

คุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

พัชราภรณ์ รักคบ^{1*} ธนาภรณ์ รักคบ² และ อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้เส้นใยปอ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้มาจากการเกษตร ในการนำมาเป็นส่วนประกอบเสริมให้กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ในสัดส่วนเท่ากับ 1%, 3% และ 5% ของน้ำหนัก ซึ่งเส้นใยปอจะทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปผสม จากผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางกายภาพทางด้าน ค่าความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวและเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ในทางกลับกัน จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้ดีกว่าเส้นใยปอที่ไม่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสาเหตุหลักคือการเสื่อมสลายของเส้นใยปอที่เกิดจากการความเป็นด่าง ทำให้บริเวณส่วนที่ติดต่อกันระหว่างเส้นใยปอและเมทริกซ์เกิดช่องว่าง ความสามารถในการยึดเกาะกันจึงลดลง ดังนั้นการปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะเป็นการทำให้ส่วนที่อ่อนแอต่อต่างของเส้นใยปอถูกจำกัด ทำให้เส้นใยปอมีเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งช่วยลดความสามารถในการดูดซึมน้ำและความชื้นและขยายตัวลดลงเมื่อสัมผัสความชื้น ไม่ก่อให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างภายใน ส่งผลให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตมีความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 107%, 276% และ 311% แต่สำหรับตัวอย่างทดสอบเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเพียง 19%, 133% และ 236% ตามสัดส่วนเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์

คำสำคัญ: คอมโพสิต, เส้นใยเซลลูโลสจากพืช, จีโอโพลิเมอร์

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ รองศาสตราจารย์ ดร. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ +669 5669 5653 อีเมล: patcha_rakkob@hotmail.com



Mechanical Properties of Geopolymer Composite Reinforced Kenaf Fiber

Patcharaporn rakkob^{1*} Tanakorn rakkob² and Avirut Chinkulkijniwat³

Abstract

This paper describes the physical and mechanical properties of geopolymer composite reinforced with kenaf fiber (1, 3, and 5 wt.%). Kenaf fiber was surface treated using sodium hydroxide 2M with 24 hours prior to mixing process. Test results showed that density, porosity and water absorption of geopolymer composites mixed with surface-treated kenaf fiber and those mixed with surface-untreated kenaf fiber are almost identical. Interfacial adhesion between fibers and matrix plays a critical role on mechanical performance of the natural fibers reinforced geopolymer composites. The degradation of reinforced fibers due to alkaline attack may result in existence of micro-cracks at the fiber and matrix interface. As surface treatment can diminish the alkaline sensitive component from the kenaf fiber and increase the surface roughness, the treated kenaf fiber geopolymer composite yields the mechanical properties better than the untreated kenaf fiber geopolymer composite does. Comparing with the geopolymer without fiber reinforcement, the flexural strength of the treated kenaf fiber geopolymer composites are 107%, 276% and 311% and that of untreated kenaf fiber geopolymer composites are 19%, 133%, 236% for 1%, 3% and 5% fiber, respectively.

Keywords: Composite, Cellulose fiber, Geopolymer

¹ Master student, School of Civil engineering, Faculty Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

² Doctoral student, School of Civil engineering, Faculty Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

³ Associate Professor Dr., School of Civil engineering, Faculty Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author, Tel. +669 5669 5653 e-mail: patcha_rakkob@hotmail.com

1. บทนำ

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานทางเลือกใหม่ เกิดจากการนำวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ที่มีองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ เป็นซิลิกาและอะลูมินา เช่น ดินขาว, ดินขาวเผาแคลไซน์, แกลลอย, และอื่น ๆ มากระตุ้นด้วยสารละลายอัลคาไลน์ที่มีความเข้มข้นสูง (โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, และโซเดียมซิลิเกต) เกิดเป็นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ซิลิกอน และอะลูมิเนียมออกไซด์ จัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างปิรามิดฐานสามเหลี่ยม ที่มีการใช้ออกซิเจนออกไซด์ร่วมกัน กลายเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงสามารถก่อตัว แข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้ดี ซึ่งมีสมรรถนะเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์ยังโดดเด่นในด้านความทนทานต่ออุณหภูมิสูง, ซัลเฟต, กรดและด่าง [1-6] สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีข้อดีหลายประการ จีโอโพลิเมอร์ยังคงมีข้อเสียเช่นเดียวกับวัสดุซีเมนต์ทั่วไป คือมีลักษณะเฉพาะเมื่อเกิดการวิบัติที่เป็นพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (Tensile strength) และความต้านทานต่อการแตกร้าวต่ำ (Fracture toughness) [7] ทำให้มีข้อจำกัดสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างบางประเภท ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้วัสดุเสริมแรง คล้ายกับนวัตกรรมของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite materials) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งาน

