

คุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ



นางสาวพัชราภรณ์ รักคอบ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

**MECHANICAL PROPERTIES OF GEOPOLYMER
COMPOSITE REINFORCED KENAF FIBER**



Patcharaporn Rakkob

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

คุณสมบัติทางกลของวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

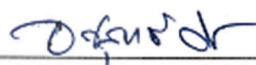
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ชนากร รุ่งเงินขำ)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

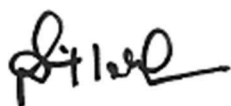
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. Menglim Hoy)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร.สันติ แม่นสิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนดัตถ์ ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พัชราภรณ์ รักคอบ : คุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ
(MECHANICAL PROPERTIES OF GEOPOLYMER COMPOSITE REINFORCED
KENAF FIBER) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 85 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่สัดส่วน 1%, 3% และ 5% โดยน้ำหนัก โดยในการศึกษานี้ได้ทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอ ด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาผสม จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยคุณสมบัติทางกลทางด้านกำลังรับแรงอัด พบว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่ากำลังอัดลดลง 26.30%, 40.54% และ 67.84% ที่เสริมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่าลดลงเพียง 15.75%, 34.84% และ 57.62% ตามลำดับ ในทางกลับกัน คุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงดัด พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดัดได้ดีกว่าเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเชื่อมสลวยของเส้นใยปอที่เกิดจากการความเป็นด่างเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้บริเวณส่วนที่ติดต่อกันระหว่างเส้นใยปอและเมทริกซ์เกิดช่องว่าง ทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันจึงลดลง ดังนั้นการปรับสภาพพื้นผิวจะเป็นการทำให้ส่วนที่อ่อนแอต่อค่าของเส้นใยปอถูกจำกัด เส้นใยปอจึงมีเสถียรภาพมากขึ้น ลดการดูดซึมน้ำและความชื้นและขยายตัวลดลงเมื่อสัมผัสความชื้น เป็นผลให้ไม่ก่อให้เกิดรอยร้าวขนาดเล็กในโครงสร้างภายใน ทำให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตมีความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น 107%, 276% และ 311% แต่สำหรับตัวอย่างทดสอบเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเพียง 19%, 133% และ 236% ตามลำดับเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับเมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา พัชราภรณ์ รักคอบ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อวิรุทธิ์

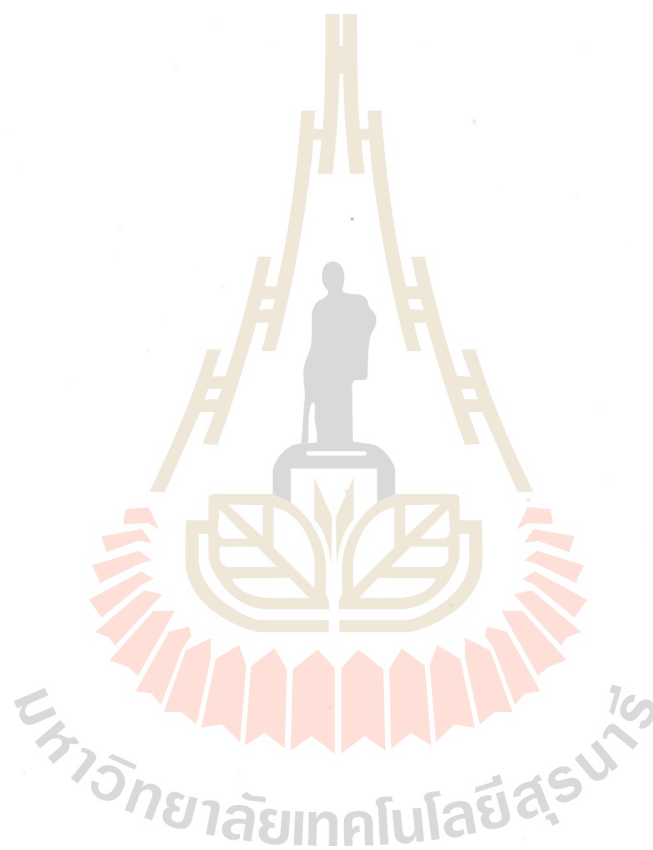
PATCHARAPORN RAKKOB : MECHANICAL PROPERTIES OF
GEOPOLYMER COMPOSITE REINFORCED KENAF FIBER. THESIS

ADVISOR : ASSOC. PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D., 85 PP.

COMPOSITE/CELLULOSE FIBER/GEOPOLYMER

This paper investigated 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. The physical and mechanical properties of the geopolymer without reinforcement were used as references. Experimental results showed the treated kenaf fiber geopolymer composite and the untreated kenaf fiber geopolymer composite possess almost identical density, porosity and water absorption values. The compressive strength of the treated kenaf fiber geopolymer composite was 15.75%, 34.84%, and 57.2% lower than that of the geopolymer without kenaf fiber for 1%, 3% and 5% fiber, respectively. While, the compressive strength of the untreated kenaf fiber geopolymer composite was 26.30%, 40.54% and 67.84% lower than that of the geopolymer without kenaf fiber for 1%, 3% and 5% fiber, respectively. Interfacial adhesion between the fibers and the matrix played a critical role on mechanical performance of the natural fibers reinforced geopolymer composites. The degradation of the fibers due to alkaline attack resulted in existence of micro-cracks at the fiber and matrix interface. As surface treatment could diminish the alkaline sensitive component from the kenaf fiber and increase the surface roughness, the treated kenaf fiber geopolymer composite possessed the better mechanical properties than the untreated kenaf fiber geopolymer composite did. Comparing with the flexural strength of the geopolymer without fiber reinforcement,

the flexural strength of the treated kenaf fiber geopolymer composites was 107%, 276% and 311% and that of untreated kenaf fiber geopolymer composites was 19%, 133%, 236% for 1%, 3% and 5% fiber, respectively.



School of Civil Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature พีชชาภรณ์ รักตบ

Advisor's Signature ดร.ณัฐกร

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินการงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสการศึกษา ให้คำปรึกษาแนะนำ แก้ไขปัญหาต่าง ๆ เกี่ยวกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร ภูเงินขำ คณะกรรมการสอบ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางวิชาการ ให้คำแนะนำและตรวจทานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.Menglim Hoy คณะกรรมการสอบ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางวิชาการ ที่ให้คำแนะนำและตรวจทานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

นายชนากรณ์ รักคอบ นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำ ช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว ตลอดระยะเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและเจ้าหน้าที่บุคคลอื่น ที่ให้คำปรึกษาแนะนำเรื่องต่าง ๆ ในการวางแผนจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รวมถึงขอขอบพระคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอยกให้บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่เคารพรัก ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพรัก ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

พัชราภรณ์ รักคอบ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)	5
2.1.1 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์	6
2.1.2 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน	6
2.2 เอกลักษณะของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fiber)	9
2.2.1 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืช	10
2.2.2 การจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส	13
2.2.3 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลส	14
2.3 ประโยชน์ของเส้นใยธรรมชาติ	15
2.4 วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	วัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช	20
2.6	ข้อจำกัดความทนทานของเส้นใยธรรมชาติ	33
2.7	การปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	34
2.8	แนวความคิดที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
3	แนวทางและวิธีการวิจัย	41
3.1	วัสดุ	41
3.2	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	43
3.3	วิธีการทดสอบ	44
3.3.1	คุณสมบัติทางกายภาพ	44
3.3.2	คุณสมบัติทางกล	46
3.4	ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)	48
3.5	แผนผังแสดงแนวความคิดและวิธีการดำเนินงานวิจัย	49
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	50
4.1	ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต	50
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต	52
4.2.1	กำลังรับแรงอัด	52
4.2.2	กำลังรับแรงดัด	54
4.2.3	ค่าโมดูลัสแรงดัด	55
4.2.4	ความเหนียว	56
4.3	ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)	57
5	บทสรุป.....	59
5.1	สรุปผลการวิจัย	59
5.2	ข้อเสนอแนะ	60
	รายการอ้างอิง	61
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก รายการคำนวณ	66

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	69
ประวัติผู้เขียน	85



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ (Li Xue et al., 2007) 12
2.2	การทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่อผ่านไป 28 วัน (Korniejenko et al., 2016) 30
2.3	การทดสอบกำลังรับแรงดัดเมื่อผ่านไป 28 วัน (Korniejenko et al., 2016) 30
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของถั่วลย (Sukmak et al., 2013) 42
3.2	คุณสมบัติของเส้นใยปอ (Soltani et al., 2015) 42
3.3	สัดส่วนผสมของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ 44
4.1	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ..... 51
ก.1	แสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณผลการทดสอบ 67

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างพื้นฐานของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต (Davidovits, 1994) 6
2.2	การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (ศักรินทร์ เหลืองคำจอง, 2559) 7
2.3	การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ดัดแปลงมาจาก (ศักรินทร์ เหลืองคำจอง, 2559) 8
2.4	องค์ประกอบทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ (พรรณพร กะตะจิตต์, 2561) 10
2.5	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (รัชพล พะวงศรีรัตน, 2558) 10
2.6	โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (รัชพล พะวงศรีรัตน, 2558) 11
2.7	โมเลกุลกลินินที่ยึดติดกับไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล, 2550) 11
2.8	การจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสแบบไมโครไฟบริล (microfibril) 13
2.9	ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส ดัดแปลงมาจาก (Jin Suk Lee et al., 2008) 14
2.10	แสดงลักษณะของเส้นใยธรรมชาติ (Sgriccia et al., 2008) 15
2.11	พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติ (Frazao et al., 2008) 15
2.12	แสดงพื้นผิวการแตกหักของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยมะพร้าว 9% ของน้ำหนัก (Abdullah et al., 2011) 16
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบที่ 28 วัน (นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ, 2556) 17
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบที่ 28 วัน (นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ, 2556) 18
2.15	กำลังรับแรงอัดของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ (Lertwattanaruk and Masuwan, 2015) 19
2.16	กำลังรับแรงดัดของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ (Lertwattanaruk and Masuwan, 2015) 19
2.17	ความแข็งของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013) 20
2.18	กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013) 21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 ความทนทานต่อแรงกระแทกของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013)	21
2.20 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเถ้าลอย (Alomayri and Low, 2013)	22
2.11 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 0.5% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013)	22
2.22 ความเค้นและความเครียดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013)	23
2.23 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย a) 0, b) 0.3, c) 0.5, d) 0.7, e) 1.0 wt% และ f.) เถ้าลอย (Alomayri et al., 2013)	24
2.24 ผลการวิเคราะห์ XRD a) fly ash and geopolymers specimens prepared with, b) 0 wt% OPC and c) 10 wt% OPC (Alomayri et al., 2014)	26
2.25 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10% ของน้ำหนัก (Alomayri et al., 2014)	26
2.26 ลักษณะการพังของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมด้วยเส้นใยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ a) 5% และ b) 10 WT% OPC (Alomayri et al., 2014)	27
2.27 เสถียรภาพทางความร้อนของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย a) 0 wt% OPC, b) 5 wt% OPC, c) 8 wt% OPC และ d) 10 wt% OPC. (Alomayri et al., 2014)	28
2.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะการเคลื่อนที่จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างทดสอบ (R. Chen et al., 2014)	29
2.29 ผลการทดสอบแรงดึง กำลังรับแรงคดและความเหนียวของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยข้าวฟ่างหวาน 0, 1, 2 และ 5% ของน้ำหนัก (Chen et al., 2014)	29
2.30 แสดงลักษณะการวิบัติจากการทดสอบแรงคดของตัวอย่างทดสอบเสริมเส้นใยฝ้าย 5% ของน้ำหนัก (Sankar et al., 2017)	31
2.31 ผลการทดสอบความเหนียวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยโพลีโพลีลีน ประเภท a-HyFRG. (Sukontasukkul et al., 2018)	32

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.32 ผลการทดสอบแรงคัดของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยโพลิโพลีลีน (Sukontasukkul et al., 2018)	32
2.33 ลักษณะการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ (Azwa et al., 2013)	33
2.34 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเส้นใยฝ้าย a) เส้นใยฝ้ายทั่วไป b) การสะสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเส้นใยฝ้าย (Ardanuy et al. 2011)	34
2.35 แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ a) ก่อน และ b) หลังปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Reza Mahjoub., 2014))	35
2.36 การทดสอบการบวมตัวของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยมะพร้าว (Asasutjarit et al. 2009)	36
2.37 การทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยมะพร้าว (Asasutjarit et al. 2009)	36
2.38 ค่าโมดูลัสต่อการแตกร้าวของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยมะพร้าว (Asasutjarit et al. 2009).....	37
2.39 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปอหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Ray et al., 2014)	38
2.40 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอด้วยสารละลาย NaOH ที่ระยะเวลา 3 และ 24 ชั่วโมง (Reza Mahjoub., 2014)	39
3.1 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น a) 0.5, b) 2, c) 5 และ d) 10 โมลาร์	43
3.2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างบนเครื่องทดสอบแรงอัด	47
3.3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างบนเครื่องทดสอบแรงคัดทำการทดสอบแรงคัดแบบการกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-Point Loading)	48
4.1 กำลังรับแรงอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ	53
4.2 แสดงค่าความเค้นและความเครียดจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ	53
4.3 กำลังรับแรงคัดของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	โมดูลัสการตัดของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ 55
4.5	ความเหนียวของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ 56
4.6	ภาพถ่ายระดับจุลภาคของตัวอย่างปริมาณเส้นใยปอ 5% a) และ b) แสดงตัวอย่างทดสอบเสริมเส้นใยแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิว หรือ K5, c) และ d) แสดงตัวอย่างทดสอบเสริมเส้นใยแบบปรับสภาพพื้นผิว หรือ TM5 58



คำอธิบายสัญลักษณ์และตัวย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
Al ₂ O ₃	=	Aluminium oxide
CaO	=	Calcium oxide
FA	=	Fly ash
Fe ₂ O ₃	=	Hematite
GP	=	จีโอโพลิเมอร์เพสต์ควบคุม
GPa	=	Gigapascal
g/cm ³	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
K ₂ O	=	Potassium oxide
Kx	=	จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว
L	=	สารกระตุ้นอัลคาไลน์
LOI	=	Loss of ignition
L/FA	=	อัตราส่วนผสมระหว่างสารกระตุ้นอัลคาไลน์กับเถ้าลอย
M	=	Molar
MPa	=	Megapascal
MgO	=	Magnesium oxide
Na ₂ O	=	Sodium oxide
NaOH	=	Sodium hydroxide
SEM	=	Scanning electron microscope
SiO ₂	=	Silicon dioxide
SO ₃	=	Sulfur trioxide
TMx	=	จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิว
μm	=	Micrometer

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานทางเลือกใหม่ เกิดจากการนำวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ที่มีองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ เป็นซิลิกาและอะลูมินา เช่น ดินขาว, ดินขาวเผาแคลไซน์, เถ้าลอย, และอื่น ๆ มากระตุ้นด้วยสารละลายอัลคาไลน์ที่มีความเข้มข้นสูง (โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, และโซเดียมซิลิเกต) เกิดเป็นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ซิลิกอน และอะลูมิเนียมออกไซด์ จัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างปิรามิดฐานสามเหลี่ยม ที่มีการใช้ออกซิเจนออกไซด์ร่วมกัน กลายเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถก่อตัวแข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้ดี ซึ่งมีสมรรถนะเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์ยังโดดเด่นในด้านความทนทานต่ออุณหภูมิสูง, ซัลเฟต, กรดและด่าง สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น Bakharev. (2005); Kong and Sanjayan, (2010); Chindaprasirt et al., (2011); Roviello et al., (2015); Phoo-ngernkham et al., (2015) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีข้อดีหลายประการ จีโอโพลิเมอร์ยังคงมีข้อเสียเช่นเดียวกับวัสดุซีเมนต์ทั่วไป คือมีลักษณะเฉพาะเมื่อเกิดการวิบัติที่เป็นพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (Tensile strength) และความต้านทานต่อการแตกร้าวต่ำ (Fracture toughness) Sankar et al., (2017) มีข้อจำกัดสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างบางประเภท ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้วัสดุเสริมแรง คล้ายกับนวัตกรรมของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite materials) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งาน

วัสดุซีเมนต์คอมโพสิต (Cement composite materials) ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นในหลายปีที่ผ่านมา เส้นใยสังเคราะห์มักถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบเสริมแรง สำหรับผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและกายภาพของปูนซีเมนต์ให้ดีขึ้น ทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจคือการใช้เส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืช มาทดแทนวัสดุใยสังเคราะห์ซึ่งมีราคาแพง การใช้เส้นใยเซลลูโลสจากพืช ถือว่าประสบความสำเร็จสำหรับใช้เป็นเส้นใยทางเลือก เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมีคุณสมบัติทางกลและกายภาพที่น่าสนใจ

และยังสามารถหาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย จากรายงานวิจัยของ Arbelaiz et al., (2005); Sgriccia et al.,(2008) ; Asasutjarit et al., (2009); Abdullah et al., (2011); Ardanuy et al., (2011) ; Frazao et al., (2018) พื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมีความขรุขระโดยธรรมชาติ ทำให้สมรรถภาพในการยึดเกาะมีมากเพียงพอที่จะช่วยปรับปรุง คุณสมบัติทางกลของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตให้ดีขึ้น ในด้านความเหนียว, ความแกร่ง, กำลัง, และความต้านทานต่อแรงกระแทก หรือแม้กระทั่งช่วยลดการยึดหดตัว ลดการนำความร้อน Rakkob et al., (2016) ได้รายงานว่าจากคุณสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้ ทำให้วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ทางด้านวัสดุก่อสร้าง หรือวัสดุทางด้านสถาปัตยกรรมในส่วนต่าง ๆ ของบ้าน หรืออาคาร ตัวอย่างเช่น ไม้เทียม, ผนัง, ฝ้า, อิฐ, และกระเบื้องมุงหลังคา เป็นต้น

ในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ (Geopolymer composite materials) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งการวิจัยโดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในการศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นหลัก ซึ่งประสิทธิภาพของวัสดุโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ด้านคุณสมบัติทางกล มีแนวโน้มไม่ได้แตกต่างกับวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญ เช่น Abdullah et al., (2011) ได้รายงานว่เส้นใยมะพร้าวมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดรอยแตกร้าวของซีเมนต์ได้ ที่ปริมาณความเหมาะสมของเส้นใยมะพร้าว เท่ากับ 9% ของน้ำหนัก อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในเรื่องความทนทานต่อการใช้งานในระยะยาวของผลิตภัณฑ์ที่ได้อ้างถึงข้างต้นนี้ เนื่องจาก Alomayri et al. (2013); Azwa et al. (2013); Tolêdo-Filho et al., (2000) กล่าวว่า การนำเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาประยุกต์ใช้กับวัสดุซีเมนต์ เส้นใยมีส่วนช่วยเพิ่มความพรุนให้กับวัสดุ และด้วยธรรมชาติของเส้นใยเซลลูโลสนั้น มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี เมื่อนำเส้นใยมาเสริมกับวัสดุคอมโพสิตที่มีความเป็นด่าง เช่น ปูนซีเมนต์หรือโพลิเมอร์ อาจทำให้สารละลายด่างถูกดูดซึมเข้าไป เป็นผลทำให้เส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสเกิดการเสื่อมสลาย หรือได้รับความเสียหายได้ จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา Alomayri and Low. (2013) อธิบายถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีการเสริมกำลังด้วยเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลส เกิดขึ้นจากพันธะที่ยึดเหนี่ยวกันระหว่างเส้นใยกับโครงข่ายภายในวัสดุ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยจึงมีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุดังกล่าว แต่สำหรับวัสดุโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ยังคงพบว่ามีรายงานการวิจัยที่ค่อนข้างน้อย ที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยก่อนนำมาเสริมกำลังให้กับวัสดุนี้ ยกตัวอย่างเช่น Ray et al. (2001) รายงานว่า เส้นใยปอที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5% เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในอัตราส่วน

เส้นใยเท่ากับ 35% โดยน้ำหนัก จะมีกำลังรับแรงคัต และค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น 20% และ 23% ตามลำดับ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติทางกลและกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุน ค่าการดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงคัต โมดูลัสแรงคัต และความเหนียวของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ โดยใช้วิธีการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยต่าง ก่อนนำมาใช้เป็นส่วนประกอบเสริมแรงในวัสดุอีโพลิเมอร์ ในการศึกษานี้จะเลือกใช้เส้นใยเซลลูโลสจากปอ เพราะสามารถหาได้ง่ายและมีคุณสมบัติทางกลที่น่าสนใจ พร้อมทั้งใช้ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะภายในของโครงสร้างในบริเวณที่เกิดการวิบัติ ซึ่งชิ้นส่วนตัวอย่างจะถูกนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบ (Horpibulsuk et al., 2009; Horpibulsuk et al., 2010; Sukmak et al., 2013) เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นของการใช้วัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติในอุตสาหกรรมการก่อสร้างต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเส้นใยปอ

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทำการศึกษาแนวคิดเพื่อนำมาพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยจากธรรมชาติ

1.3.2 นำเสนอวิธีการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยพืชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต

1.3.3 เถ้าลอย (fly ash, FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

1.3.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ ถูกนำมาเป็นสารกระตุ้น ซึ่งปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่างสารกระตุ้นอัลคาไลน์กับเถ้าลอย (L/FA) ในการศึกษาเท่ากับ 0.35

1.3.5 เส้นใยเซลลูโลสจากปอ (Kenaf fiber) ในท้องถิ่นของภาคอีสาน ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับอีโพลิเมอร์คอมโพสิต

1.3.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยพืชจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและทางกายของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้น

1.4.2 นำมาใช้เป็นแนวทางการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธาต่อไป

1.4.3 จากผลการศึกษาคาดว่าจะสามารถตีพิมพ์ในวารสารเชิงวิชาการที่มีคุณภาพสูงได้



บทที่ 2

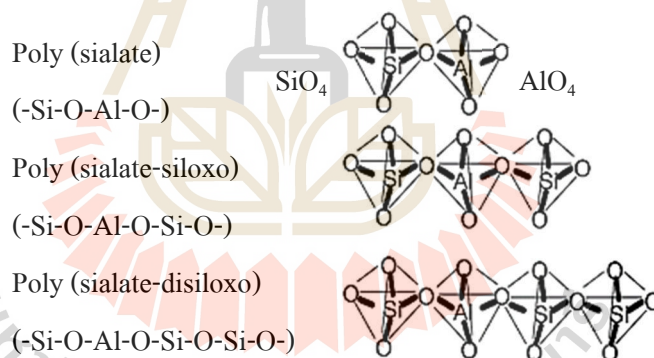
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์ อนินทรีย์ มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) ไม่มีรูปร่างแน่นอน ถูกนิยามขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1970 จากผลงานของนักวิจัยชาวฝรั่งเศสชื่อ Joseph Davidovits จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่ง เกิดจากการนำวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ที่มีองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ เป็นซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มากระตุ้นด้วยสารละลายที่มีสถานะความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ KOH และ โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เกิดเป็นปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ซิลิกอน และอะลูมิเนียมออกไซด์ จัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างปิรามิดฐานสามเหลี่ยม ที่มีการใช้ออกซิเจนออกไซด์ร่วมกัน กลายเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถก่อตัว แข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้ดี ซึ่งมีสมรรถนะเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้ในหลายงานวิจัย Bakharev. (2005); Kong and Sanjayan. (2010); Chindaprasirt et al., (2011); Roviello et al., (2015); Phoo-ngernkham et al., (2015) ยังพบว่า จีโอโพลิเมอร์มีความโดดเด่นในด้านความทนทานต่ออุณหภูมิสูง, ซัลเฟต, กรดและด่าง เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น Bakharev.(2005) ได้ศึกษาความทนทานของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากแก้วลอยต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต โดยแช่ไว้ในระยะเวลา 5 เดือน พบว่าความแข็งแรงของวัสดุต้านกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 4% และ 12%, Kong and Sanjayan, (2010) ได้ศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมจีโอโพลิเมอร์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ภายใต้อุณหภูมิที่สูงถึง 800 องศาเซลเซียส จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น 5.4% ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในทางกลับกันความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์ต่อกำลังรับแรงอัดจะลดลงอย่างมากในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส และ Phoo-ngernkham et al., (2015) ได้รายงานว่าจีโอโพลิเมอร์ตัวผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงและสัดส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่สูง จะช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของวัสดุระหว่างจีโอโพลิเมอร์และคอนกรีตภายใต้การทดสอบแรงเฉือนให้มีค่ามากขึ้น จากผลการทดสอบพบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 14 โมลาร์ และ ปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10% จะทำให้กำลังรับสูงสุดเท่ากับ 24.2 เมกะปาสคาล

