



กำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่สัมผัสอุณหภูมิสูง Compressive Strength and Microstructures of Geopolymer Exposed to Elevated Temp

ธีรพล เสาวพันธ์ และ เกียรติสุดา สมณา^{*}

Teerapon Saowapan and Kiatsuda Somna^{*}

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

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

Received : 28 February 2020

Revised : 9 July 2020

Accepted : 30 September 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังรับแรงอัดและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่สัมผัสอุณหภูมิสูง จีโอโพลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าถ่านหินและกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 ตลอดการศึกษา หลังจาก 24 ชั่วโมงนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ไปสัมผัสอุณหภูมิ 40, 1100, 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 60, 90, 120 และ 180 นาทีและ ศึกษาการจำลองสภาพการณ์ของจีโอ โพลิเมอร์หลังเกิดเพลิงไหม้ 3 กรณี ได้แก่ แช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วสัมผัสอากาศ (WA) แช่น้ำตลอดเวลา (W) และสัมผัสอากาศตลอดเวลา (A) ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM), เครื่องส่องกราดลักษณะพื้นผิวของวัสดุ (SEM), วิเคราะห์โครงสร้างผลึก(XRD), เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้อิเล็กตรอน (EDS), วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุ (FTIR) และวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน (TGA) และ ศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่สัมผัสอุณหภูมิต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงที่สุดเมื่อสัมผัสอุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการสัมผัสอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกำลังอัดมีค่าสูงเมื่อเวลาการสัมผัสอุณหภูมิลดลง การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ ด้วยการใช้เครื่องส่องกราดลักษณะพื้นผิวของวัสดุ และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้อิเล็กตรอน พบพื้นผิวที่มีส่วนประกอบของธาตุซิลิกอน อะลูมิเนียม และโซเดียมเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้การศึกษารวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อน พบว่า จีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของทุกผลิตภัณฑ์มากที่สุด

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์ ; เถ้าถ่านหิน ; โซเดียมไฮดรอกไซด์ ; อุณหภูมิ



Abstract

This research studied compressive strength and microstructure of geopolymer exposed to elevated temperatures. Geopolymer was synthesized from fly ash and activated with 14 molar sodium hydroxide solutions with constant liquid/binder ratio of 0.4 throughout the experiment. After 24 hours, the geopolymer samples were exposed to 40, 100, 200, 400 and 600 degree Celsius with duration times of 30, 60, 90, 120 and 180 min. There were three types of curing conditions after the exposure to elevated temperature which were : being immersed in water for a day then air cured (WA), being immersed in water throughout (W) and being air-cured throughout (A). Microstructures of geopolymer were characterized by optical microscope (OM), Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffractometer (XRD) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), Fourier Transformed Infrared Spectrometer (FTIR) and Thermogravimetric Analysis (TGA) techniques and compressive strength was investigated at the age of 7 and 28 days. The results showed that the compressive strength of geopolymer after exposure to elevated temperature, increased with increasing curing age. The highest compressive strength was found when geopolymer was exposed to temperature less than 200 degree Celsius. The compressive strength of geopolymer also depended on the duration of exposure to temperatures. The compressive strength of the geopolymer increased when the duration to exposure of temperature decreased. A study on microstructure of geopolymer showed the geopolymerization products. The surface areas of geopolymer paste contained silicon, aluminium and sodium which were characterized by SEM-EDS techniques. In addition, geopolymer sample which were exposed to 200 degrees Celsius had the highest weight change which detected by TGA technic.

Keywords : geopolymer ; fly ash ; sodium hydroxide ; temperature

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุประสานที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีโดยใช้วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของธาตุที่อยู่ในรูปแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เช่น เถ้าถ่านหิน ดินขาวเถ้า เถ้าขาน้อย และเถ้าแกลบ เป็นต้น กระบวนการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์เริ่มจากการนำสารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ทำปฏิกิริยากับวัสดุผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบหลักของซิลิกาและอะลูมินา และมีการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกาที่พร้อมทำปฏิกิริยาให้กับระบบ เพื่อให้ได้สารประกอบใหม่ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวต่อกัน คล้ายกับวัสดุโพลิเมอร์ และสามารถใช้อุณหภูมิเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา (Davidovits, 1999; Khale and Chaudhary, 2007) ปัจจุบันจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้รับความนิยมและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องขั้นตอนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานในการผลิตที่สูง และไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ

วัสดุตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมในประเทศไทยได้แก่ เถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุผลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าถ่านหินมีคุณสมบัติทางกลที่ดี สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดได้ดี (Bakharev, 2005) แต่วัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน (Fly ash, FA) มีความแข็งแรงต่ำที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นในกระบวนการสังเคราะห์จึงจำเป็นต้องเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อน 40 - 90 องศาเซลเซียส Bakharev (Bakharev, 2006) และ Rattanasak และ Chindaprasit (Rattanasak and Chindaprasit, 2009) ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5, 10 และ 15 โมลาร์ พบว่าการชะละลายของ Si^{4+} ไอออน เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ และจีโอโพลิเมอร์ให้กำลังอัดสูงถึง 60-70 เมกะปาสคาล Sanawong และคณะ (Sanawong *et al.*, 2010) ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินและกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าถ่านหิน พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลาร์ มีอัตราการเพิ่มของกำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าต่ำลงเล็กน้อย ที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์ Song และคณะ (Song *et al.*, 2005) ศึกษาความต้านทานของซัลเฟตจีโอโพลิเมอร์โดยเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่าจีโอโพลิเมอร์มีความต้านทานซัลเฟตมากกว่า สังเกตได้จากผิวหน้าของคอนกรีตที่หลุดร่อนออกมีปริมาณน้อยกว่า Thokchom และคณะ (Thokchom *et al.*, 2009) ศึกษาผลกระทบของโซเดียมออกไซด์ต่อความทนทานของจีโอโพลิเมอร์ภายใต้สภาวะทนซัลเฟต พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมออกไซด์สูงสามารถช่วยลดการกัดกร่อนบริเวณผิวหน้าของวัสดุได้ดีกว่า Rahmadina และ Ekaputri (Rahmadina and Ekaputri, 2017) ศึกษาสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตเมื่อโดนเผา โดยใช้คอนกรีตเป็นตัวเปรียบเทียบ พบว่าจีโอโพลิเมอร์มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่าคอนกรีต Saavedra และ Mejía (Saavedra and Mejía, 2017) ศึกษาผลของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจาก เถ้าถ่านหินที่ผสมวัสดุอื่น ๆ โดยส่วนผสมของ จีโอโพลิเมอร์ได้แก่ เถ้าถ่านหินร่วมกับ

