

การดัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยป่านศรนารายณ์เสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิต: ทบทวนวรรณกรรม  
Surface Modification of Sisal Fiber Reinforced Polymer Composites: Literature Review

มานพ พิพัฒน์หัตถกุล<sup>1\*</sup> ประยูร สุรินทร์<sup>2</sup> และ เจษฎา วงษ์อ่อน<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล <sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน 833 ถนนพระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์: 0 – 2104 – 9099 Email: manop@pit.ac.th

Manop Pipathattakul<sup>1\*</sup>, Prayoon Surin<sup>2</sup> and Jessada Wongon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, <sup>2</sup>Department of Industrial Engineering

Pathumwan Institute of Technology, 833 Rama 1 Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand.

Tel: (66)2104 – 9099 Email: manop@pit.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้มีเป้าหมายในการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการปรับสภาพพื้นผิวต่างๆ ที่นำมาใช้กับเส้นใยธรรมชาติโดยมุ่งเน้นที่เส้นใยป่านศรนารายณ์ สำหรับการประยุกต์ใช้งานคอมโพสิตในระดับสูง เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรงที่มีแนวโน้มเติบโตในทางที่ดีสำหรับการใช้งานในคอมโพสิต เนื่องจากราคาถูก, ความหนาแน่นต่ำ, ความแข็งแรงจำเพาะและมอดูลัสสูง, ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ, สามารถหาได้ง่ายในบางประเทศ, นำกลับมาใช้ใหม่ได้ และย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยหลักของเส้นใยธรรมชาติในคอมโพสิต คือมีความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ต่ำ และมีระดับการดูดซับความชื้นสูง ดังนั้นการปรับสภาพทางกลและทางเคมี จะถูกนำมาใช้สำหรับการดัดแปลงสมบัติพื้นผิวของเส้นใย โดยทบทวนเกี่ยวกับการดัดแปลงทางกล/ทางเคมีที่ถูกนำมาพิจารณาประกอบด้วย โครโมนา, พลาสมา, อัลตราโซนิก, ไซเลน, อะซิทิเลชัน, เบนโซอิลเลชัน, เปอร์ออกไซด์, สารคู่ควมมาลเอเทด, โซเดียมคลอไรด์, อะคริเลชัน, ไอโซไซยานาต, กรดสเตียริก, เปอร์แมกกาเนต, ไตรอะซีน, อนุพันธ์กรดไขมัน และเชื้อรา หลากหลายวิธีสำหรับการปรับสภาพของเส้นใย มีเป้าหมายเพื่อยกระดับการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวเส้นใย และเมทริกซ์ ซึ่งไม่เพียงแต่เฉพาะปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยเท่านั้น แต่ยังช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรงให้กับ เส้นใยอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น คอมโพสิตจะมีสมบัติทางกล และสมบัติความต้านทานความชื้นเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การดัดแปลงพื้นผิว, เส้นใยธรรมชาติ, เส้นใยป่านศรนารายณ์, การปรับสภาพพื้นผิว

## Abstract

This article aims to review about the different surface treatments applied to natural fibers and focused on sisal fiber for advanced composites applications. Natural fibers are a promising reinforcement for use in composites on account of its low cost, low density, high specific strength and modulus, no health risk, easy availability in some countries, renewability, and ready biodegradability. However, the main disadvantages of natural fibers in composites are the low compatibility between fiber and matrix and high degree of moisture absorption. Therefore, physical and chemical treatments are conducted for modification of the fiber surface properties. The different physical/chemical modifications on natural fibers for use in natural fiber reinforced polymer composites have been reviewed. Physical/chemical treatments including corona, plasma, alkaline, silane, acetylation, benzylation, peroxide, maleated coupling agents, sodium chlorite, acrylation, isocyanate, stearic acid, permanganate, triazine, fatty acid derivate and fungal are discussed. The various methods for treatment of fiber aimed to improve the adhesion between the fiber surface and the matrix may not only adjust the fiber surface but also increase fiber strength properties. Moreover, moisture resistance and mechanical properties of composites are improved.

**Keywords:** Surface modification, Natural fiber, Sisal fiber, Surface treatments

## 1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ปัญหาภาวะและสิ่งแวดล้อมได้ทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการเรียกร้องให้มีการเปลี่ยนไปใช้วัสดุธรรมชาติในงานต่างๆ [1] อีกทั้งนโยบายและกฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อมใหม่ๆ ของรัฐบาลทำให้เกิดแรงกดดันให้กับภาคอุตสาหกรรม เช่น ยานยนต์, บรรจุภัณฑ์ และการก่อสร้างในการแสวงหาวัสดุใหม่ๆ ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable materials) เพื่อทดแทนวัสดุคอมโพสิตที่ไม่ย่อยสลาย (Non-biodegradable composites) แบบเดิม [2] ทำให้เกิดความสนใจเป็นอย่างมากในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber composites) เป็นผลทำให้เกิดการค้นคว้าวิจัยอย่างกว้างขวาง เพื่อพัฒนาเส้นใยธรรมชาติให้มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fibers) โดยเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถเพิ่มคุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติให้สูงขึ้น ทำให้เส้นใยธรรมชาติกลายเป็นตัวเลือกที่สำคัญ เมื่อต้องการเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต [3]

ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์และเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber reinforced polymer composites) ได้ถูกพบเห็นและมีการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในอุตสาหกรรมวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากสามารถใช้กระบวนการผลิตอย่างง่าย, มีมิติและเสถียรภาพที่ดี, และให้ประสิทธิภาพทางกล