วัสดุซีเมนต์คอมโพสิต (Cement composite materials) ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นในหลายปีที่ผ่านมา เส้นใยสังเคราะห์มักถูกนำมาใช้เป็นหนึ่งในส่วนประกอบเสริมแรง สำหรับผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและกายภาพของปูนซีเมนต์ให้ดีขึ้น ทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสะดวกคือการใช้เส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืช มาทดแทนวัสดุใยสังเคราะห์ซึ่งมีราคาแพง การใช้เส้นใยเซลลูโลสจากพืชถือว่าประสบความสำเร็จสำหรับใช้เป็นเส้นใยทางเลือก เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมีคุณสมบัติทางกลและกายภาพที่น่าสนใจ และยังสามารถหาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย [8-13] อีกทั้งพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมีความ

ขรุขระโดยธรรมชาติ ทำให้สมรรถภาพในการยึดเกาะมีมากเพียงพอที่จะช่วยปรับปรุง คุณสมบัติทางกลของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตให้ดีขึ้น ในด้านความเหนียว, ความแกร่ง, กำลัง, และความต้านทานต่อแรงกระแทก หรือแม้กระทั่งช่วยลดการยึดหดตัว ลดการนำความร้อน [14] จากคุณสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้ ทำให้วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ทางด้านวัสดุก่อสร้าง หรือวัสดุทางด้านสถาปัตยกรรมในส่วนต่าง ๆ ของบ้าน หรืออาคาร ตัวอย่างเช่น ไม้เทียม, ผนัง, ฝ้า, อิฐ, และกระเบื้องมุงหลังคา เป็นต้น

ในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ (Geopolymer composite materials) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ในขณะที่การวิจัยโดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในการศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นหลัก ซึ่งประสิทธิภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ด้านคุณสมบัติทางกล มีแนวโน้มไม่ได้แตกต่างกับวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ในปี ค.ศ. 2011 Abdullah และคณะ [11] พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดรอยแตกร้าวของซีเมนต์ได้ ที่ปริมาณความเหมาะสมของเส้นใยมะพร้าวเท่ากับ 9% ของน้ำหนัก อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในเรื่องความทนทานต่อการใช้งานในระยะยาวของผลิตภัณฑ์ที่ได้อ้างถึงข้างต้นนี้ เนื่องจากการนำเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาประยุกต์ใช้กับวัสดุซีเมนต์เส้นใยมีส่วนช่วยเพิ่มความพูนให้กับวัสดุ และด้วยธรรมชาติของเส้นใยเซลลูโลสนั้น มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี เมื่อนำเส้นใยมาเสริมกับวัสดุคอมโพสิตที่มีความเป็นด่าง เช่น ปูนซีเมนต์หรือจีโอโพลิเมอร์ อาจทำให้สารละลายต่างถูกดูดซึมเข้าไป เป็นผลทำให้เส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสเกิดการเสื่อมสลายหรือได้รับความเสียหายได้ [15-17] จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา Alomayri และ Low [18] อธิบายถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีการเสริมกำลังด้วยเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลส เกิดขึ้นจากพันธะที่ยึดเหนี่ยวกันระหว่างเส้นใยกับโครงข่ายภายในวัสดุ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยจึงมีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุดังกล่าว แต่สำหรับวัสดุจีโอ

โพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ยังคงพบว่ามีรายงานการวิจัยที่ค่อนข้างน้อย ที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยก่อนนำมาเสริมกำลังให้กับวัสดุนี้

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาค้นคว้าพัฒนาคุณสมบัติทางกลและกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุน ค่าการดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงดัด ของวัสดุจีโอโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ โดยใช้วิธีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยต่าง ก่อนนำมาใช้เป็นส่วนประกอบเสริมแรงในวัสดุจีโอโพลีเมอร์ ในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้เส้นใยเซลลูโลสจากปอ เพราะสามารถหาได้ง่ายและมีคุณสมบัติทางกลที่น่าสนใจ พร้อมทั้งใช้ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะภายในของโครงสร้างในบริเวณที่เกิดการวิบัติ ซึ่งชิ้นส่วนตัวอย่างจะถูกนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบ [19-21]

2. วิธีการศึกษา

การทดสอบของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุจีโอโพลีเมอร์คอมโพสิต

2.1 วัสดุ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (FA)

องค์ประกอบทางเคมี	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
ร้อยละ	49.32	12.96	15.64	5.79	2.94	7.29	2.83	2.83	7.29

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเส้นใยปอ [22]

Composition	Cellulose (%)	53-57
	Hemicellulose (%)	15-19
	Lignin (%)	5.9-9.3
	Ash (%)	2-5
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)	400-700
	Young modulus (GPa)	1.7-2.1
Density (g/cm ³)		1.3
Average diameter (µm)		50-150