ตะกรันเตา ถลุงเหล็กและถ่านหินร่วมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พบว่า จีโอโพลิเมอร์จากถ่านหินร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์จากถ่านหินร่วมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ ที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของวัสดุเมื่อจีโอโพลิเมอร์ได้รับความร้อนและการจำลองสภาพการณ์หลังเกิดเพลิงไหม้ที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ให้สามารถคงทนต่อสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิต่อไป นอกจากนี้การใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการนำวัสดุเหลือทิ้งและวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุตั้งต้นในงานวิจัยนี้ได้แก่ ถ่านหินซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้เล็กกว่า 75 ไมครอน

2. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 14 โมลาร์

3. การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์

การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์โดยใช้ถ่านหินผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้อัตราส่วน 1 : 0.4 เริ่มต้นการผสมถ่านหินกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปเทลงในแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 6 เซนติเมตร ทำการถอดแบบออกเมื่อครบ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงห่อด้วยพลาสติกเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ โดยแต่ละเงื่อนไขจะทำการทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ย

4. การจำลองสภาพการณ์หลังเกิดเพลิงไหม้ของจีโอโพลิเมอร์ที่สัมผัสอุณหภูมิสูง

หลังจากบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ครบ 28 วัน ทำการทดสอบการสัมผัสอุณหภูมิโดยนำจีโอโพลิเมอร์ไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 40, 100, 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลา 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที หลังจากการเผาทำการรักษาตัวอย่างด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ 1. แช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วสัมผัสอากาศ (WA) 2. แช่น้ำตลอดเวลา (W) และ 3. สัมผัสอากาศตลอดเวลา (A)

5. การทดสอบ

5.1 เมื่อบ่มตัวอย่างทั้ง 3 วิธี ได้แก่ 1. แช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วสัมผัสอากาศ (WA) 2. แช่น้ำตลอดเวลา (W) และ 3. สัมผัสอากาศตลอดเวลา (A) หลังจากนั้นทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน

5.2 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างด้วยวิธี Optical Microscope (OM, Dino-Lite), Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM 7800F), วิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS, JEOL JSM 7800F), วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD, Bruker D8 ADVANCE), วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transformed Infrared Spectrometer (FTIR, PerkinElmer Spectrum 100 FT-IR) และวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA, PerkinElmer STA 6000)

ผลการวิจัย

1. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

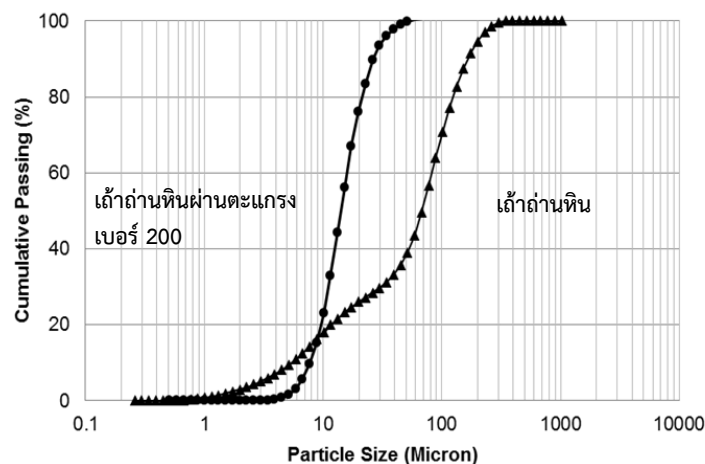
1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
FA	39.47	29.46	9.85	13.82	-	3.66	-	1.95	1.8

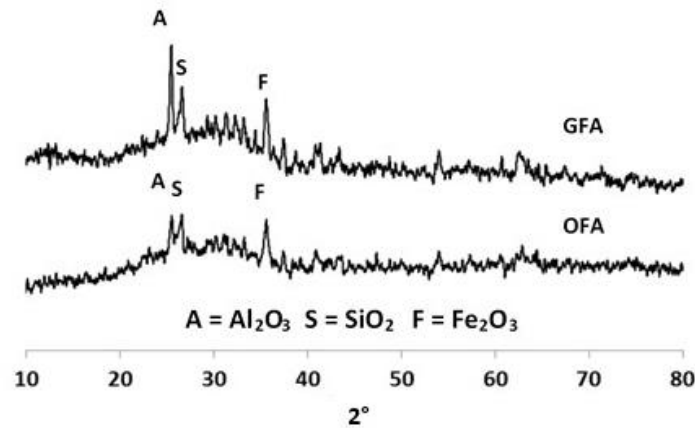
ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน พบว่า เถ้าถ่านหินมีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 78.78 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากับร้อยละ 1.8 และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึงร้อยละ 13.82 ตามมาตรฐาน ASTM C618 (ASTM C618-08a, 2008) ระบุว่าเถ้าถ่านหินที่มีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ มากกว่าร้อยละ 70 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่เกินร้อยละ 6 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F

1.2 ลักษณะการกระจายตัวของเถ้าถ่านหิน



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าถ่านหินและเถ้าถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

ภาพที่ 1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าถ่านหินและเถ้าถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (75 ไมครอน) พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของเถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ มีค่ากลางอนุภาคเท่ากับ 60 ไมครอน ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสของเถ้าถ่านหินมีน้อย ทำให้การทำปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น จึงทำการปรับปรุงคุณภาพเถ้าถ่านหินโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน การปรับปรุงขนาดของวัสดุตั้งต้นช่วยให้มีการกระจายตัวที่ดี พื้นที่สัมผัสมากขึ้น และทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น (Chindapasirt *et al.*, 2007; Somna *et al.*, 2011)



ภาพที่ 2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแก้วถ่านหินและแก้วถ่านหินที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

