

EFFECT OF SYNTHETIC LIGHTWEIGHT AGGREGATE ON EARLY AGE SHRINKAGE OF MORTAR

ผลกระทบของมวลรวมเบาสังเคราะห์ต่อการหดตัวของมอร์ตาร์ในช่วงอายุต้น

พชรพจน์ มากภิบาล¹ รักษิตพงษ์ สหมิตรมงคล^{2*}

¹นักศึกษาระดับปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ARTICLE INFO:

Received September 27, 2019

Received Revised Form:

October 31, 2019

Accepted: November 1, 2019

ABSTRACT:

In this article, the effect of synthetic lightweight aggregate on mortar properties is studied. Eight different mortar mix proportions with water to binder ratio (w/b) of 0.35 and 0.50 including; control mortar, mortar with 30% of fly ash by weight of total binder and mortar with 45% of synthetic lightweight aggregate by volume of fine aggregate, and mortar with the combination of fly ash and synthetic lightweight aggregate, are experimentally investigated. The experimental program includes flow test, autogenous and total shrinkage tests on the sample size of 25x25x285 mm, compressive strength of the sample size of 50x50x50 mm. The results indicate that the use of synthetic lightweight aggregate as internal curing agent can reduce autogenous shrinkage. In addition, increase in flow, initial setting time, final setting time and drying shrinkage can be observed. However, the compressive strength of mortars were reduced by 6 – 23% in comparison to the control mortar at 3, 7 and 28 days.

KEYWORDS: synthetic lightweight aggregate, autogenous shrinkage, drying shrinkage, internal curing

บทคัดย่อ:

บทความนี้ได้ศึกษาผลของมวลรวมเบาสังเคราะห์ที่มีต่อสมบัติของมอร์ตาร์ ในการทดสอบประกอบด้วยมอร์ตาร์ที่มีความแตกต่างกัน 8 สัดส่วนผสม มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 0.35 และ 0.50 ประกอบด้วย มอร์ตาร์ควบคุม มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมวลรวมเบาสังเคราะห์แทนที่ทราย ร้อยละ 45 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียดทั้งหมด อีกทั้งยังมีการใช้เถ้าลอยร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ ทำการทดสอบหาค่าการไหล การหดตัวแบบบอโตจีนัส การหดตัวแบบโดยรวม สำหรับตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร และทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมเบาสังเคราะห์เป็นวัสดุบ่มภายในลดการหดตัวแบบบอโตจีนัสและนอกจากนี้ยังว่ามวลรวมเบาสังเคราะห์เพิ่มการไหลและเพิ่มการก่อตัวตอนต้นและต้นปลาย เพิ่มการหดตัวแบบแห้ง และลดกำลังอัดของมอร์ตาร์ ของตัวอย่างที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ในอัตราร้อยละ 6 ถึง 23

คำสำคัญ: มวลรวมเบาสังเคราะห์, การหดตัวแบบบอโตจีนัส, การหดตัวแบบแห้ง, การบ่มภายใน

*Corresponding Author,
Email address:
raktipong.sah@kmutt.ac.th

1. ความเป็นมา

คอนกรีตเป็นวัสดุประกอบจากการผสมรวมกันของปูนซีเมนต์ น้ำและมวลรวม เมื่อนำส่วนผสมมาผสมกัน ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้น เรียกว่า “ปฏิกิริยาไฮเดรชัน” ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร [1] และการสูญเสียความชื้นในโพรงคาปิลลารีพร้อม ๆ กัน โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือการหดตัวเกิดขึ้นนี้ถือเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดการหดตัวทางเคมีในช่วงต้น หลังจากคอนกรีตเข้าสู่ระยะการก่อตัวสุดท้าย (final setting time) หรือคอนกรีตเริ่มเข้าสู่สภาพการแข็งตัว เรียกการหดช่วงนี้เรียกว่า “การหดตัวแบบอโตจีนัส” ซึ่งการหดตัวนี้รวมถึงการหดตัวทางเคมีที่เกิดขึ้นในส่วนของซีเมนต์เพสต์เป็นผลจากการสูญเสียความชื้นบางส่วนในช่องว่างคาปิลลารีที่ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยา การสูญเสียความชื้นนี้ทำให้เกิดแรงดึงคาปิลลารี มีผลทำให้เพสต์เกิดการหดตัว เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “self-desiccation” การหดตัวแบบอโตจีนัสจะเกิดขึ้นสูง หากส่วนผสมคอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำกว่า 0.35 [2] จากการศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รายงานว่าแนวทางที่ช่วยลดการหดตัวแบบอโตจีนัสในช่วงต้น ทำได้ 3 ลักษณะ คือ 1) การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เป็นต้น 2) การใช้สารเคมี เช่น สารลดการหดตัว (shrinkage reducing agent, SRA) และการใช้วัสดุอุ้มน้ำเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายน้ำภายในให้แก่คอนกรีต ได้แก่ Superabsorbent Polymer (SAP) และมวลรวมที่มีความพรุน (porous aggregate) [2]

นอกจากการสูญเสียความชื้นภายในดังกล่าว คอนกรีตยังมีการสูญเสียความชื้นไปสู่สภาวะแวดล้อมอีกด้วย เมื่อเวลาผ่านไป ความชื้นภายในช่องว่างหรือโพรงอากาศของคอนกรีต สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากการระเหยของน้ำออกจาก คอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่ส่วนผสมคอนกรีตมีปริมาณน้ำอิสระ หรือมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง การระเหยของน้ำการหดตัว ด้วยสาเหตุดังกล่าว เรียกว่า “การหดตัวแบบแห้ง” ซึ่งสามารถ ควบคุมได้โดย ลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้น้อยลง เพิ่ม ปริมาตรมวลรวมในการคอนกรีต และทำการบ่มอย่างเหมาะสม เป็นต้น [3]

การใช้มวลรวมที่ดีในปริมาณที่เหมาะสมมีส่วนช่วยลดการหดตัวทั้ง 2 แบบ เนื่องจากมวลรวมเป็นวัสดุเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีใด ๆ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่จะส่งผลทำให้เกิดการหดตัว ดังนั้นการใช้มวลรวมอย่างเหมาะสมจึงเป็นแนวทางในการลดการหดตัว โดยการใช้มวลรวมเพื่อควบคุมการหดตัวจะต้องคำนึงถึง ปริมาณ และขนาด กล่าวคือ การเพิ่มปริมาตรมวลรวมในขณะที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ทำการหดตัวลดลง การใช้มวลรวมที่ขนาดละเอียดและมีขนาดใหญ่ช่วยลดขนาดช่องว่างระหว่างมวลรวม ปริมาตรเพสต์ที่จำเป็นเพิ่มเติมเติมช่องว่างดังกล่าวก็จะลดลงไปด้วย ส่งผลให้การหดตัวน้อยลงด้วย การบ่มคอนกรีตยังเป็นอีกวิธีที่ช่วยลดความรุนแรงของปัญหาการหดตัวได้

