

## ความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน

### Workability and Compressive Strength of Geopolymer Mortar Made From High-Calcium Fly Ash Containing Cement and Palm Oil Fuel Ash

ปัทมาวดี แก้วระวัง<sup>1,\*</sup> ทศพร ศรีคำมา<sup>2</sup> และ ธนากร ภูเงินข้า<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> หน่วยงานวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา

\*Corresponding author; E-mail address: nun07032539@gmail.com

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ในเถ้าลอยร้อยละ 0 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในเถ้าลอยร้อยละ 0 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้สารกันซึมเป็นสารผสมเพิ่มในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นสารละลายต่างในการทำปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และทำการแปรผันอัตราส่วนของทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และ 1.0 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสมผลการทดสอบพบว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในเถ้าลอยทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์, เถ้าลอย, เถ้าปาล์มน้ำมัน, ปูนซีเมนต์, ความสามารถทำงานได้, กำลังอัด

#### Abstract

This article aims to study the workability and compressive strength of geopolymer mortar made from high-calcium fly ash (FA) containing cement (PC) and palm oil fuel ash (POFA). Fly ash was replaced with cement (PC) at the rates of 0 and 20% by weight of binder, Fly ash (FA) was replaced with palm oil fuel ash (POFA) at the rates of 0 and 40% by weight of binder, and using waterproof as an admixture at the rates of 0, 0.5, 1, 1.5 and 2% by weight of binder. Sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and 10 molar sodium hydroxide (NaOH) solutions were used as the alkaline solution in the reaction. The  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ratios of 1.0

with various sand to binder ratios of 0.5 and 1.0. The curing at ambient temperature were used for all of mixtures. The results found that the level replacement of PC increase showed the compressive strength of geopolymer tended to increased and fly ash (FA) was replaced with palm oil fuel ash (POFA) increase showed the setting time of geopolymer tended to increased.

Keywords: Geopolymer, Fly ash, Cement, Palm oil fuel ash, Workability, Compressive strength

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาน้ำขังหรือการรั่วซึมบริเวณคานดาดฟ้ามักเกิดกับอาคารพาณิชย์ หรือตึกแถวที่มีหลังคาเป็นชนิดคานดาดฟ้าคอนกรีต (RC Slab) เกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ท่อระบายน้ำไม่ทัน ความลาดเอียงของพื้นไม่ได้มาตรฐาน พื้นคอนกรีตเกิดการเสื่อมโทรม ระบบกันซึมเสื่อมสภาพ เป็นต้น และหากปล่อยทิ้งไว้นานจนน้ำซึมเข้าไปถึงโครงสร้างเหล็กคานใน อาจทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความเสียหายได้ ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการแก้ปัญหาให้ เลือกใช้หลายประเภททั้งแบบทาเคลือบ ซ่อมแซมด้วยปูนที่ใช้สำหรับงานซ่อมหรือแบบแผ่นสำเร็จรูป แม้ว่าวัสดุซ่อมแซมดังกล่าวจะติดตั้งง่าย ทำงานง่ายแต่ก็มีราคาแพง การหาวัสดุทางเลือกจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ โดยต้องคงสมบัติความทนทานและยืดอายุการใช้งานของคอนกรีต ซึ่งวัสดุทางเลือกที่สามารถพัฒนาได้ คือ จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง และนักวิจัยได้พยายามศึกษาค้นคว้าเพื่อให้จีโอโพลิเมอร์สามารถใช้เป็นหนึ่ง ในทางเลือกสำหรับงานก่อสร้าง [1] จีโอโพลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จาก วัสดุคิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายต่างและใช้ ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา [2] ทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานที่สามารถรับ แรงได้เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ ดินขาว เถ้าลอย เป็นต้น [3]

ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุซีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าเฉพาะที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีประมาณ 3 ล้านตัน [4] เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมเป็นหลักแต่อย่างไรก็ตามเถ้าลอยแคลเซียมสูงซีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงต่ำที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) [5] ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาการรับแรงอัดของซีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเร่งการเกิดปฏิกิริยาของซีโอโพลิเมอร์ด้วยความร้อนประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส [7] ดังนั้นงานวิจัยที่ผ่านมายังพยายามพัฒนากำลังรับแรงอัดของซีโอโพลิเมอร์โดยการเติมสารผสมเพิ่มในซีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เช่น ยิปซัม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นต้น [4-7] ซึ่งจากงานวิจัยของ Phoo-ngernkham et al. [8] ได้รายงานไว้ว่าปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลเชิงบวกต่อสมบัติทางกลของวัสดุซีโอโพลิเมอร์ อีกทั้งสามารถก่อให้เกิดผลผลิตไฮดรอกซิลที่แทรกอยู่กับซีโอโพลิเมอร์ทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมในระบบของซีโอโพลิเมอร์สามารถเพิ่มปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแสดงถึงการอยู่ร่วมกันของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและซีโอโพลิเมอร์เจล ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติทางกลในอายุปลายของซีโอโพลิเมอร์ [8] อีกทั้งจากงานวิจัยของ Pangdaeng et al. [5] ได้รายงานไว้ว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงสมบัติของซีโอโพลิเมอร์ แต่ยังสามารถเพิ่มความร้อนให้กับระบบของซีโอโพลิเมอร์ ซึ่งความร้อนนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน ได้จากการนำทะลาย และเปลือกของปาล์มน้ำมันมาเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งในปี 2559 มีการพยากรณ์ว่าประเทศไทยจะสามารถผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 11.7 ล้านตัน [9] หลังจากผลิตน้ำมันปาล์ม แล้วจึงเผาซากที่เหลือได้เป็นเถ้าปาล์มน้ำมันประมาณ 3 แสนตันหรือคิดเป็นร้อยละ 2.6 โดยน้ำหนักของปริมาณปาล์มน้ำมัน [10] ซึ่งเถ้าปาล์มมีการนำไปใช้ในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่กองทิ้ง โดยต้องเสียพื้นที่เพื่อกองทิ้งเถ้าปาล์มน้ำมัน และยังส่งผลเสียทางด้านอากาศ เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย [11-14] จากการศึกษาเบื้องต้น [15,16] พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีออกไซด์ของซิลิกอน ซึ่งเป็นออกไซด์หลักในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในปริมาณสูง ทำให้มีแนวคิดที่จะศึกษาถึงการนำเอาเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน และเพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาทำให้เกิดประโยชน์ และลดปัญหาทางสภาวะแวดล้อมที่เกิดจากเถ้าปาล์มน้ำมันด้วย

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถทำงานได้และกำลังอัดของซีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นสมบัติเบื้องต้นของวัสดุกันซึม โดยการนำเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาเป็นวัสดุตั้งต้นเพื่อใช้ในการผลิตซีโอโพลิเมอร์ ผลการทดสอบที่ได้รับจะช่วยให้เข้าใจถึงสมบัติเบื้องต้นวัสดุกันซึมจากซีโอโพลิเมอร์

## 2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ (PC) เถ้าปาล์มน้ำมัน (POFA) และทรายแม่น้ำ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง ปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าเถ้าลอยประกอบด้วยซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก ซึ่งปริมาณผลรวมของ SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เท่ากับ 66.94 เปอร์เซ็นต์ และ CaO เท่ากับ 21.41 เปอร์เซ็นต์ เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จึงจัดอยู่ในเถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [17] ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันประกอบด้วยซิลิกาเป็นหลัก และมวรวมวลละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ

สารละลายต่างๆที่ใช้ในการผลิตซีโอโพลิเมอร์ คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ประกอบด้วย 13.45% Na<sub>2</sub>O, 32.39% SiO<sub>2</sub> และ 54.16% H<sub>2</sub>O

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์มน้ำมัน

Chemical compositions	FA (%)	PC (%)	POFA (%)
SiO <sub>2</sub>	36.93	10.82	42.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.10	2.58	2.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.91	1.62	0.69
CaO	21.41	59.89	5.19
MgO	2.78	1.21	4.55
K <sub>2</sub> O	2.28	0.28	22.45
Na <sub>2</sub> O	1.42	0.12	0.49
TiO <sub>2</sub>	0.36	0.13	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	0.09	-
SO <sub>3</sub>	2.90	2.07	6.10
LOI	1.54	21.14	9.30

### 2.2 อัตราส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 100:0:0, 80:20:0 และ 40:20:40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 ทุกอัตราส่วนผสมของซีโอโพลิเมอร์ และดำเนินการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 และ 1.0 และปริมาณการใช้สารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยควบคุมค่าการไหลผ่านเท่ากับร้อยละ 110±5 ทุกอัตราส่วนผสม รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Symbol	FA	PC	POFA	สารกันซึม
100FA0PC0POFA	100	-	-	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
80FA20PC0POFA	80	20	-	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
40FA20PC40POFA	40	20	40	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์ เริ่มจากผสมเถ้าลอย ปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันให้เข้ากัน เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในวัสดุประสานและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 30 วินาทีและเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและผสมต่อเป็นเวลา 30 วินาที หลังจากนั้นเติมสารกันซึมและดำเนินการผสมต่อเป็นเวลา 30 วินาที