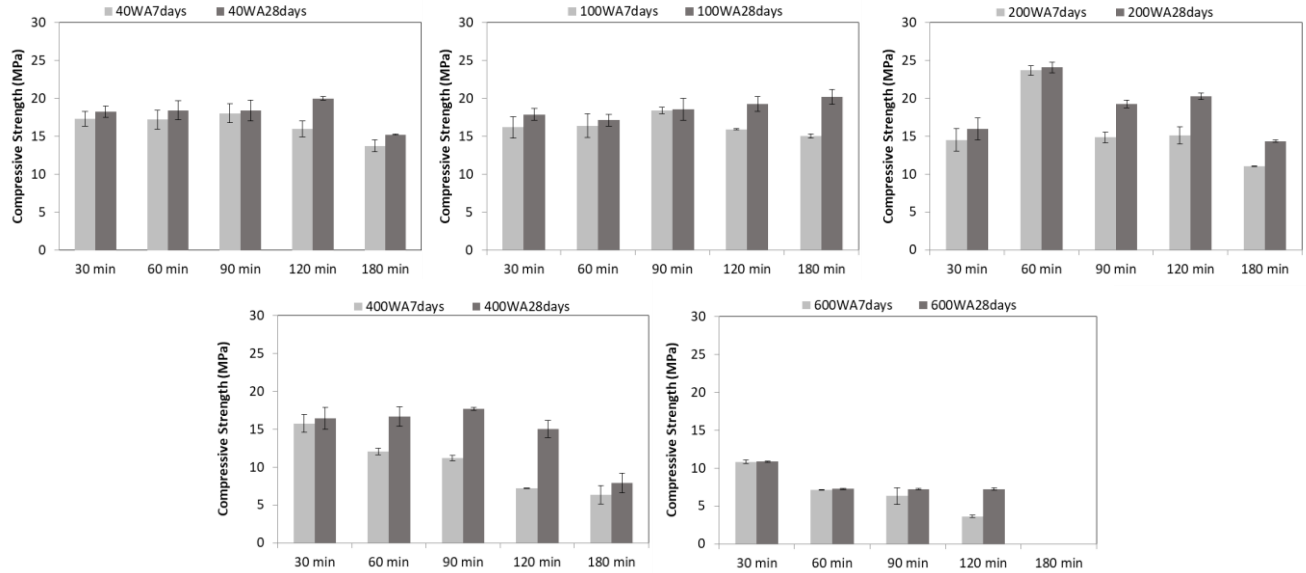
1.3 โครงสร้างผลึกของแก้วถ่านหิน

ภาพที่ 2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแก้วถ่านหิน (OFA) และแก้วถ่านหินที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (GFA) พบว่า แก้วถ่านหินมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและไม่มีเป็นผลึก ส่วนที่เป็นผลึกเป็นเฟสของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ซึ่งแสดงถึงความเป็นวัสดุพอลิคริสทอล นอกจากนี้ การที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบทำให้แก้วถ่านหินสามารถใช้เป็นวัสดุตั้งต้นของการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ได้

2. ชนิดการจำลองสภาพการณ์หลังเกิดเพลิงไหม้ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่สัมผัสอุณหภูมิสูง

2.1 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน และผ่านการแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วสัมผัสอากาศ

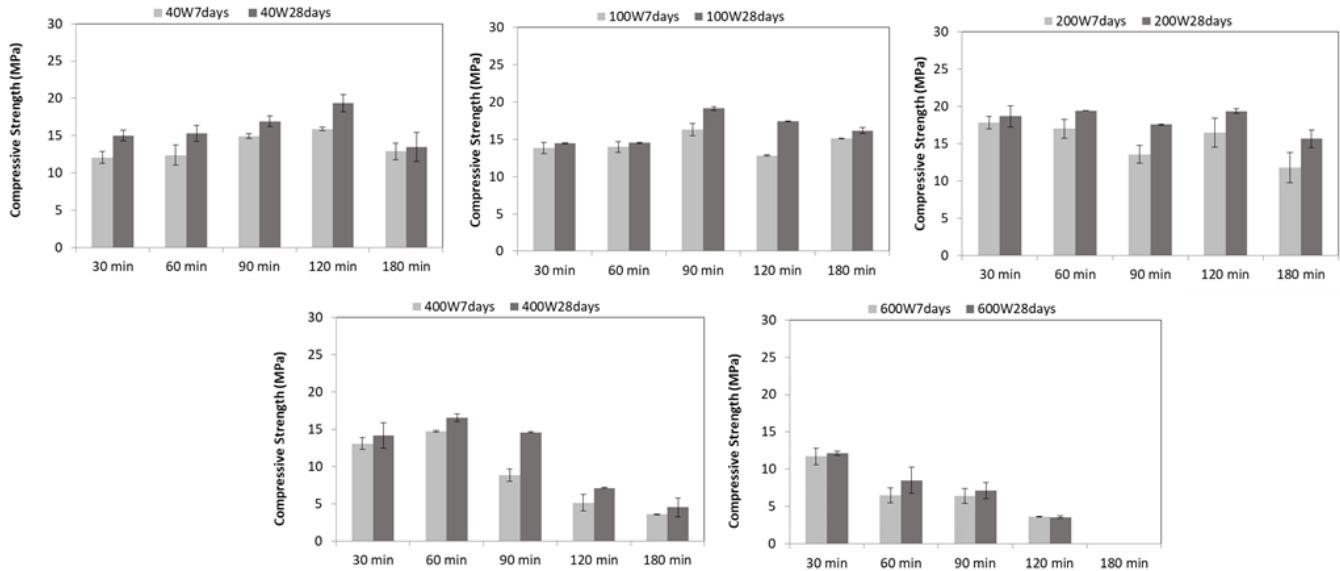
ภาพที่ 3 แสดงผลการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน และผ่านการแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วสัมผัสอากาศ พบว่าในทุกระยะเวลาของการสัมผัสความร้อน ที่อุณหภูมิ 40 และ 100 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่เวลาการสัมผัสความร้อน 60 นาทีให้ค่ากำลังอัดสูงสุดโดยค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 15.95, 24.06, 19.24, 20.23 และ 14.33 เมกะปาสคาล เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30, 60, 90, 120 และ 180 นาทีตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 400 และ 600 องศาเซลเซียส กำลังอัดมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสัมผัสความร้อนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสัมผัสความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าลดลง



