การศึกษาสมบัติความคงทนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา

A Study on Durability of Bottom Ash Geopolymer

วิเชียร ชาลี [1] และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ [2*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[2] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Wichian Chalee [1] and Ubolluk Rattanasak [2*]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

[2] Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้เสนอการศึกษาคุณสมบัติความคงทนของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา โดยเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 ทำการบ่มจีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 65 ˚C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มตัวอย่างในอากาศ และทดสอบกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน ในการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ ได้ทำการทดสอบกำลังหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 90 วัน นอกจากนี้ที่อายุตัวอย่าง 48 ชั่วโมง ได้ทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบซิลิกา Si-O (stretching) โดยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) ที่ช่วงความถี่ 1200-950 cm^{-1} และโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 90 วัน สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 35 เมกะปาสคาล และนอกจากนั้นยังพบว่า จีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 90 วัน มีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศที่อายุทดสอบเดียวกัน ตลอดจนตัวอย่างที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ค่อนข้างชัดเจน

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์ เถ้าก้นเตา ความคงทนต่อสารเคมี แมกนีเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต

***Corresponding author.** E-mail: ubolluk@buu.ac.th

Abstract

This paper presents a study on the durability of bottom ash geopolymer. The geopolymer was prepared from bottom ash with sodium silicate (Na_2SiO_3) and 10 M sodium hydroxide (NaOH) solutions. The mass ratio of Na_2SiO_3: NaOH was varied at 1, 1.5, 2, and 3. The samples were cured at 65 °C for 48 hours. Compressive strength of geopolymer curing at ambient temperature was performed at the age of 14, 30 and 90 days. Durability was presented as strength test of samples curing under 5% sodium sulfate (Na_2SO_4) and magnesium sulfate ($MgSO_4$) solutions at 90 days. In addition, the functional group characterization of silica compound, Si-O (stretching), was studied by Infrared Spectrometer (FT-IR) at frequency of 1200-950 cm^{-1}, and the microstructural study was carried out by scanning electron microscope (SEM). The results showed that using of Na_2SiO_3: NaOH of 3 gave the compressive strength of 35 MPa at 90 days. After 90 days curing in 5% Na_2SO_4 and 5% $MgSO_4$ solutions, samples in 5% $MgSO_4$ were lowered in compressive strength and obviously changed in volume.

Keywords : geopolymer, bottom ash, chemical durability, magnesium sulfate, sodium sulfate

บทนำ

สารซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ได้ถูกใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีคอนกรีต โดยเฉพาะประเทศไทยที่นิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตในงานก่อสร้างด้านโยธา ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มาจากการเผาสารที่ประกอบไปด้วยซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก อุณหภูมิในการเผาที่ประมาณ 1400-1600 ˚C กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงใช้พลังงานสูงมากจากการระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การเผา และการบด

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นจึงมีการพยายามที่จะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง โดยพยายามที่จะหาสารซีเมนต์อื่นมาใช้แทนหรือผสมเพิ่ม มีการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำปูนซีเมนต์ผสม (Blended cement) เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารที่ใช้ผสมดังกล่าวเป็นสารพวกปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานในตัวเอง แต่เมื่อผสมกับสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ วิธีการนี้เป็นการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งได้เป็นอย่างดี และลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต สารปอซโซลานที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่เถ้าถ่านหิน (fly ash) นอกจากนี้ยังมีเถ้าก้นเตา (Bottom ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) และเถ้าชีวมวล (Biomass ash) อย่างไรก็ตามสารปอซโซลานไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด เนื่องจากซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าดังกล่าวต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานและได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติยึดประสานต่อไป

นอกจากนี้ยังมีความพยายามพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า “จีโอพอลิเมอร์” เป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอน โดยการชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมในสารละลายเบสความเข้มข้นสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ซิลิกอนและอะลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเด็นเซชันเป็นโมเลกุลของลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ (Davidovits, 1999)

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้เป็นการเตรียมวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาซึ่งถือว่าเป็นของเหลือทิ้งจำนวนมากจากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าในปริมาณที่มาก แต่เถ้าก้นเตาที่ได้มีอนุภาคขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาไม่ค่อยดีนัก จึงต้องนำมาบดให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น การทดลองครั้งนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ ศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต และนอกจากนั้นได้ศึกษาหมู่ฟังชันของจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Infrared spectroscopy (IR), ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Energy dispersive X-ray spectroscope (EDX)

