

การศึกษาเบื้องต้นของผงอัลคาไล

Fundamental Study of Alkali-Activated Powder

กรรณก จอยนอก^{1,*} ชัตติย ชมพวงค์² ชูตากัก เดชพันธ์³ ศตคุณ เดชพันธ์⁴ สกวรรณ น่านจิตสุวรรณ⁵ และ ธนากร ภูเงินข้า⁶

^{1,2,3,4,6}หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

จ.นครราชสีมา

⁵สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จ.ลำปาง

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุอัลคาไลผงเพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้าง วัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ประกอบด้วยเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายอัลคาไลกระตุ้น ศึกษาอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และ 0.5 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.0 ในแต่ละส่วนผสมและบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 และ 60 องศาเซลเซียส นำวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เตรียมได้มาบดและเรียกว่าวัสดุอัลคาไลผงเพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้าง สำหรับวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้างประกอบด้วยวัสดุอัลคาไลผง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซิลิกาฟุ้ง โดยมีการแทนที่วัสดุอัลคาไลผงด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซิลิกาฟุ้งที่ร้อยละ 40 และ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์กับน้ำโดยกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ในทุกส่วนผสมและบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการศึกษาค่ากำลังอัดของของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุประสาน และผลการศึกษาค่าระยะเวลาก่อตัวของวัสดุอัลคาไลผง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ส่งผลทำให้วัสดุอัลคาไลผงมีการก่อตัวที่รวดเร็ว และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการบ่มของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้วัสดุอัลคาไลผงมีการก่อตัวที่ต่ำลงจากผลการศึกษาข้างต้นจะเป็นข้อมูลในการพัฒนาวัสดุอัลคาไลผงในงานวัสดุก่อสร้างต่อไป

คำสำคัญ: ผงอัลคาไล, จีโอโพลิเมอร์, เถ้าลอย, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, ซิลิกาฟุ้ง, กำลังรับแรงอัด

Abstract

This paper presents development of alkali-activated powder for use as binder in construction work. The precursor was consisted of fly ash and ordinary Portland cement for the production of geopolymer paste. The replacements of fly ash by ordinary Portland cement were 0, 10, 20 and 30 by weight of binder. The NaOH concentration of 10 molar and sodium silicate solution were used as alkaline activator. The liquid to binder ratio of 0.4 and 0.5, sodium silicate to NaOH solution of 1.0 and 2.0 were used as for all mixes and curing at 25 and 60 degrees Celsius. Geopolymer paste that has been thoroughly grinded, called alkali powder, for use as binder in construction work. In which the binder in construction consists of alkali-activated powder, Portland cement and silica fume. The replacements of alkali-activated powder by ordinary Portland cement and silica fume were 40 and 10 by weight of binder respectively. The NaOH concentration of 2 molar and water. The water to binder ratio of 0.45, were used as for all mixes and curing at room temperature.

The compressive strength results of hardened geopolymer paste were increased with increase ordinary Portland cement replacement. And the results of testing the alkali-activated powder setting time showed that, when the amount of ordinary Portland cement in geopolymer paste increased, faster alkali-activated powder setting time. And when the incubation temperature of the geopolymer paste increased, the setting time of the alkali-activated powder slows down. The above information can be used as basic information in development of alkali-activated powder for use as binder in construction work.

Keywords: alkali-activated powder, geopolymer, fly ash, ordinary Portland cement, silica fume, compressive strength

1. คำนำ

ในปัจจุบันจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก และทำการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง โดยส่วนมากสารละลายต่างที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดการก่อตัวและแข็งตัวทำให้มีสมบัติในการรับแรงได้ ดังนั้นจีโอโพลิเมอร์จึงสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานได้ [1]

สำหรับในประเทศไทยวัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าลอย ซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง [1] เถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา อะลูมินาและแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีความแข็งแรงต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีต [2] แนวทางการพัฒนากำลังอัดที่อุณหภูมิปกติ คือ เร่งการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส หรือเติมสารผสมเพิ่มในระบบจีโอโพลิเมอร์เพื่อให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสม [3] งานวิจัยที่ผ่านมาของสกวรรณ ทานจิตสุวรรณ และคณะ [1] ศึกษาแนวทางการพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ในเถ้าลอยสามารถปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องได้ งานวิจัยข้างต้นรายงานไว้ว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) มากขึ้นและสารประกอบดังกล่าวจะอยู่ร่วมสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (NASH) หรือจีโอโพลิเมอร์เจลส่งผลให้มีความสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานในภาคสนามหรือเชิงพาณิชย์จะเห็นได้ว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (วัสดุตั้งต้นผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) ยังมีความยุ่งยากและลำบากในการใช้งาน ดังนั้นการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ให้เป็นผงอัลคาไลชนิดส่วนผสมเดียวเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานเป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานก่อสร้างจึงได้รับการพัฒนาในปัจจุบันด้วยนิยาม “เพียงแค่เติมน้ำ” ก็สามารถใช้งานได้ ในปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาผงอัลคาไลเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง ขณะที่ต่างประเทศเริ่มมีงานวิจัยเกี่ยวกับด้านนี้ เช่น งานวิจัยของ Abdel-Gawwad and Abo-El-Enin [4] ที่ศึกษานวัตกรรมการผลิตผงจีโอโพลิเมอร์ แต่เมื่อวิเคราะห์กระบวนการผลิตของงานวิจัยนี้พบว่า ผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุตั้งต้น คือ เถ้าตระกรันหลักผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและน้ำเปล่าและกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดสอบ พบว่า กำลังอัดของผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าประมาณ 50 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน ขณะที่งานวิจัยของ Liew et al. [5] ได้ศึกษาผงจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเผาและเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยอุณหภูมิระหว่าง 40-100 องศาเซลเซียส ผลการ

ทดสอบพบว่า กำลังอัดของผงจีโอโพลิเมอร์มีค่าระหว่าง 5-10 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน จากการสำรวจงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาผงจีโอโพลิเมอร์ยังคงมีน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาผงอัลคาไลเพสต์ที่ได้รับจากจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผ่านกระบวนการบดให้ละเอียดแล้วแค่เติมน้ำ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมเบื้องต้นของผงอัลคาไลเพสต์และเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาผงอัลคาไลเพสต์เพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในอนาคต

2. การเตรียมวัสดุและการทดลอง

2.1 วัสดุตั้งต้นสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าเถ้าลอยประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก ซึ่งปริมาณผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 60.92 เปอร์เซ็นต์ และ CaO เท่ากับ 25.79 เปอร์เซ็นต์ เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จึงจัดอยู่ในเถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [6]

สารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีของ Na_2O เท่ากับร้อยละ 12.37, SiO_2 เท่ากับร้อยละ 29.94 และ H_2O เท่ากับร้อยละ 57.69 โดยน้ำหนัก

2.2 วัสดุตั้งต้นสำหรับผลิตผงอัลคาไลเพสต์

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตผงอัลคาไลเพสต์ ได้แก่ ผงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผ่านกระบวนการบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซิลิกาฟูม และกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และน้ำประปา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

| Chemical compositions (%) | FA | PC | SF |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| SiO_2 | 36.93 | 20.80 | 92.00 |
| Al_2O_3 | 18.10 | 4.70 | 0.70 |
| Fe_2O_3 | 11.91 | 3.40 | 1.20 |
| CaO | 21.41 | 65.30 | 0.20 |
| MgO | 2.78 | 1.50 | 0.20 |
| K_2O | 2.28 | 0.10 | 0.40 |
| Na_2O | 1.42 | 0.40 | 0.10 |
| TiO_2 | 0.36 | - | - |
| P_2O_5 | 0.20 | - | - |
| SO_3 | 2.90 | 2.70 | - |
| LOI | 1.54 | 0.90 | - |

