



การประเมินผลกระทบของอัตราส่วนกากผงเหล็กในจีโอโพลิเมอร์ และอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มร้อน

Impact Assessment of Waste Iron Powder Contents of Geopolymer and Temperatures of Heat Curing

ณัฐกร ชนะวัฒน์ และ ตูณ นองเนื่อง*

Nattakorn Chanawat and Toon Nongnuang*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

E-mail: nattakorn_chanawat@cmu.ac.th, toon_n@cmu.ac.th* Tel.: 091-857-0201

บทคัดย่อ

การประเมินผลกระทบของอัตราส่วนกากผงเหล็กในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะและอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มร้อน ซึ่งควบคุมสารละลายต่างโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 8 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต (SS/SH) เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนัก (L/B) เท่ากับ 0.45 ในงานวิจัยกำหนดตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยเป็นเป็นตัวอย่างควบคุม (Controlled geopolymer, CGP) โดยเปรียบเทียบกับ การประเมินผลของจีโอโพลิเมอร์ผสมกากผงเหล็กที่อัตราส่วนกากผงเหล็กร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักเถ้าลอยบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และในส่วนของประเมินอิทธิพลของอุณหภูมิที่อัตราส่วนกากผงเหล็ก ร้อยละ 20 โดยนำไปบ่มร้อนที่ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วพิจารณาผลของอัตราส่วนกากผงเหล็กและอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ ระยะเวลาก่อตัว ความหนาแน่นรวม และสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัด ของตัวอย่างอายุ 3, 7 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาก่อตัวจะลดลงเมื่อ อัตราส่วนกากผงเหล็กเพิ่มขึ้น ในส่วนของความหนาแน่นรวมของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมกากผงเหล็กพบว่า ความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของกากผงเหล็ก ซึ่งตัวอย่างที่มีความหนาแน่นรวมที่สูงขึ้นส่งผลทำให้มีกำลังมากกว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นรวมน้อย ทั้งนี้เมื่อเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ควบคุม พบว่ากำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง ในขณะที่กำลังรับแรงดัดมีค่าสูงขึ้น กำลังของจีโอโพลิเมอร์จะลดลงตามอายุของจีโอโพลิเมอร์มากขึ้น และอุณหภูมิบ่มที่สูงขึ้น จากการศึกษาอุณหภูมิ บ่มร้อนที่เหมาะสมต่อจีโอโพลิเมอร์ในการศึกษา คือช่วง 50-60 องศาเซลเซียส การพัฒนากำลังรับแรงอัดและแรงดัดมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการบ่ม จนถึงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกำลังของจีโอโพลิเมอร์ผสมกากผงเหล็กให้ค่าสูงสุด เมื่ออุณหภูมิ มากกว่าช่วงที่เหมาะสม กำลังรับแรงอัดและแรงดัดมีแนวโน้มลดลง

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์; กากผงเหล็ก; เถ้าลอย; กำลังรับแรงอัด; กำลังรับแรงดัด

ABSTRACT

Evaluation of the effect of iron powder residue ratio on fly ash geopolymers and the influence of hot curing temperature. The alkali solution was controlled using a sodium hydroxide solution concentration of 8 molars, the ratio of sodium hydroxide to sodium silicate solution. (SS/SH) was 1.0, liquid to binder ratio by weight (L/B) was 0.45. Controlled geopolymer (CGP) was determined in the study of fly ash geopolymers. Compared with the evaluation of waste iron powder geopolymers at 5%, 10%, 15%, and 20% wt. fly ash ratios. Hot curing at 60°C for 24 h and temperature influence assessment at 20% waste iron powder ratio by hot curing at 30, 40, 50, and 60°C for 24 h. Waste iron powder residue ratio and temperature influence physical properties including time of setting and bulk density, mechanical properties including compressive strength, and flexural strength of samples aged 3, 7, and 28 days. The setting time decreases as the waste iron powder ratio increases. As for the bulk density of the geopolymer samples mixed with waste iron powder, it was found that the bulk density increased with the ratio of iron powder residue. The higher the density of the sample, the more strength than the less dense sample. Compared to the control geopolymer samples, it was found that the compressive strength was reduced. while the flexural strength is higher. The geopolymer power decreases with more geopolymer age and higher curing temperatures. According to the study, the optimum heat curing temperature for geopolymers in the study was in the range of 50-60 °C. The development of compressive strength and flexural strength tended to increase with the curing temperature. Up to the optimum temperature range, the strength of the iron powder slag geopolymer reaches its maximum value, when the temperature is above the appropriate range, the compressive strength and flexural strength tend to decrease.

Keywords: Geopolymer; Waste Iron Powder; Fly Ash; Compressive Strength; Flexural Strength

1. บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ปฏิเสธไม่ได้เลยว่าวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนนั้น คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการเชื่อมประสานของคอนกรีต ซึ่งได้มาจากทรัพยากรธรรมชาติ เช่น หินปูน และดินเหนียว เป็นต้น ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เริ่มตั้งแต่การระเบิดภูเขา หินปูน การย่อย การลำเลียง การเผา (Clinker) ที่อุณหภูมิสูง และการบดให้ละเอียด ตลอดทั้งกระบวนการใช้พลังงานที่สูงมาก ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกสู่ชั้นบรรยากาศ เกิดเป็นสภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้น เมื่อคำนึงถึงผลกระทบดังกล่าวแล้ว การผลิตปูนซีเมนต์เพื่อนำไปเป็นวัสดุประสาน

ในคอนกรีตจึงไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จึงมีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุทางเลือกที่มีชื่อว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) มาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน (Geopolymerization reaction) ของสารละลายอัลคาไล (Alkali activator) ที่มีความเข้มข้นสูง และออกไซด์ของซิลิกอน และอะลูมิเนียม กลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง สามารถก่อตัว และแข็งตัวได้อย่างรวดเร็ว มีกำลังรับแรงอัดที่ดีคล้ายกับโครงสร้างที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุตั้งต้นที่ใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์ คือ วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นอะลูมินา (Alumina) และซิลิกา (Silica) นอกจากนี้ยังมี

แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) ที่มีส่วนช่วยในการก่อตัวที่อุณหภูมิห้องเมื่อมีปริมาณมากพอ โดยสารตั้งต้นนี้เป็นผลพลอยได้ (By-product) จากอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าถ่านหิน จากการศึกษพบว่าในแต่ละวันโรงไฟฟ้าแม่เมาะผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ มีผลพลอยได้เป็นเถ้าลอยประมาณ 6,000 ตันต่อวัน ซึ่งเกินขีดจำกัดการขนถ่าย [1] จึงมีแนวคิดในการนำวัสดุมาวิจัยและพัฒนาเพื่อลดปัญหาการก่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เหตุผลที่วัสดุปอซโซลานได้รับความนิยมให้นำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุซีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากมีความเป็นอสัณฐานสูงส่งผลให้มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว [3] ให้คุณสมบัติด้านกำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้นจากการบ่มด้วยความร้อน [4] สามารถก่อตัว มีความเสถียร รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยในกระบวนการผลิตซีโอโพลิเมอร์มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และใช้พลังงานน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [5] แต่การที่วัสดุซีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) จะมีความสามารถดังที่กล่าวมานั้น อุณหภูมิการบ่มร้อนถือเป็นปัจจัยสำคัญในการกระตุ้นปฏิกิริยาซีโอโพลิเมอร์ให้เกิดขึ้น จากงานวิจัยพบว่าอุณหภูมิในการบ่มร้อนแปรผันตรงกับกำลังรับแรงอัด กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิในการบ่มร้อนเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มสูงขึ้นตาม [4] ซึ่งส่งผลต่อวัสดุซีโอโพลิเมอร์ ในกรณีที่สามารทำความร้อนให้ถึงจุดที่เหมาะสมและสามารถกระจายความร้อนได้ดีทั่ววัสดุภายในเวลาที่จำกัด

อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบเจอในการนำเอาซีโอโพลิเมอร์มาใช้งานด้านวิศวกรรมโยธานั้นก็คือ การบ่มร้อนของซีโอโพลิเมอร์ ซึ่งมีหลายงานวิจัยยืนยันว่าความร้อนในการบ่มมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด ดังเช่นการศึกษาถึงเรื่องผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มซีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยมอร์ตาร์ [6] โดยใช้อุณหภูมิที่ 80, 100 และ 120 องศาเซลเซียสและระยะเวลาการบ่มร้อน 4, 6 และ 20 ชั่วโมง จากการวิจัยพบว่า กำลังรับแรงอัดของซีโอโพลิเมอร์สูงที่สุด เมื่อบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชั่วโมง วัสดุซีโอโพลิเมอร์พบว่าการใช้งานจริงของซีโอโพลิเมอร์นั้นไม่สามารถจัดเตรียมอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อทำการบ่มร้อนได้ หรือการศึกษาของ Bakria และคณะ

ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการบ่มต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย โดยควบคุมอุณหภูมิในการบ่ม (curing temperature) ที่อุณหภูมิห้อง 50°C, 60°C, 70°C และ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตาม และอุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมคือ 60°C แต่หากเกิน 60°C จะทำให้กำลังลดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียความชื้น จึงทำให้ความชื้นไม่เพียงพอต่อการพัฒนากำลังของซีโอโพลิเมอร์ ซึ่งผลของอุณหภูมิการบ่มที่สูงเกินไป สอดคล้องกับส่วนหนึ่งในการศึกษาด้านอิทธิพลของอุณหภูมิ [7] ที่ได้ระบุว่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้น แต่เมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูงเกินไปส่งผลให้ความชื้นในตัวอย่างระเหยออกไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

ขณะเดียวกัน ผงเหล็กเหลือทิ้ง (Waste Iron Powder, WIP) จากกิจกรรมภายในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การขึ้นรูป การตัดแต่งผิวโลหะ มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นควบคู่กับการเติบโตของอุตสาหกรรมในปัจจุบัน [2]

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้เกิดแนวคิดในการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับซีโอโพลิเมอร์ โดยการนำกากผงเหล็กเหลือทิ้งจากโรงงาน (Waste Iron Powder, WIP) มาประยุกต์ใช้กับเถ้าลอย (Fly Ash, FA) โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ (Physical Properties) ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว (Setting time) และความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ได้แก่ กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) และกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดให้กากผงเหล็กเป็นมวลรวม (Aggregate) ในตัวอย่างซีโอโพลิเมอร์ โดยประเมินผลกระทบจากอุณหภูมิในการบ่มร้อนและผลกระทบจากอัตราส่วนของกากผงเหล็ก

2. วัสดุและการทดสอบ

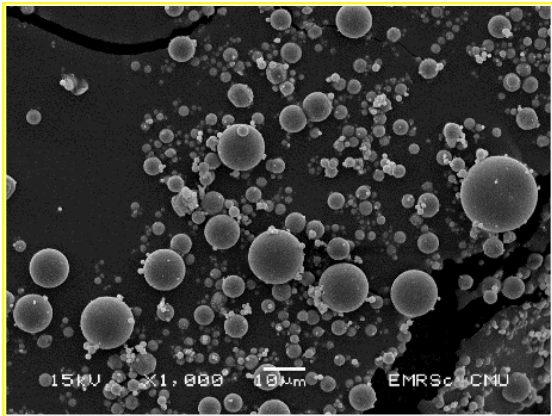
2.1 วัสดุ

- เถ้าลอย (Fly Ash) ชนิด Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [7] เป็นสารปอซโซลานสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัสดุถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุ

พลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ ตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDXRF นั้นแสดงให้เห็นว่า แก้วลอยมีองค์ประกอบร้อยละโดยน้ำหนัก (%w/w) ของอะลูมินา (Al_2O_3) เท่ากับ 8.52% ซิลิกา (SiO_2) เท่ากับ 18.17% แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับ 31.41% และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เท่ากับ 29.85% โดยแก้วลอยนี้มีปริมาณของซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) สูงถึง 8.43%

- การวิเคราะห์ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope (SEM) โดยแก้วลอยที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นทรงกลม แสดงดังรูปที่ 1

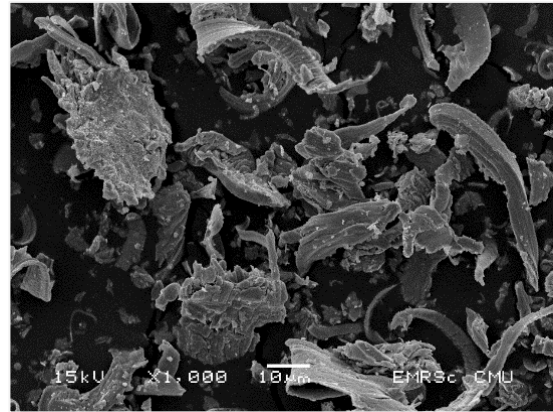


รูปที่ 1 ภาพถ่ายแก้วลอย ที่กำลังขยาย $\times 1,000$ เท่า

● กากผงเหล็ก (Waste Iron Powder) วัสดุพลอยได้จากกิจกรรมในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น การเจียร การขัด การตัด

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDXRF นั้นพบว่ากากผงเหล็กมีองค์ประกอบหลักเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ถึง 95.95%

- การวิเคราะห์ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope, (SEM) ลักษณะทางกายภาพของกากผงเหล็กที่ได้มีลักษณะแบนเป็นแผ่นและมีความโค้งงอ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพถ่ายกากผงเหล็กที่กำลังขยาย $\times 1,000$ เท่า

● สารละลายต่าง (Alkaline Activators)

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , SH)

แบบ Laboratory grade เตรียมโดยใช้การผสม NaOH ชนิดเกล็ดกับน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ผสมเท่ากับ 8 โมลาร์



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3 (ก) วัสดุแก้วลอย (Fly Ash, FA),

(ข) กากผงเหล็ก (Waste Iron Powder, WIP),

(ค) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด

(Sodium Hydroxide, SH) และ

(ง) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate, SS)

- สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , SS) แบบ Industrial grade ที่มีองค์ประกอบของโซเดียมออกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 16.10, ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 32.10 และน้ำ (Water) ร้อยละ 51.80

- โดยผสมอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , SH) ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , SS) เท่ากับ 1.00 (SS/SH=1.00)

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

2.2.1 การเตรียมสารละลาย

- แบ่งชั่งเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำกลั่นใส่ปิกเกอร์
- นำเกล็ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ใส่ลงไปในน้ำกลั่นที่อยู่ในปิกเกอร์คนจนเข้ากันทิ้งไว้จนคายความร้อน
- นำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่คายความร้อนแล้วใส่ในขวดบรรจุสารเคมี ปิดภาชนะแล้วทิ้งไว้หนึ่งคืน
- เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังจากที่ทิ้งไว้หนึ่งคืนโดยคนสารละลายทั้งสองให้เข้ากัน จากนั้นเทใส่ขวดบรรจุสารเคมี แล้วทิ้งไว้หนึ่งคืน



รูปที่ 4 การเตรียมสารละลาย

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

- ผสมเถ้าลอยและกากผงเหล็ก ตามอัตราส่วนที่กำหนด คนให้เข้ากัน โดยกำหนดให้เป็นการผสมเพิ่มเนื่องจาก ผงเหล็กไม่ทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

• ชั่งสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมซิลิเกต หลังจากทิ้งไว้แล้วหนึ่งคืน ใช้ตามอัตราส่วน L/B เท่ากับ 0.45 แล้วเทสารละลายลงถึงผสม ทำการคลุกเคล้าให้เข้ากับมวลรวมด้วยสว่าน

• เทวัสดุตัวอย่างใส่แบบหล่อจีโอโพลิเมอร์ปาดผิวหน้าของวัสดุตัวอย่างให้เรียบไปกับขอบแบบหล่อ ทิ้งไว้จนแข็งตัว แล้วนำออกแบบ หลังจากนั้นหุ้มวัสดุตัวอย่างด้วยพลาสติก แล้วทิ้งระยะเวลา (Delay Time) 1 ชั่วโมง [7]

• นำวัสดุตัวอย่างเข้าเตาอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิคงที่ แล้วนำออกจากเตาเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุ 3, 7 และ 28 วัน เพื่อนำไปทดสอบต่อไป



รูปที่ 5 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

2.3 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุ

2.3.1 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)

การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ใช้มาตรฐาน ASTM C191 [9] ทดสอบอิทธิพลของอัตราส่วนกากผงเหล็กกับเถ้าลอย (Waste Iron Powder + Fly Ash, B) ผสมกับสารละลายที่เป็นต่าง (L) ที่อัตราส่วน L/B ที่มีต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ โดยคงอัตราส่วน SS/SH 1.0, L/B 0.45 และบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 6 การทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น