ภาพที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน และผ่านการแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วสัมผัสอากาศ

2.2 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน และแช่น้ำตลอดเวลา

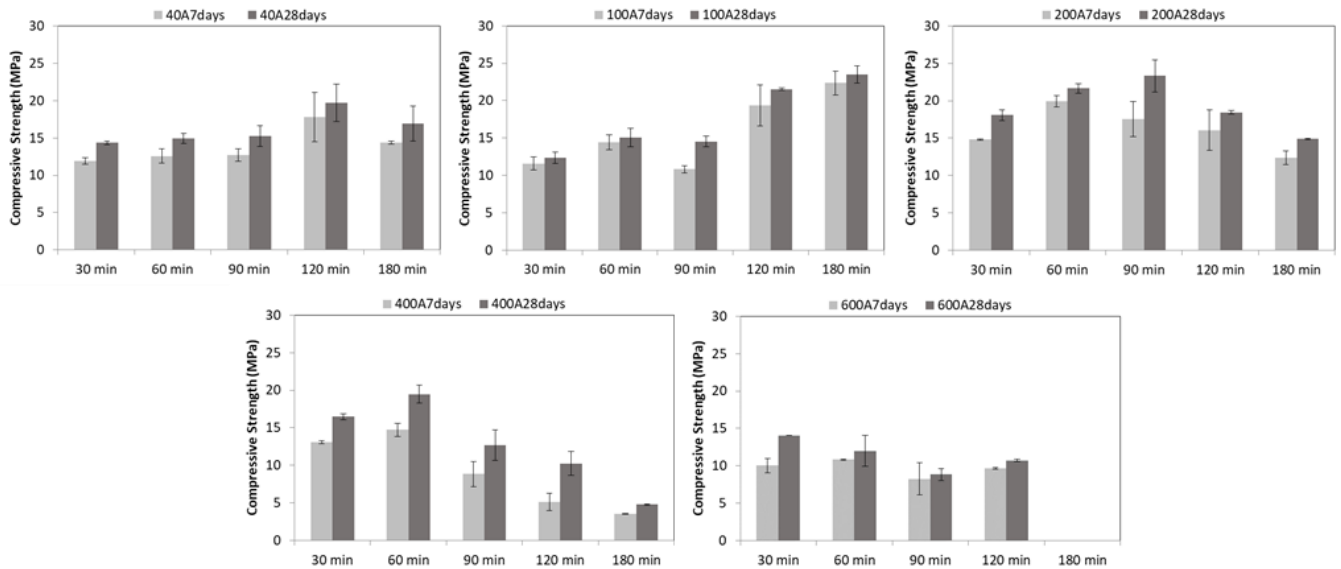
ภาพที่ 4 แสดงผลกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน ที่ผ่านการแช่น้ำตลอดเวลาการให้ความร้อนจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 40 และ 100 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน โดยให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดที่เวลา 120 และ 90 นาที ตามลำดับ และให้ค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 และ 60 นาที โดยจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที อายุ 28 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 18.65, 19.43, 17.55, 19.36 และ 15.63 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ค่ากำลังอัดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลาของการให้ความร้อนตั้งแต่ 30 ถึง 180 นาที แสดงให้เห็นว่าเมื่อจีโอโพลิเมอร์สัมผัสความร้อนและแช่น้ำตลอดเวลา นั้น ต้องมีระยะเวลาการสัมผัสความร้อนที่สั้นที่สุด โดยที่ค่ากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่สัมผัสที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นกำลังอัดของตัวอย่างลดต่ำลงอย่างรวดเร็วและไม่สามารถวัดค่ากำลังอัดได้เมื่อตัวอย่างสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเวลา 180 นาที



ภาพที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน และผ่านการแช่น้ำตลอดเวลา

2.3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน และสัมผัสอากาศตลอดเวลา

ภาพที่ 5 แสดงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน และสัมผัสอากาศตลอดเวลาจากผลการทดสอบพบว่า การให้ความร้อนกับจีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการสัมผัสความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสัมผัสความร้อนถึง 200 องศาเซลเซียส กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่ากำลังอัดสูงสุดเมื่อสัมผัสความร้อนที่เวลา 90 นาที และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสความร้อนเป็น 120 นาทีที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส กำลังอัดที่ได้มีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการสัมผัสความร้อนมากกว่า 200 องศาเซลเซียส และระยะเวลามากกว่า 90 นาที กำลังอัดมีค่าลดลงจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 18.06, 21.64, 23.31, 18.48 และ 12.31 เมกะปาสคาล เมื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที เมื่อบ่มเป็นเวลา 28 วัน ตามลำดับ



ภาพที่ 5 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อสัมผัสความร้อน และสัมผัสอากาศตลอดเวลา

3. โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผา

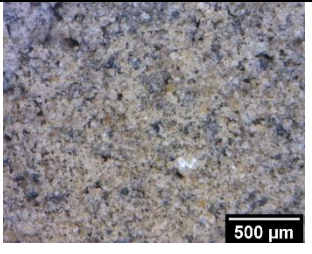
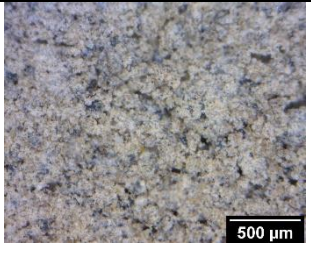
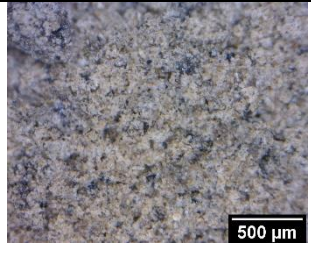
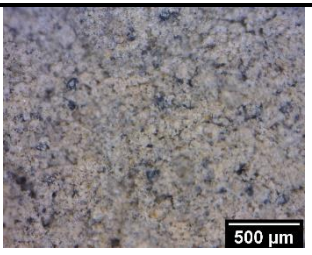
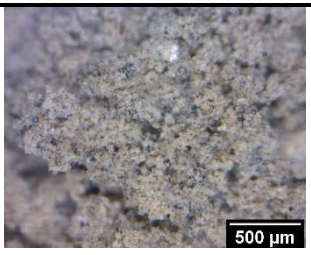
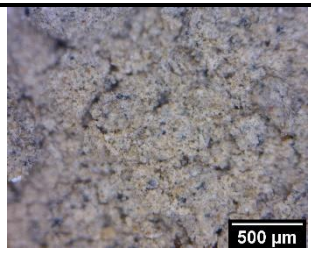
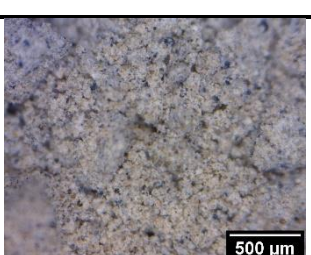
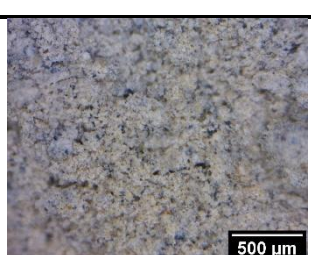
3.1 ลักษณะพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)

