

สมบัติของเส้นลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สกวรรณ ห่านจิตสุวรรณ^{1,*} ธนากร ภูเงินจำ² และ ปริญญา จินดาประเสริฐ²

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อคุณสมบัติของเส้นลอยเคลือบซีเมนต์และเส้นลอยเคลือบสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเส้นลอยร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การศึกษาใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นสารละลายต่างในการทำปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบพบว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของเส้นลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่ากำลังรับแรงอัดของเส้นลอยเคลือบซีเมนต์และเส้นลอยเคลือบสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเส้นลอยร้อยละ 15 มีค่าเท่ากับ 22 และ 34 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเส้นลอยจีโอโพลิเมอร์แสดงถึงปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตของเคลือบซีเมนต์ไฮดรอกไซด์และอยู่ร่วมกับผลผลิตของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์, เส้นลอยเคลือบซีเมนต์, เส้นลอยเคลือบสูง, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, กำลังอัด, โครงสร้างทางจุลภาค

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: yim_kachan@yahoo.com รับเมื่อ 13 มีนาคม 2556 ตอบรับเมื่อ 14 พฤษภาคม 2556

Properties of fly ash geopolymer paste containing Portland cement

Sakonwan Hanjitsuwan^{1,*} Tanakorn Phoo-ngernkham² and Prinya Chindaprasirt²

Abstract

This article presents the effect of ordinary Portland cement (OPC) replacement on low calcium fly ash (FAF) and high calcium fly ash (FAC) geopolymer paste. Fly ash was replaced with OPC at the rate of 5, 10 and 15% by weight of binder. Sodium silicate (Na_2SiO_3) and 10 molar sodium hydroxide (NaOH) solutions were used as the alkaline solution in the reaction. The $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 0.67 and the liquid/binder (L/B) ratio of 0.50 and the curing at ambient temperature were used for all of mixtures. The results found that the level replacement of OPC increase showed the compressive strength tended to increased. The compressive strength of low calcium fly ash (FAF) and high calcium fly ash (FAC) geopolymer paste at 7 days with 15% OPC replacement were 22 and 34 MPa, respectively. In addition, the microstructure analysis indicated that the increase of OPC replacement resulted in the addition formation of calcium silicate hydrate co-exists with the aluminosilicate geopolymer products. This results lead to overall increase in the compressive strength of fly ash geopolymer products.

Keywords: Geopolymer, Low calcium fly ash, High calcium fly ash, ordinary Portland cement, Compressive strength, Microstructure

¹ Program in Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University.

² Department of Civil engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

* Corresponding author, E-mail: yim_kachan@yahoo.com Received 13 March 2013, Accepted 14 May 2013

1. บทนำ

จีโอ โพลีเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง เนื่องด้วยปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากการก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [1] ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลงอย่างแพร่หลาย ซึ่งจีโอ โพลีเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายต่างและใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา [2] ทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานที่สามารถรับแรงได้เช่นเดียวกับซีเมนต์พาสต์ วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ได้แก่ ดินขาว เถ้าถ่านหิน เป็นต้น [3]

จากรายงานวิจัยในต่างประเทศพบว่าจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของกรดที่ดี [4] ดังนั้นเถ้าลอยจึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ แต่จีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอยมีความแข็งแรงต่ำที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ดังนั้นกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเร่งการเกิด ปฏิกิริยาของจีโอโพลีเมอร์ ซึ่งอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสมต่อคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์มีค่าประมาณ 40-90 องศาเซลเซียส [5] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่พยายามแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการเติมสารผสมเพิ่มในจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย เช่น ยิปซัม ซิลิกาฟูม และแคลเซียม เป็นต้น [6, 7] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นมีผลเชิงบวกต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย อีกทั้งสามารถก่อให้เกิดผลผลิตไฮดรอกซิลที่แทรกอยู่กับจีโอโพลีเมอร์ทำให้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น [8] นอกจากนี้ยังมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมในระบบของจีโอโพลีเมอร์สามารถเพิ่มปริมาณ

ของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแสดงถึงการอยู่ร่วมกันของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและจีโอโพลีเมอร์เจล (NASH) ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลในอายุปลายของจีโอโพลีเมอร์ [9]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการเพิ่มปริมาณแคลเซียมด้วยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีต่อสมบัติของเถ้าลอยแคลเซียมต่ำและเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลีเมอร์พาสต์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับจะช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์ อีกทั้งเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาคุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ในอนาคต