2.3.2 การทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

การทดสอบโดยแกะวัสดุตัวอย่างออกจากพลาสติก หลังจากที่ได้ทำการบ่มมาแล้วเป็นระยะเวลา 3, 7 และ 28 วัน ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) วัดขนาด ความกว้าง ความสูง และความยาวของวัสดุตัวอย่าง อย่างละ 3 ค่า จากแต่ละอัตราส่วนผสม นำค่าที่วัดมาไปหาค่าเฉลี่ย แล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปคำนวณหาปริมาตร จากนั้นชั่งวัสดุตัวอย่างเพื่อหาน้ำหนัก นำผลที่ได้ไปหาค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุตัวอย่างจากอัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตร



รูปที่ 7 วัดขนาดความกว้าง (b), ความสูง (h), ความยาว (L) และชั่งน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

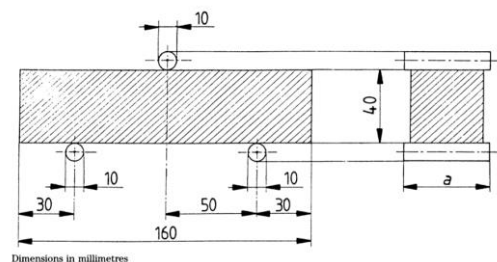
2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ

2.4.1 กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ใช้มาตรฐาน BS EN 196-1 [10] โดยแบบหล่อตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จะเป็นแบบหล่ออะคริลิก มีช่องว่างขนาด 40x40x160 มม. จำนวน 3 ช่อง ได้รับการออกแบบเพื่อให้ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปในแนวนอนเป็นรูปปริซึม (Prism) ซึ่งแบบหล่อต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ ผิวด้านในของแบบหล่อควรมีพื้นผิวที่เรียบและไม่เกิดการกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยากับวัสดุตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงดัดมีชื่อว่า เครื่องทดสอบรับแรงดัดคอนกรีต Wykeham Farrance พร้อมกับแท่นสำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด และวงแหวนปรับเทียบ (Proving Ring) ทดสอบโดยการวางวัสดุตัวอย่างที่มีอายุ 3, 7 และ 28 วัน ในแนวนอน ถูกแรงกระทำโดยแท่นแบบแรงกระทำแบบ 3 จุด (Three-Point Test Method) ได้แก่ ด้านบนที่บริเวณตรงกลาง และจุด Support ด้านล่าง 2 จุด ซึ่งอยู่ห่างกัน 100 ± 0.5 มิลลิเมตร มีอัตราการถ่ายน้ำหนักบรรทุก (Loading Rate) ที่ 0.10 มิลลิเมตรต่อวินาที ให้น้ำหนักบรรทุกคงที่นี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งวัสดุตัวอย่างเกิดการวิบัติ ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 8 จากนั้นทำการจดบันทึกค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดพร้อมทั้งถ่ายรูปลักษณะการวิบัติคำนวณได้จากสมการ (1) ดังนี้

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

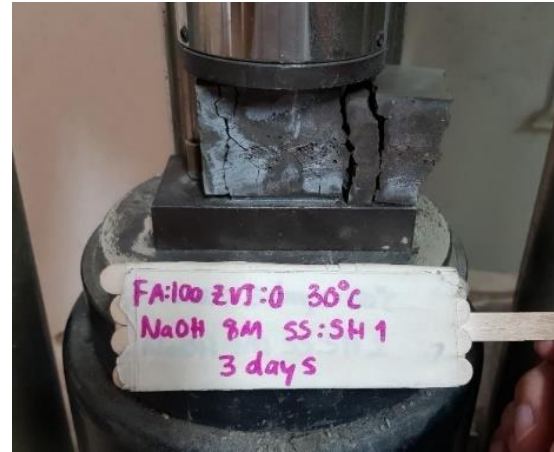
เมื่อ σ คือ ค่ากำลังรับแรงดัด, P คือ แรงสูงสุดที่อ่านได้, L คือ ช่วงคาน, b คือ ความกว้างเฉลี่ยที่หน้าตัด และ d คือ ความลึกเฉลี่ยที่หน้าตัด



