

การพัฒนากำลังต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ DEVELOPMENT OF FLEXURAL STRENGTH OF FIBER-CEMENT PLANK USING HYDRAULIC CEMENT AND GEOPOLYMER-BASED BINDERS

กรพิพัฒน์ จะนะ¹ พลภูมิ เทพศิลา² ธัญชนิต สนธิคุณ^{3,*} พองจันทร์ จิราลิต⁴ และ สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ⁵

^{1,2,3,4} หลักสูตรวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จ.เชียงใหม่
⁵ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพมหานคร
*Corresponding author; E-mail address: thanchanit2546@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา กำลังต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใยประเภทงานปูพื้น จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุประสาน โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นวัสดุหลักในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ ใช้ฝุ่นหินทดแทนทราย เสริมกำลังต้านแรงดัดด้วยเส้นใยมะพร้าว เส้นใยสังเคราะห์ และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) เปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยทำการทดสอบกำลังต้านแรงดัดและแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์ขนาด 4 x 4 x 16 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS EN 196-1 ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จำนวน 6 ตัวอย่าง และทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย ขนาด 10 x 2.5 x 45 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก. 1427-2561 โดยทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน จำนวน 4 ตัวอย่าง จากผลการศึกษาในครั้งนี้ ได้แสดงกลสมบัติและความทนทานของแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่ผลิตจากจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเปรียบเทียบกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ที่เป็นวัสดุประสานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ไฟเบอร์ซีเมนต์, จีโอพอลิเมอร์, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, เส้นใยมะพร้าว, เส้นใยสังเคราะห์

Abstract

This research investigates the enhancement of the flexural strength of fiber-cement planks for flooring applications using hydraulic cement and geopolymer-based binders. Fly ash from the Mae-Moh power plant and 1 M sodium hydroxide solution were utilized as primary materials for the geopolymer reaction. Crushed stone dust was used as a sand replacement, and various reinforcement materials, including coconut fibers, synthetic fibers, and glass fiber-reinforced polymer (GFRP), were incorporated to enhance flexural performance. The study evaluated the flexural and compressive strengths of 4 x 4 x 16

cm mortar specimens in accordance with BS EN 196-1 at curing ages of 3, 7, and 28 days for 6 specimens were tested. Additionally, the Modulus of Rupture of the 10 x 45 x 2.5 cm fiber-cement planks specimens in accordance with the TIS 1427-2561 at a curing age of 28 days for 4 specimens were tested. The results demonstrate the mechanical performance and durability of fiber cement boards made with hydraulic cement, compared to geopolymer-based alternatives. The results highlight the potential of geopolymer as an environmentally friendly alternative binder, contributing to sustainable construction materials.

Keywords: Fiber-Cement, Geopolymer, Hydraulic Cement, Coconut Fibers, Synthetic Fibers.

1. คำนำ

ในปัจจุบันแผ่นซีเมนต์เส้นใยเป็นวัสดุที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการก่อสร้าง สามารถใช้งานได้หลากหลาย เป็นทั้งแผ่นผนัง แผ่นฝ้า หรือ งานรองปู สามารถทำได้โดยเลือกตามความหนาที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน จากการศึกษาตามมาตรฐานแผ่นซีเมนต์เส้นใย : แผ่นเรียบ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1427 -2561 [1] แผ่นซีเมนต์เส้นใย หมายถึงผลิตภัณฑ์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ เส้นใย และน้ำ โดยอาจมีส่วนประกอบเพิ่มเติม เช่น สี สารผสมเพิ่ม และมวลรวม เป็นต้น ในการเสริมเส้นใยประเภทและปริมาณของเส้นใย มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นซีเมนต์เส้นใย ในปัจจุบันได้มีเส้นใยหลากหลายชนิดที่ใช้ในการผลิตแผ่นซีเมนต์เส้นใย ซึ่งจะส่งผลให้มีกำลังรับแรงดึงและกำลังต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใยสูงขึ้น [2]

กรณีการพัฒนาแผ่นซีเมนต์เส้นใยด้วยวัสดุเถ้าลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินอนุรัตน์ ภูวนาคำ [3] ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ได้เลือกใช้เส้นใยไฟเบอร์เป็นวัสดุเสริมแรง พัฒนากำลังต้านแรงดัด

ให้กับวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์ พบว่า เมื่อเพิ่มเส้นใยโพลีเอสเตอร์ในปริมาณที่เหมาะสม ส่งผลให้ค่ากำลังต้านแรงดัดของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น

การเสริมเส้นใยในมอร์ตาร์เป็นการพัฒนาวัสดุในรูปแบบหนึ่งที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งคล้ายกับหลักการเสริมเหล็กในคอนกรีตซึ่งสามารถเพิ่มคุณสมบัติในการรับแรงดึง และแรงดัดให้กับมอร์ตาร์ ในส่วนของคอนกรีตเสริมเส้นใย คือ คอนกรีตที่ผสมกับเส้นใยเพื่อช่วยรับแรงดึง ทำให้คอนกรีตสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้น โดยเส้นใยดังกล่าวจะกระจายอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต เมื่อเกิดแรงดึงขึ้นในเนื้อวัสดุเส้นใยจะทำหน้าที่ดึงรั้งเนื้อคอนกรีตเข้าไว้ด้วยกันและช่วยลดย่อแตกร้าวได้ ซึ่งการเสริมคอนกรีตด้วยเส้นใยสังเคราะห์ที่ทำจากกลุ่มพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ที่มีลักษณะเส้นใยสั้น ผิวด้านเรียบจึงเหมาะสมกับการยึดเนื้อคอนกรีตเข้าไว้ด้วยกัน [4] นอกจากนี้ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ใกล้เคียงกับเหล็ก ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และมีราคาถูกกว่า จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้าง แก้ไขปัญหาเพื่อแก้ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็ก [5]

สำหรับคอนกรีตที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธานั้น โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ มวลรวม และน้ำเป็นส่วนผสม ซึ่งมวลรวมได้แก่ หิน หยาบ กรวด เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด ทั้งนี้กระบวนการเกิดของหินที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และการนำมาใช้เป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีตนั้น จะต้องมีการแปรรูปหินให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งในกระบวนการแปรรูปหินนั้นจะก่อให้เกิดฝุ่นหิน จึงเป็นภาระให้แก่ผู้ประกอบการเพราะฝุ่นหินจัดเป็นกากอุตสาหกรรม ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนย้ายและการจัดเก็บ [6]