2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

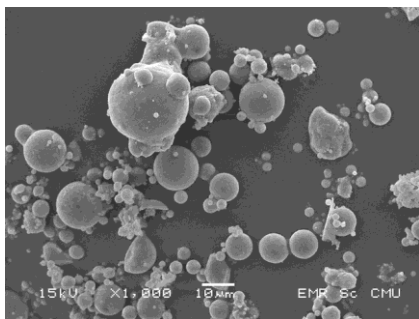
2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (FAF) จากประเทศญี่ปุ่น เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FAC) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) สารละลายต่างที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) (13.44% Na_2O , 32.39% SiO_2 และ 54.17% H_2O) เถ้าลอยทั้งสองชนิดถูกร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ก่อนนำมาใช้ในการเตรียมวัสดุจีโอโพลีเมอร์

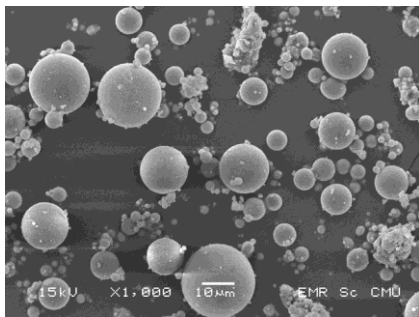
ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chemical/Materials	FAF (%)	FAC (%)	OPC (%)
SiO_2	53.40	35.21	20.80
Al_2O_3	29.08	16.57	4.70
Fe_2O_3	5.36	13.66	3.40
CaO	4.47	25.52	65.30
MgO	0.79	3.28	1.50
K_2O	0.99	1.99	0.40
Na_2O	0.60	2.73	0.10
Other	5.31	1.04	3.60

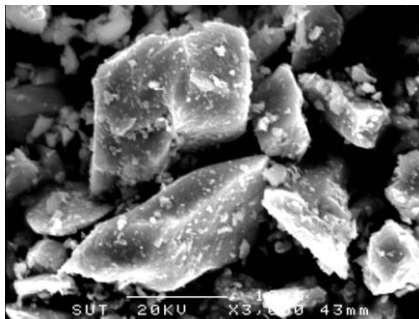
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 1 เถ้าลอยแคลเซียมสูงมีผลรวมของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กออกไซด์มีค่าเท่ากับ 65.44 จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C และผลรวมของเถ้าลอยแคลเซียมต่ำมีค่าเท่ากับ 87.84 จัดเป็นเถ้าลอยประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [10] ขณะที่ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยแคลเซียมสูง เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าเท่ากับ 2.46, 2.27 และ 3.16 ตามลำดับ



(ก) เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (FAF)



(ข) เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FAC)



(ค) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

รูปที่ 1 รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากการถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 เถ้าลอยแคลเซียมต่ำและเถ้าลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) เท่ากับ 0.50 และ 0.67 ตามลำดับ

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ประกอบด้วยการผสมเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้เข้ากัน เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที และเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตอีกเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเทสารละลายผสมลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 25×25×25 มิลลิเมตร ที่วางไว้ด้วยวิธีที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และหุ้มแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของความชื้น ตั้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบและห่อด้วยพลาสติก และเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส จนกระทั่งตัวอย่างอายุครบ 7 วัน

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Mix No.	Symbol	Mix proportion (g)			NaOH (g)	Na_2SiO_3 (g)
		FAF	FAC	OPC		
1	FAF0PC	100	-	-	30	20
2	FAF5PC	95	-	5	30	20
3	FAF10PC	90	-	10	30	20
4	FAF15PC	85	-	15	30	20
5	FAC0PC	-	100	-	30	20
6	FAC5PC	-	95	5	30	20
7	FAC10PC	-	90	10	30	20
8	FAC15PC	-	85	15	30	20

2.3 การทดสอบ

ทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 7 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 [11] องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD องค์ประกอบโมเลกุลด้วยเทคนิค FTIR และโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง SEM

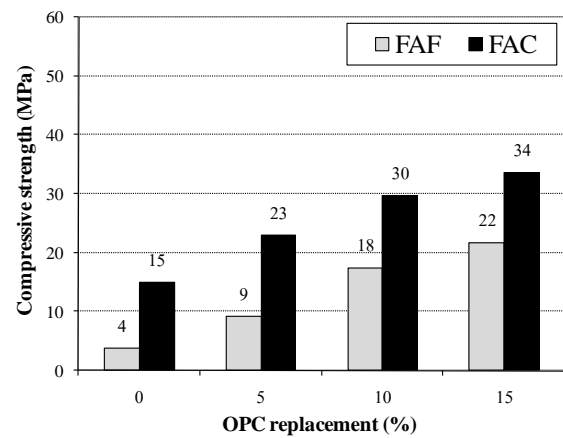
3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 กำลังรับแรงอัด