2.1.1 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์

โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการจับตัวกันของพันธะระหว่าง Si^{+4} และ Al^{+3} เกิดเป็นพันธะโคออร์ดิเนตแบบ 4 แขนกับออกซิเจน ซึ่งจะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโครงสร้างโพลิเมอร์ที่เชื่อมต่อกันแบบโซ่หรือเครือข่ายโมเลกุลที่เชื่อมโยงกันแบบพันธะ co-valent bond ที่เกิดจากปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ของ Silico-Aluminate โดยโครงสร้างหลักจะประกอบด้วยหน่วยปริมาตรสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ได้แก่ โครงสร้างแบบโพลิไซอะเลต (Polysialate, PS) โดยมีซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 1:1, โพลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate siloxo, PSS) ซิลิกาต่ออะลูมินาจะเป็นแบบ 2:1 และโครงสร้างแบบโพลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate disiloxo, PSDS) มีซิลิกาต่ออะลูมินา 3:1 จากรายงานของ Davidovits, (1994) โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ที่มี SiO_4 เพิ่มขึ้นจากหนึ่งหน่วยเป็นสามหน่วย และเมื่อเกิดการทำปฏิกิริยามากขึ้นจึงทำให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มีการเชื่อมต่อกันมากขึ้น และมีความหนาแน่นภายในโครงสร้างที่มากขึ้น จึงทำให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์นั้นสามารถรับแรงได้



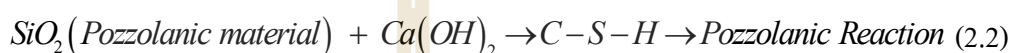
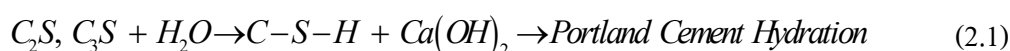
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต (Davidovits, 1994)

2.1.2 การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน

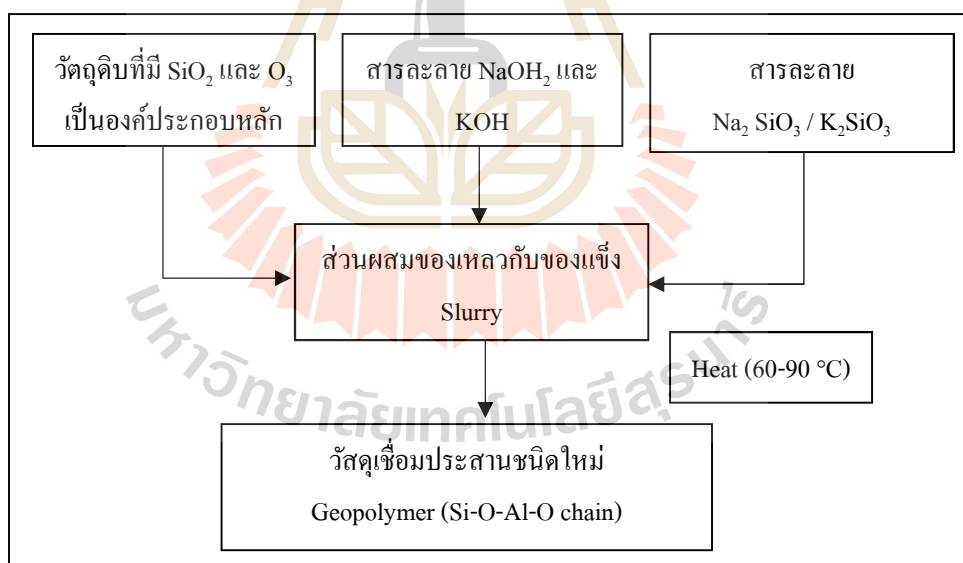
การเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์จะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างสิ้นเชิง เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดของปฏิกิริยาที่ต่างกันคือ

เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง. (2557) โครงสร้างของปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะประกอบด้วยสารยึดประสานที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักที่เกิดจากกระบวนการผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Portland cement hydration) โดยทำ

หน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต ซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว ดังสมการ 2.1 และเมื่อมีการใช้วัสดุปอซโซลาน (SiO_2) ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาขั้นที่สองขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) แสดงไว้ในสมการที่ 2.2 ซึ่งปฏิกิริยานี้จะช่วยเพิ่มวัตถุประสงค์หลักในตัวเชื่อมประสาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ส่งผลทำให้โครงสร้างของคอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์มีความหนาแน่นและทนทานมากขึ้น



แต่โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์เกิดจากวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแบบอสัณฐาน คือ ซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) และออกซิเจน (O) สารเหล่านี้จะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง ทำให้แตกตัวออกมาเป็นปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดเป็น Polymer Chain ดังรูปที่ 2.2



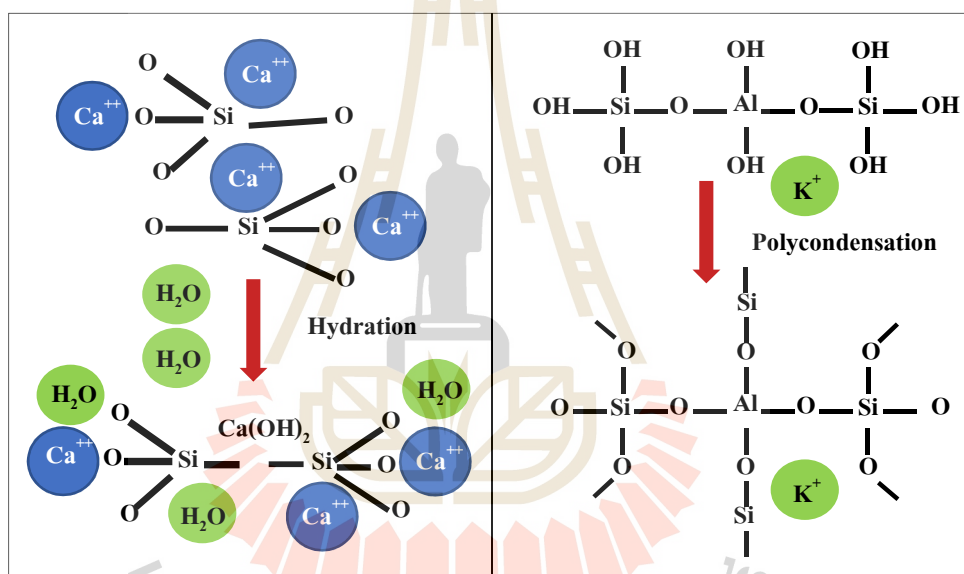
รูปที่ 2.2 การเกิดสารจีโอโพลิเมอร์ (ศักรินทร์ เหลืองคำจอง, 2559)

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างของโมเลกุลลูกโซ่ที่แตกต่างกันออกไป จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารตั้งต้น Si : Al ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของจีโอโพลิเมอร์ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.3 และรูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยา

จีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน พบว่าวัสดุหลักที่เป็นสารตั้งต้นของการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันคือวัสดุที่มีองค์ประกอบของ ซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งจะสามารถพบได้ในวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าแกลบ (RHA) หรือ Metakaolin เป็นต้น



เมื่อ M คือธาตุอัลคาไลน์, - คือการยึดเกาะพันธะ, Z คือจำนวนโมเลกุล, n คือหน่วยซ้ำของโมเลกุลลูกโซ่ และ w คือจำนวนโมเลกุลของน้ำ



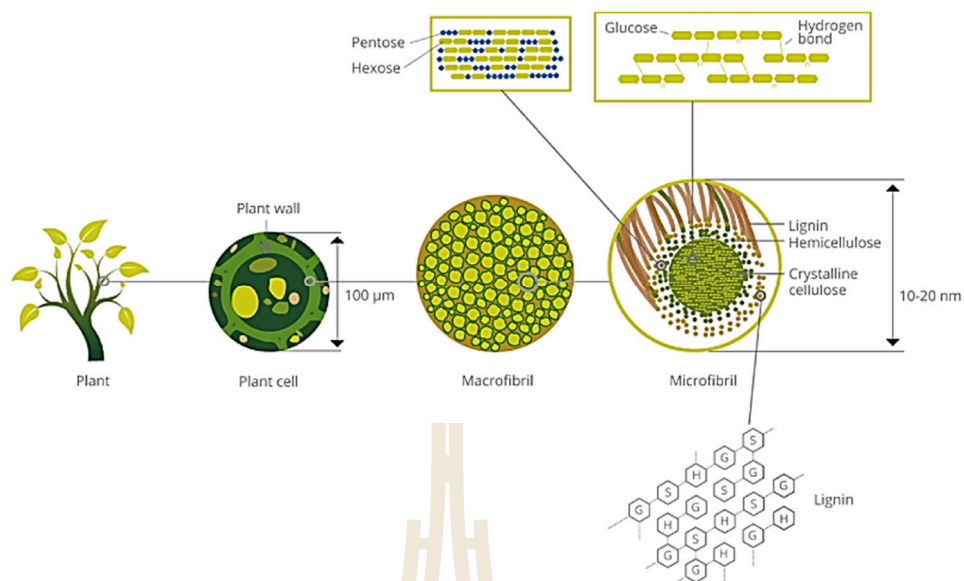
รูปที่ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน
ดัดแปลงมาจาก (ศักรินทร์ เหลืองคำจง, 2559)

จากวัสดุที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้หลากหลายเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีข้อดีอยู่หลายประการ จีโอโพลิเมอร์ยังคงมีข้อเสียเช่นเดียวกับวัสดุซีเมนต์ทั่วไป คือมีลักษณะเฉพาะเมื่อเกิดการวิบัติที่เป็นพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำ (Low Tensile Strength) และความต้านทานต่อการแตกร้าวต่ำ (Low Fracture Toughness) ทำให้มีข้อจำกัดสำหรับการใช้นำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างบางประเภท ดังนั้นจึงต้องมีการใช้วัสดุเสริมแรงให้กับวัสดุ

เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งาน จากรายงานของ Arbelaz et al., (2005) พบว่าเส้นใยสังเคราะห์มักถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในส่วนประกอบในการเสริมแรงให้กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ดีขึ้น และทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจคือ การนำเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากพืช มาใช้ทดแทนวัสดุใยสังเคราะห์ที่มีตามท้องตลาดซึ่งมีราคาค่อนข้างแพง โดยเพิ่มพูน พันธุ์ยางน้อย (2553) ได้นำเส้นใยปอแก้วและปานครนารายณ์มาเสริมกับวัสดุซีเมนต์มอร์ต้า เพื่อพัฒนาเป็นแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ พบว่าแผ่นเฟอร์โรซีเมนต์ที่เสริมเส้นใย จะส่งผลต่อการรับแรงดัดค่อนข้างดีเนื่องจากเส้นใยจะช่วยในการรับแรงดัด หลังจากที่มีมอร์ต้าแตกร้าว เช่นเดียวกันกับ ภูษิต เลิศพัฒนารักษ์ และ อัญชิสา สันติจิตโต (2555) ได้นำเส้นมะพร้าวและเส้นใยปาล์มมาเสริมกับวัสดุซีเมนต์เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุก่อสร้างคือกระเบื้องหลังคาแผ่นเรียบและแผ่นผนัง เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร พบว่าการนำเส้นใยธรรมชาติทั้งสองประเภทในอัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนัก จะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ตัวนำความร้อนได้ดีกว่าซีเมนต์เพสต์ควมร้อยละ 66 ซึ่งส่งผลต่อการประหยัดพลังงานสำหรับระบบปรับอากาศภายในอาคารที่พักอาศัยได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับ สุวัฒน์ชัย ปลื้มฤทัย (2555) ได้พัฒนาคอนกรีตบล็อกจากผักตบชวา พบว่าคอนกรีตบล็อกที่ผสมเส้นใยผักตบชวาจะมีความสามารถในการลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้ดี และมีต้นทุนที่ราคาถูกกว่าคอนกรีตบล็อกที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจากงานวิจัยเหล่านี้ การนำเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาใช้ถือว่าได้รับความนิยมและประสบความสำเร็จอย่างมาก สำหรับเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถนำพัฒนาเพื่อประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ทางด้านวัสดุก่อสร้าง หรือวัสดุทางด้านสถาปัตยกรรมในส่วนต่าง ๆ ของบ้าน เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ และยังสามารถหาได้ง่าย อีกทั้งยังราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2.2 เอกลักษณะของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fiber)

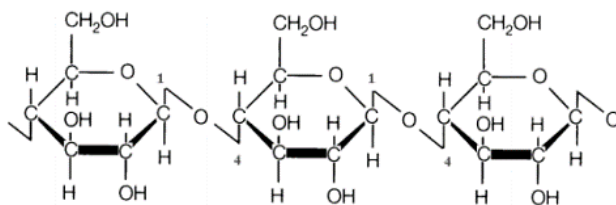
เส้นใยธรรมชาติจากพืชหรือเส้นใยเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ถูกสกัดมาจากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ใบ เปลือก ลำต้น โดยมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นจำพวกลิกโนเซลลูโลส เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) จัดเรียงตัวกันอยู่ในผนังเซลล์ของพืช (Plant Cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (รัชพล พะวงศร์รัตน, 2558)



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติ (พรณพร กะตะจิตต์, 2561)

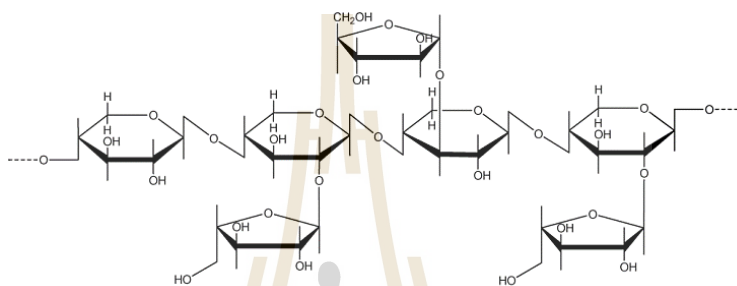
2.2.1 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืช

1. เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากโมเลกุลของกลูโคสต่อกันเป็นสายโซ่ยาว โดยจะเชื่อมต่อด້วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก (β -1, 4-glycosidic bond) เกิดเป็นโพลิเมอร์กลูแคน (Glucan) กลายเป็นโมเลกุลของเซลลูโลสที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสมากกว่า 10,000 โมเลกุล ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และเมื่อเกาะจับตัวกันมากขึ้นจึงเกิดเป็นเส้นใย ซึ่งโมเลกุลของเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน และเรียงตัวแบบขนานกัน เรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril) (รัชพล พะวงส์รัตน, 2558) ดูจากรูปที่ 2.5



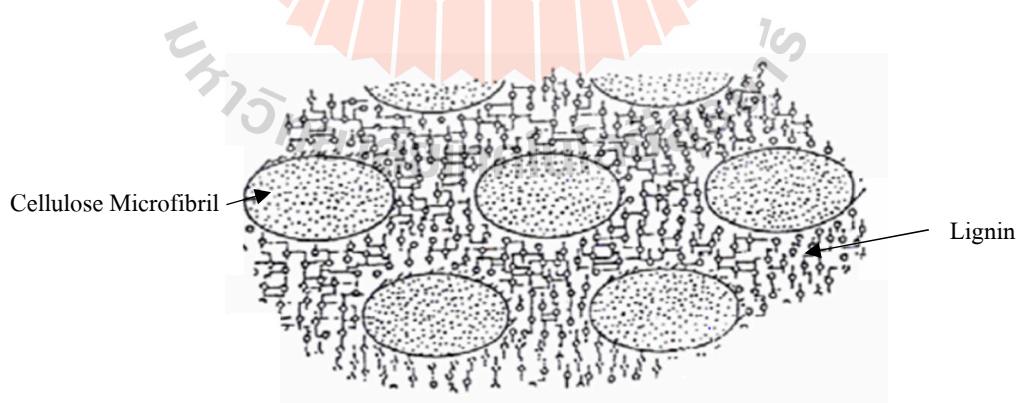
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (รัชพล พะวงส์รัตน, 2558)

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสรองมาจากเซลลูโลส ซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ของน้ำตาลหลากหลายชนิดเชื่อมต่อกัน มีลักษณะเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ส่วนมากจะเป็นดีไซแลน ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (Xylose) หลาย ๆ โมเลกุล โดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1 และ 4-ไกลโคซิดิก (นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล, 2550) ซึ่งเฮมิเซลลูโลสจะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ มีความสามารถในการกักน้ำ (Water holding capacity) ดูได้จากรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส (รัชพล พะวงศรีรัตน, 2558)

3. ลิกนิน (Lignin) เป็นสารอินทรีย์ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) มากกว่า 10,000 หน่วย ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน (สุภาวดี ผลประเสริฐ, 2557) ดูได้จากรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โมเลกุลลิกนินที่ยึดติดกับไมโครไฟบริลของเซลลูโลส (นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล, 2550)

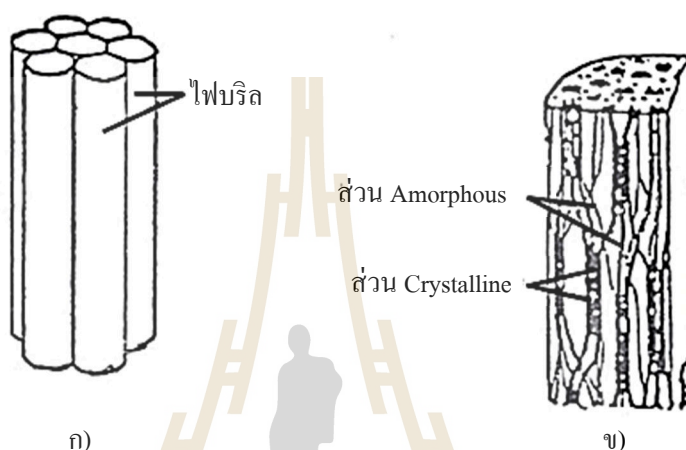
โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติจากพืชจะมีองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพกติน และอื่น ๆ เป็นต้น อัตราส่วนของแต่ละองค์ประกอบจะแตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใย ดังข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปพบว่าเส้นใยธรรมชาติจากพืชจะมีองค์ประกอบทางเคมีของเซลลูโลสอยู่ประมาณ 40-60% เฮมิเซลลูโลส 20-40% และลิกนิน 10-30% และองค์ประกอบอื่น ๆ อีกเพียงเล็กน้อย ซึ่งปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติโดยตรงต่อเส้นใย (Jin Suk Lee et al., 2008) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยไม่ใช่ปัจจัยเพียงอย่างเดียวที่กำหนดความแข็งแรงของเส้นใย แต่ยังรวมไปถึงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้ด้วย

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติ (Li Xue et al., 2007)

Type of fiber	Cellulose (%)	Lignin (%)	Hemicellulose (%)	Pectin (%)	Ash (%)
A. Bast fiber					
Fiber flax	71	2.2	18.6 – 20.6	2.3	–
Seed flax	43–47	21–23	24–26	–	5
Kenaf	31–57	15–19	21.5–23	–	2–5
Jute	45–71.5	12–26	13.6–21	0.2	0.5–2
Hemp	57–77	3.7–13	14–22.4	0.9	0.8
Ramie	68.6–91	0.6–0.7	5–16.7	1.9	–
B. Core fiber					
Kenaf	37–49	15–21	18–24	–	2–4
Jute	41–48	21–24	18–22	–	0.8
C. Leaf fiber					
Abaca	56–63	7–9	15–17	–	3
Sisal	47–78	7–11	10–24	10	0.6–1
Henequen	77.6	13.1	4–8	–	–

2.2.2 การจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส

การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสจะมีความแตกต่างกันไป คือ ถ้าแต่ละโมเลกุลมีการเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ไร้ทิศทาง จะทำให้เส้นใยมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous Region) ส่วนโมเลกุลที่มีการเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบจะทำให้เส้นใยมีความเป็นผลึกเกิดขึ้น ซึ่งเรียกการจัดเรียงตัวนี้ว่า Crystalline Region ดังแสดงในรูปที่ 2.8



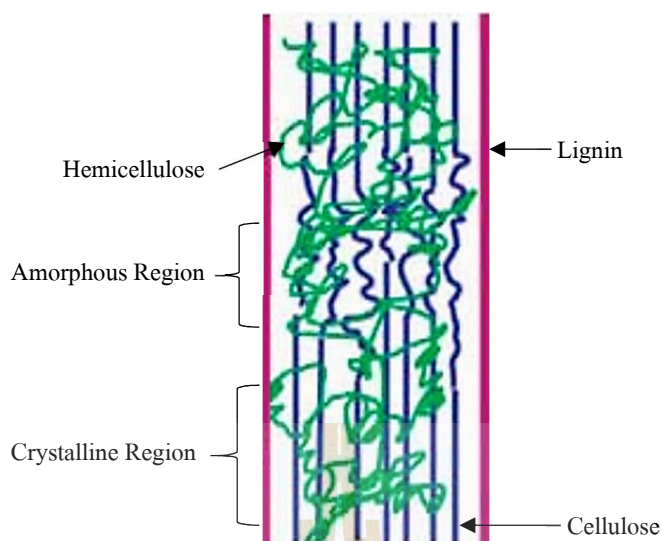
รูปที่ 2.8 การจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสแบบไมโครไฟบริล (microfibril)

ก.) กลุ่มของไมโครไฟบริลที่จัดเรียงตัวขนาดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน

ข.) ภาพตัดตามยาวของไมโครไฟบริล (microfibril)

(นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล, 2550)

สำหรับเส้นใยที่มีความเป็นผลึกมากจะมีความแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความเป็นผลึกน้อย และทิศทางการ จัดเรียงตัวของโมเลกุลในตามแนวที่ขนานกับแกนตามความยาวของเส้นใย ก็จะช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากโมเลกุลเรียงตัวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำต่อเส้นใย (ตามความยาว) ทำให้สามารถมีส่วนช่วยในการรับแรงเต็มที่ เรียกว่าเส้นใยนั้นมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่ดี (oriented fiber) ในอีกกรณีหนึ่งแม้เส้นใยจะมีบริเวณที่เป็นผลึกมาก แต่มีทิศทางการจัดเรียงตัวที่ไม่ขนานกับแกนตามยาวของเส้นใย โมเลกุลก็ไม่สามารถรับแรงในทิศทางการดึงเส้นใยได้เต็มที่ทำให้มีความแข็งแรงน้อยกว่าในกรณีแรก ซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่

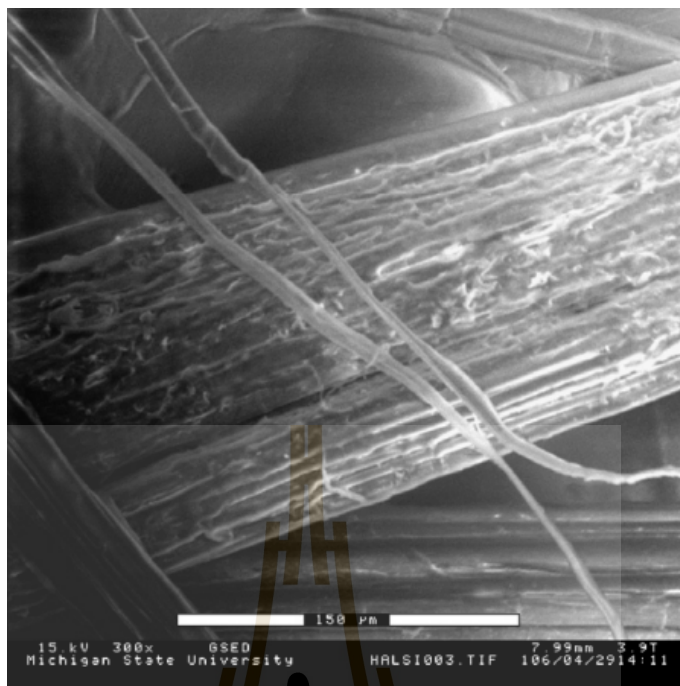


รูปที่ 2.9 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลส
คัดแปลงมาจาก (Jin Suk Lee et al., 2008)