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์

| Symbol | FA (g) | PC (g) | NS (g) | NH (g) |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 100FA-0PC-0.4L/B-1.0NS/NH | 100 | - | 20 | 20 |
| 100FA-0PC-0.4L/B-2.0NS/NH | 100 | - | 27 | 13 |
| 100FA-0PC-0.5L/B-1.0NS/NH | 100 | - | 25 | 25 |
| 100FA-0PC-0.5L/B-2.0NS/NH | 100 | - | 33 | 17 |
| 90FA-10PC-0.4L/B-1.0NS/NH | 90 | 10 | 20 | 20 |
| 90FA-10PC-0.4L/B-2.0NS/NH | 90 | 10 | 27 | 13 |
| 90FA-10PC-0.5L/B-1.0NS/NH | 90 | 10 | 25 | 25 |
| 90FA-10PC-0.5L/B-2.0NS/NH | 90 | 10 | 33 | 17 |
| 80FA-20PC-0.4L/B-1.0NS/NH | 80 | 20 | 20 | 20 |
| 80FA-20PC-0.4L/B-2.0NS/NH | 80 | 20 | 27 | 13 |
| 80FA-20PC-0.5L/B-1.0NS/NH | 80 | 20 | 25 | 25 |
| 80FA-20PC-0.5L/B-2.0NS/NH | 80 | 20 | 33 | 17 |
| 70FA-30PC-0.4L/B-1.0NS/NH | 70 | 30 | 20 | 20 |
| 70FA-30PC-0.4L/B-2.0NS/NH | 70 | 30 | 27 | 13 |
| 70FA-30PC-0.5L/B-1.0NS/NH | 70 | 30 | 25 | 25 |
| 70FA-30PC-0.5L/B-2.0NS/NH | 70 | 30 | 33 | 17 |

2.3 อัตราส่วนผสม

2.3.1 จีโอโพลิเมอร์

แก้ล้อยถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จะแปรผันอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และ 0.5 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.0 และอุณหภูมิการบ่มเท่ากับ 25 และ 60 องศาเซลเซียส ทุกอัตราส่วนผสม อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ดังแสดงในตารางที่ 2

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ เริ่มต้นด้วยดำเนินการผสมแก้ล้อยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตและดำเนินการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 30 วินาที

2.3.2 ผงอัลคาไลเฟสค์

ผงอัลคาไลเฟสค์ (AAP) เป็นส่วนผสมระหว่าง ผงจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 50 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 40 และซิลิกาฟูมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 (น้ำประปารวมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์) โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานนี้ เลือกใช้จากทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ASTM C187-16 [7] (โดยพิจารณาให้เข็มมาตรฐานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ของชุดทดสอบไวแคตจมลงในเฟสค์เป็นระยะ 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที ปริมาณน้ำที่ทำให้ผงจีโอโพลิเมอร์เกิดความชื้นเหลวปกตินี้จะเป็นค่ามาตรฐานโดยอัตราส่วนผสมของผงอัลคาไลเฟสค์ดังแสดงในตารางที่ 3

ขั้นตอนการผสมผงอัลคาไลเฟสค์ เริ่มต้นด้วยดำเนินการผสมผงจีโอโพลิเมอร์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซิลิกาฟูมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำประปาแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วินาที และเปิดเครื่องผสมด้วยความเร็วต่ำ (140±5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นหยุดเป็นเวลา 20 วินาที เพื่อปาดซีเมนต์เฟสค์ที่ติดอยู่ข้างๆ หม้อผสมและที่ใบพายให้มารวมกันตรงกลางและเปิดเครื่องผสมอีกครั้งด้วยความเร็วปานกลาง (285±10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของผงอัลคาไลเฟสค์

| Symbol | AAP (g) | PC (g) | SF (g) | 2M NH (g) | Water (g) |
|------------------------|---------|--------|--------|-----------|-----------|
| 50AP-40PC-10SF-0.45W/B | 50 | 40 | 10 | 10 | 35 |