รูปที่ 1 การผสมจีโอโพลิเมอร์

2.3 เตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์ ที่มีค่าการไหลแผ่ร้อยละ  $110 \pm 5$  ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1437 [18]



รูปที่ 2 การทดสอบค่าไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

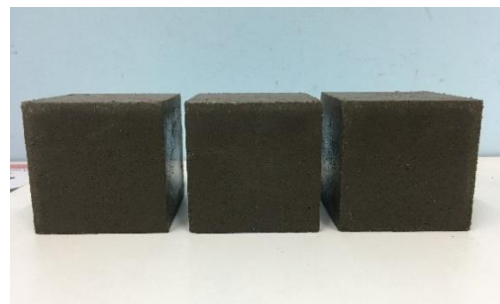
การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ ทดสอบโดยใช้เข็มมาตรฐานแบบไวแคตเช่นเดียวกับการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ การวัดระยะเวลาการก่อตัว คือระยะเวลาที่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร ปล่อยลงไปในซีเมนต์เพสต์ที่มีความชื้นเหลวปกติ หลังจากนั้นเข็มจมนลงในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 25 มิลลิเมตร ในระยะเวลา 30 วินาที และการก่อตัวสุดท้ายเกิดขึ้นเมื่อเข็มไวแคตไม่

สามารถจมนลงในจีโอโพลิเมอร์ได้ ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191 [19]



รูปที่ 3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทลงแบบหล่อขนาดทรงลูกบาศก์ ขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มิลลิเมตร และห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง ทั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติกอีกครั้งและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียสจนครบอายุการทดสอบ ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [20]



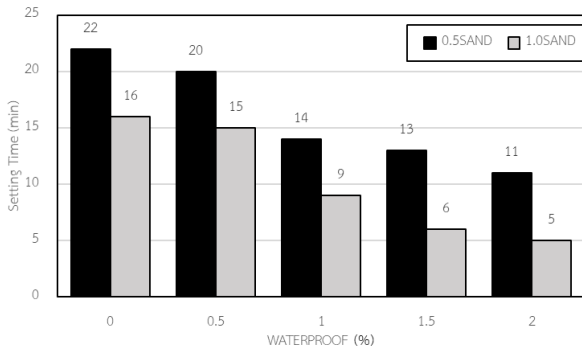
รูปที่ 4 ลักษณะตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

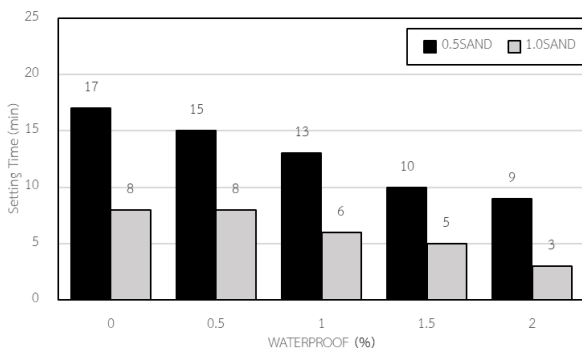
3.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังแสดงในรูปที่ 5-7 พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ โดยระยะเวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 100FA0PC0POFA ที่ผสมสารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยมีอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานร้อยละ 0.5 มีค่าเท่ากับ 22, 20, 14, 13 และ 11 นาที และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานร้อยละ 1.0 มีค่าเท่ากับ 16, 15, 9, 6 และ 5 นาที ตามลำดับ ระยะเวลาการก่อตัวปลายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 80FA20PC0POFA ที่ผสมสารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยมีอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานร้อยละ 0.5 มีค่าเท่ากับ 17, 15, 13, 10 และ 9 นาที และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานร้อยละ 1.0 มี

