

การผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชง Production of geopolymer mortar from fly ash, cannabis ash, and hemp fiber

มีศักดิ์ธนา พัวพิทยธร^{1*} และ สหलग หอมวุฒิวงส์¹

Meesakthana Puapitthayathorn^{1*} and Sahalaph Homwuttiwong¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีเป้าหมายที่จะพัฒนากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วยเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชง โดยใช้ปริมาณของเถ้ากัญชาทดแทนเถ้าลอยในสัดส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก และใส่เส้นใยกัญชงในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ร้อยละ 0-2 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/B) เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 0.50 อัตราส่วนสารลดน้ำต่อวัสดุตั้งต้น (S/B) ร้อยละ 1.0 และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องที่เป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงสุดที่อายุ 28 วัน กำลังรับแรงดัดที่อัตราส่วนผสม 100F0COH, 90F10COH และ 70F30COH มีค่าเท่ากับ 270, 258 และ 240 กก./ซม² ตามลำดับ กำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วน 70F30COH ที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 42 กก./ซม² และพบว่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลงเมื่อใช้ปริมาณของเถ้ากัญชาทดแทนเถ้าลอยในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามการเติมเส้นใยกัญชงในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีผลทำให้กำลังดัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม

คำสำคัญ: จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์; เถ้ากัญชา; เส้นใยกัญชง; กำลังรับแรงอัด; กำลังรับแรงดัด

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Faculty of Engineering, Mahasarakham University Mahasarakham 44150

* Corresponding Author: e-mail: Meesakthana.p@msu.ac.th

Abstract

This study aimed to improve the compressive and flexural strength of geopolymers using cannabis ash and hemp fibers. The fly ash was replaced with cannabis ash in a range of 0-30% and the hemp fiber was incorporated in a range of 0-2% by weight. The ratio of alkaline solution to the source materials (AL/B) was 1.0 and the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide solution (NS/NH) was 0.50. The ratio of water reducer to binder (S/B) was 1.0%. The mixture was cured at room temperature for 7, 14, and 28 days. The results showed that the maximum compressive strength of the geopolymers at 28 days of 100F0C0H, 90F10C0H, and 70F30C0H were 270, 258, and 240 kg/cm², respectively. The 70F30C0H mixture showed a maximum flexural strength of 42 kg/cm² at 28 days. This study shows that the compressive and flexural strength of the geopolymers was lower when the proportion of cannabis ash in the mixture was increased. However, the addition of hemp fibers in the geopolymer mortar mixture resulted in an increase in flexural strength compared to the control mortar.

Keywords: geopolymer mortar, cannabis ash, hemp fiber, compressive strength, flexural strength

หลักการและเหตุผล

จีโอพอลิเมอร์ (Davidovits, 1994) มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานโดยเกิดจากการนำเอาวัสดุปอซโซลานที่มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) โดยน้ำหนักเป็นวัสดุตั้งต้น (Fernandez et al., 2005) และใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของพอลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งการทำปฏิกิริยาจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มาเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา (Activator) ซึ่งช่วยให้เกิดการละลายของซิลิกาและอะลูมินา ทำให้เกิดการละลาย (Dissolution) และโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกาที่ละลายในสารละลาย และเสริมสร้างโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาก่อเกิดสารจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)

กัญชง (Kanchong) หรือเฮมพ์ (Hemp) (Elfordy et al., 2008) คือ เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุเพียงปีเดียว เจริญเติบโตง่าย เส้นใยกัญชงจัดได้ว่าเป็นเส้นใยที่มีคุณภาพสูงมีความเหนียวนุ่ม ยืดหยุ่น แข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา มีคุณสมบัติในการดูดซับกลิ่น น้ำ หรือน้ำมันได้ดี หนวบน้ำหนักประมาณ 120 – 130 กก./ม³ (พศพิพัชรราชคำ และคณะ, 2566) แต่ถ้าผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และมวลรวมธรรมชาติ จะมีชื่อเรียกว่า เฮมพ์-

คอนกรีต (Hemp Concrete) (Pantawee et al., 2017) สามารถอัดหรือหล่อขึ้นรูปโดยใช้แรงอัดหรือแรงดันในรูปแบบหล่อ

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะศึกษาการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (Pulverized Fuel Ash) ซึ่งนิยมนำไปเป็นวัสดุเติมในการสังเคราะห์วัสดุประเภทจีโอพอลิเมอร์ (Chindaprasirt et al., 2007, Palomo et al., 1999) แต่จะเห็นได้ว่ามูลค่าของเถ้าลอยได้ขยับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตนิยมนำเถ้าลอยไปทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญ แต่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบดั้งเดิม มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณสูง ที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ใช้พลังงานมหาศาล ทำให้อุตสาหกรรมนี้มีส่วนทำให้เกิดภาวะโลกร้อน และในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าถ่านหินที่เหลือทิ้งนำกลับมาใช้ประโยชน์ เพื่อทดแทนบางส่วนในการลดการใช้ปูนซีเมนต์และใส่เส้นใยกัญชง โดยปรับอัตราส่วนการเติมเถ้าลอยเถ้าถ่านหิน และเส้นใยกัญชงในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่เหมาะสม และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด (American Society for Testing and Material, 2001a) และกำลังรับแรงดัด (American Society for Testing

and Materials. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) (ASTM C78-09, 2010a) ของ จีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เพื่อนำผลการศึกษา เป็นแนวทาง ในปรับใช้ในงานคอนกรีต สามารถนำไปพัฒนาเป็น คอนกรีตที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานทั่วไป และเพื่อนำไปสู่ การพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยเพิ่มมูลค่า จากวัสดุเหลือทิ้ง