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนากำลังต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใยประเภทงานปูพื้น โดยใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์เป็นวัสดุประสานหลักในการผลิต รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ในการเสริมเส้นใยมะพร้าว เส้นใยสังเคราะห์ และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว เพื่อเป็นแนวทางพัฒนากำลังต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แผ่นซีเมนต์เส้นใย (ไฟเบอร์ซีเมนต์หรือซีเมนต์ไฟเบอร์หรือ Fiber reinforced cement)

แผ่นซีเมนต์เส้นใยเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพที่มีความเหมาะสมในการใช้งานตกแต่งได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ด้วยคุณสมบัติที่ทนทานต่อสภาพอากาศ ทั้งแดด ฝน และความชื้น ไม่ลามไฟ ช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับอาคาร ติดตั้งและขนส่งง่าย อายุการใช้งานยาวนาน ไม่ผุกร่อน สามารถปรับเปลี่ยนสี หรือเคลือบผิวได้หลากหลายรูปแบบ ไม่มีส่วนผสมของแร่ใยหิน (Asbestos-free) ปลอดภัยต่อสุขภาพ ทนทานต่อแรงกระแทกได้ดี จึงมีการนำวัสดุนี้นมาใช้ในการก่อสร้างกันอย่างแพร่หลาย โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกศึกษาแผ่นซีเมนต์เส้นใย ประเภทไม้เทียม งานรองปูพื้น ประเภทที่ถูกแสงแดด และน้ำโดยตรง ผิวด้านเรียบ ชนิดที่ 2 ตามมาตรฐาน มอก. 1427-2561 [1]

2.2 วัสดุประสาน (Cementitious materials)

วัสดุประสาน หรือ Binder วัสดุประสานที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างมาตั้งแต่อดีต คือ กลุ่มวัสดุซีเมนต์ โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1824 แต่กระบวนการผลิตนี้ได้สร้างมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมโดยการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งแก๊สนี้ได้เป็นตัวการหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้นในปัจจุบัน ในปัจจุบันประเทศไทยได้ลดการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปรับเปลี่ยนมาใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่มีสัดส่วนการใช้ปูนเม็ดลดลง โดยนำวัสดุอื่นมาผสมทดแทน เช่น หินปูน และ/หรือ วัสดุพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้ ในปัจจุบันได้มีวัสดุประสานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ วัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์ (Geopolymer materials) เกิดจากวัสดุตั้งต้นที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) ทำปฏิกิริยากับสารละลายด่างอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxides) และ/หรือ อัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkali silicates) ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางวิศวกรรม ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ไม่มีการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสามารถประยุกต์ใช้วัสดุตั้งต้นจากกากอุตสาหกรรมได้ และยังมีแนวโน้มที่ให้กำลังต้านแรงดัดสูงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [7,8]

2.3 เส้นใย (Fibers)

เส้นใยเป็นวัสดุรูปร่างเรียวยาว แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มเส้นใยธรรมชาติ จากต้นไม้อีกหลายชนิด เช่น ไม้ไผ่ มะพร้าว ผักตบชวา และกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์ ที่ได้จากการสังเคราะห์วัสดุอุตสาหกรรม เช่น เส้นใยเหล็ก หรือเส้นใยพอลิโพรพิลีน ที่สังเคราะห์จากปิโตรเลียม หากแบ่งตามมาตรฐานอเมริกัน ASTM C1116/C1116M-10a (2015) [9] จะแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

2.3.1 เส้นใยเหล็ก

เป็นเส้นใยที่นิยมนำมาใช้ในการเสริมกำลังในงานโครงสร้างเป็นอย่างมาก เนื่องจากเส้นใยเหล็กเป็นเส้นใยที่แข็งแรง มีกำลังรับแรงดึงสูง และเนื่องจากเส้นใยเหล็กมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายจึงทำให้มีการพัฒนาให้มีรูปร่าง ขนาด และกำลังรับแรงดึงที่หลากหลาย อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM A820/A820M

2.3.2 เส้นใยแก้ว

เป็นเส้นใยที่มีความได้เปรียบเส้นใยเหล็กอยู่ในหลายด้าน ทั้งด้านความคงทนเพราะเส้นใยแก้วนั้นทนต่อความชื้นได้มาก และด้านการตอบสนองต่ออุณหภูมิ เส้นใยแก้วนั้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ออุณหภูมิต่ำ สามารถทนความร้อนได้สูง อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา จึงนับเป็น ข้อได้เปรียบในงานออกแบบเชิงโครงสร้าง ความยาวของเส้นใยที่ใช้กันทั่วไปตั้งแต่ 13 ถึง 38 มิลลิเมตร และสามารถแบ่งกลุ่มจากขนาดเส้นใยได้ทั้งขนาดเล็ก (Micro fibers) และขนาดใหญ่ (Macro fibers) เส้นใยแก้วที่นำมาใช้ในการเสริมกำลัง อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C1666/ C1666M

2.3.3 เส้นใยสังเคราะห์

เส้นใยสังเคราะห์ที่ได้รับการพัฒนาและนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย แต่เส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมใช้งานมากที่สุด ได้แก่ เส้นใยไนลอน (Nylon) และเส้นใยพอลิโพรพิลีน ด้วยความหลากหลายของวัสดุกลุ่มนี้ ทำให้สามารถ

จำแนกกลุ่มของเส้นใยตามขนาดได้ 2 กลุ่ม คล้ายกับเส้นใยแก้ว คือ เส้นใยขนาดเล็ก (Micro fibers) ที่มีขนาดหน้าตัดเล็กกว่า 0.3 มิลลิเมตร และมีความยาวตั้งแต่ 12 - 20 มิลลิเมตร โดยถือว่าเส้นใยประเภทนี้ไม่นับเป็นเส้นใยสำหรับงานโครงสร้าง (Non-structural fibers) และเส้นใยอีกกลุ่มคือ เส้นใยขนาดใหญ่ ที่มีหน้าตัดใหญ่กว่า 0.3 มิลลิเมตร มีความยาวเส้นใยตั้งแต่ 25 มิลลิเมตร ขึ้นไป และถือว่าเส้นใยประเภทนี้เป็นเส้นใยสำหรับงานโครงสร้าง (Structural fibers)

2.3.4 เส้นใยธรรมชาติ

เป็นเส้นใยที่ได้จากสิ่งที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้คอนกรีต ต้นทุนต่ำ แต่ในทางกลับกัน เส้นใยจะมีคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลที่ไม่สม่ำเสมอ เส้นใยธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ เส้นใยไม้ไผ่ เส้นใยต้นไม้ เส้นใยป่าน และเส้นใยมะพร้าว

สำหรับเส้นใยที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติจากกามมะพร้าว เส้นใยมะพร้าวนี้นี้ เป็นเส้นใยที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก มีปริมาณมาก ไม่สลายพิษ เส้นใยมีความแข็งแรง ด้านทานแรงดึงได้ดี เนื่องจากมีลักษณะเป็นองค์ประกอบปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยจากพืชชนิดอื่น และยังทนทานต่อการทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ และการกัดกร่อนจากน้ำเค็มได้ดี [10] สำหรับเส้นใยสังเคราะห์นั้น เนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบันได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและมีราคาลดลง สามารถนำไปใช้งานก่อสร้างได้มากขึ้น โดยช่วยลดปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีต เพิ่มกำลังรับแรงของคอนกรีต มีน้ำหนักเบา และทนทานต่อการทำปฏิกิริยาเคมี

2.4 ฝุ่นหิน (Crushed Stone Dust)

ฝุ่นหินเป็นวัสดุพลอยได้จากการม่หิน ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับทราย แต่ด้วยรูปร่างที่มีเหลี่ยมมุมจากการม่ และปริมาณของฝุ่นละเอียด อาจส่งผลกระทบต่อความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่ก็สามารถเพิ่มความหนาแน่นและกำลังอัดได้ [11]

2.5 สารเคมีผสมเพิ่ม

การใช้สารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำอย่างมาก ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อช่วยเพิ่มกำลังต้านแรงอัด และปรับปรุงคุณสมบัติการไหล โดยเลือกใช้ Sika® ViscoCrete®-819 Extra ตามมาตรฐาน ASTM C494 ประเภท F เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ทั้งที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [12]

2.6 มาตรฐานแผ่นซีเมนต์เส้นใย

การพัฒนา กำลังต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอโพลิเมอร์นี้ อ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐานแผ่นซีเมนต์เส้นใย มอก. 1427-2561 [1] โดยกำหนดค่าโมดูลัสแตกร้าวโดยเฉลี่ย และค่าโมดูลัสแตกร้าวด้านขนานเส้นใย ที่มีค่าเป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย [1]

หน่วยเป็นเมกะพาสคัล

ชนิด	โมดูลัสแตกร้าว			
	ประเภทที่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรง		ประเภทที่ไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรง	
	ค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า	ตามแนวขนานเส้นใยไม่น้อยกว่า	ค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า	ตามแนวขนานเส้นใยไม่น้อยกว่า
1	4	2.8	4	2.8
2	7	4.9	7	4.9
3	13	9.1	10	7.0
4	18	12.6	16	11.2
5	24	16.8	22	15.4

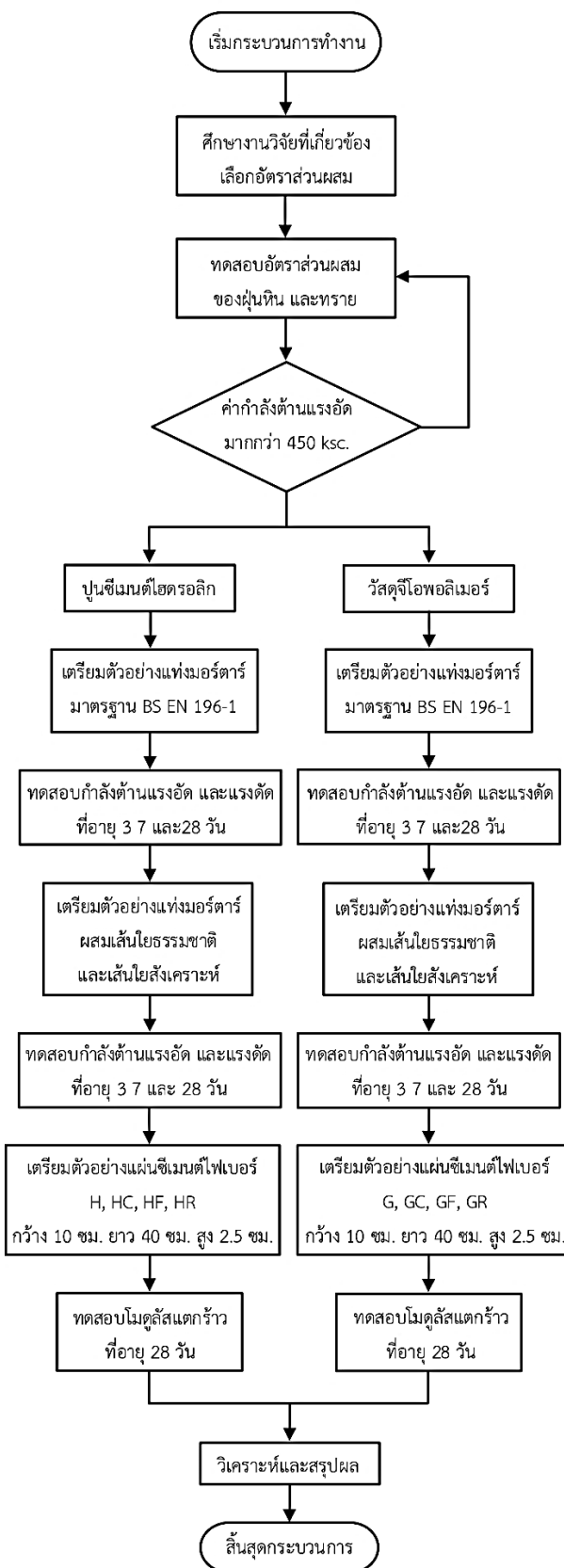
หมายเหตุ ประเภทที่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรง สภาวะขึ้นทดสอบด้วยน้ำ

ประเภทที่ไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรง สภาวะขึ้นทดสอบ ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ

3. ขั้นตอนการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากำลังต้านแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใย จึงได้เลือกใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด ศึกษาเปรียบเทียบกัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และเลือกใช้ฝุ่นหินทดแทนทราย เนื่องจากมีกำลังต้านแรงอัดและแรงดัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำในอัตราส่วนผสมเท่ากัน [6] โดยกำหนดอัตราส่วนผสมของวัสดุประสานต่อฝุ่นหิน 1 : 2 และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Sika® ViscoCrete®-819 Extra ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 0.31 สำหรับวัสดุประสานจีโอโพลิเมอร์ใช้เผื่อลอย : ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก 65 : 35 และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Sika® ViscoCrete®-819 Extra ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักวัสดุประสาน 100 กิโลกรัม โดยมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.29 โดยเตรียมตัวอย่างทดสอบ 2 ขนาด ได้แก่ แท่งมอร์ตาร์สำหรับการทดสอบกำลังต้านแรงดัดและแรงอัด ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ขนาด 4 x 4 x 16 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS EN 196-1 [13] เสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ในส่วนของการตัวอย่างแผ่นซีเมนต์เส้นใย สำหรับการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวที่อายุ 28 วัน ขนาด 10 x 2.5 x 45 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก. 1427-2561 [1] โดยได้เสริมเส้นใยมะพร้าว เส้นใยสังเคราะห์ และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว โดยแสดงลำดับขั้นตอนของการดำเนินการโครงการดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.2.1 วัสดุที่ใช้

1. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ชนิดใช้งานทั่วไป (GU) ตามมาตรฐานปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มอก. 2594-2556
2. ทรายแม่น้ำ (River Sand) ใช้เป็นมวลรวมละเอียดควบคุม มีค่า FM 2.94
3. ฝุ่นหิน (Crushed Stone Dust) จากโรงโม่หิน บริษัท สยามสโตน แอ็กกริเกรท จำกัด อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ โดยไม่ทำการปรับปรุงคุณภาพ ใช้เป็นมวลรวมละเอียดทดแทนทรายแม่น้ำ มีค่า FM 3.81
4. เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แบบไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับวัสดุซีโอพอลิเมอร์
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide; NaOH) เป็น โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด เกรดอุตสาหกรรม ใช้สำหรับการเตรียม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์
6. สารเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำอย่างง่าย Sika® Visco-Crete®-819 Extra ใช้เป็นสารเคมีผสมเพิ่มในการลดปริมาณน้ำ ในอัตราส่วน ร้อยละ 1 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และวัสดุซีโอพอลิเมอร์
7. เส้นใยมะพร้าว (Coconut Fibers) ขนาด 0.5-1.5 เซนติเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน [10]
8. เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fibers) FORTA-FERRO® Macro synthetic fibers ขนาดความยาว 2.25 นิ้ว (5.4 เซนติเมตร) เป็นการผสมผสานของเส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใยโพลิโพรพิลีนและเส้นใยไนลอน ฟิลาเมนต์แบบมัดเกลียว ในอัตราส่วน 4.15 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คอนกรีต โดยคิดเป็นร้อยละ 0.498 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน [14]
9. พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer; GFRP) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็น ขนาดเล็กที่สุดที่มีการผลิตใช้ในระดับอุตสาหกรรม แต่มีขนาดเล็กกว่าขนาด เล็กสุดของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ตามมาตรฐาน มอก. 2973-2562



เส้นใยมะพร้าว



เส้นใยสังเคราะห์



พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว*

*ใช้เตรียมตัวอย่างแผ่นพื้นซีเมนต์ไฟเบอร์เท่านั้น

รูปที่ 2 วัสดุเส้นใยมะพร้าว, เส้นใยสังเคราะห์ และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

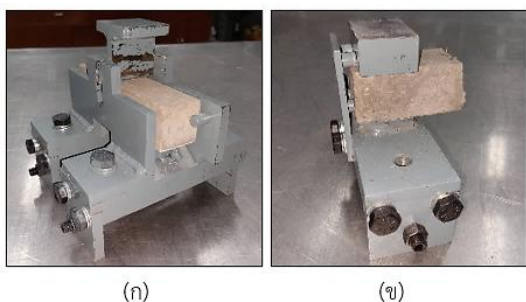
1. เครื่องทดสอบ UTM (Universal testing machine) ที่สามารถ ถ่ายแรงได้โดยทำให้เกิดการแอนตัวของชิ้นงานในอัตราคงที่ ใช้สำหรับ ทดสอบค่ากำลังต้านแรงอัดและกำลังต้านแรงดัด

2. แบบหล่อแท่งมอร์ตาร์ เพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังต้านแรงดัดและแรงอัด ที่อายุ 3 วัน และ 28 วัน ขนาด 4 x 4 x 16 เซนติเมตร มาตรฐาน BS EN 196-1 [13]

3. แบบหล่อแผ่นพื้นซีเมนต์เส้นใยเพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังต้านแรงดัด ที่อายุ 28 วัน ขนาด 10 x 2.5 x 45 เซนติเมตร มาตรฐาน มอก. 1427-2561 [1]

4. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังต้านแรงดัดมาตรฐาน BS EN 196-1 สำหรับทดสอบกำลังต้านแรงดัด ดังรูปที่ 3 (ก)

5. ชุดเครื่องมือทดสอบกำลังต้านแรงอัดมาตรฐาน BS EN 196-1 สำหรับทดสอบกำลังต้านแรงอัด ดังรูปที่ 3 (ข)



รูปที่ 3 ชุดเครื่องมือทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 196-1

3.2.3 สัญลักษณ์ของตัวอย่าง

สัญลักษณ์ของตัวอย่างที่มีชื่อเรียกตามวัสดุที่ใช้ของแต่ละตัวอย่างซึ่งประกอบไปด้วยตัวเลขขึ้นต้น และตามด้วยอักษร ดังต่อไปนี้

โดยที่ H- คือ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

G- คือ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุจีโอพอลิเมอร์

-C คือ ตัวอย่างทดสอบที่เสริมเส้นใยมะพร้าว

-F คือ ตัวอย่างทดสอบที่เสริมเส้นใยสังเคราะห์

-R คือ ตัวอย่างทดสอบที่เสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

3.3 อัตราส่วนผสม

3.3.1 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

จากการศึกษาและผลการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุประสาน มีอัตราส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์ ต่อ ฝุ่นหิน หรือ ทราย ในอัตราส่วน 1:2 ได้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.31 โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Sika® ViscoCrete®-819 Extra ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ โดยเสริมเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และเสริมเส้นใยสังเคราะห์ร้อยละ 0.498 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ และใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว จำนวน 3 เส้นต่อชิ้นตัวอย่างแผ่นซีเมนต์เส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ตามมาตรฐาน BS EN 196-1 จำนวน 6 ตัวอย่าง (กรัม)

Mix	ปูนซีเมนต์	ทราย	ฝุ่นหิน	W/C	C	F
H0	1280	2560	0	0.31	-	-
H	1280	0	2560	0.31	-	-
HC	1280	0	2560	0.31	64	-
HF	1280	0	2560	0.31	-	6.37

**ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Sika® ViscoCrete®-819 Extra 12.8 กรัม

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ตามมาตรฐาน มอก. 1427-2561 จำนวน 4 ตัวอย่าง (กรัม)

Mix	ปูนซีเมนต์	ฝุ่นหิน	W/C	C	F	R*
H	3750	7500	0.31	-	-	-
HC	3750	7500	0.31	187.5	-	-
HF	3750	7500	0.31	-	18.68	-
HR	3750	7500	0.31	-	-	12

*ใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว จำนวน 3 เส้น/แผ่น รวม 12 เส้น

**ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Sika® ViscoCrete®-819 Extra 37.5 กรัม

3.3.2 อัตราส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์

จากการศึกษาข้อมูลอัตราส่วนผสมของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ กำหนดให้ใช้อัตราส่วนวัสดุประสาน ต่อ ฝุ่นหิน ในอัตราส่วน 1:2 โดยที่วัสดุประสานประกอบด้วย เกล็ดย่อยร้อยละ 65 และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกร้อยละ 35 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ มีอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.29 ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Sika® ViscoCrete®-819 Extra ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักวัสดุประสาน เสริมเส้นใยมะพร้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักวัสดุประสาน เสริมเส้นใยสังเคราะห์ร้อยละ 0.498 ของน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว จำนวน 3 เส้นต่อชิ้น สำหรับตัวอย่างแผ่นซีเมนต์เส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์จากวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ตามมาตรฐาน BS EN 196-1 จำนวน 6 ตัวอย่าง (กรัม)

Mix	ปูนซีเมนต์	FA	ฝุ่นหิน	NaOH 0.5 M	C	F
G	448	832	2560	371.2	-	-
GC	448	832	2560	371.2	64	-
GF	448	832	2560	371.2	-	6.37

**ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Sika® ViscoCrete®-819 Extra 12.8 กรัม

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ตามมาตรฐาน มอก. 1427-2561 จำนวน 4 ตัวอย่าง (กรัม)

Mix	ปูนซีเมนต์	FA	ฝุ่นหิน	NaOH 0.5 M	C	F	R*
G	1312.5	2437.5	7500	1087.5	-	-	-
GC	1312.5	2437.5	7500	1087.5	187.5	-	-
GF	1312.5	2437.5	7500	1087.5	-	18.68	-
GR	1312.5	2437.5	7500	1087.5	-	-	12

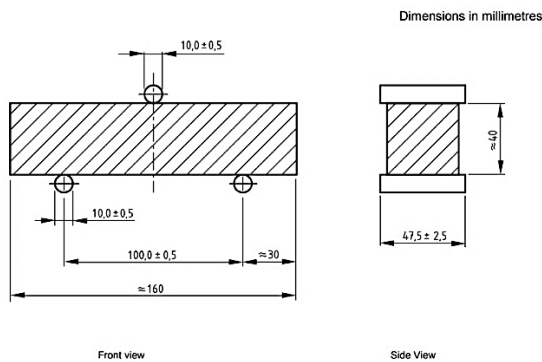
*ใช้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว จำนวน 3 เส้น/แผ่น รวม 12 เส้น

**ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม Sika® ViscoCrete®-819 Extra 37.5 กรัม

3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม

3.4.1 การทดสอบกำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์

1. เตรียมตัวอย่างทดสอบ ขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร ตามมาตรฐาน BS EN 196-1
2. บ่มตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิห้องทดสอบ ห่อตัวอย่างด้วยฟิล์มยืด รอการทดสอบที่อายุ 3 วัน และ 28 วัน
3. ทดสอบกำลังต้านแรงดัด จัดตำแหน่งแท่งตัวอย่างให้อยู่ระหว่างจุดรองรับทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 4 กดขึ้นทดสอบด้วยอัตราคงที่จนวิบัติ



รูปที่ 4 การจัดวางตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์ [13]



รูปที่ 5 การทดสอบกำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์

3.4.2 การทดสอบกำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์

นำตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบตามข้อ 3.4.1 วางบนชุดอุปกรณ์ทดสอบกำลังต้านแรงอัด ดังรูปที่ 6 จัดตำแหน่งขึ้นทดสอบและกดขึ้นทดสอบด้วยอัตราคงที่จนวิบัติ



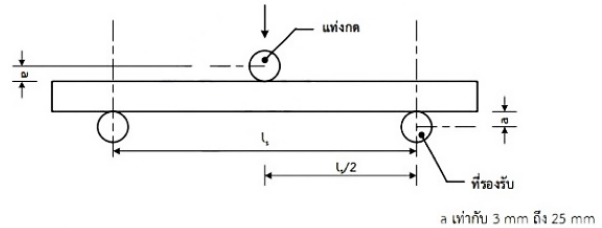
รูปที่ 6 การทดสอบกำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์

3.4.3 การทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย

1. เตรียมตัวอย่างขึ้นทดสอบ ขนาด $10 \times 2.5 \times 45$ เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก. 1427-2561

2. บ่มตัวอย่างทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้องทดสอบ ห่อแผ่นตัวอย่างด้วยฟิล์มยืด รอการทดสอบที่อายุ 28 วัน

3. ติดตั้งชิ้นตัวอย่างบนชุดอุปกรณ์ทดสอบ เพื่อทดสอบโมดูลัสแตกร้าว จัดวางตำแหน่งแท่งให้อยู่ระหว่างจุดรองรับทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 7 กดขึ้นตัวอย่างด้วยอัตราคงที่จนวิบัติ



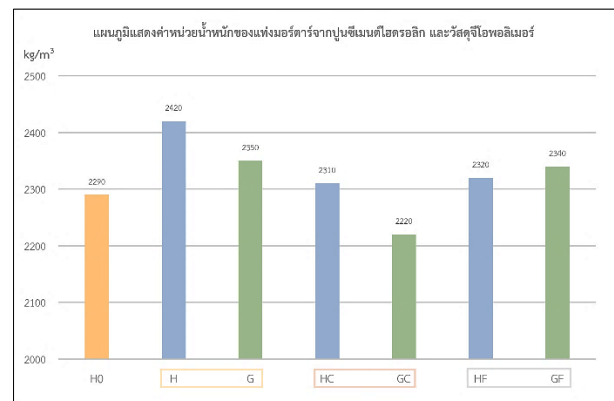
รูปที่ 7 การทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย [1]



รูปที่ 8 การทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย

4. ผลการวิจัย

4.1 หน่วยน้ำหนักของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์

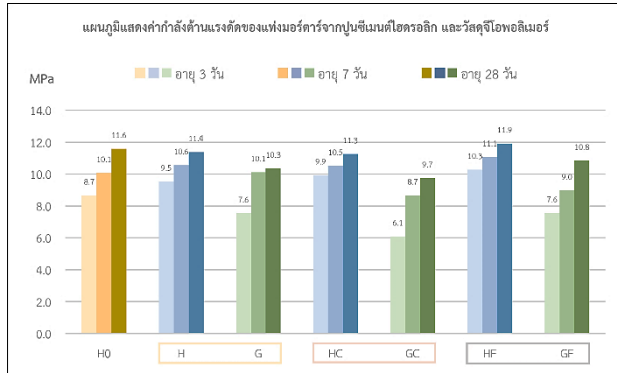


รูปที่ 9 ค่าหน่วยน้ำหนักของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์

จากรูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก พบว่าหน่วยน้ำหนักของ H0 ที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสมหลักมีค่าหน่วยน้ำหนัก 2290 kg/m³ น้อยกว่า H ที่ใช้ปูนหินเป็นมวลรวมทดแทนทราย ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนัก 2420 kg/m³ และมากกว่าค่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ G ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนัก 2350 kg/m³ และเมื่อเสริมเส้นใยมะพร้าวจะพบว่า HC มีค่าหน่วยน้ำหนักลดลง 2310 kg/m³ เช่นเดียวกับ GC ที่มีค่าหน่วยน้ำหนักเพียง 2220 kg/m³ ซึ่งน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย สำหรับ

ตัวอย่างที่เสริมเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า HF และ GF มีค่าหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกันที่ 2320 และ 2340 kg/m³ ตามลำดับ

4.2 ค่าเฉลี่ยกำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน

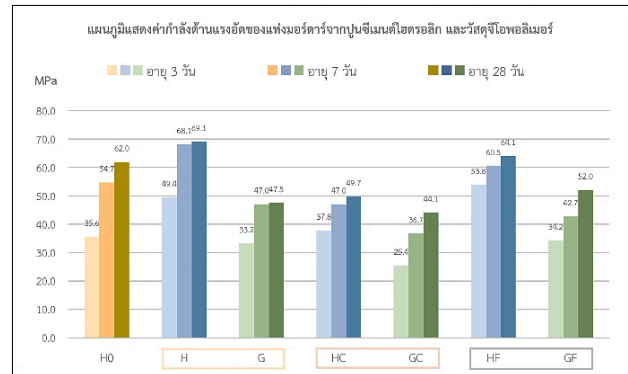


รูปที่ 10 กำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน

จากรูปที่ 10 พบว่าค่ากำลังต้านแรงดัดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่อายุ 3 วัน H0 มีค่ากำลังต้านแรงดัด 8.7 MPa ซึ่งน้อยกว่า H ที่ใช้ฝุ่นหินแทนที่ทรายที่มีค่ากำลังต้านแรงดัดสูงถึง 9.5 MPa และเมื่อเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า HC และ HF มีค่ากำลังต้านแรงดัด 9.9 และ 10.3 MPa เพิ่มขึ้นตามลำดับ ในส่วนของค่ากำลังต้านแรงดัดที่อายุ 7 วัน H0 มีค่ากำลังต้านแรงดัด 10.1 MPa เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่อายุ 3 วัน และยังคงน้อยกว่า H ที่ 10.6 MPa สำหรับตัวอย่างที่เสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า HC มีค่า 10.5 MPa ในขณะที่ HF มีค่ากำลังต้านแรงดัด 11.1 MPa สำหรับค่ากำลังต้านแรงดัดที่อายุ 28 วัน ของ H0 เท่ากับ 11.6 MPa มากกว่า H ที่ 11.4 MPa สำหรับตัวอย่างที่เสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า HC มีค่ากำลังต้านแรงดัด 11.3 MPa และ HF มีค่ากำลังต้านแรงดัด 11.9 MPa

ในส่วนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ พบว่า กำลังต้านแรงดัดที่อายุ 3 วัน G มีค่ากำลังต้านแรงดัด 7.6 MPa เมื่อเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า GC มีค่าน้อยลงเหลือ 6.1 MPa และ GF ที่ 7.6 MPa สำหรับกำลังต้านแรงดัดที่อายุ 7 วัน G มีการพัฒนากำลังต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นเป็น 10.1 MPa เมื่อเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า GC และ GF ก็มีแนวโน้มที่มีค่ากำลังต้านแรงดัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย คือ 8.7 และ 9.0 MPa ตามลำดับ สำหรับค่ากำลังต้านแรงดัดที่อายุ 28 วัน G มีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจากที่อายุ 7 วัน คือ 10.3 MPa และตัวอย่างที่เสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่ายังคงมีค่ากำลังต้านแรงดัดใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย คือ 9.7 และ 10.8 MPa ตามลำดับ

4.3 ค่าเฉลี่ยกำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน

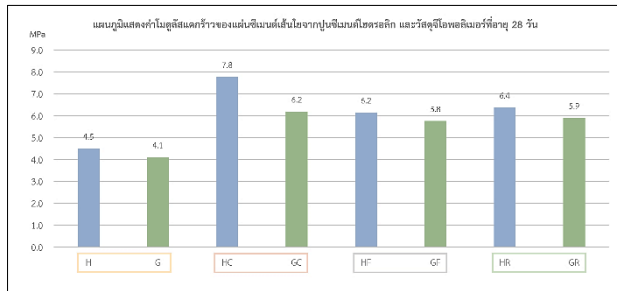


รูปที่ 11 กำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 3 7 และ 28 วัน

จากรูปที่ 11 พบว่าค่ากำลังต้านแรงอัดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่อายุ 3 วัน ของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก H0 มีค่ากำลังต้านแรงอัด 35.6 MPa ซึ่งน้อยกว่า H มีค่ากำลังต้านแรงอัด 49.4 MPa เมื่อทำการเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า HC มีค่ากำลังต้านแรงอัด 37.8 MPa HF มีค่ากำลังต้านแรงอัด 53.8 MPa ในส่วนของค่ากำลังต้านแรงอัดที่อายุ 7 วัน ของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก H0 มีค่ากำลังต้านแรงอัด 54.7 MPa ซึ่งน้อยกว่า H มีค่ากำลังต้านแรงอัด 68.1 MPa เมื่อทำการเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า HC มีค่ากำลังต้านแรงอัด 47.0 MPa และ HF มีค่ากำลังต้านแรงอัด 60.5 MPa และค่ากำลังต้านแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก H0 มีค่ากำลังต้านแรงอัด 62.0 MPa ซึ่งน้อยกว่า H มีค่ากำลังต้านแรงอัด 69.1 MPa เมื่อทำการเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า HC มีค่ากำลังต้านแรงอัด 49.7 MPa และ HF มีค่ากำลังต้านแรงอัด 64.1 MPa

ในส่วนของวัสดุจีโอพอลิเมอร์พบค่ากำลังต้านแรงอัดที่อายุ 3 วัน ของ G มีค่ากำลังต้านแรงอัด 33.2 MPa เมื่อทำการเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า GC มีค่ากำลังต้านแรงอัด 25.4 MPa และ GF มีค่ากำลังต้านแรงอัด 34.2 MPa ในส่วนของค่ากำลังต้านแรงอัดที่อายุ 7 วันของ G มีค่ากำลังต้านแรงอัด 47.0 MPa เมื่อทำการเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า GC มีค่ากำลังต้านแรงดัด 36.7 MPa GF มีค่ากำลังต้านแรงดัด 42.7 MPa และค่ากำลังต้านแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของ G มีค่ากำลังต้านแรงอัด 47.5 MPa เมื่อทำการเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า GC มีค่ากำลังต้านแรงดัด 44.1 MPa GF มีค่ากำลังต้านแรงดัด 52.0 MPa

4.4 ค่าเฉลี่ยโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 12 โมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่อายุ 28 วัน

จากรูปที่ 12 พบว่าค่าโมดูลัสแตกร้าวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่ากำลังต้านแรงดัด 4.5 MPa ซึ่งมากกว่า G ซึ่งมีค่ากำลังต้านแรงดัด 4.1 MPa การเสริมเส้นใยมะพร้าว พบว่า HC มีค่ากำลังต้านแรงดัด 7.8 MPa และ GC มีค่ากำลังต้านแรงดัด 6.2 MPa และการเสริมเส้นใยสังเคราะห์ พบว่า HF มีค่ากำลังต้านแรงดัด 6.2 MPa และ GF มีค่ากำลังต้านแรงดัด 5.8 MPa ในส่วนการเสริมพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว พบว่า HR มีค่ากำลังต้านแรงดัด 6.4 MPa และ GR มีค่ากำลังต้านแรงดัด 5.9 MPa

5. วิเคราะห์ผลการวิจัย

5.1 หน่วยน้ำหนักของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์

จากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักของวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก การใช้ฟูนหินมาทดแทนทรายจะได้ค่าน้ำหนักที่มากกว่า และการเสริมเส้นใยมะพร้าวจะทำให้ค่าน้ำหนักของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์นั้นลดลง ส่วนการเสริมเส้นใยสังเคราะห์จะทำให้ค่าน้ำหนักของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกลดลง และวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ได้นั้นใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ทำการเสริมเส้นใย

5.2 ค่ากำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์

จากการทดสอบพบว่ากำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ใช้ฟูนหินทดแทนทรายมีค่ากำลังต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นซึ่งจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ฟูนหินทดแทนทรายทำให้มีค่ากำลังต้านแรงดัดเพิ่มขึ้น การเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้กำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพิ่มขึ้น แต่ในส่วนของการเสริมเส้นใยสังเคราะห์ในวัสดุจีโอพอลิเมอร์นั้นพบว่า การเสริมเส้นใยในวัสดุจีโอพอลิเมอร์นั้นทำให้กำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากวัสดุจีโอพอลิเมอร์นั้นค่าลดลงจากเดิม ซึ่งอาจเกิดจากการเสริมเส้นใยในปริมาณที่ไม่เหมาะสม และเมื่อเปรียบเทียบกำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์พบว่ากำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ทำการเสริมเส้นใย G มีค่ากำลังต้านแรงดัดน้อยกว่าในช่วงต้นที่อายุ 3 วัน

และมีค่ากำลังต้านแรงดัดใกล้เคียงกับกำลังต้านแรงดัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก H0 และ H ที่อายุ 7 และ 28 วัน

5.3 ค่ากำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์

จากการทดสอบพบว่าค่ากำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ไม่ทำการเสริมเส้นใย H0 มีค่าน้อยกว่า H ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการใช้ฟูนหินทดแทนทรายทำให้มีค่ากำลังต้านแรงอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ทำการเสริมเส้นใย G พบว่ามีค่ากำลังต้านแรงอัดน้อยกว่า H0 และ H ในส่วนของการเสริมเส้นใยมะพร้าวพบว่าค่ากำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลงจากเดิม และการเสริมเส้นใยสังเคราะห์พบว่าค่ากำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่าใกล้เคียงจากเดิม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเสริมเส้นใยมะพร้าวทำให้ค่ากำลังอัดลดลงและเส้นใยสังเคราะห์ทำให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงจากเดิม

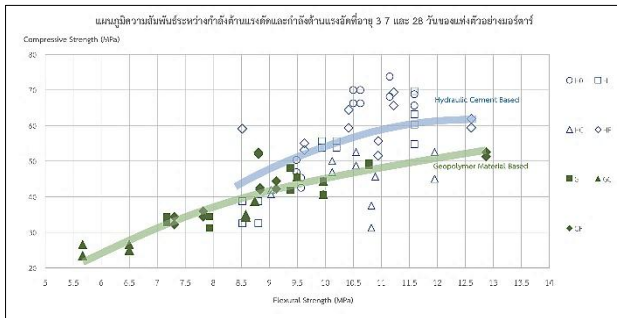
5.4 ค่าโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์

จากการทดสอบพบว่าโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าโมดูลัสแตกร้าวมากกว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และการเสริมเส้นใยมะพร้าว เส้นใยสังเคราะห์ และพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ทำให้โมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นที่อายุ 28 วัน

5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์

จากผลการทดสอบเมื่อเทียบตัวอย่างกับโมดูลัสแตกร้าวชั้นคุณภาพที่ 2 ของแผ่นซีเมนต์เส้นใย ตามมอก. 1427-2561 พบว่าตัวอย่างทดสอบของแท่งมอร์ตาร์ผ่านชั้นคุณภาพที่ 2 ยกเว้น GC ไม่ผ่านชั้นคุณภาพในช่วงต้นที่อายุ 3 วัน ส่วนปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีแนวโน้มที่ให้กำลังต้านแรงดัดสูงกว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และมีค่ากำลังต้านแรงดัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ด้วยเส้นใย แต่วัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังต้านแรงดัดที่ลดลงเมื่อแทนที่ด้วยเส้นใย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสัดส่วนเส้นใยที่เลือกใช้ โดยจากงานวิจัยของ อนุรัตน์ ภูวนาค [3] ที่ทำการทดลองโดยใช้เส้นใยไม้ไผ่ ได้กำลังต้านแรงดัดสูงสุดของวัสดุจีโอพอลิเมอร์เมื่อแทนที่เส้นใยไม้ไผ่ที่ร้อยละ 3 และลดลงเมื่อแทนที่เส้นใยไม้ไผ่ที่ร้อยละ 5 หรืออาจเป็นผลมาจากขนาดของตัวหินฟูนมีค่า Fineness Modulus (FM) เท่ากับร้อยละ 3.81 เมื่อเปรียบเทียบกับทรายในส่วนผสมของ H0 มี FM เท่ากับร้อยละ 2.97 จึงเห็นได้ว่าฟูนหินที่ใช้ค่อนข้างหยาบ และในส่วนของการทดสอบของแผ่นซีเมนต์เส้นใยนั้นพบว่าตัวอย่างทดสอบแผ่นซีเมนต์เส้นใยนั้นไม่ผ่านชั้นคุณภาพที่ 2 ยกเว้น HC ที่มีค่าโมดูลัสแตกร้าว 7.8 MPa และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีแนวโน้มที่โมดูลัสแตกร้าวสูงกว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และมีค่าโมดูลัสแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่ด้วยเส้นใย ส่วนวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีค่าโมดูลัสแตกร้าวที่เพิ่มขึ้น

เมื่อแทนที่ด้วยเส้นใยและมีค่าโมดูลัสต่ำกว่าใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
เฉลี่ยน้อยกว่า 10.8 %



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านแรงดัดและกำลังต้านแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วันของแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์

6. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่า หน่วยน้ำหนักของแท่งมอร์ตาร์จากวัสดุจีโอพอลิเมอร์น้อยกว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก การใช้ฟุ้งหินทดแทนทรายจะเพิ่มหน่วยน้ำหนัก ส่วนการเสริมเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยสังเคราะห์ทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง โดยเฉพาะเส้นใยสังเคราะห์ที่ทำให้หน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่เสริมเส้นใย สำหรับการใช้ฟุ้งหินทดแทนทรายของแท่งมอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทำให้กำลังต้านแรงดัดเพิ่มขึ้น การเสริมเส้นใยมะพร้าวทำให้กำลังต้านแรงอัดของแท่งมอร์ตาร์ลดลงทั้งในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ขณะที่การเสริมเส้นใยสังเคราะห์แทบไม่เปลี่ยนแปลง ผลการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวพบว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าโมดูลัสแตกร้าวมากกว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ และการเสริมเส้นใยช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสแตกร้าวให้ทั้งในปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกให้ประสิทธิภาพดีกว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ในหลาย ๆ ด้าน โดยเฉพาะค่ากำลังต้านแรงดัดและโมดูลัสแตกร้าว ในขณะที่วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถปรับปรุงได้ด้วยการเสริมเส้นใย แต่ยังม่ีข้อจำกัดในการเลือกใช้ปริมาณเส้นใยที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดเชียงใหม่ ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย กาฬสินธุ์ และเจ้าหน้าที่นักวิชาการศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดเชียงใหม่ ที่ให้ข้อเสนอแนะ แนวคิด และที่ช่วยสละเวลาคัดทดสอบชิ้นตัวอย่างทดสอบสำหรับงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท เซลลูลาร์บีม (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณรสสุคนธ์ เหล่าไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนวัสดุเส้นใย FORTA-FERRO[®] Macro synthetic fibers ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท สยามสโตน แอ็กกริเกรท จำกัด อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนฟุ้งหิน ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวุฒิพงศ์ เครืองค์ปิง ผู้แทนฝ่ายขายผลิตภัณฑ์เคมีประเภทน้ำยาซีก้า ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และบริษัท ซีก้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนสารเคมีผสมเพิ่ม Sika[®]ViscoCrete[®]-819 Extra ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2563). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1427-2561 แผ่นซีเมนต์เส้นใย : แผ่นเรียบ. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 137 ตอนพิเศษ 22 ง วันที่ 29 มกราคม พุทธศักราช 2563.
- [2] นพรัตน์ ฤทธิ์กระจ่าย, สฤกษ์ พรมสายใจ, นิวัติ คลังสีดา, เสาวลักษณ์ ยอดวิญญูวงศ์ และสุระเชษฐ์ ตุ่มมี (2564). ผลของเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของไฟเบอร์ซีเมนต์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ระดับชาติ ครั้งที่ 2 ในวาระครบ 65 ปี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.
- [3] อนุรัตน์ ภูวนาคำ (2564). การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์จากโรงขยะไฟฟ้าถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก, สาขาวิศวกรรมเซรามิก, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] สิริพงศ์ เกิดบุญมา, นิตพงษ์ ประภาพันธุ์กุล และวิฑิต ปานสุข (2563). พฤติกรรมรับการดัดของคานคอนกรีตเสริมเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้เส้นใยพอลิโพรพิลีน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563.
- [5] วรากร อุ่นสมบัติ, ชูชัย สุจิรวกุล และประวีณ ชมปรีดา (2566). การศึกษาแรงยึดเหนี่ยวของแท่ง GFRP กับคอนกรีต และการรับแรงภายในของคานคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยเหล็กเสริมและแท่ง GFRP. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566.
- [6] ชูเกียรติชูสกุล และขวัญชีวา หยงสตาร์ (2561). กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้หินฟุ้งแทนทราย. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, ปีที่10, ฉบับที่ 2.
- [7] พงจันทร์ จิราสิต, สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และอดิสร เพียรสุวรรณ. (2566). สมบัติเชิงกลของ Alkali-activated Fly Ash Concrete ในงานถนน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566.
- [8] Fongjan Jirasit, Chemical, mechanical and microstructural properties of alkali activated cement, IffB, Institut für Baustoffe, Leibniz-Universität Hannover, Diss., 2010.

- [9] American Society for Testing and Materials (2015). *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete*. (C1116/C1116M – 10a (2015)). ASTM INTERNATIONAL.
- [10] มะรอฟา มามะ, กฤติยา อ่องวุฒินันท์, อรรถเดช อับดุลมาติน, มูฮัมหมัดซารีฟ สนิทวาที และเพ็ญพิชชา สนิทอินทร์ (2565). การศึกษาแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยมะพร้าวเพื่อใช้ในงานก่อสร้าง. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565.
- [11] ชูเกียรติชูสกุล และขวัญชีวา หยงสตาร์. (2561). กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้หินปูนแทนทราย. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, ปีที่10, ฉบับที่ 2.
- [12] Sika Thailand (2024). *Sika®ViscoCrete®-819 Extra*. December 2024.
- [13] BRITISH STANDARD (2005). *BS EN 196-1-2005 : Methods of testing cement*, February 2005.
- [14] Forta Corp (2010). *FORTA-FERRO® Guide Specification for Synthetic Fiber-Reinforced Portland Cement Concrete Slabs on Ground*. July 2010.