

ปัจจัยของสารละลายต่างต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาค ของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชนากร ภูเงินขำ¹ และ สกวรรณ ห่านจิตสุวรรณ^{2*}

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของสารละลายต่างต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สารละลายต่างที่ใช้เป็นของเหลวประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์เพียงอย่างเดียว (NH) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกัน (NHWG) และสารละลายโซเดียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียว (WG) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสารละลายต่างที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งสารละลายต่างเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาของระบบจีโอโพลิเมอร์ โดยการใช้สารละลาย NHWG สามารถให้กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงกว่าการใช้สารละลาย NH และการใช้สารละลาย WG นอกจากนี้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซัลเฟตผสมกันยังพบผลึกของสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตไฮดรตและส่วนอสัณฐานของจีโอโพลิเมอร์ในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มากกว่าการใช้สารละลาย NH และการใช้สารละลาย WG ส่งผลให้มีกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นที่สูงสอดคล้องกับผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคของ เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีความหนาแน่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์, สารละลายอัลคาไล, กำลังรับแรงอัด, โมดูลัสยืดหยุ่น, โครงสร้างทางจุลภาค

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: yim_kachan@yahoo.com รับเมื่อ 15 สิงหาคม 2557 ตอบรับเมื่อ 31 ตุลาคม 2557

Factors of Alkali Solutions Affecting Physical Properties and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement

Tanakorn Phoo-ngernkham¹ and Sakonwan Hanjitsuwan^{2*}

Abstract

This article investigated the factors of alkali activated solutions affecting mechanical properties and microstructure of fly ash (FA) geopolymer containing Portland cement type I (PC). The PC was used to replace FA at the dosages of 0, 5, 10, 15 and 20% by weight of binder. The alkali activated solution of 10 molar of sodium hydroxide only (NH), 10 molar of sodium hydroxide and sodium silicate solution (NHWG), and sodium silicate solution only (WG) were used as the liquid portion in the mixture. The test results indicated that the type of alkali activated solutions for producing the geopolymer affecting mechanical properties and microstructure of FA geopolymer containing PC. The alkali activators significantly affected the reaction products of geopolymer matrix. The use of NHWG solution gave higher compressive strength and modulus of elasticity of FA geopolymer mortar than those of NH solution only and WG solution only. Moreover, the use of NHWG solution was found to have more peak of calcium silicate hydrate and amorphous phase of FA geopolymer containing PC in XRD pattern than those of NH solution and WG solution only. This was corresponded to SEM results of FA geopolymer paste, which appeared denser and more homogeneous matrix.

Keywords : Geopolymer, Alkali solution, Compressive strength, Modulus of elastic, Microstructure

¹ Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

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

* Corresponding author, E-mail: yim_kachan@yahoo.com Received 15 August 2014, Accepted 31 October 2014

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานในกระบวนการผลิตมาก ขณะเดียวกันในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยเติบโตอย่างรวดเร็วทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากข้อจำกัดที่กล่าวถึงข้างต้นทั้งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และการไม่ได้ใช้ประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้งจึงได้มีการพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ขึ้นโดยนำเอาถ่านหินจากภาคอุตสาหกรรมที่เหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยเอาถ่านหินมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และหรืออะลูมินา (Al_2O_3) ที่อยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นหลักมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิต เรียกว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งจีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นกับสารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ และสารละลายอัลคาไลซิลิเกต และใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นโมเลกุลลูกโซ่เชื่อมต่อกันคล้ายกับการเชื่อมต่อกันของโพลีเมอร์ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวทำให้วัสดุเกิดการแข็งตัวและสามารถรับกำลังอัดได้เช่นเดียวกับกับซีเมนต์เพสต์ [1] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่สามารถรับกำลังอัดได้ต่ำที่อุณหภูมิปกติ จึงต้องมีการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันและเพิ่มกำลังอัด [2] แต่หากพิจารณาถึงการนำมาใช้อุตสาหกรรมก่อสร้างจริงยังคงค่อนข้างยุ่งยากและลำบาก ดังนั้นในปัจจุบันนักวิจัยได้พยายามศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่อุณหภูมิปกติ เช่น