เพราะนอกจากการบ่มจะช่วยลดการสูญเสียความชื้นแล้ว การบ่มยังทำให้คอนกรีตพัฒนาสมบัติและมีความทนทานดีขึ้น โดยการบ่มที่ใช้กันทั่วไปในงานก่อสร้าง ทำโดยการบ่มจากภายนอกด้วยน้ำ หลังจากถอดแบบหรือทันทีที่คอนกรีตเริ่มแข็งตัวแล้ว [4] วิธีนี้เป็นที่นิยม แต่มีข้อจำกัดคือ ความชื้นที่มาจากวัสดุเปียกจะเข้าถึงการบ่มในส่วนเนื้อคอนกรีตที่อยู่ลึกด้านในได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำต่ำ [5] นอกจากการบ่มภายนอกแล้ว ยังมีการบ่มภายใน (Internal Curing) ที่เป็นเทคนิคในการเพิ่มเติมความชื้นหรือแหล่งบ่มน้ำจากภายในคอนกรีต โดยการบ่มภายในจะเกิดขึ้นเมื่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดขึ้น ซึ่งวัสดุบ่มภายในที่นำเสนอประเภทหนึ่ง คือ มวลรวมเบา (lightweight aggregate) เนื่องจากมวลรวมเบามีการใช้ในงานคอนกรีตอยู่แล้ว เนื่องจากมวลรวมเบามีความพรุน มีโพรงกระจายอยู่ทั่วเม็ด จึงสามารถกักเก็บน้ำไว้ได้ และอาจนำไปใช้เพื่อควบคุม self-desiccation ที่เกิดในคอนกรีต ได้อีกด้วย [6]

หลักการใช้มวลรวมเบาเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุบ่มภายใน เริ่มต้นจากการเตรียมมวลรวมเบาที่โดยปกติค่อนข้างแห้งไปแช่น้ำเป็นระยะเวลา 3 วัน เพื่อให้มวลรวมเบาดังกล่าวอยู่ในสภาวะอิ่มตัว จากนั้นจึงนำมวลรวมเบาไปผสมคอนกรีต เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในคอนกรีตเนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ น้ำที่อยู่ในโพรงของมวลรวมเบาจะถูกคายออกมาเป็นแหล่งน้ำภายใน น้ำที่คายออกมาจากมวลรวมดังกล่าวเป็นน้ำเพิ่มเติมสำหรับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา และช่วยยกระดับความชื้นในคอนกรีต [7] จากการศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามวลรวมเบาหลายชนิดที่เป็นมวลรวมเบาธรรมชาติและมวลรวมเบาสังเคราะห์ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุบ่มภายในได้ ได้แก่ หินพัมมิส (pumice) หินดินดาน (shale) หินชนวน (slate) และ เม็ดโคลน (expanded clay) เป็นต้น [8-9] มวลรวมเบาเหล่านี้มีโพรงเปิดกระจายอยู่ทั่วและต่อเนื่องกัน ทำให้มวลรวมเบามีความสามารถในการดูดน้ำและคายน้ำได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ ดังนั้นการเลือกมวลรวมเบาที่มีสมบัติดูดน้ำและคายน้ำได้จึงมีความสำคัญสำหรับการบ่มภายในเป็นอย่างมาก กล่าวคือ เมื่อผสมมวลรวมเบาเปียกเข้ากับส่วนผสมอื่น ๆ ของคอนกรีต มวลรวมเบาจะไปกระจายอยู่ทั่วในเนื้อคอนกรีต เมื่อปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้น โพรงคาปิลลารีเกิดการสูญเสียความชื้น ทำให้เกิดแรงดึงคาปิลลารี ขณะเดียวกันน้ำในโพรงของมวลรวมเบาที่อยู่ติดกับเพสต์ส่วนนั้นก็ถูกปล่อยออกมาเพื่อชดเชยความชื้นที่สูญเสียไปและเพียงพอต่อการชดเชยการเกิดการหดตัวทางเคมีที่เกิดขึ้น [9] และช่วยลดความเสี่ยงต่อการแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีต [10-11]

สำหรับอุตสาหกรรมคอนกรีต ด้านวัสดุก่อสร้างและอาคารในประเทศไทย มีการใช้มวลรวมเบาสังเคราะห์ (synthetic lightweight aggregate, LWA) ชนิดเม็ดโคลน (expanded clay)

เป็นส่วนผสมคอนกรีตอยู่แล้ว นิยมมากในงานคอนกรีตมวลรวมเบา (lightweight aggregate concrete) ได้แก่ งานผนัง เช่นเดียวกับงานจีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) และเพื่อให้มวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลน (lightweight expanded clay) ถูกนำมาใช้ในโรงงานวัสดุก่อสร้างในประเทศไทยให้มากขึ้นด้วย เทคโนโลยีการบ่มภายใน ทางผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญต่อการศึกษสมบัติของมวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลนนี้ ควบคู่กับศึกษสมบัติของมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลน ได้แก่ การไหล การก่อตัว การหดตัวแบบอโตจีนัส การหดตัวโดยรวม การหดตัวแบบแห้งและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35 และ 0.50 เพื่อศึกษาแนวโน้มหรือผลกระทบจากการใช้มวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดดังกล่าวเป็นวัสดุบ่มภายในเบื้องต้น ก่อนนำองค์ความรู้ไปต่อยอดในการศึกษาสมบัติของคอนกรีต และเพื่อจะนำมวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลนไปประยุกต์ใช้กับงานคอนกรีตผสมเสร็จ (ready mixed concrete) งานวิจัยยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้มวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลน ในมอร์ตาร์ผสมแก้าลอย เพื่อแนวทางในการสนับสนุนและเผยแพร่การใช้มวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลนที่มีอยู่แล้วในประเทศไทย ให้มีการใช้งานจริงอย่างแพร่หลายมากขึ้น

2. วัสดุ สัตว์ส่วนผสมและวิธีการดำเนินการวิจัย

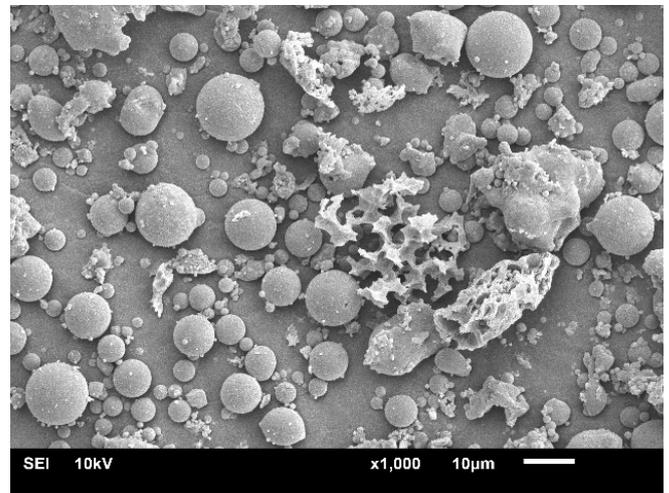
2.1 วัสดุประสาน

วัสดุประสานในการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ และแก้าลอยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้า มีทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 มีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาพบว่าแก้าลอยชนิดนี้ จัดอยู่ใน Class F คือ มีปริมาณ SiO₂ กับ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก

2.2 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดในการทดลอง ได้แก่ ทรายแม่น้ำ ซึ่งเป็นมวลรวมธรรมชาติที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59 ส่วนมวล รวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลน (Lightweight expanded clay, LWA) ที่ใช้แทนที่ทรายเป็นวัสดุบ่มภายใน มีขนาดประมาณ 1 ถึง 5 มิลลิเมตร มีรูปร่างค่อนข้างกลม ผิวมัน ไม่มีเหลี่ยมมุม และมีรูพรุนขนาดประมาณ 14 ถึง 34 ไมครอนดังแสดงในรูปที่ 2 มีความ

ถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.24 ในสภาวะแห้ง (oven-dry) ซึ่งมีขนาดคละดังรูปที่ 3 พบว่าอนุภาคมวลรวมเบาสังเคราะห์เกือบทั้งหมดมีขนาดอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าขนาดใหญ่กว่าและมีขนาดคละที่แคบกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทรายแม่น้ำ



รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายแก้าลอย กำลังขยาย 1000 เท่า

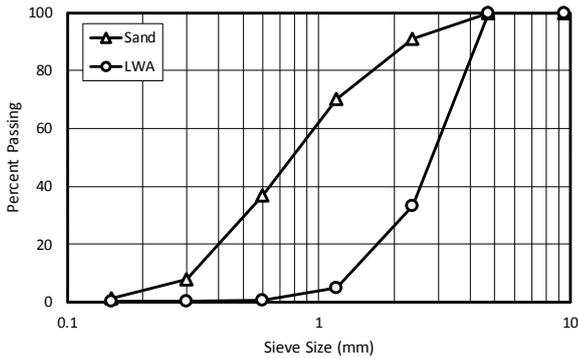


a b
รูปที่ 2 มวลรวมเบาสังเคราะห์

มวลรวมเบาสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นมวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลน (lightweight expanded clay) ที่จากการนำดินเหนียวที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ผ่านกระบวนการเผา (pyro process) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส โดยระหว่างการเผามีการเติมสารกระจาย ฟองอากาศ เพื่อให้มวลรวมเบาที่มีโครงสร้างพรุน และทำให้มี น้ำหนักเบา [12]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และแก้าลอย

Material	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	LOI (%)	Fineness (cm ² /g)	Specific gravity
Cement	20.20	4.70	3.73	63.40	1.37	1.22	-	0.28	2.72	3,430	3.15
BFA	45.24	28.25	2.43	11.80	0.74	0.74	0.47	0.66	2.95	2,460	2.23



รูปที่ 3 ขนาดคละของทรายและมวลรวมเบาสังเคราะห์

2.3 การทดสอบสมบัติของมวลรวมเบาสังเคราะห์ที่ใช้เป็นวัสดุป่มาภายใน

สมบัติของมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย อัตราการดูดซึมน้ำในมวลรวมเบาสังเคราะห์ทำตามขั้นตอนมาตรฐานการทดสอบ ASTM C1761 นำตัวอย่างที่อยู่ในสภาวะแห้งด้วยการอบในเตาอบไปแช่น้ำ เป็นเวลา 3 วัน แล้วนำตัวอย่างไปปรับให้ อยู่ในสภาพเปียกผิวแห้ง (wet surface dry, WSD) ด้วยกระดาษ paper towel หลังจากนั้นแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก นำไปหาความถ่วงจำเพาะในสภาวะเปียกผิวแห้ง ส่วนที่ 2 นำไปใช้ในขั้นตอนการทดสอบการคายน้ำ

การทดสอบการคายน้ำเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลง น้ำหนักของตัวอย่าง ภายใต้สภาวะที่ปรับลดความชื้นสัมพัทธ์ใน อุณหภูมิคงที่เท่ากับ 23±1 องศาเซลเซียส จากสภาวะเปียกผิวแห้งและค่อย ๆ ปรับลดความชื้นสัมพัทธ์ลงจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ ร้อยละ 80 โดยทุกๆ การเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นสัมพัทธ์ น้ำหนักของตัวอย่างจะถูกบันทึก จากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบเปรียบเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างนั้นๆ ในสภาวะอบแห้ง ส่วนความสามารถในการกักเก็บน้ำของมวลรวมเบาสังเคราะห์นั้น สามารถวัดได้จากวิธีการทดสอบตามที่ได้มีการอธิบาย รายละเอียดวิธีการไว้ในงานวิจัยในอดีต [13]

2.4 การทดสอบมอร์ตาร์

2.4.1 การเตรียมมวลรวมเบาสังเคราะห์เพื่อเตรียมตัวอย่างมอร์ตาร์

การเตรียมมวลรวมเบาสังเคราะห์เพื่อใช้เป็นวัสดุป่มาภายใน ทำโดยนำมวลรวมเบาสังเคราะห์ในสภาวะแห้งไปแช่น้ำในภาชนะเป็นเวลา 3 วัน โดยทำการคนมวลรวมเบาสังเคราะห์ในภาชนะอย่างน้อยวันละครั้ง การคนมวลรวมเบาสังเคราะห์จะกระทำจนกระทั่งไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้มวลรวมเบาสังเคราะห์สามารถดูดน้ำเข้าไปในโพรงเปิดได้เต็มที่ หลังจากนั้นนำมวลรวมเบาสังเคราะห์ขึ้นจากน้ำ และพักไว้ในตะแกรงจนกระทั่งสังเกตได้ว่าไม่มีน้ำหยดลงได้ตะแกรง และเลือกสุ่มตัวอย่างมวลรวมเบาสังเคราะห์เพื่อทดสอบหาความชื้นที่ผิวเพื่อใช้ในการปรับน้ำในส่วนผสมมอร์ตาร์ก่อนทำการผสม

2.4.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ มีทั้งหมด 8 อัตราส่วนผสม มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 และ 0.50 ประกอบด้วย มอร์ตาร์ควบคุม (W35 และ W50) มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (W35BFA30 และ W50BFA30) และมวลรวมเบาสังเคราะห์แทนที่ทราย ร้อยละ 45 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียดทั้งหมด (W35L45 และ W50L45) และมอร์ตาร์ที่มีการใช้เถ้าลอยร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35BFA30L45 และ W50BFA30L45)

ทั้งนี้ในการผสมมอร์ตาร์ทำการควบคุมให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมมอร์ตาร์เท่ากับอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ในทุกสัดส่วนผสม มีเพียงการหักปริมาณน้ำที่อยู่บริเวณผิวของมวลรวมเบาสังเคราะห์เปียกเท่านั้น และไม่มีการนำน้ำที่เกิดจากผลการคายน้ำจากมวลรวมเบาสังเคราะห์มาคิดร่วมกับน้ำในส่วนผสม

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์

No	Mix Notation	W/B	Mix Proportion (kg/ m ³)				
			Cement	BFA	Water	Sand	LWA
1	W35	0.35	899	-	315	1038	-
2	W35L45	0.35	899	-	315	571	227
3	W35BFA30	0.35	594	255	297	1038	-
4	W35BFA30L45	0.35	594	255	297	571	227
5	W50	0.50	673	-	336	1168	-
6	W50L45	0.50	673	-	336	642	225
7	W50BFA30	0.50	450	193	321	1168	-
8	W50BFA30L45	0.50	450	193	231	642	225

2.4.3 การทดสอบอัตราคราไหล

การทดสอบการไหลแม่เริ่มต้นเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1437 การไหลแม่เริ่มต้นในการศึกษานี้คิดมาจากค่าเฉลี่ยความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างมอร์ตาร์จากการวัด 4 ค่า