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของเถ้าลอย เถ้า กัญชา และเส้นใยกัญชง ที่เหมาะสมสำหรับการผลิต จีโพลิเมอร์มอร์ตาร์
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมของเถ้าลอย เถ้า กัญชา และเส้นใยกัญชง ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและ กำลังรับแรงดัดของจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์

วิธีการศึกษา

1. การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น ขอบเขตการวิจัย การออกแบบส่วนผสม การเตรียมตัวอย่าง และ วิธีการวิเคราะห์

1.1 ขอบเขตการวิจัย

ในการศึกษาใช้ปริมาณของเถ้าลอยที่ใส่แทนที่ ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 70 80 90 และ 100 โดยน้ำหนัก ใช้ ปริมาณของเถ้ากัญชา ร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดย น้ำหนักใช้เส้นใยกัญชง ร้อยละ 0 1 และ 2 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 1.00 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.50 อัตราส่วนสารลดน้ำต่อวัสดุตั้งต้น ร้อยละ 1 และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

1.2 ออกแบบส่วนผสม

- ส่วนผสมของจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย ผสมเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชง

หมายเหตุ: OPC หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่1

F หมายถึง เถ้าลอย (Fly Ash)

C หมายถึง เถ้ากัญชา (Cannabis Ash)

SP หมายถึง สารลดน้ำพิเศษ

H หมายถึง เส้นใยกัญชง (Hemp Fiber)

Fine Agg หมายถึง มวลรวมละเอียด (ทราย)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชง

อัตรา ส่วนผสม	Na ₂ SiO ₃ / NaOH	วัสดุประสาน (Binder) (%)			วัสดุมวลรวม (Aggregate)		(Admixture) (%)
	Ratio	OPC	F	C	Fine Agg.	H	SP
CT	0	100	0	0	100	0	0
100F0C0H	0.5	0	100	0	100	0	1
90F10C0H	0.5	0	90	10	100	0	1
80F20C0H	0.5	0	80	20	100	0	1
70F30C0H	0.5	0	70	30	100	0	1
100F0C1H	0.5	0	100	0	100	1	1
90F10C1H	0.5	0	90	10	100	1	1
80F20C1H	0.5	0	80	20	100	1	1
70F30C1H	0.5	0	70	30	100	1	1
100F0C2H	0.5	0	100	0	100	2	1
90F10C2H	0.5	0	90	10	100	2	1
80F20C2H	0.5	0	80	20	100	2	1
70F30C2H	0.5	0	70	30	100	2	1

1.3 การเตรียมตัวอย่าง

- เถ้าลอย (Fly Ash) ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมครอน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมและให้ได้อนุภาคที่ละเอียดสม่ำเสมอ

- เถ้ากัญชา (Hemp ash) ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 75 ไมครอน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมและให้ได้อนุภาคที่ละเอียดสม่ำเสมอ

- เส้นใยกัญชง (Hemp fiber) ใช้ส่วนที่ลอกออกจากแกนโดยนำเส้นใยกัญชงมาเป็นส่วนผสมตัดให้มีขนาดความยาวประมาณ 25 มิลลิเมตรเท่ากัน

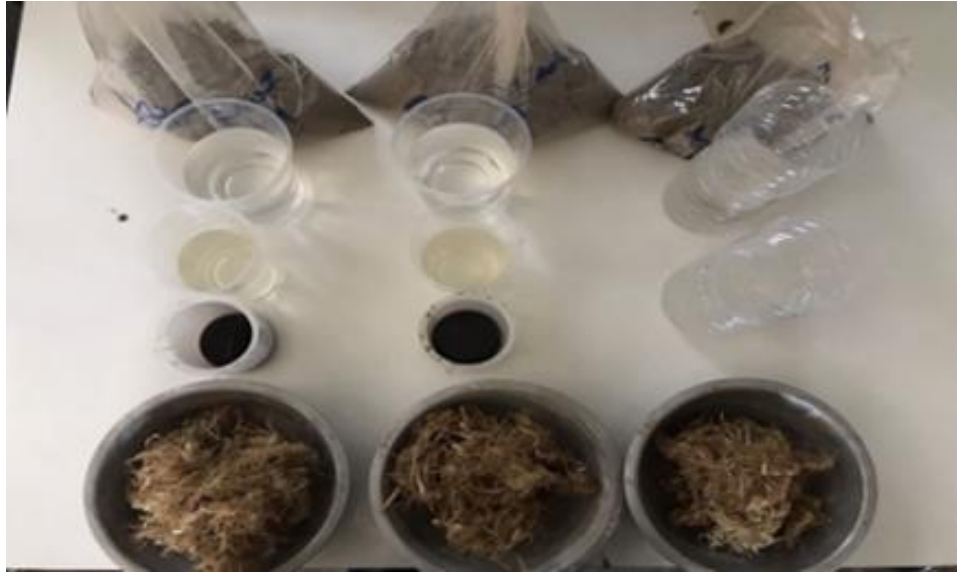
- มวลรวมละเอียด ซึ่งเป็นทรายเม็ดหยาบซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด (American Society for Testing and Material (2006a).