รูปที่ 8 การทดสอบโดยวิธี Three-Point Test Method



รูปที่ 9 การวัดหลังทดสอบกำลังรับแรงอัด



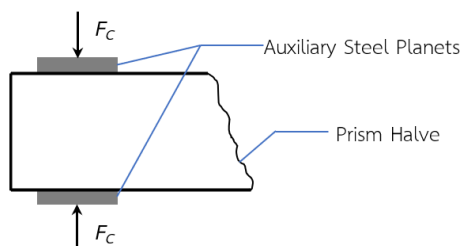
รูปที่ 11 การวัดหลังทดสอบกำลังรับแรงอัด

2.4.2 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

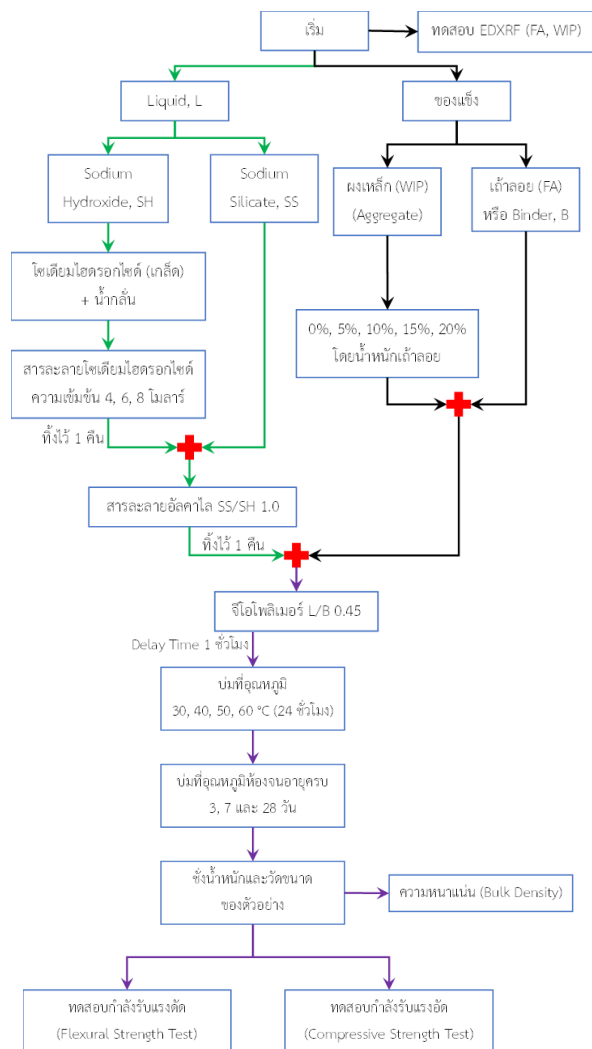
การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ใช้มาตรฐาน BS EN 196-1 โดยการนำตัวอย่างทั้งสองส่วนจากวัสดุตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่หักจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยมีข้อแม้ว่าส่วนที่แตกหักของวัสดุตัวอย่างที่นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดจะต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 65 มิลลิเมตร และจะต้องไม่มีรอยแตกร้าวมาก่อน เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงอัด มีชื่อเรียกว่าเครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต CST 2000 kN พร้อมกับแท่นสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด ทดสอบโดยนำวัสดุที่หักแล้วไว้ตรงกลางแท่น แล้วกดด้วยน้ำหนักบรรทุก 2000 กิโลนิวตัน มีการควบคุมอัตราเร็วของน้ำหนักบรรทุกอย่างคงที่ผ่านวาล์วจนกระทั่งวัสดุตัวอย่างเกิดการวิบัติ จากนั้นทำการจดบันทึกค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด มีหน่วยวัดเป็นหน่วยแรงกระทำตั้งฉากต่อพื้นที่ตัดขวางของวัสดุตั้งแสดงในรูปที่ 10 พร้อมทั้งถ่ายรูปลักษณะการวิบัติ

$$\sigma = \frac{F_c}{A} \quad (2)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น (Stress), F_c คือ แรงภายนอกที่มากระทำ และ A คือ พื้นที่ที่แรงกระทำ



รูปที่ 10 แรงกระทำต่อวัสดุขณะรับแรงทดสอบตั้งฉาก



รูปที่ 12 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย

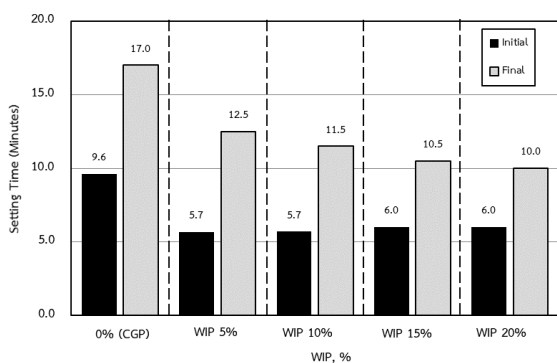
3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบผลของอัตราส่วนกากผงเหล็ก (Waste Iron Powder, WIP) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกายภาพ (Physical Properties) และเชิงกล (Mechanical Properties) ของ จีโอโพลิเมอร์

ทดสอบภายใต้เงื่อนไขคือ อัตราส่วนสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต (SS/SH) เท่ากับ 1.0, ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์, อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนัก (L/B) เท่ากับ 0.45 และบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอัตราส่วนเหล็กต่อเถ้าลอยเป็นร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักเถ้าลอย

3.1.1 อิทธิพลต่อสมบัติเชิงกายภาพของจีโอโพลิเมอร์

● ระยะก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์

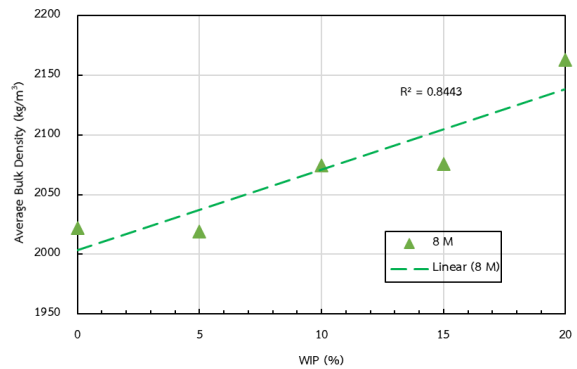


รูปที่ 13 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ กับอัตราส่วนกากผงเหล็ก (WIP)

จากผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ ผสมกากผงเหล็ก พบว่าอัตราส่วนกากผงเหล็ก (WIP) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย มีแนวโน้มลดลง จากผลดังกล่าว สรุปได้ว่ากากผงเหล็ก สามารถทำปฏิกิริยากระตุ้นการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ ให้เร็วขึ้นได้ เมื่อเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ควบคุม (Controlled geopolymer, CGP)

● ความหนาแน่นรวมของจีโอโพลิเมอร์

จากความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวมเฉลี่ย (Average Bulk density) และอัตราส่วนกากผงเหล็ก (WIP)