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุจีโอโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาตินี้ ประกอบไปด้วย เถ้าลอย (Fly ash, FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งใช้เป็นวัสดุหลักในการสังเคราะห์จีโอโพลีเมอร์ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแสดงไว้ดังตารางที่ 1 และเส้นใยเซลลูโลสจากปอ (Kenaf fiber) ที่มีคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 2 โดยทำการแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดที่หนึ่งจะเป็นเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว (Untreated kenaf fiber) ชุดที่ 2 จะเป็นเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว (Treated kenaf fiber) โดยการแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนสารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline activator, L) จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์แบบกลีตผสมกับน้ำกลั่น (Distilled water) ให้ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ จากนั้นพักเก็บไว้ในห้องเก็บสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่างสารกระตุ้นอัลคาไลน์กับเถ้าลอย (L/FA) ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เท่ากับ 0.35

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างวัสดุจีโอโพลีเมอร์คอมโพสิตเพื่อทำการทดสอบในแต่ละชุดทดสอบจะใช้ปริมาณเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5% ต่อน้ำหนักของเถ้าลอย และตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์เฟสที่ไม่มีเสริมเส้นใยปอเป็นตัวอย่างอ้างอิง (GP) โดยมีสัดส่วนผสมในการเตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 3 ชุดตัวอย่างทดสอบ Kx (x เป็น 1, 3 และ 5) แสดงถึงปริมาณเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5%) จะเป็นจีโอโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอแบบไม่ได้ปรับปรุงสภาพพื้นผิว ส่วนชุดตัวอย่างทดสอบ TMx จะเป็นจีโอโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอแบบปรับปรุงสภาพ

พื้นผิว โดยจะมีการเติมน้ำเพิ่มเพื่อให้การกระจายตัวของเส้นใยภายในคอมโพสิตดีขึ้น และทำงานง่าย

การเตรียมตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ จะเริ่มจากการนำเอาลวดและเส้นใยปอมาผสมกันแบบแห้งด้วยมือก่อน เพื่อลดการกระจุกกันของเส้นใยเสริมในวัสดุ จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต แล้วจึงดำเนินการตามวิธีผสมของ Alomayri และ Low [18] โดยนำส่วนผสมก่อนหน้ามาผสมในเครื่องผสมอีกครั้ง ที่รอบความเร็วการหมุนต่ำ จนกระทั่งเส้นใยปอมีการกระจายตัวทั่วถึงแล้วจึงเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 10 โมลาร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.35 แล้วผสมต่อไปเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงเปลี่ยนมาผสมที่รอบความเร็วการหมุนสูงอีก 10 นาที นำส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้ไปบรรจุลงแม่พิมพ์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และ 2.5x7.6x30.5 เซนติเมตร (1x3x12 นิ้ว) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัด จากนั้นวางบนโต๊ะสั่นสะเทือนเพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 5 นาที ปล่อยให้แห้งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมงภายในอุณหภูมิห้อง แล้วจึงแกะตัวอย่าง นำมาห่อด้วยพลาสติกใส บ่มทิ้งไว้ที่สภาพแวดล้อมเดิมเป็นระยะเวลา 28 วัน

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

Sample	Fly ash (g)	NaOH solution (g)	Fiber content (%wt.)	Added water (g)
GP	100	35	0	0
K1	100	35	1	0
K3	100	35	3	50
K5	100	35	5	100
TM1	100	35	1	0
TM3	100	35	3	50
TM5	100	35	5	100

*หมายเหตุ GP หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ควบคุม
Kx หมายถึง จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว
TMx หมายถึง จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิว

2.3 คุณสมบัติทางกายภาพ

ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทุกตัวอย่างจะทำการชั่งน้ำหนักหลังจากแกะออกจากแบบหล่อทันที เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของขั้นตอนการผสมตัวอย่าง ค่าน้ำหนักของตัวอย่างวัสดุ จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ได้ ควรจะมีค่าน้ำหนักแตกต่างกันไม่เกินไปกว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ร้อยละ 10 ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพนี้จะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM-C20 [23] โดยใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อนในแต่ละสัดส่วนผสม บ่มทิ้งไว้จนกระทั่งถึงเวลาทดสอบที่ 28 วัน ในอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาทำการชั่งน้ำหนักทั้งหมด 3 แบบ คือ น้ำหนักแห้ง D , น้ำหนักในน้ำ S และน้ำหนักที่สภาวะอิ่มตัว W เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่น (Bulk Density), ค่าความพรุน (Porosity) และค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

2.3.1 ความหนาแน่น (Bulk Density, B)

ค่าความหนาแน่น (B) ของตัวอย่างทดสอบ คือสัดส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งและปริมาตรภายนอก กับโพรงอากาศ สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$B = \frac{D}{V} \quad (1)$$

เมื่อ B คือความหนาแน่น, D คือน้ำหนักแห้ง และ V คือปริมาตรภายนอก

2.3.2 ความพรุน (Porosity, P)