- น้ำสะอาด ใช้ในการเตรียมการทดสอบและเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 นำมาเตรียมเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ผสมและทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องก่อนนำมาใช้งาน

- สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของ Na₂O ร้อยละ 15.32, SiO₂ ร้อยละ 32.87 โดยน้ำหนัก และ H₂O ร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก

- สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca (OH)₂ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยกัญชง

- สารลดน้ำ (Superplasticizer) เตรียมในปริมาณที่เหมาะสม (โดยปกติไม่เกิน ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักวัสดุตั้งต้น) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ประกอบด้วย เถ้าลอย (Fly Ash) เส้นใยกัญชง (Hemp fiber) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) สารลดน้ำ (Superplasticizer) และน้ำสะอาด

ขั้นตอนการผสม

วิธีการผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

1. จัดเตรียมส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เช่น เถ้าลอย เถ้ากัญชง เส้นใยกัญชง น้ำผสม และสารเคมีที่ใช้ในการผสม ทำการตวงชั่งตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการผสมให้เรียบร้อยก่อนเริ่มทำการผสม

2. เริ่มเทส่วนผสมจากการใส่เถ้าลอย เถ้ากัญชง และเส้นใยกัญชง ลงในเครื่องผสมจากนั้นเปิดเครื่องผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 2.5 นาที เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วให้ใส่น้ำที่เตรียมไว้ลงในส่วนผสม โดยในช่วงที่ใส่น้ำให้เปิดเครื่องผสมตามปกติเพื่อให้ใบพัดคนส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3. จากนั้นใส่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วทำการผสมต่อเป็นเวลา 2.5 นาที ใส่ทรายที่เตรียมไว้ลงในเครื่อง ผสมเป็นเวลา 2.5 นาที สุดท้ายเมื่อครบเวลาแล้วจึงใส่สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารลดน้ำ แล้วเปิดเครื่องผสมต่อประมาณ 2.5 นาที จนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

4. เมื่อผสมเสร็จเรียบร้อยแล้วให้นำส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เทลงใส่แบบหล่อตัวอย่างที่เตรียมไว้ ทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร และขนาด 8x8x28 เซนติเมตร

5. เทส่วนผสมลงในแบบหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์พันด้วยฟิล์มพลาสติกทั้งแบบหล่อจากนั้นนำเข้าตู้อบ โดยทำการที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อนำเข้าอบครบ 48 ชั่วโมงแล้ว จึงทำการถอดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ออกจากแบบหล่อ แล้วนำพันด้วยฟิล์มพลาสติก เสร็จแล้วนำมาบ่มตามอายุที่ 7 14 และ 28 วัน โดยตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

1.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ 100 ตัน ยี่ห้อ Chunyen รุ่นCY910122

1.5 การทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural strength) ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้ขนาด 8x8x28 เซนติเมตร ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C78 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ 100 ตัน ยี่ห้อ Chunyen รุ่นCY910122

1.6 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption) ตัวอย่างทดสอบ ใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C642-06 (American Society for Testing and Material (2006b).



รูปที่ 2 การบ่มตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ขนาด 8x8x28 เซนติเมตร และขนาด 5x5x5เซนติเมตร โดยใช้วิธีทำการปิดพลาสติกใส



รูปที่ 3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การอภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชาเสริมที่สัดส่วนเถ้าลอยและเถ้ากัญชาต่างกัน ที่ปริมาณเส้นใยกัญชาในส่วนผสมร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าแนวโน้มตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดที่ค่อนข้างสูงและใกล้เคียงกัน กำลังการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม ส่วนผสม CT มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 275 กก./ชม² ที่อายุ 28 วัน จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ควบคุม มีค่าที่ใกล้เคียงกันกับจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่ใส่เส้นใยกัญชา

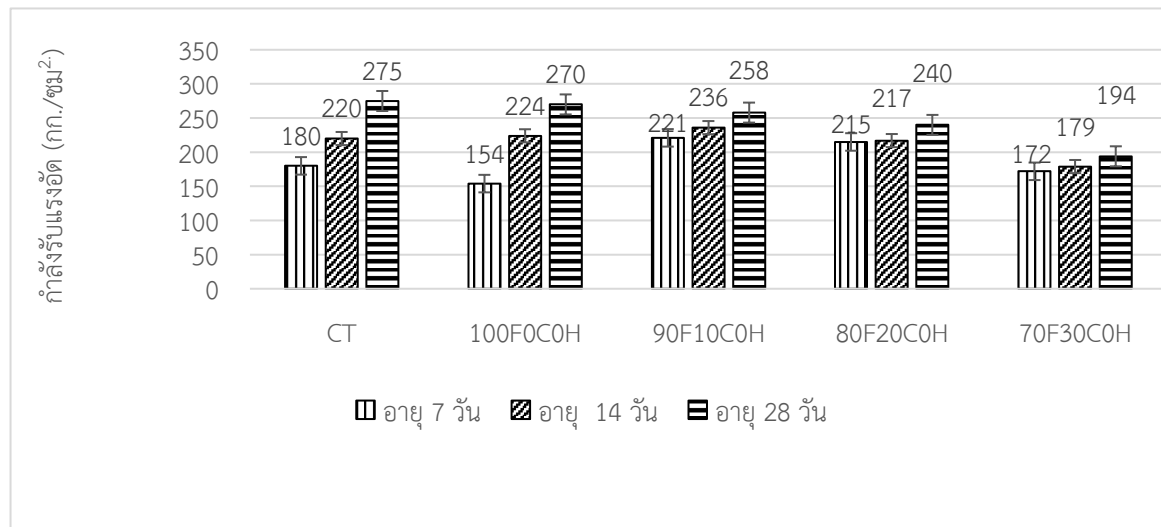
เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่ม 7 วัน พบว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของส่วนผสม 90F10C0H มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 221 กก./ชม² กำลังรับแรงอัดรองลงมาเป็นส่วนผสม70F30C0H เท่ากับ 215 กก./ชม² และส่วนผสม80F20C0H เท่ากับ 172 กก./ชม² ตามลำดับ พิจารณาอายุการบ่มที่ 14 วัน พบว่าผลการ

