

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Study physical property of fly ash geopolymer paste containing Portland cement

สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์^{1*} ธนากร ภูเงินคำ² และ ปริญญา จินดาประเสริฐ³

^{1*} สาขาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 52100

โทรศัพท์ 054-237399 โทรสาร 054-241079 E-mail: yim_kachan@yahoo.com

^{2,3} ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีต่อสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งวัสดุประสานประกอบด้วยเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา และบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 ทุกอัตราส่วนผสมผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 7 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นจะมีความไม่เป็นผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุมีความความแน่นของเพสต์มากขึ้น

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์, เถ้าลอย, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, กำลังรับแรงอัด, โครงสร้างทางจุลภาค

Abstract

This paper presents properties of fly ash geopolymer paste. The binder was consisted of fly ash and ordinary Portland cement. The replacements of fly ash by ordinary Portland cement were 2.5, 5.0, 7.5, and 10.0 by weight of binder. The NaOH concentration of 10 molar and sodium silicate solution were used as alkaline activator. The liquid to ash ratio of 0.4, sodium silicate to NaOH solution of 0.67 were used as for all mixes. The compressive strength results of hardened geopolymer at 7 days were increased with increase ordinary Portland cement replacement. The mineral compositions were found the increase of amorphous phase which related with compressive strength and dense matrix paste from morphology result.

Keywords: geopolymer, fly ash, ordinary Portland cement, compressive strength, morphology

1. บทนำ

ในปัจจุบันจีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องขั้นตอนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือไม่ใช้พลังงานในการผลิตที่สูง และไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ ในประเทศไทยวัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ เถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จากรายงานของ Chindaprasirt et al. (2007) พบว่ามีปริมาณเถ้าลอยที่ถูกกองทิ้งประมาณ 3 ล้านตัน ดังนั้นการนำวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์จึงเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์และทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติต่าง ๆ ที่ดี (Chindaprasirt et al., 2007; Rattanasak et al., 2009; Hanjitsuwan et al., 2011) เนื่องด้วยเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในส่วนของเนื้อแก้ว (amorphous) ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาในสภาวะสารละลายต่างได้ดี หรือเรียกเถ้าลอยว่าเป็นวัสดุพอซโซลาน (pozzolan) (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2547)

กระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ (สมิทร ส่งพิริยะกิจ และคณะ, 2551) เริ่มจากการนำสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ทำปฏิกิริยากับวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบหลักของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) และมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกาที่พร้อมทำปฏิกิริยาให้กับระบบ เพื่อให้ได้สารประกอบใหม่ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวต่อกันคล้ายกับวัสดุโพลิเมอร์ และสามารถใช้อุณหภูมิเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา (Davidovits, 1999; Khale and Chaudhary, 2007)

จากรายงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศพบว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีคุณสมบัติทางกลที่ดี สามารถต้านทานการกัดกร่อนของกรดได้ดี (Bakharev, 2005) แต่วัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีความแข็งแรงต่ำที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อน 40 - 90 องศาเซลเซียส (Bakharev, 2006) การเร่งปฏิกิริยาด้วยอุณหภูมิทำให้วัสดุดังกล่าวมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ในงานโครงสร้างจริง จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้พยายามแก้ปัญหาโดยการเติมสารผสมเพิ่มในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เช่น ยิปซัม ซิลิกาฟุ้ง และแคลเซียม เป็นต้น (Allahverdi et al., 2011; Guo et al., 2010) และงานวิจัยของ Garcia-Lodeiro et al. (2011) พบว่าปริมาณแคลเซียม (เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์) ที่เพิ่มขึ้นมีผลทางด้านบวกต่อสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เนื่องจากเกิดผลผลิตไฮดรเจนแทรกอยู่กับจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้สมบัติทางกลที่ดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และบ่มที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้น และทำให้เข้าใจถึงอิทธิพลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาผลของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีต่อสมบัติทางกล องค์ประกอบทางแร่ และโครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เฟส

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ

วัสดุประสานที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นประกอบด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สารละลายต่างที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ คือ สารละลาย โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) (SiO_2 32.39%, Na_2O 13.44% และ H_2O 54.17% โดยน้ำหนัก) และสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

เถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 2.5 5 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน การเตรียมวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 และ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 ทุกอัตราส่วนผสม ของจีโอโพลิเมอร์ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์ ผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในวัสดุประสาน และผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและผสมต่อเป็นเวลา 5 นาที หลังจากกระบวนการผสมเหลว แบบหล่อขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 (2002) และห่อด้วยฟิล์มพลาสติก เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติก และเก็บไว้ในที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่าง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เฟส

