อิทธิพลของปูนซีเมนต์ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของเถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์
Effect of Cement on Unit Weight and Compressive Strength of Biomass Ash Geopolymer Mortar

ธาฬิณ ดีสวัสดิ์[1], เสริมศักดิ์ ติยะแสงทอง[2], เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[3], วิศิษฏ์ศักดิ์ ทับยัง[4], นันทชัย ชูศิลป์[5] และ จุฑามาศ ลักษณะกิจ[6]

[1,2,3] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
[4,5,6]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
**Corresponding author; E-mail address: Tharin.de@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของเถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เถ้าชีวมวลเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้า จ.สงขลา งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 50:50:0, 50:45:5, 50:40:10, 50:35:15, 50:30:20, 50:25:25 และ 50:20:30 อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 70:30 และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ทดสอบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของเถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักของเถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างเถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 340 ksc ที่อัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 50:25:25

คำสำคัญ: เถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์, กำลังอัด, หน่วยน้ำหนัก, โซเดียมซิลิเกต, โซเดียมไฮดรอกไซด์

Abstract

This research studied the unit weight and compressive strength of biomass ash geopolymer mortar. Biomass ash is a by-product of a power plant in Songkhla province. This research used the sand to biomass ash to Portland cement ratios of 50:50:0, 50:45:5, 50:40:10, 50:35:15, 50:30:20, 50:25:25 and 50:20:30, sodium silicate (Na_2SiO_3) to sodium hydroxide (NaOH) ratio of 70:30, and NaOH concentration of 8 molar. The unit weight and compressive strength of biomass ash geopolymer mortar sample were investigated at curing time of 7 days. The test results showed that the unit weight of biomass ash geopolymer mortar increased as cement content increased. The maximum compressive strength of the biomass ash geopolymer mortar sample was 340 ksc at the sand to biomass ash to Portland cement ratios of 50:25:25.

Keywords: Biomass ash Geopolymer, Compressive strength, Unit Weight, Sodium silicate, Sodium hydroxide

1. คำนำ

ในปัจจุบันแนวคิดของการจัดการสิ่งแวดล้อมโดยการนำเอาผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมหรือของเสียที่เกิดขึ้นมาใช้ประโยชน์เริ่มมีเพิ่มมากขึ้น ผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมและของเหลือทิ้งเช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย เป็นของเสียที่เหลือทิ้งในประเทศไทย ดังนั้นการนำเอาวัสดุผลพลอยได้หรือวัสดุเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์ จึงนับได้ว่าเป็นแนวทางที่ดีในการจัดการสิ่งแวดล้อม สำหรับในงานด้านการก่อสร้างมีการนำเอาวัสดุที่เป็นผลพลอยได้หรือวัสดุเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ และมีเริ่มมีการนำเอาของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาให้ประโยชน์ในงานก่อสร้างเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์และยังคงคุณสมบัติทางกลที่ดีเช่นกำลังรับแรงอัดรวมถึงคุณสมบัติด้านความทนทานเช่นทนทานต่อกรดทนทานต่อการเกิดคาร์บอเนชั่นได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์วัสดุชนิดนี้เรียกว่า “จีโอโพลิเมอร์” [1]

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง เนื่องด้วยปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [2] ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลงอย่างแพร่หลาย ซึ่งจีโอโพลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา [3]

เถ้าชีวมวล เป็นของที่เหลือจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าชีวมวล มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตได้เนื่องจากเถ้าชีวมวลมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นส่วนประกอบหลักทางเคมี สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสานมวลรวมในคอนกรีตและให้ผลดีต่อกำลังอัด

สารชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่หาได้ในประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก อาทิ แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อยซังข้าวโพด กากและกะลาปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น รวมถึงมูลสัตว์ ของเสียจากการแปรรูปสินค้าเกษตร น้ำเสียจากชุมชน และขยะ ซึ่งชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ใน

กระบวนการผลิตไฟฟ้า ประเทศไทยมีศักยภาพที่จะนำมาผลิต พลังงานเทียบเท่ากับการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 3,000 เมกะวัตต์ (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2546) ชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิยมเรียกว่าเชื้อเพลิงชีวมวล

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของเถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ 50:50:0, 50:45:5, 50:40:10, 50:35:15, 50:30:20, 50:25:25 และ 50:20:30 อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 70:30 และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ ทดสอบกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักของเถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบและการเตรียมตัวอย่าง

2.1.1 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียดหรือทรายที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำธรรมชาติ ทำการล้างน้ำเพื่อเอาส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ ดินเหนียว และสิ่งเจอปนอื่น ๆ ออก แล้วนำมาอบแห้งและนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