ทดสอบกำลังรับแรงอัดของส่วนผสม 90F10C0H มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 236 กก./ชม² กำลังรับแรงอัดรองลงมาเป็นส่วนผสม100F0C0H เท่ากับ 224 กก./ชม² และส่วนผสม70F30C0H เท่ากับ 217 กก./ชม² ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยไม่ต่างกันมาก และที่อายุการบ่มที่ 28 วัน พบว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของส่วนผสม 100F0C0H มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 270 กก./ชม² กำลังรับแรงอัดรองลงมาเป็นส่วนผสม 90F10C0H เท่ากับ 258 กก./ชม² และส่วนผสม70F30C0H เท่ากับ 240 กก./ชม² ตามลำดับ สอดคล้องกับ (Palomo et al., 1999) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาขึ้นเป็นไปตามทฤษฎี

ดังนั้น จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยการแทนที่ปริมาณของปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และเถ้ากัญชา มีผลต่อการทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นอย่างมาก เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุการบ่มที่ 28 วัน จะเห็นได้ว่ามีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ ส่วนผสม 100F0C0H มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 270 กก./ชม² จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่าเมื่อปริมาณ

ถ้ากัญชาเพิ่มขึ้นมีกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดจากอัตราส่วนปริมาณเถ้าลอยที่ลดลง เป็นผลให้ความเข้มข้นของสารที่เป็นแหล่งซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการเกิดโพลิเมอร์จะลดลง ส่งผลให้การสร้างโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่แข็งแรงน้อยลง นอกจากนี้ที่ปริมาณเถ้ากัญชาที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มเถ้ากัญชาในส่วนผสมอาจส่งผลให้การทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีในเถ้ากัญชาอาจไม่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับ

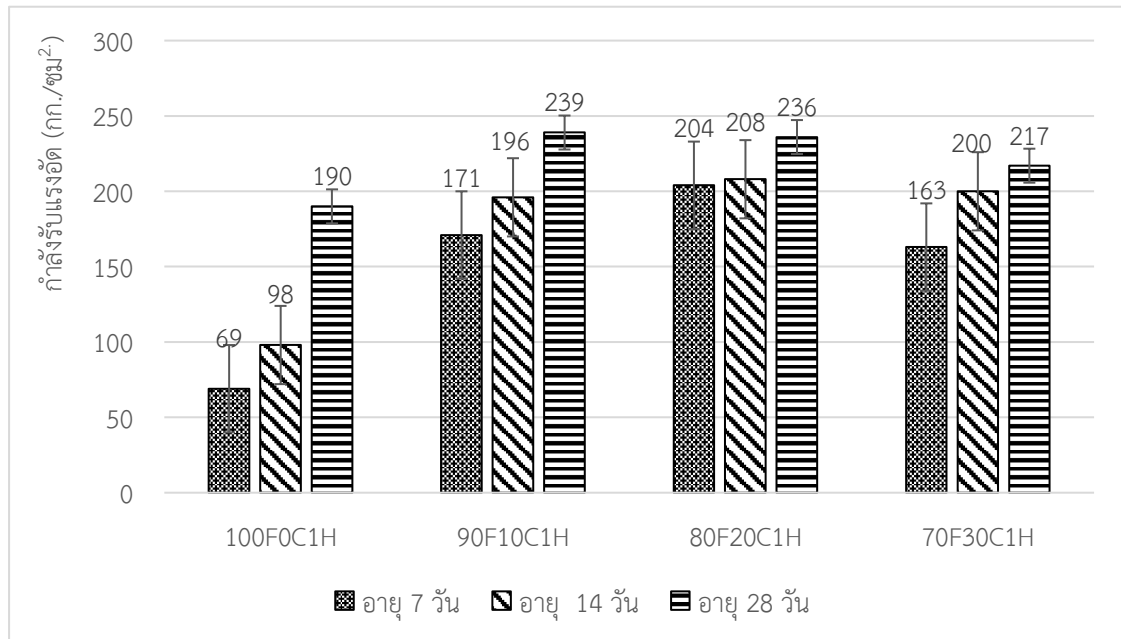
เถ้าลอยในเชิงการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่าง ซึ่งจากการสังเกตหลังจากการทดสอบก้อนตัวอย่าง ยังมีความชื้นในก้อนตัวอย่างที่ทดสอบ ซึ่งอาจส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ความชื้นในตัวอย่างส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายต่างและเถ้าลอย หากปริมาณความชื้นไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้นส่งผลต่อการลดกำลังรับแรงอัด ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชาในส่วนผสมร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชา ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน โดยแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 70-100 โดยน้ำหนักผสมเถ้ากัญชา ร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก และใส่เส้นใยกัญชาในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พิจารณาอายุการทดสอบ 28 วัน พบว่าอัตราส่วนผสม 90F10C1H ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 239 กก./ซม² รองลงมาที่อัตราส่วน 80F20C1H เท่ากับ 236 กก./ซม² และอัตราส่วน 70F30C1H เท่ากับ 217 กก./ซม² การควบคุมอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้นเท่ากับ 1 และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.5 ช่วยเพิ่มความสมดุลของปฏิกิริยาทางเคมี และพบว่าเมื่อปริมาณเถ้าลอยลดลงและแทนที่บางส่วนด้วยเถ้ากัญชา อาจช่วยเพิ่มความ