Yan Li et al. (2000) และ Asasutjarit et al. (2009) ได้รายงานไว้ว่า เมื่อส่วนประกอบเซลลูโลสมีมากขึ้น และการลดลงของการบิดเกลียวในไมโครไฟบริลที่ผนังเซลล์ชั้นที่สองกับแนวแกนของเส้นใย จะส่งผลให้ความแข็งแรงและความแกร่งของเส้นใยจากพืชมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Pickering et al. (2016) ยังได้รายงานไว้ว่า คุณสมบัติของเส้นใยแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบเคมีและโครงสร้างแตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการเจริญเติบโต เวลาการเก็บเกี่ยว วิธีการสกัดเส้นใย วิธีการปรับสภาพและวิธีการเก็บรักษาด้วย ซึ่งในปี ค.ศ 2007 Pickering ได้รายงานไว้ว่า กำลังรับแรงดึงของเส้นใย กล้วยจะเพิ่มขึ้นในช่วง 99 วันถึง 114 วันของการเจริญเติบโต จากนั้นกำลังของเส้นใยจะลดลงประมาณ 15% หลังจากเลยเวลาเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมมาประมาณ 5 วัน

2.2.3 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลส

จากรายงานของ Sgriccia et al., (2008) โดยธรรมชาติพื้นที่ผิวของเส้นใยเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทำให้มีสมรรถภาพในการยึดเกาะมากเพียงพอที่จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับวัสดุประเภทซีเมนต์ได้



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของเส้นใยธรรมชาติ (Sgriccia et al., 2008)

2.3 ประโยชน์ของเส้นใยธรรมชาติ

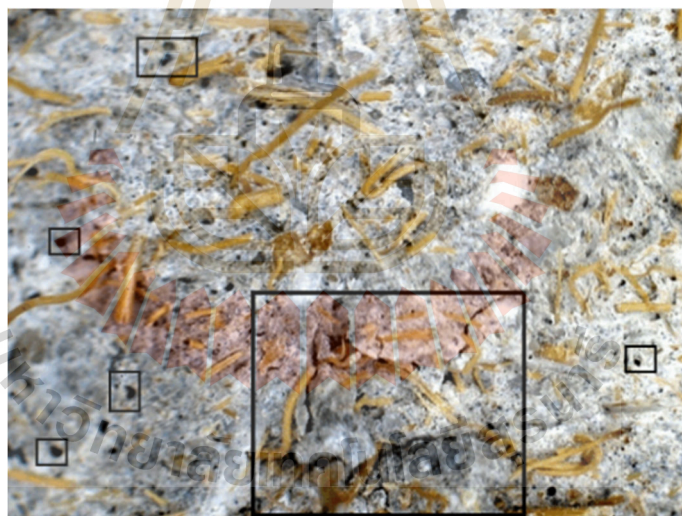
การนำเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสมาเสริมกับวัสดุประเภทซีเมนต์ เนื่องจากประโยชน์ของมัน คือทำหน้าที่ช่วยรับแรงดึงและถ่ายแรง ด้วยความสามารถในการยึดเกาะของเส้นใยที่มีมากเพียงพอ จึงทำให้ช่วยปรับปรุงข้อจำกัดของพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุซีเมนต์ที่เป็นแบบเปราะได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพคุณสมบัติทางกลของวัสดุในด้านกำลังรับแรงดัด ความเหนียว และความทนทานต่อแรงกระแทกอีกด้วย (Frazao et al., 2008; Asasutjarit et al., 2009)



รูปที่ 2.11 พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติ (Frazao et al., 2008)

2.4 วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช

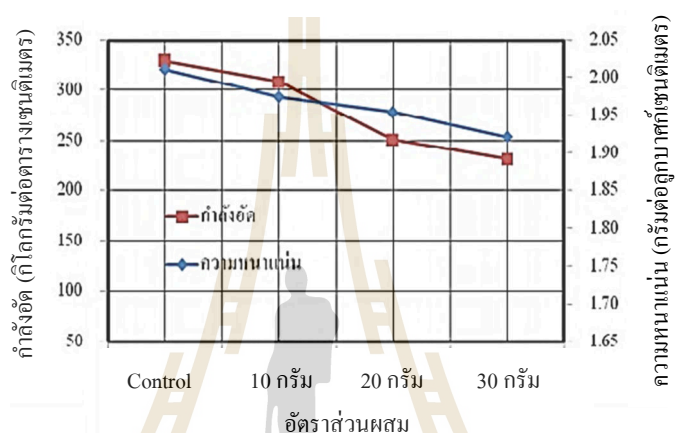
เพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องความเปราะและความเหนียว ให้กับวัสดุซีเมนต์ในอดีต วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืชได้ถูกคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยจากการศึกษาของ Abdullah et al. (2001) ได้รายงานว่าเส้นใยมะพร้าวมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพคุณสมบัติทางกลให้กับวัสดุซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เส้นใยมะพร้าวมีส่วนช่วยลดรอยแตกร้าวของวัสดุซีเมนต์ได้ จากการศึกษาวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมด้วยเส้นใยมะพร้าว 0, 3, 6 และ 15% ของน้ำหนัก ซึ่งใช้อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:1 และปริมาณน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่าปริมาณของเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมเท่ากับ 9% ของน้ำหนัก โดยระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะทำให้วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 43.84 เมกะปาสกาล และค่าโมดูลัสการแตกหักเท่ากับ 15.23 เมกะปาสกาล และที่ปริมาณของเส้นใยมะพร้าวมากกว่า 9% ของน้ำหนักจะทำให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตมีค่าลดลง



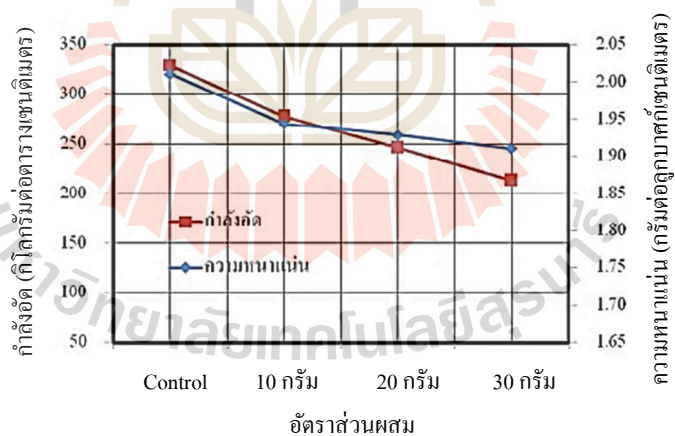
รูปที่ 2.12 แสดงพื้นผิวการแตกหักของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยมะพร้าว 9% ของน้ำหนัก (Abdullah et al., 2011)

นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ (2556) รายงานว่าความยาวและปริมาณของเส้นใยจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุซีเมนต์เพสต์ จากศึกษาคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์เสริมเส้นใยตาลโตนด โดยมีปริมาณของเส้นใยแตกต่างกันคือ 0, 10, 20 และ 30 กรัม เส้นใยที่มีความยาว 2 และ 8 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด และความยาวของเส้นใย 8 เซนติเมตร สำหรับการ

ทดสอบกำลังรับแรงค้ด จากการทดสอบด้งแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 พบว่าความยาวและปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้กำลังรับแรงค้ดและความหนาแน่นมีค่าน้อยลง โดยกำลังรับแรงค้ดจะลดลงร้อยละ 35.3 และความหนาแน่นลดลงร้อยละ 5 แต่ในทางกลับกันเมื่อบริมาณของเส้นใยที่เสริมในวัสดุซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อกำลังรับแรงค้ดที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยกำลังรับแรงค้ดเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 38.9 เป็นเพราะเส้นใยตาลโตนดเป็นวัสดุที่ช่วยเพิ่มการยึดเกาะกัน เส้นใยมีส่วนช่วยให้ซีเมนต์เพสต์ไม่เกิดการพังแบบวัสดุเปราะในขณะที่เกิดการวิบัติ

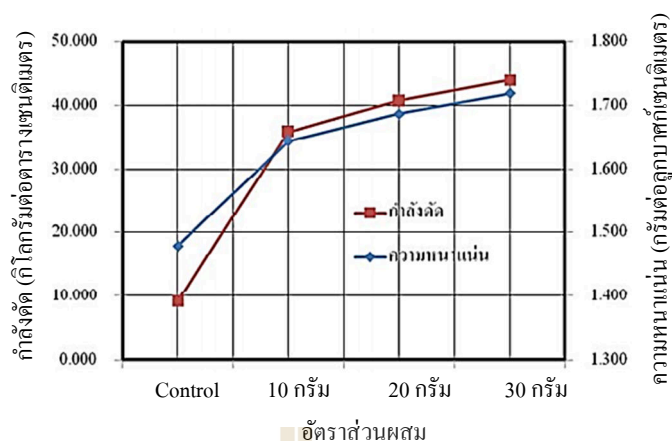


a) เส้นใยตาลโตนดยาว 2 เซนติเมตร



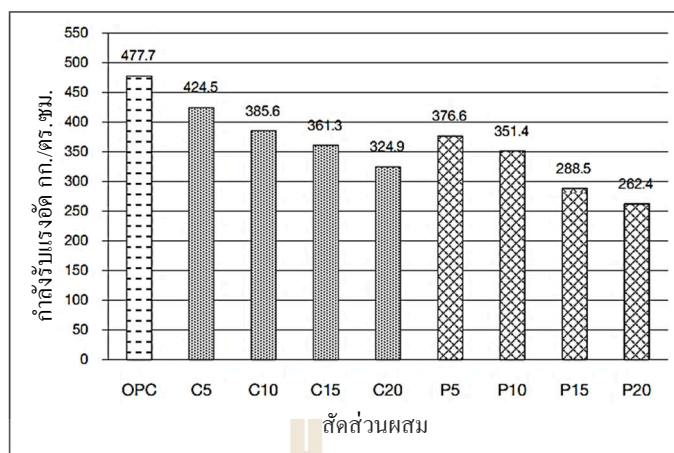
b) เส้นใยตาลโตนดยาว 8 เซนติเมตร

รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงค้ดของตัวอย่างทดสอบที่ 28 วัน
(นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ, 2556)

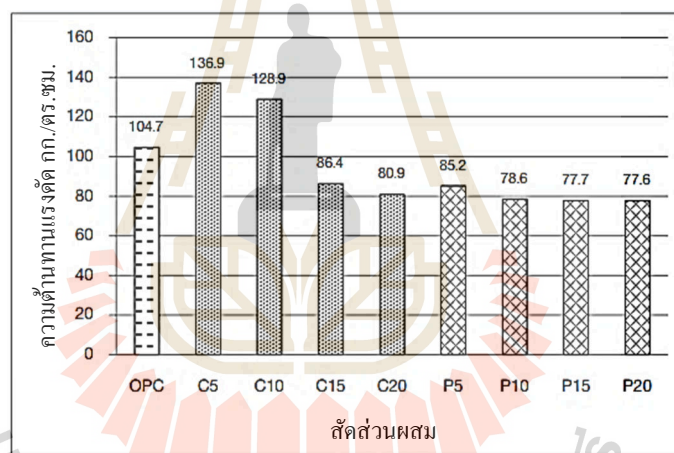


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบที่ 28 วัน (นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ, 2556)

Lertwattanaruk and Masuwan (2015) ได้รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำจะทำให้ความหนาแน่นของวัสดุมีค่าลดลง ส่วนค่าความชื้นและการดูดซึมน้ำจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.15 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยจะไม่ส่งผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลทางด้านกำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต จากศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ โดยใช้ส่วนผสมของเส้นใยที่ต่างชนิดกันคือ เส้นใยคาบมะพร้าวและเส้นใยปาล์ม ที่อัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ของน้ำหนัก ซึ่งส่วนผสมของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผงหินปูน น้ำ และทราย จากผลการทดสอบที่อัตราส่วนเส้นใยร้อยละ 20 ของน้ำหนัก วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยคาบมะพร้าวจะมีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดเท่ากับ 1.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร รวมถึงค่าความชื้นและการดูดซึมน้ำจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 5.79% และ 10.29% ตามลำดับ แต่สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตผสมเส้นใยปาล์มจะทำให้กำลังมีแนวโน้มลดลงมากที่สุด เท่ากับ 262.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่สำหรับวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยมะพร้าวอัตราส่วนร้อยละ 5% จะทำให้กำลังรับแรงดัดมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 136.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดูได้จากรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 กำลังรับแรงอัดของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ (Lertwattanaruk and Masuwan, 2015)



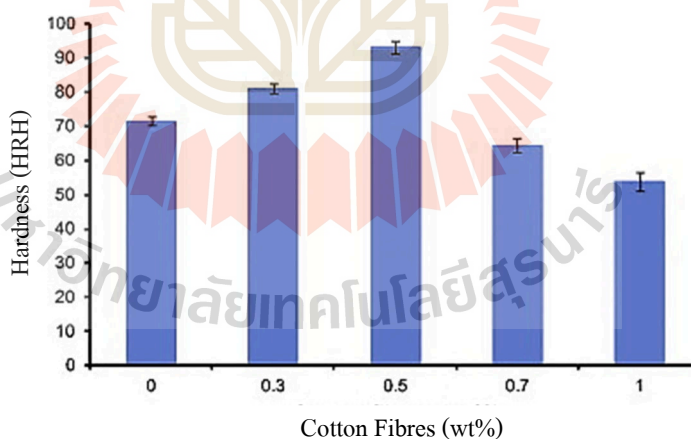
รูปที่ 2.16 กำลังรับแรงอัดของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ (Lertwattanaruk and Masuwan, 2015)

อีกทั้ง Ardanuy et al. (2011) รายงานว่าเส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการลดการนำความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยจะทำการศึกษาวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตที่เสริมด้วยเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดคือ เส้นใยฝ้าย เยื่อไม้ยูคาลิปตัส และเส้นใยไผ่ จากผลการทดสอบพบว่า ปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มีค่าลดลง โดยสารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ลดลง 32% และ ไตรแคลเซียมซัลไฟเกต (C_3S) กับ ไดแคลเซียมซัลไฟเกต (C_2S) ลดลงประมาณ 21% ไคแคลเซียมซัลไฟเกต ความร้อนที่ลดลงเหล่านี้จะส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยไผ่อีกด้วย

2.5 วัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช

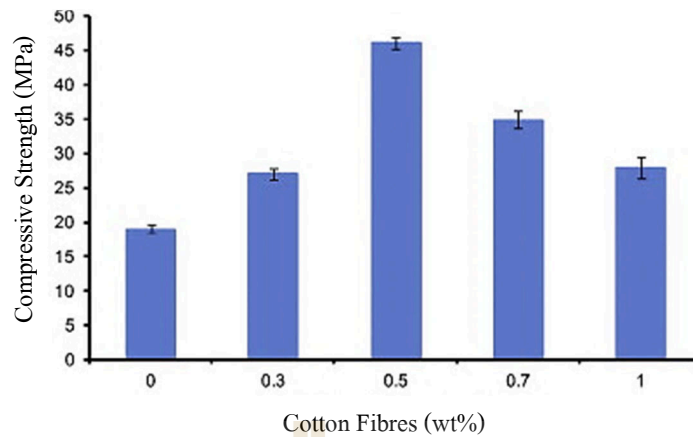
เช่นเดียวกับวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติจากพืช การปรับปรุงกำลังรับแรงดัดให้กับวัสดุอีโพลิเมอร์ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างให้มีความหลากหลายมากขึ้น จึงได้มีนักวิจัยหลายคนเริ่มทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำเส้นใยธรรมชาติจากพืชมาเสริมกำลังให้กับวัสดุอีโพลิเมอร์

Alomayri and Low (2013) ได้อธิบายถึงการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของเส้นใยฝ้ายมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลของอีโพลิเมอร์เสริมเส้นใยฝ้าย 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อแก้วลอยเท่ากับ 3.5 และอัตราส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 พบว่าอีโพลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยฝ้าย 0.5% ของน้ำหนัก เมื่อเทียบกับอีโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่เสริมเส้นใยฝ้าย ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 70 เป็น 93 Rockwell H (HRH) ดูได้จากรูปที่ 2.17 และกำลังรับแรงอัดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 46.0 เมกกะปาสคาล แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 รวมถึงความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่ามากขึ้น จาก 1.9 เป็น 4.5 กิโลจูลต่อตารางเมตร อีกด้วย ซึ่งจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.19

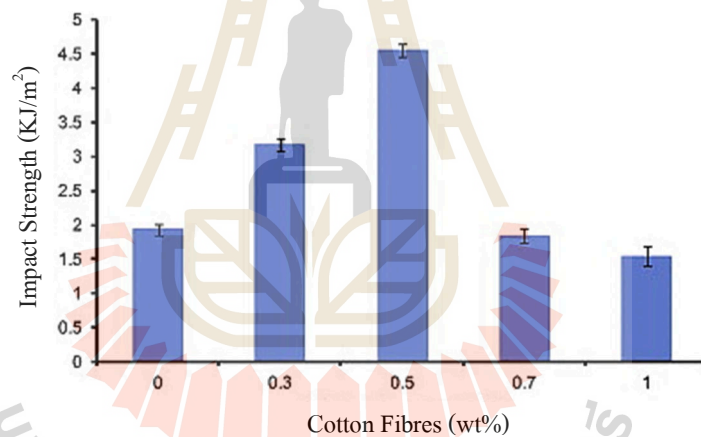


รูปที่ 2.17 ความแข็งของอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย

0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013)

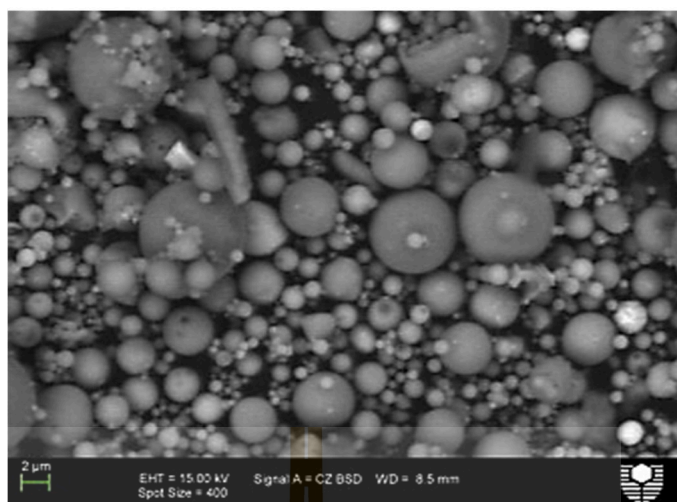


รูปที่ 2.18 กำลังรับแรงอัดของของอีโพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013)

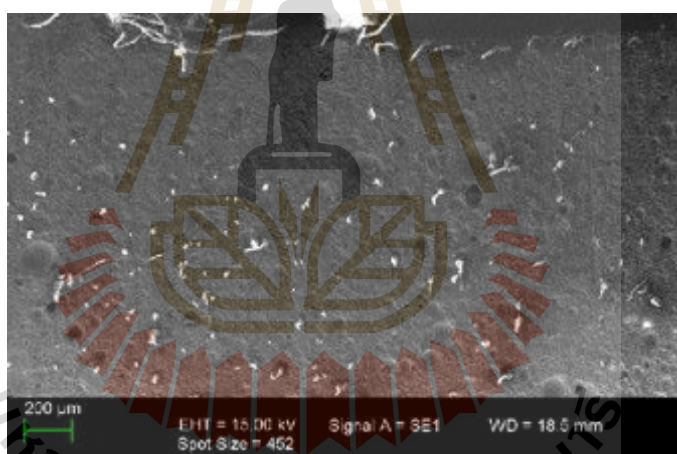


รูปที่ 2.19 ความทนทานต่อแรงกระแทกของอีโพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013)

นอกจากนี้ Alomayri and Low (2013) ยังได้กล่าวถึงการทดสอบลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (SEM) จากรูปที่ 2.20 เดิมจะเห็นว่าเถ้าลอยก่อนเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยสารละลายอัลคาไลน์ จะมีอนุภาคเป็นลักษณะทรงกลมที่มีขนาดแตกต่างกันและมีพื้นผิวเรียบเนียน แต่เมื่อวัสดุอีโพอลิเมอร์คอมโพสิตได้มีการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณ 0.5% ของน้ำหนัก และถูกกระตุ้นด้วยสารละลายอัลคาไลน์ พบว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับอีโพอลิเมอร์เมทริกซ์และดูมีความสม่ำเสมอ ดูได้จากรูปที่ 2.21



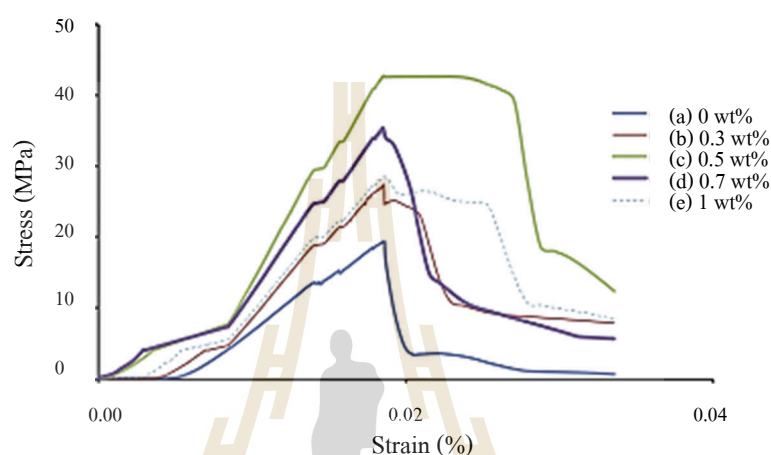
รูปที่ 2.20 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของแก้วลอย (Alomayri and Low, 2013)



รูปที่ 2.21 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใย 0.5% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013)

จากผลการศึกษาของ (Alomayri and Low, 2013) คุณสมบัติทางกลของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยจะมีค่าสูงสุด ที่ปริมาณของเส้นใยเท่ากับ 0.5% เนื่องจากเส้นใยมีส่วนช่วยกระจายแรงภายในเมทริกซ์ จึงทำให้อีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น จากรูปที่ 2.22 แสดงถึงค่าความเค้นและความเครียดมีแนวโน้มในลักษณะเป็นเส้นโค้งบ่งบอกถึงเส้นใยมีส่วนช่วยเหนี่ยวรั้งพฤติกรรมการเสียรูปแบบลักษณะเปราะของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์ ซึ่งเกิดจากพันธะยึดเหนี่ยวกันระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ เมื่ออีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตรับแรงแบบ

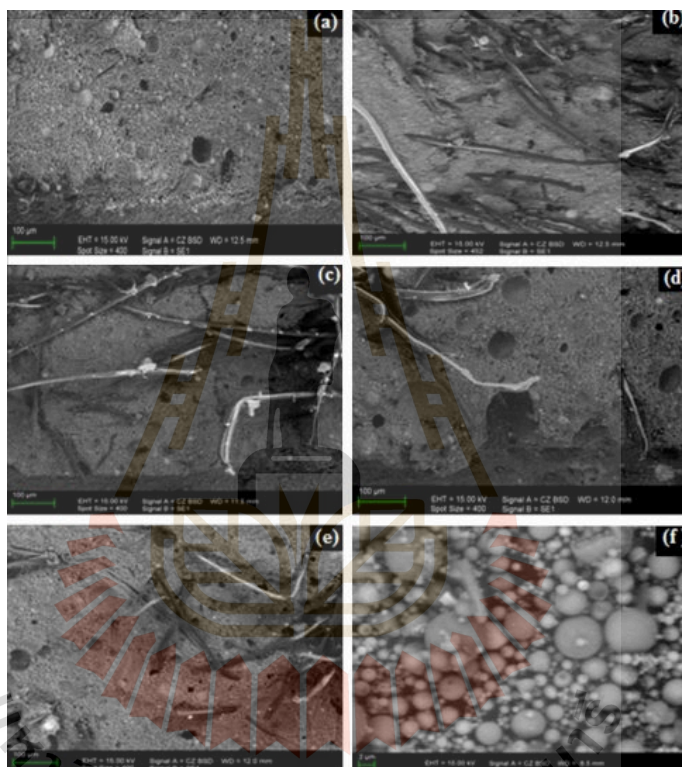
เฉียบพลัน เส้นใยจะเกิดการพังแบบ Pull-Out ก่อนเส้นใยฝ้ายจะขาดและเกิดการเสียรูป แต่เมื่อปริมาณของเส้นใยฝ้ายมากกว่า 0.5% ของน้ำหนัก จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลที่ลดลง เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเส้นใยฝ้าย ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีของเส้นใยภายในจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้นปริมาณของเส้นใยฝ้ายจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอีกด้วย