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรวมเฉลี่ย และอัตราส่วนกากผงเหล็ก (WIP)

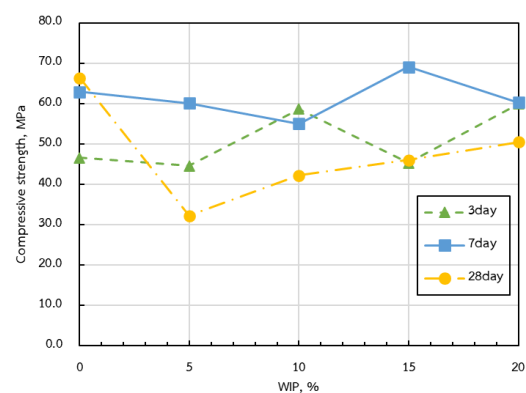
เมื่อผสมเหล็กในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 พบว่า ความหนาแน่นรวมเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจาก ความถ่วงจำเพาะของเหล็กมีค่ามากกว่าเถ้าลอย

3.1.2 อิทธิพลต่อสมบัติเชิงกายภาพของจีโอโพลิเมอร์

● กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ที่อัตราส่วน FA:WIP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนผสม (%)		กำลังรับแรงอัด (MPa)		
FA	WIP	อายุ 3 วัน	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน
100	0 (CGP)	46.6	62.9	66.4
	5	44.6	60.1	32.2
	10	58.6	55.0	42.3
	15	45.3	69.1	46.0
	20	59.9	60.3	50.5



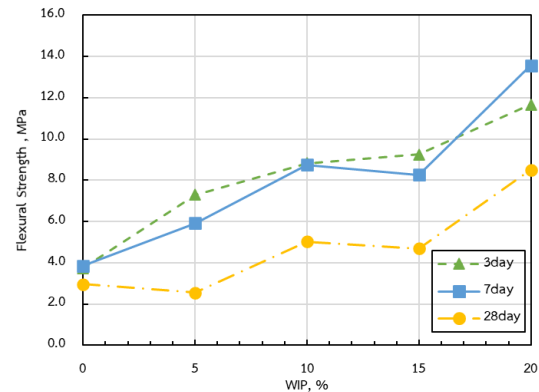
รูปที่ 15 กำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนกากผงเหล็ก ในจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

จากความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนกากผงเหล็กในจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ควบคุมให้กำลังอัดที่ 3, 7 และ 28 วัน เท่ากับ 46.6, 62.9 และ 66.4 MPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มโดยที่อายุการบ่ม 28 วันให้กำลังอัดสูงสุด เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผสมกากผงเหล็กอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ให้กำลังแรงอัดที่ 3 วันเท่ากับ 44.6, 58.6, 45.3 และ 59.9 MPa ตามลำดับ กำลังอัดแรงที่ 7 วันเท่ากับ 60.1, 55.0, 69.1 และ 60.3 MPa ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 32.2, 42.3, 46.0 และ 50.5 MPa ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เมื่อผสมกากผงเหล็กกำลังรับแรงอัดลดลงตามอายุการบ่ม โดยเห็นความแตกต่างชัดเจนที่ระยะเวลา 28 วัน เมื่อเทียบกำลังรับแรงอัดกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ควบคุม ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่ามีอัตราส่วนลดลงร้อยละ 51.51, 36.29, 30.72 และ 23.94 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ผสมกากผงเหล็กอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 พบว่าเมื่ออัตราส่วนกากผงเหล็กเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่พัฒนากำลังที่อายุตัวอย่างที่ 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่ 3 วัน และ 7 วัน โดยกำลังรับแรงอัดที่อายุตัวอย่าง 7 วัน ได้แก่ 60.1, 55.0, 69.1 และ 60.3 MPa ตามลำดับ ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดในอัตราส่วนกากผงเหล็กร้อยละ 5, 15 และ 20 ขณะที่อัตราส่วนร้อยละ 10 ให้ค่าสูงสุด ที่อายุตัวอย่างการบ่ม 3 วันเท่ากับ 69.1 MPa

● กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ที่อัตราส่วน FA:WIP ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนผสม (%)		กำลังรับแรงดัด (MPa)		
FA	WIP	อายุ 3 วัน	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน
100	0 (CGP)	3.8	3.9	3.0
	5	7.3	5.9	2.6
	10	8.8	8.7	5.0
	15	9.3	8.3	4.7
	20	11.7	13.6	8.5



รูปที่ 16 กำลังรับแรงดัดและอัตราส่วนกากผงเหล็กในจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

จากความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดัดและอัตราส่วนกากผงเหล็กในจีโอโพลิเมอร์ที่อายุการบ่มต่าง ๆ เมื่อเทียบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ควบคุม ให้กำลังรับแรงดัดที่ 3, 7 และ 28 วัน เท่ากับ 3.8, 3.9 และ 3.0 MPa เทียบกับตัวอย่างที่ผสมกากผงเหล็กอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ให้กำลังแรงดัดที่ 3 วันเท่ากับ 7.3, 8.8, 9.3 และ 11.7 MPa ตามลำดับ กำลังอัดแรงดัดที่ 7 วันเท่ากับ 5.9, 8.7, 8.3 และ 13.6 MPa ตามลำดับ กำลังอัดแรงดัดที่ 28 วันเท่ากับ 2.6, 5.0, 4.7 และ 8.5 MPa ตามลำดับ พบว่าเมื่อผสมกากผงเหล็กลงในจีโอโพลิเมอร์ กำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่ม 3 วัน เพิ่มขึ้นคิดเป็น 1.92, 2.31, 2.45 และ 3.07 เท่าของตัวอย่างควบคุม ตามลำดับ ขณะเดียวกันตัวอย่างผสมกากผงเหล็กกำลังรับแรงดัดลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม แต่เมื่อพิจารณาตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ผสมกากผงเหล็กอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 พบว่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนกากผงเหล็กเพิ่มมากขึ้น ขณะเดียวกันกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ที่อายุการบ่ม 28 วัน ให้กำลังน้อยกว่าอายุการบ่ม 7 วัน และ 3 วัน ซึ่งอายุการบ่มที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างผสมกากผงเหล็กอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, และ 15 คือ 3 วัน ในขณะที่ตัวอย่างผสมกากผงเหล็กอัตราส่วนร้อยละ 20 คือ 7 วัน ขณะเดียวกันนั้นตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ผสมกากผงเหล็กอัตราส่วนร้อยละ 10 กับ 15 หลังอายุ 7 วัน ปฏิบัติ