ที่เพียงพอ ในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ โดยหลักขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะในการยึดเกาะกันระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยและการเลือกกระบวนการผลิตที่เหมาะสม [4-6] โดยคุณภาพของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย ขึ้นอยู่กับการยึดเกาะกันของผิวหน้าระหว่างเมทริกซ์กับเส้นใยหรือที่เรียกว่าอินเตอร์เฟซ เพราะอินเตอร์เฟซที่สมบูรณ์จะช่วยส่งผ่านความเค้นที่เกิดขึ้นกับเมทริกซ์เข้าสู่เส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] เส้นใยธรรมชาติมีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าเส้นใยแก้วหรือเส้นใยคาร์บอนที่เป็นเส้นใยสังเคราะห์หลายประการ อาทิเช่น ต้นทุนต่ำ, ความหนาแน่นต่ำ, คุณสมบัติเฉพาะการดึงเทียบเคียงได้กับเส้นใยสังเคราะห์, ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนอุปกรณ์ต่างๆ, ไม่ระคายเคืองต่อผิว, ความเสี่ยงต่อสุขภาพต่ำ, นำกลับมาใช้ใหม่ได้, และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งวัสดุคอมโพสิตเหล่านี้ถูกนำไปใช้สำหรับการบิน, การก่อสร้าง, การกีฬา, การบรรจุหีบห่อและโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ [8-9] ซึ่งเส้นใยป่านศรนารายณ์ถือว่าเป็นหนึ่งในเส้นใยธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นอย่างมากในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากสามารถหาได้ง่ายมีแหล่งเพาะปลูกในประเทศไทย

ดังนั้นบทความนี้มีเป้าหมายในการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการดัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยวิธีต่างๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใย เพื่อเป็นแนวทางในการที่จะเลือกใช้วิธีการได้อย่างเหมาะสม เพื่อนำกระบวนการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต โดยใช้พอลิเอสเทอร์เรซินเป็นเมทริกซ์และเสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ถักทอ ซึ่งเป็นงานที่จะดำเนินการต่อไปในอนาคต

## 2. องค์ประกอบของวัสดุผสมเส้นใยธรรมชาติ

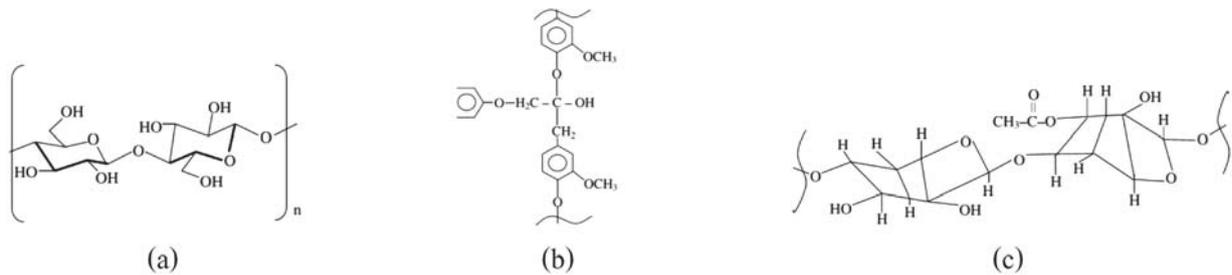
คอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติ เป็นวัสดุผสมระหว่างวัสดุสังเคราะห์/วัสดุธรรมชาติที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบแรกทำหน้าที่เสริมแรงเรียกว่าเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous phase) หรือเส้นใยธรรมชาติ ในขณะที่องค์ประกอบที่เหลือทำหน้าที่ยึดโยงขององค์ประกอบแรกเข้าไว้ด้วยกันเรียกว่าเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือเมทริกซ์ (Matrix) โดยองค์ประกอบทั้งสองถูกผสมรวมกัน โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้มาซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่มีคุณลักษณะและคุณสมบัติตามที่ต้องการ [10]

### 2.1 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติจากพืชเป็นลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic) หรือสารประกอบเชิงซ้อนของเซลลูโลสที่มีอยู่ในธรรมชาติซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose), ลิกนิน (Lignin), เพกทิน (Pectin), และแว็กซ์ (Wax) ตัวอย่างองค์ประกอบโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ [11,12]

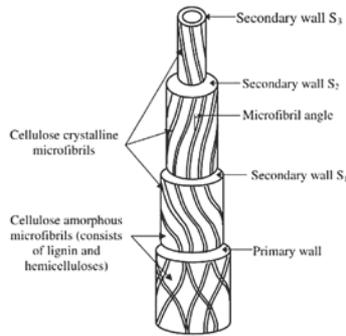
Name	Cellulose (wt.%)	Lignin (wt.%)	Hemicellulose (wt.%)	Pectin (wt.%)	Wax (wt.%)	Micro-fibrillar/spiral angle (°)	Moisture content (wt.%)
<i>Bast fibers</i>							
Jute	61-71.5	12-13	13.6-20.4	0.2	0.5	8.0	12.6
Flax	71	2.2	18.6-20.6	2.3	1.7	10.0	10.0
Hemp	70.2-74.4	3.7-5.7	17.9-22.4	0.9	0.8	6.2	10.8
Ramie	68.6-76.2	0.6-0.7	13.1-16.7	1.9	0.3	7.5	8.0
<i>Leaf fibers</i>							
Sisal	67-78	8.0-11.0	10.0-14.2	10.0	2.0	20.0	11.0
PALF	70-82	5-12	-	-	-	14.0	11.8
<i>Seed fibers</i>							
Cotton	82.7	0.7-1.6	5.7	-	0.6	-	33-34



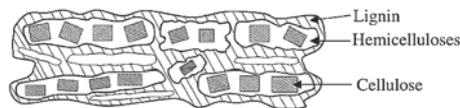
รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) เซลลูโลส (b) เฮมิเซลลูโลส และ (c) ลิกนิน [10]