2.1.2 เถ้าชีวมวล

เถ้าชีวมวล (Biomass Ash ; BA) ซึ่งเถ้าชีวมวลที่นำมาใช้เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนเพื่อใช้ภายในโรงงานในจังหวัดสงขลา จากตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวล ซึ่งมีส่วนประกอบหลักได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 41.61 , 21.94 , 9.31 , 7.05 และ 5.81 ตามลำดับ ซึ่งไม่สามารถจำแนกเป็นเถ้าลอย Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้ เนื่องจากผลรวมของ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันแล้วได้ไม่ถึงร้อยละ 70 และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ต้องไม่เกินร้อยละ 4 ตามข้อกำหนด [6]

2.1.3 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C-150 [7] ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 คุณสมบัติทางเคมีแสดงในตารางที่ 1 ผลรวมของปริมาณธาตุ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีค่าเท่ากับร้อยละ 30.23 และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีปริมาณร้อยละ 61.62

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชีวมวล **(BA)** และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 **(PC)**

Chemical composition (%)	BA	PC
SiO_2	41.61	22.30
Al_2O_3	9.31	4.23
Fe_2O_3	5.81	3.70
CaO	21.94	61.62
MgO	3.80	2.21
SO_3	5.40	4.62
K_2O	7.05	0.40
Cl	3.39	-
LOI	1.69	8.91

2.1.4 สารละลายด่างที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การวิจัยครั้งนี้ใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกร็ด โดยจะผสมเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำที่ความเข้มข้นเท่ากับ 8 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 70:30

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 50:50:0, 50:45:5, 50:40:10, 50:35:15, 50:30:20, 50:25:25 และ 50:20:30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 70:30 ทุกอัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ โดยควบคุมค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110±5 ทุกอัตราส่วนผสม และทดสอบระยะเวลาการก่อตัว โดยใช้เข็มมาตรฐานแบบไวแคต ตามมาตรฐานASTM C191 [10]

นำเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำทรายเข้ามาผสมจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน เติมสารโซเดียมซิลิเกตที่ผสมสารโซเดียมเกตไฮดรอกไซด์คนจนสารละลายเข้ากันได้ดีแล้ว จากนั้นเทลงในวัสดุที่เตรียมไว้ข้างต้น คนส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่มีการหยุดพัก จากนั้นเทส่วนผสมทั้งหมดลงแบบหล่อพลาสติกขนาด 5×5×5 ซม. ใช้ระยะเวลารวมกันทั้งหมดไม่เกิน 5 นาที บ่มตัวอย่างไว้ในแบบหล่อประมาณ 24 ชั่วโมง โดยมีพลาสติกคลุมไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น หลังจากนั้นแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อแล้วจึงนำแผ่นพลาสติกใส่ห่อหุ้มตัวอย่างเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นอีกครั้ง จากนั้นบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องระยะเวลา 7 วัน แล้วจึงแกะพลาสติกใสออก วัดขนาดและชั่งน้ำหนักตัวอย่าง นำไปทดสอบกำลังอัด (Compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C109 [11]

3. ผลการทดสอบ

3.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังแสดงในตารางที่ 2 ระยะเวลาก่อตัวปลายมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ โดยระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ S50-BA50-PC0 ที่อัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวล 50:50 มีค่าเท่ากับ 102 และ 192 นาที และ S50-BA45-PC5 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:45:5 มีค่าเท่ากับ 40 และ 150 นาที และ S50-BA40-PC10 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:40:10 มีค่าเท่ากับ 8 และ 65 นาที และ S50-BA35-PC15 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:35:15 มีค่าเท่ากับ 7 และ 22 นาที และ S50-BA30-PC20 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:30:20 มีค่าเท่ากับ 5.5 และ 19 นาที และ S50-BA25-PC25 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:25:25 มีค่าเท่ากับ 4.5 และ 17 นาที และ S50-BA20-

PC30 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:20:30 มีค่าเท่ากับ 1 และ 21 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ระยะเวลาการก่อตัวต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Symbol	Initial Setting Time (min)	Final Setting Time (min)
S50-BA50-PC0	102	192
S50-BA45-PC5	40	150
S50-BA40-PC10	8	65
S50-BA35-PC15	7	22
S50-BA30-PC20	5.5	19
S50-BA25-PC25	4.5	17
S50-BA20-PC30	1	21