2.4.4 การทดสอบการหดตัวของบ่อโตจิ้นส์

การหดตัวของมอร์ตาร์ โดยการวัดเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ความยาวและน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างถูกวัดที่เวลา 12 ชั่วโมงหลังจากผสมมอร์ตาร์ แล้วทำการควบคุมการสูญเสียความชื้นที่ผิว 2 แบบที่แตกต่างกัน (แสดงในรูปที่ 6) คือ แบบแรกคือ สภาวะที่ผิวไม่มีการสูญเสียความชื้นหรือสภาวะผิวปิด ทำโดยใช้แผ่นพลาสติกหุ้มตัวอย่างมอร์ตาร์จำนวน 10 ชั้น จากนั้นห่อหุ้มตัวอย่างขึ้นต่อไปด้วยแผ่นอลูมิเนียมอีก 2 ชั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นหรือการระเหยของน้ำที่ผิว สภาวะนี้ใช้สำหรับแสดงผลการหดตัวของบ่อโตจิ้นส์จนกระทั่งครบ 28 วัน ส่วนอีกแบบ เป็นสภาวะที่ผิวมีการสูญเสียความชื้นหลัง 7 วัน โดยตัวอย่างจะเริ่มต้นการวัดความยาว ในสภาวะปิดผิวเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นแผ่นพลาสติกและแผ่นอะลูมิเนียมจะถูกนำออก เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการสูญเสียความชื้นที่ผิวจนกระทั่งตัวอย่างอายุครบ 28 วัน สภาวะนี้ใช้สำหรับการทดสอบการหดตัวโดยรวม ระหว่างที่ตัวอย่างอายุ 7 วันจนถึงอายุ 28 วัน ทั้งนี้ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมที่มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส

ทั้งนี้การหดตัวสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งตัวอย่างคอนกรีต ระหว่างความยาวที่เวลาเริ่มต้น (12 ชั่วโมงหลังการผสม) กับความยาวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่อายุใดๆ กล่าวคือ เมื่อความยาวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่อายุใด ๆ มีค่าน้อยกว่าความยาวของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่อายุเริ่มต้น “การหดตัว” มีค่าเป็นบวก

2.4.5 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร หลอมมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อแล้วเขย่าเพื่อให้มอร์ตาร์สามารถเติมเต็มแบบหล่อได้สมบูรณ์ ถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง และบ่มมอร์ตาร์ด้วยการห่อตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกจำนวน 5 ชั้น จากนั้นทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วันแล้วหาค่าเฉลี่ย จากการทดสอบตัวอย่างจำนวน 5 ก้อนต่อ 1 สัดส่วนผสม

2.4.6 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกราฟแสดงความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการประเมินศักยภาพของวัสดุบ่มภายใน โดยพิจารณาจากการลดลงของการหดตัวของบ่อโตจิ้นส์ของมอร์ตาร์ผสมวัสดุบ่มภายในต่อการหดตัวของบ่อโตจิ้นส์ของมอร์ตาร์ควบคุม ทั้งนี้จากหลักการการออกแบบส่วนผสม ASTM C1761 สามารถคำนวณอัตราส่วนการชดเชย (Compensation ratio, CR) ได้จากปริมาตร

มวลรวมเบาสังเคราะห์ที่ใช้ลดการหดตัวของบ่อโตจิ้นส์ได้ ในส่วนผสมมอร์ตาร์ของงานวิจัยนี้ มีการแทนที่ทรายด้วยมวลรวมเบาสังเคราะห์เท่ากับร้อยละ 45 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียดทั้งหมด

2.4.7 การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย

การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายเป็นเทคนิควิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการ วิเคราะห์เชิงพื้นที่ ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้กับการ วิเคราะห์พื้นที่ของมวลรวมเบาสังเคราะห์ในแท่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการหดตัวของบ่อโตจิ้นส์ มีขั้นตอนดังนี้

2.4.7.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพ (image analysis)

หลังจากทดสอบการหดตัวของบ่อโตจิ้นส์ที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างจะถูกนำมาตัดแล้วขัดผิวจนผิวมันเงา เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และสังเกตรอยต่อระหว่างซีเมนต์เพสต์และผิวของมวลรวมเบาสังเคราะห์ โดยระหว่างการขัดทุกขั้นตอน ตัวอย่างจะถูกนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าด้วยระบบคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้สิ่งแปลกปลอมหรือผงขัดเข้าไปปะปนภายในตัวอย่างมอร์ตาร์

2.4.7.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope)

ภาพถ่าย OM ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยภาพได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Dino-lite optical microscope รุ่น AM4115TF เมื่อได้ภาพถ่ายดังกล่าวมาแล้วก็จะสามารถทำการวิเคราะห์เชิงพื้นที่เพื่อประเมินในเชิงปริมาณได้

3. ผลการศึกษา

3.1 ความสามารถกักเก็บและคายน้ำของมวลรวมเบาสังเคราะห์

3.1.1 อัตราการดูดซึมน้ำ

สำหรับอัตราการดูดซึมน้ำของมวลรวมเบาสังเคราะห์ที่อายุ 3 วัน มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 20.84 ส่วนความถ่วงจำเพาะที่สภาวะเปียกผิวแห้ง (WSD) เท่ากับ 1.50

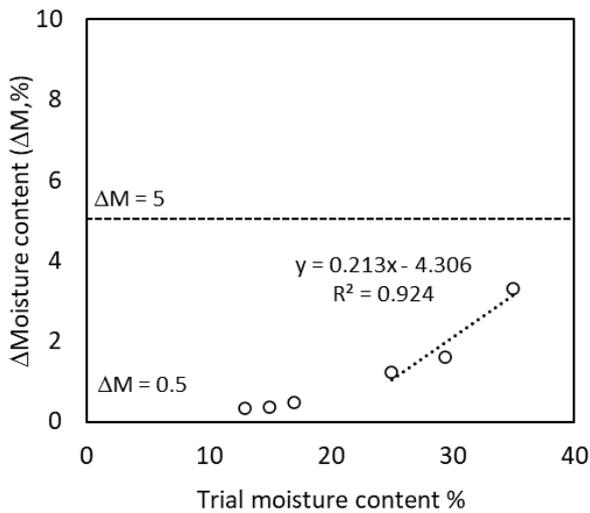
3.1.2 ความสามารถในการกักเก็บน้ำ

หลังจากทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ ทำให้ได้ค่าที่ใช้ในการคาดคะเนปริมาณความชื้น ที่จะไปนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำ ดังรูปที่ 4 มีค่าเท่ากับ 20.22 ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราการดูดซึมน้ำเล็กน้อย

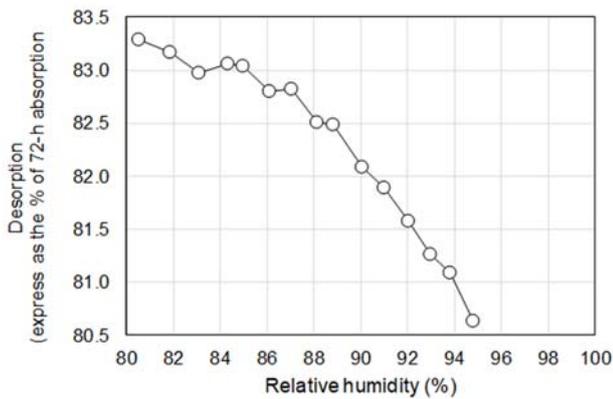
3.1.3 ความสามารถในการคายน้ำ

รูปที่ 5 แสดงความสามารถในการคายน้ำของมวลรวมเบาสังเคราะห์จากระดับความชื้นสัมพัทธ์ 95% ลดลงไปถึงระดับความชื้นสัมพัทธ์ 80% พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95% มวลรวมเบาสังเคราะห์มีความสามารถในการคายน้ำเท่ากับร้อยละ 80.7 และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80% มวลรวมเบาสังเคราะห์มีความสามารถในการคายน้ำเท่ากับร้อยละ 83.3% ทั้งนี้การคายน้ำ

ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 94% นับเป็นอัตราส่วน 0.1693 โดยน้ำหนักของมวลรวมเบาสังเคราะห์ในสภาวะเปียกผิวแห้ง



รูปที่ 4 ค่าความสามารถการกักเก็บน้ำ (water retainability) ของมวลรวมเบาสังเคราะห์



รูปที่ 5 ร้อยละการคายน้ำของมวลรวมเบาสังเคราะห์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 80% ถึง 95%