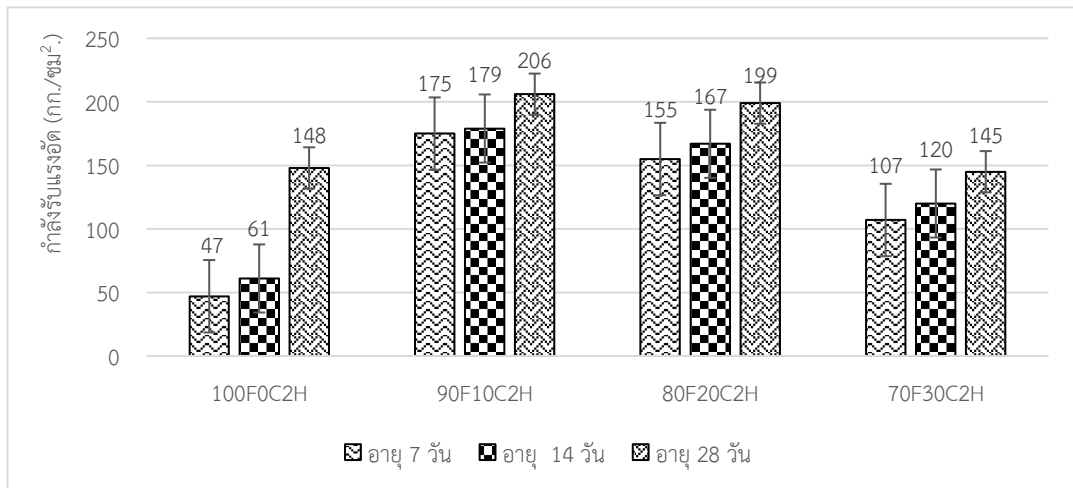
สมดุลระหว่างสารซิลิกาและอะลูมินาที่เกิดปฏิกิริยาร่วมระหว่างเถ้ากัญชาและสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทำให้เพิ่มการพัฒนาของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่หนาแน่นและมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อทำงานร่วมกับสารละลายอัลคาไลน์ และการเติมเส้นใยกัญชาในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มความเหนียวและลดการแตกร้าวในโครงสร้างในตัวอย่างทำให้สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2004) ที่รายงานว่ากำลังอัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยกัญชาจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนการผสมเส้นใยกัญชาน้อยกว่าร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยมากกว่านี้ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชาในส่วนผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 7 พบว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยใช้ปริมาณเถ้าลอยเถ้ากัญชา และใส่เส้นใยกัญชาร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนผสม 90F10C2H หรือ การแทนที่ปริมาณของเถ้าลอยร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก สัดส่วนเถ้ากัญชาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และใส่เส้นใยกัญชาร้อยละ 2 โดยน้ำหนักที่อายุทดสอบ 28 วัน จะเห็นได้ว่าให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ เท่ากับ 206 กก./ซม² ซึ่งเถ้าลอยมีบทบาทสำคัญในการให้สารซิลิกา และอะลูมินา จำเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในจีโอพอลิเมอร์ ส่วนผสมเถ้าลอยช่วยรักษาความสมดุลของสารประกอบที่จำเป็นสำหรับการเกิดโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์ที่แข็งแรง การเพิ่มเถ้ากัญชาในสัดส่วนนี้อาจช่วยเพิ่มแหล่งซิลิกา และแคลเซียมที่เสริมกระบวนการ

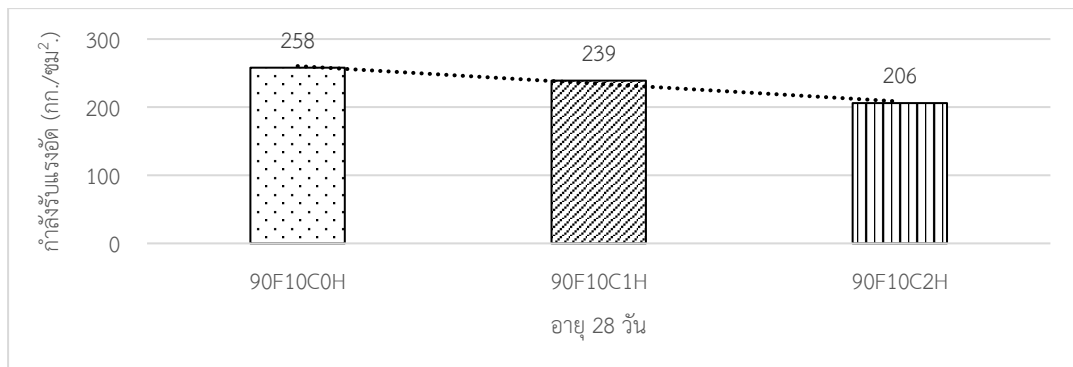
เกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะในระยะเวลาบ่มที่ยาวขึ้น องค์ประกอบของเถ้ากัญชาอาจส่งผลให้โครงสร้างจีโอพอลิเมอร์มีความหนาแน่น และทนทานมากขึ้น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดการบ่มที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ทุกอัตราส่วนผสมพบว่ามีแนวโน้มของการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่มาก อาจเกิดจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยกัญชกลงในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มากขึ้น เป็นผลให้เกิดโพรงภายในตัวอย่างทดสอบค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ (รณกฤต กุลธวัชวงศ์ และคณะ, 2563) กล่าวว่าเมื่อมีการผสมเส้นใยในอัตราส่วนที่สูงขึ้นจะเป็นผลให้เส้นใยมีโอกาสเกาะกลุ่มกันเป็นกระจุกจนทำให้เกิดโพรงขึ้นในเนื้อมอร์ตาร์ซึ่งจะทำให้กำลังอัดลดลงในที่สุด