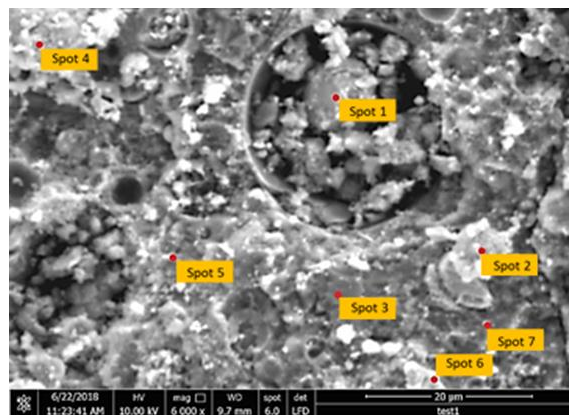
ตารางที่ 2 แสดงลักษณะพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผาโดยใช้กล้อง OM พบว่า ลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระ และมีสีน้ำตาลอ่อน นอกจากนี้ยังพบอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็กมีสีน้ำตาลและมีสีดำกระจายตัวอยู่ทั่วไปบริเวณพื้นผิว เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิการเผาและชนิดของการบ่มจีโอโพลิเมอร์หลังจากการเผา

3.2 ลักษณะพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์จากเครื่องส่องกราดลักษณะพื้นผิวของวัสดุ (Scanning Electron Microscope, SEM) และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เอเลคตรอน (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)

ภาพที่ 6 และ 7 แสดงลักษณะพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แล้วบ่มด้วยวิธีการที่แช่น้ำตลอดเวลาและสัมผัสอากาศตลอดเวลา พบว่า ตัวอย่างมีลักษณะพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน สังเกตได้ว่าตัวอย่างมีพื้นผิวที่เป็นทรงกลมเหลืออยู่และมีบางส่วนมีลักษณะที่เว้าแหว่งที่เกิดจากการชะซิลิกาและอลูมินา แสดงให้เห็นถึงเก้าถ่านหินบางส่วนไม่ทำปฏิกิริยา เช่นดังตำแหน่งที่ 1 ในภาพที่ 6 เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบลักษณะพื้นผิวที่เป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กที่มีเหลี่ยมมุมไม่แน่นอนกระจายอยู่ทั่วทุกบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง จากการทดลองด้วยเทคนิค EDS ของตารางที่ 3 และ 4 เพื่อที่จะศึกษาลักษณะพื้นผิวของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ โดยตำแหน่งที่ศึกษามีองค์ประกอบของธาตุ Na, Al, และ Si มีแนวโน้มของการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ เนื่องจาก Na ทำหน้าที่เป็นธาตุสมดุลประจุของ Al เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นทรงสี่หน้า (tetrahedral) ของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์

ตารางที่ 2 ตารางแสดงลักษณะพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากกล้อง OM

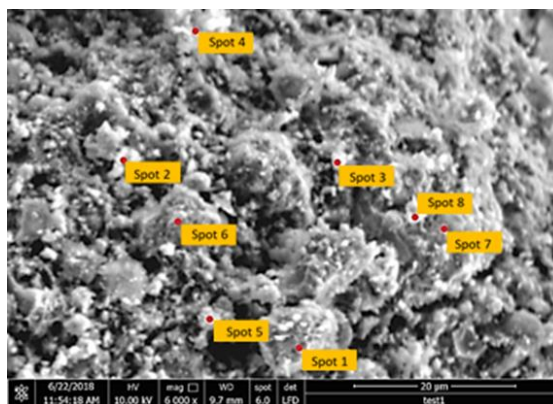
		ลักษณะการบ่ม		
		แช่น้ำตลอดเวลา (W)	บ่มน้ำ 1 คืน แล้วบ่มอากาศ (WA)	บ่มในอากาศ (A)
คุณสมบัติการเผ่าจีโอโพลิเมอร์	100 องศาเซลเซียส			
	200 องศาเซลเซียส			
	400 องศาเซลเซียส			



ภาพที่ 6 ลักษณะพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์จากตัวอย่างที่เผาที่ 400 องศาเซลเซียส และผ่านการแช่น้ำตลอดเวลา (400 W)

ตารางที่ 3 ร้อยละของน้ำหนักอะตอมในแต่ละตำแหน่งของตัวอย่างที่เผาที่ 400 องศาเซลเซียส และผ่านการแช่น้ำตลอดเวลา (400 W)

ธาตุ	ร้อยละของน้ำหนัก						
	1	2	3	4	5	6	7
Na	16.30	10.60	10.94	8.90	15.98	8.43	7.44
Al	14.31	14.54	3.59	14.20	13.01	11.02	3.69
Si	15.77	17.41	10.30	17.24	14.67	17.18	14.69
Ca	3.25	6.10	7.72	4.87	4.66	12.06	19.25
Fe	-	1.94	5.21	-	-	-	3.00



