

สมบัติเชิงกลของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า ภายใต้การกระทำของโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

วินัย หอมศรีประเสริฐ¹ และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความทนทานของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าภายใต้การกระทำของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) ในด้านกำลังรับแรงอัด หลังจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในน้ำ และบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 180 วัน ผลการทดสอบพบว่าในแง่ของอัตราส่วนโดยน้ำหนัก จีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ที่มากกว่ามีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่ดีกว่า ทั้งที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำ และบ่มที่อุณหภูมิห้อง ส่วนในแง่ของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) ที่น้อยกว่า หรือสัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ที่มีผลรวมโดยน้ำหนักของสารละลายต่างมากกว่าปริมาณเถ้าลอย มีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าทั้งในกรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำ และบ่มอุณหภูมิห้อง

คำสำคัญ : จีโอพอลิเมอร์ / เถ้าลอย / กำลังรับแรงอัด / โซเดียมซัลเฟต / แมกนีเซียมซัลเฟต

* Corresponding Author : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks

Winai Homsriprasert¹ and Burachat Chatveera^{2*}

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Abstract

This research aimed at studying the durability of fly ash-based geopolymer mortar with electric oven curing under sodium sulfate and magnesium sulfate attacks. The study of the influences of Na_2SiO_3 -to- NaOH (NS/NH) ratio by weight and fly ash-to-alkali solution (FA/AS) ratio by weight on the compressive strength involved immersion of a sample for a period of 180 days into 5% by weight solutions of sodium sulfate and magnesium sulfate. Moreover, the study of geopolymer mortar characteristics in water and when incubated at room temperature was performed. The results revealed that the compressive strength of mortar increased at increased Na_2SiO_3 -to- NaOH (NS/NH) ratio by weight when the mortars were immersed in sodium sulfate, magnesium sulfate, water as well as when incubated at room temperature. In addition, the compressive strength of mortar increased with reduced fly ash-to-alkali solution (FA/AS) ratio by weight when the mortars were immersed in sodium sulfate, magnesium sulfate, water as well as when incubated at room temperature.

Keywords : Geopolymer / Fly Ash / Compressive Strength / Sodium Sulfate / Magnesium Sulfate

* Corresponding Author : cburacha@engr.tu.ac.th

¹ Doctoral Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าปัญหาของโครงสร้างคอนกรีตที่พบมากขึ้นเป็นพิเศษ คือ ความทนทานของคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ปั่นป่วนไปด้วยความเป็นกรด และความเป็นซัลเฟต โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเป็นซัลเฟตนั้น มีโทษที่ทันทายให้ทำการศึกษาวิจัยว่าทำอย่างไรที่จะยับยั้งหรือยืดอายุการผุกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตออกไป เพราะโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสความเป็นกรดและความเป็นซัลเฟต ทั้งในน้ำทะเล น้ำกร่อยหรือน้ำใต้ดินนั้นล้วนเป็นสาเหตุทำให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดการผุกร่อนแล้วส่งผลให้เกิดการสูญเสียกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Loss) เกิดการขยายตัว (Expansion) และแตกร้าว (Crack) ในที่สุด

แม้ว่าจะมีความพยายามค้นคว้าวิจัยในการนำวัสดุปอซโซลานมาผสมแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้มีความทนทานมากยิ่งขึ้น แต่วิธีการดังกล่าวยังคงไม่ใช่ทางออกที่ตอบโจทย์ด้านความทนทานไปพร้อมกับความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะสัดส่วนผสมในโครงสร้างคอนกรีตยังคงมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมหลัก [1] ทั้งนี้เนื่องจากในอดีตจวบจนถึงปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้นำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการก่อสร้าง [2,3] ซึ่งได้มาจากกระบวนการเผาสารซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 1,400 – 1,600 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำมาบดให้ละเอียดตามความต้องการ จึงเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก [4] และในกระบวนการผลิตจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เกิดขึ้นมาก [5-9] เพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาซีเมนต์ให้สูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส [5] เพื่อเผาแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากดินขาวหรือหินปูน นั้นต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งขั้นตอนนี้เองที่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยทุก ๆ 1 ตันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตออกมาจากเตาเผาจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศในปริมาณประมาณ 1 ตันเท่ากันด้วย โดยได้มีการสรุปเป็นตัวเลขว่าอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ได้ปล่อย

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมาสู่บรรยากาศอยู่ในสัดส่วนประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาในบรรยากาศทั้งหมด [6-11] ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นี้เองที่เป็นสาเหตุหลักของก๊าซที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) [12-13] และประเทศไทยเองในปัจจุบันมีขีดความสามารถในการผลิตปูนซีเมนต์ทั้งสิ้น 55-56 ล้านตันต่อปี โดยแบ่งเป็นการผลิตตามความต้องการใช้รวมภายในประเทศอยู่ที่ 33 ล้านตัน และมีปริมาณการส่งออกอยู่ที่ 12-13 ล้านตัน [14] จากตัวเลขดังกล่าวนี้หมายความว่าประเทศไทยมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการผลิตปูนซีเมนต์ปีละประมาณ 55 – 56 ล้านตันต่อปี

โดยตัวอย่างของวัสดุปอซโซลานประเภทเถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านเตา เถ้าตะกรัน เถ้าแกลบ เถ้าปาล์ม น้ำมัน เถ้าชานอ้อย เถ้าชีวมวลดินขาวเผา เป็นต้น [15] ยังไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ทั้งหมดเนื่องจากซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในวัสดุดังกล่าวต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่มีสมบัติในการยึดประสาน [16-17]

ดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนาวัสดุยึดประสานชนิดใหม่ที่ใช้วัสดุปอซโซลานที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) โดยไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์เลย แต่ให้มีสมบัติในการยึดประสานเทียบเท่าหรือดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ [15] ซึ่งในปัจจุบันก็ได้มีการพัฒนาวัสดุยึดประสานแนวใหม่ดังกล่าวมาได้แล้ว เรียกว่า วัสดุ “จีโอพอลิเมอร์” (Geopolymer) [18-19]