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเส้นใยซึ่งให้ความแข็งแรง (Strength), ความแข็งตึง (Stiffness) และเสถียรภาพ (Stability) โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 1(a) ประกอบด้วยกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl: OH) สามกลุ่ม โดยสองในสามกลุ่มจะสร้างพันธะไฮโดรเจนขึ้นภายในโมเลกุลเซลลูโลส (Intramolecular) ในขณะที่ส่วนที่เหลือจะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลเซลลูโลสอื่นๆ (Intermolecular) [13] เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างลักษณะเป็นกิ่งแขนงพอลิเมอร์จับกันอยู่แบบหลวมๆ ประกอบด้วยน้ำตาลคาร์บอนห้า (Pentose) และน้ำตาลคาร์บอนหก (Hexoses) ต่ออยู่กับกิ่งแขนงพอลิเมอร์ดังรูปที่ 1(b) ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (อสัณฐาน) ประกอบด้วยคาร์บอน, ไฮโดรเจน, และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติกดังรูปที่ 1(c) [14] เพกทินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) มีหน่วยย่อยคือกรดและน้ำตาลหลายชนิดทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกันคล้ายเป็นซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบสารอินทรีย์ (สารแทรก) และสารอนินทรีย์ (เถ้า) จำนวนเล็กน้อยเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในโครงสร้างของเส้นใย รูปที่ 2 แสดงแผนภาพโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติและรูปที่ 3 จำลองการจัดวางโครงสร้างขององค์ประกอบหลักทั้งสามภายในผนังเซลล์เส้นใย [15] เซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ยาว เมื่อมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่เรียกว่าเซลลูโลสไมโครไฟบริล (Cellulose microfibrils) จะมีรูปร่างลักษณะเฉพาะตัวตามแต่ละชนิดของเส้นใยและเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการกำหนดคุณสมบัติของเส้นใย [10] โดยแต่ละชั้นผนังเซลล์เส้นใยประกอบด้วยผนังเซลล์หลัก (Primary) และผนังเซลล์รอง (Secondary) ซึ่งผนังเซลล์รองประกอบด้วยชั้นสามชั้น โดยแต่ละชั้นมีเซลลูโลสไมโครไฟบริลหมุนติเกลียวเชื่อมต่อกัน [16] ปริมาณเซลลูโลส (Cellulose content) จะมี

ค่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากชั้นหลักไปยังชั้นรองและมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันในแต่ละชั้น ในทางกลับกันปริมาณของลิกนินจะลดลงเรื่อยๆ จากชั้นหลักจนถึงชั้นรอง เฮมิเซลลูโลสโมเลกุล (Hemicellulose molecules) ถูกผูกพันระไฮโดรเจนเข้ากับเซลลูโลสไฟบริล (Cellulose fibrils) และก่อตัวเป็นวัสดุประสาน (Cementing materials) สำหรับโครงสร้างเส้นใยส่วนลิกนินและเพกทินจะถูกผนวกรวมคู่เข้าด้วยกันกับโครงข่ายเซลลูโลส-เฮมิเซลลูโลส (Cellulose-hemicellulose network) และให้คุณลักษณะการยึดเกาะที่เหนียวแน่น (Adhesive quality) เหมือนเป็นกาวธรรมชาติ ชั้นผนังรอง  $S_2$  (Secondary wall  $S_2$ ) มีความหนาคิดเป็นประมาณ ร้อยละ 80 ของความหนาทั้งหมด ดังนั้นชั้นผนังรอง  $S_2$  จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ของเส้นใย โดยทั่วไปแล้วเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงและมุมไมโครไฟบริลต่ำ (Microfibrillar angle : เป็นมุมระหว่างแกนของเส้นใยกับเซลลูโลสไมโครไฟบริล) จะมีคุณสมบัติความแข็งแรงที่ดีกว่า [11,17]



รูปที่ 2 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ [15]



รูปที่ 3 การจัดวางโครงสร้างขององค์ประกอบหลักทั้งสามภายในผนังเซลล์เส้นใย [15]

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกลของเส้นใยธรรมชาติเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ แม้ว่าเส้นใยธรรมชาติค่อนข้างที่จะมีคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงด้อยกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ แต่เมื่อพิจารณาถึงมอดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) และร้อยละของการยืดตัวที่จุดขาด (Elongation at break) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเส้นใยธรรมชาติมาใช้แทนเส้นใยสังเคราะห์สำหรับผลิตคอมโพสิตพอลิเมอร์ เพื่อใช้งานทางด้านวิศวกรรม

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติกับเส้นใยสังเคราะห์ [11, 12, 18]

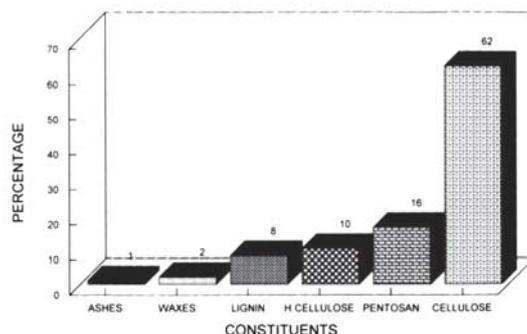
Name of fibers	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Specific strength (Gpa/g/cm <sup>3</sup> )	Specific modulus (Gpa/g/cm <sup>3</sup> )	Elongation at break (%)
Jute	1.3-1.4	393-773	13-26.5	0.3-0.5	10-18.3	1.16-1.5
Flax	1.5	345-1100	27.6	0.2-0.7	18.4	2.7-3.2
Hemp	1.14	690	30-60	0.6	26.3-52.6	1.6
Ramie	1.5	400-938	61.4-128	0.3-0.6	40.9-85.3	1.2-3.8
Sisal	1.45	468-640	9.4-22.0	0.3-0.4	6.4-15.2	3-7
PALF	1.52	413-1627	34.5-82.51	0.3-1.1	22.7-54.3	1.6
Cotton	1.5-1.6	287-800	5.5-12.6	0.2-0.5	3.7-7.8	7.0-8.0
E-glass	2.5	2000-3500	70	0.8-1.4	28	2.5
S-glass	2.5	4570	86	1.8	34.4	2.8
Aramid	1.4	3000-3150	63-67	21-2.2	45-47.8	3.3-3.7

## 2.2 เส้นใยป่านศรนารายณ์

ป่านศรนารายณ์มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า อะกาเว ไชซาลานา (*Agave sisalana* Perr.) มีลำต้น ตื้น หนา และมีหน่อ (Sucker) รากเป็นระบบรากฝอย (Fibrous root system) ใบเดี่ยว (Simple leaf) เกิดเป็นพุ่มแฉ่ (Rosette) เวียนรอบลำต้น (Spiral) สีเขียวเข้ม มีไข (Waxy bloom) ดังรูปที่ 4 [19] ใบของต้นป่านศรนารายณ์คือส่วนที่ถูกนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงมีส่วนประกอบทางเคมีหลักๆ ได้แก่ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน, เพนโทซาน (Pentosan), และแวกซ์ โดยแต่ละส่วนประกอบมีอัตราส่วนตามแผนภูมิ ดังรูปที่ 5 [20]