3.2 หน่วยน้ำหนัก

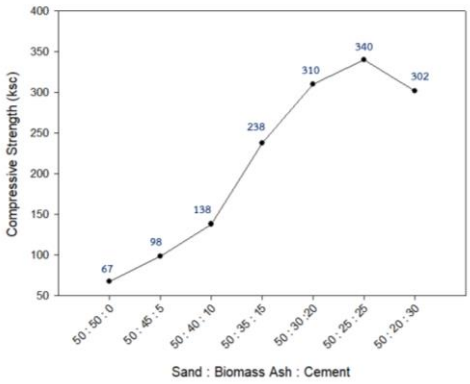
หน่วยน้ำหนักของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าหน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ S50-BA50-PC0 ที่มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวล 50:50 มีค่าเท่ากับ 1,773.41 กก./ลบ.ม. และ S50-BA45-PC5 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:45:5 มีค่าเท่ากับ 1,858.19 กก./ลบ.ม. และ S50-BA40-PC10 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:40:10 มีค่าเท่ากับ 1,895.07 กก./ลบ.ม. และ S50-BA35-PC15 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:35:15 มีค่าเท่ากับ 1,907.63 กก./ลบ.ม. และ S50-BA30-PC20 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:30:20 มีค่าเท่ากับ 1,931.81 กก./ลบ.ม. และ S50-BA25-PC25 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:25:25 มีค่าเท่ากับ 1,951.10 กก./ลบ.ม. และ S50-BA20-PC30 มีอัตราส่วนทรายต่อเถ้าชีวมวลต่อปูนซีเมนต์ 50:20:30 มีค่าเท่ากับ 2,078.97 กก./ลบ.ม. ตามลำดับ หน่วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของส่วนละเอียดหรือปูนซีเมนต์จะเข้าไปเติมเต็มโพรงอากาศที่อยู่ในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ทำให้อัดแน่นมากขึ้น และแข็งแกร่งมากขึ้น [12]

ตารางที่ 3 หน่วยน้ำหนักของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Symbol	Unit Weight (kg/m^3)
S50-BA50-PC0	1,773.41
S50-BA45-PC5	1,858.19
S50-BA40-PC10	1,895.07
S50-BA35-PC15	1,907.63
S50-BA30-PC20	1,931.81
S50-BA25-PC25	1,951.10
S50-BA20-PC30	2,078.97

3.3 กำลังรับแรงอัด

รูปที่ 1 แสดงกำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Cement Hydration) ที่มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากเกินความจำเป็น ทำให้กำลังอัดเริ่มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แข็งตัวเร็วเกินไป จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เกิดการแตกร้าวได้ง่าย [13]



รูปที่ 1 กำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

4. บทสรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของปูนซีเมนต์ต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของเถ้าชีวมวล จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน สรุปได้ดังนี้

1) ระยะเวลาการก่อตัวต้น และระยะเวลาการก่อตัวปลายมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าชีวมวลด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์

2) หน่วยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณของส่วนละเอียดหรือปูนซีเมนต์เข้าไปเติมเต็มโพรงอากาศที่อยู่ในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ทำให้อัดแน่นมากขึ้น และแข็งแกร่งมากขึ้น

3) กำลังรับแรงอัดของเถ้าชีวมวลและปูนซีเมนต์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Cement Hydration) ที่มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากเกินความจำเป็น ทำให้กำลังอัดเริ่มลดลง เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แข็งตัวเร็วเกินไป จึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เกิดการแตกร้าวได้ง่าย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ในการในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] เกียรติสุดา สมนา และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2558). ผลของอัตราส่วน Ca:Si และ Na:Al ต่อกำลังอัดและลักษณะโครงสร้างผลึกของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง. วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 8, ฉบับที่ 3, หน้า 115.

[2] VM. Malhotra,“Introduction: sustainable development and concrete technology”,Concrete International, 24, 2002, pp. 22.

[3] P. Paisitsrisawat and U. Rattanasak, “Effect of silica fume on properties of fluidizer bed combustion (FBC) fly ash geopolymer”, The Journal of Industrial Technology, 9(1), 2013, In press (in Thai).

[4] สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์ ธนากร ภูเงินขำ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2556). สมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, หน้า 99.

[5] สำเนียง องสุพันธ์กุล ภูวดล โพธิ์ปักษ์ และ จิรัฐิติ์ บรรจงศิริ (2554). การศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ของเถ้าชีวมวลผสมปูนซีเมนต์. รายงานการวิจัยสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตรและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.

[6] ASTM C618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, 2015.

[7] American Society for Testing and Material (2002). ASTM C109. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. ASTM International.

[8] ปัทมาวดี แก้วระวัง, ทศพล ศรีมาคำ และ ธนากร ภูเงินขำ (2563). ความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563.

[9] ASTM C1437, (2007). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, American Society for Testing and Materials.

[10] [10]ASTM C 191, (2008).Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by vicat needle”, American Society for Testing and Materials.

[11] ASTM C109. (2002). Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube speciments), Annual Book of ASTM Standard, Vol.04.01.

[12] พัชรพล โพธิ์ศรี (2557). การพัฒนาของคอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบา. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[13] อาบีเด็ง ฮาวา (2551). สมบัติของคอนกรีตมวลเบาหินพัมมิซผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราและเถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.