รูปที่ 2.22 ความเค้นและความเครียดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก (Alomayri and Low, 2013)

ในปีเดียวกัน Alomayri et al. (2013) ได้รายงานเพิ่มเติมเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย ทางด้านคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกล และพฤติกรรมการแตกหัก โดยมีสัดส่วนปริมาณเส้นใยฝ้ายที่ต่างกันคือ 0, 0.3, 0.5, 0.7 และ 1% ของน้ำหนัก จากการศึกษพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย 1% ของน้ำหนัก มีความหนาแน่นน้อยที่สุดเท่ากับ 1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความพรุนมากที่สุดเท่ากับ 30% จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลจะเห็นว่าจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยฝ้าย 0.5% ของน้ำหนัก จะทำให้กำลังรับแรงคดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10.4 เป็น 11.7 เมกะปาสกาล ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นจาก 0.08 เป็น 0.95 จิกะปาสกาล และความต้านทานต่อการการแตกหักมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.12 เมกะปาสกาล เมตร^{1/2} จากรูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยฝ้ายมีส่วนช่วยเพิ่มความต้านต่อการแตกหักโดยผ่านฟังก์ชันการดูดซับพลังงาน เช่น การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ การแยกตัวของเส้นใยเมื่อเกิดการพังแบบ Pull-Out และการเหนียวรั้งของเส้นใย จากรูปที่ 2.23 c) เส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีภายในจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่ง

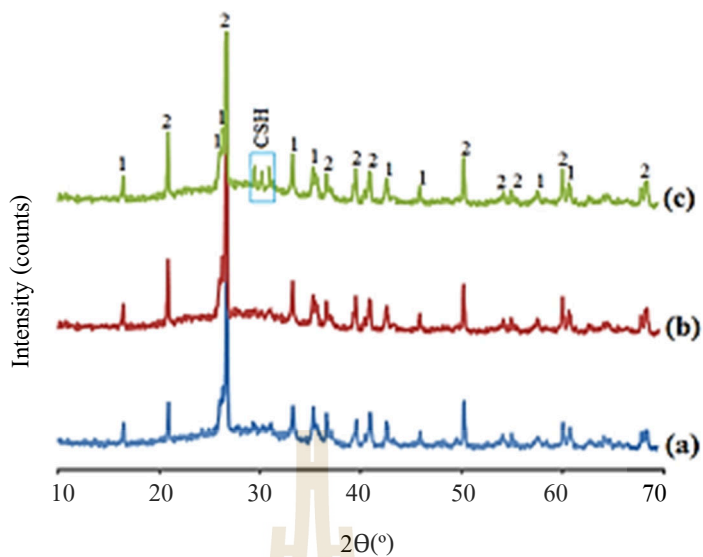
การกระจายตัวที่ดีของเส้นใยฝ้ายจะช่วยในเรื่องการทำงานร่วมกันระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ เพิ่มความเหนียวแน่นในการยึดเกาะกัน โดยการเหนียวรั้งของเส้นใยฝ้ายมีส่วนทำให้การขยายตัวของรอยร้าวภายในโครงข่ายของวัสดุคดน้อยลง แต่ถ้าเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีของเส้นใยฝ้ายภายใน จีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ ก็จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยฝ้ายกับเมทริกซ์ลดลง เนื่องจาก ปริมาณของเส้นใยฝ้ายที่เพิ่มขึ้นเกิน 0.5% ของน้ำหนัก จะเพิ่มความพรุนให้กับวัสดุ ซึ่งจะส่งผลต่อ กำลังของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ลดลง ดูได้จากรูปที่ 2.23 d) และ e.)



รูปที่ 2.23 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย a) 0, b) 0.3, c) 0.5, d) 0.7, e) 1.0 wt% และ f.) ใ้ล้อย (Alomayri et al., 2013)

Alzeer and MacKenzie (2013) ได้รายงานว่าการเสริมเส้นใยลิกนินจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้กับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ กำลังรับแรงคดของวัสดุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 0, 4, 7 และ 10% ของน้ำหนัก ตัวอย่างทดสอบจะถูกลบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และบ่มทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง 14 วัน ก่อนนำมาทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมด้วยเส้นใย 10% จะมีค่ากำลังรับแรงคดสูงสุดเท่ากับ 70 เมกะปาสคาล ส่วนจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่มีการเสริมเส้นใยลิกนิน กำลังรับแรงคดจะอยู่ที่ประมาณ 5.8 เมกะปาสคาล เท่านั้น

Alomayri et al. (2014) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย โดยบ่ม ณ อุณหภูมิห้อง การทดสอบนี้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถูกใช้เป็นตัวควบคุมในอัตราส่วนที่ต่างกัน คือ 0, 5, 8 และ 10% ของน้ำหนัก อัตราส่วนของสารละลายอัลคาไลน์ต่อเกลือลอย (L/FA) เท่ากับ 0.35 และอัตราส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 จากผลการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้ายที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10% ของน้ำหนัก กำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงกระแทกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 17.1 เมกะปาสคาล และ 7.8 กิโลจูลต่อตารางเมตร แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มากกว่า 5% ของน้ำหนัก จะทำให้ความต้านทานการแตกหักลดลง เนื่องจากแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดูได้จากรูปที่ 2.24 จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางกลให้กับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์จะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใยกับจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์เข้าด้วยกัน ทำให้โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น จากรูปที่ 2.25 จะเห็นว่าเส้นใยมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังให้กับคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความสามารถในการดูดซับพลังงาน ทำให้จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมเส้นใยฝ้ายมีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตไม่มีการเสริมเส้นใยฝ้าย และเมื่อมีแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์แทรกซึมเข้าไปภายในจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ จึงเกิดการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยฝ้ายกับเมทริกซ์ดีขึ้น ส่งผลทำให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีกำลังรับแรงคดและกำลังรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

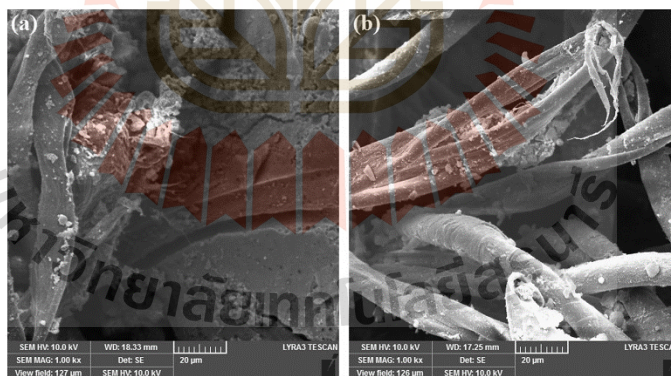


รูปที่ 2.24 ผลการวิเคราะห์ XRD a) fly ash and geopolymers specimens prepared with, b) 0 wt% OPC and c) 10 wt% OPC (Alomayri et al.,2014)

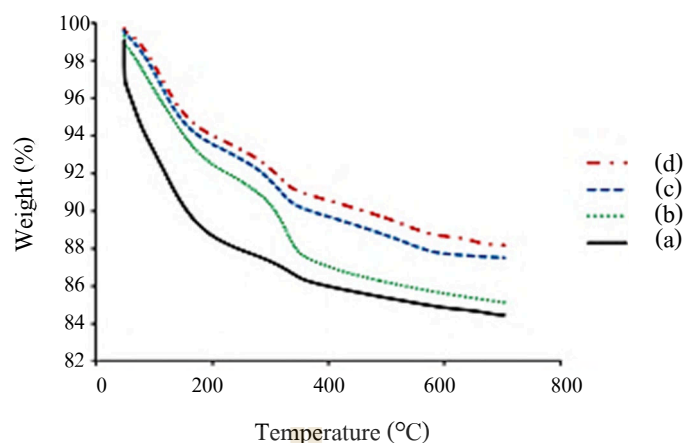


รูปที่ 2.25 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใย ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10% ของน้ำหนัก (Alomayri et al., 2014)

แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังส่งผลทำให้ความต้านทานการแตกหักลดลง เพราะว่าเมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตมีลักษณะคล้ายวัสดุซีเมนต์ทั่วไป สังเกตได้จากภาพถ่ายระดับจุลภาคในรูปที่ 2.26 a) ลักษณะการพังของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5% ของน้ำหนัก จะเกิดการเหนียวรั้งของเส้นใยแบบ Pull-Out ก่อนวัสดุเกิดการเสียรูป และรูปที่ 2.26 b) ลักษณะการพังของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากกว่า 5% ของน้ำหนัก จะเห็นว่าเส้นใยฝ้ายไม่ได้หลุดออกมาจากเนื้อของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เมื่อมีแรงมากระทำจึงเกิดการพังแบบลักษณะของเส้นใยที่ถูกตัดขาดออกจากกัน หรือเรียกพฤติกรรมของการแตกหักแบบวัสดุเปราะ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยกับจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง ส่งผลให้ความต้านทานการแตกหักลดลงเช่นเดียวกัน ต่อมาในขณะเดียวกัน Alomayri et al. (2014) ยังได้วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (TGA) เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุ โดยวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ วัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการคายน้ำ การสูญเสียน้ำหนักจะลดลงก็ต่อเมื่อเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เข้าไปผสมในจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต และการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ดีขึ้น ดูได้จากรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 ลักษณะการพังของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมด้วยเส้นใยฝ้ายผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ a) 5% และ b) 10 WT% OPC (Alomayri et al., 2014)

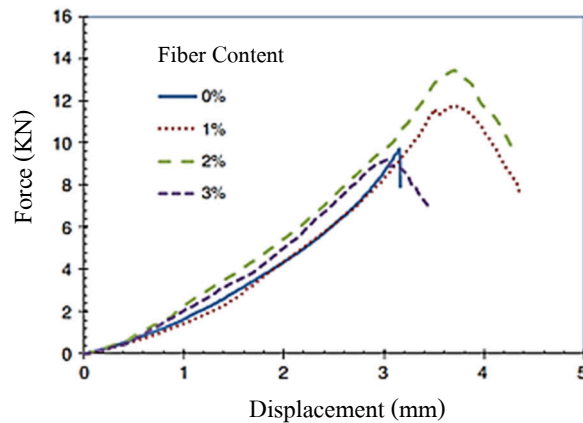


รูปที่ 2.27 เสถียรภาพทางความร้อนของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย

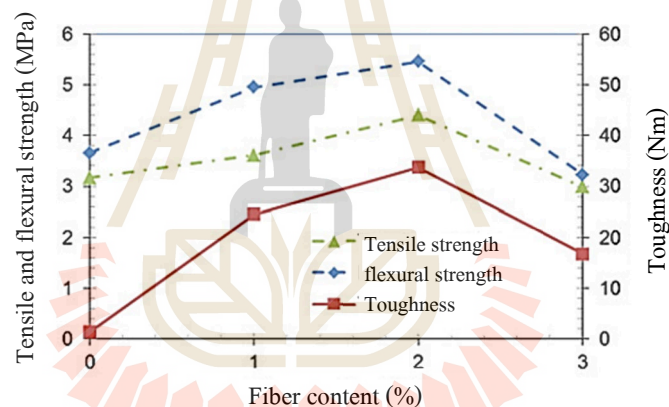
a) 0 wt% OPC, b) 5 wt% OPC, c) 8 wt% OPC และ d) 10 wt% OPC.

(Alomayri et al., 2014)

R. Chen et al. (2014) ได้รายงานว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการเสริมด้วยเส้นใยข้าวฟ่างหวานจะช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับวัสดุ งานวิจัยนี้จะใช้เส้นใยข้าวฟ่างหวาน ขนาดความยาว 5 เซนติเมตร เป็นตัวควบคุมในสัดส่วน 0, 1, 2 และ 3 % เพื่อทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางกล ด้านกำลังรับแรงดัด แรงดึง และความเหนียว จากผลการทดสอบในรูปที่ 2.28 ที่สัดส่วนของเส้นใยข้าวฟ่างหวาน 2% จะทำให้ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 36 % อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้แรงดัด กำลังรับแรงดัด และความเหนียวของวัสดุมีค่าสูงสุด เท่ากับ 4.4, 5.4 เมกกะปาสคาล และ 34 นิวตันเมตร ตามลำดับ ดูได้จากรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะการเคลื่อนที่จากการทดสอบ ความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างทดสอบ (R. Chen et al., 2014)



รูปที่ 2.29 ผลการทดสอบแรงดึง กำลังรับแรงคดและความเหนียวของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต เสริมเส้นใยข้าวฟ่างหวาน 0, 1, 2 และ 5% ของน้ำหนัก (Chen et al., 2014)

Korniejenko et al. (2016) ได้รายงานว่าลักษณะเฉพาะของเส้นใยแต่ละชนิดนั้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ต่างกัน จากการศึกษากีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติต่างชนิดกัน คือ เส้นใยฝ้าย, เส้นใยป่าน, เส้นใยต้นปาล์ม และเส้นใยมะพร้าว ที่อัตราส่วนผสม 1% ของน้ำหนักแก้วลอย และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 8 โมลาร์ ผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ในอัตราส่วน 1:2 และ 5 จากการทดสอบชนิดของเส้นใยธรรมชาติจะมีผลต่อกำลังที่แตกต่างกันออกไป เส้นใยฝ้าย, เส้นใยมะพร้าว และใยป่าน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพคุณสมบัติทางกลให้กับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมด้วย

เส้นใยมะพร้าวจะมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุดเท่ากับ 31.36 เมกกะปาสกาล และวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยป่านจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 5.90 เมกกะปาสกาล แต่ในขณะเดียวกันจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมด้วยเส้นใยต้นปาล์มจะมีค่ากำลังรับแรงอัดและแรงคดที่ลดลง เนื่องจากขาดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยปาล์มกับจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ จึงทำให้วัสดุมีคุณสมบัติทางกลที่ลดลง สาเหตุนี้อาจเกิดจากลักษณะเฉพาะของเส้นใยแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบสามารถดูได้จากตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดเมื่อผ่านไป 28 วัน (Korniejenko et al., 2016)

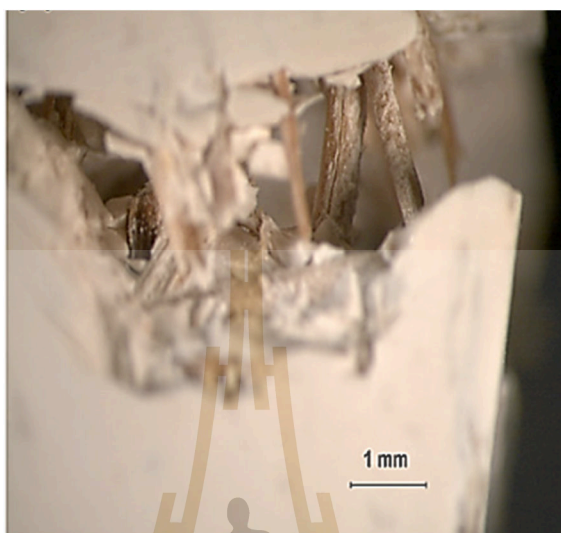
Sample	MPa	Standard deviation of recorded values of strengths
Geopolymer (matrix)	24.78	1.89
Geopolymer with coir fibers (1%)	31.36	10.10
Geopolymer with cotton fibers (1%)	28.42	5.30
Geopolymer with raffia fibers (1%)	13.66	1.71
Geopolymer with sisal fibers (1%)	25.16	3.43

ตารางที่ 2.3 การทดสอบกำลังรับแรงคดเมื่อผ่านไป 28 วัน (Korniejenko et al., 2016)

Sample	MPa	Standard deviation of recorded values of strengths
Geopolymer (matrix)	5.55	0.72
Geopolymer with coir fibers (1%)	5.25	0.57
Geopolymer with cotton fibers (1%)	5.85	0.78
Geopolymer with raffia fibers (1%)	3.05	0.35
Geopolymer with sisal fibers (1%)	5.90	0.14

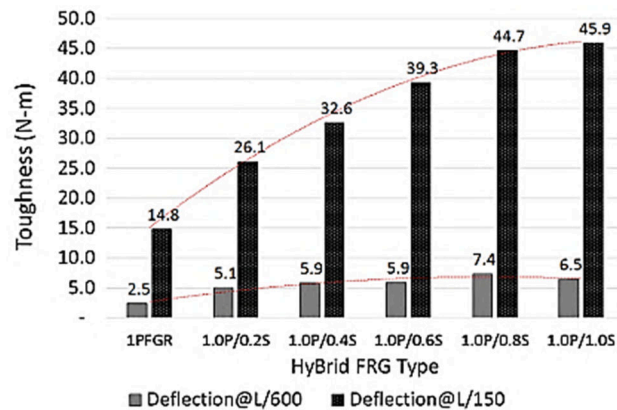
Sankar et al. (2017) ได้รายงานว่เส้นใยใฝ่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงต่อการโค้งงอของวัสดุได้ จากศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวเสริมเส้นใยใฝ่ที่ถูกับเป็นส่วนๆ โดยมีปริมาณของเส้นใยใฝ่เท่ากับ 5% ของน้ำหนัก จากผลการทดสอบแรงคดแบบ 4 จุด ตัวอย่างทดสอบจะมีกำลังรับแรงคดสูงสุดเท่ากับ 7.5 เมกกะปาสกาล จากรูปที่ 2.30 การดึงออกของเส้นใย ขณะทำการทดสอบจนถึงจุดที่ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ แสดงถึงความสามารถในการเหนียวรั้งของเส้น

ใยภายในโครงสร้างวัสดุ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลในด้านความต้านทานต่อแรงดึงในทางที่ตีขึ้น

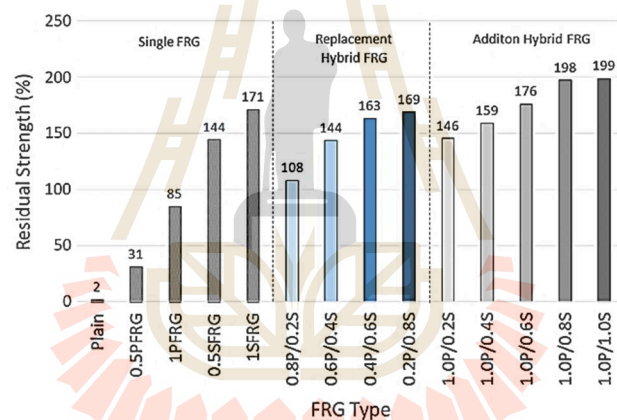


รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะการวิบัติจากการทดสอบแรงดึงของตัวอย่างทดสอบเสริมเส้นใยไฟ 5% ของน้ำหนักร (Sankar et al., 2017)

ในหลาย ๆ งานวิจัยข้างต้นนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sukontasukkul et al. (2018) ได้อธิบายว่าเส้นใยมีส่วนช่วยเพิ่มความเหนียว ทำให้วัสดุมีความสามารถในการรับกำลังรับแรงดึงได้ดีขึ้น ซึ่งความเหนียวจะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุนั้น จากการศึกษาวัสดุอีโพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยโพลีโพลีลีน โดยมีอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยต่อซิลิกาฟุ่มเท่ากับ 90:10 ของน้ำหนักร ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 18 โมลาร์ และมีอัตราส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.5 ของน้ำหนักร พบว่าประเภทของเส้นใย a-HyFRG ที่สัดส่วน 1.0P/1.0S-HyFRG มีค่าความเหนียวมากที่สุดเท่ากับ 45.9 นิวตันเมตร และกำลังรับแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 199.1% ดูได้จากรูปที่ 2.31 และ 2.32 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความเหนียวจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเส้นใยที่มากขึ้น อีกทั้งประเภทของเส้นใยที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อกำลังรับแรงดึงของวัสดุอีกด้วย



รูปที่ 2.31 ผลการทดสอบความเหนียวของวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยโพลีโพลีลีน ประเภท a-HyFRG. (Sukontasukkul et al., 2018)

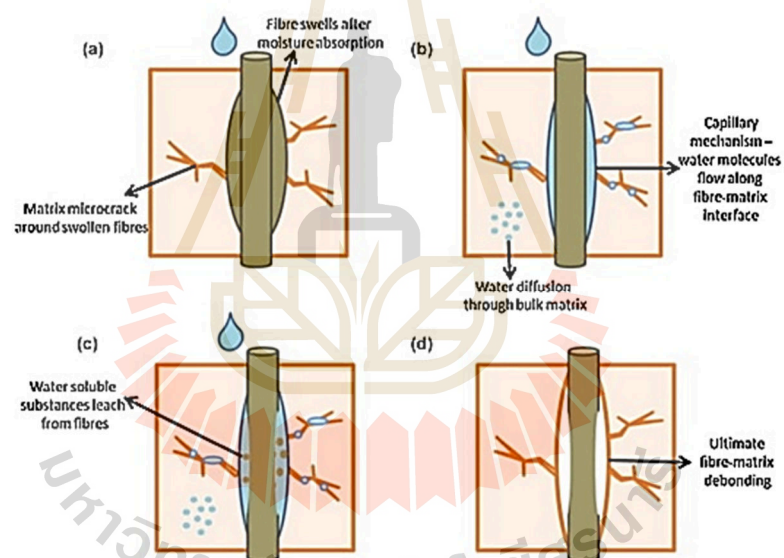


รูปที่ 2.32 ผลการทดสอบแรงคัดของวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยโพลีโพลีลีน (Sukontasukkul et al., 2018)

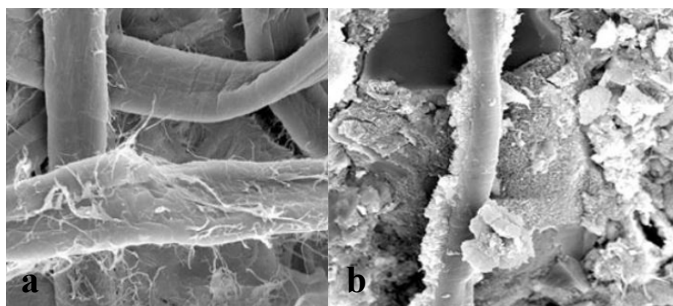
จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ในขณะที่งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นหลัก ซึ่งประสิทธิภาพของวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ มีแนวโน้มไม่แตกต่างกับวัสดุซีเมนต์เสริมเส้นใยธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามการนำเส้นใยธรรมชาติมาเสริมกับวัสดุที่มีความเป็นด่างสูง ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องความทนทานของเส้นใย ที่อาจจะเกิดการเสื่อมสลายได้

2.6 ข้อจำกัดความทนทานของเส้นใยธรรมชาติ

การนำเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาประยุกต์ใช้กับวัสดุซีเมนต์ เส้นใยมีส่วนจะช่วยเพิ่มความพรุนให้กับวัสดุ และเมื่อวัสดุเกิดความพรุนความชื้นจากภายนอกจะแทรกซึมเข้าไปภายในวัสดุได้ง่ายขึ้น จึงทำให้เส้นใยธรรมชาติที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีเกิดการขยายตัว อาจก่อให้เกิดรอยร้าวเล็ก ๆ ภายในโครงสร้างของวัสดุได้ ดังได้จากรูปที่ 2.33 และนอกจากนี้เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งความชื้นที่แทรกซึมอยู่อาจจะไปชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในวัสดุและเกิดการสะสมอยู่ในเส้นใยจนทำให้เส้นใยมีความเป็นด่างสูง ดังเกิดได้จากรูปที่ 2.34 ความพรุนจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้วัสดุมีความทนทานลดน้อยลง (Alomayri and Low, 2014)



รูปที่ 2.33 ลักษณะการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติ (Azwa et al., 2013)



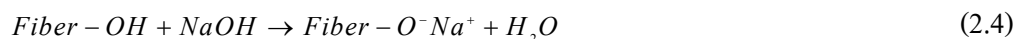
รูปที่ 2.34 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของเส้นใยฝ้าย a) เส้นใยฝ้ายทั่วไป
b) การสะสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของเส้นใยฝ้าย (Ardanuy et al. 2011)