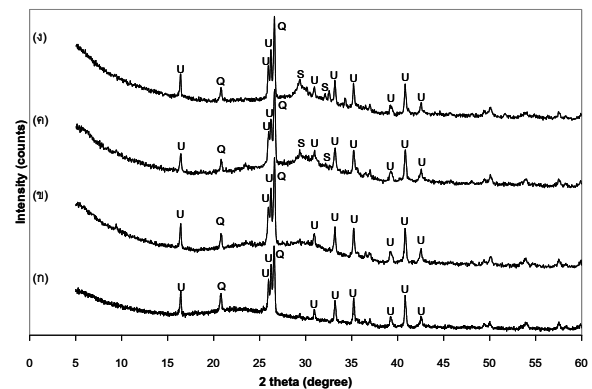
ค่ากำลังรับแรงอัดของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่ากำลังรับแรงอัดของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดของ FAF0PC, FAF5PC, FAF10PC และ FAF15PC มีค่าเท่ากับ 4, 9, 18 และ 22 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของ FAC0PC, FAC5PC, FAC10PC และ FAC15PC มีค่าเท่ากับ 15, 23, 30 และ 34 เมกะปาสคาล ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของถ้ำลอยจีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเนื่องจากปริมาณของแคลเซียมที่สูงขึ้นช่วยให้มีการทำปฏิกิริยามากขึ้นในระบบของจีโอโพลิเมอร์ [12]จากรายงานวิจัยของ Yip และคณะ [13] พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมไอออนยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ให้มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (CASH) มากขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เหมือนมวลรวมเล็กๆ ส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรงและกำลังรับแรงอัด

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างถ้ำลอยแคลเซียมต่ำและถ้ำลอยแคลเซียมสูงพบว่าถ้ำลอยแคลเซียมต่ำมีความต้องการปริมาณแคลเซียมไอออนเพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยาภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ [14] ขณะที่ถ้ำลอยแคลเซียมสูงมีแนวโน้มที่เหมือนกันกับถ้ำลอยแคลเซียมต่ำที่ปริมาณแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งอาจเนื่องจากปริมาณแคลเซียมจาก

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นแคลเซียมไอออนที่มีความพร้อมในการทำปฏิกิริยา ผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาว่าแคลเซียมไอออนสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นส่งผลให้เกิดผลผลิตแคลเซียม-ซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (CASH) มากขึ้นทำให้กำลังอัดมีการพัฒนาดีขึ้น [9, 15]



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสม



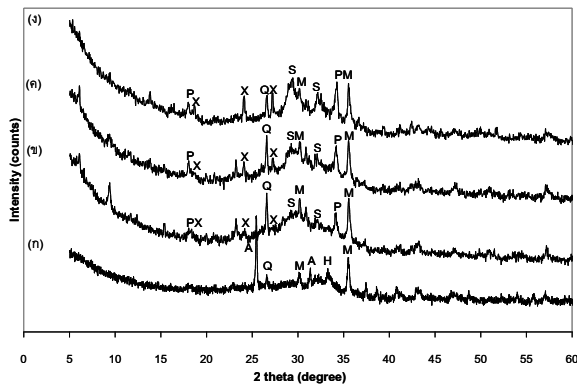
รูปที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของถ้ำลอยแคลเซียมต่ำ และถ้ำลอยแคลเซียมต่ำจีโอโพลิเมอร์

(ก) FAF (ข) FAF0PC (ค) FAF5PC

[Q=quartz (SiO_2), U=mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), S=calcium silicate hydrate ($\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5}\cdot x\text{H}_2\text{O}$)]

3.2 องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD

จากผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ เถ้าลอยแคลเซียมต่ำและเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์-เพสต์ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ กรณีเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (ตั้งต้น) และเถ้าลอยแคลเซียมต่ำจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก-ง) พบว่า เถ้าลอยแคลเซียมต่ำ (รูปที่ 3 ก) ประกอบด้วยผลึกของมัลไลต์และควอตซ์ หลังจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาพบว่า (รูปที่ 3 ข-ง) เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์จะพบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) เป็นสารประกอบใหม่ และที่มุม 28-30 มีความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้น และยังคงพบมัลไลต์และควอตซ์ที่ไม่ทำปฏิกิริยา ยังคงเหลืออยู่ในระบบ