2.4 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.4.1 จีโอโพลิเมอร์เฟสค์

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C191 [8] ส่วนการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 [9] โดยใช้แบบหล่อขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร สำหรับการเตรียมตัวอย่างสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

(1) บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส: หลังกระบวนการผสมดำเนินการเทจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ลงแบบหล่อ หลังจากนั้นกระทุ้งตามมาตรฐานและใช้เกรียงปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบและหุ้มแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ดำเนินการถอดแบบหล่อและห่อฟิล์มพลาสติกอีกครั้งและเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบเท่ากับ 7 และ 28 วัน

(2) บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส: หลังกระบวนการผสมดำเนินการเทจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ลงแบบหล่อ หลังจากนั้นกระทุ้งตามมาตรฐานและใช้เกรียงปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบและหุ้มแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างเข้าตู้อบเพื่อเร่งปฏิกิริยาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ดำเนินการถอดแบบและห่อฟิล์มพลาสติกอีกครั้งและเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบเท่ากับ 7 และ 28 วัน

โดยการรายงานผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ทั้ง 2 กรณี ใช้ค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง

2.4.2 ผงอัลคาไลเฟสค์

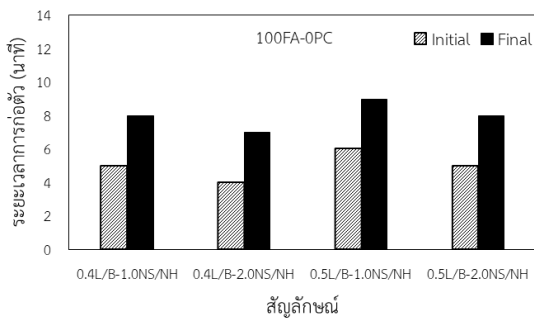
การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของผงอัลคาไลเฟสค์ดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191 [8] ส่วนการทดสอบค่ากำลังอัดของผงอัลคาไลเฟสค์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 [9] หลังกระบวนการผสมดำเนินการเทผงอัลคาไลเฟสค์ลงแบบหล่อขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร หลังจากนั้นกระทุ้งตามมาตรฐานและใช้เกรียงปาด

หน้าตัวอย่างให้เรียบและหุ้มแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมงดำเนินการถอดแบบหล่อและห่อฟิล์มพลาสติกอีกครั้งและเก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบเท่ากับ 1 วัน โดยกรายงานผลการทดสอบค่ากำลังอัดของผงอัลคาไลเฟสที่ใช้ค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง

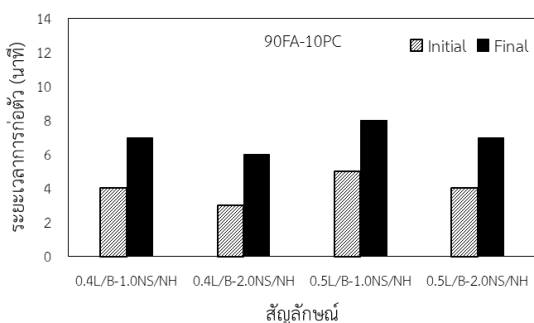
3. ผลการวิจัย

3.1 ระยะเวลาการก่อดวงจีโอโพลิเมอร์เฟส

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อดวงของถ้ำล้อยจีโอโพลิเมอร์เฟสแปรผันปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ซีเมนต์ร้อยละ 0-30 อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และ 0.5 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.0 ดังแสดงในรูปที่ 1-4



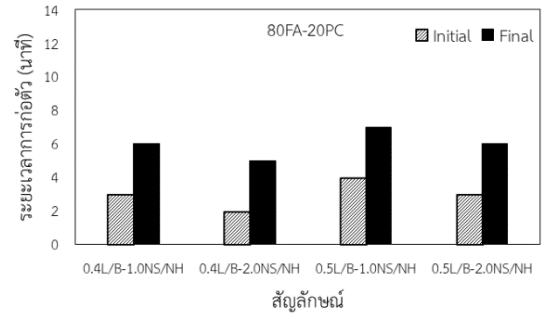
รูปที่ 1 ระยะเวลาการก่อดวงของจีโอโพลิเมอร์เฟสของถ้ำล้อยล้วน