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยบดให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 10 ไมครอน องค์ประกอบหลักทางเคมีที่ทดสอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 1

สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30˚C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 10 โมลาร์ ในการทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนได้ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าก้นเตา

องค์ประกอบหลักทางเคมี	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)
SiO_2	38.8
Al_2O_3	12.8
Fe_2O_3	5.1
CaO (and free lime)	18.9
Others	21.5
LOI	2.9

สารละลายที่ใช้ในการผสมจีโอพอลิเมอร์ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ซึ่งอัตราส่วน SiO_2 ต่อ Na_2O เท่ากับ 3.4 โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.36 ที่อุณหภูมิ 30˚C สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 10 โมลาร์ ในการทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนได้ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

การเตรียมจีโอพอลิเมอร์

ในการเตรียมจีโอพอลิเมอร์ นำเถ้าก้นเตามาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนในเครื่องผสมเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและผสมต่อเป็นเวลา 1 นาที จนได้จีโอพอลิเมอร์เพสต์ และเติมทรายในขั้นตอนสุดท้ายของการผสมจนได้เป็นจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยอัตราส่วนผสมแสดงในตารางที่ 2 ในการเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าร์จะใช้ อัตราส่วนของเถ้าก้นเตาต่อทราย เท่ากับ 2 โดยน้ำหนัก หลังจากผสมเสร็จเทจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม^3 และนำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 65˚C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนทำการแกะแบบ

การทดสอบจีโอพอลิเมอร์

ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่อายุตัวอย่าง 48 ชั่วโมงได้ศึกษาหมู่ฟังชันและโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ด้วยเทคนิค IR และ SEM-EDX ตามลำดับ จากนั้นได้แบ่งตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มควบคุมได้ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่บ่มในอากาศเป็นเวลา 14, 30 และ 90 วัน และอีก 2 กลุ่มได้แช่ใน 5% Na_2SO_4 และ 5% $MgSO_4$ ก่อนที่จะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 90 วัน โดยแต่ละการทดสอบกำลังอัดได้ใช้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ 3 ก้อน

ตารางที่ 2 สัดส่วนการผสมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา (โดยน้ำหนัก)

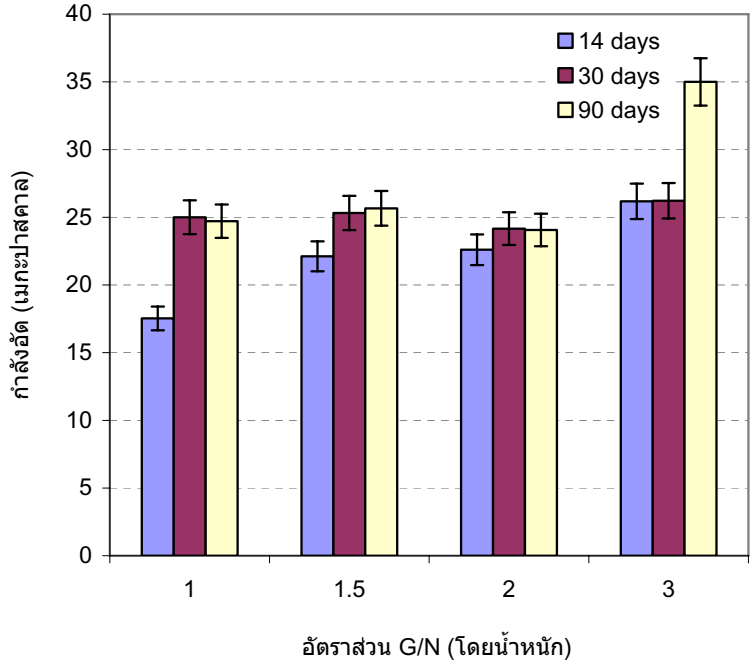
ตัวอย่าง	เถ้าก้นเตา	Na_2SiO_3 (G)	10 M NaOH (N)	อัตราส่วน G/N
1	60	20	20	1
2	60	24	16	1.5
3	60	27	13	2
4	60	30	10	3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

ผลการศึกษากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าก้นเตา แสดงดังภาพที่ 1 พบว่าอัตราส่วน Na_2SO_4/NaOH (G/N) มีผลต่อค่ากำลังอัด โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วน G/N ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยเฉพาะที่อายุมอร์ต้าร์ที่บ่มในอากาศ 14 วัน โดยพบว่าที่ G/N เท่ากับ 1 สำหรับการบ่มในอากาศ 14 วัน ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 17 เมกะปาสคาล และเพิ่มขึ้นเป็น 22, 22.5 และ 26 เมกะปาสคาลเมื่อเพิ่ม G/N เป็น 1.5, 2 และ 3 ตามลำดับ และที่อายุจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์มากขึ้นพบว่ามีการพัฒนาทางกำลังเพิ่มขึ้นในช่วงอายุ 14 ถึง 30 วัน โดยเฉพาะที่ใช้อัตราส่วน G/N ในช่วง 1 ถึง 2 โดยมี

กำลังอัดที่ 25, 25.4, และ 24 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และหลังจากนั้นกำลังอัดจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนเกือบคงที่ในช่วงอายุ 30 ถึง 90 วัน ในขณะที่เมื่อค่า G/N สูงขึ้นเป็น 3 จะเห็นการพัฒนาทางด้านกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุของจีโอพอลิเมอร์-มอร์ต้าร์อย่างชัดเจน โดยค่ากำลังอัดที่อายุบ่มในอากาศเป็นเวลา 90 วัน สามารถพัฒนาได้สูงถึง 35 เมกะปาสคาล ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวเป็นผลมาจากการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในปริมาณสูงทำให้มีปริมาณซิลิกาที่ละลายได้ (Dissolved silica) ในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งจะช่วยทำให้การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของจีโอพอลิเมอร์ดีขึ้น

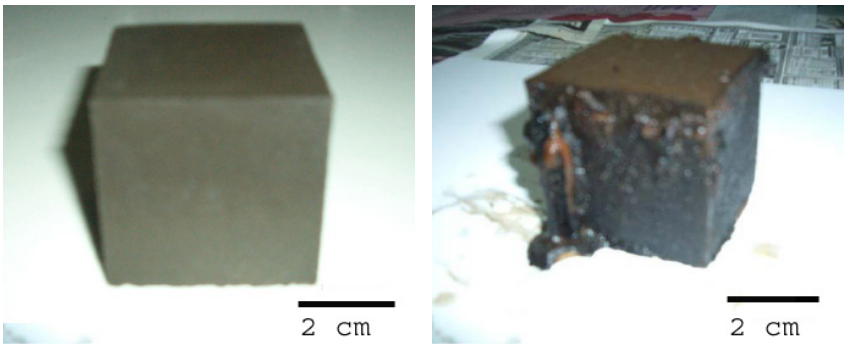


ภาพที่ 1 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์บ่มในอากาศที่อายุ 14, 30 และ 90 วัน

ความคงทนของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์

จากการนำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์แช่ใน 5% Na_2SO_4 และ 5% $MgSO_4$ ก่อนที่จะทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 90 วัน พบว่าตัวอย่างที่แช่ใน 5% Na_2SO_4 เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรเล็กน้อยที่อายุการแช่ 90 วัน ในขณะตัวอย่างที่แช่ใน 5% $MgSO_4$ มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดขึ้นค่อนข้างชัดเจน โดยทุกตัวอย่างมีส่วนที่ก่อตัวออกมาจากพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์-มอร์ต้าร์ ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยอาจจะเกิดเป็น $Mg(OH)_2$ จากปฏิกิริยาระหว่าง Mg^{2+} (จากสารละลาย $MgSO_4$) กับ OH^- (จาก NaOH ที่ใช้ในการผสม) ดังสมการต่อไปนี้ (ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วย SEM-EDX)

$$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2$$

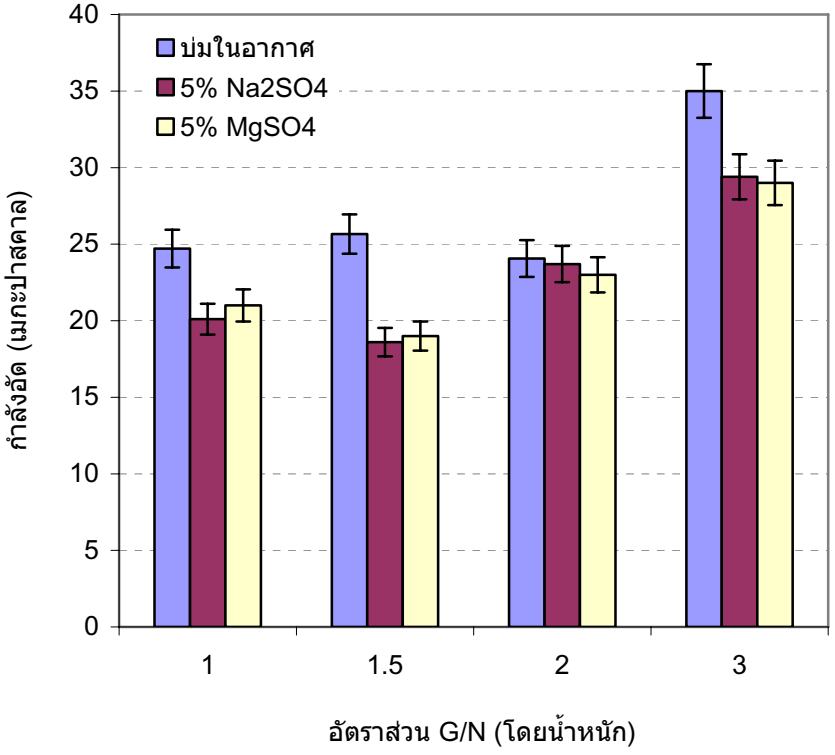


ก่อนแช่ หลังแช่ 90 วัน

ภาพที่ 2 ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ก่อนและหลังแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก

แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่บริเวณผิวของจีโอพอลิเมอร์ นอกจากนั้นอาจเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต ($MgO{\cdot}SiO_2{\cdot}8H_2O$) ซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมไอออนกับซิลิกา (Skalny et al., 2002) โดยการเกิดสารประกอบทั้งสองทำให้ตัวอย่างเกิดการสูญเสียน้ำหนักซึ่งเกิดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของรูพรุนและช่องว่างในตัวอย่าง (Skalny et al., 2002 และ Bakharev, 2005) เป็นผลให้ค่ากำลังอัดลดลง อีกทั้งการสูญเสียน้ำหนักเกิดจาก SiO_2 ที่ถูกชะออกมาจากมอร์ต้าร์ เกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกตปนออกมากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่พบที่ส่วนที่ก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ ดังที่สามารถตรวจพบ Si ในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (ภาพที่ 3)

สำหรับตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น แคลเซียมไอออนในส่วนผสมสามารถเกิดปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออนเป็นสารประกอบยิปซัมขึ้นมาได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียพันธะ (Bonding loss) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ โดยเฉพาะที่ค่า G/N ที่ค่าเท่ากับ 1 และ 1.5 ตัวอย่างที่แช่ในสารละลายทั้งสองจะให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่บ่มในอากาศอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ที่อัตราส่วน G/N ดังกล่าว มีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนจากสารละลายโซดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมมาก ทำให้สามารถเกิดสารประกอบ $Mg(OH)_2$ ได้มากเช่นกัน โดยภาพที่ 3 แสดงผลกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ใน 5% Na_2SO_4 และ 5% $MgSO_4$



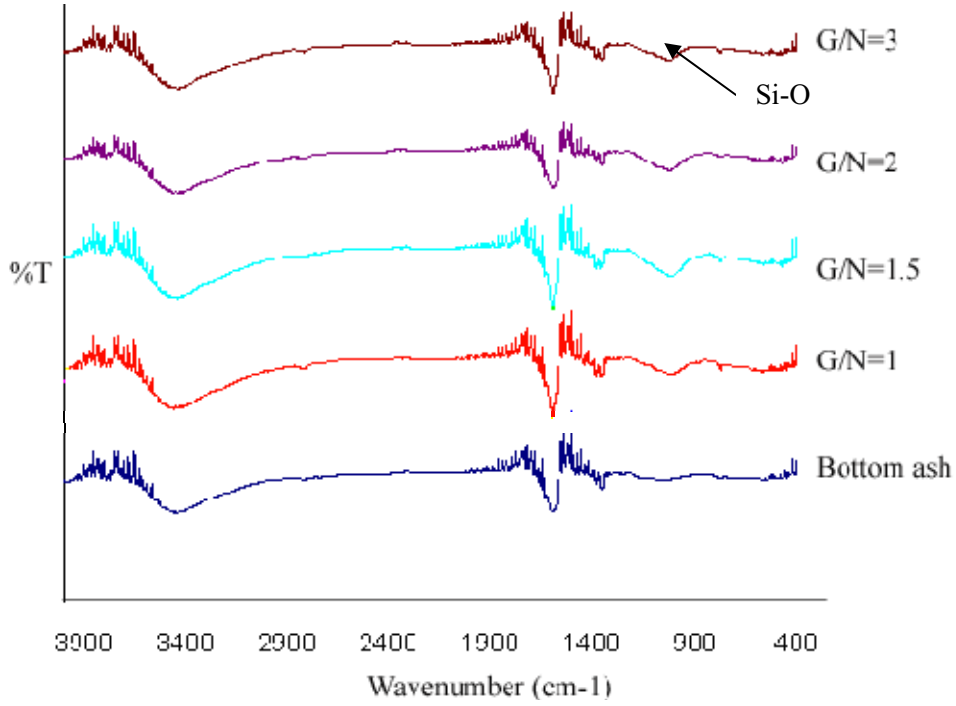
ภาพที่ 3 กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มในอากาศและแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 90 วัน

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนของจีโอพอลิเมอร์-มอร์ต้าร์ต่อการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบซัลเฟต โดยวัดออกมาในรูปของการสูญเสียกำลังอัด จะเห็นได้ว่า ทั้งกลุ่มที่แช่ในสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตมีกำลังอัดต่ำกว่ากลุ่มที่บ่มในอากาศค่อนข้างชัดเจน นั่นแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ยังไม่สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากซัลเฟตได้ แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าที่อัตราส่วน G/N เท่ากับ 2 มีการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตทั้ง 2 ชนิดต่ำที่สุด หรือมีการต้านทานการทำลายเนื่องจากซัลเฟตได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์เพื่อที่จะ

รองรับสภาพแวดล้อมที่มีการทำลายเนื่องจากซัลเฟต ก็สามารถที่จะทำได้ แต่ทั้งนี้ต้องศึกษาควบคู่ไปกับสมบัติเชิงกลพื้นฐานด้วย และนอกจากนั้นเป็นที่น่าสังเกตว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่แช่ในสารสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและโซเดียมซัลเฟตมีค่าไกล้เคียงกัน โดยไม่สามารถพิจารณาได้ว่าสารประกอบซัลเฟตตัวไหนที่ส่งผลทำลายต่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ในแง่ของกำลังอัดมากกว่ากัน แต่เมื่อพิจารณาด้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของก้อนตัวอย่างก็พบว่าตัวอย่างที่แช่ในแมกนีเซียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดขึ้นค่อนข้างชัดเจน ซึ่งถึงแม้กำลังอัดจะไม่ลดลงมากแต่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่มีค่าสูงก็ถือเป็นการทำลายและส่งผลเสียต่อจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์ เช่นกัน

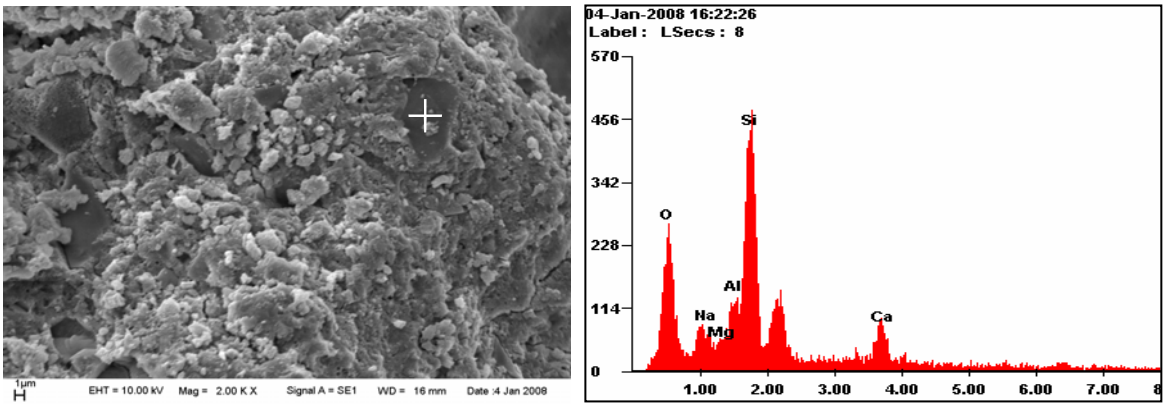
หมู่ฟังชันของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค FT-IR

จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของสารตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์ ด้วยเทคนิค FT-IR ที่สภาวะการเตรียมตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการอัด KBr เลขคลื่นที่ใช้ (Wave number) ตั้งแต่ 4,000-400 cm^{-1} พบว่าตัวอย่าง 1,200-900 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ Si-O (Stretching) ซึ่งพีคดังกล่าวพบในทุกตัวอย่าง ดังภาพที่ 4 ซึ่งสังเกตุพีคขนาดเล็กของที่ Si-O-Si และ Si-O-Al ที่ช่วงประมาณ 450 cm^{-1} ส่วนที่บริเวณ 3,400 cm^{-1} เป็นพีคของ OH เมื่อเพิ่มค่า G/N ในส่วนผสม พบว่าพีคของ Si-O มีตำแหน่งเลื่อนไปทางเลขคลื่นที่ต่ำลง และมีพื้นที่ของพีคเปลี่ยนแปลงไปซึ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของความยาวสายโซ่ของอะลูมิโนซิลิเกตพอลิเมอร์ (Bakharev, 2005) นอกจากนี้ยังพบพีคของ C-O ที่ประมาณ 1350 cm^{-1}ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาคาร์บอเนชันของตัวอย่างกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

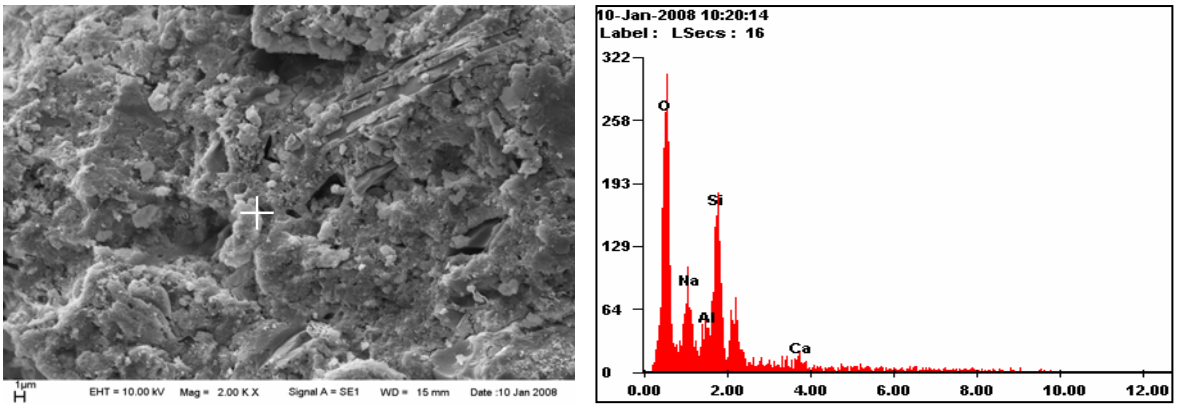


ภาพที่ 4 FT-IR spectra ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์

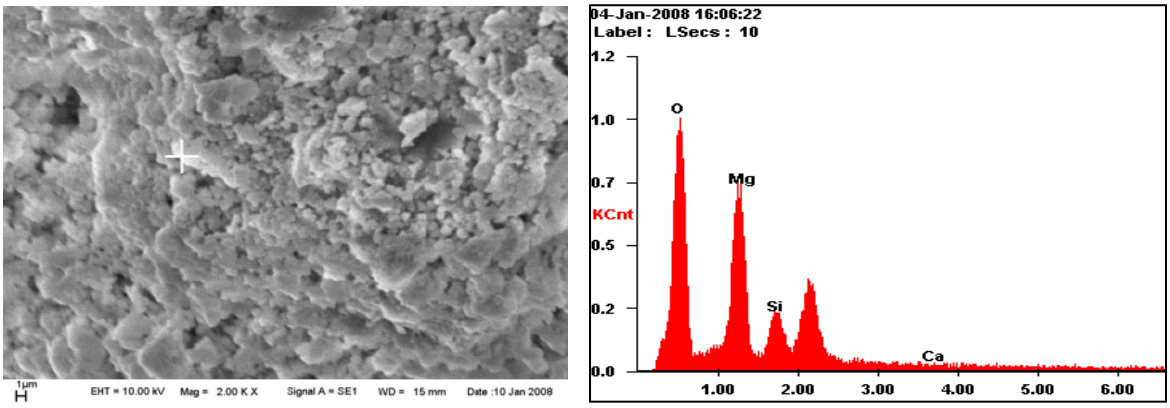
เมื่อทำการหาอัตราส่วน corrected area ของพีค Si-O ของจีโอพอลิเมอร์เพสต์เทียบกับเถ้าก้นเตาก่อนทำปฏิกิริยา พบว่าที่อัตราส่วน G/N เท่ากับ 1, 1.5, 2, และ 3 มีอัตราส่วนพื้นที่พีคเท่ากับ 1.2, 2.2, 2.0, และ 1.6 ตามลำดับ ซึ่งให้ผลในแนวโน้มเดียวกับผลการทดสอบกำลังอัดโดยเฉพาะที่ G/N ในช่วง 1 ถึง 2 ที่กำลังเพิ่มขึ้นตามค่า G/N ที่อายุการบ่ม 14 วัน อย่างไรก็ตามแนวโน้มดังกล่าวสวนทางกับผลกำลังอัดที่ค่า G/N เท่ากับ 3 ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยอื่นนอกเหนือจากปริมาณพีคของ Si-O ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์



(ก) เถ้าก้นเตา



(ข) จีโอพอลิเมอร์เพสต์ (G/N = 3)



(ค) ส่วนที่ก่อตัวเมื่อแช่ในสารละลาย 5% $MgSO_4$

ภาพที่ 5 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์โดยเทคนิค SEM-EDX

ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากเถ้าก้นเตาที่ใช้อัตราส่วน G/N เท่ากับ 3 และตัวอย่างส่วนที่ก่อตัวจากพื้นผิวตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่แช่ในสารละลาย 5% $MgSO_4$ ได้นำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยภาพที่ 5(ก) แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าก้นเตาที่บดละเอียด พบว่าเถ้าก้นเตาพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ และมีเม็ดเจลที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของเถ้าก้นเตา เมื่อนำเถ้าก้นเตามาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันโดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์เกิดเจลก่อตัวเพิ่มมากขึ้นดังภาพที่ 5(ข) ส่วนตัวอย่างที่ก่อตัวจากพื้นผิวจีโอพอลิเมอร์แสดงในภาพที่ 5(ค) พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคมีลักษณะแตกต่างจาก 2 ภาพแรก มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว โค้งมนไม่มีเหลี่ยมมุม

ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM-EDX พบว่าเถ้าก้นเตามีซิลิกอน อะลูมิเนียมและแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก โดยอัตราส่วนของ Si/Al มีค่า 5.4 หลังจากผสมเป็นจีโอพอลิเมอร์พบว่าอัตราส่วนของ Si/Al เพิ่มขึ้นเป็น 6.0 ซึ่งมีค่าสูงกว่าจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย อัตราส่วน Si/Al ที่สูงทำให้จีโอพอลิเมอร์ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำ (Fletcher et al., 2005) ดังนั้นจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาจึงให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย (อุบลลักษณ์และปริญญา, 2551) ในส่วนของตัวอย่างที่ก่อตัวจากพื้นผิวจีโอพอลิเมอร์พบว่าองค์ประกอบหลักประกอบด้วยซิลิกอนและแมกนีซียม แต่ไม่พบอะลูมิเนียมในส่วนนี้ ซึ่งอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมซิลิเกต

สรุป

จากการศึกษากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาที่ผสมด้วยสัดส่วนต่างๆ พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนดดยน้ำหนักระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ และให้กำลังอัดสูงสุดที่ประมาณ 35 เมกะปาสคาลที่อายุการบ่ม 90 วัน จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของจีโอพอลิเมอร์เพสต์พบว่ามีหมู่ฟังชันที่สำคัญที่ 1,200-900 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ Si-O ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าก้นเตาแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบส่วนเกิดการขยายตัวบริเวณผิวของจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลต่อค่ากำลังอัดที่ลดลง จากการศึกษาองค์ประกอบด้วย SEM-EDX พบว่าส่วนที่ก่อตัวอาจเป็น $Mg(OH)_2$ และสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 73/2551

เอกสารอ้างอิง

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., 31*(2), 371-381.

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

Davidovits, J., (1999). Chemistry of geopolymer system, Terminology. pp 9-39. In Proceeding of Second International Conference Geopolymer '99, France.

Fletcher, R.A., Mackenzie, K.J.D., Nicholson, C.L, and Shimada, S. (2005). The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society, 25*,1471-1477.

Skalny, J., Marchand, J., and Odler, I. (2002). Sulfate attack on concrete, 1st Edition. Spon Press. New York.