Tolêdo-Filho et al. (2000) ได้ทำการทดสอบความทนทานของเส้นใยป่านกับเส้นใยมะพร้าวในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง โดยใช้การทดสอบวัฏจักรเป็ยกสลับแห้ง พบว่าเส้นใยป่านและเส้นใยมะพร้าวที่แช่ในตัวทำละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างสูงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 300 วัน จะทำให้เส้นใยสูญเสียกำลังและความยืดหยุ่นไปโดยสมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากการที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ตกผลึกสะสมอยู่ในลูเมน ผนังเซลล์และช่องว่างของเส้นใย แต่สำหรับการแช่เส้นใยทั้งสองชนิดในสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กลับพบว่า เส้นใยสูญเสียกำลังจากการโจมตีของด่างน้อยกว่าแม้จะเป็นเวลาถึง 420 วันก็ตาม ในด้านวิศวกรรมโยธา การนำเส้นใยธรรมชาติมาเสริมกำลังให้กับวัสดุที่มีความเป็นด่างสูง เช่น วัสดุซีเมนต์ และวัสดุอีโพลิเมอร์ ยังคงมีข้อจำกัดอยู่ในใช้เรื่องงานในระยะยาว เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดี อาจจะทำให้สารละลายด่างถูกดูดซึมเข้าไปเป็นผลทำให้เส้นใยเสื่อมสลาย หรือได้รับความเสียหายได้ ซึ่งจากหลายงานวิจัยได้อธิบายถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีการเสริมกำลังด้วยเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลส เกิดขึ้นจากพันธะที่ยึดเหนี่ยวกันระหว่างเส้นใยกับโครงข่ายภายในวัสดุ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยธรรมชาติจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุดังกล่าว

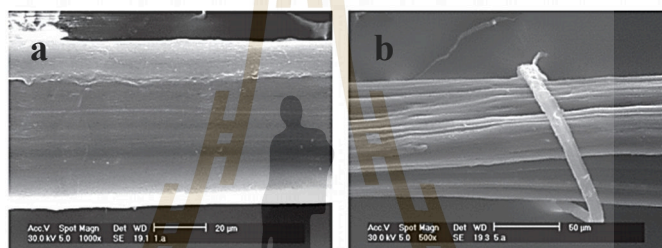
2.7 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Rakkob at el. (2016) รายงานว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใย ซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลส โดยการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยด้วยวิธีนี้ จะทำให้แวกซ์หรือน้ำมันที่เคลือบอยู่ที่ผิวภายนอกของเส้นใย รวมถึงส่วนประกอบจำพวกลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมเส้นใยเข้าด้วยกันถูกกำจัดออกไปหลังการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นระยะเวลาหนึ่ง

ดังแสดงในรูปที่ 2.35 ส่งผลให้วัสดุซีเมนต์มีพันธะยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยกับโครงข่ายภายในวัสดุดีขึ้น นอกจากนี้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปกำจัดพันธะไฮโดรเจนที่มีอยู่ในโครงสร้างของเส้นใย ส่งผลในการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์โลสของเส้นใย โดยแสดงเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



สองอิทธิพลหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติของเส้นใย เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยด้วยวิธีนี้คือ 1 เพิ่มความขรุขระให้พื้นที่ผิวของเส้นใย ซึ่งช่วยเสริมการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยกับปูนซีเมนต์ 2 เพิ่มจำนวนขององค์ประกอบเซลล์โลสของเส้นใยทำให้เส้นใยทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีขึ้น

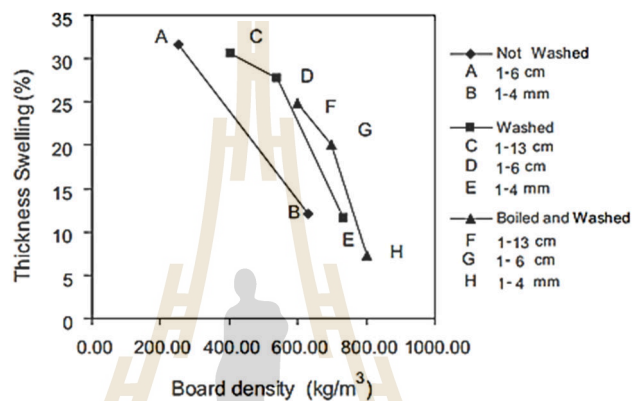


รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ a) ก่อน และ b) หลังปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Reza Mahjoub., 2014)

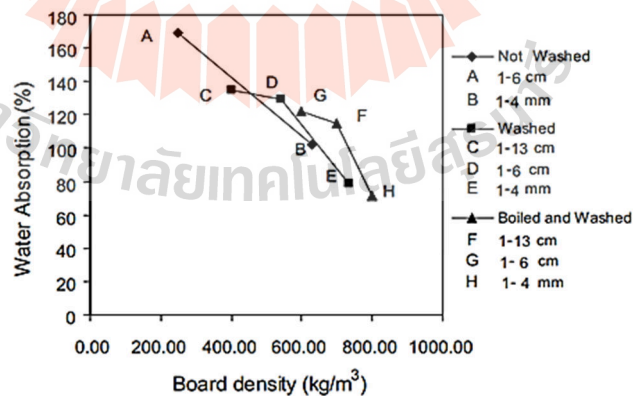
Ray et al. (2001) ได้รายงานว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5% เป็นเวลา 4 ชั่วโมงจะมีประสิทธิภาพเหมาะสมในการเป็นส่วนประกอบในวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สุด โดยพบว่าที่อัตราส่วนเส้นใยที่ 35% โดยน้ำหนัก จะมีกำลังรับแรงคด และค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้น 20% และ 23% ตามลำดับ

Asasutjarit et al. (2009) ได้รายงานว่าการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีและการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าว จะช่วยให้วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตมีคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพดีขึ้น จากศึกษาคุณสมบัติทางกลและองค์ประกอบทางเคมีที่ของเส้นใยมะพร้าว 3 ตัวอย่างคือ 1) เส้นใยมะพร้าวดิบ 2) เส้นใยมะพร้าวดิบที่ผ่านการล้างด้วยน้ำป่า 10 ลิตร 3) เส้นใยมะพร้าวที่ถูกต้ม 2 ชั่วโมง เพื่อลดสารเคมีที่ละลายน้ำได้เช่นน้ำตาล แป้ง ไขมันและฟีนอล เป็นต้น และล้างด้วยน้ำประปา จาก 3 ตัวอย่างของเส้นใยมะพร้าวนั้น จะถูกนำมาปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างเส้นใยมะพร้าวที่ถูกต้มและล้าง หลังจากถูกแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์องค์ประกอบทางเคมีของเส้น

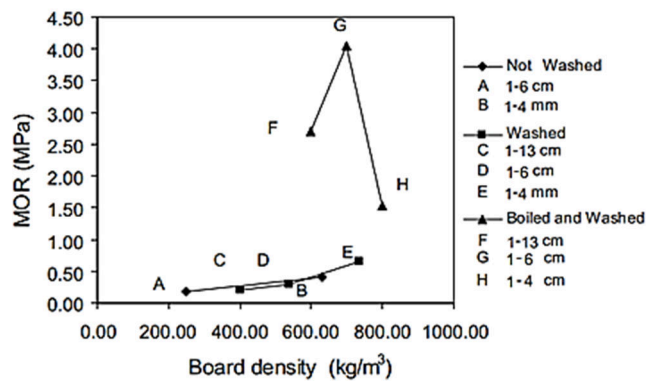
ใยมะพร้าวจะลดลงมากที่สุด 14.2% อีกทั้งเมื่อนำเส้นใยมาเสริมแรงกับวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต ตัวอย่างทดสอบที่เสริมด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ถูกต้มและล้าง จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพด้านการบวมตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง ในขณะที่ซีเมนต์คอมโพสิตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ดูได้จาก รูปที่ 2.36 และ 2.37 ส่วนคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์คอมโพสิต ค่าโมดูลัสต่อการแตกร้าวจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 4 เมกะปาสคาล สำหรับตัวอย่างทดสอบที่เสริมเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการต้มและล้าง ที่ความยาวเส้นใย 1.6 เซนติเมตร ดูได้จากรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.36 การทดสอบการบวมตัวของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยมะพร้าว (Asasutjarit et al. 2009)

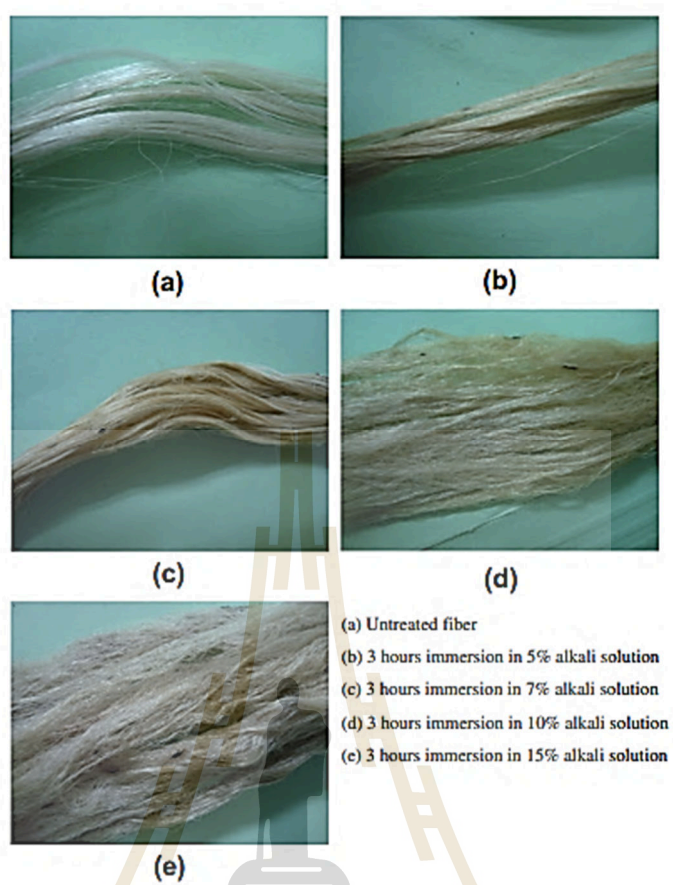


รูปที่ 2.37 การทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยมะพร้าว (Asasutjarit et al. 2009)

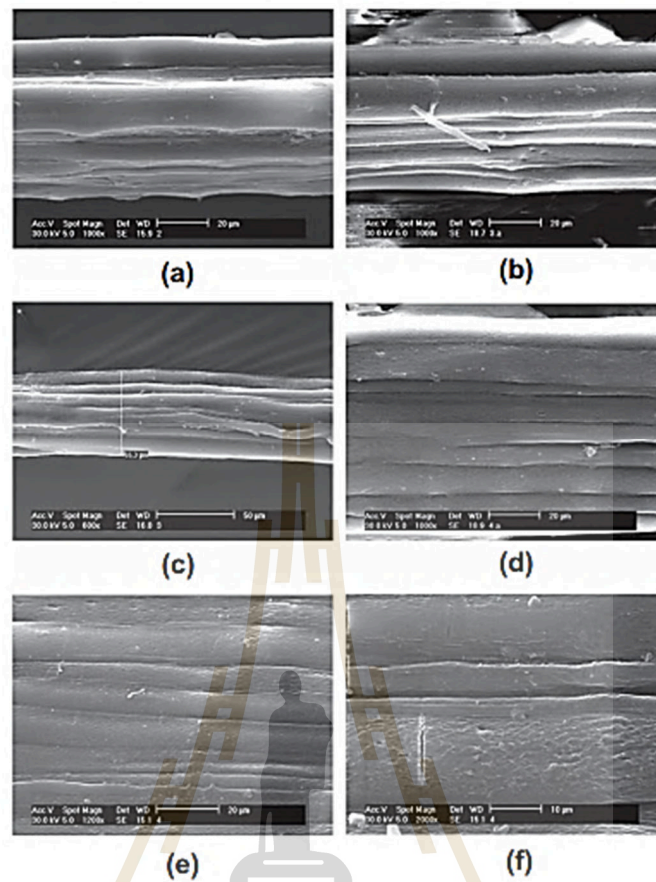


รูปที่ 2.38 ค่าโมดูลัสต่อการแตกร้าวของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยมะพร้าว
(Asasutjarit et al. 2009)

Ray et al. (2014) ได้รายงานว่าการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะช่วยเพิ่มความหยาบและความขรุขระให้แก่เส้นใยปอ จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยปอหลังการถูกปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี โดยการนำเส้นใยไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5, 7, 10 และ 15% ที่เวลา 3 และ 24 ชั่วโมง พบว่าเส้นใยปอที่ถูกแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 และ 15% เกิดการแยกตัว บิดเบี้ยวและมีลักษณะเปราะ ดูได้ในรูปที่ 2.39 และจากภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ในรูปที่ 2.40 a) เส้นใยที่ปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว เส้นใยจะมีลักษณะเรียบโดยถูกเคลือบด้วยลิกนิน เฮมิเซลลูโลส แวกซ์หรือน้ำมันที่เคลือบไว้อยู่ และเมื่อเส้นใยปอถูกแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เส้นใยปอจะมีลักษณะที่ไม่เรียบเนียนและเกิดความขรุขระ ซึ่งความขรุขระบริเวณผิวของเส้นใยนี้ จะช่วยเสริมแรงยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ภายในโครงสร้างของวัสดุได้ดีขึ้น แต่ถ้าหากแช่ในสารละลายด่างที่มีความเข้มข้นที่สูงมากเกินไป 10% จะทำให้โครงสร้างของเส้นใยปอเกิดความเสียหาย จึงส่งผลทำให้แรงดึงของเส้นใยมีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 2.40 b)



รูปที่ 2.39 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยปอหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Ray et al., 2014)



- a) เส้นใยไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว b) 3 hr. 5% NaOH
 c) 24 hr. 5% NaOH d) 3 hr. 7% NaOH
 e) 24 hr. 7% NaOH f) 3 hr. 10% NaOH

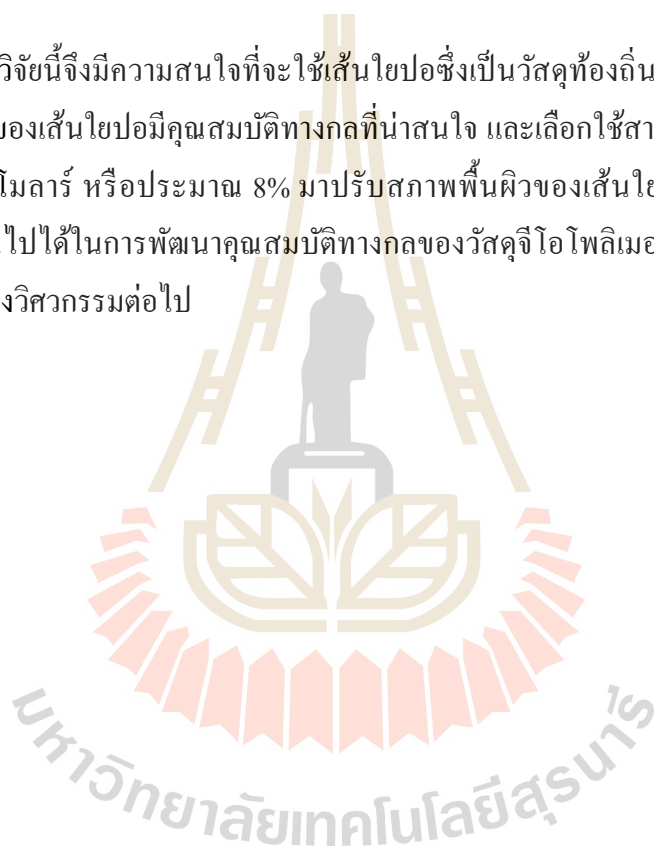
รูปที่ 2.40 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ของการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอด้วยสารละลาย NaOH ที่ระยะเวลา 3 และ 24 ชั่วโมง (Reza Mahjoub., 2014)

2.8 แนวความคิดที่ได้จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เส้นใยเซลลูโลสจากพืชมีคุณสมบัติทางกลที่น่าสนใจที่จะสามารถนำมาปรับปรุงวัสดุจีโอโพลิเมอร์ในเรื่องข้อจำกัดของวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบเปราะได้
2. การนำเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาเสริมกับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ในปริมาณที่เหมาะสมนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพต่อคุณสมบัติทางกลในด้านกำลังรับแรงดัด โมดูลัสแรงดัด และความเหนียวให้กับวัสดุได้

3. การนำเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาเสริมกำลังในวัสดุที่มีความเป็นต่างสูง อาจทำให้เส้นใยเกิดการเสื่อมสลาย ซึ่งจะทำให้กำลังของวัสดุมีค่าลดลง การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยก่อนนำมาทดสอบจึงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของงานวิจัยนี้ การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น จำเป็นต้องมีความเข้มข้นที่เหมาะสม หากใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปจนความจำเป็น ส่งผลให้เส้นใยเกิดความเสียหาย จนขาดแรงดึงอาจทำให้คุณสมบัติทางกลของวัสดุลดลงได้เช่นกัน และจากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องมาข้างต้นนี้ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ควรมีค่าไม่เกิน 10%

4. งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะใช้เส้นใยปอซึ่งเป็นวัสดุท้องถิ่นที่สามารถหาได้ง่าย ด้วยลักษณะเฉพาะของเส้นใยปอมีคุณสมบัติทางกลที่น่าสนใจ และเลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ หรือประมาณ 8% มาปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอก่อนนำไปผสม เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติในทางวิศวกรรมต่อไป



บทที่ 3

แนวทางและวิธีการวิจัย

การทดสอบของงานวิจัยนี้เพื่อมุ่งเน้นพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ และศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต ด้วยวิธีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอ

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาตินี้ ประกอบไปด้วย

1. เถ้าลอย (Fly ash, FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์อีโพลิเมอร์ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแสดงไว้ดังตารางที่ 3.1 ผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 81.48% จัดเป็นเถ้าลอยประเภท Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 อ้างอิงจาก Sukmak et al. (2013)

2. เส้นใยเซลลูโลสจากปอ (Kenaf fiber) ที่มีคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 3.2 โดยทำการแบ่งเป็น 2 ชุด คือ

ชุดที่ 1 จะเป็นเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว (Untreated kenaf fiber)

ชุดที่ 2 จะเป็นเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว (Treated kenaf fiber) โดยการแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5, 2, 5 และ 10 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาล้างด้วยน้ำสะอาด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวไปศึกษาลักษณะทางกายภาพผ่านภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ จะเห็นว่าแวกซ์หรือน้ำมันที่เคลือบอยู่บริเวณผิวภายนอกของเส้นใย รวมถึงส่วนประกอบจำพวกลิกนิน เฮมิเซลลูโลส ได้ถูกกำจัดออกไปจนหมด และส่วนของเส้นใยเซลลูโลสไม่ได้รับความเสียหาย ดูได้จากรูปที่ 3.1 b) แต่สำหรับเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5 และ 10 โมลาร์ จะเห็นว่าเส้นใยเซลลูโลสเกิดความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 c) และ d) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัย

ของ Ray et al. (2014) เส้นใยธรรมชาติจากพืชที่ถูกแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากเกินไป อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเส้นใยได้ ดังนั้นเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ จึงถูกใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตในการศึกษาของงานวิจัยนี้

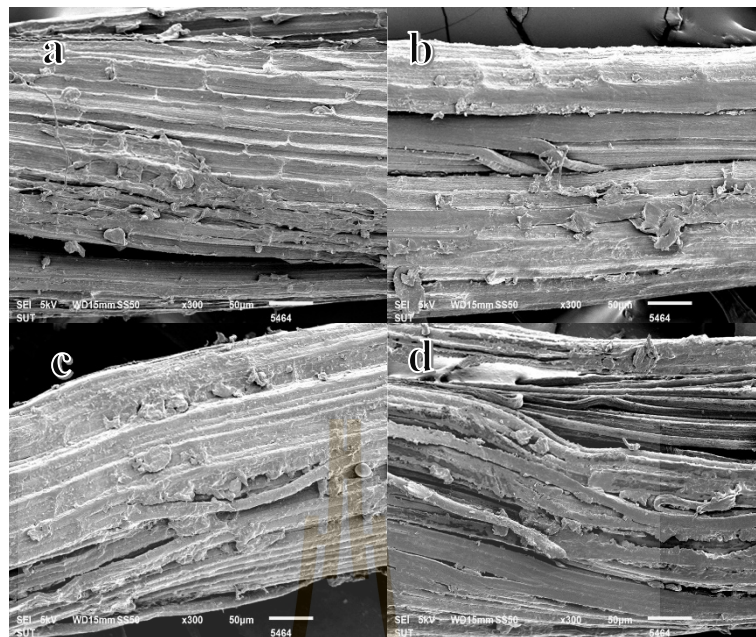
3. สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline activator, L) จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ดผสมกับน้ำกลั่น (Distilled water) ให้ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ จากนั้นพักเก็บไว้ในห้องเก็บสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณอัตราส่วนผสมระหว่างสารกระตุ้นอัลคาไลน์กับเถ้าลอย (L/FA) ในการศึกษาจะใช้เท่ากับ 0.35

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (Sukmak et al., 2013)

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

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเส้นใยปอ (Soltani et al., 2015)

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



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น a) 0.5, b) 2, c) 5 และ d) 10 โมลาร์

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อทำการทดสอบในแต่ละชุดทดสอบจะใช้ปริมาณเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5% ค่อน้ำหนักของเส้นใยและตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ไม่มีการเสริมเส้นใยปอเป็นตัวอย่างอ้างอิง (GP) โดยมีสัดส่วนผสมในการเตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 3.3 ชุดตัวอย่างทดสอบ Kx (x เป็น 1, 3 และ 5 แสดงถึงปริมาณเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5%) จะเป็นจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอแบบไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว ส่วนชุดตัวอย่างทดสอบ TMx จะเป็นจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว โดยจะมีการเติมน้ำเพิ่มเพื่อให้การกระจายตัวของเส้นใยภายในคอมโพสิตดีขึ้น และทำงานง่าย

การเตรียมตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ จะเริ่มจากการนำเส้นใยปอและเส้นใยปอมาผสมกันแบบแห้งด้วยมือก่อน เพื่อลดการกระจุกกันของเส้นใยเสริมในวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต แล้วจึงดำเนินการตามวิธีผสมของ Alomayri and Low. (2013) โดยนำส่วนผสมก่อนหน้ามาผสมในเครื่องผสมอีกครั้ง ที่รอบความเร็วการหมุนต่ำจนกระทั่งเส้นใยปอมีการกระจายตัวทั่วเส้นใยปอแล้วจึงเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 10 โมลาร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.35 แล้วผสมต่อไปเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงเปลี่ยนมาผสมที่รอบความเร็วการหมุนสูงอีก 10 นาที นำ

ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้ไปบรรจุลงแม่พิมพ์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและการทดสอบกำลังรับแรงอัด ส่วนแม่พิมพ์ขนาด 2.5x7.6x30.5 เซนติเมตร (1x3x12 นิ้ว) สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงคด จากนั้นวางบนโต๊ะสั่นสะเทือนเพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 5 นาที ปล่อยให้แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมงภายในอุณหภูมิห้อง แล้วจึงแกะตัวอย่าง นำมาห่อด้วยพลาสติกใส บ่มทิ้งไว้ที่สภาพแวดล้อมเดิมเป็นระยะเวลา 28 วัน

ตารางที่ 3.3 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	5
K5	100	35	5	10
TM1	100	35	1	0
TM3	100	35	3	5
TM5	100	35	5	10

*หมายเหตุ GP

หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ควบคุม

Kx

หมายถึง จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว

TMx

หมายถึง จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิว

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทุกตัวอย่างจะทำการชั่งน้ำหนักหลังจากแกะออกจากแบบหล่อทันที เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของขั้นตอนการผสม ตัวอย่าง คำนวณน้ำหนักของตัวอย่างวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ได้ ควรจะมีค่าน้ำหนักแตกต่างกันไม่เกินไปกว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ร้อยละ 10 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพนี้จะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM-C20 ซึ่งเป็นไปตามแนวทางของ Alomayri et al. (2013) 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)