รูปที่ 4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ (ก) FAC (ข) FAC0PC (ค) FAC5PC (ง) FAC15PC [Q=quartz (SiO₂), M=magenesioferrite (MgFe₂O₄), P=portlandite (Ca(OH)₂), S=calcium silicate hydrate, X=phase X (Na₁₄Al₁₂Si₁₃O₅₁.6H₂O)]

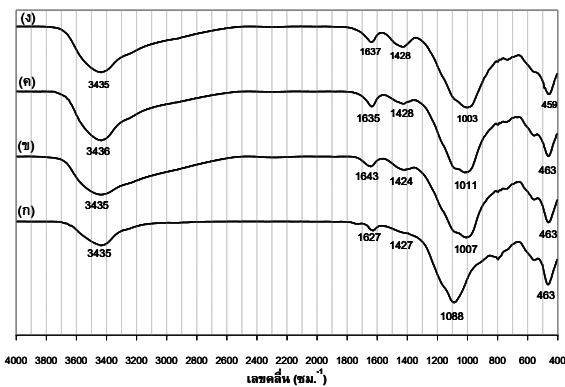
กรณีเถ้าลอยแคลเซียมสูง (ตั้งต้น) และเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก-ง) พบว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูง (รูปที่ 4 ก) ประกอบด้วยผลึกของควอตซ์ แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ แอนไฮไดรต์ ฮีมาไทต์ และส่วนอสัณฐาน ที่มุม 20-30 องศา หลังจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาพบว่า (รูปที่ 4 ข-ง) ส่วนที่เป็นอสัณฐานของเถ้าลอยจะถูก

ชะละลายออกมาก่อนและเกิดปฏิกิริยาเพื่อเป็นสารประกอบใหม่ และมีการเลื่อนตำแหน่งของมุมเป็น 25-35 ซึ่งช่วงดังกล่าวบ่งบอกความเป็นอสัณฐานของจีโอโพลิเมอร์ [7, 16-18] นอกจากนี้ยังคงพบผลึกของเถ้าลอยตั้งต้นที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเหลืออยู่ เช่น ควอตซ์ แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ แต่ไม่พบแอนไฮไดรต์ และพบสารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และเฟสเอ็กซ์หรือโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต นอกจากนี้เถ้าลอยตั้งต้นมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์สูงจึงมีโอกาสเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) คล้ายกับการเกิดสารประกอบดังกล่าวในปูนซีเมนต์ [19] ซึ่งส่วนอสัณฐานที่พบนั้นจะมีเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และ จีโอโพลิเมอร์เจล (NASH) เกิดร่วมกัน [20]

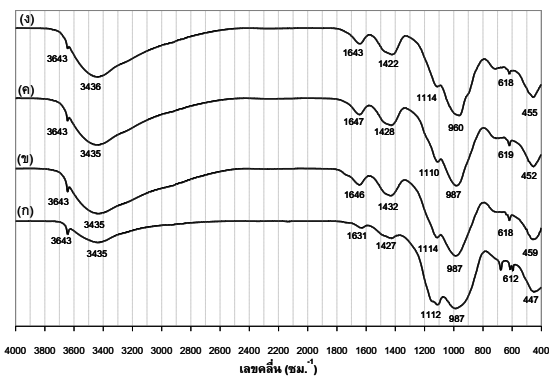
3.3 โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค FTIR

จากผลวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของเถ้าลอยตั้งต้นและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่ารูปแบบของสเปกตรัมของเถ้าลอยตั้งต้นและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเหมือนกันแต่ต่างที่ตำแหน่งเลขคลื่น และมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและตำแหน่งของสเปกตรัมของตัวอย่างหลังจากทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อเทียบกับสเปกตรัมของเถ้าลอยตั้งต้น นอกจากนั้นในเถ้าลอยตั้งต้นพบสเปกตรัมที่ตำแหน่ง 3450 และ 1650 ซม⁻¹ ของ O-H stretching และ O-H bending ของโมเลกุลน้ำ หลังจากทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตำแหน่งดังกล่าวมีปริมาณเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่ามีน้ำในโครงสร้างมากขึ้น [21] ที่ตำแหน่ง 1460 ซม⁻¹ บอการมีสารประกอบคาร์บอเนต [22] ตำแหน่ง 1200-950 ซม⁻¹ บอถึงการเกิด Si-O-Si stretching ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน แสดงว่าตัวอย่างหลังการเกิดปฏิกิริยาสามารถเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ได้ ส่วนตำแหน่งที่ 460 ซม⁻¹ เกิด O-Si-O bending แสดงว่ายังคงมีควอตซ์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ [21]