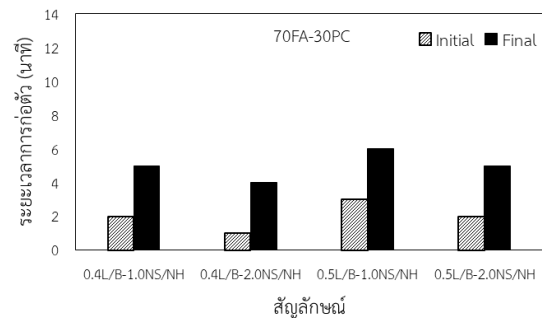
รูปที่ 2 ระยะเวลาการก่อดวงของจีโอโพลิเมอร์เฟสแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10

ผลการทดสอบ พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดวงของจีโอโพลิเมอร์เฟสมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3] รายงานไว้ว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณแคลเซียมในระบบเพิ่มขึ้นทำให้ระบบมีการก่อดวงเร็วขึ้นและส่งผลให้เนื้อเฟสมีการแข็งตัวเร็วขึ้น เช่นเดียวกันกับปัจจัยของซิลิกาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์จากถ้ำล้อยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้เนื้อเฟส

มีการแข็งตัวเร็วขึ้น [10] ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มระยะเวลาการก่อดวงจีโอโพลิเมอร์เฟส ดังที่ได้มีการรายงานงานวิจัยก่อนหน้านี้ [11]



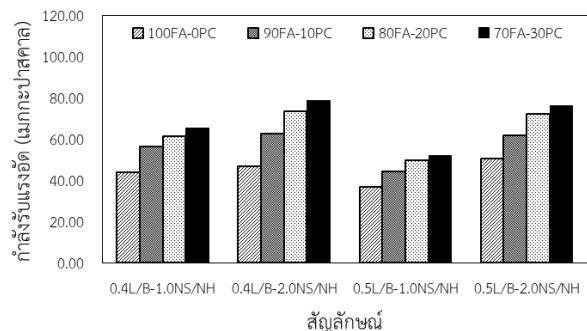
รูปที่ 3 ระยะเวลาการก่อดวงของจีโอโพลิเมอร์เฟสแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20



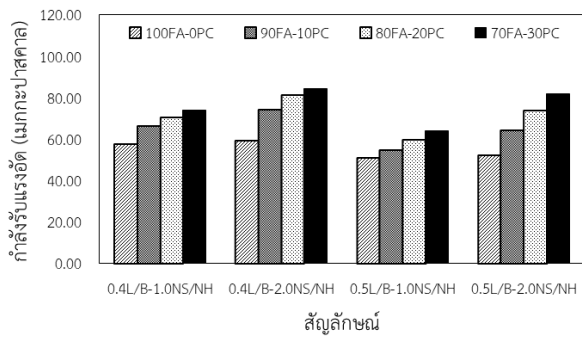
รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อดวงของจีโอโพลิเมอร์เฟสแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30

3.2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟส

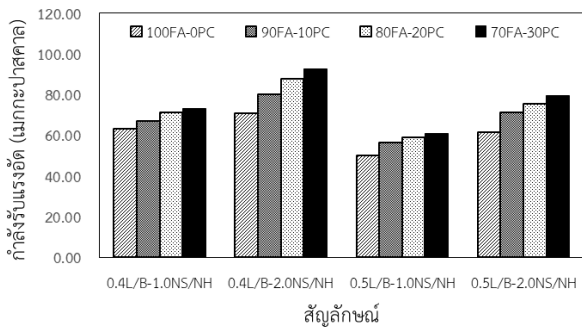
ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อดวงของถ้ำล้อยจีโอโพลิเมอร์เฟสแปรผันปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ซีเมนต์ร้อยละ 0-30 อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และ 0.5 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 2.0 และอุณหภูมิการบ่มเท่ากับ 25 และ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5-8