รูปที่ 7 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชงในส่วนผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ที่อายุ 28 วัน จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนผสม

ที่มีการเพิ่มเส้นใยกัญชงมากขึ้นทำให้ความสามารถกำลังรับแรงอัดลดลง ตามลำดับ



รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชงในส่วนผสมร้อยละ 0 - 2 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน

การทดสอบกำลังรับแรงอัด

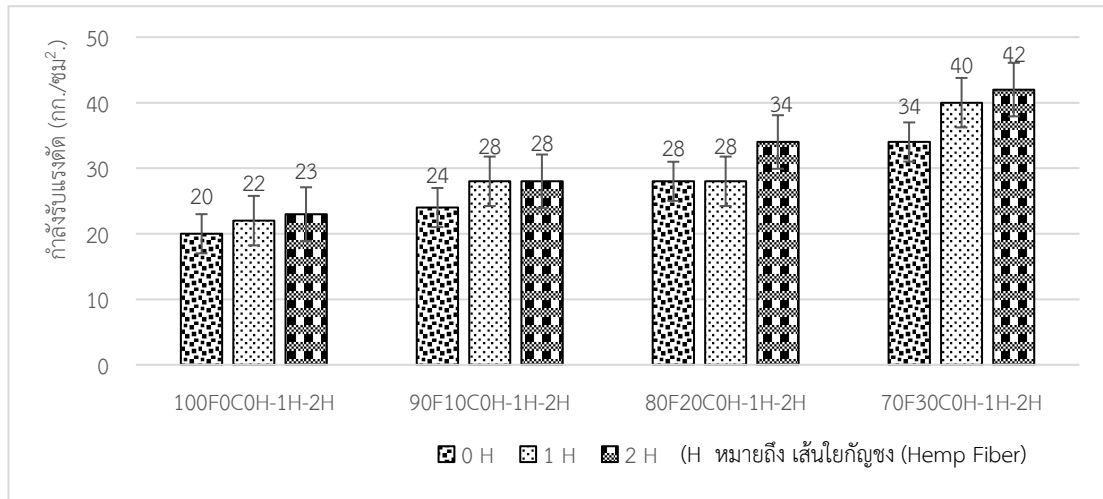
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง การใช้เถ้าลอย ร้อยละ 70- 100 โดยน้ำหนัก ผสมเถ้ากัญชา ร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก และผสมเส้นใยกัญชงร้อยละ 0-2 โดยน้ำหนัก พบว่าสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดสามารถรับแรงอัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 42 กก./ชม² คืออัตราส่วนผสม 70F30C2H ที่ใช้เส้นใยกัญชงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก รองลงมาที่อัตราส่วนผสม 70F30C1H มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 40 กก./ชม² และส่วนผสมที่ใช้เส้นใยกัญชง

ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 34 กก./ชม² ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาทุกอัตราส่วนผสมพบว่าความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดของแต่ละอัตราส่วนผสมมีค่าไม่แตกต่างกันมาก จึงสรุปได้ว่าการเติมเส้นใยกัญชงในส่วนผสมที่มากขึ้นทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดได้ดีขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Rahman et al., 2011) พบว่าการใช้ใยไฟเบอร์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ และ (Andic-Cakir et al., 2014) พบว่าการเสริมเส้นใยมะพร้าวในซีเมนต์มอร์ตาร์

ร้อยละ 0.40–0.75 จะทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดสูงขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ (รณกฤต กุลธวัชวงศ์ และคณะ, 2563) กล่าวว่าค่ากำลังดัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เสริมเส้นใยปานครนารายณ์ มีค่าสูงกว่าส่วนผสมควบคุมและมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราส่วนการผสมเส้นใยที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการใส่เส้นใยกัญชงในสัดส่วนดังกล่าวช่วยเพิ่ม

ความสามารถในการเสริมแรงของโครงสร้างจีโอพอลิเมอร์โดยเส้นใยทำหน้าที่เป็นตัวกระจายแรง และลดการแตกร้าว เส้นใยกัญชงยังเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการต้านทานแรงดึงของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ซึ่งช่วยเสริมสมบัติทางกลในระยะยาว ดังแสดงในรูปที่ 9