รหัสชื่อ ตัวอย่าง	เถ้าลอย (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	สารละลายโซเดียมซิลิเกต (กรัม)	สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)
FA0PC	100	0	16	24
FA2.5PC	97.5	2.5	16	24
FA5PC	95	5	16	24
FA7.5PC	92.5	7.5	16	24
FA10PC	90	10	16	24

3.3 การทดสอบกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาค

การทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 (2002) ที่อายุการบ่ม 7 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เลือกชิ้นตัวอย่างที่อยู่ตรงกลางของทรงลูกบาศก์ ใช้สั้วสกัดตัวอย่างเพสต์ให้เป็นก้อนเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร การเตรียมตัวอย่างทดสอบองค์ประกอบทางแร่จะทำการเลือกจากก้อนตัวอย่างเล็ก ๆ และบดให้ละเอียด

4. ผลการวิจัย

4.1 สมบัติของวัสดุตั้งต้น

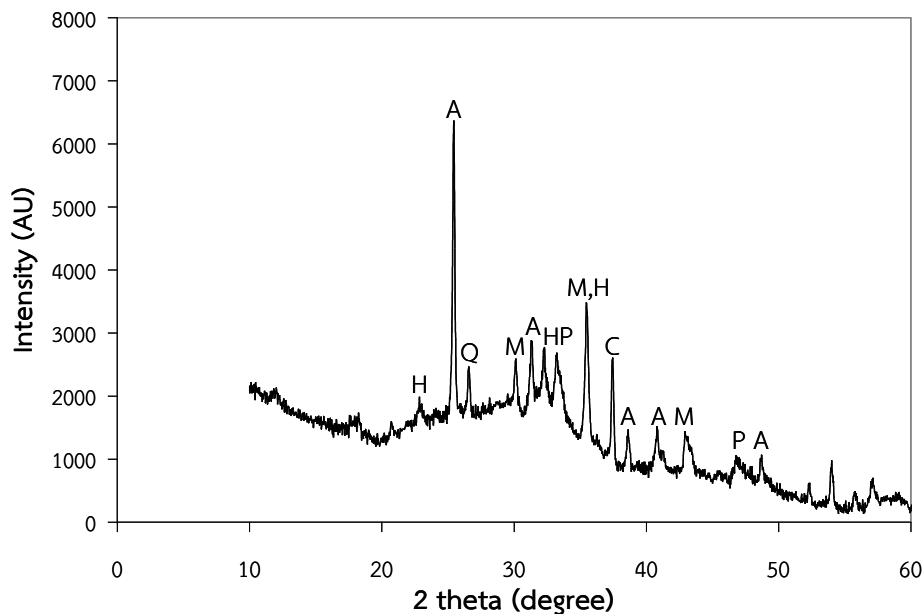
องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะเฉพาะของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ผิวเกลี้ยง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะแบบรูปร่างไม่แน่นอน (ธนากร ภูเงินคำ และคณะ, 2555) และองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอยประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก คือ ควอตซ์ (SiO_2), แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ (MgFe_2O_4), แอนไฮไดรต์ (CaSO_4), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2), เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และส่วนที่ไม่เป็นผลึกที่มุ่ม 20-40 องศา ดังแสดงในภาพที่ 1

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (%)
Silicon dioxide (SiO_2)	35.2	20.8
Aluminium oxide (Al_2O_3)	16.5	4.7
Iron oxide (Fe_2O_3)	13.6	3.4
Calcium oxide (CaO)	25.5	65.3
Magnesium oxide (MgO)	-	1.5
Sodium oxide (Na_2O)	2.7	0.4
Potassium oxide (K_2O)	-	0.1
Sulfur trioxide (SO_3)	-	2.7
Other	9.0	-
Loss on ignition (LOI)	1.1	0.9

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้น	เถ้าลอย	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ความถ่วงจำเพาะ	2.47	3.16
พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{cm}^2/\text{กรัม}$)	2000	3600