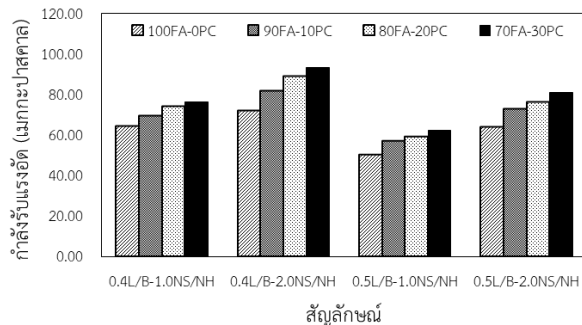
รูปที่ 5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน และบ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน และบ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน และบ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 8 กำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน และบ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

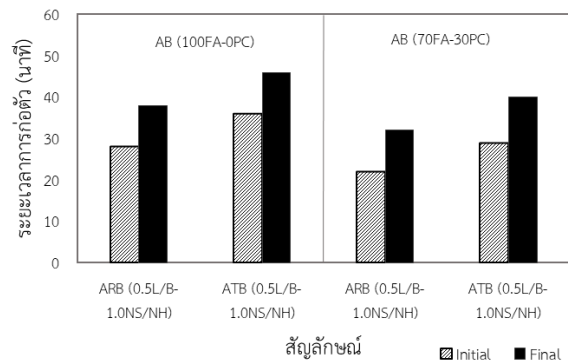
จากผลการทดสอบ พบว่าปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นช่วยพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ได้ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้แคลเซียมออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยและเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และอยู่ร่วมกับโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) หรือจีโอโพลีเมอร์เจลส่งผลเชิงบวกต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ [10] เช่นเดียวกันกับปัจจัยของซิลิกาที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเกิดเป็นสารประกอบ

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) มากขึ้นภายในระบบ [10] ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลเชิงลบต่อกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ทำนองเดียวกันกับการเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของระบบซีเมนต์ [11] ส่วนปัจจัยของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่าอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ที่ส่วนผสมเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3]

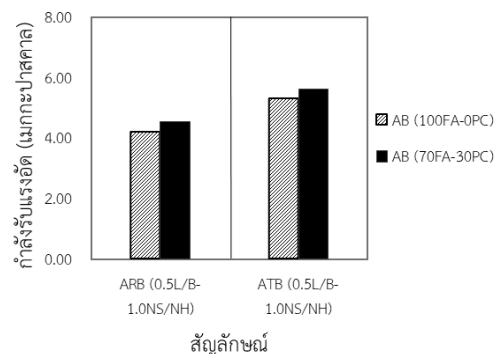
3.3 ระยะเวลาการก่อตัวของผงอัลคาไลเพสต์

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของผงอัลคาไลเพสต์ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า ค่าระยะเวลาการก่อตัวของผงอัลคาไลเพสต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเลือกใช้ผงจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 เปรียบเทียบกับผงจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยล้วน โดยระยะเวลาการก่อตัวปลายของผงอัลคาไลเพสต์ที่ผลิตจากผงจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยล้วนมีค่าระหว่างประมาณ 38-45 นาที ส่วนระยะเวลาการก่อตัวปลายของผงอัลคาไลเพสต์ที่ผลิตจากผงจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 มีค่าระหว่างประมาณ 33-40 นาที อาจเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากผงจีโอโพลีเมอร์และซิลิกาฟุ่ม

ส่วนปัจจัยของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของการผลิตผงจีโอโพลีเมอร์ต่อระยะเวลาการก่อตัวของผงอัลคาไลเพสต์ พบว่า อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มก่อตัวช้ากว่าอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ข้อสรุปตรงนี้ยังไม่แน่ชัดต้องวิเคราะห์ร่วมกับโครงสร้างทางจุลภาคอีกครั้ง