Garcia-Lodeiro et al. [3] ได้รายงานว่าการที่จีโอโพลิเมอร์มีแคลเซียมออกไซด์ในระบบมีแนวโน้มส่งผลทางบวกต่อสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (CASH) คล้ายกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาในระบบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ระบบมีสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรตแทรกอยู่กับผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้วัสดุแข็งตัวและรับกำลังได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิห้องและมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Phoo-ngernkham et al. [4] และ Pangdaeng et al. [5] ได้รายงานว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 5-15 ในเถ้าลอยสามารถปรับปรุงและพัฒนากำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำคือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต อีกทั้งการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ในเถ้าลอยยังสามารถเพิ่มความร้อนให้กับระบบของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งความร้อนนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮดรชัน

จากผลงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเชิงบวกต่อการพัฒนาเป็นวัสดุประสานให้มีกำลังสูง นอกจากนี้ปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ สารละลายต่างที่ใช้ในเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยสารละลายต่างที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งสารละลายไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่

ชะละลายองค์ประกอบหลัก (ซิลิกาและอะลูมินา) จากวัสดุตั้งต้น สารละลายไฮดรอกไซด์ที่นิยมใช้ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งโดยปกติสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถชะละลายซิลิกาและอะลูมินาได้ดีกว่าสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ [6] ขณะที่สารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เพิ่มปริมาณซิลิกอนไอออนที่พร้อมจะเกิดปฏิกิริยาให้กับระบบและทำให้แต่ละไอออนเกิดการเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่โพลิเมอร์ [7]

จากผลเชิงบวกในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในถ้ำลอย และหน้าที่เฉพาะของสารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของสารละลายต่างต่อกำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และโครงสร้างทางจุลภาคของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะทำให้เข้าใจถึงอิทธิพลของสารละลายต่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ในงานซ่อมแซมต่อไป

2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วย ถ้ำลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) และทราย (RS) โดยองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยแคลเซียมสูงและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 1

สารละลายที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (WG) (13.89% Na₂O, 32.15% SiO₂ และ 46.04% H₂O)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ FA และ PC

Chemical compositions	FA (%)	PC (%)
SiO ₂	29.32	20.80
Al ₂ O ₃	12.96	4.70
Fe ₂ O ₃	15.64	3.40
CaO	25.79	65.30
MgO	2.94	1.50
Na ₂ O	2.94	0.40
K ₂ O	2.93	0.10
SO ₃	7.29	2.70
LOI	0.30	0.90
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	57.92	-

2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังแสดงในตารางที่ 2 ถ้ำลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (WG/NH) และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.60, 2.0 และ 1.0 ตามลำดับ ทุกอัตราส่วนผสม การผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้นด้วยผสมถ้ำลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

และทรายให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมสารละลายต่าง และผสมต่อเป็นเวลาประมาณ 5 นาที

ชนิดของสารละลายต่างที่ใช้เป็นของเหลวใน ส่วนผสมของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว (NH), สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลาย โซเดียมซิลิเกต (NHWG) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต เพียงชนิดเดียว (WG)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Symbol	FA (g)	PC (g)	RS (g)	NH (g)	WG (g)
FA0PC_NH	100	-	100	60	-
FA5PC_NH	95	5	100	60	-
FA10PC_NH	90	10	100	60	-
FA15PC_NH	85	15	100	60	-
FA20PC_NH	80	20	100	60	-
FA0PC_NHWG	100	-	100	20	40
FA5PC_NHWG	95	5	100	20	40
FA10PC_NHWG	90	10	100	20	40
FA15PC_NHWG	85	15	100	20	40
FA20PC_NHWG	80	20	100	20	40
FA0PC_WG	100	-	100	-	60
FA5PC_WG	95	5	100	-	60
FA10PC_WG	90	10	100	-	60
FA15PC_WG	85	15	100	-	60
FA20PC_WG	80	20	100	-	60

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

หลังจากกระบวนการผสมแล้วเสร็จ ทำการเท ตัวอย่างลงแบบขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตาม

มาตรฐาน ASTM C109 [8] และห่อแบบหล่อด้วยฟิล์ม พลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจาก การทดสอบ 3 ตัวอย่าง

2.3.2 การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น

การทดสอบ โมดูลัสยืดหยุ่นและการวิเคราะห์ที่ ประยุกต์จากมาตรฐาน ASTM C469 [9] โดยหลังจาก กระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทตัวอย่างลงแบบ ทรงกระบอกขนาด 25x50 มิลลิเมตร และห่อแบบหล่อ ด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของ ตัวอย่าง และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุ การบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจาก การทดสอบ 3 ตัวอย่าง

2.3.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใช้ส่วนผสม เดียวกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 2 แต่ ไม่มีทรายในส่วนผสมของเพสต์ ตัวอย่างสำหรับการ เตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอ- โพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยการเลือก ขึ้นตัวอย่างขนาดเล็ก ประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ที่อยู่ตรง กลางของตัวอย่างชิ้นงานทรงลูกบาศก์ของจีโอ- โพลิเมอร์เพสต์

2.3.4 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบองค์ประกอบทางแร่

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของจีโอ โพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยบดตัวอย่างวัสดุจีโอ โพลิเมอร์เพสต์ให้เป็นผงละเอียด และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD) โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของจีโอ โพลิเมอร์เพสต์ตั้งแต่มุม 5 ถึง 60 องศา

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของถั่วลอยจีโอ โพลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 และ 28 วัน และแปรผันการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอ โพลิเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในถั่วลอย และการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอ โพลิเมอร์ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอ โพลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งกรณีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงชนิดเดียว (NH) ในการเกิดปฏิกิริยา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าค่อนข้างต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยทุกปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจาก NH ต้องการเวลาที่มากขึ้นและความร้อนเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา [10] ดังนั้นกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจาก NH จึงมีค่าที่ค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิปกติ

กรณีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NHWG) ในการเกิดปฏิกิริยา

เป็นจีโอโพลิเมอร์ ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้ จีโอโพลิเมอร์เจลสามารถจับตัวกันและแข็งตัวได้รวดเร็วขึ้น [5] และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้น ซึ่งการอยู่ร่วมกันระหว่างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตกับจีโอโพลิเมอร์เจลทำให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มีความหนาแน่นมากขึ้น [11] อีกทั้งการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีหน้าที่ชะละลายซิลิกาและอะลูมินาออกมาจากวัสดุตั้งต้น ขณะที่สารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่ควบแน่นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เช่นทำให้ระบบของจีโอโพลิเมอร์มีความสมบูรณ์ [7] อย่างไรก็ตามเมื่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 20 ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากที่ส่วนผสมนี้เกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วจึงส่งผลต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เช่น

ตารางที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

Symbols	Compressive strength (MPa)					
	NH		NHWG		WG	
	7D	28D	7D	28D	7D	28D
FA0PC	1.00	5.42	27.83	29.07	8.81	28.65
FA5PC	1.55	6.10	31.76	44.17	18.46	33.08
FA10PC	0.96	6.25	34.39	50.52	17.87	38.87
FA15PC	0.94	6.12	36.64	54.05	22.10	40.34
FA20PC	1.73	6.80	37.83	48.58	10.48	15.89

ส่วนกรณีการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเพียงชนิดเดียว (WG) ในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอโพลิเมอร์ ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้ผลไป

ในทางเดียวกับกรณีใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น และการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 20 ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงอาจเนื่องจากคุณสมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีความหนืด ดังนั้นการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 20 จึงทำให้ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน [12]

