



## ปัจจัยของการแทนที่เอฟฟิเดียมปซัมและอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อกำลังรับแรงอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์

ชุตานันท์ เดชพันธ์ ธนากร ภูเงินขำ\* ศตคุณ เดชพันธ์ และ ชัตติย ชมพวงค์

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ

สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

ปริญญา จินดาประเสริฐ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 5362 8964 อีเมล: tanakorn.ph@rmuti.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.029

รับเมื่อ 20 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 19 พฤษภาคม 2563 ตอรับเมื่อ 24 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของการแทนที่เอฟฟิเดียมปซัมต่อกำลังรับแรงอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ โดยการใช้เอฟฟิเดียมปซัมแทนที่เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสานสารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ โดยแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนักอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่เอฟฟิเดียมปซัม และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น การแทนที่เอฟฟิเดียมปซัมในเถ้าลอยมีแนวโน้มส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มากกว่าอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางแร่และโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ผสมเอฟฟิเดียมปซัม เมื่อแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าปริมาณการใช้เอฟฟิเดียมปซัมในเถ้าลอยร้อยละ 10 และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 1.5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเอฟฟิเดียมปซัม

**คำสำคัญ:** เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ เอฟฟิเดียมปซัม อัตราส่วนของสารละลายต่าง สมบัติเชิงกล โครงสร้างทางจุลภาค

การอ้างอิงบทความ: ชุตานันท์ เดชพันธ์, ธนากร ภูเงินขำ, ศตคุณ เดชพันธ์, ชัตติย ชมพวงค์, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ “ปัจจัยของการแทนที่เอฟฟิเดียมปซัมและอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อกำลังรับแรงอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 31, ฉบับที่ 4, หน้า 711–722, ต.ค.-ธ.ค. 2564.



## Factors of FGD-gypsum Replacement and Alkaline Solution Ratio on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer

Chudapak Detphan, Tanakorn Phoo-ngernkham\*, Satakhun Detphan and Khattiya Chompoovong  
Sustainable Construction Material and Technology Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand

Sakonwan Hanjitsuwan

Program of Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University, Lampang, Thailand

Prinya Chindapasirt

Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

\*Corresponding Author, Tel. 09 5362 8964, E-mail : tanakorn.ph@rmuti.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.029

Received 20 April 2020 ; Revised 19 May 2020; Accepted 24 June 2020; Published online: 25 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research aims to study the factors of FGD-gypsum replacement and alkaline solution ratio on the compressive strength and microstructure of fly ash (FA) geopolymer. FGD was used to replace FA at the ratio of 0%, 10%, 20%, and 30% by weight of the binder. The liquid activators were sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and 10 molar of sodium hydroxide (NaOH) solutions. The differences in  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ratios at 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 were investigated. The liquid/binder ratio of 0.60 cured at ambient temperature was used in all mixing. Test results showed that the setting time of FA geopolymer mortar tended to decrease with the increasing of FGD replacement and the  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ratio. Besides, XRD and SEM results corresponded to compressive strength results of FA geopolymer. According to the above test results, it can be concluded that using 10%FGD activated with  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  ratios at 1.0 and 1.5 were the optimum mix o develop the compressive strength of FA geopolymer mortar incorporated with FGD-gypsum.

**Keywords:** Fly Ash Geopolymer, GD-gypsum, Alkaline Solution Ratio, Mechanical Properties, Microstructure

Please cite this article as: C. Detphan, T. Phoo-ngernkham, S. Detphan, K. Chompoovong, S. Hanjitsuwan, and P. Chindapasirt "Factors of FGD-gypsum replacement and alkaline solution ratio on compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 711–722, Oct.–Dec. 2021 (in Thai).

## 1. บทนำ

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความนิยม และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงาน วัสดุก่อสร้าง วัสดุจีโอพอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถนำวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรมมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต และใช้คุณสมบัติในการผลิตต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส การผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาของ ซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายต่างและใช้ความร้อน ในการเร่งปฏิกิริยา [1] สำหรับการผลิตจีโอพอลิเมอร์ ในประเทศไทย วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ คือ แฉะลอยจากการผลิต กระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แฉะลอยดังกล่าวมีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียม เป็นหลัก และมีส่วนของอสัณฐานในปริมาณสูงเมื่อพิจารณา จากองค์ประกอบทางแร่ ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยา ในสภาวะสารละลายต่างได้ดี จึงมีความเหมาะสมในการ ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ [2]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3], [4] แสดงให้เห็นว่าแฉะลอย จีโอพอลิเมอร์มีความสามารถในการรับกำลังไม่สูงมาก เมื่อบ่มที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) แนวทางแก้ไขคือ ต้องเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อนประมาณ 40–90 องศา เซลเซียส [3] ถึงแม้ว่าการใช้ความร้อนจะช่วยพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิปกติได้ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งาน ถือเป็นข้อจำกัดในการนำไป ใช้ในงานภาคสนาม ดังนั้นนักวิจัยหลายท่าน [3], [4] ได้ใช้วัสดุ ที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์แทนที่แฉะลอยเพื่อ เร่งปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ซึ่งจากรายงานวิจัยดังกล่าว พบว่า ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลเชิงบวกต่อสมบัติ ทางกลและโครงสร้างทางจุลภาคของแฉะลอยจีโอพอลิเมอร์ อีกทั้งปริมาณแคลเซียมในระบบของจีโอพอลิเมอร์สามารถ เพิ่มปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และ แสดงถึงการอยู่ร่วมกันของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและ จีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) ในโครงสร้าง [5]

ในปัจจุบันเอพิจิตีอิมปซิมเป็นหนึ่งในวัสดุที่มีองค์ประกอบ ของแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณสูง ซึ่งเอพิจิตีอิมปซิมเป็น

วัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยเอพิจิตี อิมปซิมได้มาจากการที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ดำเนินการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจาก โครงการโรงไฟฟ้าแม่เมาะตั้งแต่ พ.ศ. 2520 เป็นต้นมา เพื่อ ควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของสำนักงานคณะกรรมการ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ดังรายงานวิจัยของจักรชัยวัฒน์ [6] ดังนั้นจึงติดตั้งระบบกำจัดกำมะถันซึ่งเป็นเครื่องกำจัด ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization; FGD) ระบบนี้จะทำการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้ระบบ เปียก โดยมีหินปูนเป็นตัวกำจัดก๊าซ (Wet Lime Stone Process) ต้องใช้ปริมาณหินปูนมากกว่า 130 ตันต่อวัน หรือ เฉลี่ยประมาณเกือบ 1 ล้านตันต่อปี ผลจากกระบวนการ Desulfurization จะได้เอพิจิตีอิมปซิม [FGD-Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )] เป็นวัสดุพลอยได้ โดยทั่วไปผลึกของอิมปซิม มีตั้งแต่ 1–200 ไมครอน มีรูปร่างและขนาดของผลึกเป็น แบบต่างๆ ตั้งแต่เป็นรูปลูกบาศก์ (Cubic Shape) จนกระทั่ง เป็นรูปแท่ง (Rod Shape) สำหรับผลึกของอิมปซิมที่ผ่าน กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยทั่วไปอนุภาค จะอยู่ในช่วง 5–20 ไมครอน มีลักษณะเป็นรูปแท่ง [6] แต่ อย่งไรก็ตาม ในปัจจุบันเอพิจิตีอิมปซิมยังไม่ได้มีการนำไป ใช้งานและแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์มากนัก จึงทำให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะเหลืออิมปซิมจากการจำหน่าย ปีละ ประมาณ 2.19 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 97.4 ของปริมาณ ทั้งหมด [6]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความ เป็นไปได้ในการใช้เอพิจิตีอิมปซิมเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต วัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เอพิจิตีอิมปซิมแทนที่แฉะลอยเพื่อเร่ง การเกิดปฏิกิริยาของวัสดุจีโอพอลิเมอร์เมื่อบ่มที่อุณหภูมิปกติ โดยศึกษาสมบัติด้านระยะเวลาการก่อตัวและกำลังรับ แรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ จากแฉะลอยผสม เอพิจิตีอิมปซิม นอกจากนั้นศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของ จีโอพอลิเมอร์เพสต์จากแฉะลอยผสมเอพิจิตีอิมปซิมเพื่อ วิเคราะห์ร่วมกับผลการทดสอบเชิงกล ผลการทดสอบ ที่ได้รับจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์การใช้ จีโอพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไปในอนาคต

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ประกอบด้วย เถ้าลอย (FA) และเอพิจีตียิปซัม (FGD) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ขั้นตอนการเตรียมเอพิจีตียิปซัมในงานวิจัยนี้ เอพิจีตียิปซัมจะถูกอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเอพิจีตียิปซัมถูกบดด้วยเครื่องลอสแองเจลีส์ และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 ไมครอน) ก่อนนำไปใช้งาน องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและเอพิจีตียิปซัม ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเถ้าลอยและเอพิจีตียิปซัมมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และ 2.39 ตามลำดับ

**ตารางที่ 1** องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและเอพิจีตียิปซัม

Chemical compositions	FA (%)	FGD (%)
SiO <sub>2</sub>	31.32	0.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.96	2.82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.64	0.25
CaO	25.79	75.47
MgO	2.94	-
K <sub>2</sub> O	2.93	-
Na <sub>2</sub> O	2.83	-
SO <sub>3</sub>	4.92	10.16
LOI	1.30	10.33

สารละลายที่ใช้ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, NH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NS) ประกอบด้วย 13.45% Na<sub>2</sub>O, 32.39% SiO<sub>2</sub> และ 54.16% H<sub>2</sub>O

### 2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 ในการผสม

จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1.0 และบ่มที่อุณหภูมิปกติทุกอัตราส่วนผสม

**ตารางที่ 2** อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเอพิจีตียิปซัม

Symbol	FA (g)	FGD (g)	Sand (g)	NH (g)	NS (g)
FA0FGD-NS/NH=1.0	100	-	100	30	30
FA0FGD-NS/NH=1.5	100	-	100	24	36
FA0FGD-NS/NH=2.0	100	-	100	20	40
FA0FGD-NS/NH=2.5	100	-	100	17	43
FA10FGD-NS/NH=1.0	90	10	100	30	30
FA10FGD-NS/NH=1.5	90	10	100	24	36
FA10FGD-NS/NH=2.0	90	10	100	20	40
FA10FGD-NS/NH=2.5	90	10	100	17	43
FA20FGD-NS/NH=1.0	80	20	100	30	30
FA20FGD-NS/NH=1.5	80	20	100	24	36
FA20FGD-NS/NH=2.0	80	20	100	20	40
FA20FGD-NS/NH=2.5	80	20	100	17	43
FA30FGD-NS/NH=1.0	70	30	100	30	30
FA30FGD-NS/NH=1.5	70	30	100	24	36
FA30FGD-NS/NH=2.0	70	30	100	20	40
FA30FGD-NS/NH=2.5	70	30	100	17	43

การผสมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เริ่มต้นด้วยผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ให้เข้ากันดีก่อนการนำไปใช้เป็นส่วนผสม การผสมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มีขั้นตอนการผสมดังนี้ เริ่มต้นด้วยการนำวัสดุตั้งต้นใส่ในหม้อผสมและผสมให้ส่วนผสมเข้ากันประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลาย

โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ที่เตรียมไว้แล้วผสมให้ส่วนผสมเข้ากันประมาณ 1 นาที และใส่ทรายที่เตรียมไว้แล้วผสมอีกประมาณ 1 นาที จนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

### 2.3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัด

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เข็มไวแคตทำนองเดียวกันกับการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191-13 [7]

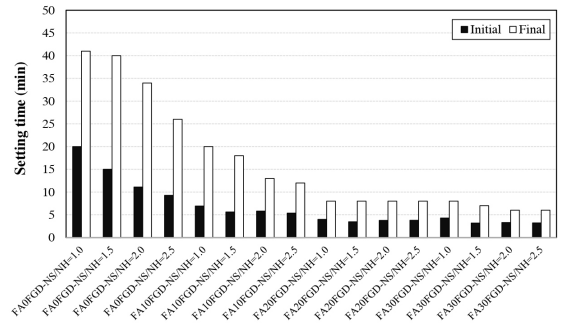
สำหรับการทดสอบกำลังอัด ดำเนินการเทจีโอพอลิเมอร์หลังการผสมลงในแบบหล่อขนาด  $50 \times 50 \times 50$  มิลลิเมตร ซึ่งกระบวนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบกำลังอัดดำเนินตามมาตรฐาน ASTM C109 [8] แล้วทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง แล้วทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นอีกครั้งและเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน โดยค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จะใช้ค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม

### 2.4 การทดสอบองค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์ นำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน มาบดให้เป็นผงละเอียด และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ตั้งแต่มุม 5 ถึง 60 องศา

### 2.5 การทดสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ หลังจากการทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน จะเลือกชิ้นส่วนตัวอย่างจากตรงกลางของก้อนตัวอย่างขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างวางบนที่วางตัวอย่างและเคลือบทอง แล้วทำการทดสอบที่ 15 กิโลโวลต์ และกำลังขยายเท่ากับ 1,000 เท่า



รูปที่ 1 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลันเตาผสมเอฟจีดีบีซีเอ็ม

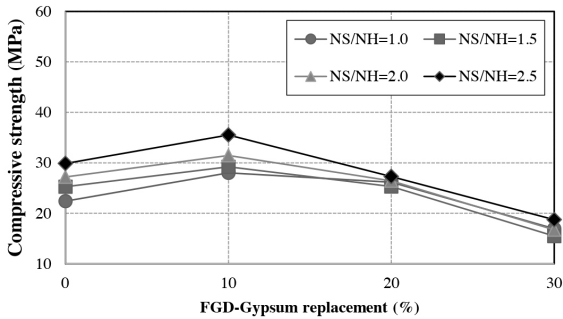
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากถั่วลันเตาผสมเอฟจีดีบีซีเอ็ม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการแทนที่เอฟจีดีบีซีเอ็มในถั่วลันเตา และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า ปัจจัยของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และการแทนที่เอฟจีดีบีซีเอ็มในถั่วลันเตาส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

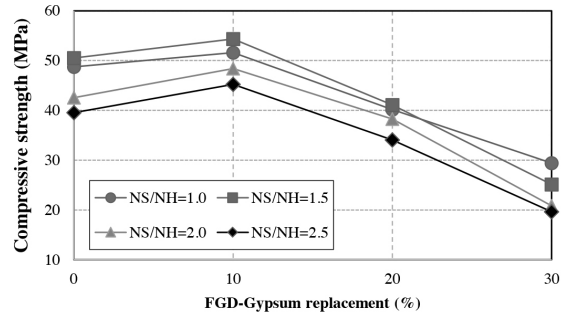
ในกรณีที่ปริมาณการแทนที่เอฟจีดีบีซีเอ็มในถั่วลันเตาเท่ากับร้อยละ 0 และ 10 พบว่า อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน อาจเนื่องจากอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณซิลิกาที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้ซิลิกาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์จากถั่วลันเตาและเอฟจีดีบีซีเอ็ม ทำนองเดียวกันกับการใช้ถั่วลันเตาผสมแคลเซียมคาร์ไบด์ตามรายงานวิจัยของธนกร และคณะ [9]

ส่วนในกรณีที่ปริมาณการแทนที่เอฟจีดีบีซีเอ็มในถั่วลันเตาเท่ากับร้อยละ 20 และ 30 พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อแปรผันอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อาจ



**รูปที่ 2** กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มเมื่อแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน

เนื่องจากการแทนที่เอฟจีดีอีพีซีเอ็มในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีการก่อตัวอย่างรวดเร็วจนทำให้ระยะเวลาการก่อตัวไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 1 ยังพบว่า อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 และเมื่อมีการใช้เอฟจีดีอีพีซีเอ็มร้อยละ 30 จะมีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วที่สุด การที่การใช้เอฟจีดีอีพีซีเอ็มแทนที่เถ้าลอยส่งผลระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ อาจเนื่องจากปริมาณแคลเซียมออกไซด์จากเอฟจีดีอีพีซีเอ็ม (ดูตารางที่ 1) สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาเกิดเป็นผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (C-A-S-H) มากขึ้นในระบบของจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนี้ความร้อนจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับซิลิกาช่วยเร่งการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pangdaeng และคณะ [3] และ ธนากร และคณะ [4] ที่มีการใช้เถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มมีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นวัสดุซ่อมแซมสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งมาตรฐาน ASTM C881 [10] ได้มีการ



**รูปที่ 3** กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มเมื่อแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน

แนะนำไว้ว่า วัสดุซ่อมแซมควรมีระยะเวลาการก่อตัวต้นไม่เกิน 30 นาที

### 3.2 กำลังอัด

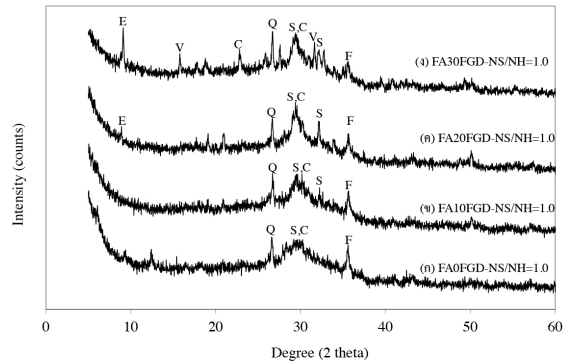
ผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเอฟจีดีอีพีซีเอ็มเมื่อแปรผันอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และอายุการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 พบว่า การใช้เอฟจีดีอีพีซีเอ็มร้อยละ 10 สามารถปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อาจเป็นไปได้ว่าแคลเซียมออกไซด์จากเอฟจีดีอีพีซีเอ็มทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากเถ้าลอยเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) มากขึ้นในระบบของจีโอพอลิเมอร์และอยู่ร่วมกับผลิตภัณฑ์หลักของระบบจีโอพอลิเมอร์คือ โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (N-A-S-H) หรือจีโอพอลิเมอร์เจล จากรายงานวิจัยของ Chindaprasit และคณะ [11] พบว่า การร่วมอยู่ร่วมกันระหว่างแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (N-A-S-H) จะช่วยพัฒนาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ส่วนการใช้เอฟจีดีอีพีซีเอ็มร้อยละ 20 และ 30 พบว่า กำลังอัดของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากปริมาณซิลิเกตจากเอฟจีดีอีพีซีเอ็มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อกำลังอัด

ของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ [12]

เมื่อพิจารณาปัจจัยของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอพิจิตีปีซิมที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน (รูปที่ 2) พบว่า กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเอพิจิตีปีซิมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา กำลังอัดที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน (รูปที่ 3) พบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบกำลังที่เกิดขึ้นมีทิศทางแตกต่างจากกำลังอัดที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้พบว่า การที่ กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเอพิจิตีปีซิมมากกว่า 20 มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากเอพิจิตีปีซิมมีองค์ประกอบของแคลเซียมซิลิเกตเมื่ออยู่ในระบบจีโอพอลิเมอร์และทำปฏิกิริยากับโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) จากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเป็นคราบเกลือเกิดขึ้นภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์ จึงส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงอัดสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Rattanasak และคณะ [13] และ Guo และคณะ [14]

### 3.3 องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยเมื่อแปรผันปริมาณการแทนที่เอพิจิตีปีซิมในเถ้าลอยและอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4-7 โดยองค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการแทนที่เอพิจิตีปีซิมและใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก), 5 (ก), 6 (ก) และ 7 (ก) ตามลำดับ พบว่า ประกอบด้วยส่วนของออสซิลิเกตประมาณ 20-38 องศา และผลึกของควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) แมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) โดยจากรายงานวิจัยของ

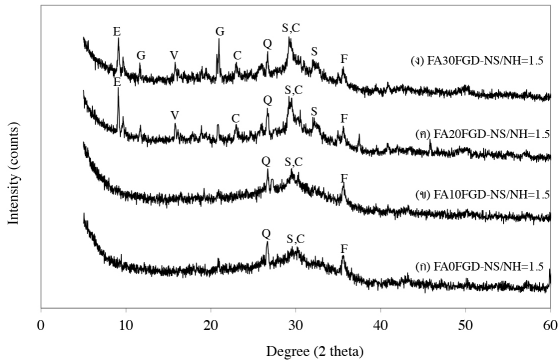


(V)=Vishnevite ( $\text{Na}_6\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{20}(\text{SO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$ ), Q= Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), F=Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), S= Calcium silicate hydrate ( $\text{Ca}_1\text{Si}_2\text{O}_5\text{xH}_2\text{O}$ ), C=Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), E = ettringite  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_6\text{26H}_2\text{O}$

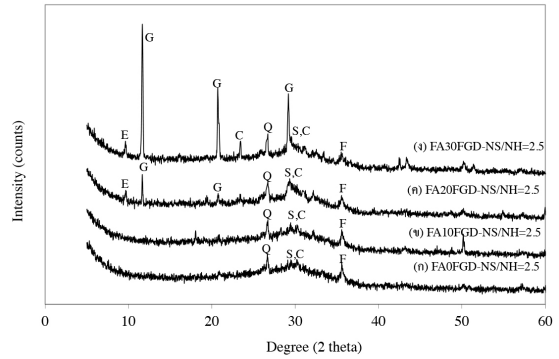
**รูปที่ 4** องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเอพิจิตีปีซิมที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน

Garcia-Lodeiro และคณะ [15] พบว่า ส่วนของออสซิลิเกตวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่อาจแสดงถึงการอยู่ร่วมกันของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และสารประกอบโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (N-A-S-H) ของระบบแคลเซียมสูงจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งจากรายงานข้างต้นแสดงให้เห็นว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) อยู่ร่วมกับโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (N-A-S-H) จะช่วยพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ได้

สำหรับส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 (รูปที่ 4) และ 1.5 (รูปที่ 5) และมีการแทนที่ด้วยเอพิจิตีปีซิมร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่า สารประกอบที่เกิดขึ้นทั้งสองอัตราส่วนมีแนวโน้มเหมือนกัน ยกตัวอย่างเช่น ส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และแทนที่ด้วยเอพิจิตีปีซิมร้อยละ 10 [รูปที่ 4 (ข)] และส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 และแทนที่ด้วยเอพิจิตีปีซิมร้อยละ 10 [รูปที่ 5 (ข)] จะมีสารประกอบคือ ผลึกของควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) แมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ในขณะที่เมื่อแทนที่



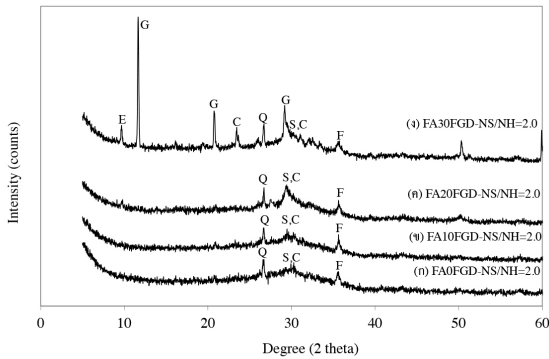
V=Vishnevite ( $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_4\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$ ), Q= Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), F=Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), S= Calcium silicate hydrate ( $\text{Ca}_1.5\text{SiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ), E = ettringite  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , C=Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), G=Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )



V=Vishnevite ( $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_4\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$ ), Q= Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), F=Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), S= Calcium silicate hydrate ( $\text{Ca}_1.5\text{SiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ), E = ettringite  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , C=Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), G=Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

**รูปที่ 5** องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จาก  
 ใถ้ลอมผสมเอพิจิตีบิซิมที่อัตราส่วนสารละลาย  
 โซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 เท่ากับ 1.5 และอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน

**รูปที่ 7** องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จาก  
 ใถ้ลอมผสมเอพิจิตีบิซิมที่อัตราส่วนสารละลาย  
 โซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 เท่ากับ 2.5 และอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน



V=Vishnevite ( $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_4\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$ ), Q= Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), F=Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), S= Calcium silicate hydrate ( $\text{Ca}_1.5\text{SiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ), E = ettringite  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , C=Calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), G=Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

**รูปที่ 6** องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จาก  
 ใถ้ลอมผสมเอพิจิตีบิซิมที่อัตราส่วนสารละลาย  
 โซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 เท่ากับ 2.0 และอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน

จะพบยิบซั่ม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เพิ่มเติม

สำหรับส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต  
 ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 (รูปที่ 6) และ  
 2.5 (รูปที่ 7) และแทนที่ด้วยเอพิจิตีบิซิมร้อยละ 10, 20 และ  
 30 พบว่า สารประกอบที่เกิดขึ้นเหมือนกันทั้งสองอัตราส่วน  
 โดยส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อ  
 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 และแทนที่ด้วย  
 เอพิจิตีบิซิมร้อยละ 10 [รูปที่ 6 (ข)] และ 20 [รูปที่ 6 (ค)] และ  
 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียม  
 ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 และแทนที่ด้วยเอพิจิตีบิซิมร้อยละ  
 10 [รูปที่ 7 (ข)] พบว่า สารประกอบที่เกิดขึ้นภายในระบบมี  
 แนวโน้มเหมือนกัน คือ ผลึกของควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) แมกนีไทต์  
 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต  
 (C-S-H) และเมื่อมีการแทนที่ด้วยเอพิจิตีบิซิมร้อยละ 30  
 กระตุ้นด้วยอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย  
 โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 [รูปที่ 6 (ง)] จะพบ Ettringite  
 ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) และยิบซั่ม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )  
 เพิ่มเติมเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 6 (ค)

ส่วนการใช้เอพิจิตีบิซิมร้อยละ 20 และ 30 กระตุ้น  
 ด้วยอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย

ใถ้ลอมด้วยเอพิจิตีบิซิมร้อยละ 20 และ 30 ดังแสดงใน  
 รูปที่ 4 (ค), 4 (ง) และ 5 (ค) จะพบสารประกอบเพิ่มขึ้นอีก  
 2 ชนิด คือ Ettringite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) และ  
 Vishnevite ( $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_4\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$ ) ส่วนการใช้  
 เอพิจิตีบิซิมร้อยละ 30 [รูปที่ 5 (ง)] ที่ใช้ตราส่วนสารละลาย  
 โซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5



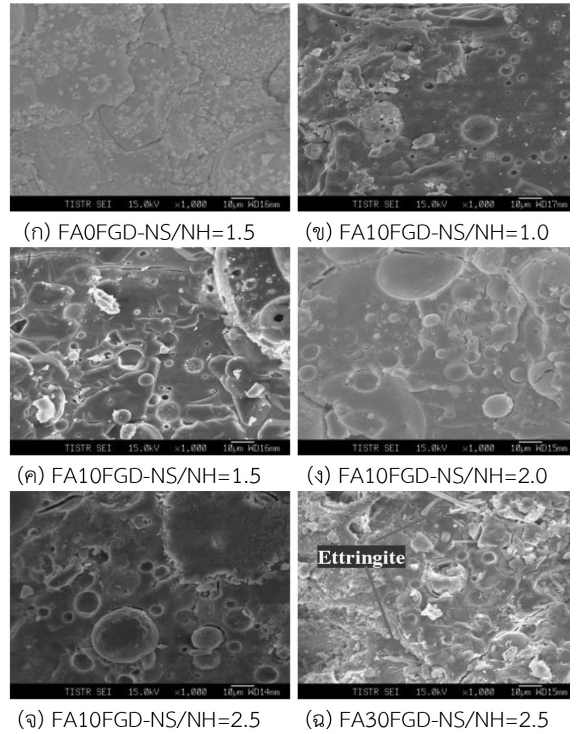
โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 ดังแสดงในรูปที่ 7 (ค), 7 (ง) จะพบสารประกอบเพิ่มขึ้นอีก 2 ชนิด คือ Ettringite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) และยิปซั่ม ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เพิ่มเติมเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 7 (ข)

### 3.4 โครงสร้างทางจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ผสมเอพิจีตียิปซั่มที่อายุตัวอย่าง 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเอพิจีตียิปซั่ม เมื่อพิจารณาปัจจัยของการแทนที่ด้วยเอพิจีตียิปซั่มในเถ้าลอยร้อยละ 0 [รูปที่ 8 (ก)] กับ 10 [รูปที่ 8 (ค)] พบว่า ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจะแน่นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เอพิจีตียิปซั่มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ของวัสดุตั้งต้นจะเกิดเป็นผลผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) และจะเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและ/หรืออะลูมินาจากเถ้าลอยและเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ร่วมกับโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanjitsuwan และคณะ [16]

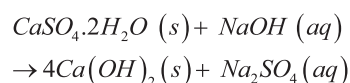
ส่วนเมื่อพิจารณาปัจจัยของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่การแทนที่เอพิจีตียิปซั่มในเถ้าลอยร้อยละ 10 พบว่า ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 [รูปที่ 8 (ข)] และ 1.5 [รูปที่ 8 (ค)] มีเกิดปฏิกิริยาดีกว่าอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 [รูปที่ 8 (ง)] และ 2.5 [รูปที่ 8 (จ)] เมื่อพิจารณาจากอนุภาคของเถ้าลอยที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดปฏิกิริยาบางส่วนภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์น้อยกว่าและมีแนวโน้มแน่นตัวมากกว่า

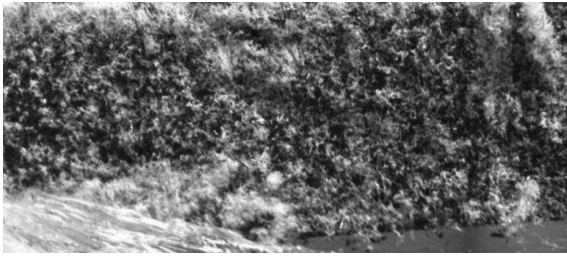
ขณะที่เมื่อพิจารณาปัจจัยของการแทนที่เอพิจีตียิปซั่มในเถ้าลอยร้อยละ 10 [รูปที่ 8 (จ)] และ 30 [รูปที่ 8 (ฉ)] ที่ใช้



รูปที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมเอพิจีตียิปซั่มเมื่อแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน

อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 พบว่า การแทนที่เอพิจีตียิปซั่มร้อยละ 30 จะเริ่มปรากฏสารประกอบอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ [รูปที่ 6(ง) และ 7(ง)] ที่จะพบ เอต์ทริไนต์ ซึ่งการพบเอต์ทริไนต์ หมายถึง โครงสร้างทางจุลภาคมีโอกาสเกิดแตกร้าวจากการขยายตัว เนื่องจากการใช้เอพิจีตียิปซั่มร้อยละ 30 เป็นการใช้ในปริมาณสูงจะมีโอกาสเกิดโซเดียมซัลเฟตสูงมากและจะส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ในอายุปลาย ดังเช่นสมการการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ [13]





**รูปที่ 9** ลักษณะคราบเกลือของจีโอพอลิเมอร์เพสต์จาก  
 แก้วลอยผสมเอฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 30 กระตุ้นด้วย  
 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย  
 โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้เอฟจีดีอีปซั่ม  
 แทนที่แก้วลอยในปริมาณมากขึ้นจะมีแนวโน้มการเกิด  
 สารประกอบโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) มากขึ้นภายในระบบ  
 ของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งการเกิดสารประกอบโซเดียมซัลเฟต  
 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) หมายถึง การเกิดคราบเกลือภายในระบบของ  
 จีโอพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น การใช้เอฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 30  
 แทนที่ในแก้วลอยและกระตุ้นด้วยอัตราส่วนสารละลาย  
 โซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5  
 เพื่อผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพสต์ จะเกิดคราบเกลือบนผิวของ  
 ตัวอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 9

#### 4. สรุป

ผลการศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอย  
 ผสมเอฟจีดีอีปซั่มและแปรผันอัตราส่วนสารละลายโซเดียม  
 ซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปัจจัยของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต  
 ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณของการใช้  
 เอฟจีดีอีปซั่มส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของแก้วลอยจีโอ  
 พอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากปริมาณซิลิกาที่มี  
 ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกต  
 และแคลเซียมออกไซด์จากเอฟจีดีอีปซั่มมากขึ้น โดยค่าระยะ  
 ระยะเวลาการก่อตัวของแก้วลอยจีโอพอลิเมอร์ผสมเอฟจีดีอีปซั่ม  
 ร้อยละ 10-30 มีค่าระหว่าง 6-20 นาที

2. การใช้เอฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 10 ช่วยปรับปรุงกำลัง

รับแรงอัดของแก้วลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ แต่อย่างไรก็ตาม  
 กำลังอัดของแก้วลอยจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง  
 เมื่อมีการใช้เอฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 20 และ 30 นอกจากนั้น  
 กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของอัตราส่วนของ  
 สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 ที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากองค์ประกอบของแคลเซียมซัลเฟต  
 จากเอฟจีดีอีปซั่มทำปฏิกิริยากับโซเดียมออกไซด์จาก  
 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต  
 ให้เกิดเป็นสารประกอบโซเดียมซัลเฟต

3. ปริมาณการใช้เอฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 10 แทนที่  
 ในแก้วลอยและกระตุ้นด้วยอัตราส่วนของสารละลายโซเดียม  
 ซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.5 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด  
 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 54.3 เมกะปาสกาล

4. องค์ประกอบทางแร่ของแก้วลอยจีโอพอลิเมอร์ผสม  
 เอฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 10 สำหรับทุกอัตราส่วนสารละลาย  
 โซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะพบ  
 สารประกอบของผลึกของควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) แมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  
 แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)  
 ซึ่งการพบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) สอดคล้องกับ  
 ผลกำลังอัดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5. การพบสารประกอบเอ็ดทรินไกต์เพิ่มเติมจากการ  
 วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนผสม  
 ของการใช้เอฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 20 และ 30 กระตุ้นด้วย  
 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียม  
 ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัด  
 ที่มีแนวโน้มลดลง

6. ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของการใช้เอฟจีดี  
 อีปซั่มร้อยละ 10 มีแนวโน้มแน่นตัวมากเมื่อเปรียบเทียบกับ  
 ส่วนผสมควบคุม ส่วนลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเมื่อใช้  
 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียม  
 ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.0 และ 1.5 มีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยา  
 ดีกว่าอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย  
 โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 และ 2.5 นอกจากนั้น  
 การแทนที่เอฟจีดีอีปซั่มร้อยละ 30 พบเอ็ดทรินไกต์ซึ่งเป็น  
 สาเหตุที่ทำให้ตัวอย่างเกิดแตกร้าวจากการขยายตัว

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ 2561 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สัญญาเลขที่ NKR2561REV017 และผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Davidovits, "Geopolymers-Inorganic polymeric new materials," *Journal of Thermal Analysis*, vol. 37, no. 8, pp. 1633–1656, 1991.
- [2] S. Hanjitsuwan, T. Phoo-ngernkham, L.Y. Li, N. Damrongwiriyanupap, and P. Chindapasirt, "Strength development and durability of alkali-activated fly ash mortar with calcium carbide residue as additive," *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 714–723, 2018.
- [3] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindapasirt, "Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive," *Materials & Design*, vol. 53, pp. 269–274, 2014.
- [4] T. Phoo-ngernkham, P. Chindapasirt, V. Sata, S. Pangdaeng, and T. Sinsiri, "Properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement additive," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 2, pp. 214–220, 2013.
- [5] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, and D.E. MacPhee, "Effect of calcium additions on N-A-S-H cementitious gels," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 93, no. 7, pp. 1934–1940, 2010.
- [6] J. Kaweewong, "Using flue gas desulfurization (FGD) gypsum, by-product of coal-fired power plants in agriculture," *King Mongkut's Agricultural Journal*, vol. 36, no. 1, pp. 161–172, 2018 (in Thai).
- [7] *Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle*, ASTM C191-13, 2013.
- [8] *Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens)*, ASTM C109, 2002.
- [9] T. Phoo-ngernkham, C. Phiangphimai, D. Intarabut, S. Hanjitsuwan, N. Damrongwiriyanupap, L.Y. Li, and P. Chindapasirt, "Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue," *Construction and Building Materials*, vol. 247, pp. 118543, 2020.
- [10] *Standard specification for epoxy-resin-base bonding systems for concrete*, ASTM C881/C881M-14, 2014.
- [11] P. Chindapasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *Journal of Materials Science*, vol. 47, no. 12, pp. 4876–4883, 2012.
- [12] K. Boonserm, V. Sata, K. Pimraksa, and P. Chindapasirt, "Improved geopolymerization of bottom ash by incorporating fly ash and using waste gypsum as additive," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 7, pp. 819–824, 2012.
- [13] U. Rattanasak, K. Pankhet, and P. Chindapasirt, "Effect of chemical admixtures on properties



- of high-calcium fly ash geopolymer,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 18, no. 3, pp. 364–369, 2011.
- [14] X. Guo, H. Shi, L. Chen, and W.A. Dick, “Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 173, no. 1–3, pp. 480–486, 2010.
- [15] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez, and D.E. MacPhee, “Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ,” *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 923–931, 2011.
- [16] S. Hanjitsuwan, T. Phoo-ngernkham, and N. Damrongwiriyanupap, “Comparative study using Portland cement and calcium carbide residue as a promoter in bottom ash geopolymer,” *Construction and Building Materials*, vol. 133, pp. 128–134, 2017.