ค่าความพรุน (P) จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของโพรงเปิดในตัวอย่างกับปริมาตรภายนอก สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P, \% = \left(\frac{W - D}{V} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ P คือค่าความพรุน (%), W คือน้ำหนักที่สภาวะอิ่มตัว, D คือน้ำหนักแห้ง และ V คือปริมาตรภายนอก

2.3.3 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption, A)

การดูดซึมน้ำ (A) จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำที่ตัวอย่างดูดซึมเข้าไปกับน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$A, \% = \left(\frac{W-D}{D} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ A คือการดูดซึมน้ำ (%), W คือน้ำหนักที่สถานะอิ่มตัว, และ D คือน้ำหนักแห้ง

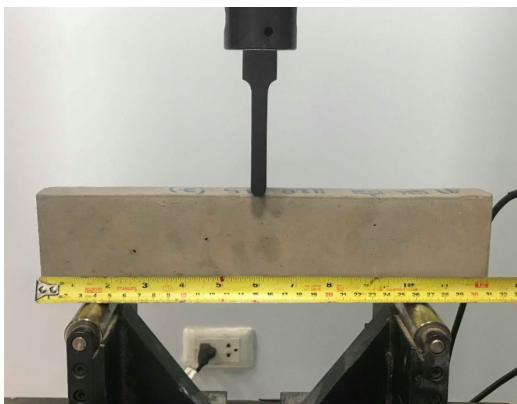
2.4 คุณสมบัติทางกล

2.4.1 กำลังรับแรงดัด

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ จะใช้ตัวอย่างขนาด $2.54 \times 7.62 \times 30.48$ เซนติเมตร ($1 \times 3 \times 12$ นิ้ว) ช่วงความยาวระหว่างจุดรองรับ (L) เท่ากับ 22.86 เซนติเมตร (9 นิ้ว) กำหนดระยะความหนา, $h = L/3$ ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C293 [24] ใช้เครื่อง Universal Testing Machine, UTM ทำการทดสอบแรงดัดแบบสามจุด (Three point bending) ดังเช่น รูปที่ 1 ที่แสดงการติดตั้งตัวอย่างเพื่อเตรียมทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้อัตราเร็วการกดของเครื่องทดสอบเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที โดยกำลังรับแรงดัดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\sigma_F = \frac{3 P_m L}{2 b h^2} \quad (4)$$

เมื่อ σ_F คือกำลังรับแรงดัด, P_m คือแรงสูงสุดที่กระทำจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ, L คือช่วงความยาวระหว่างจุดรองรับ, b คือความกว้างของตัวอย่าง และ h คือความหนาของตัวอย่าง



รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งตัวอย่างบนเครื่องทดสอบแรงดัดแบบจุด 3 จุด

2.4.2 ความเหนียว

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงดัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมกำลังด้วยเส้นใยปอ จะถูกใช้เพื่อนำมาพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกลในด้านความเหนียว ซึ่งจะเป็นการบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยไม่แตกร้า

2.5 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

ชิ้นส่วนเล็ก ๆ จากบริเวณของการวิบัติในแต่ละตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเส้นใยปอ 5% จะถูกนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ซึ่งชิ้นส่วนของตัวอย่างทดสอบจะถูกนำมาบดบดย่อยปฏิกิริยาปอโซลันด้วยการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส โดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปติดตั้งบน Stub เพื่อทำการเคลือบผิวด้วยทอง ก่อนนำไปวิเคราะห์ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) โดยวิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบนี้ เป็นการดำเนินการตามวิธีของ Sukmak และคณะ [21]

3. ผลการศึกษา

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ค่าความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ ของตัวอย่างทดสอบ ที่บ่มในอุณหภูมิห้องอายุ 28 วันทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4 โดยเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ ระหว่างตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิว กับที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว ซึ่งค่าความหนาแน่นของทุก ๆ ตัวอย่างทดสอบจะมีแนวโน้มที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยปอ สอดคล้องกับ Abdullah และคณะ [11] ซึ่งศึกษาซิเมนต์คอมโพสิตเสริมใยมะพร้าว และ Alomayri และ Low [18] ศึกษาวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของเส้นใยปอที่เท่ากัน พบว่าตัวอย่างทดสอบที่เสริมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว จะมีความหนาแน่นสูงกว่า ตัวอย่างที่เสริมเส้นใยปอแบบที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวเพียงเล็กน้อย (0.3%, 1.0% และ 1.1% ตามสัดส่วนเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ)

เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (GP) จะมีค่าความหนาแน่น
สูงที่สุดเท่ากับ 1.877 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