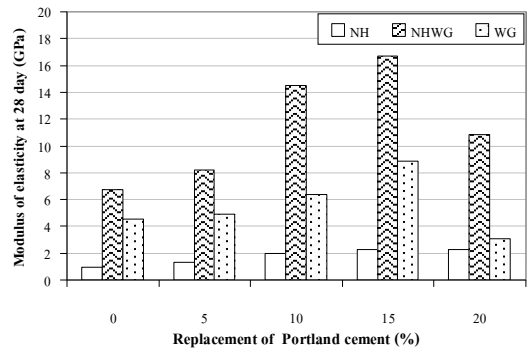
เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผลิตจาก NHWG>WG>NH ขณะที่กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน พบว่ากรณีที่ใช้ WG ถึงแม้ว่าจะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับการใช้ NHWG อย่างไรก็ตามการใช้ WG มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเนื่องจากการใช้ NHWG มีความพร้อมในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันมากกว่า [13]

เมื่อเปรียบเทียบการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอโพลิเมอร์ พบว่าการใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยาสามารถให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด รองลงมาคือการใช้ WG ในการเกิดปฏิกิริยา และการใช้ NH ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด

3.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และแปรผันการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในถ้ำล่อย และการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ส่งผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์

มอร์ตาร์ทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด กล่าวคือ กรณีการใช้ NH ในการเกิดปฏิกิริยา ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในถ้ำล่อยที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ส่วนกรณีการใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอโพลิเมอร์ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในถ้ำล่อยที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ระบบมีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มีความแน่นมากขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับโมดูลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าใกล้เคียงกับโมดูลัสยืดหยุ่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ (มีค่าระหว่าง 19-25 GPa และค่ากำลังรับแรงอัดระหว่าง 51.6-75.6 MPa) [14] อย่างไรก็ตามเมื่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 20 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากที่ส่วนผสมนี้เกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วจึงส่งผล

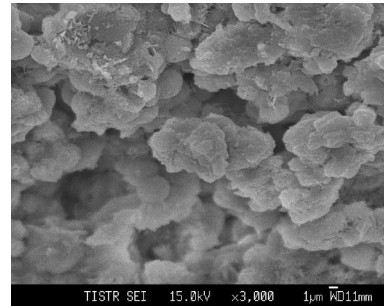
ต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน เช่นเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ขณะที่กรณีการใช้ WG ในการเกิดปฏิกิริยา ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเนื้อที่เพิ่มขึ้น แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 20 ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงอาจเนื่องจากสมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีความหนืด ประกอบกับการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 20 เกิดการทำปฏิกิริยาที่เร็วขึ้นและส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน [12] ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จึงมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 15

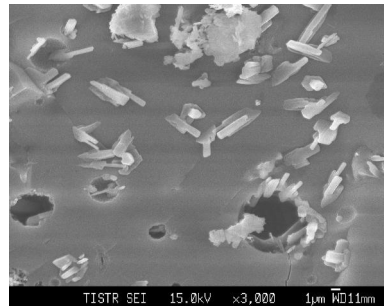
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นจีโอโพลิเมอร์ที่มีผลต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ พบว่าการใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยาสามารถให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สูงสุด รองลงมาคือการใช้ WG ในการเกิดปฏิกิริยา และการใช้ NH ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ต่ำที่สุดทำนองเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.3 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์

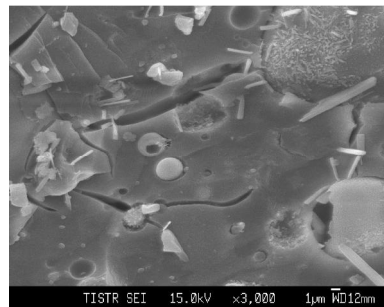
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเยื่อของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 และแปรผันการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2



(ก) FA15PC_NH



(ข) FA15PC_NHWG



(ค) FA15PC_WG

รูปที่ 2 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

กรณีที่ใช้ NH ในการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 2 ก) พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีลักษณะจับตัวกันแบบหลวมๆ และไม่แข็งแรงสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ค่อนข้างต่ำ ขณะที่กรณีที่ใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 2 ข) พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความหนาแน่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง อาจเนื่องจากการใช้เนื้อเยื่อของจีโอโพลิเมอร์

แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์พร้อมกับจีโอโพลิเมอร์เจล [15-16] และเป็นการเพิ่มผลผลิตให้กับระบบของจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้ช่วยปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคและกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ขณะที่การใช้ WG ในการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 2 ค) พบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความหนาแน่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงเช่นเดียวกันกับการใช้ NHWG แต่การใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยายังคงมีความหนาแน่นมากกว่าการใช้ WG ในการเกิดปฏิกิริยา