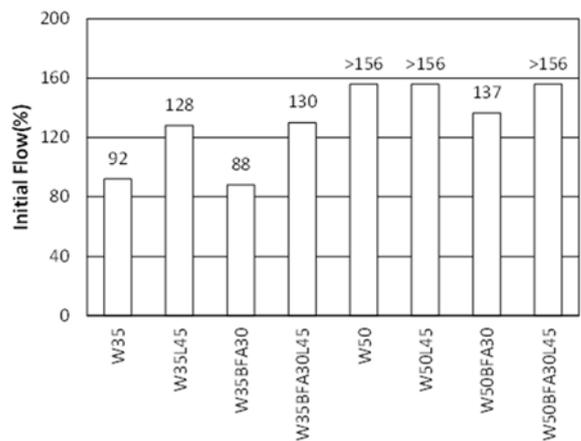


รูปที่ 6 ตัวอย่างมอร์ตาร์ สำหรับทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวในสภาวะควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ

3.2.1 อัตราการไหล

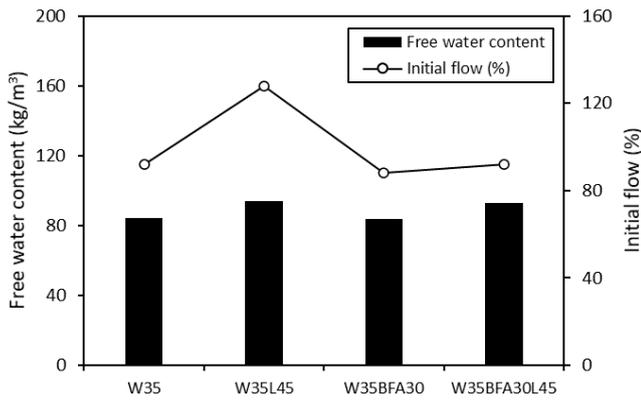
รูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการไหลแผ่เริ่มต้น ในกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มีค่าเท่ากับ 0.35 มอร์ตาร์ที่ใช้มวลรวมเบาสังเคราะห์แทนที่ทราย (W35L45) จะมีค่าการไหลแผ่เริ่มต้นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม (W35) นอกจากนี้ยังพบว่าการไหลแผ่เริ่มต้นจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าลอย เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่เป็นทรงกลม ทำให้การขัดกันระหว่างปูนซีเมนต์และอนุภาคของแข็งมีค่าลดลงและทำให้มอร์ตาร์มีการลื่นไหลที่ดี และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35BFA30L45) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ ขณะที่มอร์ตาร์ที่มี w/b เท่ากับ 0.50 มีค่าการไหลแผ่เริ่มต้นมากกว่าร้อยละ 156 เกือบทุกสัดส่วนผสม ยกเว้นมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (W50BFA30) ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในมอร์ตาร์ที่มีมวลรวมเบาสังเคราะห์เป็นวัสดุผสมภายใน มีการไหลแผ่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ลักษณะผิวมน ไม่มีเหลี่ยมมุม และมีรูปร่างทรงกลม ของมวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดนี้ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์หล่อลื่น (Lubrication effect) [20] ในมอร์ตาร์สด

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำอิสระในกลุ่มมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 ตามหลักการในงานวิจัยที่ผ่านมา [20] เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำอิสระ พบว่าปริมาณน้ำทั้งหมดในส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35L45) มีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มอร์ตาร์ส่วนผสมนี้มีอัตราการไหลที่มากที่สุด

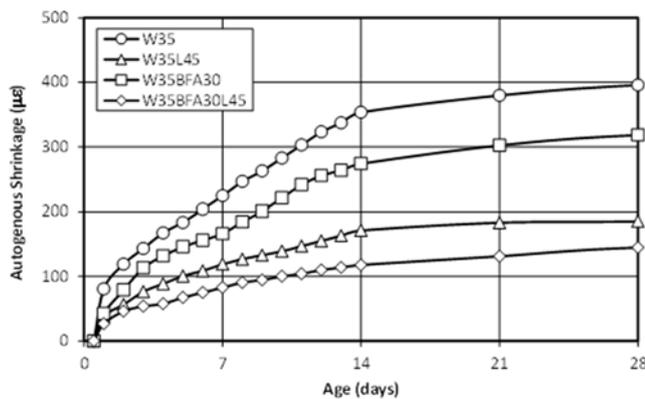


รูปที่ 7 การไหลแผ่เริ่มต้น

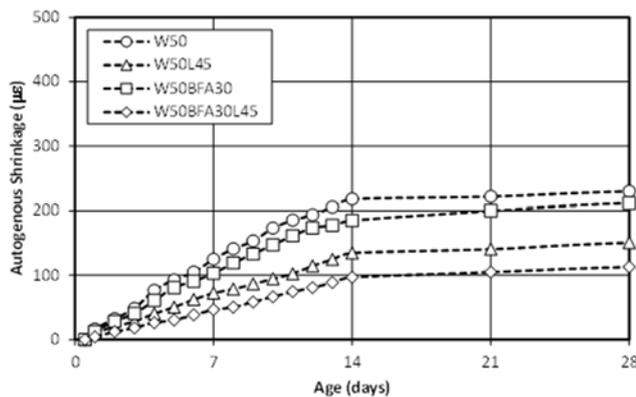
3.2 พฤติกรรมของมอร์ตาร์



รูปที่ 8 ปริมาณน้ำอิสระของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 กับการไหลแผ่เริ่มต้น



รูปที่ 9 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35



รูปที่ 10 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

3.2.2 การหดตัว

3.2.2.1 การหดตัวแบบออโตจีนัส

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบการหดตัวของมอร์ตาร์ควบคุม (W35) มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (W35BFA30) มอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35L45) และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35BFA30L45) เมื่อพิจารณาการ

หดตัวจะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ควบคุม (W35) มีการหดตัวแบบออโตจีนัสมากที่สุด และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (W35BFA30) มอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35L45) และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35BFA30L45) มีการหดตัวน้อยลงตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดขึ้นมากในช่วงอายุต้น และหลัง 14 วันไปแล้วมีอัตราการหดตัวแบบออโตจีนัสลดลง หากพิจารณาช่วงเวลาระหว่างที่ตัวอย่างมีอายุ 12 ชั่วโมง ถึงอายุ 14 วัน การหดตัวของมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์มีค่าการหดตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากการคายน้ำของมวลรวมเบาสังเคราะห์สู่ซีเมนต์เฟสบริเวณใกล้เม็ดมวลรวมเบาสังเคราะห์ทำช่วยเพิ่มความชื้นให้กับช่องโพรงคาปิลลารีหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้น และหากพิจารณาในที่อายุ 28 วัน การหดตัวของทั้งสามส่วนผสม (W35BFA30 W35L45 และ W35BFA30L45) กับมอร์ตาร์ควบคุม (W35) การหดตัวแบบออโตจีนัสลดลงจาก 391 µ เป็น 319 186 145 µ คิดเป็นร้อยละ 20 53 และ 64 ตามลำดับ การหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (W35BFA30) มีค่าการหดตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (W35) เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นลดลง การหดตัวแบบออโตจีนัสจึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการหดตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35BFA30L45) กับมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (W35BFA30) พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35BFA30L45) มีค่าการหดตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (W35BFA30) เนื่องจากการใช้เถ้าลอยช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นและมวลรวมเบาสังเคราะห์ช่วยรักษาระดับความชื้นในซีเมนต์เฟสต้นขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำช่วยลดการหดตัวแบบออโตจีนัสลงได้ดียิ่งขึ้น