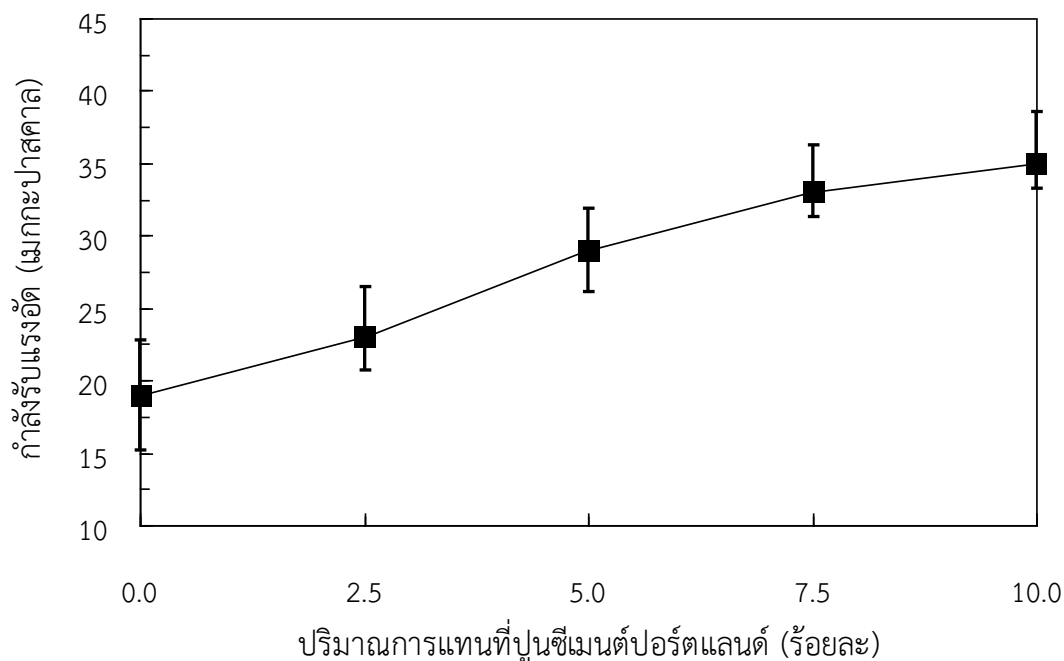


ภาพที่ 1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอย

(Q=SiO₂, M=MgFe₂O₄, A=CaSO₄, C=CaO, P=Ca(OH)₂, H=Fe₂O₃)

4.2 กำลังรับแรงอัด

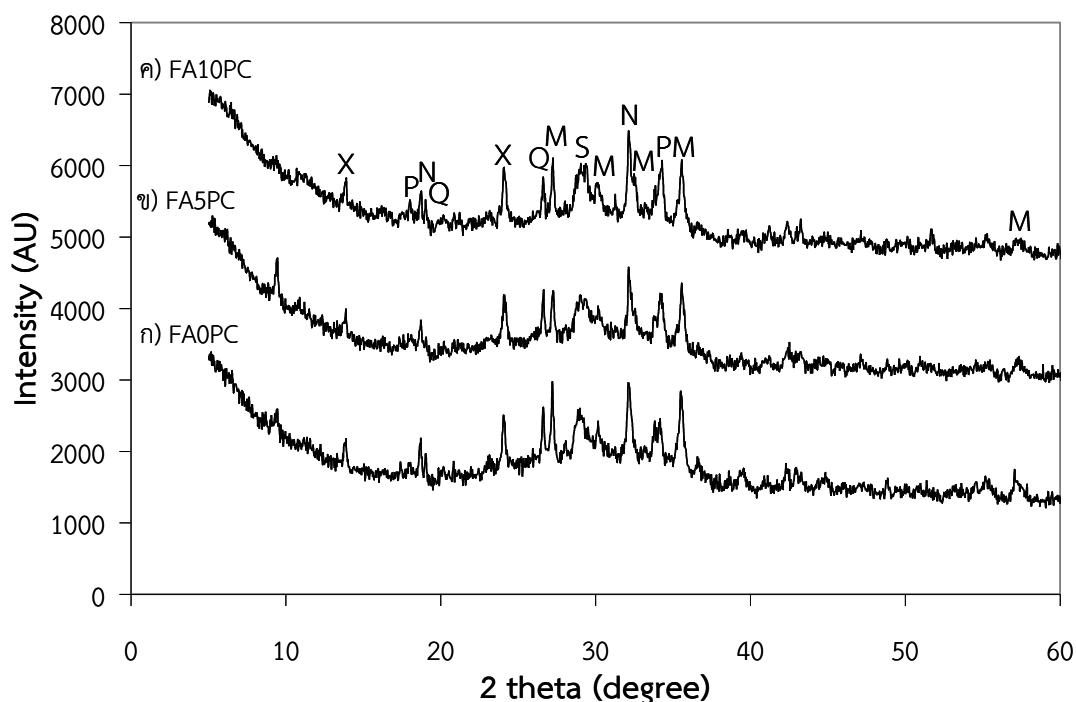
ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสแสดงดังภาพที่ 2 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ธนากร ภูเงินขำ และคณะ, 2555; แสงสุรีย์ พังแดง และคณะ, 2555) อาจเนื่องจากปริมาณของแคลเซียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น มีผลต่อการเกิดจีโอโพลิเมอร์เจล (Yip and Van Deventer, 2003) และมีการพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้น (Yip and Van Deventer, 2003) อีกทั้งการเพิ่มปริมาณแคลเซียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้แคลเซียมสามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอย ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) คล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้ระบบจีโอโพลิเมอร์มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงในทำนองเดียว กับระบบของซีเมนต์เฟส (Kroehong et al., 2011) และสารประกอบทั้งสองชนิดดังกล่าวช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์จึงส่งผลให้กำลังอัดมีการพัฒนาดีขึ้น (Guo et al., 2010)