Geopolymerization ไปเสร็จสิ้นแล้ว ตัวที่ยังพัฒนากำลัง คือ Hydration เพราะฉะนั้นผงเหล็กที่ไม่มีการเกี่ยวข้องกับ ปฏิกิริยาการแข็งตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ จึงทำให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจาก 20% ที่กำลังเพิ่มขึ้น เพราะความหนาแน่นของเหล็กที่มีมากขึ้น

3.2 ผลการทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มร้อนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์

ทดสอบภายใต้เงื่อนไขคือ อัตราส่วนสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต (SS/SH) เท่ากับ 1.0, ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8 โมลาร์, อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนัก (L/B) 0.45 และอัตราส่วนกากผงเหล็กร้อยละต่อเถ้าลอยโดยน้ำหนักเท่ากับ 0 และ 20

3.2.1 ผลการทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มร้อน

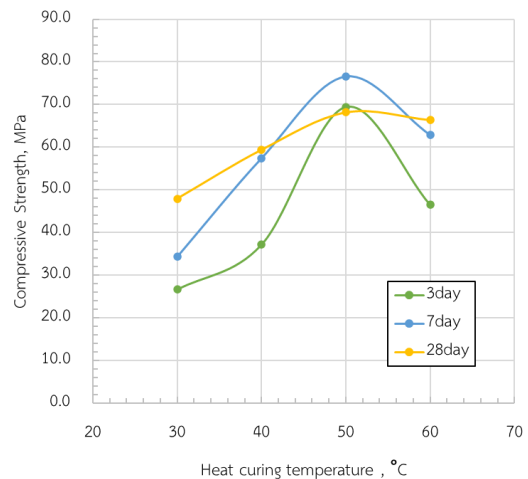
● กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ระหว่างตัวอย่าง CGP และตัวอย่าง FA:WIP = 100:20

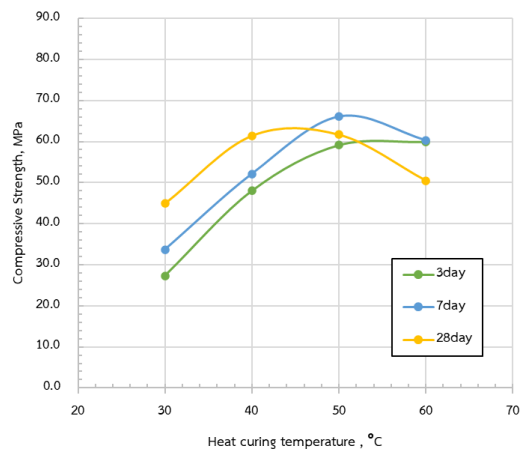
อัตราส่วนผสม (%)		อุณหภูมิ การบ่ม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	กำลังรับแรงอัด (MPa)		
FA	WIP		อายุ 3 วัน	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน
100	0 (CGP)	30	26.7	34.4	48.0
		40	37.2	57.4	59.4
		50	69.4	76.6	68.2
		60	46.6	62.9	66.4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ระหว่างตัวอย่าง CGP และตัวอย่าง FA:WIP = 00:20

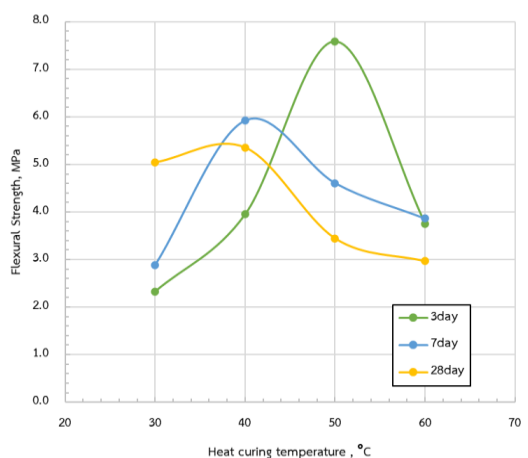
อัตราส่วนผสม (%)		อุณหภูมิ การบ่ม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	กำลังรับแรงอัด (MPa)		
FA	WIP		อายุ 3 วัน	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน
100	20	30	27.3	33.7	44.9
		40	48.0	52.1	61.4
		50	59.1	66.1	61.7
		60	59.9	60.3	50.5



รูปที่ 17 กำลังรับแรงอัด และอุณหภูมิการบ่มร้อนที่อายุตัวอย่างต่าง ๆ ของตัวอย่าง CGP (FA:WIP=100:0)



รูปที่ 18 กำลังรับแรงอัด และอุณหภูมิการบ่มร้อนที่อายุตัวอย่างต่าง ๆ ของตัวอย่าง WIP20% (FA:WIP=100:20)