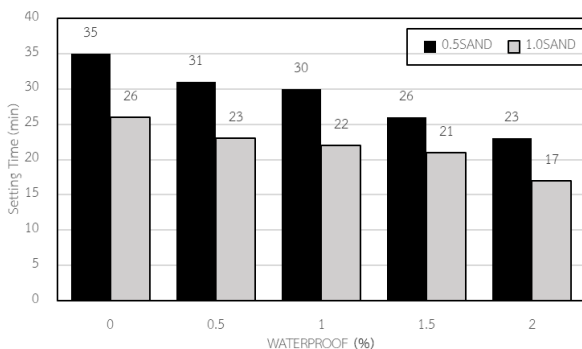
ค่าเท่ากับ 8, 8, 6, 5 และ 3 นาที ตามลำดับ ระยะเวลาการก่อตัวปลายของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 40FA20PC40POFA ที่ผสมสารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1, 1.5 และ 2 โดยมีอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานร้อยละ 0.5 มีค่าเท่ากับ 35, 31, 30, 26 และ 23 นาที และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานร้อยละ 1.0 มีค่าเท่ากับ 26, 23, 22, 21 และ 17 นาที ตามลำดับ จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นว่าส่วนผสมที่มีค่าระยะเวลาการก่อตัวระหว่าง 20-30 นาที เป็นส่วนผสมที่สามารถพัฒนาเป็นวัสดุกันซึมต่อไป



รูปที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (100FA0PC0POFA)



รูปที่ 6 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (80FA20PC0POFA)

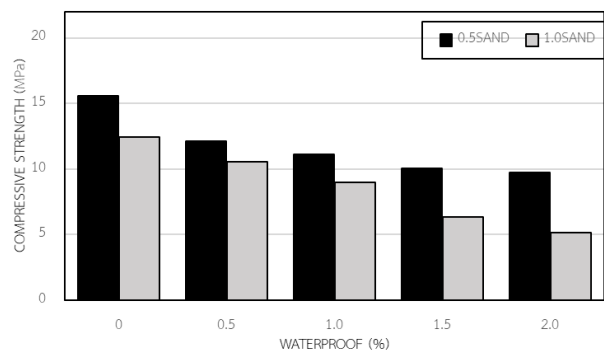


รูปที่ 7 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (40FA20PC40POFA)

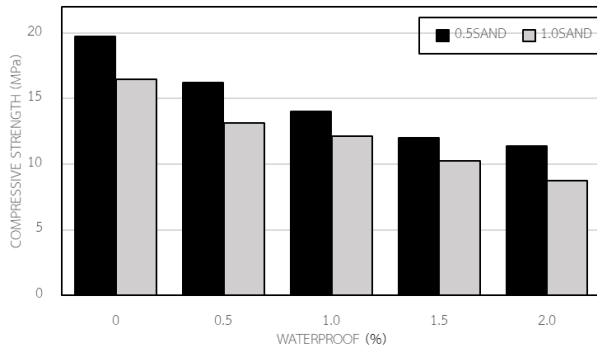
### 3.2 กำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมปูนซีเมนต์และ เถ้าปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 8-10 พบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอย่าง ชัดเจน โดยที่กำลังอัดของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 จะได้ ว่า 100FA0PC0POFA ที่ใส่สารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 มีค่าเท่ากับเท่ากับ 15.58, 12.11, 11.09, 10.07 และ 9.74 เมกะปาสคาล ตามลำดับ, 80FA20PC0POFA ที่ใส่สารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 มีค่าเท่ากับ 19.76, 16.19, 14.03, 12.04 และ 11.39 เมกะ ปาสคาล ตามลำดับ, และ 40FA20PC40POFA ที่ใส่สารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 มีค่าเท่ากับ 11.82, 11.22, 10.67, 10.10 และ 8.66 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และกำลังอัดของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 1.0 จะได้ว่า 100FA0PC0POFA ที่ใส่สารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 มีค่าเท่ากับเท่ากับ 12.42 10.54 9.01 6.32 และ 5.16 เมกะ ปาสคาล ตามลำดับ, 80FA20PC0POFA ที่ใส่สารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 มีค่าเท่ากับ 16.44 13.14 12.14 10.23 และ 8.78 เมกะ ปาสคาล ตามลำดับ, และ 40FA20PC40POFA ที่ใส่สารกันซึมร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 มีค่าเท่ากับ 9.36 7.38 6.11 5.61 และ 4.51 เมกะ ปาสคาล ตามลำดับ จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นว่าส่วนผสมที่มีค่า กำลังอัดมากกว่า 10 เมกะปาสคาล เป็นส่วนผสมที่สามารถพัฒนาเป็นวัสดุ กันซึมต่อไป