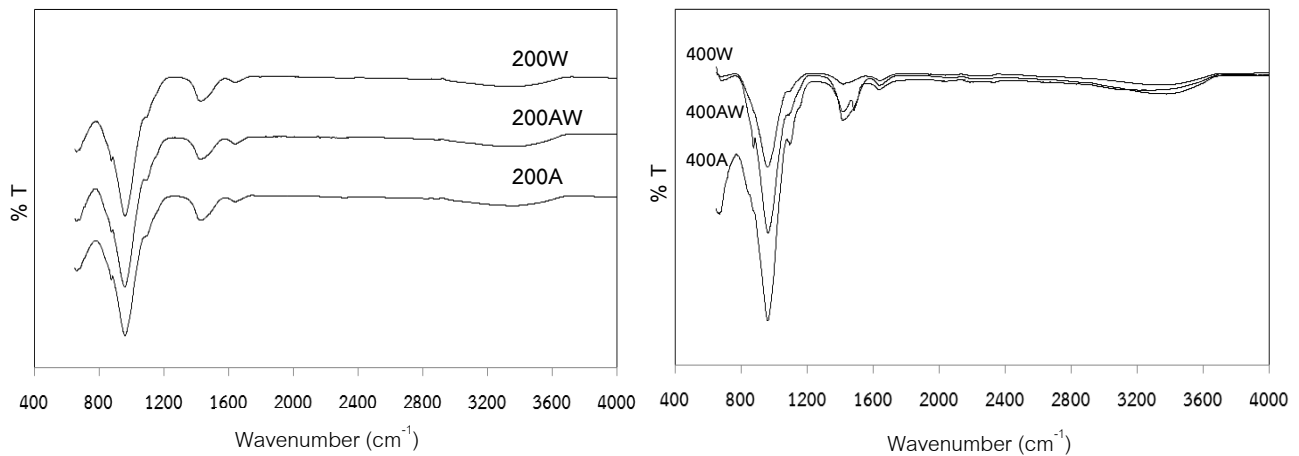
ภาพที่ 7 ลักษณะพื้นผิวของจีโอโพลีเมอร์ตัวอย่างที่เผาที่ 400 องศาเซลเซียส และอยู่ในอากาศตลอดเวลา (400A)

ตารางที่ 4 ร้อยละของน้ำหนักอะตอมในแต่ละตำแหน่งของตัวอย่างที่เผาที่ 400 องศาเซลเซียส และอยู่ในอากาศตลอดเวลา (400A)

ธาตุ	ร้อยละของน้ำหนัก							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Na	11.55	8.61	10.29	7.88	9.82	12.81	14.20	10.69
Al	12.21	7.41	8.05	6.43	8.60	11.90	14.07	14.29
Si	14.80	16.18	13.98	11.35	12.96	16.05	15.00	17.25
Ca	8.75	14.31	9.58	18.92	13.91	7.21	2.99	4.79
Fe	-	2.43	3.43	2.71	2.57	-	-	-

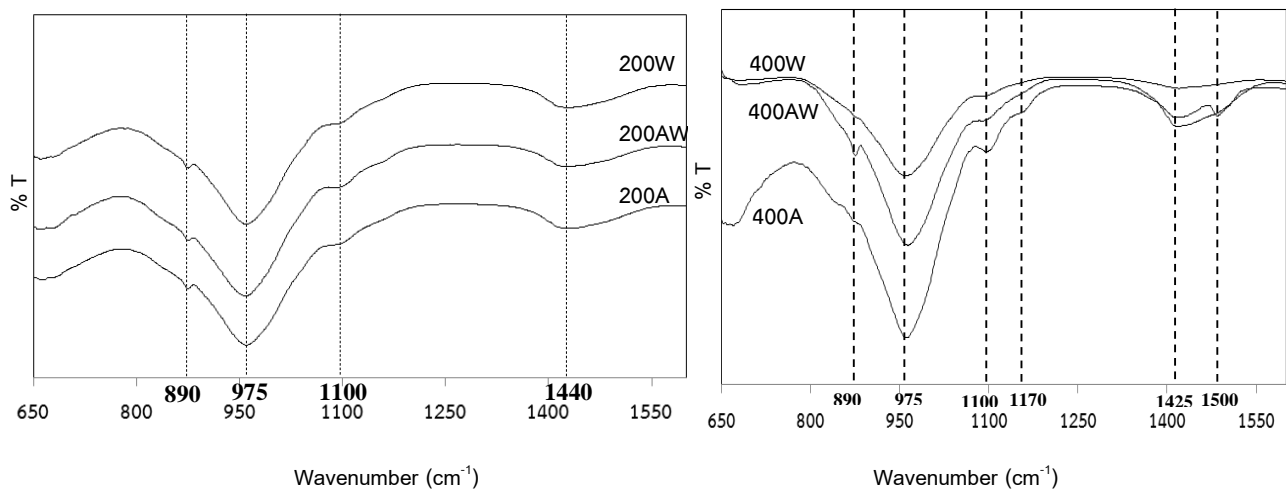
3.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีจากเทคนิค Fourier Transformed Infrared Spectrometer (FTIR)

ภาพที่ 8 และ 9 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการตรวจสอบจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400 – 4000 และ 650 – 1600 ต่อเซนติเมตร ของจีโอโพลิเมอร์ที่เผาที่อุณหภูมิ 200 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยตารางที่ 5 แสดงตำแหน่งและโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบ



ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จากการตรวจสอบเทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400 – 4000 ต่อเซนติเมตร

ของตัวอย่าง 200W 200AW และ 200A และ ตัวอย่าง 400W 400AW และ 400A



ภาพที่ 9 โครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จากการตรวจสอบเทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่น 650 – 1600

ต่อเซนติเมตร ของตัวอย่าง 200W 200AW และ 200A และ ตัวอย่าง 400W 400AW และ 400A

ภาพที่ 9 โครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จากการตรวจสอบเทคนิค FTIR ของตัวอย่างที่สัมผัสอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 890, 975 และ 1100 ต่อเซนติเมตร ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Akira Matsuda *et al.*, Kumar and Kumar, 2011; Clausiet *et al.*, 2016) แสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าถ่านหิน



สังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์กลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกตเจลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน นอกจากนี้ยังพบการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1440 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชัน CO_3^{2-} จากโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) (Jin *et al.*, 2016; Clausi *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2016; Timakul *et al.*, 2016 and Yun *et al.*, 2016) สำหรับการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1640 และ 3370 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชัน -OH จากโมเลกุลของน้ำ (Jin *et al.*, 2016)