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ไม่มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) โดยการกระตุ้นด้วยด่าง [20-26] และบ่มด้วยความร้อน [21,27-29] พบว่าสมบัติเด่นของจีโอพอลิเมอร์มีหลายประการ ได้แก่ ค่ากำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น ความสามารถ

การซึมผ่านน้ำต่ำ การหดตัวต่ำ ความคืบต่ำ ทนไฟ ทนทาน ต่อสภาวะการแข็งและการละลายของน้ำสลับกัน ทนทาน ต่อการสัมผัสสารละลายซัลเฟตและการกัดกร่อนของกรด เป็นต้น [21,30-36] ทั้งนี้เนื่องจากจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ซึ่งถูกชะออกมาจากวัสดุโดยสารละลายต่างความเข้มข้นสูงที่พอเหมาะเกิดเป็นกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) และใช้ความร้อนในอุณหภูมิที่สูงพอเหมาะกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้ซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวแบบควบแน่น หรือโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับการเชื่อมกันของโมเลกุลหินที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจึงทำให้จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติเด่นสามารถนำไปใช้ในเป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานคอนกรีตได้ [37-38] แต่โจทย์ที่ทำหายไม่ได้มีแค่เพียงการหาวัสดุพอใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตเป็นจีโอพอลิเมอร์เท่านั้น แต่เรายังคงต้องคิดต่อไปว่าทำอย่างไรสิ่งปลูกสร้างจะมีความคงทนเมื่อสัมผัสกับอากาศ ในน้ำ หรือในดินที่ปนเปื้อนไปด้วยความเป็นกรดและความเป็นซัลเฟต เพื่อรองรับการใช้งานเมื่อโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ต้องไปสัมผัสความเป็นกรดและสารละลายซัลเฟตในสถานการณ์ต่างๆ อย่างไรก็ตามก็ต้องไม่ลืมปัญหาหลักในปัจจุบันนั่นคือ ปัญหาภาวะโลกร้อนตามที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นการผลิตจีโอพอลิเมอร์จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงหลักความยั่งยืน (Sustainable) และความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทั้งในแง่ของการได้มาของแหล่งวัตถุดิบรวมถึงกระบวนการผลิตภายใต้หลักความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ จึงจะถือว่าเรากำลังมาถูกทางในการวิจัยและพัฒนาจีโอพอลิเมอร์เพื่อนำเอามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [15]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวกับความทนทานของจีโอพอลิเมอร์แก่ลอมยังมีปริมาณน้อย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของความทนทานของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แก่ลอมที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) แล้วบ่มร้อนด้วยเตาอบไฟฟ้า จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)

ในน้ำ และบ่มที่อุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาสมบัติด้านความทนทานในแง่ของกำลังรับแรงอัด

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1 วัสดุผงอะลูมิเนียมซิลิเกต (Solid aluminosilicate materials)

วัสดุผงที่ใช้เป็นแหล่งซิลิกาและอะลูมินาในการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้แก่ แก้วลอย (Fly Ash, FA) ซึ่งนำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [39]

2.1.2 มวลรวมละเอียด

ใช้ทรายแม่น้ำละเอียดขนาดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry, S.S.D.) ตามมาตรฐาน ASTM C778 [40]

2.1.3 สารละลายต่าง

สารละลายต่างที่ใช้มี 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, NH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , NS) ซึ่งประกอบด้วย โซเดียมออกไซด์ (Na_2O), ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และน้ำ (H_2O) เท่ากับร้อยละโดยมวล 9.58, 28.75 และ 61.67 ตามลำดับ

2.1.4 น้ำ

สำหรับน้ำที่ใช้ ได้แก่ น้ำกลั่นสำหรับเตรียมสารละลายต่างและเป็นส่วนผสมสำหรับการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งมีค่าระดับ pH ที่เป็นกลาง

2.1.5 สารละลายซัลเฟต

สารละลายซัลเฟตที่ใช้เช่นตัวอย่าง ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือใช้โซเดียมซัลเฟตปริมาณ 50 กรัมละลายน้ำปริมาตร 1 ลิตร และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือใช้แมกนีเซียมซัลเฟตปริมาณ 42.36 กรัมละลายน้ำปริมาตร 1 ลิตร ตามมาตรฐาน ASTM C1012 [41]

2.2 วิธีการวิจัย

2.2.1 การทดสอบสมบัติของเถ้าลอย

ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ศึกษาโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สำหรับสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วยความต้องการน้ำ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และดัชนีกำลัง ส่วนโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย ทำการศึกษาภาพถ่ายขยายโดยวิธีเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) การกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยโดยการวิเคราะห์ Particle Size Distribution (PSD) และการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคเถ้าลอยโดยวิธีเทคนิค X-Ray

Diffraction (XRD) analysis

2.2.2 การผสมและหล่อตัวอย่าง

ผสมเถ้าลอยและสารละลาย NaOH ให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวในหม้อผสม จากนั้นเททรายลงไปแล้วตามด้วยสารละลาย Na_2SiO_3 จากนั้นเติมน้ำเพิ่มเติม (Extra Water) ลงไปเพื่อให้มีค่าร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109 (ร้อยละ 110 ± 5) [42] แล้วเทจีโอพอลิเมอร์-มอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร สุดท้ายปิดผิวหน้าตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำระหว่างการทำปฏิกิริยา สำหรับสัดส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย

Samples	Ratio by weight				Weight (g)				
	FA/AS	NS/NH	Fly Ash	Sand	Alkaline Solution	Na_2SiO_3	NaOH	*Extra Water	Flow
1) 2.0FA0.5+3%	2.0	0.5	300	600	150	50	100	14	112
2) 2.0FA1.0+5%	2.0	1.0	300	600	150	75	75	23	110
3) 2.5FA0.5+8%	2.5	0.5	300	600	120	40	80	34	113