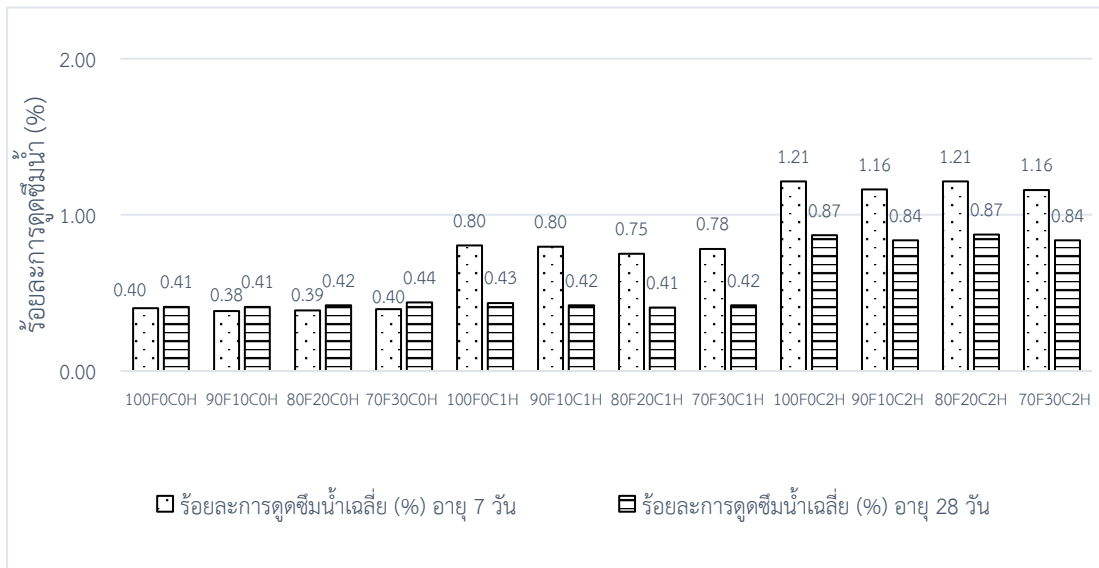


รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชา และเส้นใยกัญชงในส่วนผสมร้อยละ 0 - 2 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน

การทดสอบการดูดซึมน้ำ

เมื่อพิจารณาร้อยละการดูดซึมน้ำ พบว่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลชัดเจนต่อร้อยละการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ไม่ส่งผลต่อความพรุนในก้อนตัวอย่างมาก ส่วนการใช้เถ้าลอย เถ้ากัญชา และเส้นใยกัญชง ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความพรุนในจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สูงขึ้นด้วย โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.50 โมลาร์ ผสมเถ้าลอยเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชง ร้อยละ 10 - 30 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าส่วนผสม 70-100F0-30C0H ทดสอบตัวอย่างที่อายุ 7 และ 28 วัน จะเห็นได้ว่ามีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าไม่ต่างกันมาก เท่ากับ 0.38 – 0.44 ทั้งนี้เป็นผลจากการที่ไม่ได้ใส่เส้นใยกัญชงในส่วนผสมจึงทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าต่ำ เพราะตัวอย่างมีความทึบน้ำ และเกิดรูพรุนหรือโพรงในตัวอย่างน้อย เมื่อพิจารณาอัตราส่วนผสม 70-100F0-30C1H ในอัตราส่วนผสมดังกล่าวจะใส่เส้นใยกัญชง ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนผสมที่

ไม่ใส่เส้นใยกัญชง เท่ากับ 0.41-0.80 และอัตราส่วนผสม 70-100F0-30C2H เท่ากับ 0.84 – 1.21 พบว่าเกิดจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยกัญชงที่ใส่เข้าไปในส่วนผสม ทำให้เกิดโพรงและมีความพรุนมากขึ้นจากเดิม จึงมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การเพิ่มเถ้ากัญชาและเส้นใยกัญชงในปริมาณสูงขึ้นไปอาจช่วยให้มีการพัฒนาโครงสร้างภายใน และความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ แต่อาจเพิ่มความพรุนในตัวอย่าง ส่งผลให้ร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ (รณกฤต กุลธวัชวงศ์ และคณะ, 2563) สาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนโพรงอากาศสูงขึ้น เป็นผลมาจากโครงสร้างของเส้นใยที่มีลักษณะเป็นโพรงภายใน และโพรงอากาศนี้เองจะเป็นเส้นทางในการลำเลียงของเหลวเข้าสู่ชิ้นตัวอย่าง ผนวกกับเส้นใยธรรมชาติมีร้อยละการดูดซึมน้ำที่สูง จึงทำให้ร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน บ่งชี้ได้จากร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะตามอัตราส่วนโพรงอากาศตัวอย่างที่มีอายุมากขึ้นแสดงให้เห็นการลดลงของการดูดซึมน้ำ และการพัฒนาความแข็งแรงที่เด่นชัดขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลการทดสอบค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชา และเส้นใยกัญชงในส่วนผสม ร้อยละ 0 - 2 โดยน้ำหนักที่อายุ 28 วัน

การสรุปผลการวิจัยและประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

- กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบที่อัตราส่วนผสม 100F0C0H และ 90F10C0H อายุการบ่มที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 270 และ 258 กก./ cm^2 ตามลำดับ แปรผันตามปริมาณเถ้าลอย และเมื่อผสมเส้นใยกัญชงพบว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้เส้นใยกัญชงเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากปริมาณเส้นใยกัญชง ทำให้เกิดโพรงภายในตัวอย่างค่อนข้างมาก ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลง
- เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ไม่ใส่เส้นใยกัญชงและใส่เส้นใยกัญชงมากที่สุด คือ ร้อยละ 2 จะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยผสมเถ้ากัญชา และเส้นใยกัญชงที่อัตราส่วนผสม 70F30C2H มีค่าเท่ากับ 42 กก./ cm^2 และส่วนผสม 100F0C0H มีค่าเท่ากับ 20 กก./ cm^2 อายุการบ่มที่ 28 วัน ดังนั้นจะเห็นว่าการใส่เส้นใยกัญชงช่วยให้ความสามารถในการรับแรงอัดได้มากขึ้น
- การทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์เมื่อพิจารณาอายุการทดสอบที่ 7 วัน และ 28 วัน จะเห็นได้ว่าร้อยละการดูดซึมน้ำมีร้อยละการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของการผสมเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างของเส้นใยที่มีลักษณะเป็นโพรงภายใน จึงส่งผลให้ตัวอย่างมีอัตราส่วนโพรงอากาศที่สูงขึ้น ผนวก

กับเส้นใยธรรมชาติมีการดูดซึมน้ำที่สูง จึงทำให้ร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน บ่งชี้ได้จากร้อยละการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะ

ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

- เนื่องจากงานวิจัยมีอัตราส่วนผสมที่หลากหลาย และปริมาณวัสดุที่นำมาใช้ยังมีปริมาณที่น้อยทำให้ไม่สามารถทำตัวอย่างทดสอบได้ในปริมาณมากและทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ ได้ไม่ครบถ้วน ทำให้ไม่ทราบคุณสมบัติในด้านอื่น ๆ การวิจัยครั้งต่อไปสามารถออกแบบให้เป็นการวิจัยในเชิงลึกหรือเจาะลึกส่วนผสมแต่ละประเภท โดยใช้ข้อมูลวิจัยชิ้นนี้อ้างอิงได้
- การเตรียมเส้นใยกัญชงค่อนข้างยาก เนื่องจากต้องตัดให้ได้ขนาดตามที่กำหนดควรใช้เครื่องตัดกระดาษที่มีสเกลบอกขนาดมาใช้ในตัดเส้นใยกัญชง

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ พ.ศ. 2566 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผู้วิจัยขอขอบคุณนางสาวพิมพ์วิไล ประสมสี และนางสาวศุภรัตน์ เล่งวงศ์ นิสิตสาขาวิศวกรรมโยธา และอาจารย์

ทุกท่าน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ช่วยเหลือและแนะนำงานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพน พิพัฒน์ไพบูรณ์ อาจารย์คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์แก่ักญาในการทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

พภูมิพัท ราชคำ, ภาณุพงศ จันฤไชย, อุกฤษฏ โขศรี, ปิยรส ทะเสนฮต, คำภี จิตชัยภูมิ, และ ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี. (2566). *คุณสมบัติเบื้องต้นของแคนนาบิสคอนกรีตจากแกนกัญชาผสมเกล็ดอย*. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ. ครั้งที่ 28. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

รณกฤต กุลธวัชวงศ์, อำพล วงศ์ษา, วันชัย สะตะ, และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2563). *จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยที่มีเส้นใยปานศรนารายณ์เป็นส่วนผสม*. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 13(1), 90–100.

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. (2551). *การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน*. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. (KMUTT Research and Development Journal)*, 31(2), 371–381

Andic-Cakir, O., Sarikanat, M., Tufekci, H. B., Demirci, C., & Erdogan, U. H. (2014). Physical and mechanical properties of randomly oriented coir fiber-cementitious composites. *Composites: Part B*, 61, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.029>

American Society for Testing and Materials. (2001a). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in or (50mm) cube specimens: ASTM C109/C109M-99* [Unpublished manuscript]. Annual Book of ASTM Standards.

_____. (2006a). *ASTM C778-06 Standard Specification for Standard Sand* [Unpublished manuscript]. Annual Book of ASTM Standard.

_____. (2006b). *Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete ASTM C642-06* [Unpublished manuscript]. Annual Book of ASTM Standards.

_____. (2010a). *Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. ASTM C348-97.4* [Unpublished manuscript]. Annual Book of ASTM Standards.

Chindapasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composite, Vol. 29*, 224-229.

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

Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., & Goudet, L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 22, 2116-2123.

Fernandez-Jimenez., A., Palomo., A. & Criado, M. (2005). Microstructure Development of Alkali activated Fly Ash Cement: A Descriptive Model, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 1204-1209.

Li, Z., Wang, L., & Wang, X. (2004). Compressive and flexural properties of hemp fibred reinforced concrete. *Fiber Polymer, Fibers and Polymers, Vol. 5 No.3*, 187–197.

- Pantawee, S., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2017). Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminums sulfate $[Al_2(SO_4)_3]$ and hydrated lime $[Ca(OH)_2]$ treatment. *Construction and Building Materials*, *n156*, 435-442.
- Palomo, A., Grutzeck., M.W. & Blanco, M.T. (1999). Alkali-activated Fly Ashes: A Cement for The Future”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 8, 1323-1329.
- Rahman, MM., Rashid, MH., Hossain, MA., Hasan, MT., & Hasan, MK. (2011). Performance evaluation of bamboo reinforced concrete beam. *International Journal of Engineering & Technology*. *11*(4), 113–118.
- Van, Jaarsveld, J.G.S., Deventer, J.S.J., & Lukey, G.C. (2003). The Characterization of Source Materials in Fly Ash-based Geopolymers, *Materials Letters*, Vol. *57*, 1272-1280.