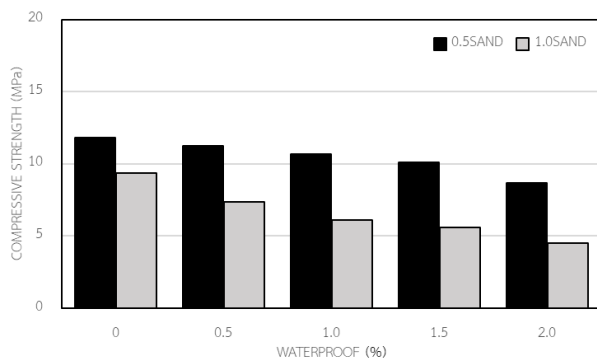
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทั้งระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้ำลอยผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่า ส่วนผสมของ 40FA20PC40POFA (ถ้ำลอยร้อยละ 40 เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 40 ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20) และการใช้สารกันซึมเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในพัฒนาเป็นวัสดุกันซึมต่อไป



รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (100FA0PC0POFA)



รูปที่ 9 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (80FA20PC0POFA)



รูปที่ 10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (40FA20PC20POFA)

#### 4. บทสรุป

การไหลแผ่มีค่าเท่ากับร้อยละ 110±5 ทุกอัตราส่วนผสม ระยะเวลาก่อตัวปลายมีแนวโน้มลดลงขณะที่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ ขณะที่การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันในเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มลดระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้สั้นลง

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบ

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Phoo-ngernkham T, Chindapasirt P, Sata V, Hanjitsuwan S, Hatanaka S. The effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on properties of high calcium fly ash geopolymers cured at ambient temperature. *Materials & Design*. 2014;55:58-65
- [2] P. Paisitsrisawat and U. Rattanasak, Effect of silica fume on properties of fluidizer bed combustion (FBC) fly ash geopolymers”, *The Journal of Industrial Technology*, 9(1), 2013, In press (in Thai).
- [3] J. Davidovits, Geopolymers - Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1991, pp. 1633-1656.
- [4] Chindapasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*. 2007;29(3):224-9.
- [5] Pangdaeng S, Phoo-ngernkham T, Sata V, Chindapasirt P. Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*. 2014;53:269-74.
- [6] Temuujin J, van Riessen A, Williams R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;167(1-3):82-8.
- [7] Williams PJ, Biernacki JJ, Walker LR, Meyer HM, Rawn CJ, Bai J. Microanalysis of alkali activated fly ash-CH pastes. *Cement and Concrete Research*. 2002;32(6):963-72.
- [8] Phoo-ngernkham T, Chindapasirt P, Sata V, Pangdaeng S, Sinsiri T. Properties of high calcium fly ash geopolymer pastes containing Portland cement as additive. *International Journal of Minerals, metallurgy and Materials*. 2013;20(2):214-20.
- [9] Centre for Agricultural Information, 2015, Palm Production, Office of Agricultural Economics, Thailand : Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- [10] Charoennatkul, C., 2014, “Interlocking Blocks Containing Oil Palm Ash and Shells Waste,” *Journal of Community Development and Life Quality*.
- [11] Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. and Saeting, T., 2007, “Evaluation of the Sulfate Resistance of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash,” *Construction and Building Materials*, 21 (7), pp. 1399-1405.

- [12] Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K. and Siripanichgorn, A., 2007, "Use of Waste Ash from Palm Oil Industry in Concrete," *Waste Management*, 27 (1), pp. 81-88.
- [13] Jaturapitakkul, C., Tangpagasit, J., Songmue, S. and Kiattikomol, K., 2011, "Filler Effect and Pozzolanic Reaction of Ground Palm Oil Fuel Ash," *Construction and Building Materials*, 25 (11), pp. 4287-4293.
- [14] Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., 2011, "Effect of Palm Oil Fuel Ash Fineness on the Microstructure of Blended Cement Paste," *Construction and Building Materials*, 25 (11), pp. 4095-4104.
- [15] Tay, J.H., 1990, "Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material", *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 2, pp. 94-105.
- [16] สุรพันธ์ สุกันปรีย์, ขรินทร์ นมรักษ์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2545). การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต. *การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี 2545, 20-23 มิถุนายน, กรุงเทพฯ, หน้า 191-199.*
- [17] ASTM C618-17a (2017). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02.
- [18] ASTM C1437, (2007). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, American Society for Testing and Materials.
- [19] ASTM C 191, (2008). Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by vicat needle", American Society for Testing and Materials.
- [20] ASTM C109. (2002). Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens), *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.04.01.