1. ความหนาแน่น (Bulk Density, B)

ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบคือสัดส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งและปริมาตรภายนอกกับโพรงอากาศ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1

$$B = \frac{D}{V} \quad (3.1)$$

เมื่อ B คือความหนาแน่น, D คือน้ำหนักแห้ง และ V คือปริมาตรภายนอก

2. ความพรุน (Porosity, P)

ค่าความพรุนจะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของโพรงเปิดในตัวอย่างกับปริมาตรภายนอก สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2

$$P, \% = \left(\frac{W - D}{V} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

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

3. การดูดซึมน้ำ (Water Absorption, A)

การดูดซึมน้ำจะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำที่ตัวอย่างดูดซึมเข้าไปกับน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3

$$A, \% = \left(\frac{W - D}{D} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

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

3.3.2 คุณสมบัติทางกล

1. กำลังรับแรงอัด

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ จะใช้ตัวอย่างขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุของ ASTM C109 โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine, UTM ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างเพื่อเตรียมทดสอบกำลังรับแรงอัด ใช้อัตราเร็วการกดของเครื่องทดสอบเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที (อ้างอิงจาก Alomayri et al., 2013) โดยกำลังรับแรงอัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$\sigma_c = \frac{P_m}{A} \quad (3.4)$$

เมื่อ σ_c คือกำลังรับแรงอัด P_m คือแรงสูงสุดที่กระทำจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ และ A คือพื้นที่ของตัวอย่างทดสอบ

2. กำลังรับแรงดัด

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ จะใช้ตัวอย่างขนาด 2.54x7.62x30.48 เซนติเมตร (1x3x12 นิ้ว) ช่วงความยาวระหว่างจุดรองรับ (L) เท่ากับ 22.86 เซนติเมตร (9 นิ้ว) กำหนดระยะความหนา, $h = L/3$ ซึ่งการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C293 ใช้เครื่อง Universal Testing Machine, UTM ทำการทดสอบแรงดัดแบบ การกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-Point Loading) ดังรูปที่ 3.3 ที่แสดงการติดตั้งตัวอย่างเพื่อเตรียมทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้อัตราเร็วการกดของเครื่องทดสอบเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตรต่อนาที (อ้างอิงจาก Alomayri et al., 2013) โดยกำลังรับแรงดัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$\sigma_F = \frac{3 P_m L}{2 b h^2} \quad (3.5)$$

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

3. โมดูลัสการดัด

โมดูลัสการดัดของวัสดุโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ จะใช้การพิจารณา ค่าความชันเริ่มต้นในช่วงยืดหยุ่นของความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่าง สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.6

$$E_F = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta P}{\Delta d} \right) \quad (3.6)$$

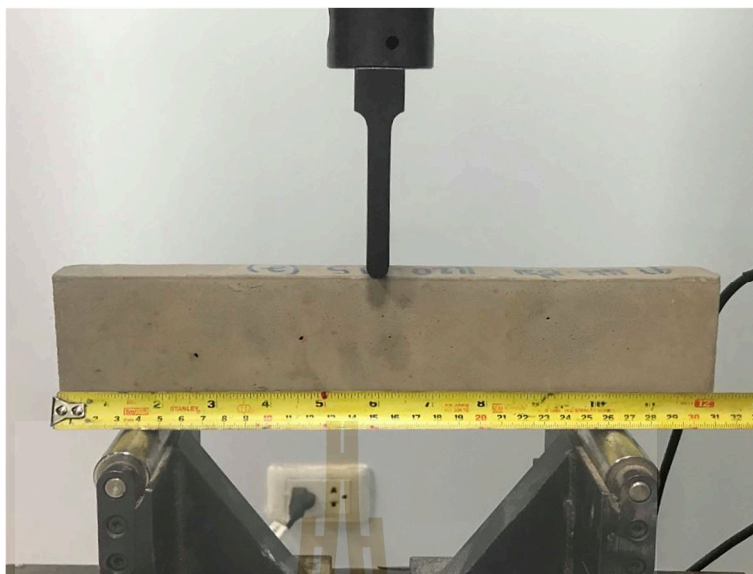
เมื่อ E_F คือโมดูลัสการดัด, L คือช่วงความยาวระหว่างจุดรองรับ, b คือความกว้างของตัวอย่าง, h คือความหนาของตัวอย่าง, P_m คือแรงสูงสุดที่กระทำจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ และ $\frac{\Delta P}{\Delta d}$ คือค่าความชันเริ่มต้นในช่วงยืดหยุ่น

4. ความเหนียว

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงดัดของวัสดุโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมกำลังด้วยเส้นใยปอ จะถูกใช้เพื่อนำมาพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกลในด้านความเหนียว ซึ่งจะเป็นการบ่งชี้ให้เห็นถึงค่าความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยไม่แตกร้าว



รูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างบนเครื่องทดสอบแรงอัด

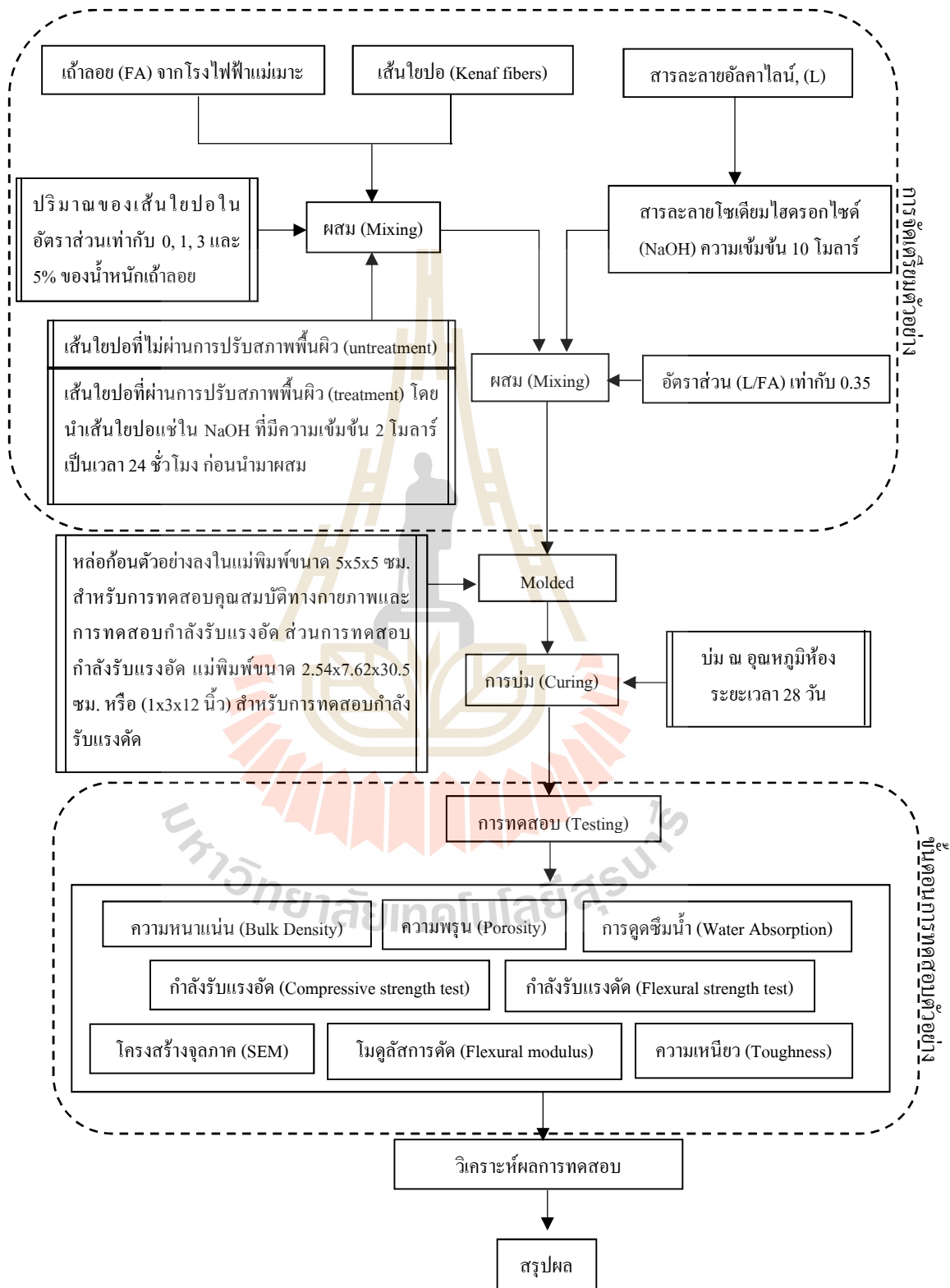


รูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างบนเครื่องทดสอบแรงดัดทำการทดสอบแรงดัดแบบการกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-Point Loading)

3.4 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

ชิ้นส่วนเล็ก ๆ จากบริเวณของการวิบัติในแต่ละตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเส้นใย 5% จะถูกนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ซึ่งชิ้นส่วนของตัวอย่างทดสอบจะถูกนำมาขั้วยังปฏิกิริยาปอซโซลานด้วยการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส โดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปติดตั้งบน Stub เพื่อทำการเคลือบผิวด้วยทอง ก่อนนำไปวิเคราะห์ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) โดยวิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบนี้ เป็นการดำเนินการตามวิธีของ Sukmak et al. (2013)

3.5 แผนผังแสดงแนวความคิดและวิธีการดำเนินงานวิจัย



บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต โดยมีผลการทดสอบความหนาแน่น ความความพรุน และการดูดซึมน้ำ สำหรับการศึกษาคูสมบัติทางกายภาพ และผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงคด โมดูลัสแรงคด และความเหนียว สำหรับการศึกษาคูสมบัติทางกล ตามสัดส่วนผสมของเส้นใยปอ 0, 1, 3 และ 5% ของน้ำหนัก

4.1 ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต

ค่าความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ ของตัวอย่างทดสอบ ที่บ่มในอุณหภูมิห้องอายุ 28 วันทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ ระหว่างตัวอย่างอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิว กับที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว ซึ่งค่าความหนาแน่นของทุก ๆ ตัวอย่างทดสอบจะมีแนวโน้มที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยปอ สอดคล้องกับ Abdullah et al. (2011) ซึ่งศึกษาซีเมนต์คอมโพสิตเสริมใยมะพร้าว และ Alomayri and Low (2013) ศึกษาอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของเส้นใยปอที่เท่ากัน พบว่าตัวอย่างทดสอบที่เสริมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว จะมีความหนาแน่นสูงกว่า ตัวอย่างที่เสริมเส้นใยปอแบบที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวเพียงเล็กน้อย (0.3%, 1.0% และ 1.1% ตามสัดส่วนเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (GP) จะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดเท่ากับ 1.877 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

สำหรับค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทั้งสอง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยปอที่มากขึ้นในทุกตัวอย่าง สอดคล้องกับผลการศึกษาของงานวิจัยอื่น ๆ เช่น Alomayri and Low (2013), Alomayri et al. (2014) และ Lertwattanaruk and Masuwan (2015) โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยปอในแต่ละตัวอย่างทดสอบ จะทำให้สัดส่วนของวัสดุอีโพลิเมอร์ลดลง และจากความชอบน้ำโดยธรรมชาติของเส้นใยเซลลูโลสจากพืช Alomayri et al. (2014) เมื่อมีการเติมน้ำเพิ่มในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง อาจก่อให้เกิดการขยายตัวจากการดูดซึมน้ำ เมื่อตัวอย่างทดสอบแห้งและแข็งตัว จะทำให้เกิดช่องว่างตลอดแนวรอบ ๆ เส้นใยปอในวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต โดยตัวอย่างควบคุมจะมีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำอยู่ที่เท่ากับ 4.13% และ 2.20%

ตามลำดับ แต่สำหรับตัวอย่างที่ 5% ของปริมาณเส้นใยจะมีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำสูงที่สุด โดยตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะเท่ากับ 12.36% และ 7.12% ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยที่ปรับสภาพพื้นผิวนั้น จะเท่ากับ 11.56% และ 6.59% ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นว่าความพรุนของงานวิจัยนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ สุวรรณิ เหล่าปัญญา และวีระ หอสกุลไท (2556) เนื่องจากตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่ไม่มีมวลรวมผสม โดยเป็นวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ามอร์ตาร์ และคอนกรีต จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้วัสดุมีค่าความพรุนที่ต่ำ

จากข้อมูลเหล่านี้จะเห็นได้ว่าการใช้เส้นใยที่มีการปรับสภาพพื้นผิว และไม่มี การปรับสภาพผิวในวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต จะมีความแตกต่างกันในด้านของความหนาแน่นน้อยมาก ๆ จนแทบไม่มีความแตกต่าง แต่ค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำจะแตกต่างกันพอสมควร โดยพบว่า ในตัวอย่างที่ใช้ปริมาณเส้นใย 5% การใช้เส้นใยที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้วจะให้ค่าความพรุนลดลง 6.47% และการดูดซึมน้ำลดลง 7.44% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ปริมาณเส้นใยแบบไม่ปรับสภาพ จำนวน 5% เท่ากัน

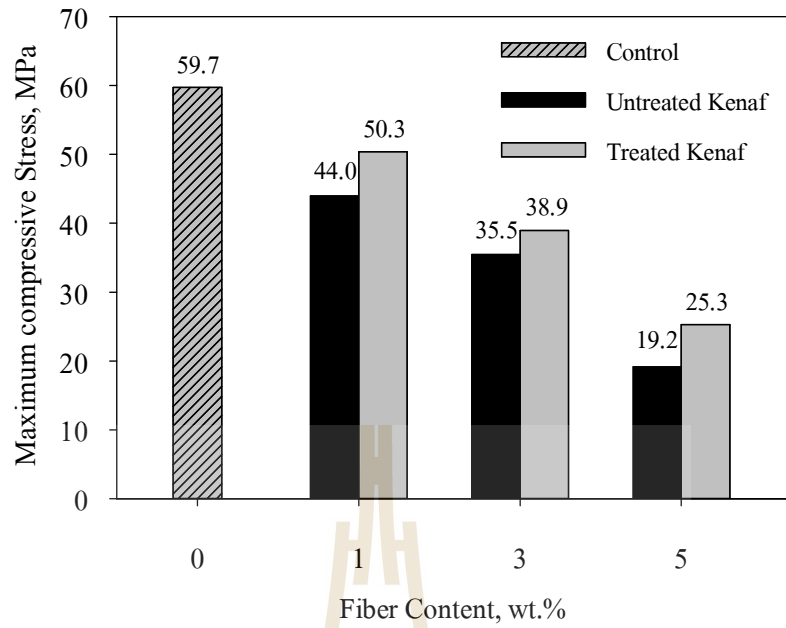
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

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

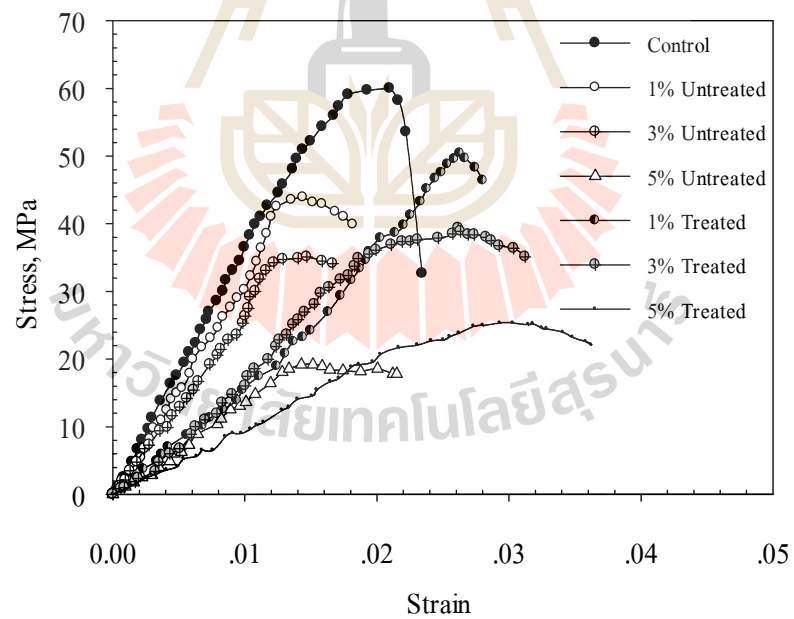
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต

4.2.1 กำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิต จากรูปที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวมีค่าเท่ากับ 44.0, 35.5 และ 19.2 เมกกะปาสคาล และวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่าเท่ากับ 50.3, 38.9 และ 25.3 เมกกะปาสคาล ตามอัตราส่วนของเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุอีโพลิเมอร์ควบคุมที่ไม่มีการเสริมเส้นใยปอ (59.7 เมกกะปาสคาล) จะพบว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลง 26.30%, 40.54% และ 67.84% สำหรับเส้นใยปอแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิว และ 15.75%, 34.84% และ 57.62% สำหรับเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว ตามอัตราส่วนของเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lertwattanaruk and Masuwan (2015) เนื่องจากการเพิ่มเส้นใยปอจะเป็นการเข้าแทนที่สัดส่วนแก้วลอย ทำให้มีความพรุนเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังจะทำให้แก้วลอยที่ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาอีโพลิเมอร์ไรเซชันมีปริมาณลดลง ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุอีโพลิเมอร์โดยตรง ดังนั้นวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมเส้นใยปอจึงมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าอีโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่เสริมเส้นใยปอ และจากรูปที่ 4.2 แสดงถึงค่าความเค้นและความเครียดมีลักษณะเป็นเส้นโค้งบ่งบอกว่าเส้นใยปอมีความสามารถช่วยเหนี่ยวรั้งพฤติกรรมการเสียรูปแบบลักษณะเปราะของวัสดุได้



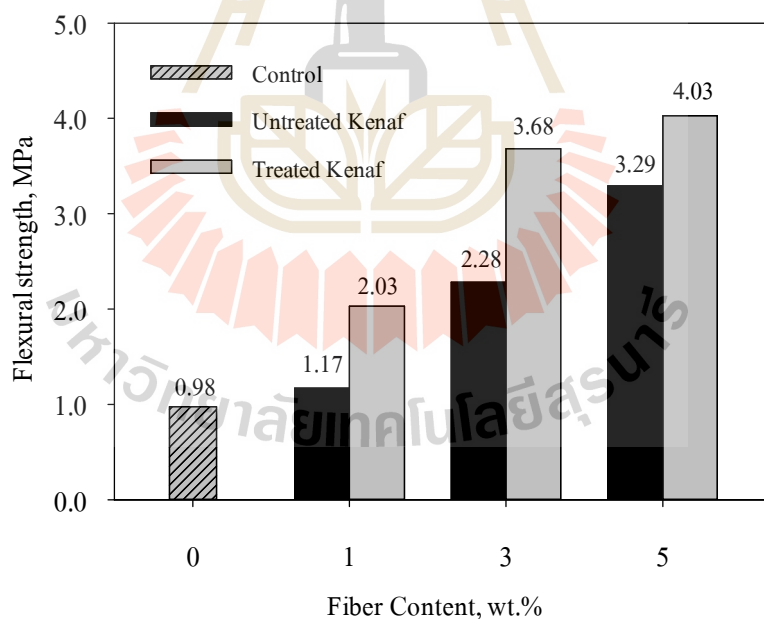
รูปที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ



รูปที่ 4.2 แสดงค่าความเค้นและความเครียดการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

4.2.2 กำลังรับแรงดัด

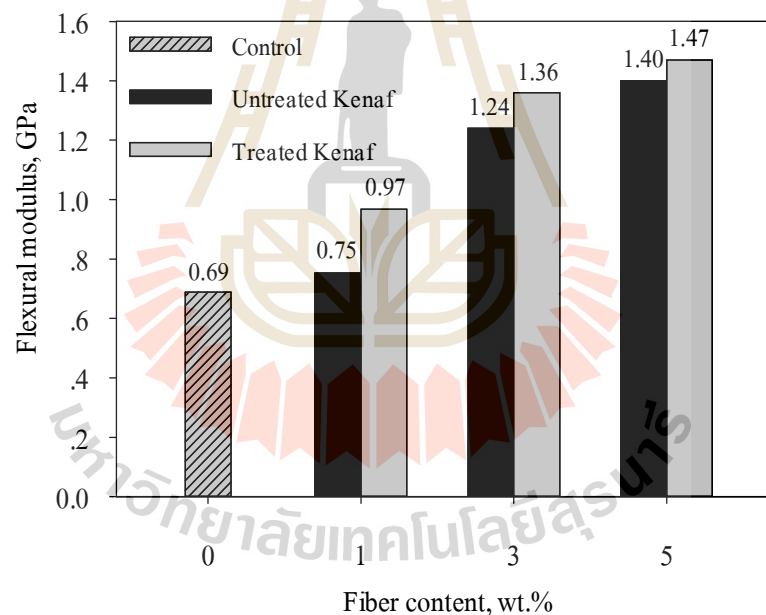
ผลการศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัด ของวัสดุอีพ็อกซีโพลีเมอร์คอมโพสิต จะแสดงตามรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ทุกตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงดัดของวัสดุอีพ็อกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% เป็นผลมาจากเส้นใยปอช่วยเพิ่มการถ่ายแรงให้กับอีพ็อกซีโพลีเมอร์ ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดมากขึ้น เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างควบคุม (0.98 เมกะปาสกาล) กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวมีค่าเท่ากับ 1.17, 2.28 และ 3.29 เมกะปาสกาล ตามลำดับเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น และส่วนตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยแบบปรับสภาพพื้นผิวมีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 2.03, 3.68 และ 4.03 เมกะปาสกาล ตามลำดับเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับอีพ็อกซีโพลีเมอร์ควบคุม ที่ไม่มีการเสริมเส้นใยปอกำลังที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น 19.39%, 132.65% และ 235.71% สำหรับตัวอย่างที่ผสมแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย และ 107.14%, 275.51% และ 311.22% สำหรับตัวอย่างที่ผสมแบบปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย ตามสัดส่วนเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กำลังรับแรงดัดของวัสดุอีพ็อกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

4.2.3 ค่าโมดูลัสแรงดัด

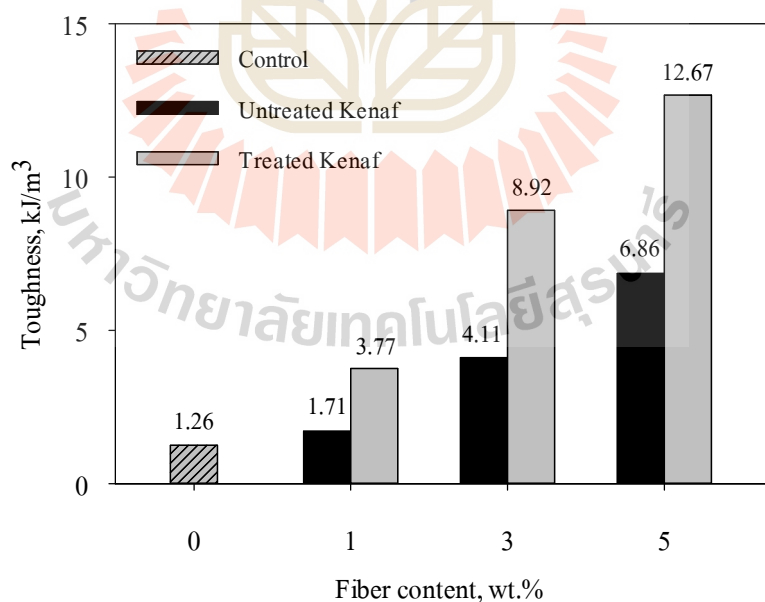
รูปที่ 4.4 แสดงค่าโมดูลัสการดัดของวัสดุอีโพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ จะเห็นว่าค่าโมดูลัสการดัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของเส้นใยปอ ลักษณะคล้ายกันกับค่ากำลังรับแรงดัดในรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าโมดูลัสการดัดของตัวอย่างทดสอบควบคุม จะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.69 จิกะปาสกาล ตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิว มีค่าโมดูลัสการดัดเท่ากับ 0.75, 1.24 และ 1.40 จิกะปาสกาล และตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว จะมีค่าเท่ากับ 0.97, 1.36 และ 1.47 จิกะปาสกาล ตามปริมาณเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสการดัดของตัวอย่างทดสอบทั้งสองชุด ตามรายงานของ Alomayri et al. (2013) ได้อ้างว่าการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสการดัดของวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ นั้น เป็นผลมาจากเส้นใยที่ใช้เสริมกำลังมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นที่สูงกว่า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุคอมโพสิตภายใต้แรงดัดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.4 โมดูลัสการดัดของวัสดุอีโพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