รูปที่ 4 ลักษณะของต้นป่านศรนารายณ์ [19]



รูปที่ 5 ส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยป่านศรนารายณ์ [20]

### 2.3 เมทริกซ์

เมทริกซ์เป็นวัสดุประสานทำหน้าที่จับยึดเส้นใยและส่งผ่านแรงกระทำจากภายนอกต่อไปยังเส้นใยโดยพอลิเมอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นเมทริกซ์มีทั้งประเภทที่เป็นเทอร์โมเซต (Thermosets) เช่นพอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyesters) และอีพ็อกซี (Epoxy) หรือเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เช่นพอลิพรอพิลีน (Polypropylene: PP), พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE), และอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) [21, 22] การเปรียบเทียบระหว่างเมทริกซ์ประเภทเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกเมทริกซ์ [21]

ข้อดี	ข้อด้อย
<b>เทอร์โมเซต</b>	
- เรซินมีความหนืดต่ำ	- แข็งเปราะ
- ดีสำหรับเส้นใยเปียก	- รีไซเคิลไม่ได้
- เสถียรภาพทางความร้อนดีเยี่ยม	- คุณสมบัติทางเทคนิคกลางๆ ไม่โดดเด่น
เมื่อผ่านพอลิเมอร์ไรซ์ (Polymerised)	
- ทนต่อสารเคมี	- หลอมคืนรูปไม่ได้
<b>เทอร์โมพลาสติก</b>	
- รีไซเคิลได้	- การไหลตัวเมื่อละลายต่ำ
- ง่ายต่อการซ่อมแซมโดยการเชื่อมและตัวทำละลาย	- ต้องมีการให้ความร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลาย
- หลอมคืนรูปได้	เมื่อต้องการขึ้นรูป
- มีความเหนียว	

### 2.4 กระบวนการทางเทคนิคในการขึ้นรูป

โดยหลักการแล้วกระบวนการทางเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติจะคล้ายกับกระบวนการที่ใช้กับเส้นใยสังเคราะห์โดยขึ้นอยู่กับความยาว (Length), ทิศทางการวางตัว (Orientation) และชนิด (Type) ของเส้นใย โดยเส้นใยที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้นใยที่ถูกตัดให้มีขนาดสั้นๆ (Short fiber) ที่มีการกระจายและทิศทางการวางตัวแบบสุ่ม (Random orientation), เป็นเส้นดัดหรือทำให้เส้นดัดเป็นแผ่น (Raw and carded) ที่มีแนวการวางตัวของเส้นใยอยู่ในทิศทางเดียว (Unidirectional) หรือเป็นแผ่นเส้นใยทอ (Woven fabrics) สำหรับคอมโพสิตเทอร์โมเซตวิธีการผลิตพื้นฐานคือการขึ้นรูปด้วยมือ "Hand-layup" ซึ่งความสม่ำเสมอของคอมโพสิตในแง่ของความหนา, อัตราส่วนของเส้นใยต่อเมทริกซ์และความพรุนจะขึ้นอยู่กับทักษะฝีมือของผู้ปฏิบัติงาน ตรงข้ามกับวิธีการขึ้นรูปโดยอาศัยการทำสุญญากาศเพื่อช่วยให้เรซินไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ หรือที่เรียกว่า Vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) โดยเรซินจะถูกดึงเข้าสู่แม่พิมพ์ภายใต้ความดันสุญญากาศเข้าไปผสมกับเส้นใยเสริมแรงในแม่พิมพ์ ทำให้เรซินสามารถกระจายตัวเข้ากับเส้นใยได้ดีภายในแม่พิมพ์ ทำให้ได้คอมโพสิตที่มีคุณภาพดีและมีความพรุนที่ต่ำกว่าวิธีการขึ้นรูปด้วยมือ

ส่วนเทคนิคอื่นที่นำมาใช้กับทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกเมทริกซ์ เป็นวิธีที่เรียกว่าพัลทรูชัน (Pultrusion) โดยทำการดึงเส้นใยออกจากม้วนผ่านแผ่นนำทาง (Guide plate) แล้วนำเข้าสู่อ่างที่มีพอลิเมอร์เหลวอยู่พอลิเมอร์เหลวจะเคลือบเส้นใย จากนั้นจะถูกอบให้แข็งตัว (Curing) ส่วนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) และการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) เป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตคอมโพสิตสำหรับเทอร์โมพลาสติกเมทริกซ์ โดยการอัดขึ้นรูปส่วนเสริมแรงจะถูกผสมเข้ากับเมทริกซ์และถูกกดอัดด้วยแผ่นร้อน (Hot plate) ส่วนการฉีดขึ้นรูปเส้นใยและเรซินจะถูกผสมเข้าด้วยกันในเครื่องจักรและให้ความร้อนจนละลายเป็นของไหล จากนั้นจึงฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันสูงซึ่งในกระบวนการอัดและฉีดขึ้นรูปต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูง (มากกว่า 200 °C / 5Mpa) [23]

### 3. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอมโพสิต

#### 3.1 โครงสร้างของพืชเส้นใย

โครงสร้างเซลล์ของเส้นใยมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดตลอดทั้งบริเวณผลึก (Crystallite) และบริเวณอสัณฐาน (Amorphous) พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล (Intra-molecular) ทำให้เกิดการแทรกแซงด้วยเคมีอื่นๆ ได้ยากการมีอยู่ของหมู่ไฮโดรฟิลิกไฮดรอกซิล (Hydrophilic hydroxyl groups) จะรวมตัวกันกับโมเลกุลของน้ำ (Water molecules) จากบรรยากาศเฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน, เพกทิน และแว็กซ์ เป็นสสารที่ปกปิดทำหน้าที่ยึดเกาะโมเลกุลของน้ำซึ่งทำให้เส้นใยมีคุณลักษณะความเป็นขั้ว (Polar) และชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นผลทำให้เข้ากันได้ไม่ดีกับเมทริกซ์ซึ่งมีคุณลักษณะไม่มีขั้ว (Non-polar) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) [24, 13, 17] เพื่อให้โครงสร้างผลึกสามารถขยายขอบเขตออกไปได้จำเป็นต้องมีการกำจัดหมู่ไฮโดรฟิลิกไฮดรอกซิลและสิ่งสกปรกต่างๆ (แว็กซ์) ที่เกาะติดอยู่บริเวณผิวของเส้นใยธรรมชาติโดยใช้วิธีการทางเคมี อาทิเช่นเมอร์เซอร์ไรเซชัน (Mercerization), อะซิทิเลชัน (Acetylation), เบนโซอิลเลชัน (Benzoylation), เปอร์ออกไซด์ (Peroxide), และอื่นๆ