ภาพที่ 2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟส

4.3 องค์ประกอบทางแร่

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์แสดงดังภาพที่ 3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีความไม่เป็นผลึกเพิ่มขึ้นที่มุม 25 - 35 องศา ซึ่งเป็นช่วงที่บ่งชี้ความไม่เป็นผลึกของวัสดุจีโอโพลิเมอร์และส่งผลต่อสมบัติทางกล (Davidovits, 1991; Rattanaksak et al., 2009) การเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อาจจะส่งผลดีในอายุปลาย เนื่องด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกา และอะลูมินา ทำให้เพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (ธนากร ภูเงินขำ และคณะ, 2555) นอกจากนี้สารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม คือ แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Na}_{14}\text{Al}_{12}\text{Si}_{13}\text{O}_{56} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และยังคงมีเถ้าลอยที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเนื่องจากพบแร่ที่มีในเถ้าลอยตั้งต้นคือ ควอตซ์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์

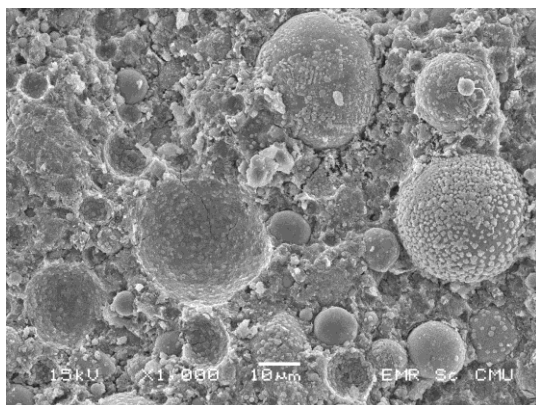


ภาพที่ 3 องค์ประกอบทางแร่ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

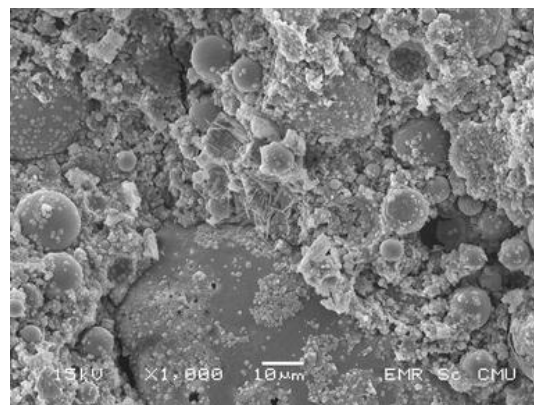
(X= $\text{Na}_{14}\text{Al}_{12}\text{Si}_{13}\text{O}_{56} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, N= Na_2SO_4 , P= $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Q= SiO_2 , M= MgFe_2O_3 , , S=CSH)