หมายเหตุ : 1) น้ำหนักของส่วนผสมที่แสดงในตารางใช้ในการเตรียมตัวอย่าง 1 หม้อผสม

2) สัญลักษณ์ของชุดตัวอย่างสามารถอธิบายได้ ดังนี้

- FA หมายถึง จีโอพอลิเมอร์เถ้าลอย (Fly Ash)
- ตัวเลข xx หน้า FA หมายถึง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS)
- ตัวเลข xx หลัง FA หมายถึง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH (NS/NH)
- ตัวเลข xx หลังเครื่องหมายบวก (+) หมายถึง ร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณน้ำพิเศษที่ทำให้ตัวอย่างมีค่าการ

ไหลแผ่ ตามมาตรฐาน ASTM C 109

- เช่น ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3% หมายถึง ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ FA/AS เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ NS/NH เท่ากับ 0.5 และมีปริมาณน้ำพิเศษ เท่ากับ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์เพสต์ (เถ้าลอย + Na_2SiO_3 + NaOH)

2.2.3 สภาวะการบ่ม

เมื่อทำการหล่อตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เสร็จแล้ว นำตัวอย่างไปบ่ม 2 วิธี ได้แก่ บ่มที่อุณหภูมิห้องและบ่มในเตาอบไฟฟ้า โดยที่อุณหภูมิห้องนั้นตัวอย่างอยู่ในแบบหล่อ และปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกทิ้งไว้ที่

อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นนำตัวอย่างเข้าบ่มในเตาอบไฟฟ้า ประกอบด้วย ส่วนผสม 2.0FA0.5 บ่มที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนผสม 2.0FA1.0 บ่มที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและส่วนผสม 2.5FA0.5 บ่มที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2.4 สภาวะการบ่มแช่

หลังจากนำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ออกจากเตาอบไฟฟ้าแล้วนำชุดตัวอย่างไปบ่มแช่ใน 4 สภาวะ ได้แก่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต แมกนีเซียมซิลเฟต ในน้ำ และที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 180 วัน

3. ผลการวิจัย

3.1 สมบัติเบื้องต้นของแก้วลอย

3.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	แก้วลอย	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	36.44	20.66
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	20.48	5.38
ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	15.76	3.32
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	16.35	65.20
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	3.55	1.39
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	2.25	0.38
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.98	0.07
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	3.35	2.24
ไททานเนียมออกไซด์ (TiO ₂)	0.37	0.25
ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	1.24	0.50

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของแก้วลอยที่ใช้กับแก้วลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

องค์ประกอบทางเคมี	*แก้วลอย	**ประเภทของแก้วลอย	
		F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃), ร้อยละต่ำสุด	72.68	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃), ร้อยละสูงสุด	3.35	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, ร้อยละสูงสุด	0.06	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI), ร้อยละสูงสุด	0.59	6.0	6.0
อัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์เทียบเท่า (Na ₂ O), ร้อยละสูงสุด	0.98	1.5	1.5

หมายเหตุ : 1) สัญลักษณ์ (*) หมายถึง แก้วลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2) สัญลักษณ์ (**) หมายถึง ประเภทของแก้วลอย ตามมาตรฐาน ASTM C618

3.1.2 สมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเถ้า-ลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4 จะเห็นว่า เถ้าลอย มีค่าความต้องการน้ำ

ความถ่วงจำเพาะ และพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวจะพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีความละเอียดมากกว่าเถ้าลอย

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สมบัติทางกายภาพ	เถ้าลอย	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (ร้อยละ)	0.59	1.50
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.06	0.19
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ซม ² /ก)	2135	3375
ความถ่วงจำเพาะ	2.25	3.15
ความละเอียดขนาดของอนุภาค (ร้อยละผ่าน, ไมโครเมตร)		
75 ไมโครเมตร	24.4	5.2
45 ไมโครเมตร	38.6	3.6
36 ไมโครเมตร	44.6	90.6
ดัชนีการพัฒนากำลัง (ร้อยละ)		
ที่อายุ 7 วัน	80.7	100
ที่อายุ 28 วัน	90.8	100
ปริมาณน้ำที่ต้องการ (ร้อยละ)	95.8	100
ค่าความหนาแน่น (Bulk Density, kg/m ³)	958	1000

3.1.3 โครงสร้างทางจุลภาค

1. ลักษณะของอนุภาคโดยวิธีเทคนิค

Scanning Electron Microscopy (SEM)

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ภาพถ่ายขยายของเถ้าลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ผลการทดสอบพบว่าอนุภาคของตัวอย่างเถ้าลอยมีลักษณะรูปทรงกลมและมีขนาดเล็กใหญ่ปะปนกัน

2. ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยโดยการวัด Particle Size Distribution (PSD)

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์พบว่าขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 14.71 ไมโครเมตร

3. การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาค

เถ้าลอยโดยวิธีเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) analysis

จากผลการทดสอบพบว่าองค์ประกอบธาตุที่พบมากที่สุดคือ แคลเซียมซัลเฟต หรือ Anhydrite (CaSO₄) ซึ่งผลึกจะมีลักษณะเป็นแบบ Orthorhombic รองลงมา คือ ซิลิกาออกไซด์ หรือ Quartz alpha (SiO₂) โดยผลึกมีลักษณะเป็นแบบ Hexagonal ถัดมา คือ Iron Silicon Oxide (Fe₂O₃) โดยผลึกมีลักษณะเป็นแบบ Cubic และสุดท้ายคือ Mullite (Al₆Si₂O₁₃) โดยผลึกจะมีลักษณะเป็นแบบ Orthorhombic

3.1.4 สมบัติความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตที่มีต่อกำลังรับแรงอัด

3.1.4.1 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH)