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบการหดตัวของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.50 เมื่อพิจารณาการหดตัวพบว่ามีความโน้มช่นเดียวกันกับมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 กล่าวคือ จะเห็นได้ว่ามอร์ตาร์ควบคุม (W50) มีการหดตัวแบบออโตจีนัสมากที่สุด และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (W50BFA30) มอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W50L45) และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W50BFA30L45) มีการหดตัวน้อยลงตามลำดับ การหดตัวแบบออโตจีนัสของทั้งสามส่วนผสมข้างต้นมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมอยู่คิดเป็นร้อยละ 8 34 และ 51 ตามลำดับ

3.2.2.2 การหดตัวโดยรวม

รูปที่ 11 และรูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบการหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 และ 0.50 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่า มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมมีการหดตัวน้อยในช่วงสัปดาห์แรก เนื่องจากตัวอย่างถูกหุ้มอยู่ และจะเห็นได้ว่า หลังจากอายุ 7 วัน การหดตัวโดยรวม

เพิ่มขึ้นอย่างมากและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการนำแผ่นพลาสติกและแผ่นอลูมิเนียมออก

การหดตัวของมอร์ตาร์ในกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าถ้าลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ (W35BFA30) มีการหดตัวโดยรวมน้อยที่สุดเท่ากับ 1025 μ ขณะที่มวลรวมเบาสังเคราะห์ทำให้การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ไม่ว่าจะมีส่วนผสมของเถ้าลอยหรือไม่ก็ตาม

เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมมอร์ตาร์ในกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.50 กับมอร์ตาร์ควบคุม (W50) พบว่า มอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยผสมร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ มีการหดตัวโดยรวมมากที่สุด รองลงมาคือมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ซึ่งมีการหดตัวโดยรวมเท่ากับ 1042 μ 1151 μ และ 1111 μ ตามลำดับ ทั้งสามส่วนผสมมีการหดตัวโดยรวมมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ที่มีการหดตัวโดยรวมเพียง 950 μ ดังแสดงในรูปที่ 12

3.2.2.3 การหดตัวแบบแห้ง

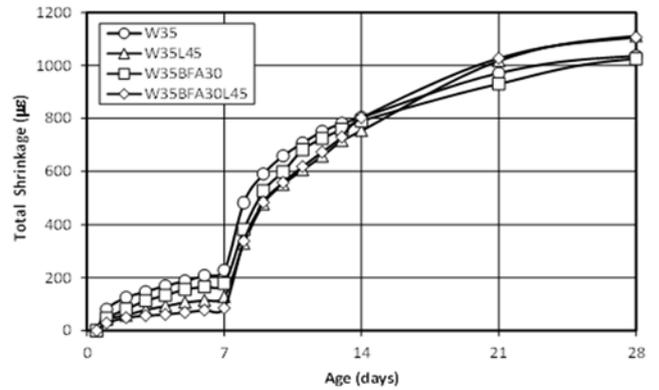
ในการศึกษานี้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ได้มาจากการคำนวณความแตกต่างระหว่างการหดตัวโดยรวมกับการหดตัวแบบอโตจีนัส โดยความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งและอายุของตัวอย่างทดสอบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 13 (กรณีมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.35) และรูปที่ 14 (กรณีมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5) ซึ่งเห็นได้ว่าทุกส่วนผสมในทั้งสองกรณีดังกล่าวมีการหดตัวแบบแห้งมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีสาเหตุมาจากปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสมที่มากกว่า และทำให้มีการระเหยของความชื้นมากขึ้น

จากรูปที่ 13 ในกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 เห็นได้ว่าการใช้เถ้าลอยผสมร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ทำให้มอร์ตาร์ (W35BFA30L45) มีการหดตัวแบบแห้งมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 962 μ ส่วนมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (W35BFA30) มีค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยลงตามลำดับคือ 926 μ และ 707 μ ซึ่งยังคงมีค่าการหดตัวแบบแห้งมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม อยู่ร้อยละ 50 44 และ 10 ตามลำดับ

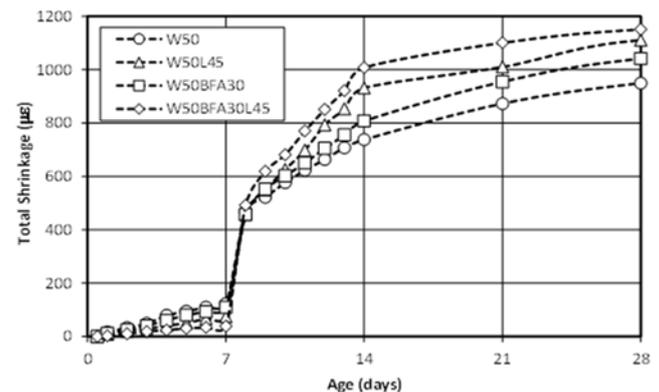
การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5 ในรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่าการหดตัวแบบแห้งในส่วนผสมนี้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับส่วนผสมมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.35 กล่าวคือมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอยผสมร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์ทำให้มอร์ตาร์ (W50BFA30L45) มีการหดตัวแบบแห้งเท่ากับ 1039 μ ส่วนมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าการหดตัวแบบแห้งลดลงตามลำดับ 960 μ และ 720 μ ซึ่งยังคงมีค่า

การหดตัวแบบแห้งมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม คิดเป็น ร้อยละ 44 33 และ 15 ตามลำดับ

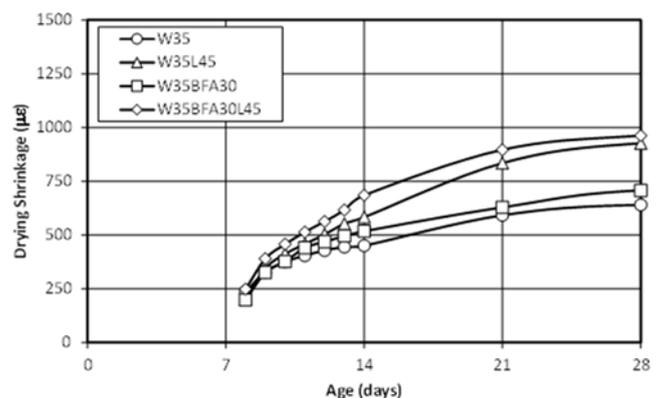
จากผลการทดสอบพบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยลดการหดตัวแบบอโตจีนัส แต่ทำให้การหดตัวโดยรวมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกับการหดตัวแบบแห้ง



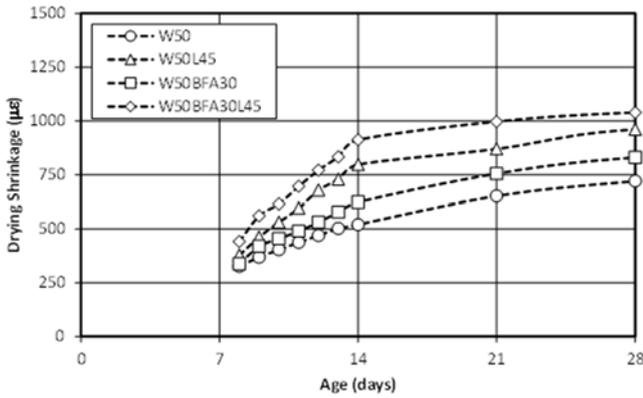
รูปที่ 11 การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35



