart, Taweechai Sumranwanich, Pongsak Choktaweekarn and Somnuk tangtermsirikul, 2013. Effect of free lime content on properties of cement – fly ash mixtures. Construction and Building materials, 38:829-836.
- [6] ปริญาจินดาประเสริฐและชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. 1500. 7. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.