จากผลการทดสอบ เมื่อพิจารณาที่ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแฉะลยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) ที่เท่ากัน คือส่วนผสมของ 2.0FA0.5 และ 2.0FA1.0 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แฉะลยของส่วนผสม 2.0FA1.0 มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าส่วนผสม 2.0FA0.5 ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำ และที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้ นอกจากสภาวะการบ่มแล้วเมื่อพิจารณาถึงปริมาณโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าส่วนผสมของ 2.0FA1.0 มีปริมาณโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เท่ากับกับส่วนผสมของ 2.0FA0.5 แต่ส่วนผสมของ 2.0FA1.0 มีปริมาณโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่า และมีปริมาณโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตมากกว่าของส่วนผสม 2.0FA0.5 นั่นคือ จีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ที่มากกว่าเมื่อบ่มแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำและที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 180 วัน จะพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำและที่อุณหภูมิห้องตามลำดับ และจากหลักการที่ว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากแฉะลยจะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อการเกิดเจลละลุมิโนซิลิเกตที่มีละลุมินาอยู่ในปริมาณที่สูงซึ่งจะเกิดในระยะแรกของการกระตุ้นอนุภาคแฉะลยด้วยต่างและจะเพิ่มต่อไปเนื่องจากในแฉะลยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ [43] และเมื่อผิวของจีโอพอลิเมอร์ยังคงไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากหน่วยแรงและเป็นรอยแตกแยกในแนวตั้งของตัวอย่างจึงทำให้การกระจายของไอออนต่างยังไม่เกิดขึ้นในเนื้อจีโอพอลิเมอร์ [44] การเพิ่มขึ้นของการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ของส่วนผสม 2.0FA1.0 ซึ่งมีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก

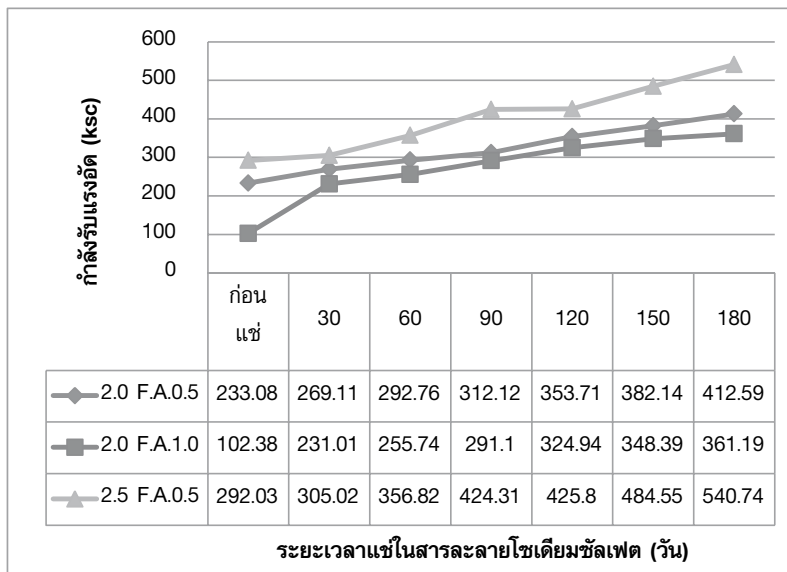
ของสารละลายโซเดียม ซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) มากกว่าส่วนผสมของ 2.0FA0.5 และ 2.5FA0.5 ยังคงพัฒนาต่อไปตลอดช่วงระยะเวลา 30,60,90,120,150 และ 180 วัน ที่บ่มแช่ ดังแสดงในรูปที่ 1 ถึง 8

3.1.4.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแฉะลยต่อสารละลายต่าง (FA/AS)

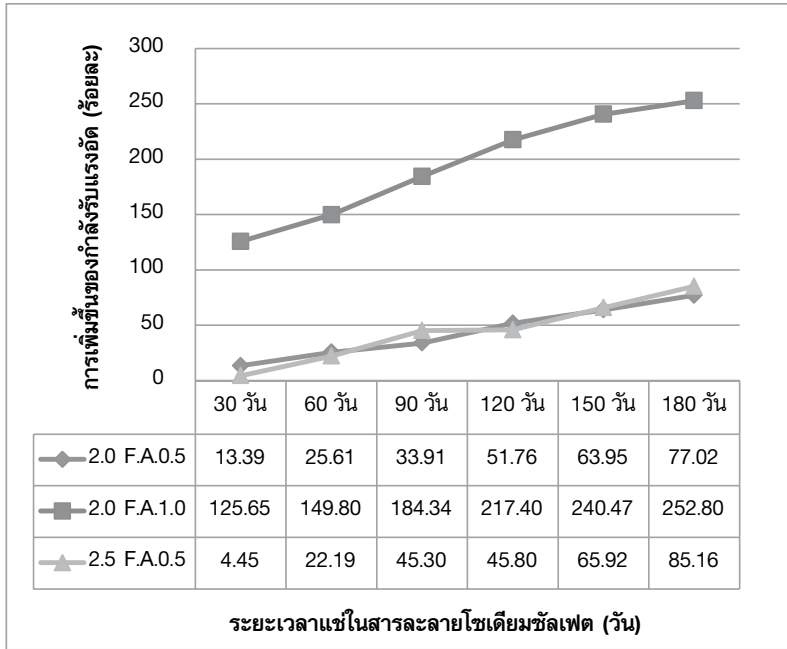
จากผลการทดสอบ เมื่อพิจารณาที่ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ที่เท่ากัน คือส่วนผสมของ 2.0FA0.5 และส่วนผสม 2.5FA0.5 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์แฉะลยของส่วนผสม 2.0FA0.5 มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกับส่วนผสม 2.5FA0.5 ทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตและที่อุณหภูมิห้อง ยกเว้นที่บ่มแช่ในน้ำที่ส่วนผสม 2.0FA0.5 มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าส่วนผสม 2.5FA0.5 ทั้งนี้ นอกจากสภาวะการบ่มและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) แล้วเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแฉะลยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) พบว่าส่วนผสม 2.0FA0.5 มีปริมาณโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่าของส่วนผสม 2.5FA0.5 นั่นคือ จีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแฉะลยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) ที่น้อยกว่าหรือความหมายเดียวกับผลรวมโดยน้ำหนักของสารละลายต่างมากกว่า จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำ และที่อุณหภูมิห้องตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดยังคงมีพัฒนาการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและจากผิวของจีโอพอลิเมอร์ยังคงไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากหน่วยแรงและเป็นรอยแตกแยกในแนวตั้งของตัวอย่างจึงทำให้การกระจายของไอออนต่างยังไม่เกิดขึ้นในเนื้อจีโอพอลิเมอร์ [44] ตลอดช่วงระยะเวลา 30,60,90,120,150 และ 180 วัน ที่บ่มแช่ ดังแสดงในรูปที่ 1 ถึง 8 ซึ่งการที่จีโอพอลิเมอร์มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแฉะลยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) ที่น้อยกว่าหรือความหมายเดียวกับผลรวม