สำหรับค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำ จากผลการ
ทดสอบจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทั้งสอง มีค่าเพิ่มขึ้นตาม
ปริมาณเส้นใยปอที่มากขึ้นในทุกตัวอย่าง สอดคล้องกับ
ผลการศึกษางานวิจัยอื่น [18, 25-26] โดยการเพิ่มขึ้น
ของปริมาณเส้นใยปอในแต่ละตัวอย่างทดสอบ จะทำให้
สัดส่วนของวัสดุอีโพลีเมอร์ลดลง และจากความชอบ
น้ำโดยธรรมชาติของเส้นใยเซลลูโลสจากพืช [25] เมื่อมี
การเติมน้ำเพิ่มในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง อาจก่อให้เกิด
การขยายตัวจากการดูดซึมน้ำ เมื่อตัวอย่างทดสอบแข็ง
และแห้งตัว จะทำให้เกิดช่องว่างตลอดแนว รอบ ๆ เส้น
ใยปอในวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิต โดยตัวอย่างควบคุม
จะมีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำอยู่ที่เท่ากับ 4.13%
และ 2.20% ตามลำดับ แต่สำหรับตัวอย่างที่ 5% ของ
ปริมาณเส้นใยจะมีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำสูงที่สุด
โดยตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับ
สภาพพื้นผิวจะเท่ากับ 12.36% และ 7.12% ตามลำดับ
ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิว
นั้น จะเท่ากับ 11.56% และ 6.59% ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

อีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

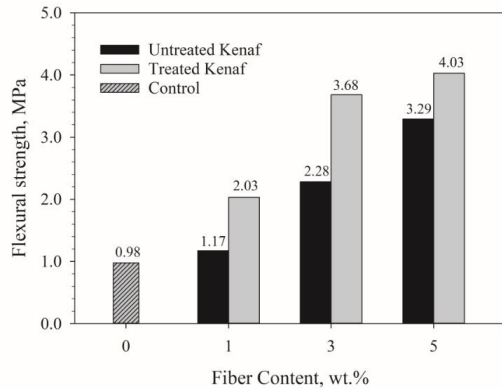
Physical properties	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Water absorption (%)
GP	1.877	4.13	2.20
1%fiber untreated	1.842	7.83	4.25
1%fiber treated	1.848	7.28	3.94
3%fiber untreated	1.765	11.66	6.61
3%fiber treated	1.783	10.26	5.76
5%fiber untreated	1.736	12.36	7.12
5%fiber treated	1.756	11.56	6.59

จากข้อมูลเหล่านี้จะเห็นได้ว่าการใช้เส้นใยปอที่มีการ
ปรับสภาพพื้นผิว และไม่มีการปรับสภาพผิวในวัสดุ
อีโพลีเมอร์คอมโพสิต จะมีความแตกต่างกันในด้านของ
ความหนาแน่นน้อยมาก ๆ จนแทบไม่มีความแตกต่าง แต่
ค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำจะแตกต่างกันพอสมควร
โดยพบว่าในตัวอย่างที่ใช้ปริมาณเส้นใย 5% การใช้เส้นใย
ที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้วจะให้ค่าความพรุนลดลง 6.47%
และการดูดซึมน้ำลดลง 7.44% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้
ปริมาณเส้นใยแบบไม่ปรับสภาพจำนวน 5% เท่ากัน

3.2 คุณสมบัติทางกล

3.2.1 กำลังรับแรงดัด

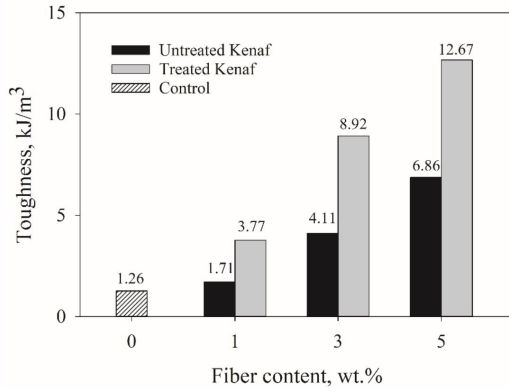
ผลการศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพพื้นผิว
ของเส้นใยปอที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัด ของวัสดุ
อีโพลีเมอร์คอมโพสิต จะแสดงตามรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็น
เห็นว่า ทุกตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงดัดของวัสดุ
อีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอเพิ่มขึ้นตาม
สัดส่วนเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% เป็นผลมาจากเส้น
ใยปอช่วยเพิ่มการถ่ายแรงให้กับอีโพลีเมอร์ ส่งผลให้
ความสามารถในการรับแรงดัดมากขึ้น เมื่อเทียบกับกำลัง
รับแรงดัดของตัวอย่างควบคุม (0.98 เมกกะปาสคาล)
กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยแบบ
ไม่ปรับสภาพพื้นผิวมีค่าเท่ากับ 1.17, 2.28 และ 3.29
เมกกะปาสคาล ตามลำดับเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น และส่วน
ตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยแบบปรับสภาพพื้นผิวมี
กำลังรับแรงดัดเท่ากับ 2.03, 3.68 และ 4.03 เมกกะ
ปาสคาล ตามลำดับเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ
อีโพลีเมอร์ควบคุม ที่ไม่มีการเสริมเส้นใยปอกำลังที่
เพิ่มขึ้นคิดเป็น 19.39%, 132.65% และ 235.71%
สำหรับตัวอย่างที่ผสมแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย
และ 107.14%, 275.51% และ 311.22% สำหรับ
ตัวอย่างที่ผสมแบบปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย ตามสัดส่วน
เส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ



รูปที่ 2 กำลังรับแรงดัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

3.2.2 ความเหนียว

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ที่ได้จากการทดสอบแรงดัดแบบสามจุด ค่าความเหนียวที่แสดงดังรูปที่ 3 จะแสดงให้เห็นว่า วัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมกำลังด้วยเส้นใยปอ มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องไปตามผลการทดสอบของ Sukontasukkul และคณะ [27] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของความเหนียวระหว่างตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยปอทั้ง 2 ประเภท คือเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว และเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว พบว่าการปรับปรุงสภาพผิวของเส้นใยปอจะทำให้เส้นใยปอและเมทริกซ์มีความเข้ากันได้ดี ทำให้ลดการเกิดช่องว่างระหว่างบริเวณพื้นผิวสัมผัสของเส้นใยปอและเมทริกซ์ ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทพลังงานเพิ่มมากขึ้น ค่าความเหนียวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุมที่ไม่มีการเสริมเส้นใยปอ จะมีค่าความเหนียวเพียง 1.26 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร แต่สำหรับค่าความเหนียวของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว จะมีค่าเท่ากับ 1.71, 4.11 และ 6.86 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร และตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีค่าความเหนียวเท่ากับ 3.77, 8.92 และ 12.67 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามอัตราส่วนของเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ



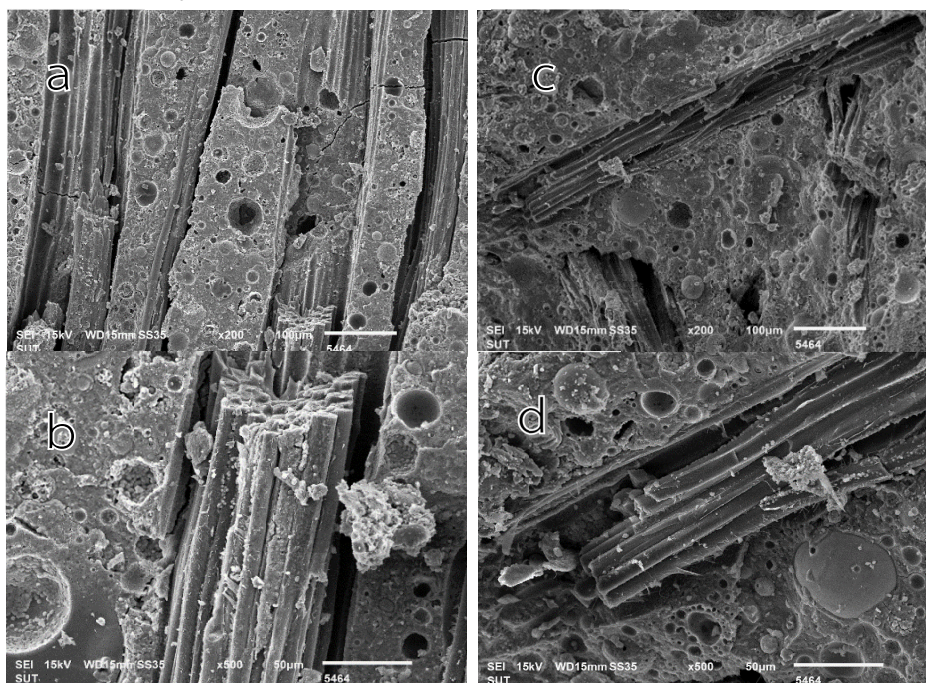
รูปที่ 3 ความเหนียวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

3.3 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยปอแบบไม่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีกำลังรับแรงดัดต่ำกว่าตัวอย่างที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิว เนื่องจากพื้นผิวของเส้นใยปอตามธรรมชาติจะมีสมบัติเป็นแบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) คือมีความชอบน้ำโดยธรรมชาติ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพื้นผิวประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) การที่นำเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพใด ๆ มาเสริมกำลังให้กับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต จะทำให้เส้นใยปอมีแนวโน้มที่จะดูดซึมน้ำหรือความชื้นได้มาก ทำให้เส้นใยปอเกิดการบวมตัวหรือขยายขนาดได้มาก ก่อให้เกิดความเครียดบริเวณส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยปอกับเมทริกซ์ นำไปสู่การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก อีกทั้งองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) มีความอ่อนแอต่อสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ซึ่งภายในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์อาจทำให้พื้นผิวของเส้นใยปอเกิดความเสียหาย และเกิดการเสื่อมสลายได้อย่างช้า ๆ ด้วยเหตุนี้บริเวณรอบ ๆ ส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยปอกับเมทริกซ์จะเกิดช่องว่าง ส่งผลให้การยึดเกาะกันลดลง ทำให้กระทบต่อความสามารถในการรับแรงดัดที่ไม่ดี แต่ในทางกลับกันเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้องค์ประกอบของเส้นใยที่อ่อนแอต่ออย่างเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ถูก

กำจัดออกไป ทำให้เส้นใยปอมีเสถียรภาพมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงการยึดเกาะทำให้เส้นใยปอเข้ากันได้ดีกับ จีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับรายงานของ Azwa และคณะ [16] ที่ได้กล่าวไว้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยพืชด้วย สารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ จะเป็นการกำจัดกลุ่มไฮดรอกซิลในองค์ประกอบของเส้นใยพืชที่มีความเข้ากันได้ดีกับโมเลกุลของน้ำ และยังสลายองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลส ซึ่งจะช่วยลดความสามารถในการดูดซับความชื้น เป็นผลให้การบวมตัวของเส้นใยพืชลดลง โครงช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์เกิดน้อยลงเช่นกัน และความชื้นจากภายนอกแทรกซึมเข้าสู่คอมโพสิตได้ยากขึ้น ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยพืชและเมทริกซ์ดีขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบภาพถ่ายระดับจุลภาค ที่แสดงในรูปที่ 4 โดยตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว พื้นผิวของเส้นใยปอที่เป็นเปลือกหุ้มบางส่วนจะเกิดการเสื่อมสลาย เนื่องจากการโจมตีของสารละลายต่างๆที่ถูกใช้ในขั้นตอนการเตรียม

ตัวอย่าง จากรูปที่ 4a จะพบรอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดจากความเครียดบริเวณส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยปอกับเมทริกซ์ และรูปที่ 4b จะเห็นได้ว่า มีช่องว่างบริเวณรอบ ๆ เส้นใยปอกับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต ส่วนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวนั้นเส้นใยปอจะมีเสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากส่วนที่อ่อนแอต่อต่างได้ถูกกำจัดออกไปแล้ว ดังรูปที่ 4c และ 4d เป็นผลให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยปอและจีโอโพลิเมอร์ดีขึ้น เส้นใยปอและจีโอโพลิเมอร์มีความเข้ากันได้ดี ส่งผลต่อการกระจายแรงในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ดีขึ้นเช่นกัน ดังนั้นคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ ทางด้านกำลังรับแรงดัดจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว กับเส้นใยปอแบบไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว พบว่าสัดส่วนกำลังรับแรงดัด (TM:K) จะมีค่าเท่ากับ 1.74, 1.61 และ 1.22 เท่า ตามปริมาณเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ



*หมายเหตุ ขนาดของภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) a) กำลังขยายเท่ากับ x200 มาตรฐานส่วน 100 μm b) กำลังขยายเท่ากับ x500 มาตรฐานส่วน 50 μm c) กำลังขยายเท่ากับ x200 มาตรฐานส่วน 100 μm d) กำลังขยายเท่ากับ x500 มาตรฐานส่วน 50 μm

รูปที่ 4 ภาพถ่ายระดับจุลภาคของตัวอย่างปริมาณเส้นใยปอ 5% : a) และ b) แสดงตัวอย่างทดสอบเสริมเส้นใยแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิว หรือ K5, c) และ d) แสดงตัวอย่างทดสอบเสริมเส้นใยแบบปรับสภาพพื้นผิว หรือ TM5



4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ ที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และเส้นใยปอที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว ไม่ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตแตกต่างกัน แต่เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะช่วยให้ความพรุน และการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง

4.2 เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตดีกว่าเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และที่ปริมาณเส้นใยปอ 1% แบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่ากำลังรับแรงดัดน้อยที่สุด

4.3 การใช้เส้นใยปอในการเสริมกำลังให้กับจีโอโพลิเมอร์ในปริมาณ 1% การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอ จะช่วยให้กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต มีค่าสูงกว่าการใช้เส้นใยปอที่ไม่ปรับสภาพพื้นผิวค่อนข้างมาก แต่สำหรับปริมาณเส้นใยปอที่ 5% กำลังรับแรงดัดระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิว กับเส้นใยที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวมีค่าต่างแตกต่างกันไม่มาก เมื่อเทียบกับตัวอย่างแบบ 1% เส้นใยปอเนื่องจากเส้นใยปริมาณมากขึ้นการกระจายตัวของเส้นใยในจีโอโพลิเมอร์ระหว่าง เส้นใยปอแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิว กับไม่ปรับสภาพพื้นผิวจะไม่แตกต่างกัน ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] T. Bakharev, "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1233–1246, Jun., 2005.