รูปที่ 9 ระยะเวลาการก่อตัวของผงอัลคาไลเพสต์



รูปที่ 10 กำลังอัดของผงอัลคาไลเพสต์ที่อายุเท่ากับ 1 วัน

3.4 กำลังอัดของผงอัลคาไลเฟสท์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของผงอัลคาไลเฟสท์ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่า กำลังอัดของผงอัลคาไลเฟสท์เมื่อผลิตจากผงจีโอโพลิเมอร์เฟสท์จากเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 มีแนวโน้มมากกว่าผงอัลคาไลเฟสท์เมื่อผลิตจากผงจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยล้วน อาจเนื่องจากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮดรอกซิลช่วยพัฒนา กำลังอัดผงอัลคาไลเฟสท์ที่อายุการบ่มช่วงแรก ผู้วิจัยเชื่อว่าซิลิกาจากผงจีโอโพลิเมอร์และซิลิกาฟุ่มจะช่วยพัฒนา กำลังอัดของผงอัลคาไลเฟสท์เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นทำนองเดียวกับปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่วนปัจจัยของอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาของการผลิตผงจีโอโพลิเมอร์ต่อกำลังอัดของผงอัลคาไลเฟสท์ พบว่า อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มพัฒนา กำลังอัดดีกว่าอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

4. บทสรุป

4.1 ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสท์มีแนวโน้มลดลงและกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4.2 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นช่วยชะลอระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสท์ ในทางตรงกันข้ามกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสท์มีแนวโน้มลดลง

4.3 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีช่วยพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสท์สูงกว่าอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

4.4 ผงจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 มีแนวโน้มเร่งระยะเวลาการก่อตัวของผงอัลคาไลเฟสท์มากกว่าผงจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยล้วน ส่วนอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มก่อตัวช้ากว่าอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

4.5 ผงจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 มีแนวโน้มพัฒนา กำลังอัดของผงอัลคาไลเฟสท์สูงกว่าผงจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยล้วน ขณะที่อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ช่วยพัฒนา กำลังอัดดีกว่าอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ, บวรรัถ อินทร์จ้อหอ, ณัฐวัฒน์ เสาะสูงเนิน, ธนิตร์ เสาะสูงเนิน, ภัทรพล จักรวรรณ, อัครพล วะชุม,

ฉัตรทริกา เพียงพิมาย และธนกร ภูเงินข้า. (2563). ผลของสารผสมเพิ่มที่ขยายตัวต่อระยะเวลาก่อตัวและกำลังรับแรงอัดของวัสดุอัลคาไลจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 15, 25-27 มีนาคม 2563*, หน้า 216-220.

- [2] Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Pangdaeng, S., Sinsiri, T. (2013). Properties of high calcium fly ash geopolymer pastes containing Portland cement as additive. *International Journal of Minerals, metallurgy and Materials*, 20(2), pp. 214-220.
- [3] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*, 53, pp. 269-274.
- [4] Abdel-Gawwad, HA., Abo-El-Enein, SA. (2016). A novel method to produce dry geopolymer cement powder. *HBRC Journal*, 12(1), pp. 13-24.
- [5] Liew, YM., Heah, CY., Li, LY., Jaya, NA., Abdullah, MMAB., Tan, SJ., Kamarudin, H. (2017). Formation of one-part-mixing geopolymers and geopolymer ceramics from geopolymer powder. *Construction and Building Materials*, 156, pp. 9-18.
- [6] 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.
- [7] ASTM C187-16. (2016). Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.02.
- [8] ASTM C191. (2002). Standard test method for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.01.
- [9] ASTM C109. (2002). Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars. *Annual Book of ASTM Standard*. Vol.04.01.
- [10] Phoo-ngernkham, T., Phiangphimai, C., Intarabut, D., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N., Li, LY., Chindaprasirt, P. (2020). Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 247, pp. 118543.
- [11] Sinsiri, T., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Chindaprasirt, P. (2012). The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar. *Computers and Concrete*, 9(6), pp. 427-437.