รูปที่ 12 การหดตัวโดยรวมของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



รูปที่ 13 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35



รูปที่ 14 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

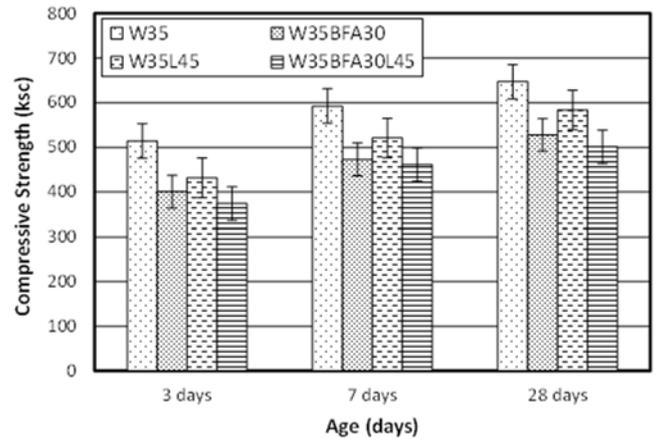
ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวอาจเป็นผลเนื่องมาจากที่มีการป้องกันการระเหยเป็นระยะเวลาเพียง 7 วัน ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับแก้ลดหย่อนในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในระดับที่จะทำให้มอร์ตาร์มีความสมบูรณ์เต็มที่ จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระเกิดการระเหยได้มากกว่าในส่วนผสมที่มีแก้ลดหย่อน

3.2.3 กำลังอัด

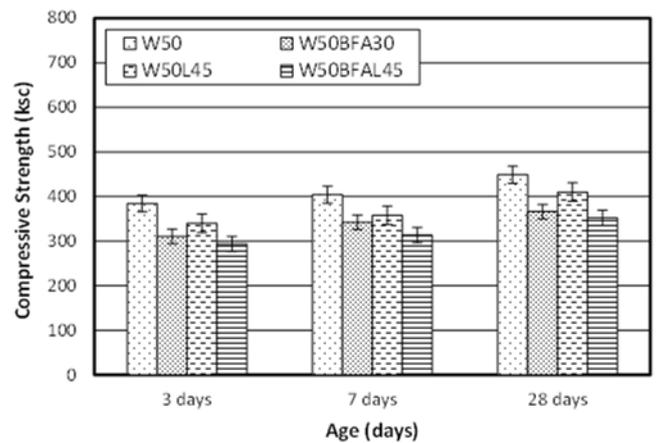
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอายุการบ่มมอร์ตาร์ที่ผสมแก้ลดหย่อน (W35BFA30) มวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35L45) และแก้ลดหย่อนมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35BFA30L45) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 15 (มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35) และ รูปที่ 16 (มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ทุกส่วนผสมมอร์ตาร์มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยมอร์ตาร์ที่ให้กำลังอัดรองลงมาจากมอร์ตาร์ควบคุม คือ มอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ ส่วนมอร์ตาร์ผสมแก้ลดหย่อน และมอร์ตาร์ที่มีแก้ลดหย่อนร่วมกับมวลรวมเบาสังเคราะห์มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน สำหรับการใช่มวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลนมีกำลังอัดที่ 3 7 และ 28 วัน ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากมวลรวมเบาสังเคราะห์เป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง และมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าทราย มอร์ตาร์ที่ใช่มวลรวมเบาสังเคราะห์แทนที่ทรายร้อยละ 45 ทำให้ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลง จึงทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงเนื่องจากความพรุนของมอร์ตาร์

3.2.4 Compensation Ratio (CR)

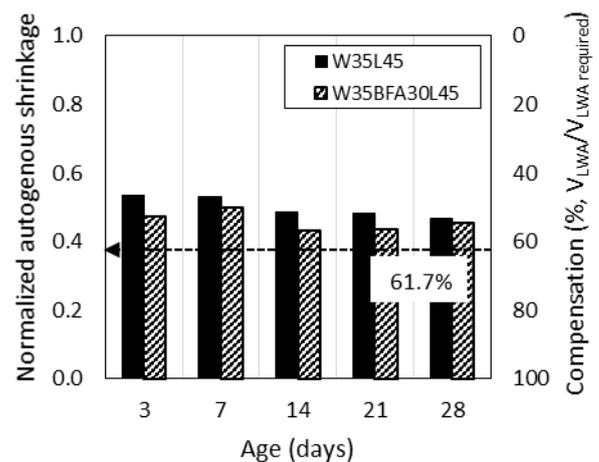
รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง normalized autogenous shrinkage ที่อายุ 3 7 14 21 และ 28 วัน พบว่าเมื่อใช่มวลรวมเบาสังเคราะห์เป็นวัสดุบ่มภายใน มีการลดลงของการหดตัวแบบบอโตจีนัสลดลงในมอร์ตาร์ที่มีมวลรวมเบาสังเคราะห์เป็นวัสดุบ่มภายใน ไม่ว่าจะผสมแก้ลดหย่อนหรือไม่ (ค่า normalized autogenous shrinkage มีค่าน้อยกว่า 1)



รูปที่ 15 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.35



รูปที่ 16 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง normalized autogenous shrinkage ที่อายุต่าง ๆ กับ compensation ratio (CR)

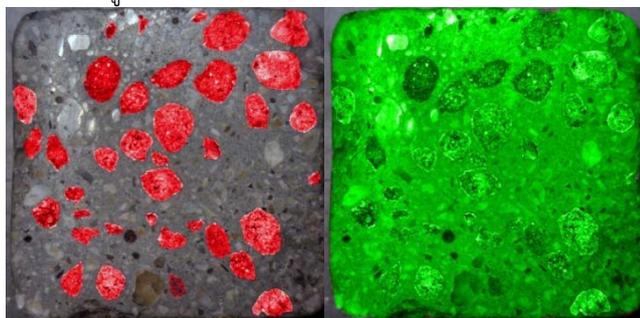
อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่า normalized autogenous shrinkage ที่อายุต่าง ๆ มาพิจารณาควบคู่กับ compensation ratio (CR) จะเห็นได้ว่าค่า normalized autogenous shrinkage ที่ได้จากการทดสอบหาการหดตัวของบ่อโตนีตนั้นยังคงมีค่ามากกว่าที่คาดหวังไว้ ทั้งนี้เพราะในการออกแบบสัดส่วนผสมได้มีการกำหนด compensation ratio (CR) ไว้ที่ 61.7% แต่จากการทดสอบสามารถเทียบได้ว่าผลของการชดเชย (compensation effect) นั้นน้อยกว่า 60% ในทุกกรณี

3.2.5 ภาพ OM ของมวลรวมเบาสังเคราะห์ในมอร์ตาร์ จากการวิเคราะห์ด้วยภาพ (image analysis)

การวิเคราะห์ด้วยภาพถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อประกอบการอภิปรายกลไกการทำงานของมวลรวมเบาสังเคราะห์ต่อการเปลี่ยนแปลงการหดตัวของมอร์ตาร์ ทั้งการหดตัวของบ่อโตนีตและการหดตัวของบ่อแห้ง

รูปที่ 18 เป็นรูปถ่ายที่แสดงลักษณะภายในมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของมวลรวมเบาสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ จากการสังเกตพบว่าภายในโพรงช่องว่างในเม็ดมวลรวมเบาสังเคราะห์ส่วนใหญ่ นั้นมีปูนซีเมนต์เติมเต็มอยู่ ซึ่งหมายความว่าปูนซีเมนต์เคลื่อนตัวเข้าไปในโพรงดังกล่าวระหว่างการผสมหรือภายหลังการผสม