โดยน้ำหนักของสารละลายต่างมากกว่าซึ่งสอดคล้องกับหลักการของสารละลายต่างที่ใช้กระตุ้นการเกิดจีโอพอลิเมอร์ที่ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เพราะกระบวนการเกิดจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะต่างของซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะออกมาจากวัสดุแหล่งกำเนิดโดยสารละลายไฮดรอกไซด์จะทำหน้าที่ช่วยชะซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ออกจากวัสดุส่วนสารละลาย ซิลิเกตเป็นตัวช่วยเติมซิลิกาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพื่อปรับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาให้เหมาะสมในการเกิดจีโอพอลิเมอร์ [45-46] และความสามารถในการชะและ

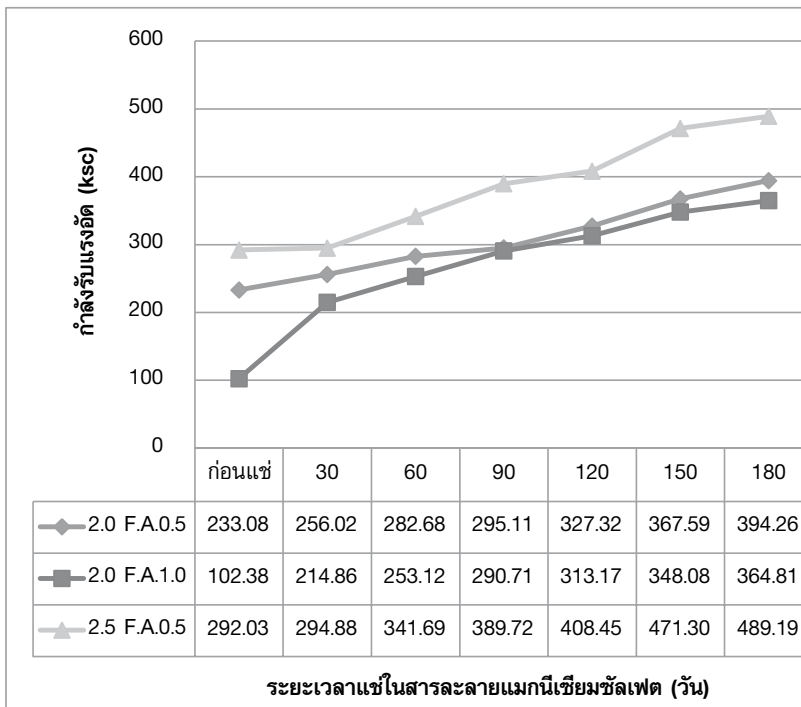
ละลายนี้ทำให้อะตอมของซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ที่ผิววัสดุแหล่งกำเนิดละลายออกมาโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) ของต่างเกิดเป็นอะลูมิเนต (AlO_2^-) และซิลิเกต (SiO_3^{2-}) ในสารละลายแล้วไอออนของสารริเริ่ม (Precursor) รวมตัวกันเกิดเป็นเจลโมโนเมอร์ (Monomer) และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีปัจจัยหลายประการที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ ชนิดของวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตชนิดและความเข้มข้นของสารละลายต่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุผงต่อสารละลายต่างอุณหภูมิ และระยะเวลาบ่ม [47-48]



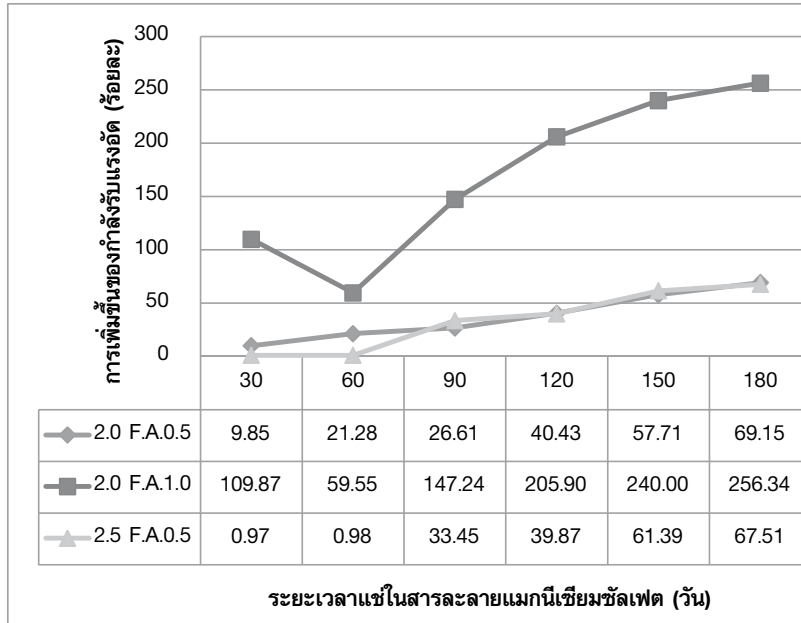
รูปที่ 1 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ลอบบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าแล้วแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต



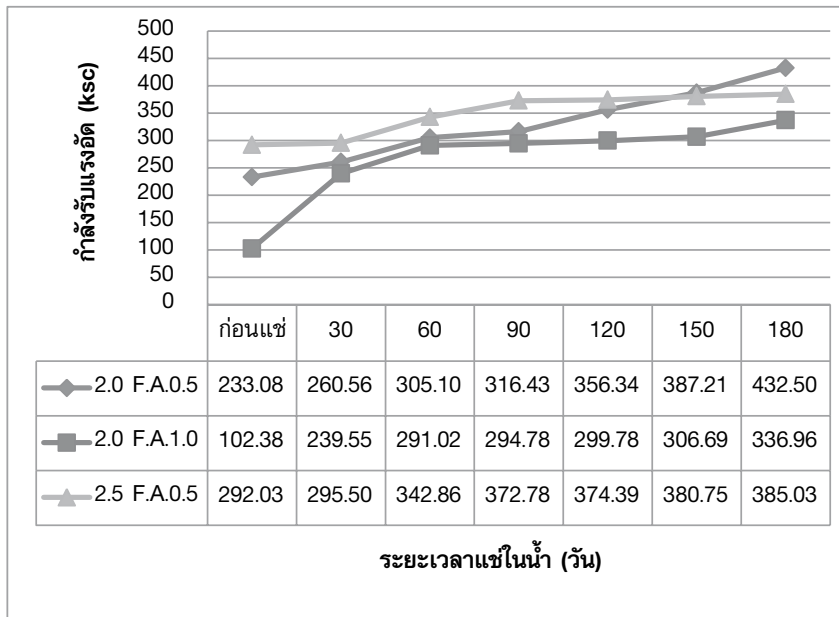
รูปที่ 2 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด (ร้อยละ) ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าลวยบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าแล้วแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



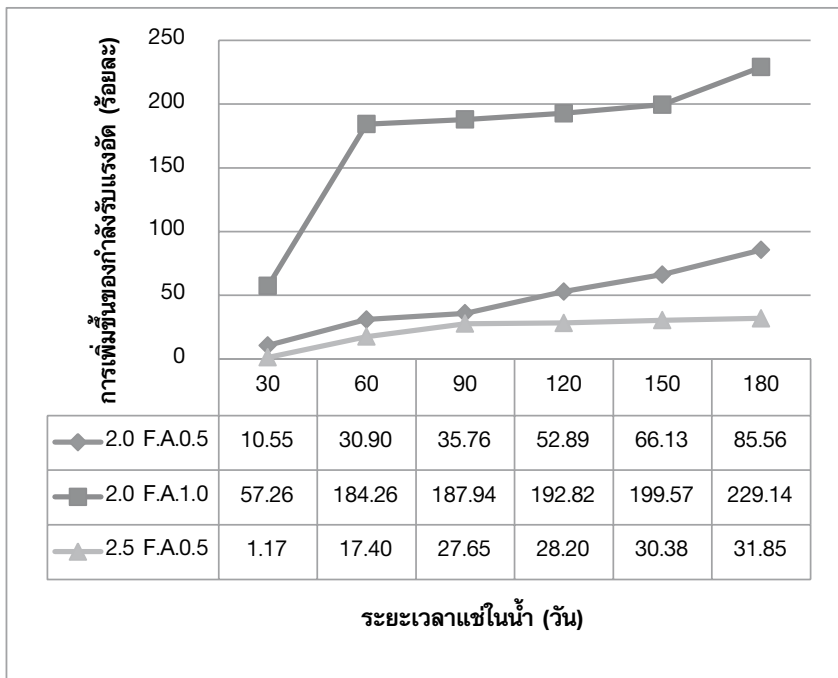
รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ด้าลวยบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าแล้วแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



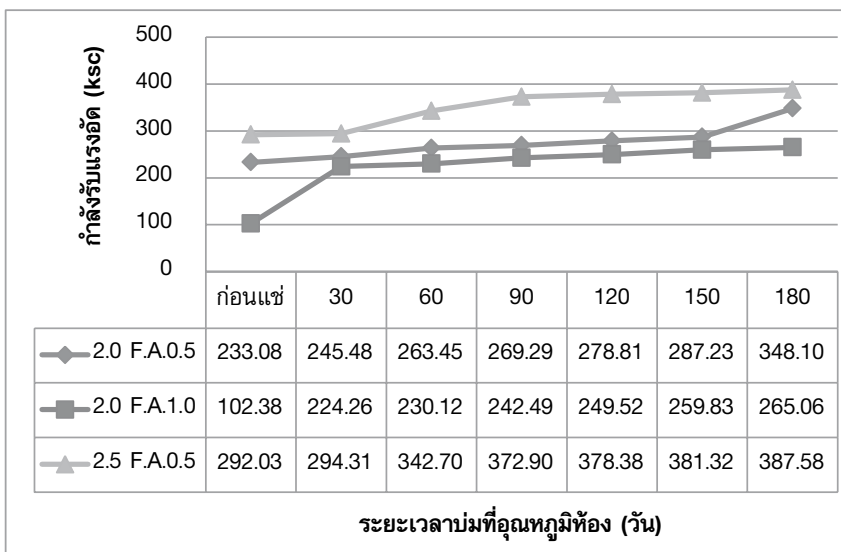
รูปที่ 4 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด (ร้อยละ) ของจีโอฟอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ลอบบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าแล้วแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