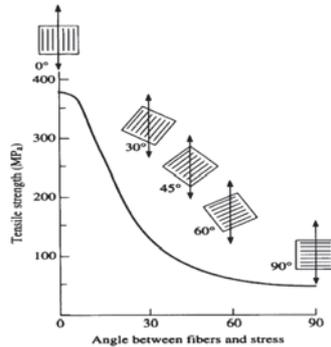
#### 3.2 เสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใย

โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติเริ่มเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยลิกนินเริ่มเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 200°C ในขณะที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูงมากกว่านั้น [21] การยกระดับเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยสามารถทำได้โดยการกำจัดเอาบางส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออก การเสื่อมสภาพของเส้นใยธรรมชาติเป็นปัญหาสำคัญต่อการพัฒนาคอมโพสิตทั้งในด้านการผลิต (Curing, Extrusion หรือ Injection moulding) และการนำคอมโพสิตไปใช้ประโยชน์ในด้านวัสดุ [25, 26]

#### 3.3 ความยาวเส้นใย, ปริมาณ และทิศทางการวางตัว

คุณสมบัติทางกลของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นความยาวเส้นใย, ปริมาณและทิศทางการวางตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเมทริกซ์จะถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยในลักษณะของความเค้นเฉือนที่อินเตอร์เฟซ เมื่อพิจารณาถึงทิศทางการวางตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ทำให้สามารถจำแนกคอมโพสิตออกได้เป็นสามประเภทใหญ่ๆ ด้วยกันประเภทที่หนึ่ง เส้นใยวางตัวตามแนวยาวในเมทริกซ์ให้ความแข็งแรงดึงสูง (Higher

tensile strength) แต่ความแข็งแรงอัดต่ำ (Lower compressive strength), ประเภทที่สองเส้นใยวางตัวตามแนวขวางกับเมทริกซ์ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำมาก โดยรูปที่ 6 แสดงความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตเมื่อเส้นใยวางตัวในทิศทางต่างๆ [27] และสุดท้ายประเภทที่สามเส้นใยถูกตัดให้มีขนาดสั้นๆ มีลักษณะทิศทางการวางตัวแบบสุ่มซึ่งจะให้คุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน โดยการควบคุมอัตราส่วนรูปร่าง (Aspect ratio), การกระจายตัว (Dispersion), และทิศทางการวางตัว (Orientation) สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอมโพสิตได้ [11, 17, 21]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตและทิศทางวางตัวของเส้นใย [27]

### 3.4 ความพรุน

ในระหว่างการทำเส้นใยเพื่อเสริมแรงให้กับเมทริกซ์อาจมีอากาศหรือสารระเหยอื่นๆ ปะปนเข้าไปและติดอยู่ภายในคอมโพสิตจากนั้นเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งแล้วจะทำให้เกิดช่องว่างหรือเป็นโพรงอากาศเล็กๆ (Micro-voids) ทำให้เกิดรูพรุนเป็นจำนวนมากและเป็นสาเหตุทำให้คอมโพสิตที่ผลิตได้ มีคุณภาพและคุณสมบัติทางกลไม่เป็นไปตามที่ต้องการ อีกทั้งการอบแห้งและอัตราการเย็นตัว (Colling rate) ของคอมโพสิตก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความพรุนของคอมโพสิต [21] คอมโพสิตที่มีค่าความพรุนสูง (High void content) ซึ่งหากมากเกินไปกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะส่งผลทำให้ความต้านทานความล้าต่ำลง (Lower fatigue resistance), การแพร่กระจาย (Diffusion) และการดูดซึม (Absorption) น้ำสูงขึ้นและทำให้คุณสมบัติทางกลมีความกว้างตัวเพิ่มมากขึ้น [28, 29] โดยคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยสูงกว่า (Higher fiber content) มีโอกาสและความเสี่ยงที่จะเกิดความพรุนได้มากกว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยต่ำกว่า (Lower fiber content)

### 3.5 การดูดความชื้นของเส้นใย

เส้นใยที่มีโครงสร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเซลลูโลสหรือเส้นใยลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic fiber) มีคุณลักษณะชอบน้ำและดูดซับความชื้น (Absorb moisture) โดยมีพันธะไฮโดรเจนจำนวนมาก (หมู่ไฮดรอกซิล: Hydroxyl groups -OH) อยู่ระหว่างโมเลกุล (Macromolecules) ภายในผนังเซลล์เส้นใย เมื่อความชื้นในอากาศสัมผัสกับเส้นใยพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายและหมู่ไฮดรอกซิลจะฟอร์มตัวพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่กับโมเลกุลของน้ำ การปฏิสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยที่ชอบน้ำ (Hydrophilic fiber) และเมทริกซ์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic matrix) ทำให้เส้นใยบวม ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่าง, การ

แตกตัวของเมทริกซ์, และคุณสมบัติทางกลที่แย่งของคอมโพสิต [30] ดังนั้นการกำจัดความชื้นออกจากเส้นใยจึงเป็นขั้นตอนสำคัญ ซึ่งอาจใช้การตากแห้งหรืออบด้วยความร้อน [31] การดูดซับความชื้นของเส้นใยสามารถทำให้ลดลงได้โดยการกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลที่ขอบน้าออกจากโครงสร้างเส้นใยโดยใช้วิธีการดัดแปลงทางเคมีต่างๆ [32]