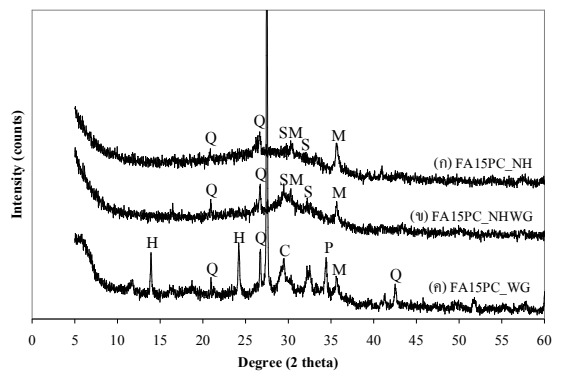
ดังนั้น จากผลการทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 และแปรผันการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นตัวและความเป็นเนื้อเดียวกันของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจาก NHWG>WG>NH สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

3.4 องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในถ้ำลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และแปรผันการใช้สารละลายต่างในการเกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 3

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในถ้ำลอยที่อัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของถ้ำลอย และแปรผันการใช้สารละลายต่างในการ

เกิดปฏิกิริยาเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (รูป 3 ก-ค) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ทั้ง 3 ตัวอย่างประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นออสติฐานที่มุมประมาณ 25-35 องศา ซึ่งช่วงความเป็นออสติฐานบ่งบอกความเป็นว่องไวในการทำปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ [6, 15, 17] และส่วนที่เป็นผลึก



รูปที่ 3 องค์ประกอบทางแร่ของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (Q=ควอตซ์, M=แมกนีซิโอเฟอไรต์, C=แคลเซียมคาร์บอเนต, P=แคลเซียมไฮดรอกไซด์, H=ไฮโดรโซดาไลท์, S=แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์)

โดยกรณีที่ใช้ NH ในการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 3 ก) ผลึกที่พบ คือ ควอตซ์ แมกนีซิโอเฟอไรต์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรโซดาไลท์ (Na₄Al₃Si₃O₁₂(OH)) ซึ่งควอตซ์และแมกนีซิโอเฟอไรต์ เป็นแร่ที่พบในถ้ำลอยตั้งต้นแสดงว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมได้ยังคงมีถ้ำลอยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเหลืออยู่ ขณะที่สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์คาดว่าเป็นสารประกอบที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และสารประกอบไฮโดรโซดาไลท์เป็นสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นจากการ

ทำปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาความเป็นอิสระพื้นฐานที่มุมประมาณ 25-35 องศา พบว่าการใช้ NH นั้นความเป็นอิสระพื้นฐานเพียงเล็กน้อย และส่วนใหญ่ที่พบเป็นผลึก ซึ่งความเป็นอิสระพื้นฐานเพียงเล็กน้อยบ่งบอกถึงการทำปฏิกิริยาที่ค่อนข้างช้าสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์ที่ค่อนข้างต่ำ

ส่วนกรณีที่ใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 3 ข) พบส่วนที่เป็นผลึก คือ ควอตซ์ แมกนีซิโอ-เฟอไรต์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต และส่วนที่เป็นอิสระพื้นฐานที่มุมประมาณ 25-35 องศา ชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ NH ในการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 3 ก) และยังเป็นบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาของระบบจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเป็นสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ที่มีในเถ้าลอยตั้งต้นหรือปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ที่ถูกชะละลายจากวัสดุ ตั้งต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮดรชันของระบบปูนซีเมนต์ [18] ทำให้วัสดุซีเมนต์สามารถก่อตัว และรับกำลังอัดได้ ดังนั้นค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเมื่อใช้ NHWG จึงมีกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่สูง ดังแสดงในตารางที่ 3