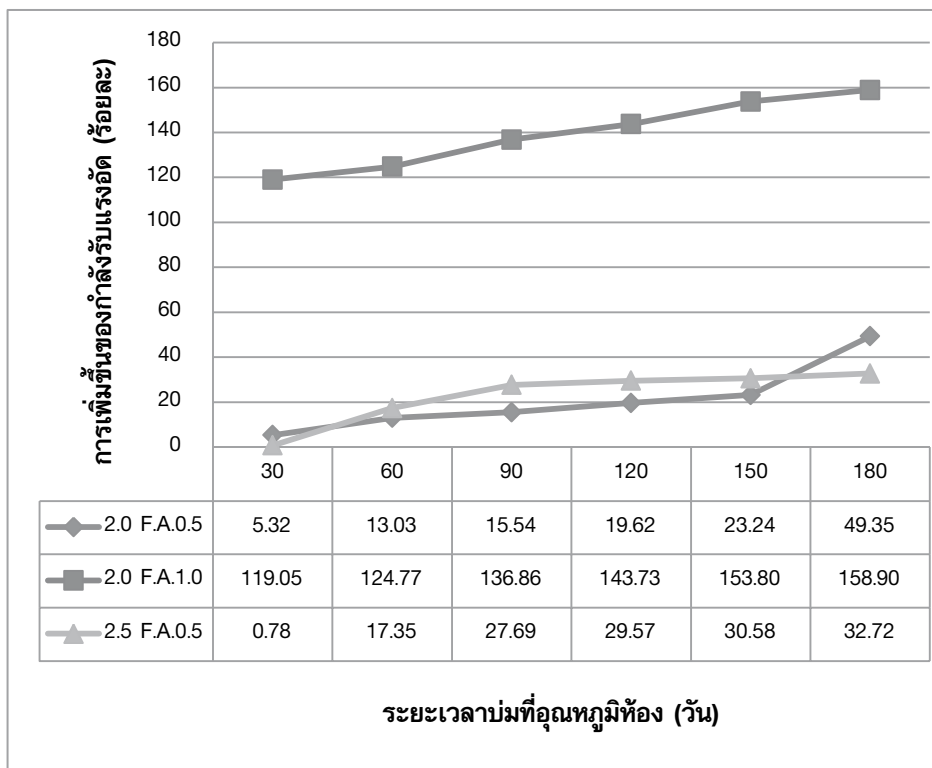
รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของจีโอฟอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ลอบบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าแล้วแช่ในน้ำ



รูปที่ 6 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด (ร้อยละ) ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ลดย บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าแล้วแช่น้ำ



รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ได้ลดย บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า แล้วบ่มที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 8 การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัด (ร้อยละ) ของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าแล้วบ่มที่อุณหภูมิห้อง

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อพิจารณาในแง่ของอัตราส่วนโดยน้ำหนักพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ที่มากกว่าจะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำและที่อุณหภูมิห้อง

2. จีโอพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) ที่น้อยกว่าหรือความหมายเดียวกับว่าสัดส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ที่มีผลรวมโดยน้ำหนักของสารละลายต่างมากกว่าปริมาณเถ้าลอยจะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ดีกว่าทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในน้ำและที่อุณหภูมิห้อง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณสิริภร จูฑารีย์ ผู้ช่วยปฏิบัติการวิจัยและจัดเตรียมข้อมูล

6. เอกสารอ้างอิง

1. Homsriprasert, W., 2013, Durability of Fly Ash-based Geopolymer Mortar with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks, A Thesis for the Degree of Master in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, pp. 1-2.

2. Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V. and Zhang, L., 2012, "Production of Geopolymeric Binder from Blended Waste Concrete Powder and Fly Ash," *Construction and Building Materials (CONSTR*

BUILD MATER), 35, pp. 718 – 729.

3. Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M. and Bolio, H., 2011, “Sustainable Cement Production-Present and Future,” *Cement and Concrete Research*, 41 (7), pp. 642-650.

4. Rajamane, N.P., Nataraja, M.C. and Lakshmanan, N., 2011, “An Introduction to Geopolymer Concrete,” *Journal of Indian Concrete*, pp. 25-28.

5. Gartner, E., 2004, “Industrially Interesting Approaches to Low – CO₂,” *Cement and Concrete Research*, 34 (9), pp. 1489-1498.

6. Huntzinger, D. and Eatmon, T., 2009, “A Life-cycle Assessment of Cement Manufacturing : Comparing Traditional Process with Alternative Technologies,” *Journal of Clean Product*, 17 (7), pp. 668-675.

7. Meyer, C., 2009, “The Greening of the Concrete Industry,” *Cement and Concrete Composites*, 31 (8), pp. 601-615.

8. Malhotra, V., 2002, “Introduction Sustainable Development and Concrete Technology,” *ACI Concrete International*, 24 (7), p. 22.

9. Mccaffery, R., 2002, Climate Change and the Cement Industry,” *GCL Magazine*, Environmental Special Issue, pp. 15-19.

10. Shi, X., Collins, F., Zhao, X. and Wang, Q., 2012, “Mechanical Properties and Microstructure Analysis of Fly Ash Geopolymeric Recycled Concrete,” *Journal of Hazard Mater*, 237, pp. 20-29.

11. Mehta, P., Zachar, J., Claisse, P., Naik, T. and Ganjian, E.(Eds.), 2010, “Sustainable Cements and Concrete for the Climate Change era – a review,” *Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, June 28 - June 30, 2010, Università Politecnica della Marche, Ancona Italy, pp. 1- 10.

12. Davidovits, J., 1999, “Chemistry of Geo-

polymeric Systems,” *Terminology in International Conference Geopolymer Saint-Quentin France*, pp. 1-124.

13. Malhotra, V. and Mehta, P., 2005, “High-performance, High-volume Fly Ash Concrete Materials Mixture, Proportioning Properties Construction Practice and Case Histories 2nd,” *Ottawa Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Incorporated*, pp. 1-124.

14. Thansettakij Newspaper, 2013, Year 33, Issues 2884, Date 3 – 5 October.

15. Homsriprasert, W., 2015, Mechanical Properties and Durability of Fly Ash-based Geopolymer Concrete with Electric Oven Curing under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attacks, A Thesis for the Doctoral of Philosophy Program in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, pp. 1-32.