4.2.4 ความเหนียว

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงคด ค่าความเหนียวที่แสดงดังรูปที่ 4.5 จะแสดงให้เห็นว่า วัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมกำลังด้วยเส้นใยปอ มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องไปตามผลการทดสอบของ Sukontasukkul et al. (2018) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของความเหนียวระหว่างตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยปอทั้ง 2 ประเภท คือเส้นใยปอที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว และเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว พบว่าการปรับปรุงสภาพผิวของเส้นใยปอจะทำให้เส้นใยปอและเมทริกซ์มีความเข้ากันได้ดี ทำให้ลดการเกิดช่องว่างระหว่างบริเวณพื้นผิวสัมผัสของเส้นใยปอและเมทริกซ์ ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทพลังงานเพิ่มมากขึ้น ค่าความเหนียวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุมที่ไม่มีการเสริมเส้นใยปอ จะมีค่าความเหนียวเพียง 1.26 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร แต่สำหรับค่าความเหนียวของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว จะมีค่าเท่ากับ 1.71, 4.11 และ 6.86 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร และตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับปรุงสภาพผิว จะมีค่าความเหนียวเท่ากับ 3.77, 8.92 และ 12.67 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามอัตราส่วนของเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ

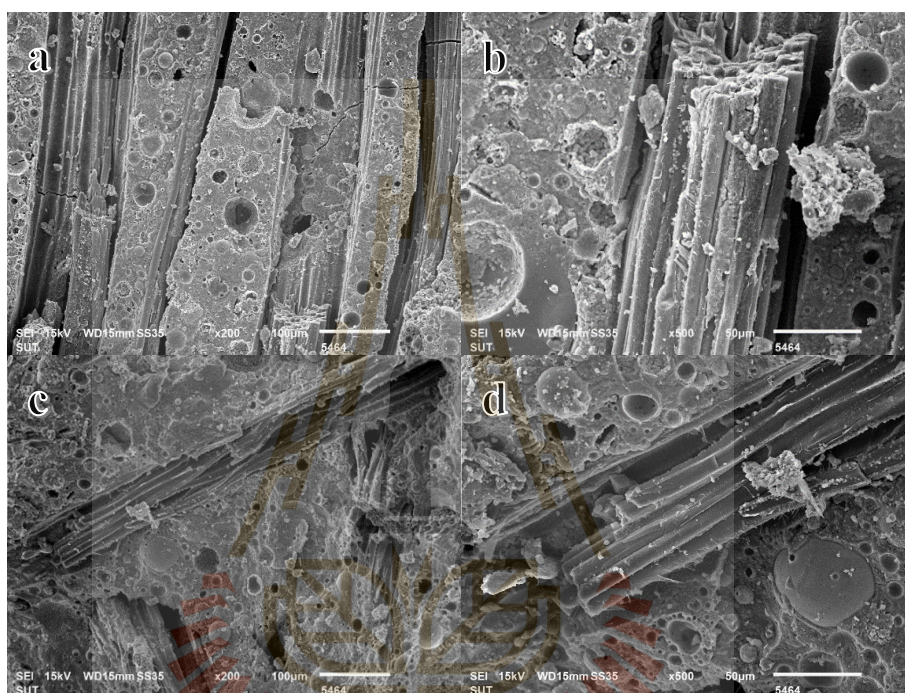


รูปที่ 4.5 ความเหนียวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

4.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยปอแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวจะมีกำลังรับแรงดัดต่ำกว่าตัวอย่างที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว เนื่องจากพื้นผิวของเส้นใยปอตามธรรมชาติจะมีสมบัติเป็นแบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) คือมีความชอบน้ำโดยธรรมชาติ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพื้นผิวประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) การที่นำเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพใด ๆ มาเสริมกำลังให้กับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต จะทำให้เส้นใยปอมีแนวโน้มที่จะดูดซึมน้ำหรือความชื้นได้มาก ทำให้เส้นใยปอเกิดการบวมตัวหรือขยายขนาดได้มาก ก่อให้เกิดความเครียดบริเวณส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยปอกับเมทริกซ์ นำไปสู่การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก อีกทั้งองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) มีความอ่อนแอต่อสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ซึ่งภายในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์อาจทำให้พื้นผิวของเส้นใยปอเกิดความเสียหาย และเกิดการเสื่อมสลายได้อย่างช้า ๆ ด้วยเหตุนี้บริเวณรอบ ๆ ส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยปอกับเมทริกซ์จะเกิดช่องว่าง ส่งผลให้การยึดเกาะกันลดลง ทำให้กระทบต่อความสามารถในการรับแรงดัดที่ไม่ดี แต่ในทางกลับกันเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้องค์ประกอบของเส้นใยที่อ่อนแอต่อด่าง อย่างเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ถูกกำจัดออกไป ทำให้เส้นใยปอมีเสถียรภาพมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงการยึดเกาะทำให้เส้นใยปอเข้ากันได้ดีกับจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับรายงานของ Azwa et al. (2013) ที่ได้กล่าวไว้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยพืชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเป็นการกำจัดกลุ่มไฮดรอกซิลในองค์ประกอบของเส้นใยพืชที่มีความเข้ากันได้ดีกับโมเลกุลของน้ำ และยังสลายองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส ซึ่งจะช่วยลดความสามารถในการดูดซับความชื้น เป็นผลให้การบวมตัวของเส้นใยพืชลดลง โพรงช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์เกิดน้อยลงเช่นกัน และความชื้นจากภายนอกแทรกซึมเข้าสู่คอมโพสิตได้ยากขึ้น ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยพืชและเมทริกซ์ดีขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบภาพถ่ายระดับจุลภาค ที่แสดงในรูปที่ 4.6 โดยตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว พื้นผิวของเส้นใยปอที่เป็นเปลือกหุ้มบางส่วนจะเกิดการเสื่อมสลาย เนื่องจากการโจมตีของสารละลายด่างที่ถูกใช้ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง จากรูปที่ 4.6 a) จะพบรอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดจากความเครียดบริเวณส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยปอกับเมทริกซ์ และรูปที่ 4.6 b) จะเห็นได้ว่า มีช่องว่างบริเวณรอบ ๆ เส้นใยปอกับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต ส่วนเส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวนั้นเส้นใยปอจะมีเสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากส่วนที่อ่อนแอต่อด่างได้ถูกกำจัดออกไปแล้ว ดังรูปที่ 4.6 c) และ 4.6 d) เป็นผลให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยปอและจีโอโพลิเมอร์ดีขึ้น เส้นใยปอและจีโอโพลิเมอร์มีความเข้ากันได้ดี ส่งผลต่อการกระจายแรงในวัสดุ

จีโอโพลิเมอร์ได้ดีขึ้นเช่นกัน ดังนั้นคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ ทางด้านกำลังรับแรงดัดจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่าง ทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว กับเส้นใยปอแบบไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว พบว่า สัดส่วนกำลังรับแรงดัด (TM:K) จะมีค่าเท่ากับ 1.74, 1.61 และ 1.22 เท่า ตามปริมาณเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ



*หมายเหตุ ขนาดของภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

- a) กำลังขยายเท่ากับ x200 มาตรฐาน 100 μm
- b) กำลังขยายเท่ากับ x500 มาตรฐาน 50 μm
- c) กำลังขยายเท่ากับ x200 มาตรฐาน 100 μm
- d) กำลังขยายเท่ากับ x500 มาตรฐาน 50 μm

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายระดับจุลภาคของตัวอย่างปริมาณเส้นใยปอ 5% a) และ b) แสดงตัวอย่างทดสอบเสริมเส้นใยแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิว หรือ K5, c) และ d) แสดงตัวอย่างทดสอบเสริมเส้นใยแบบปรับสภาพพื้นผิว หรือ TM5

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยในบทนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ โดยใช้เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ จากผลการดำเนินงานสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และเส้นใยปอที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว ไม่ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตแตกต่างกัน แต่เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะช่วยให้ความพรุน และการดูดซึมน้ำค่าลดลง

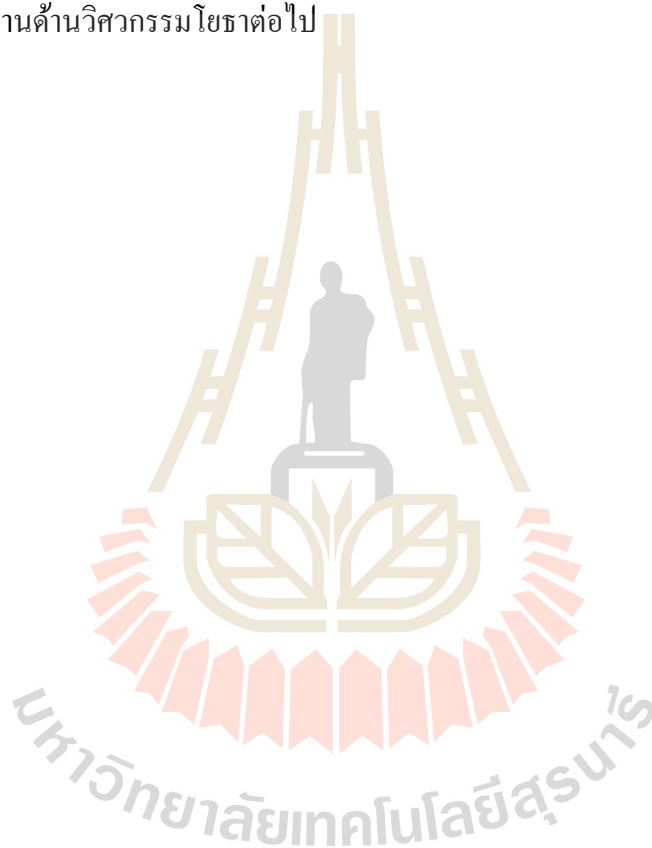
2. การใช้เส้นใยปอเสริมกับวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจะไม่ส่งผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลในด้านกำลังรับแรงอัด ซึ่งจีโอโพลิเมอร์เพสต์ควบคุมจะมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด และการใช้เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวเสริมกับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตจะทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่ามากกว่าการใช้เส้นใยปอที่ไม่ผ่านปรับสภาพพื้นผิว

3. เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตดีกว่าเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และที่ปริมาณเส้นใยปอ 1% แบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่ากำลังรับแรงดัดน้อยที่สุด

4. การใช้เส้นใยปอในการเสริมกำลังให้กับจีโอโพลิเมอร์ในปริมาณ 1% การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอ จะช่วยทำให้กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต มีค่าสูงกว่าการใช้เส้นใยปอที่ไม่ปรับสภาพพื้นผิวค่อนข้างมาก แต่สำหรับปริมาณเส้นใยปอที่ 5% กำลังรับแรงดัดระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิว กับเส้นใยที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวมีค่าต่างแตกต่างกันไม่มาก เมื่อเทียบกับตัวอย่างแบบ 1% เส้นใยปอ เนื่องจากเส้นใยปริมาณมากขึ้นการกระจายตัวของเส้นใยในจีโอโพลิเมอร์ระหว่างเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว กับไม่ปรับสภาพพื้นผิวจะไม่แตกต่างกัน ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ เพื่อมุ่งเน้นพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุอีโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ แต่ในทางวิศวกรรมโยชการนำเส้นใยธรรมชาติมาเสริมในวัสดุที่มีความเป็นด่างสูง ยังคงมีข้อจำกัดเรื่องความทนทานของวัสดุในระยะยาวอยู่ อนาคตข้างหน้าในงานวิจัยนี้อาจจะต้องมีการทดสอบผ่านกระบวนการทำรอบเปียกสลับแห้ง เพื่อศึกษาผลกระทบในเรื่องของความทนทานที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุนี้ และศึกษาแนวทางการพัฒนาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธาต่อไป



รายการอ้างอิง

- นันทชัย ชูศิลป์ และคณะ. (2556). สมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์เสริมเส้นใยตาลโตนด, วารสาร การพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต, 1(2), หน้า89-99.
- นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล. (2550). การศึกษากระบวนการการปรับสภาพกากปาล์มน้ำมันเพื่อเพิ่ม ผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมัก, สถาบันพระจอมเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร.
- พรรณพร กะตะจิตต์. (2561). กระดาษหนังสือพิมพ์เป็นสีเหลือง, สถาบันส่งเสริมการสอน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงศึกษาธิการ, สืบค้นจาก <https://www.scimath.org/article-chemistry/item/8392-2018-06-01-02-41-28>
- เพิ่มพูน พันธุ์ยางน้อย. (2553). **A Parameter Study of Bending Behavior of Ferro Cement Reinforced with Wire Mesh Obtained from Natural and Synthetic Fibers with Pre-Tension in Fibers**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และ อัญชิสา สันติจิตโต. (2555). คุณสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้น ใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มเพื่อผลิตวัสดุก่อสร้าง, Journal of Architectural/Planning Research and Studies, 9(1), หน้า 113-124.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์ (2558). กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจาก วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน
- สุภาวดี ผลประเสริฐ. (2557). การปรับสภาพวัตถุดิบพอลิโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 22 ฉบับที่ 5 (ฉบับพิเศษ)
- สุวิทย์ชัย ปลื้มฤทัย. (2555). การพัฒนาคอนกรีตบล็อกจากผักตบชวา, มหาวิทยาลัยศิลปกร, กรุงเทพมหานคร.
- สุวรรณณี เหล่าปัญญาและวีระ หอสกุลไท. (2556). กำลังอัด ความพรุนและความดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์ผสมผงลู่ก้วยไฟฟ้า, KKU Res. J., 18(2), หน้า. 280-288.
- เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง. (2557). หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของดินตะกอนประปา-ถ้ำลอยจีโอโพลี เมอร์มวอลเบาเซลลูลาร์. สถาบันมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

- ศักดิ์รินทร์ เหลืองคำจอง (2559). วารสารคอนกรีต : วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (**Geopolymer Material**).
สืบค้นจาก <http://www.thaitca.or.th/images/journal/journal3/journal3-6.pdf>
- Abdullah A., Jamaludin S.B., Noor M. M. and Hussin K. (2011). **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.
- Alomayri T. and Low I.M. (2013). **Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites**, Journal of Asian Ceramic Societies, vol. 1, no. 1, pp. 30-34.
- Alomayri T., Shaikh F.U.A. and Low I.M. (2013). **Characterisation of cotton fibre-reinforced geopolymer composites**, Composites Part B: Engineering, vol. 50, pp. 1-6.
- Alomayri T., Shaikh F.U.A. and Low I.M. (2014). **Mechanical and thermal properties of ambient cured cotton fabric-reinforced fly ash-based geopolymer composites**, Ceramics International, vol. 40, pp.14019–14028.
- Alomayri, Assaedi H, Shaikh F.U.A. and Low I.M. (2014). **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.
- Alzeer M. and MacKenzie K. (2013). **Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax)**, Applied Clay Science, vol. 75–76, pp. 148–152.
- American Society for Testing and Materials (2015). ASTM C20-00: **Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water**. Book of Standards Volume: 15.01
- American Society for Testing and Materials (2016). ASTM C109 / C109M-16a: **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)**. Book of Standards Vol. 04.01
- American Society for Testing and Materials (2016). ASTM C293/C293M–16: **Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)**. Book of Standards Vol. 04.02
- Arbelaiz A., Ferná'ndez B., Ramos J.A., Retegi A., Llano-Ponte R. and Mondragon I. (2005). **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.
- Ardanuy M., Claramunt J., Garcia-Hortal J. A. and Barra M. (2011). **Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers**, *Cellulose*, vol. 18, no. 2, pp. 281-289.
- Asasutjarit C., Charoenvai S., Hirunlabh J. and Khedari J. (2009). **Materials and mechanical properties of pretreated coir-based green composites**, *Composites Part B : Engineering*, vol. 40, no. 7, pp. 633–637.
- Azwa Z.N., Yousif B.F., Manalo A.C. and Karunasena W. (2013). "A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibers," *Materials and Design*, vol. 47, pp. 424-442.
- Bakharev T. (2005). **Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions**, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1233–1246.
- Bakharev T. (2005), **Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing**, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1224–1232.
- Chen R, Ahmari S. and Zhang L. (2014). **Utilization of sweet sorghum fiber to reinforce fly ash-based geopolymer**, *Journal of Materials Science*, vol. 49, no.6, pp 2548–2558.
- Chindaprasirt P., Chareerat T., Hatanaka S. and Cao T., **High-Strength Geopolymer Using Fine High-Calcium Fly Ash**, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 264-270, Mar., 2011.
- Davitdovits, J., (1994). **Properties of Geopolymer Cements**”, In Kiev (Eds.), **Proceedings of The First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, pp.131-149.
- Frazao C., Barros J., Toledo Filho R., Ferreira S. and Gonçalves D. (2018), **Development of sandwich panels combining sisal fiber-cement composites and fiber-reinforced lightweight concrete.**, *Cement and Concrete Composites*, vol. 86, pp. 206-223.
- Horpibulsuk S., Rachan R. and Raksachon Y. (2009). **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.

- Horpibulsuk S., Rachan R., Chinkulkijniwat A., Raksachon Y. and Suddeepong A. (2010). **Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations**, Construction and Building Materials, vol. 24, no. 10, pp. 2011–2021.
- Jin-Suk Lee, Binod Parameswaran, Joon-Pyo Lee, Soon-Chul Park. **"Recent developments of key technologies on cellulosic ethanol production."** Journal of Scientific & Industrial Research, 67, pp. 865-873. 2008.
- Kong D. L. Y and Sanjayan J. G. (2010). **Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete**, Cement and Concrete Research, vol. 40, no. 2, pp. 334–339.
- Korniejenko K., Frąćzek E., Pytlak E. and Adamski M. (2016). **Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers**, Procedia Engineering vol.151, pp.388 – 393.
- Lertwattanaruk P. and Masuwan K., **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)
- Li Xue, L. G. Tabil and S. Panigrahi. (2007). **Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review."** Journal of Polymers and the Environment, vol.15, no.1, pp. 25-33.
- Phoo-ngernkham T., Sata V., Hanjitsuwan S., Ridtirud C., Hatanaka S. and Chindaprasit P. (2015) **High calcium Fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material**, Construction and Building Materials, vol. 98, pp. 482–488.
- Pickering K. L., G. W. Beckermann, S. N. Alam and N. J. Foreman. (2007). **Optimising industrial hemp fibre for composites."** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 38, no. 2, pp. 461-468.
- Rakkob T., Chinkulkijniwat A. and Yubonchit S. (2016) **A review of recent developments of natural cellulose fiber in cementitious materials**, The 21st National Convention on Civil Engineering, pp.708-713. (in Thai)
- Ray D., Sarkars B. K., Rana A. K. and Bose N. R. (2001). **Effect of alkali treated jute fibres on composite properties**. Bulletin of Materials Science, 24(2), pp. 129–135.

- Reza Mahjoub et al., (2014). **"Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications"** Construction and Building Materials, vol.55, pp. 103–113.
- Roviello G., Ricciotti L., Ferone C., Colangelo F. and Tarallo O. (2015). **Fire resistant melamine based organic-geopolymer hybrid composites**, Cement & Concrete Composites, vol. 59, pp. 89–99.
- Sankar K., Ribeiro R. A.S., Ribeiro M. G. S. and Kriven W.M. (2017). **Potassium-based geopolymer composites reinforced with chopped bamboo fibers**, Journal of the American Ceramic Society, vol. 100, no. 1, pp. 49–55.
- Sgriccia N., Hawley M.C. and Misra M. (2008). **Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites**, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 39, no. 10, pp. 1632-1637.
- Soltani N., Bahrami A., Pech-Canul M.I. and González L.A. (2015). **Review on the physicochemical treatments of rice husk for production of advanced materials**," Chemical Engineering Journal, vol. 264, pp. 899-935.
- Sukmak P., Horpibulsuk S. and Shen S. S. L. (2013). **Strength development in clay–fly ash geopolymer**," Construction and Building Materials, vol. 40, pp. 566–574.
- Sukontasukkul P., Pongsopha P., Chindaprasir P. and Songpiriyakij S., "Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer," Construction and Building Materials, vol. 161, pp. 37-44, Feb., 2018.
- Tolêdo-Filho R. D., Scrivener K., England G. L. and Ghavami K. (2000). **Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites**, Cement & Concrete Composites, vol. 22, no. 2, pp. 127-143.
- Yan Li, Yiu-Wing M., Lin Ye. (2000). **Sisal fibre and its composites: a review of recent developments.** Composites Science and Technology, vol. 60, pp. 2037-2055.