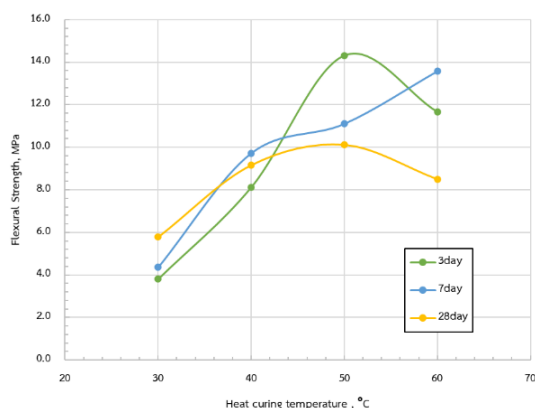


รูปที่ 19 กำลังรับแรงดัด และอุณหภูมิการบ่มร้อนที่อายุตัวอย่างต่าง ๆ ของตัวอย่าง CGP (FA:WIP=100:0)

● กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ระหว่างตัวอย่าง CGP และตัวอย่าง FA:WIP = 100:20

อัตราส่วนผสม (%)		อุณหภูมิ การบ่ม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	กำลังรับแรงดัด (MPa)		
FA	WIP		อายุ 3 วัน	อายุ 7 วัน	อายุ 28 วัน
100	0 (CGP)	30	2.3	2.9	5.0
		40	4.0	5.9	5.4
		50	7.6	4.6	3.4
		60	3.8	3.9	3.0
100	20	30	3.8	4.4	5.8
		40	8.1	9.7	9.2
		50	14.3	11.1	10.1
		60	11.7	13.6	8.5



รูปที่ 20 กำลังรับแรงดัด และอุณหภูมิการบ่มร้อนที่อายุตัวอย่างต่าง ๆ ของตัวอย่าง WIP20% (FA:WIP=100:20)

4. สรุปผลการศึกษา

จากการประเมินผลกระทบของอัตราส่วนกากผงเหล็กในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยแม่เมาะ และอิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มร้อน ต่อสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ ระยะเวลาก่อตัว ความหนาแน่นรวม และสมบัติเชิงกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน พบว่า

4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนกากผงเหล็กในจีโอโพลิเมอร์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกายภาพ (Physical Properties) จากผลการศึกษา สรุปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนกากผงเหล็กเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นรวมเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเหล็กมีค่ามากกว่าเถ้าลอย และส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะก่อตัวสุดท้ายลดลง

4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนกากผงเหล็กในจีโอโพลิเมอร์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ควบคุมกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมกากผงเหล็ก พบว่าการพัฒนา กำลังรับแรงอัดและแรงดัดที่ 28 วันลดลง ในขณะที่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ควบคุมมีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเพิ่มขึ้น แต่กำลังรับแรงดัดที่ 28 วันลดลง และเมื่อผสมผงเหล็ก กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง แต่กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราส่วนกากผงเหล็กที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แนวโน้มกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดเพิ่มสูงขึ้น ขณะเดียวกันที่อายุการบ่ม 28 วัน ให้กำลังน้อยกว่าอายุการบ่ม 7 วัน และ 3 วัน สรุปได้ว่ากำลังรับแรงดัดและแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น

4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มร้อน ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของจีโอโพลิเมอร์ผสมกากผงเหล็กเปลี่ยนแปลงไป โดยจากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ผสมกากผงเหล็กมีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อุณหภูมิการบ่ม 50°C และการพัฒนา กำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการบ่มในลักษณะเดียวกับกำลังรับแรงอัด ขณะที่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 50°C ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มที่ลดลง จากการศึกษารูปสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ในการศึกษา คือช่วง 50-60°C

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรทุกท่านภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ อีกทั้งช่วยอำนวยความสะดวกและสนับสนุนงานวิจัย ทั้งวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ ในการปฏิบัติงาน รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ, “การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์,” maemoh.egat.com, Nov. 17, 2016. [Online]. Available: <http://maemoh.egat.com/>. [Accessed Mar. 2, 2020].
- [2] ศูนย์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กไทย, “การศึกษาสถานภาพอุตสาหกรรมเศษเหล็ก ภายใต้โครงการพัฒนาศูนย์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหการ”. Sep. 01, 2015. [Online]. Available: <http://iiu.isit.or.th/th/reports/In-Depth%20Research%20Report.aspx> [Accessed Mar. 2,2020].
- [3] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วัสดุจีโอโพลิเมอร์. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2560.
- [4] A. M. M. Al Bakria, H. Kamarudin, M. BinHussain, I. K. Nizar, Y. Zarina, and A. R. Rafiza, “The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers,” Physics Procedia, vol. 22, pp. 286–291, 2011.
- [5] K. Neupane, “Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of portland cement in concrete industry,” Mechanics of Materials, vol. 103, Dec., pp. 110–122, 2016.
- [6] A. A. Adam, and X. X. X. Horiato, “The effect of temperature and duration of curing on the strength of fly ash based geopolymer mortar,” Procedia Engineering, vol. 95, pp. 410–414, 2014.
- [7] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, “Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer,” Cement and Concrete Composites, vol. 29, no. 3, pp. 224–229, 2007.
- [8] American Society for Testing and Materials, “ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”. Feb. 11, 2019. [Online]. Available: <https://www.astm.org/standards/c618>. [Accessed Mar. 02, 2020].
- [9] American Society for Testing and Materials, “ASTM C191: Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle”. Nov. 05, 2021. [Online]. Available: <https://www.astm.org/standards/c191>. [Accessed Mar. 02, 2020].
- [10] British Standards Institution, “BS EN 196-1: Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength”. May. 31, 2016. [Online]. Available: <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Undated?UPI=000000000000483082>. [Accessed Mar. 02, 2020].