[2] T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1224–1232, Jun., 2005.

[3] D. L. Y. Kong and J. G. Sanjayan, "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 2, pp. 334–339, Feb., 2010.

[4] P. Chindaprasit, T. Chareerat, S. Hatanaka and T. Cao, "High-Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 264–270, Mar., 2011.

[5] G. Roviello, L. Ricciotti, C. Ferone, F. Colangelo and O. Tarallo, "Fire resistant melamine based organic-geopolymer hybrid composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 59, pp. 89–99, May, 2015.

[6] T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridditirud, S. Hatanaka and P. Chindaprasit, "High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 482–488, Nov., 2015.

[7] K. Sankar, R. A.S. Ribeiro, M. G. S. Ribeiro and W.M Kriven, "Potassium-based geopolymer composites reinforced with chopped bamboo fibers," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 100, no. 1, pp. 49–55, Jan., 2017.

[8] A. Arbelaiz, B. Fernandez, J.A. Ramos, A. Retegi, R. Llano-Ponte and I. Mondragon, "Mechanical properties of short flax fibre bundle/polypropylene composites: Influence of matrix/fibre modification, fibre content, water uptake and recycling," *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 10, pp. 1582–1592, Aug., 2005.



- [9] N. Sgriccia, M.C. Hawley and M. Misra, "Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 10, pp. 1632-1637, Oct., 2008.
- [10] C. Asasutjarit, S. Charoenvai, J. Hirunlabh and J. Khedari, "Materials and mechanical properties of pretreated coir-based green composites," *Composites Part B : Engineering*, vol. 40, no. 7, pp. 633-637, Oct., 2009.
- [11] A. Abdullah, S.B. Jamaludin, M. M. Noor and K. Hussin, "Composite Cement Reinforced Coconut Fiber: Physical and Mechanical Properties and Fracture Behavior," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 7, pp. 1228-1240, 2011.
- [12] M. Ardanuy, J. Claramunt, J. A. Garcia-Hortal and M. Barra, "Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers," *Cellulose*, vol. 18, no. 2, pp. 281-289, Apr., 2011.
- [13] C. Frazao, J. Barros, R. Toledo Filho, S. Ferreira and D. Gonçalves, "Development of sandwich panels combining sisal fiber-cement composites and fiber-reinforced lightweight concrete.," *Cement and Concrete Composites*, vol. 86, pp. 206-223, Feb., 2018.
- [14] T. Rakkob, A. Chinkulkijniwat and S. Yubonchit, "A review of recent developments of natural cellulose fiber in cementitious materials," *The 21st National Convention on Civil Engineering*, pp.708-713, 2016. (in Thai)
- [15] T. Alomayri, F.U.A. Shaikh and I.M. Low, "Characterisation of cotton fibre-reinforced geopolymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 50, pp. 1-6, Jul., 2013.
- [16] Z.N. Azwa, B.F. Yousif, A.C. Manalo and W. Karunasena, "A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres," *Materials and Design*, vol. 47, pp. 424-442, May, 2013.
- [17] R. D. Tolêdo-Filho, K. Scrivener, G. L. England and Ghavami K., "Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites," *Cement & Concrete Composites*, vol. 22, no. 2, pp. 127-143, Apr., 2000.
- [18] T. Alomayri and I.M. Low, "Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites," *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 1, no. 1, pp. 30-34, Mar., 2013.
- [19] S. Horpibulsuk, R. Rachan and Y. Raksachon, "Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay," *Soils and Found*, vol. 49, no. 1, pp. 85-98, Feb., 2009.
- [20] S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon and A. Suddeepong, "Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 10, pp. 2011-2021, Oct., 2010.
- [21] P. Sukmak, S. Horpibulsuk and S. S. L. Shen, "Strength development in clay-fly ash geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 566-574, Mar., 2013.
- [22] N. Soltani, A. Bahrami, M.I. Pech-Canul and L.A. González, "Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials," *Chemical Engineering Journal*, vol. 264, pp. 899-935, Mar., 2015.



- [23] Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water, ASTM C20-00, 2015.
- [24] Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading), ASTM C293/C293M-16, 2016.
- [25] T. Alomayri, H. Assaedi, F.U.A. Shaikhc and I.M. Lowa, "Effect of water absorption on the mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites," *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 2, no. 3, pp. 223–230, Sep., 2014.
- [26] P. Lertwattanakul and K. Masuwan, "Investigation of Sound Insulation Properties of Fiber Cement Board Containing Natural Fibers," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 1, pp. 71-86, Jan.-Mar., 2015. (in Thai)
- [27] P. Sukontasukkul, P. Pongsopha, P. Chindaprasit and S. Songpiriyakij, "Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer," *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 37-44, Feb., 2018.