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสเปกตรัม พบว่าใน
 แก้วลอยเคลือบเซรามต่ำตั้งต้น (รูปที่ 5 ก) พบสเปกตรัมที่
 1088 cm^{-1} และมีการเลื่อนตำแหน่งและมีความคมชัดที่
 1003-1011 cm^{-1} ในตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยา กรณีแก้วลอย
 เคลือบเซรามสูงตั้งต้น (รูปที่ 6 ก) พบสเปกตรัมที่ 987-
 1110 cm^{-1} และมีความคมชัดมากขึ้นที่ 987 cm^{-1} ในตัวอย่าง
 หลังทำปฏิกิริยา [23]



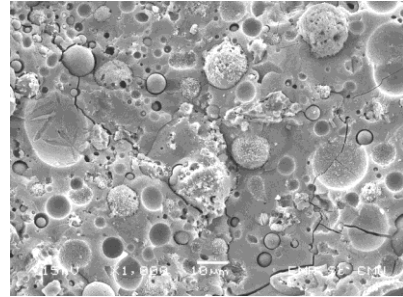
รูปที่ 5 อินฟราเรดสเปกตรัมของแก้วลอยเคลือบเซรามต่ำ และ
 แก้วลอยเคลือบเซรามต่ำจีโอโพลิเมอร์ (ก) FAF (ข) FAF0PC
 (ค) FAF5PC (ง) FAF15PC



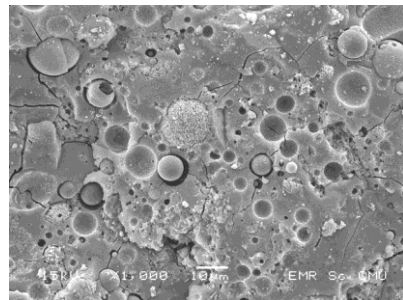
รูปที่ 6 อินฟราเรดสเปกตรัมของแก้วลอยเคลือบเซรามสูง และ
 แก้วลอยเคลือบเซรามสูงจีโอโพลิเมอร์ (ก) FAC (ข) FAC0PC
 (ค) FAC5PC (ง) FAC15PC

3.4 โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง SEM

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วลอย
 จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ต
 แลนด์ทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



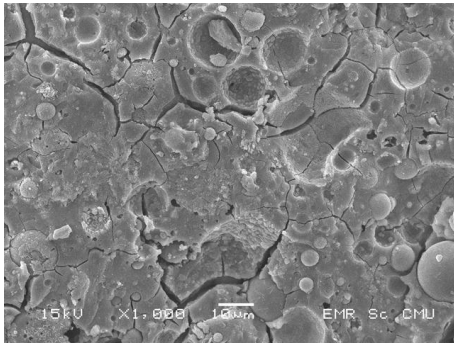
(ก) FAF0PC



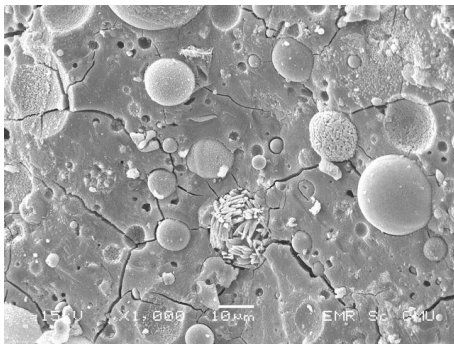
(ข) FAF15PC

รูปที่ 7 โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วลอยเคลือบเซรามต่ำ
 จีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ก) FAF0PC (ข) FAF15PC