ขณะที่การใช้ WG ในการเกิดปฏิกิริยา (รูปที่ 3 ค) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีลักษณะคล้ายคลึงกับ กรณีที่ใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามความเป็นอิสระพื้นฐานที่มุมประมาณ 25-35 องศา ไม่ชัดเจนเท่ากับการใช้ NHWG แต่ความเป็นอิสระพื้นฐานมีความชัดเจนมากกว่าการใช้ NH ซึ่งผล

การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางแร่ของจีโอโพลิเมอร์ สอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด โมดูลัสยืดหยุ่น และโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์

4. สรุปผล

จากผลการศึกษสามารถสรุปได้ว่า

1) กำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น โดยการใช้ NHWG ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าการใช้ WG และ NH โดยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 เมื่อใช้ NHWG ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน สามารถให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 54.05 MPa

2) โมดูลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นตามกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น และปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลดีต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ขณะที่การใช้สารละลาย NHWG ให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากกว่าการใช้ WG และ NH ทำนองเดียวกันกับกำลังรับแรงอัด โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 เมื่อใช้ NHWG ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 16.68 GPa

3) โครงสร้างทางจุลภาคแสดงถึงจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความหนาแน่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง เมื่อใช้ NHWG ในการเกิดปฏิกิริยา และการใช้ WG ในการเกิดปฏิกิริยามีความหนาแน่นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการใช้ NH ในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากสามารถเพิ่มผลึกพันธะจากการทำปฏิกิริยา

ภายในระบบของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

4) องค์ประกอบทางแร่ชี้ให้เห็นว่า จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความเป็นอสัณฐานมากขึ้นเมื่อใช้ NHWG มากกว่าการใช้ WG และ NHWG ซึ่งผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง ภายใต้คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (001/2557) ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Khale and R. Chaudhary, “Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review”, *Journal of Materials Science* 47 (3), 2007, pp. 729-746.
- [2] T. Bakharev, “Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing”, *Cement and Concrete Research* 36 (6), 2006, pp. 1134-1147.
- [3] 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* 41 (9), 2011, pp. 923-931.
- [4] T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Pangdaeng and T. Sinsiri, “Properteis 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.
- [5] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata and P. Chindaprasirt, “Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive”, *Materials & Design* 53, 2014, pp. 269-274.
- [6] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, “Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer”, *Minerals Engineering* 22 (12), 2009, pp. 1073-1078.
- [7] J. Davidovits, “Geopolymer Chemistry and Applications”, *Institute Geopolymer, Saint Quentin, France*, 2008.
- [8] ASTM C109, “Standard Test Method of Compressive Strength of Hydrualic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Speciments)”, *Annual Book of ASTM Standard* 4.01, 2002.

- [9] ASTM C469, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression”, Annual Book of ASTM Standard 2.01, 2002.
- [10] J.G.S. Van Jaarsveld and J.S.J. Van Deventer, “Effect of The Alkali Metal Activator on The Properties of Fly Ash-Based Geopolymers”, Industrial and Engineering Chemistry Research 38 (10), 1999, pp. 3932-3941.
- [11] S. Hanjisuwan, T. Phoo-ngernkham and P. Chindapasirt, “Properties of Fly Ash Geopolymer Paste Containing Portland Cement”, The Journal of Industrial Technology 9 (2), 2013, pp. 97-106.
- [12] P. Chindapasirt, T. Chareerat and V. Sirivivatnanon, “Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer”, Cement and Concrete Composites 29 (3), 2007, pp. 224-229.
- [13] 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.
- [14] P. Chindapasirt, “Influence of load history on the properties of concrete”, PhD Thesis, The University of New South Wales, Australia. 1980.
- [15] 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.
- [16] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul and P. Chindapasirt, “NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature”, Fuel 90 (6), 2011, pp.2118-2124.
- [17] S. Hanjitsuwan, P. Chindapasirt and K. Pimraksa, “Electrical Conductivity and Dielectric Property of Fly Ash Geopolymer Pastes”, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 18 (1), 2011, pp. 94-99.
- [18] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul and T. Sinsiri, “Effect of Fly Ash Fineness on Microstructure of Blended Cement Paste”, Construction and Building Materials 21 (7), 2007, pp. 1534-1541.