การเคลื่อนตัวของปูนซีเมนต์เข้าไปสู่โพรงในมวลรวมเบาสังเคราะห์มวลเบานั้นน่าจะเกิดในช่วงก่อนที่มอร์ตาร์ก่อตัวและน่าจะทำให้เกิดผลสำคัญอย่างน้อยสองประการ ประการแรกคือการที่ปูนซีเมนต์เข้าไปในโพรงจะทำให้พื้นที่อยู่ในโพรงนั้นออกมาจากโพรงเพราะโดนแทนที่ด้วยอนุภาคปูนซีเมนต์ ด้วยเหตุดังกล่าวปริมาณน้ำสุทธิตี่จะทำงานตามกลไกการบ่มภายในจึงมีน้อยลง อีกประการหนึ่ง น้ำที่ออกมาจากโพรงนั้นก็น่าจะผสมเข้ากับซีเมนต์เพสต์ในระบบ ซึ่งน่าจะช่วยให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานโดยเฉลี่ยมีค่ามากขึ้นเล็กน้อย และน่าจะส่งผลในเชิงลบต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์และมีความเป็นไปได้ที่จะมีส่วนทำให้การหดตัวของบ่อแห้งของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเมื่อมีมวลรวมเบาสังเคราะห์อยู่ในส่วนผสม



พื้นที่มวลรวมเบาสังเคราะห์ที่มีซีเมนต์เพสต์ที่ภายใน
รูปที่ 18 ภาพถ่ายมอร์ตาร์ผสมมวลรวมเบาสังเคราะห์ (W35L45) ที่อายุ 28 วัน

ทั้งนี้ในมาตรฐานการออกแบบคำนวณคอนกรีตให้มีสมบัติการบ่มภายใน (Internal curing) นั้นยังไม่ได้มีการพิจารณาโอกาสที่จะเกิดการเคลื่อนตัวของอนุภาควัสดุประสานเข้าไปในโพรงของวัสดุอุ้มน้ำที่ใช้สำหรับบ่มภายในและเหตุดังกล่าวน่าจะเป็นหนึ่งในส่วนสำคัญที่ทำให้ค่า compensation ratio ที่พบจากการทดสอบในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการของ ASTM C1761

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 การใส่มวลรวมเบาสังเคราะห์นี้ช่วยเพิ่มการไหลเริ่มต้นของมอร์ตาร์ได้ เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระและรูปร่างของมวลรวมเบาสังเคราะห์ทำให้เกิดระบบหล่อลื่น (Lubrication effect)

4.2 มวลรวมเบาสังเคราะห์ที่ใช้สามารถลดการหดตัวของบ่อโตนีตของมอร์ตาร์ได้ เนื่องจากกลไกการบ่มภายใน แต่ระดับ compensation ratio ที่วัดได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณตาม ASTM C1761 เล็กน้อย

4.3 การใช้มวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดเม็ดโคลนแทนที่ทรายเป็นวัสดุบ่มภายในทำให้การหดตัวโดยรวมและการหดตัวของบ่อแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลรวมเบาสังเคราะห์เป็นวัสดุพรุนทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนมากขึ้นไปด้วย หลังจากนำวัสดุห่อหุ้มผิวตัวอย่างมอร์ตาร์ออกเพื่อให้เผชิญสภาวะแห้ง มอร์ตาร์ซึ่งมีขนาดเล็กมากก็ยิ่งสูญเสียน้ำสู่สภาวะแวดล้อมมากขึ้น

4.4 การใส่มวลรวมเบาสังเคราะห์ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 3 7 และ 28 วัน เนื่องจากมวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดนี้เป็นวัสดุพรุน เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มวลรวมเบาสังเคราะห์ชนิดนี้ทำให้มอร์ตาร์มีความพรุนเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นมอร์ตาร์ลดต่ำลงอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยแก่ผู้เขียนภายใต้โครงการวิจัย เลขที่ CE-KMUTT 5904 และโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) เลขที่ PHD58K0109

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. J. Pease, 2005, The role of shrinkage reducing admixtures on shrinkage, stress development and cracking, M.A. thesis, Purdue University, Denmark.
- [2] L. Wu et al., "Autogenous shrinkage of high performance concrete: a review", Construction and Building Materials, Vol. 149, pp.62-75, 2017.
- [3] G. Appa Rao, "Long-term drying shrinkage of mortar – influence of silica fume and size of fine aggregate",

- Cement and concrete research, Vol. 31, pp.171-175, 2001.
- [4] J. Zhang et al., "Experimental and theoretical studies on shrinkage of concrete at early-ages", ASCE Journal Materials Civil Engineering, Vol. 23(3), pp. 312- 320, 2011.
- [5] J. Zhang et al., "Micromechanical modelling on autogenous and drying shrinkage on concrete", Construction and Building Material, 29(3), pp. 230-240, 2012.
- [6] D. Cusson and T. Hoogeveen, "Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking", Cement and concrete research, Vol. 38, pp.757-765, 2008.
- [7] ASTM., "Standard Specification for Lightweight Aggregate for internal curing of concrete" ASTM C1761, 2015.
- [8] ACI, "Guide to curing concrete" ACI 308R, Farmington Hills, USA, pp. 31, 2001.
- [9] K. Kovler, O.M.Jensen, "Internal curing of concrete: state-of-the-art", RILEM 196-ICC, France, pp. 139, 2007.
- [10] S. Weber, H.W. Reinhardt, "A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing", Advanced Cement Based Materials 6, Vol. 2, pp. 59-68, 1997.
- [11] S. Ghourchian et al., "An investigation use of zeolite aggregates for internal curing of concrete", Construction and Building Materials, Vol. 40, pp.135-144, 2013.
- [12] A.L. Bush et al, "Section 11.20: Lightweight aggregate manufacturing", Mineral Product Industry, 1, 5th Ed, pp. 181 - 190, 2006.
- [13] R. Kasemchaisiri and S. Tangtermsirikul., "A method to determinewater retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete", Construction and Building Materials, Vol. 21, pp.1322-1334, 2007.
- [14] V.H. Villarreal, and D.A Crocker, "Better pavements through internal hydration", Concrete International, Vol. 29(2), pp. 32-36, 2007.
- [15] D.P. Bentz, "Internal curing of high performance blended cement mortars: autogenous deformation and compressive strength development", ACI Materials Journal, Vol. 104(4), pp. 408-414 , 2007.
- [16] D.P. Bentz et al., "Influence of internal curing on properties and performance of cement-based repair materials", National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, pp. 21-22, 2015.
- [17] J. Kerby, 2013, Internal curing using lightweight fine aggregate, M.A. Thesis, University of Arkansas, Fayetteville.
- [18] Y. Han et al., "Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage of high strength concrete slabs", Construction and Building Materials, 61, pp.41-49, 2014.
- [19] อรรถสิทธิ์ แสงระยับ, 2560, ผลกระทบของชนิดแก้ว ลอยต่อสมบัติเพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีต,วิทยานิพนธ์ สาขา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 139 หน้า.
- [20] S. Tangtermsirikul et al., "A model for predicting workability of fresh mortar and concrete", Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 676, 51, pp.149-157, 2001.
- [21] A. Bentur et al., "Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates", Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp.1587-1591, 2001.
- [22] T. Deboodt et al., "Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous shrinkage deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete", Construction and Building Materials, Vol. 119, pp.41-49, pp. 53-60, 2016.
- [23] S. Zhutovsky et al., "Effect of hybrid curing on cracking potential high-performance concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 54, pp.36-42, 2013.