พบว่าแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ประกอบด้วยแก้วลอยที่
 ไม่มีการทำปฏิกิริยาฝังอยู่ในเนื้อของจีโอโพลิเมอร์ แต่เมื่อมี
 การแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงให้เห็นถึง
 ปริมาณแก้วลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยามีน้อยลง ซึ่งทำให้
 โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มีความหนาแน่นกว่า [9] อาจ
 เนื่องจากปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มผลผลิตของ
 แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) แคลเซียมอะลูมิโนซิลิ
 เกตไฮดรต (CASH) และอยู่ร่วมกับจีโอโพลิเมอร์เจล
 (NASH) [15] ส่งผลให้ช่วยปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของแก้ว
 ลอยจีโอโพลิเมอร์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างแก้วลอย
 เคลือบเซรามต่ำและแก้วลอยเคลือบเซรามสูง-จีโอโพลิเมอร์เพสต์
 พบว่าแก้วลอยเคลือบเซรามสูงจีโอโพลิเมอร์มีความหนาแน่น
 มากกว่าแก้วลอยเคลือบเซรามต่ำจีโอโพลิเมอร์ และแก้วลอย
 เคลือบเซรามสูงจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มเกิดสารใหม่มากกว่า
 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด



(ก) FAC0PC



(ข) FAC15PC

รูปที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอยแคลเซียมสูง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ (ก) FAC0PC (ข) FAC15PC

4. สรุปผล

กำลังรับแรงอัดของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ซึ่งช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและขนาดโพรงของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยเถ้าลอยแคลเซียมต่ำและเถ้าลอยแคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 ที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน สามารถให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 22 และ 34 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ชี้ให้เห็นว่า การแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ระบบของจีโอโพลิเมอร์มีความอ่อนนุ่มมากขึ้น และสามารถเกิดผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และจีโอโพลิเมอร์เจลได้มากขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค FTIR ชี้ให้เห็นว่าการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์-ริเซชันได้มากขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วย SEM แสดงถึงการปรับปรุงและความหนาแน่นมากขึ้นมีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพาง สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เกศรินทร์ พิมพ์รักษา ที่อนุเคราะห์เฝ้าลดยแคลเซียมต่ำจากประเทศญี่ปุ่น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] VM. Malhotra, "Introduction: sustainable development and concrete technology", Concrete International, 24, 2002, pp. 22.
- [2] P. Paisitsrisawat and U. Rattanasak, "Effect of silica fume on properties of fluidizer bed combustion (FBC) fly ash geopolymer", The Journal of Industrial Technology, 9(1), 2013, In press (in Thai).
- [3] J. Davidovits, "Geopolymers - Inorganic polymeric new materials", Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1991, pp. 1633-1656.

- [4] T. Bakharev, “Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions”, *Cement and Concrete Research*, 35(6), 2005, pp. 1233-1246.
- [5] 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.
- [6] A. Allahverdi, EN. Kani and M. Yazdanipour, “Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement”, *Ceramics-Silikaty*, 55(1), 2011, pp. 68-78.
- [7] X. Guo, H. Shi, L. Chen and WA. Dick, “Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures”, *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 2010, pp. 480-486.
- [8] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez and DE. 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.
- [9] T. Phoo-ngernkham, P. Chindapasirt, 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.
- [10] ASTM C618, “Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in cement”, *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.04.01, 2008.
- [11] ASTM C109, “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, 2002.
- [12] K. Dombrowski, A. Buchwald and M. Weil, “The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers”, *Journal of Materials Science*, 42(9), 2007, pp. 3033-3043.
- [13] CK. Yip, GC. Lukey and JSJ. Van Deventer, “The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation”, *Cement and Concrete Research*, 35(9), 2005, pp. 1688-1697.
- [14] A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, G. Kovalchuk, LM. Ordoñez and MC. Naranjo, “OPC-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration”, *Journal of Materials Science*, 42(6), 2007, pp. 2958-2966.
- [15] 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.
- [16] P. Chindapasirt, U. Rattanasak and C. Jaturapitakkul, “Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials”, *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 2011, pp. 55-60
- [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] U. Rattanasak and P. Chindapasirt, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer", *Minerals Engineering*, 22(12), 2009, pp. 1073-1078.
- [19] P. Chindapasirt and U. Rattanasak, "Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer", *Waste Management*, 30(4), 2010, pp. 667-672.
- [20] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers", *Waste Management*, 29(2), 2009, pp. 539-543.
- [21] D. Panias, IP. Giannopoulou and T. Perraki, "Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 301(1-3), 2007, pp. 246-254.
- [22] VFF. Barbosa, KJD. MacKenzie and C. Thaumaturgo, "Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers", *International Journal of Inorganic Materials*, 2(4), 2000, pp. 309-317.
- [23] T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing", *Cement and Concrete Research*, 35(6), 2005, pp. 1224-1234.