#### 4. การดัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ

อินเตอร์เฟซระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เป็น โชนของการแพร่กระจายหรือ โชนปฏิกิริยาที่สารสองสถานะ (Two phases) รวมตัวกันทางเคมีและ/หรือทางกล การยึดติดระหว่างอินเตอร์เฟซมีผลต่อคุณลักษณะสมบัติทางกลของคอมโพสิตซึ่งหากมีการยึดเกาะกันไม่ดีทำให้คอมโพสิตที่ได้มีคุณสมบัติทางกลที่แย่ [32] สำหรับคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากความชอบน้ำซึ่งเป็นธรรมชาติของหมู่ไฮดรอกซิลเป็นอุปสรรคต่อการเกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ นอกจากนี้เพกทินและแว็กซ์ยังครอบคลุมการทำงานของหมู่ฟังก์ชันปฏิกิริยา (Reactive functional groups) และเป็นอุปสรรคต่อการเชื่อมต่อกันกับเมทริกซ์ เพื่อเพิ่มการยึดเกาะของพันธะที่ผิวสัมผัสจำเป็นต้องมีการดัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยด้วยวิธีการทางกลที่เปลี่ยนแปลงสมบัติพื้นผิว, วิธีการทางเคมีที่เพิ่มหมู่ปฏิกิริยา, สารเติมแต่งปฏิกิริยา (Reactive additives), และสารช่วยประสานคู่ควบ (Coupling agents) ล้วนแต่มีส่วนช่วยสนับสนุนการเชื่อมต่อกับเมทริกซ์ทำให้คุณสมบัติทางกลของคอมโพสิตดีขึ้น [33]

##### 4.1 การดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยด้วยวิธีการทางกล (Physical methods)

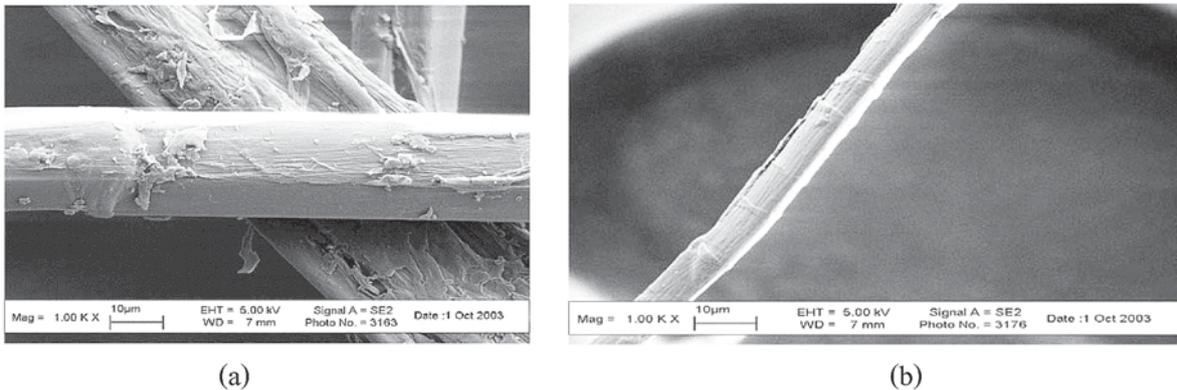
วิธีการดัดแปลงพื้นผิวทางกลนี้รวมถึง การรีด การผ่านกระบวนการทางความร้อน (Thermal treatment) ซึ่งวิธีการดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยทางกลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติพื้นผิวของเส้นใย และมีอิทธิพลต่อการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ ซึ่งวิธีการทางกลนั้น ไม่ได้เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเส้นใยแต่อย่างใด โดยวิธีการดัดแปลงพื้นผิวทางกลจะช่วยทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ดีขึ้น วิธีการดัดแปลงเส้นใยทางกลมีหลายวิธีได้แก่

##### 4.1.1 การปรับสภาพผิวด้วยโคโรนา (Corona treatment)

โคโรนาทริทเมนต์เป็นวิธีการดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยทางกลโดยพลาสมาโคโรนาถูกสร้างขึ้นจากการจ่ายไฟฟ้าศักย์สูงให้แก่อิเล็กโทรดปลายแหลม (Tips) การประยุกต์โคโรนาลงไปบนพื้นผิวของเส้นใยที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วช่วยปรับปรุงคุณสมบัติความชอบน้ำตามธรรมชาติของเส้นใย การปรับปรุงสมบัติทางกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับอีพ็อกซีโดยการทำโคโรนาบนเส้นใยปอกระเจา (Jute fibers) ช่วยทำให้สมบัติทางกลของคอมโพสิตดีขึ้น [34] นอกจากนี้โคโรนาช่วยทำให้ความแข็งแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยกัญชง (Hemp fibers) กับพอลิพรอพิลีนเพิ่มขึ้นทำให้มอดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 [35]

#### 4.1.2 การปรับสภาพผิวด้วยพลาสมา (Plasma treatment)

พลาสมาทรีทเมนต์เป็นวิธีการดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยทางกลที่คล้ายกับโคโรนาทรีทเมนต์ทำได้โดยการสร้างประจุขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุ การดัดแปลงพื้นผิวของวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของแก๊สที่ใช้, อนุภาคมูลอิสระที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive free radical), และหมู่ฟังก์ชันซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้โดยที่พลังงานพื้นผิวสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามพื้นผิว (Surface cross-linking) ขึ้นโดยคอมโพสิทระหว่างพอลิเอสเทอร์กับเส้นใยป่านลินิน (Flax fibers) ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวด้วยฮีเลียมโคลด์พลาสมา (Helium cold plasma) เส้นใยจะมีลักษณะพื้นผิวที่สะอาดดังรูปที่ 7 ช่วยทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางกลคือความแข็งแรงดึงของชิ้นงานดีขึ้น [36] นอกจากนี้การเตรียมคอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์ (Sisal fibers) กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) จะทำให้สมบัติทางกลของคอมโพสิทดีขึ้นเมื่อได้ทำการดัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยด้วยเทคนิคพลาสมาทรีทเมนต์ [37]



รูปที่ 7 Scanning electron micrograph ของเส้นใยป่านลินิน (a) untreated; (b) treated plasma [36]

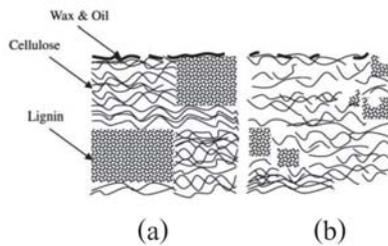
#### 4.2 การดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical methods)