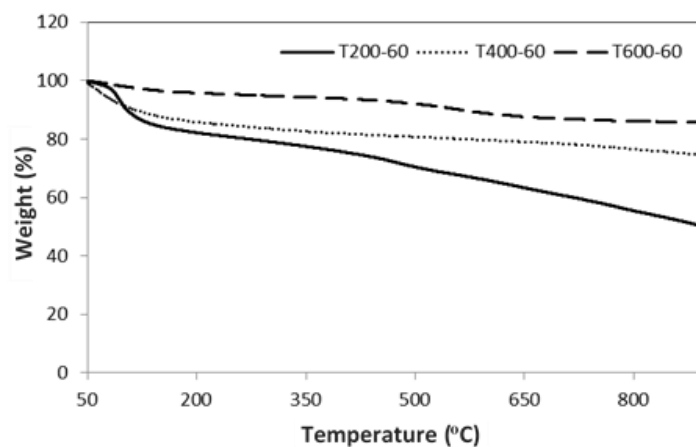
จากภาพที่ 9 โครงสร้างทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์จากการตรวจสอบเทคนิค FTIR ของตัวอย่างที่สัมผัสน้ำอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แสดงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบจีโอโพลิเมอร์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 890, 975, 1100 และ 1170 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะ Al-O หรือ Si-O ของอะลูมิเนียมซิลิเกตเจล ซึ่งสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Akira Matsuda *et al.*, 2014; Kumar and Kumar, 2011 and Clausi *et al.*, 2016) แสดงให้เห็นว่าการใช้เตาถ่านหินสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์กลุ่มอลูมิเนียมซิลิเกตเจลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน นอกจากนี้ยังพบการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1425 และ 1500 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะของหมู่ CO_3^{2-} จากโซเดียมคาร์บอเนต หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (Jin *et al.*, 2016; Clausi *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2016; Timakul *et al.*, 2016 and Yun *et al.*, 2016) สำหรับการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1640, 3370 และ 3780 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน -OH จากโมเลกุลของน้ำ (Jin *et al.*, 2016)

ตารางที่ 5 ตำแหน่งเลขคลื่นและโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบ

ตำแหน่ง (cm^{-1})	โครงสร้าง	อ้างอิง
890	stretching of vibration of T-O-Si (T=Si or Al)	Akira Matsuda <i>et al.</i> , (2019)
900-1030	Al-O or Si-O ของ aluminosilicate	Sanjay Kumar and Rakesh Kumar, (2011) Marina Clausi <i>et al.</i> , (2016)
1101	Si-O-Si (asymmetric)	Natt Makul and Burachat Chatveera, (2013)
1380-1500	O-C-O bonds of CO_2^{-3}	Yun Liu <i>et al.</i> , (2016)
1400-1456	O-C-O bonds of CO_2^{-3}	Mantong Jin <i>et al.</i> , (2016) Marina Clausi <i>et al.</i> , (2016) Sujeong Lee <i>et al.</i> , (2016) Patthamaporn Timakul <i>et al.</i> , (2016)
1640-1649	-OH และ H-O-H โมเลกุลของน้ำ	Sujeong Lee <i>et al.</i> , (2016)
3429-3440	-OH และ H-O-H โมเลกุลของน้ำ	Mantong Jin <i>et al.</i> , (2016)

3.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

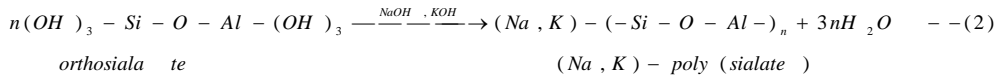
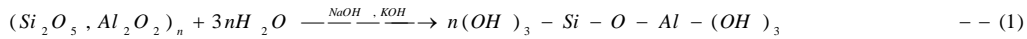
ภาพที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค TGA พบว่า น้ำหนักของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิของการเผาเพิ่มขึ้น จีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส มีค่า Residual Mass เท่ากับ 50, 65 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 120 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของโมเลกุลของน้ำ จากนั้นในช่วง 120 ถึง 200 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของ NASH gel หรือผลิตภัณฑ์จากจีโอโพลิเมอร์ และช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่เกิดการสลายตัวของกลุ่มคาร์บอนเนต



ภาพที่ 10 กราฟการทดสอบ TGA

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลของกำลังอัดจากการจำลองสภาพการณ์หลังเกิดเพลิงไหม้ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่สัมผัสความร้อนทั้ง 3 ลักษณะ ได้แก่ แชน้ำ 24 ชั่วโมง แล้วสัมผัสอากาศ (WA) แชน้ำตลอดเวลา (W) และสัมผัสอากาศตลอดเวลา (A) กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของการกระตุ้นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งในงานวิจัยพบการกระตุ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส (Rovnanik, 2010; Hui *et al*, 2014 and Shoaei *et al*, 2019) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียส ทำให้การดึงโมเลกุลของน้ำออกจากระบบได้ดีส่งผลให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าการกำลังอัดลดลง ดังนั้น เมื่อให้ความร้อนแก่จีโอโพลิเมอร์ด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสถึง 200 องศาเซลเซียสแล้วใช้ระยะเวลาที่นานกว่า 90 นาที กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าลดลง จากปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ พบว่า น้ำมีส่วนสำคัญในช่วงต้นของการผสมจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งน้ำเป็นส่วนประกอบหนึ่งของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผสมกับเถ้าถ่านหินเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดผลิตภัณฑ์ขั้นต้นของจีโอโพลิเมอร์ แต่เมื่อต้องการผลิตภัณฑ์สุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์โมเลกุลของน้ำจะถูกจัดออกเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ให้สมบูรณ์แสดงดังสมการที่ 1 และ 2 (Davidovits, 1999) แสดงให้เห็นว่าชนิดของการจำลองสภาพการณ์หลังเกิดเพลิงไหม้แล้วมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่ต่างกันทั้ง 3 ลักษณะ ทั้งในน้ำและในอากาศหลังจากการสัมผัสความร้อน ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์



การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผาด้วยเทคนิค OM ไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทำให้ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยการใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope และ Energy Dispersive Spectroscopy ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุ Na, Al, Si และ Ca ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของจีโอโพลิเมอร์ แต่เนื่องจากเก้าถ่านหินมีแคลเซียมในปริมาณสูงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นของจีโอโพลิเมอร์เป็นได้ทั้ง NASH (sodium aluminate silicate hydrate) CSH (calcium silicate hydrate) CASH (calcium silicate aluminate hydrate) (Somna and Bumrungjareon, 2011) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาและชนิดของการบ่มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งผลจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีพบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่เผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบเดียวเมื่อเปรียบเทียบกับที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่มีโครงสร้างหลายแบบ ซึ่งลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่แสดงผลกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ในหัวข้อที่ 2 และจากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค TGA แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของทุกผลิตภัณฑ์มากที่สุดโดยเฉพาะในช่วง 450 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งสัมพันธ์กับช่วงการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์ และสัมพันธ์กับผลของค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่รับกำลังได้สูงที่สุด นอกจากนี้ เมื่ออุณหภูมิการเผามีค่าสูงขึ้นการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จะลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ยังเกิดไม่สมบูรณ์ ทำให้ไม่เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบกำลังอัดและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ 40, 100, 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การบ่มจีโอโพลิเมอร์ทั้ง 3 ลักษณะ กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ถังน้ำจะเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นต้นของจีโอโพลิเมอร์แต่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์โมเลกุลของน้ำจะถูกขจัดออกเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ให้สมบูรณ์ ดังนั้นลักษณะการบ่มไม่ได้ส่งผลต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

2. ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผา เมื่อศึกษา ลักษณะพื้นผิวพบว่าจีโอโพลิเมอร์ทุกตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ และบ่มด้วยวิธีการที่แตกต่าง จะมีลักษณะพื้นผิวที่ใกล้เคียงกัน และการศึกษาด้วยเทคนิค EDS พบว่าพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุ Na, Al, Si และ Ca ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของจีโอโพลิเมอร์ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาและชนิดของการบ่มไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของ



จีโอโพลีเมอร์ ในส่วนของการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีและ TGA พบว่าผลการศึกษาคัดค้านกับกำลังอัด กล่าวคือ จีโอโพลีเมอร์ที่เผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีผลิตภัณฑ์จีโอโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบเดียวกับเมื่อเปรียบเทียบกับที่เผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่มีโครงสร้างหลายแบบและการเผาจีโอโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงเฟสของทุกผลิตภัณฑ์มากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และสาขาเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ เป็นผลให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

American Society for Testing and Materials, ASTM C618-08a. (2008). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia; 04.02.2008.

Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233-1246.

Bakharev, T. (2006). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing, *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1134-1147.

Chindapasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224-229. (in Thai)

Clausi, M., Tarantino, S. C., Magnani, L. L., Riccardi, M. P., Tedeschi, C. and Zema M. (2016). Metakaolin as a precursor of materials for applications in Cultural Heritage: Geopolymerbased mortars with ornamental stone aggregates, *Applied Clay Science*, 132–133, 589–599.

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, 9-39.

Hui, B., Zhu, H., Cui, Xue, M., Yan, H., Gong and Yu, S. (2014). *Applied Clay Science*, 99, 144-148.



- Jin, M., Zheng, Z., Sun, Y., Chen L. and Jin, Z. (2016). Resistance of metakaolin-MSWI fly ash based geopolymer to acid and alkaline environments. *Journal of NonCrystalline Solids* ,450, 116–122.
- Khale, D. and Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, *Journal of Materials Science*, 47(3), 729-746.
- Kumar, S. and Kumar, R. (2011). Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics International*, 37, 533–541.
- Lee, S., Riessenc, A. V., Chona, C., Kangb, N., Joud, H. and Kim, Y. (2016). Impact of activator type on the immobilisation of lead in fly ash-basedgeopolymer. *Journal of Hazardous Materials* 305, 59-66.
- Liu, Y., Zhang, K., Feng, E., Zhao, H. and Liu, F. (2016). Synthesis of geopolymer composites from a mixture of ferronickel slag and fly ash. 17th IUMRS International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2016).
- Makul, N. and Chatveera, B. (2013). Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar: Influence of Fly Ash Sources and Sodium Silicate (Na_2SiO_3) / Sodium Hydroxide (NaOH) Ratios, *KMUTT Research and Development Journal*, 36(1), 99-125. (in Thai)
- Matsuda, A., Maruyama, I., Meawad, A., Pareek, S. and Araki, Y. (2019). Reaction, Phases, and Microstructure of Fly Ash-Based Alkali-Activated Materials, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17, 93-101.
- Rahmadina, A. and Ekaputri, J. (2017). Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Exposed to Combustion MATEC Web of Conferences, Vol. 138.
- Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, 22(12), 1073-1078.(in Thai)
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24, 1176-1183.



- Sanawong, C., Somna, K. and Chalee, W. (2010). Compressive and Bond Strengths of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *BURAPHA SCIENCE JOURNAL*, 15(1), 13-22. (in Thai)
- Shoaei, P., Musaei, H.R., Mirlohi, F., zamanabadi, S.N., Ameri, F. and Bahrami, N. (2019). Construction and Building Materials, 227, 10 December 2019, 116686.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindapasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *The Science and Technology of Fuel and Energy*, 90, 2118-2124.
- Somna, K. and Bumrongjaroen, W. (2011). Effect of External and Internal Calcium in Fly Ash on Geopolymer Formation, *Developments in Strategic Materials and Computational Design II: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 32,
- Song, X.J., Marosszeky, M., Brungs, M. and Munn, R.(2005). Durability of fly ash based Geopolymer concrete against sulphuric acid attack, 10 DBMC International Conferences on Durability of Building Materials and Components, Lyon, France,
- Thokchom, S., Ghosh, P. and Ghosh, S. (2009). Acid Resistance of Fly ash based Geopolymer mortars, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(6), 36-40.
- Timakul, P., Rattannaprasit, W. and Aungkavattana, P. (2016). Improving compressive-strength of fly ash Based geopolymer composites by basalt fibers addition. *Ceramics International*, 142, 6288-6295.
- Valencia, W. and De Gutiérrez, R.M. (2017). Performance of Geopolymer Concrete Composed of Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures. *Construction and Building Materials*, 154, 229-235.