16. Elahi, A., Khan, Q., Barbhuiya, S., Basheer, P. and Russell, M., 2012, “Hydration Characteristics of Cement Paste Containing Supplementary Cementitious Materials,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37, pp. 535- 544.

17. Aly, M., Hashmi, M., Olabi, A., Messeiry, M, Abadir, E. and Hussain, A., et al., 2012, “Effect of Colloidal Nano-silica on the Mechanical and Physical Behavior of Waste-glass Cement Mortar”, *Materials and Design*, 33, pp. 127-135.

18. Glukhovskiy, V., 1959, Soil silicates (Grun-tosilikaty), *USSR Kiev Budivelnik Publisher*.

19. Davidovits, J., 2008, Geopolymer Chemistry and Application, *Institute Geopolymer*.

20. Davidovits, J., 1991, “Geopolymer/organic Polymer New Materials,” *Journal of Thermal Analysis*, 37 (8), pp. 1633-1656.

21. Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D. and Rangan, B., 2004, “On the Development of Fly

Ash-based Geopolymer Concrete,” *Journal of ACI Mater*, 101, pp. 467-472.

22. Fernandez-Jimenez, A. and Palomo, A., 2006, “Engineering Properties of Alkali-activated Fly Ash Concrete,” *Journal of ACI Mater*, 103 (2), pp. 106-112.

23. Davidovits, J., 1994, “High-Alkali Cements for 21st Century Concrete,” *Journal of ACI Special Publication SP*, pp. 383-398.

24. Bakharev, T., Sanjayan, J. and Cheng, Y., 1999, “Alkali activation of Australian Slag cements,” *Cement and Concrete Research*, 29 (1), pp. 113-120.

25. Nath, P. and Sarker, P., 2012, “Geopolymer Concrete for Ambient Curing Condition,” *Proceedings of the Australian structural engineering conference*, Perth Australia.

26. Rangan, B., 2006, “Studies on Low-calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete,” *Journal of Indian Concrete*, 80, pp. 9-17.

27. Bakharev, T., 2005, “Geopolymer Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing,” *Cement and Concrete Research*, 35 (6), pp.1224-1232.

28. Provis, J., Herrex, R., Bernal, S., Duxson, P. and Van Deventer, J., 2012, “Dilatometry of Geopolymers as a Means of Selecting Desirable Fly Ash Sources,” *Journal of Non-Cryst Solids*, 358 (16), pp. 1930-1937.

29. Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Criado, M., 2006, “Alkali Activated Fly Ash Binders A Comparative Study between Sodium and Potassium Activators,” *Materiales de Construction*, 56 (281), pp. 51-65.

30. Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D. and Rangan, B., 2004, “Brief Review Development of Geopolymer Concrete,” *George Hoff Symposium American Concrete Institute, Las Vegas*.

31. Smajouw, D., Hardjito, D., Wallah, S. and Rangan, B., 2007, “Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Study of Slender Reinforced Columns,” *Journal of Materials Science*, 42(9), pp. 3124-3130.

32. Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Lopez-Hombrados, C., 2006, “Engineering Properties of Alkali-activated Fly Ash Concrete,” *Journal of ACI Mater*, 103 (2), pp. 106-112.

33. Diaz-Loya, E., Allouche, E. and Vaidya, S., 2011, “Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete,” *Journal of ACI Mater*, 108 (3), pp. 300-306.

34. Swanepoel, J. and Strydom, C., 2002, “Utilisation Fly Ash in a Geopolymeric Material,” *Applied Geochemistry*, 17 (8), pp. 1143-1148.

35. Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J., Lukey, G., Palomo, A. and Van Deventer, J., 2007, “Geopolymer Technology the Current State of the Art,” *Journal of Materials Science*, pp. 2917-2933.

36. Sofi, M., Van Deventer, J. and Mendis, P., 2007, “Engineering properties of ionorganic polymer concretes”, *Cement and Concrete Research*, 37 (2), pp. 251-257.

37. Davidovits, J., 1994, “High-Alkali Cements for 21st Century Concretes,” *The V. Mohan Malhotra Symposium on Concrete Technology : Past, Present and Future*, University of California, Berkeley.

38. Davidovits, J., 1994, “Properties of Geopolymer Cements,” *In Kiev (Eds.) Proceedings of The First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials*, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, pp. 131-149.

39. American Society for Testing Materials, 2009, “ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” *Annual Book of ASTM Standard*,

Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

40. American Society for Testing Materials, 2009, "ASTM C778 Standard Specification for Standard Sand," *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction*, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

41. American Society for Testing Materials, 2009, "ASTM C1012 / C1012M - 13, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution," *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction*, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

42. American Society for Testing Materials, 2009, "ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction*, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

43. Ikeda, K., 1998, "Consolidation of Mineral Powders by The Geopolymer Binder Technique for Material Use," *Journal of Mining and Materials*

Processing Institute of Japan, 114, pp. 497-500.

44. Davidovits, J., 1991, "Geopolymer: Inorganics Polymeric New Materials," *Journal of Thermal Analysis*, 37 (8), pp. 1633-1656.

45. Provis, J. and Van Deventer, J., 2007, "Geopolymerisation Kinetics2 : Reaction Kinetic Modelling," *Chemical Engineering Science*, 62, pp. 2318-2329.

46. Homsriprasert, W. and Chatveera, B., 2015, "Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Mortar Cured with Electric Oven," *KMUTT Research and Development Journal*, 31 (2), pp. 3-18. (In Thai)

47. Khaliland, M. and Merz, E., 1994, "Immobilisation of Intermediate-level Waste in Geopolymers," *Journal of Nuclear Materials*, 211 (2), pp. 141-148.

48. Rattanasak, U., Chalee, W. and Chindaprasert, P., 2006, "Study of Leaching of Lignite Fly Ash and Strength of Fly Ash Based-Geopolymer," *KMUTT Research and Development Journal*, 29 (4), pp. 437-446. (In Thai)