การทำเคมีคัลทรีทเมนต์ (Chemical treatment) สามารถลดระดับความชอบน้ำของเส้นใยลงและช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ [38, 39] โดยมีการศึกษาการทำเคมีคัลทรีทเมนต์ด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้

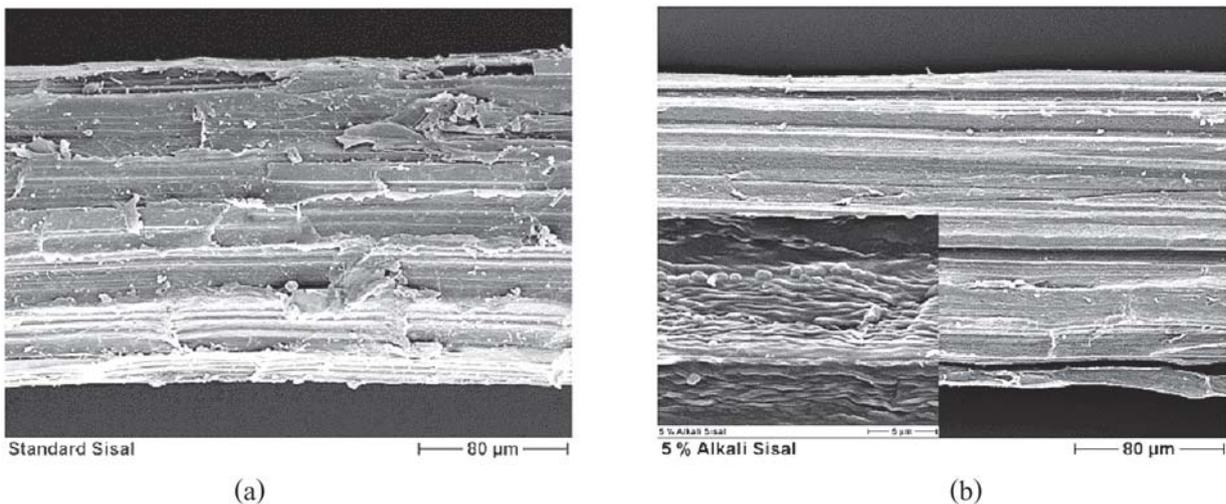
##### 4.2.1 การปรับสภาพผิวด้วยอัลคาไลน์ (Alkaline treatment)

อัลคาไลน์ทรีทเมนต์หรือเมอร์เซอร์ไรเซชัน (Mercerization) เป็นการดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารอัลคาไลน์ที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) หรือโซดาไฟ (NaOH) ซึ่งสารอัลคาไลน์จะเปลี่ยนแปลงและทำลายการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกเซลลูโลสลงทำให้ง่ายต่อการแทรกซึมทางเคมีอีกทั้งทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างโครงข่าย (Network structure) ทำให้ความหยาบของพื้นผิวเพิ่มขึ้น ในบริเวณออสซิลเลชันเซลลูโลสไมโครโมเลกุลจะถูกแยกออกจากกันและช่องว่างนั้นจะถูกเติมเต็มด้วยโมเลกุลของน้ำ หมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่ไวต่อปฏิกิริยาในโมเลกุลของสารอัลคาไลน์จะแตกตัวออก จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ (H-OH) และหลุดออกจากเส้นใย โดยโมเลกุลที่เหลืออยู่จะก่อตัวเป็นหมู่เซลล์เส้นใย

O-Na (Fiber-cell-O-Na groups) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส [16] เป็นผลทำให้หมู่ไฮโดรฟิลิกไฮดรอกซิลลดลง อีกทั้งยังช่วยกำจัดบางส่วนของเฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน, เพกทิน, แวกซ์, และน้ำมันบนผิวเส้นใย [40-42] นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวประสิทธิผลของเส้นใย [21] แต่หากความเข้มข้นของอัลคาไลน์มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสมจนทำให้เกิดการกัดเซาะโครงสร้างที่มากเกินไป เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายให้กับเส้นใยและทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง [32, 40, 43] สมการที่ (1) [15] แสดงปฏิกิริยาทางเคมีของเซลล์เส้นใยและ NaOH ส่วนรูปที่ 8 แสดงแผนผังจำลองของโครงสร้างเส้นใยเซลลูโลสก่อนและหลังจากการปรับสภาพผิวด้วยอัลคาไลน์ เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิว จะมีปริมาณลิกนินที่ต่ำลงบางส่วนของแวกซ์และน้ำมันหายไป รูปที่ 9 แสดงภาพ Scanning electron micrograph ของพื้นผิวเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวเปรียบเทียบกับการทำอัลคาไลน์ที่ริทเมนต์ ที่ความเข้มข้น 5% (wt.%) ตารางที่ 4 เป็นการสรุปผลงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของการปรับสภาพผิวด้วยอัลคาไลน์ ที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิต



รูปที่ 8 แผนผังจำลองของโครงสร้างเส้นใยเซลลูโลส; (a) Untreated; (b) Alkalinized cellulose fiber [13]



รูปที่ 9 Scanning electron micrograph ของเส้นใยป่านศรนารายณ์; (a) Untreated; (b) 5% Alkali [50]