4.4 โครงสร้างทางจุลภาค

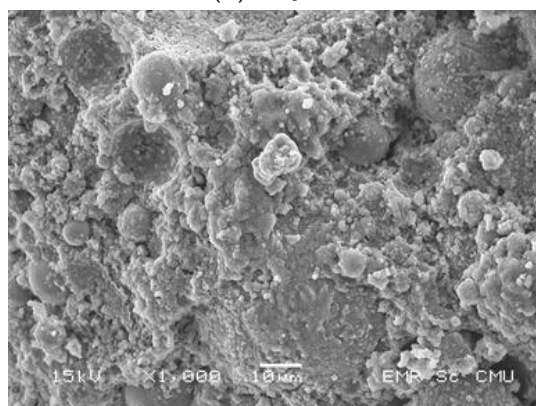
ผลทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอโพลิเมอร์แสดงดังภาพที่ 4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ส่งผลทำให้ลักษณะโครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เมื่อการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอยจะมีความขรุขระมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยตั้งต้น บ่งบอกถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาในระบบของจีโอโพลิเมอร์ได้มาก (ธนกร ภูเงินขำ และคณะ, 2555) อีกทั้งการเพิ่มแคลเซียมออกไซด์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในระบบจีโอโพลิเมอร์ทำให้มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยเพื่อเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้น (Yip et al., 2005) ในอายุปลายของจีโอโพลิเมอร์ (Li et al., 2010) ในทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่งผลให้โครงสร้างทางจุลภาคของระบบจีโอโพลิเมอร์มีความแน่นขึ้น สอดคล้องกับผลกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น



(ก) FA0PC



(ข) FA5PC



(ค) FA10PC

ภาพที่ 4 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุอีโพลิเมอร์

5. สรุปผลการทดลอง

การแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยอีโพลิเมอร์มีแนวโน้มส่งผลที่ดีต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดนั้นแสดงถึงการปรับปรุงขนาดของช่องว่างและโพรงให้ลดลง อีกทั้งการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ยังสามารถเพิ่มปริมาณของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต ดังนั้นการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ในเถ้าลอยอีโพลิเมอร์สามารถให้กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วันเท่ากับ 35 เมกกะปาสกาล

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนอุดหนุนในงานวิจัยนี้ และสาขาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

7. บรรณานุกรม

- ธนากร ภูเงินคำ, วันชัย สะตะ, ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, **การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 8**, หน้า 186-192.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2547). **เถ้าลอยในงานคอนกรีต**. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.
- สมิทร ส่งพิริยะกิจ, มาณัติ ภมระราภา และ อุบลรักษณ์ รัตนศักดิ์. (2551). วัสดุจีโอโพลิเมอร์, **พัฒนาเทคนิคศึกษา, ปีที่ 20, ฉบับที่ 65 (มกราคม-มีนาคม)**, หน้า 11-15.
- แสงสุรีย์ พังแดง, ธนากร ภูเงินคำ, สกพลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, วันชัย สะตะ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). ผลกระทบการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค, **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17**, วันที่ 9-11 พฤษภาคม 2555 ณ จังหวัดอุดรธานี.
- Allahverdi, A., Kani, E. N. and Yazdanipour, M. (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement, **Ceramics - Silikaty**, vol. 55(1), pp. 68-78.
- ASTM C109. (2002). **Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens)**, Annual Book of ASTM Standard, Vol.04.01.
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, **Cement and Concrete Research**, vol. 35(6), pp. 1233-1246.
- Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing, **Cement and Concrete Research**, vol. 36(6), pp. 1134-1147.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, vol. 29(3), pp. 224-229.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, vol. 37(8), pp. 1633-1656.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In: Davidovits J, Davidovits R, James C , editors. Géopolymère'99, **Proceedings of Geopolymer Second International Conference, Saint-Quentin**, pp. 9-39.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A. and MacPhee, D. E. (2011). 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(9), pp. 923-931.

- Guo, X., Shi, H., Chen, L. and Dick, W. A. (2010). Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures, **Journal of Hazardous Materials**, vol. **173(1-3)**, pp. 480-486.
- Hanjitsuwan, S., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K. (2011). Electrical conductivity and dielectric property of fly ash geopolymer pastes, **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, vol. **18(1)**, 94-99.
- Khale, D. and Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, **Journal of Materials Science**, vol. **47(3)**, pp. 729-746.
- Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste, **Construction and Building Materials**, vol. **25(11)**, pp. 4095-4104.
- Li, C., Sun, H. and Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements, **Cement and Concrete Research**, vol. **40(9)**, pp. 1341-1349.
- Rattanasak, U., Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, vol. **22(12)**, pp. 1073-1078.
- Yip, C. K. and Van Deventer, J. S. J. (2003). Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder, **Journal of Materials Science**, vol. **38(18)**, pp. 3851-3860.
- Yip, C. K., Lukey, G. C. and Van Deventer, J. S. J. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, **Cement and Concrete Research**, vol. **35(9)**, pp. 1688-1697.