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณผลการทดสอบ



ตารางที่ ก.1 แสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณผลการทดสอบ

การทดสอบ	ตัวอย่างทดสอบ	วิธีการคำนวณผลการทดสอบ
1. ความหนาแน่น	TMK5	จากสูตร $B = \frac{D}{V} = \frac{220.59}{125.615} = 1.756 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}$ <p>เมื่อ B คือความหนาแน่น, D คือน้ำหนักแห้ง และ V คือปริมาตรภายนอก</p>
2. ความพรุน	TMK5	จากสูตร $P, \% = \left(\frac{W - D}{V} \right) \times 100 = \left(\frac{235.115 - 220.59}{125.615} \right) \times 100 = 11.56\%$ <p>เมื่อ P คือค่าความพรุน (%), W คือน้ำหนักที่สภาวะอิ่มตัว, D คือน้ำหนักแห้ง และ V คือปริมาตรภายนอก</p>
3. การดูดซึมน้ำ	TMK5	จากสูตร $A, \% = \left(\frac{W - D}{D} \right) \times 100 = \left(\frac{235.115 - 220.59}{220.59} \right) \times 100 = 6.59\%$ <p>เมื่อ A คือการดูดซึมน้ำ (%), W คือน้ำหนักที่สภาวะอิ่มตัว และ D คือน้ำหนักแห้ง</p>
4. กำลังรับแรงอัด	GP	จากสูตร $\sigma_c = \frac{P_m}{A} = \frac{149.25}{0.05 \times 0.05} = 59.7 \text{ MPa}$ <p>เมื่อ σ_c คือกำลังรับแรงอัด P_m คือแรงสูงสุดที่กระทำจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ และ A คือพื้นที่ของตัวอย่างทดสอบ</p>

ตารางที่ ก.1 แสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณผลการทดสอบ (ต่อ)

การทดสอบ	ตัวอย่างทดสอบ	วิธีการคำนวณผลการทดสอบ
5. กำลังรับแรงคัต	TMK5	<p>จากสูตร</p> $\sigma_F = \frac{3 P_m L}{2 b h^2} = \frac{3 (1.73333 \times 0.2286)}{2 (0.0254 \times 0.0762^2)} = 4.03 \text{ MPa}$ <p>เมื่อ σ_F คือกำลังรับแรงคัต, P_m คือแรงสูงสุดที่กระทำจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ, L คือช่วงความยาวระหว่างจุดรองรับ, b คือความกว้างของตัวอย่าง และ h คือความหนาของตัวอย่าง</p>
6. ค่าโมดูลัสแรงคัต	TMK5	<p>จากสูตร</p> $E_F = \frac{L^3}{4 b h^3} \left(\frac{\Delta P}{\Delta d} \right)$ $E_F = \left(\frac{0.2286^3}{4 \times 0.0254 \times 0.0762^3} \right) (0.005532) = 1.47 \text{ GPa}$ <p>เมื่อ E_F คือโมดูลัสการคัต, L คือช่วงความยาวระหว่างจุดรองรับ, b คือความกว้างของตัวอย่าง, h คือความหนาของตัวอย่าง, P_m คือแรงสูงสุดที่กระทำจนตัวอย่างเกิดการวิบัติ และ $\frac{\Delta P}{\Delta d}$ คือค่าความชันเริ่มต้นในช่วงยืดหยุ่น</p>
7. ความเหนียว	TMK5	<p>คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงคัต โดยจะใช้โปรแกรม Origin เป็นตัวคำนวณผลการทดสอบ เช่น ตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอ 5% แบบปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่าความเหนียวเท่ากับ 12.67 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร</p>

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

พัชราภรณ์ รักคบบ, ธนาภรณ์ รักคบบ และอวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์. (2561). คุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ. วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2563



คุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

พัชราภรณ์ รักคบ¹ 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 สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ รองศาสตราจารย์ ดร. สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้พิมพ์ประสานงาน 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-crackes 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

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

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

³Associate 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 (Pozzolan materials) ที่มีองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินา เช่น ดินขาว, ดินขาวเผาแคลไซน์, แก้วลอย, และอื่น ๆ มากกระตุ้นด้วยสารละลายอัลคาไลน์ที่มีความเข้มข้นสูง (โซเดียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, และโซเดียมซิลิเกต) เกิดเป็นปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ซิลิกอน และอะลูมิเนียมออกไซด์ จัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างปิรามิดฐานสามเหลี่ยม ที่มีการเชื่อมโยงซิลิกอนออกไซด์ร่วมกัน กลายเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถก่อตัว แข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้ดี ซึ่งมีสมรรถนะเทียบเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์ยังโดดเด่นในด้านความทนทานต่ออุณหภูมิสูง, ซัลเฟต, กรดและด่าง [1-6] สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีข้อดีหลายประการ จีโอโพลิเมอร์ยังคงมีข้อเสียเช่นเดียวกับวัสดุซีเมนต์ทั่วไป คือมีลักษณะเฉพาะเมื่อเกิดการวิบัติที่เป็นพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อการดึงตัว (Tensile strength) และความต้านทานต่อการแตกร้าวตัว (Fracture toughness) [7] ทำให้มีข้อจำกัดสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างบางประเภท ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้วัสดุเสริมแรง คล้ายกับนวัตกรรมของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite materials) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งาน

วัสดุซีเมนต์คอมโพสิต (Cement composite materials) ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นในหลายปีที่ผ่านมา เส้นใยสังเคราะห์มักถูกนำมาใช้เป็นหนึ่งในส่วนประกอบเสริมแรง สำหรับผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลและกายภาพของปูนซีเมนต์ให้ดีขึ้น ทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสะดวกคือการใช้เส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืช มาทดแทนวัสดุ

ใยสังเคราะห์ซึ่งมีราคาแพง การใช้เส้นใยเซลลูโลสจากพืชถือว่าประสบความสำเร็จสำหรับใช้เป็นเส้นใยทางเลือก เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมีคุณสมบัติทางกลและกายภาพที่น่าสนใจ และยังสามารถหาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย [8-13] อีกทั้งพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมีความขรุขระโดยธรรมชาติ ทำให้สมรรถภาพในการยึดเกาะมีมากเพียงพอที่จะช่วยปรับปรุง คุณสมบัติทางกลของวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตให้ดีขึ้น ในด้านความเหนียว, ความแกร่ง, กำลัง, และความต้านทานต่อแรงกระแทก หรือแม้กระทั่งช่วยลดการยืดหดตัว ลดการนำความร้อน [14] จากคุณสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้ ทำให้วัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์ทางด้านวัสดุก่อสร้าง หรือวัสดุทางด้านสถาปัตยกรรมในส่วนต่าง ๆ ของบ้าน หรืออาคาร ตัวอย่างเช่น ไม้เทียม, ผนัง, ฝ้า, อิฐ, และกระเบื้องผนังหลังคา เป็นต้น

ในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ (Geopolymer composite materials) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ในขณะที่การวิจัยโดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในการศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นหลัก ซึ่งประสิทธิภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ด้านคุณสมบัติทางกล มีแนวโน้มไม่ได้แตกต่างกับวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติแบบเดิมอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ในปี ค.ศ. 2011 Abdullah และคณะ [11] พบว่าเส้นใยมะพร้าวมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดรอยแตกร้าวของซีเมนต์ได้ ที่ปริมาณความเหมาะสมของเส้นใยมะพร้าว เท่ากับ 9% ของน้ำหนัก อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในเรื่องความทนทานต่อการใช้งานในระยะยาวของผลิตภัณฑ์ที่ได้อ้างถึงข้างต้นนี้ เนื่องจากการนำเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาประยุกต์ใช้กับวัสดุซีเมนต์ เส้นใยมีส่วนช่วยเพิ่มความพรุนให้กับวัสดุ และด้วยธรรมชาติของเส้นใยเซลลูโลสนั้น มี

ความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี เมื่อนำเส้นใยมาเสริมกับวัสดุคอมโพสิตที่มีความเป็นด่าง เช่น ปูนซีเมนต์หรืออีโพลีเมอร์ อาจทำให้สารละลายต่างถูกดูดซึมเข้าไป เป็นผลทำให้เส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลสเกิดการเสื่อมสลาย หรือได้รับความเสียหายได้ [15-17] จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา Alomayri และ Low [18] อธิบายถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีการเสริมกำลังด้วยเส้นใยธรรมชาติหรือเส้นใยเซลลูโลส เกิดขึ้นจากพันธะที่ยึดเหนี่ยวกันระหว่างเส้นใยกับโครงข่ายภายในวัสดุ ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยจึงมีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของวัสดุดังกล่าว แต่สำหรับวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ ยังคงพบว่ามีรายงานการวิจัยที่ค่อนข้างน้อย ที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการปรับปรุงคุณภาพของเส้นใยก่อนนำมาเสริมกำลังให้กับวัสดุนี้

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติทางกลและกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุน ค่าการดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงคด ของวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยธรรมชาติ โดยใช้วิธีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยด้วยต่าง ก่อนนำมาใช้เป็นส่วนประกอบเสริมแรงในวัสดุอีโพลีเมอร์ ในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้เส้นใยเซลลูโลสจากปอ เพราะสามารถหาได้ง่ายและมีคุณสมบัติทางกลที่น่าสนใจ พร้อมทั้งใช้ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะภายในของโครงสร้างในบริเวณที่เกิดการวิบัติ ซึ่งชิ้นส่วนตัวอย่างจะถูกนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบ [19-21]

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

2. วิธีการศึกษา

การทดสอบของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุอีโพลีเมอร์คอมโพสิต

2.1 วัสดุ

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

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

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อทำการทดสอบในแต่ละชุดทดสอบจะใช้ปริมาณเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5% ต่อน้ำหนักของแก้วลอย และตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสที่ไม่มีเสริมเส้นใยปอเป็นตัวอย่างอ้างอิง (GP) โดยมีสัดส่วนผสมในการเตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 3 ชุดตัวอย่างทดสอบ Kx (x เป็น 1, 3 และ 5 แสดงถึงปริมาณเส้นใยปอ 1%, 3% และ 5%) จะเป็นจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอแบบไม่ได้รับสภาพพื้นผิว ส่วนชุดตัวอย่างทดสอบ TMx จะเป็นจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว โดยจะมีการเติมน้ำเพิ่มเพื่อให้การกระจายตัวของเส้นใยภายในคอมโพสิตดีขึ้น และทำงานง่าย

การเตรียมตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ จะเริ่มจากการนำแก้วลอยและเส้นใยปอมาผสมกันแบบแห้งด้วยมือก่อน เพื่อลดการกระจุกกันของเส้นใยเสริมในวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต แล้วจึงดำเนินการตามวิธีผสมของ Alomayri และ Low [18] โดยนำส่วนผสมก่อนหน้ามาผสมในเครื่องผสมอีกครั้ง ที่รอบความเร็วการหมุนต่ำจนกระทั่งเส้นใยปอมีการกระจายตัวทั่วแก้วลอย แล้วจึง

เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (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 ปล่อยให้แข็งตัวเป็นเวลา 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 จีโอโพลิเมอร์เฟสควบคุม
 Kx หมายถึง จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว
 TMx หมายถึง จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิว

2.3 คุณสมบัติทางกายภาพ

ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทุกตัวอย่างจะทำการชั่งน้ำหนักหลังจากแกะออกจากแบบหล่อทันที เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของ ขั้นตอนการผลิตตัวอย่าง คำนวณน้ำหนักของตัวอย่างวัสดุ จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ได้ ควรจะมีค่าน้ำหนักแตกต่างกันไม่เกินไปกว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ร้อยละ 10 ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพนี้จะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM-C20 [23] โดยใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อนในแต่ละสัปดาห์ผสม 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) ของตัวอย่างทดสอบคือ สัดส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งและปริมาตรภายนอก กับ โพร่งอากาศ สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ B คือความหนาแน่น, D คือน้ำหนักแห้ง และ V คือปริมาตรภายนอก

2.3.2 ความพรุน (Porosity, P)

ค่าความพรุน (P) จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของโพรงเปิดในตัวอย่าง กับปริมาตรภายนอก 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 คือน้ำหนักที่สภาวะอิ่มตัว, และ D คือน้ำหนักแห้ง

2.4 คุณสมบัติทางกล

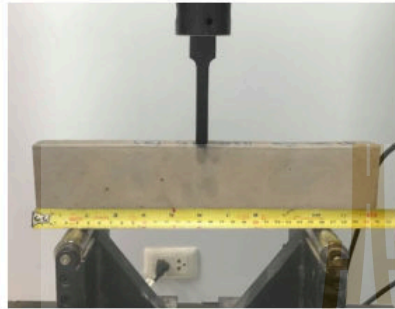
2.4.1 กำลังรับแรงดัด

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดัดของวัสดุ จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ จะใช้ตัวอย่างขนาด 2.54x7.62x30.48 เซนติเมตร (1x3x12 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 คือช่วงความยาวระหว่างจุด

รองรับ, b คือความกว้างของตัวอย่าง และ h คือความหนาของตัวอย่าง



รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งตัวอย่างบนเครื่องทดสอบแรงดัดแบบจุด 3 จุด

2.4.2 ความเหนียว

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงดัดของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมกำลังด้วยเส้นใยปอ จะถูกใช้เพื่อนำมาพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกลในด้านความเหนียว ซึ่งจะเป็นการบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับพลังงานและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยไม่แตกร้าว

2.5 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

ชิ้นส่วนเล็ก ๆ จากบริเวณของการวิบัติในแต่ละตัวอย่างทดสอบที่ปริมาณเส้นใยปอ 5% จะถูกนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ซึ่งชิ้นส่วนของตัวอย่างทดสอบจะถูกนำมาบ่มยังปฏิบัติการปอโซลานด้วยการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส โดยการแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำไปติดตั้งบน Stub เพื่อทำการเคลือบผิวด้วยทอง ก่อนนำไปวิเคราะห์ภาพถ่ายระดับ

จุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) โดยวิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบนี้ เป็นการดำเนินการตามวิธีของ Sukmak และคณะ [21]

3. ผลการศึกษา

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ค่าความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ ของตัวอย่างทดสอบ ที่บ่มในอุณหภูมิห้องอายุ 28 วันทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4 โดยเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ ระหว่างตัวอย่างอีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิว กับที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว ซึ่งค่าความหนาแน่นของทุก ๆ ตัวอย่างทดสอบจะมีแนวโน้มที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยปอ สอดคล้องกับ Abdullah และคณะ [11] ซึ่งศึกษาซีเมนต์คอมโพสิตเสริมใยมะพร้าว และ Alomayri และ Low [18] ศึกษาวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยฝ้าย เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของเส้นใยปอที่เท่ากัน พบว่าตัวอย่างทดสอบที่เสริมเส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว จะมีความหนาแน่นสูงกว่า ตัวอย่างที่เสริมเส้นใยปอแบบที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวเพียงเล็กน้อย (0.3%, 1.0% และ 1.1% ตามสัดส่วนเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (GP) จะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดเท่ากับ 1.877 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

สำหรับค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทั้งสอง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยปอที่มากขึ้นในทุกตัวอย่าง สอดคล้องกับผลการศึกษางานวิจัยอื่น [18, 25-26] โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยปอในแต่ละตัวอย่างทดสอบ จะทำให้สัดส่วนของวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์ลดลง และจากความชอบน้ำโดยธรรมชาติของเส้นใยเซลลูโลสจากพืช [25] เมื่อมีการเติมน้ำเพิ่มขึ้นขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง อาจก่อให้เกิดการขยายตัวจากการดูดซึมน้ำ เมื่อตัวอย่างทดสอบแข็งและแห้งตัว จะทำให้เกิดช่องว่างตลอดแนว

รอบ ๆ เส้นใยปอในวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต โดยตัวอย่างควบคุมจะมีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำอยู่ที่เท่ากับ 4.13% และ 2.20% ตามลำดับ แต่สำหรับตัวอย่างที่ 5% ของปริมาณเส้นใยจะมีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำสูงสุด โดยตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะเท่ากับ 12.36% และ 7.12% ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยปอที่ปรับสภาพพื้นผิวนั้น จะเท่ากับ 11.56% และ 6.59% ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

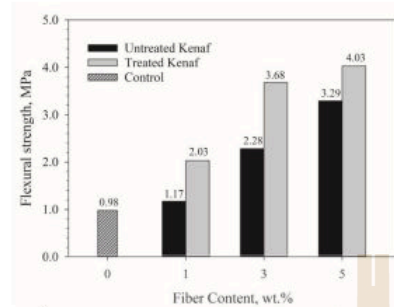
Physical properties	Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Water absorption (%)
GP	1.877	4.13	2.20
1%fiber untreated	1.842	7.83	4.25
1%fiber treated	1.848	7.28	3.94
3%fiber untreated	1.765	11.66	6.61
3%fiber treated	1.783	10.26	5.76
5%fiber untreated	1.736	12.36	7.12
5%fiber treated	1.756	11.56	6.59

จากข้อมูลเหล่านี้จะเห็นได้ว่าการใช้เส้นใยปอที่มีการปรับสภาพพื้นผิว และไม่มีการปรับสภาพผิวในวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต จะมีความแตกต่างกันในด้านของความหนาแน่นน้อยมาก ๆ จนแทบไม่มีความแตกต่าง แต่ค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำจะแตกต่างกันพอสมควร โดยพบว่าในตัวอย่างที่ใช้ปริมาณเส้นใย 5% การที่ใช้เส้นใยที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้วจะให้ค่าความพรุนลดลง 6.47% และการดูดซึมน้ำลดลง 7.44% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ปริมาณเส้นใยแบบไม่ปรับสภาพจำนวน 5% เท่ากัน

3.2 คุณสมบัติทางกล

3.2.1 กำลังรับแรงดัด

ผลการศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดัด ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต จะแสดงตามรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ทุกตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงดัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% เป็นผลมาจากเส้นใยปอช่วยเพิ่มการถ่ายแรงให้กับจีโอโพลิเมอร์ ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดมากขึ้น เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างควบคุม (0.98 เมกกะปาสคาล) กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวมีค่าเท่ากับ 1.17, 2.28 และ 3.29 เมกกะปาสคาล ตามลำดับเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น และส่วนตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยแบบปรับสภาพพื้นผิวมีกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 2.03, 3.68 และ 4.03 เมกกะปาสคาล ตามลำดับเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุม ที่ไม่มีการเสริมเส้นใยปอกำลังที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น 19.39%, 132.65% และ 235.71% สำหรับตัวอย่างที่ผสมแบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย และ 107.14%, 275.51% และ 311.22% สำหรับตัวอย่างที่ผสมแบบปรับสภาพพื้นผิวเส้นใย ตามสัดส่วนเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ

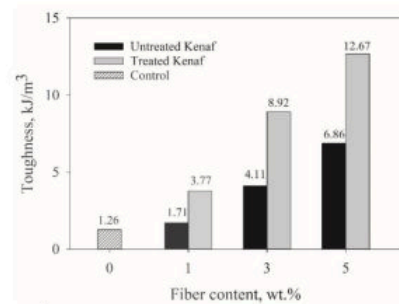


รูปที่ 2 กำลังรับแรงดัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

3.2.2 ความเหนียว

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ที่ได้จากการทดสอบแรงดัดแบบสามจุด ค่าความเหนียวที่แสดงดังรูปที่ 3 จะแสดงให้เห็นว่า วัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมกำลังด้วยเส้นใยปอ มีความเหนียวเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเส้นใยปอ 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 และตัวอย่าง

ทดสอบที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิว จะมีค่าความเหนียวเท่ากับ 3.77, 8.92 และ 12.67 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ตามอัตราส่วนของเส้นใยปอที่เพิ่มขึ้น 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ



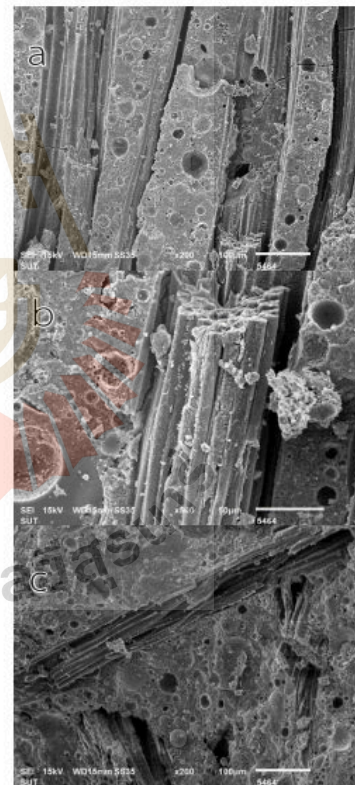
รูปที่ 3 ความเหนียวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ

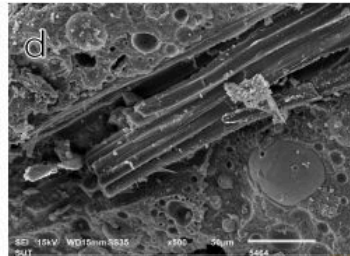
3.3 ภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยปอแบบไม่ปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีกำลังรับแรงดัดต่ำกว่าตัวอย่างที่ผสมเส้นใยปอแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิว เนื่องจากพื้นผิวของเส้นใยปอตามธรรมชาติจะมีสมบัติเป็นแบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) คือมีความชอบน้ำโดยธรรมชาติ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพื้นผิวประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) การที่นำเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพใด ๆ มาเสริมกำลังให้กับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต จะทำให้เส้นใยปอมีแนวโน้มที่จะดูดซึมน้ำหรือความชื้นได้มาก ทำให้เส้นใยปอเกิดการบวมตัวหรือขยายขนาดได้มาก ก่อให้เกิดความเครียดบริเวณส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยปอกับเมทริกซ์ นำไปสู่การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก อีกทั้ง

องค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) มีความอ่อนแอต่อสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ซึ่งภายในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์อาจทำให้พื้นผิวของเส้นใยเกิดความเสียหาย และเกิดการเสื่อมสลายได้อย่างช้า ๆ ด้วยเหตุนี้บริเวณรอบ ๆ ส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยกับเมทริกซ์จะเกิดช่องว่าง ส่งผลให้การยึดเกาะกันลดลง ทำให้กระทบต่อความสามารถในการรับแรงดัดที่ไม่ดี แต่ในทางกลับกันเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้องค์ประกอบของเส้นใยที่อ่อนแอต่อด่าง อย่างเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ถูกกำจัดออกไป ทำให้เส้นใยมีเสถียรภาพมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงการยึดเกาะทำให้เส้นใยเชื่อมเข้ากันได้ดีกับจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับรายงานของ Azwa และคณะ [16] ที่ได้กล่าวไว้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยพืชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเป็นการกำจัดกลุ่มไฮดรอกซิลในองค์ประกอบของเส้นใยพืชที่มีความเข้ากันได้ดีกับโมเลกุลของน้ำ และยังสลายองค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส ซึ่งจะช่วยลดความสามารถในการดูดซับความชื้น เป็นผลให้การบวมตัวของเส้นใยพืชลดลง โพรงช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์เกิดน้อยลงเช่นกัน และความชื้นจากภายนอกแทรกซึมเข้าสู่คอมโพสิตได้ยากขึ้น ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยพืชและเมทริกซ์ดีขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบภาพถ่ายระดับจุลภาค ที่แสดงในรูปที่ 4 โดยตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว พื้นผิวของเส้นใยที่เป็นเปลือกหุ้มบางส่วนจะเกิดการเสื่อมสลาย เนื่องจากการโจมตีของสารละลายด่างที่ถูกใช้ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง จากรูปที่ 4a จะพบรอยร้าวขนาดเล็กที่เกิดจากความเครียดบริเวณส่วนต่อประสานระหว่างพื้นผิวเส้นใยกับเมทริกซ์ และรูปที่ 4b จะเห็นได้ว่า มีช่องว่างบริเวณรอบ ๆ เส้นใยกับจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต ส่วนเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวนั้นเส้นใยจะมี

เสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากส่วนที่อ่อนแอต่อด่างได้ถูกกำจัดออกไปแล้ว ดังรูปที่ 4c และ 4d เป็นผลให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและจีโอโพลิเมอร์ดีขึ้น เส้นใยและจีโอโพลิเมอร์มีความเข้ากันได้ดี ส่งผลต่อการกระจายแรงในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ดีขึ้นเช่นกัน ดังนั้นคุณสมบัติทางกลของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ ทางด้านกำลังรับแรงดัดจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างทดสอบที่ผสมเส้นใยแบบปรับสภาพพื้นผิว กับเส้นใยแบบไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว พบว่าสัดส่วนกำลังรับแรงดัด (TM:K) จะมีค่าเท่ากับ 1.74, 1.61 และ 1.22 เท่า ตามปริมาณเส้นใยปอที่ 1%, 3% และ 5% ตามลำดับ





*หมายเหตุ: ขนาดของภาพถ่ายระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

- a) กำลังขยายเท่ากับ $\times 200$ มาตรฐาน $100 \mu\text{m}$
 b) กำลังขยายเท่ากับ $\times 500$ มาตรฐาน $50 \mu\text{m}$
 c) กำลังขยายเท่ากับ $\times 200$ มาตรฐาน $100 \mu\text{m}$
 b) กำลังขยายเท่ากับ $\times 500$ มาตรฐาน $50 \mu\text{m}$

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

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ ที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยตัวทำละลายไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และเส้นใยปอที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว ไม่ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตแตกต่างกัน แต่เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะช่วยให้ความพรุน และการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง

4.2 เส้นใยปอที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตดีกว่าเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และที่ปริมาณเส้นใยปอ 1% แบบไม่ปรับสภาพพื้นผิวจะมีค่ากำลังรับแรงดัดน้อยที่สุด

4.3 การใช้เส้นใยปอในการเสริมกำลังให้กับจีโอโพลิเมอร์ในปริมาณ 1% การปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยปอ จะช่วยทำให้กำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต มีค่าสูงกว่าการใช้เส้นใยปอที่ไม่ปรับสภาพพื้นผิวค่อนข้างมาก แต่สำหรับปริมาณเส้นใยปอที่ 5% กำลังรับแรงดัด ระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยแบบปรับปรุงสภาพพื้นผิว กับเส้นใยที่ไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิวมีค่าต่างแตกต่างกันไม่มาก เมื่อเทียบกับตัวอย่างแบบ 1% เส้นใยปอ เนื่องจากเส้นใยปริมาณมากขึ้นการกระจายตัวของเส้นใยในจีโอโพลิเมอร์ระหว่าง เส้นใยปอแบบปรับสภาพพื้นผิว 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. Rittirud, 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. Toledo-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. Shaikh and I.M. Low, "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. Lertwattanaruk 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. Chindaprasir 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.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวพัชรภรณ์ รักคอบ เกิดวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2535 จบการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสิรินธร จังหวัดสุรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ.2558 ในภาคเรียนสุดท้ายของการศึกษาในระดับปริญญาตรีได้เป็นนักศึกษาฝึกงานของบริษัทโปทิม บิลเดอร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ตำแหน่งวิศวกรประมาณราคา (Estimate) ซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการถอดแบบและการประมาณราคาโครงการงานก่อสร้างต่าง ๆ หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2558 ได้มาทำงานเป็นผู้ช่วยนักวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และต่อมามีปี พ.ศ. 2559 เข้าศึกษาต่อระดับมหาบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา โครงสร้างหลักสูตร วิศวกรรมโยธา ขนส่งและทรัพยากรธรณี แบบ ก. และมีผลงานทางวิชาการได้ตีบทความในวารสารวิชาการคณาจารย์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี 11 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-เมษายน 2563 เรื่องคุณสมบัติทางของวัสดุโพลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยปอ (Mechanical Properties of Geopolymer Composite Reinforced Kenaf Fiber)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี