

อิทธิพลของชนิดของสารละลายต่างต่อกำลึงอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์พอสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก

ธนากร ภูเงินขำ^{1*} สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ² จิระยุทธ สืบสุข¹ และ จักษดา ชำรงวุฒิ¹

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารละลายต่างต่อกำลึงอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก เถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กถูกกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์เพียงอย่างเดียว (NH) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมกัน (NHNS) และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียว (NS) สำหรับใช้เป็นของเหลวในส่วนผสม ในการศึกษาครั้งนี้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของตะกรันเตาถลุงเหล็กช่วยปรับปรุงกำลึงอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์พอสต์ เนื่องด้วยเป็นการเพิ่มแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตภายในระบบของจีโอพอลิเมอร์ ขณะที่สารละลายต่างส่งผลต่อปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์, เถ้าลอย, ตะกรันเตาถลุงเหล็ก, กำลึงอัด, โครงสร้างทางจุลภาค

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: tanakorn.ph@rmuti.ac.th รับเมื่อ 3 ธันวาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2559

Influence of Alkali Solution Types on Compressive Strength and Microstructure of Geopolymer Manufactured From Low Calcium Fly Ash Containing Ground Blast Furnace Slag

Tanakorn Phoo-ngernkham^{1*}, Sakonwan Hanjitsuwan², Jirayut Suebsuk¹
and Jaksada Thumrongvut¹

Abstract

This article investigated the influences of alkali solution on compressive strength and microstructure of geopolymer manufactured from low fly ash (FA) containing ground blast furnace slag (GBFS). The FA was replaced with GBFS at the dosages of 0, 50 and 100 by weight of binder. The FA-GBFS blends were activated with 10 molar sodium hydroxide solutions directly (NH), sodium silicate and sodium hydroxide solutions together (NHNS), and sodium silicate directly (NS) for using as the liquid portion in the mixture. Alkaline liquid/binder ratio of 0.60 and curing at ambient temperature of 25 °C were selected for all mixtures. The results indicated that the increase in GBFS enhanced the compressive strength and microstructure of geopolymer pastes due to additional calcium silicate hydrate into the geopolymer matrix. While the alkali solutions had significance effects on the geopolymerization products.

Keywords : Geopolymer, Fly ash, Ground blast furnace slag, Compressive strength, Microstructure

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan.

² Program in Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University.

* Corresponding author, E-mail: tanakorn.ph@rmuti.ac.th Received 3 December 2015, Accepted 9 November 2016

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศปริมาณมาก เนื่องจากใช้หินปูน (CaCO_3) เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิต ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก [1] การพยายามลดการใช้ปูนซีเมนต์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดก๊าซเรือนกระจกได้ ในปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุเชื่อมชนิดใหม่ที่มีชื่อว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์เพื่อใช้ในการงานก่อสร้าง [2-4] วัสดุจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของวัสดุตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) [5]

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ซึ่งทั้งเถ้าลอย แคลเซียมต่ำ และเถ้าลอยแคลเซียมสูง สามารถใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตเป็นจีโอพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาในปริมาณสูง แต่ข้อจำกัดของการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น คือ การพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ค่อนข้างน้อย เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง จึงมีนักวิจัยที่ศึกษาการเติมสารผสมเพิ่มที่มีองค์ประกอบของแคลเซียม เช่น แคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และปูนซีเมนต์พัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ให้เพิ่มขึ้นจากการศึกษาของ Phoo-ngernkham et al. [6] พบว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อเป็นแหล่งให้แคลเซียมจะส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน และการใช้แคลเซียมเป็นสารผสมเพิ่มในระบบเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H)

ร่วมกับ จีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) ดังเช่นการรายงานของ Guo et al. [7]

เถ้าลอยแคลเซียมต่ำและตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นวัสดุตั้งต้นอีกชนิดที่มีความเหมาะสมในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กซึ่งมีประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ [8] ตะกรันเตาถลุงเหล็กถูกใช้เป็นวัสดุประสานในอุตสาหกรรมซีเมนต์เนื่องด้วยมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา และอะลูมินาในส่วนอสัณฐานจึงมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานในระบบที่มีความเป็นด่างแบบกลาง [9] มีนักวิจัยพบว่าการแทนที่ ตะกรันเตาถลุงเหล็กในเถ้าลอยในระบบจีโอพอลิเมอร์ เป็นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมให้กับระบบและช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพเมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง [10] นอกจากนี้ Chi and Huang [11] รายงานว่า การแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กในเถ้าลอยในระบบจีโอพอลิเมอร์ส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างมีความแน่นตัวเพิ่มขึ้น โดยในระบบที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการเกิดปฏิกิริยานั้นให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยา [12] แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาร่วมกันส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์จากตะกรันเตาถลุงเหล็ก [10] ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาก็คือ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และสารประกอบแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ซึ่งคล้ายกับผลผลิตที่เกิดขึ้นในระบบปูนซีเมนต์ [13]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กเพื่อเพิ่มกำลังอัดของเถ้าลอยแคลเซียมต่ำจีโอพอลิเมอร์ โดยมี

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลัังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำที่มีการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็ก ผลที่ได้จากงานวิจัยทำให้เข้าใจพฤติกรรมของวัสดุดังกล่าว และเป็นแนวทางในการนำวัสดุจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวไปใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมต่อไป

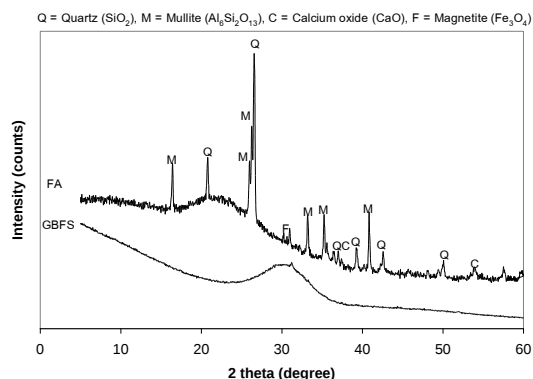
2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (FA) จากโรงไฟฟ้า Hekinan ประเทศญี่ปุ่นและตะกรันจากเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground blast furnace slag, GBFS) จากบริษัท Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation สารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ประกอบด้วย 11.67% Na_2O , 28.66% SiO_2 , 59.67% H_2O

องค์ประกอบเคมีของ FA และ GBFS ดังแสดงในตารางที่ 1 ความถ่วงจำเพาะของ FA และ GBFS เท่ากับ 2.20 และ 2.91 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ FA และ GBFS เท่ากับ 12.3 และ 12.4 ไมโครเมตร ส่วนค่าความละเอียดด้วยวิธีเบลน (Blaine fineness) ของ FA และ GBFS เท่ากับ 3,100 และ 4,950 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของ FA และ GBFS ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า FA ประกอบด้วยส่วนอสัณฐานตามที่ปรากฏลักษณะของ hump ที่มุม 18-28 และพบผลึกของมัลไลต์ ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) ควอตซ์ (SiO_2) แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ (MgFe_2O_4) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ส่วน GBFS ส่วนใหญ่ประกอบด้วย

ส่วนอสัณฐานตามที่ปรากฏลักษณะของ hump ที่มุม 25-35 [13] และผลึกแมกนีไทต์เล็กน้อย



รูปที่ 1 XRD ของวัสดุตั้งต้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ FA และ GBFS

Chemical compositions	FA (%)	GBFS (%)
SiO_2	52.31	30.53
Al_2O_3	27.04	13.67
Fe_2O_3	6.85	0.33
CaO	3.32	46.00
MgO	1.23	5.09
Na_2O	1.15	0.24
K_2O	1.29	0.36
SO_3	0.99	-
LOI	1.60	0.22

2.2 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมและอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของจีโอพอลิเมอร์ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนสารละลายต่างต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.6 ศึกษาปริมาณการแทนที่ของ GBFS

ใน FA เท่ากับร้อยละ 0 (0GBFS), 50 (50GBFS) และ 100 (100GBFS) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และ ศึกษาชนิดของสารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว (NH) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NHNS) และ สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงชนิดเดียว (NS) โดยใช้ที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ เท่ากับ 2.0

วิธีการผสมเริ่มต้นจากนำ FA และ GBFS ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเทสารละลายต่างลงใน ส่วนผสม และผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์

Symbol	FA (g)	GBFS (g)	NH (g)	NS (g)
0GBFS-NH	100	-	60	-
50GBFS-NH	50	50	60	-
100GBFS-NH	-	100	60	-
0GBFS-NHNS	100	-	20	40
50GBFS-NHNS	50	50	20	40
100GBFS-NHNS	-	100	20	40
0GBFS-NS	100	-	-	60
50GBFS-NS	50	50	-	60
100GBFS-NS	-	100	-	60

2.3 การทดสอบกำลังอัด

หลังจากการผสม เทตัวอย่างลงในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร จากนั้นปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบและหุ้มตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติก บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เมื่อครบอายุบ่ม 1 วัน

และตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วหุ้มตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของความชื้นและเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง จนครบอายุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน โดยใช้ค่าเฉลี่ย 3 ก่อนต่อหนึ่งส่วนผสม

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Symbol	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio
0GBFS-NH	1.94
50GBFS-NH	2.04
100GBFS-NH	2.23
0GBFS-NHNS	2.36
50GBFS-NHNS	2.56
100GBFS-NHNS	3.07
0GBFS-NS	2.57
50GBFS-NS	2.88
100GBFS-NS	3.49

2.4 การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยการเลือกชิ้นตัวอย่างขนาดเล็ก ประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ที่อยู่ตรงกลางของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ส่วนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยบดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ให้เป็นผงละเอียด และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD) โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ตั้งแต่มุม 5 ถึง 60 องศา

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังอัด

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เมื่อมีการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกัน และการแทนที่ GBFS ใน FA ดังแสดงตารางที่ 4 ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วย GBFS เพิ่มขึ้นในทุกส่วนผสมที่มีการใช้สารละลาย NH, NHNS และ NS ในการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของส่วนผสมที่ใช้ NHNS ในการเกิดปฏิกิริยาที่การแทนที่ GBFS ร้อยละ 0, 50, และ 100 มีค่าเท่ากับ 43.0, 114.5 และ 172.0 เมกะปาสกาล ตามลำดับ การเพิ่ม GBFS ในส่วนผสมเป็นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าลอยเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ทำให้มีสารประกอบดังกล่าวร่วมกับจีโอพอลิเมอร์เจล (N-A-S-H) ในโครงสร้างของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จึงส่งผลเชิงบวกต่อกำลังอัด [13] การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง GBFS และสารละลายต่างเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลเชิงบวกต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรตไรเซชัน ซึ่งปริมาณการแทนที่ของ GBFS ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น

จากตารางที่ 4 ส่วนผสม กรณี 0GBFS ที่ใช้สารละลายต่าง NH, NHNS และ NS ในการเกิดปฏิกิริยาค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน มีค่าเป็น 0 เมกะปาสกาล เนื่องจากส่วนผสมดังกล่าวมีเฉพาะเถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งเถ้าลอยแคลเซียมต่ำมีความสามารถในการ

ก่อตัวและรับกำลังได้น้อยเมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องและที่อายุ 28 วัน ตัวอย่างที่มีการพัฒนากำลังในกรณีที่ใช้สารละลายต่าง NH และ NHNS ในการเกิดปฏิกิริยามีเท่ากับ 1.5 และ 43.0 เมกะปาสกาล สำหรับตัวอย่างที่ใช้ NS ในการเกิดปฏิกิริยายังคงไม่สามารถรับกำลังได้เนื่องจากด้วยสารละลาย NH มีหน้าที่ใช้ในการละลายไอออนของซิลิกอน (Si^{4+}) และอะลูมิเนียม (Al^{3+}) จากวัสดุตั้งต้น เพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน [15] อย่างไรก็ตามการพัฒนากำลังรับแรงอัดของส่วนผสม ที่มีเฉพาะ FA และใช้ NH และ NS เพียงชนิดเดียวในการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ NHNS ในการเกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 4 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

Symbol	Compressive strength (MPa)	
	7 days	28 days
0GBFS-NH	0*	1.5
50GBFS-NH	6.5	18.5
100GBFS-NH	15.5	27.0
0GBFS-NHNS	0*	43.0
50GBFS-NHNS	85.0	114.5
100GBFS-NHNS	144.5	172.0
0GBFS-NS	0*	0*
50GBFS-NS	39.0	55.0
100GBFS-NS	120.0	173.0

หมายเหตุ 0* กำลังรับแรงอัดมีค่าน้อยมาก

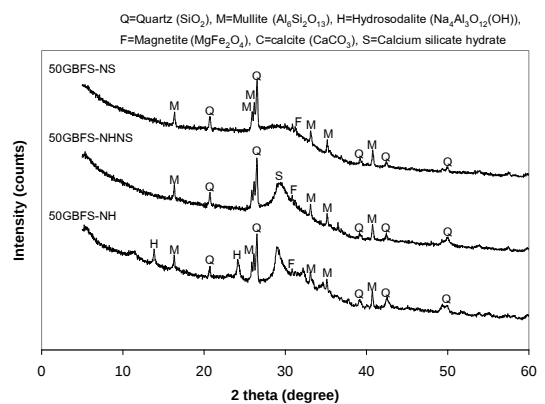
ในส่วนผสมที่มีการแทนที่ GBFS ร้อยละ 50 ของส่วนผสมที่ใช้สารละลายต่าง NH, NHNS และ NS ในการเกิดปฏิกิริยา มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 18.3,

114.5 และ 55.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จะเห็นว่า ส่วนผสม 50GBFS-NH ให้ค่ากำลังรับอัดต่ำกว่าการใช้ สารละลายต่าง NHNS และ NS ในการเกิดปฏิกิริยา อาจเนื่องจากระบบของจีโอพอลิเมอร์ต้องการระยะเวลา ในการพัฒนากำลังอัดเมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง [14-15] ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำ ส่วนผสม 50GBFS-NHNS ให้ผลกำลังรับอัดที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ สารละลายต่าง NH และ NS เพียงชนิดเดียวในการ เกิดปฏิกิริยาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rashad et al. [16]

ในส่วนผสมที่มีการแทนที่ GBFS ร้อยละ 100 ของ ส่วนผสมที่ใช้สารละลายต่าง NH, NHNS และ NS ในการเกิดปฏิกิริยา มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 27.0, 172.0, 173.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จะเห็นว่า ส่วนผสม 100GBFS-NS มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด อาจ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์ จาก GBFS และซิลิกาจากสารละลายต่าง NS เกิดเป็น สารประกอบ C-S-H [13] Ismail et al. [13] รายงานว่า การเกิดปฏิกิริยาของ GBFS กับสารละลายต่างทำให้เกิด การละลายของแคลเซียมออกไซด์และอะลูมิเนียมจาก GBFS ส่งผลเกิดเจลของ C-S-H และ C-A-S-H ในระบบ ทำให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ค่ากำลังอัดของวัสดุ จีโอพอลิเมอร์ยังขึ้นกับอัตราส่วน โมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยอัตราส่วน โมล $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 3.50 ทำให้ ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูง มีค่าสูง [17] เมื่อเทียบกับส่วนผสม 100GBFS-NS ที่มีอัตราส่วน โมล เท่ากับ 3.49 (ดังแสดงในตารางที่ 3)

3.2 องค์ประกอบทางแร่

จากผลการทดสอบกำลังอัดพบว่าการแทนที่มี GBFS ในส่วนผสมร้อยละ 50 จะทำให้ค่ากำลังอัดของ จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเลือกส่วนผสมของ 50GBFS เมื่อแปรผันสารละลาย ต่าง NH, NHNS และ NS มาศึกษาองค์ประกอบทางแร่ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 XRD ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

จากรูปพบว่าในส่วนผสม 50GBFS-NH พบส่วนที่เป็น อนุสัฐานและของผลึกของควอตซ์ มัลไลต์ แมกนีไทต์ และไฮโดรโซดาไลต์ที่ลดลง นอกจากนี้ ยังพบผลึกของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และไฮโดรโซดาไลต์ (hydrosodalite, $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$) ซึ่งการพบไฮโดรโซดาไลต์ แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เช่นใน ตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดที่ได้ยังมีค่าน้อย กรณี ส่วนผสม 50GBFS-NHNS พบว่าส่วนที่เป็นอนุสัฐาน ผลึกสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ควอตซ์ มัลไลต์ ซึ่งส่วนผสมนี้มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน

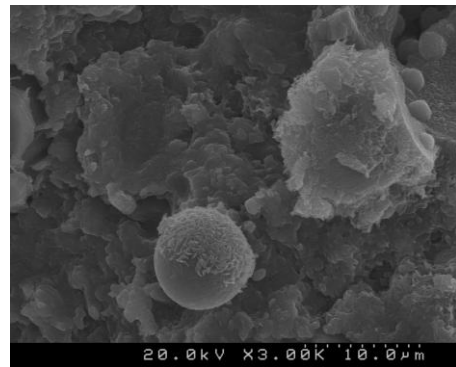
เท่ากับ 114.5 เมกะปาสคาล ขณะที่ส่วนผสมของ 50GBFS-NS พบส่วนที่เป็นอสังฐานที่มุ่ม 28-35 นอกจากนี้ยังพบผลึกควอตซ์และมัลไลต์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้ NHNS การลดลงของผลึกมีลักษณะทำนองเดียวกันกับส่วนผสมของ 50GBFS-NHNS ซึ่งการลดลงของผลึกหมายถึงการเพิ่มขึ้นของส่วนอสังฐานของระบบจีโอพอลิเมอร์ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับส่วนผสมของ 50GBFS-NH

3.3 โครงสร้างทางจุลภาค

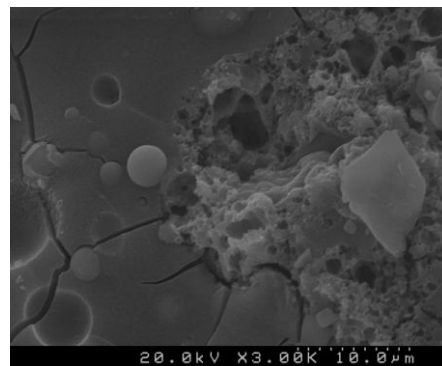
จากผลการทดสอบกำลังอัดพบว่า การแทนที่ GBFS ในส่วนผสมร้อยละ 50 จะทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเลือกส่วนผสมของ 50GBFS เมื่อแปรผันสารละลายต่าง NH, NHNS และ NS มาศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 3

การเพิ่มปริมาณ GBFS ในส่วนผสมเป็นการเพิ่มผลผลิตที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ GBFS ในสารละลายต่างเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) และความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะช่วยในการพัฒนากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ [18] โดยส่วนผสมที่ใช้ NHNS ลักษณะโครงสร้างมีความแน่นตัวมากกว่าการใช้ NH เพียงชนิดเดียว และ NS เพียงชนิดเดียว ในการเกิดปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามยังพบเถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ร่วมกับโครงสร้างของเนื้อจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งการใช้สารละลายต่าง NH และ NS ร่วมกันในการ

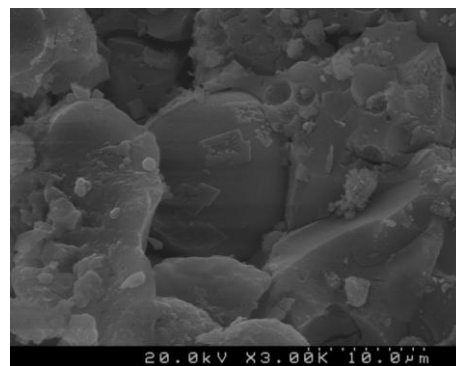
เกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรโซชันที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์ [19] ซึ่งกำลังอัดของ 50GBFS-NHNS ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 114.5 เมกะปาสคาล



(ก) 50GBFS-NH



(ข) 50GBFS-NHNS



(ค) 50GBFS-NS

รูปที่ 3 SEM ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาผลของชนิดสารละลายต่างและปริมาณการแทนที่ GBFS ใน FA ที่มีต่อกำลังอัด และโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า จีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่มีการแทนที่ FA ด้วย GBFS ช่วยปรับปรุงกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องด้วยการแทนที่ด้วย GBFS เป็นการเพิ่มแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ให้กับระบบของจีโอพอลิเมอร์ส่งผลให้ช่วยเพิ่มผลผลิตกับระบบของจีโอพอลิเมอร์ จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ พบว่า การใช้สารละลายต่าง NH และ NHNS เป็นสารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้เกิดผลึกของ C-S-H ในขณะที่ระบบของ NS เพียงอย่างเดียวมีความเป็นอสัณฐานสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคที่แสดงให้เห็นว่า 50GBFS-NHNS มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าในกรณี 50GBFS-NH และ 50GBFS-NS เนื่องจากส่วนผสมดังกล่าวเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์กว่าทั้ง 2 ระบบ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาส่วนผสมของ 100GBFS ที่ใช้สารละลายต่าง NS เพียงชนิดเดียวเป็นสารละลายต่าง ให้ค่ากำลังอัดเทียบเท่ากับการใช้สารละลายต่าง NHNS ซึ่งค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของ 100GBFS-NHNS และ 100GBFS-NS มีค่าเท่ากับ 172.0 และ 173.0 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Kroehong, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, "Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste", Construction and Building Materials 25(11), 2011, pp. 4095-4104.
- [2] T. Phoo-ngernkham and S. Hanjisuwan, "Factors of alkali solutions affecting physical properties and microstructure of fly ash geopolymer mortar containing Portland cement", The Journal of Industrial Technology 10(3), 2014, pp. 61-72.
- [3] T. Phoo-ngernkham, S. Hanjisuwan and P. Chindaprasirt, "Influence of Portland cement replacement and sand to binder ratio on slant shear strength between concrete substrate and geopolymer", The Journal of Industrial Technology 11(3), 2015, pp. 42-52.
- [4] S. Hanjisuwan, T. Phoo-ngernkham and P. Chindaprasirt, "Properties of fly ash geopolymer paste containing portland cement", The Journal of Industrial Technology 9(2), 2013, pp. 97-106. (in Thai)
- [5] J. Davidovits, "Geopolymers - Inorganic polymeric new materials", Journal of Thermal Analysis 37(8) 1991, pp. 1633-1656.
- [6] T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Pangdaeng and T. Sinsiri, "Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Pastes Containing Portland Cement as Additive", International Journal of Minerals, metallurgy and Materials 20(2), 2013, pp. 214-220.

- [7] X. Guo, H. Shi and W.A. Dick, "Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer", *Cement and Concrete Composites* 32(2), 2010, pp. 142-147.
- [8] S. Aydın and B. Baradan, "Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars", *Composites Part B: Engineering* 57, 2014, pp. 166-172.
- [9] F. Puertas, S. Martinez-Ramirez, S. Alonso and T. Vázquez, "Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products", *Cement and Concrete Research* 30(10), 2000, pp. 1625-1632.
- [10] S. Kumar, R. Kumar and S.P. Mehrotra, "Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer", *Journal of Materials Science* 45(3), 2010, pp. 607-615.
- [11] M. Chi and R. Huang, "Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars", *Construction and Building Materials*. 40, 2013, pp. 291-298.
- [12] R.R. Lloyd, "The durability of inorganic polymer cements" PhD Thesis, The University of Melbourne, 2008.
- [13] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, R. San Nicolas, S. Hamdan and J.S.J. van Deventer, "Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash", *Cement and Concrete Composites* 45, 2014, pp. 125-135.
- [14] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul and P. Chindaprasirt, "NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature", *Fuel* 90(6), 2011, pp.2118-2124.
- [15] J.W. Phair and J.S.J. Van De Venter, "Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymer", *Minerals Engineering* 14(3), 2001, pp. 289-304
- [16] A.M. Rashad, Y. Bai, P.A.M. Basheer, N.B. Milestone and N.C. Collier, "Hydration and properties of sodium sulfate activated slag", *Cement and Concrete Composites* 37, 2013, pp. 20-29.
- [17] P. Chindaprasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems", *Journal of Materials Science* 47(12), 2012, pp. 4876-4883.
- [18] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, S. Hamdan and J.S.J Van Deventer, "Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure", *Materials and Structures* 46(3), 2013, pp. 361-373.
- [19] J.E. Oh, P.J.M. Monteiro, S.S. Jun, S. Choi and S.M. Clark, "The evolution of strength and crystalline pastes for alkali-activated ground Blast furnace slag and fly ash-based geopolymers", *Cement and Concrete Research* 40(2), 2010, pp. 189-196.