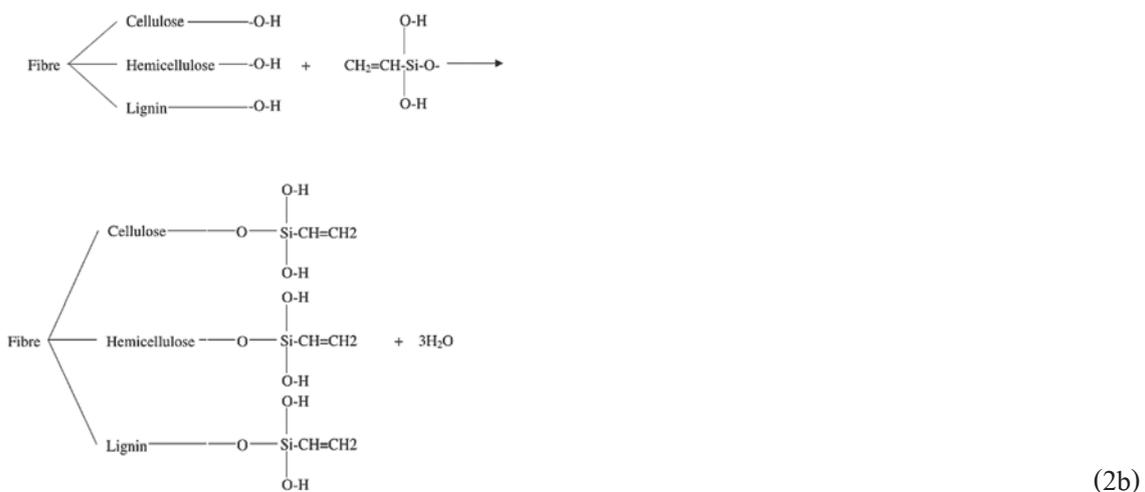
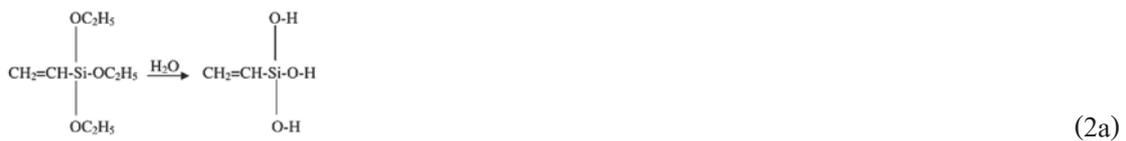
ตารางที่ 4 งานวิจัยเกี่ยวกับการทำอัลคาไลน์ทรียทเมนท์ให้กับเส้นใยเสริมแรงของคอมโพสิต [15:ปรับปรุงโดยผู้เรียบเรียง]

คอมโพสิต เส้นใย-เมทริกซ์	วิธีการปรับสภาพผิว	ผลลัพธ์ที่มีต่อสมบัติทางกลและทางความร้อน	ปี	อ้างอิง
Sponge gourd-polyester	2% NaOH for 10, 60, 90 min	การทำอัลคาไลน์ทรียทเมนท์ 90 นาที ให้คุณสมบัติความแข็งแรงดึงที่ดีที่สุด	2014	[44]
Coir-polypropylene	5% NaOH for 1 h	ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 39 เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่เส้นใยไม่ได้ผ่านการทำอัลคาไลน์ทรียทเมนท์	2014	[45]
Sisal-polyester	2%, 6%, 10% NaOH	การทำอัลคาไลน์ทรียทเมนท์ที่ความเข้มข้น 10% (wt.%) เป็นเวลา 2 และ 5 ชม. ให้คุณสมบัติความแข็งแรงดึงมากที่สุด	2014	[46]
Flax-epoxy	Alkali treatment	ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น ร้อยละ 30 ด้วยการกำจัดเพกทินออก	2007	[40]
Sisal-polyester	0.5%, 1%, 2%, 4%, 10% NaOH treatment at room temperature	การทำอัลคาไลน์ทรียทเมนท์ ที่ความเข้มข้น 4% (wt.%) ให้คุณสมบัติความแข็งแรงดึงมากที่สุด	2007	[40]
Hemp non-woven mat with euphorbia resin	0.16% NaOH for 48 h	ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น ร้อยละ 30 และคุณสมบัติความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่เส้นใยไม่ได้ผ่านการทำอัลคาไลน์ทรียทเมนท์	2007	[41]
Hemp fiber	8% NaOH treatment	เสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น ร้อยละ 4	2005	[47]
Sisal-polycaprolactone composite	10% NaOH for 1, 3, 24 and 48 h	มอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	2004	[48]
Jute-vinylester	5% NaOH for 4, 6 and 8 h	การทำอัลคาไลน์ทรียทเมนท์ 4 ชม. ทำให้คอมโพสิตมีคุณสมบัติความแข็งแรงดัด (Flexural strength) และความแข็งแรงเฉือนในชั้นลามินาร์ (Interlaminar shear strength) เพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ 20 และ 19	2001	[42]
Coir-polyester	5% NaOH treatment for 72 h	ความแข็งแรงดัดและความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เพิ่มขึ้น ร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่เส้นใยไม่ได้ผ่านการทำอัลคาไลน์ทรียทเมนท์	1983	[49]

#### 4.2.2 การปรับสภาพผิวด้วยไซเลน (Silane treatment)

ไซเลนเป็นโมเลกุลฟังก์ชัน โมเลกุล (Multifunctional molecule) ซึ่งถูกใช้เป็นสารคู่ควบ (Coupling agent) ในการดัดแปลงพื้นผิวเส้นใย โดยไซเลนจะเข้าไปปรับสภาพความชอบน้ำที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ไซเลนจะก่อตัวเป็นรูปแบบการเชื่อมโยงทางเคมีผ่านสะพานไซลอกเซน (Siloxane bridge) โดยผ่านหลายขั้นตอนประกอบด้วย การย่อยสลาย (Hydrolysis), การรวมตัว (Condensation), และการสร้างพันธะ (Bond formation) ในระหว่างกระบวนการปรับสภาพผิวเส้นใยหมู่ไซลานอล (Silanol) จะฟอร์มตัวขึ้นจากความชื้นที่มีอยู่ภายในและหมู่อัลคอกซีที่สามารถแยกออกเป็น โโมเลกุลเล็กๆ (Hydrolysable alkoxy groups) (Hydrolysis, ดูสมการที่ (2a) [51]) ในระหว่างกระบวนการรวมตัวหรือคอนเดนเซชัน (Condensation process) ปลายด้านหนึ่งของไซลานอล จะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (Cellulose hydroxyl group: Si-O-cellulose, ดูสมการที่ (2b) [51]) และส่วนที่เหลือจะทำปฏิกิริยาโดยสร้างพันธะ (Bond formation) กับหมู่ฟังก์ชันของเมทริกซ์ (Si-Matrix) ซึ่งปฏิกิริยาร่วม (Co-reactivity) เหล่านี้ช่วยให้เกิดโมเลกุลที่เชื่อมโยกันตลอดแนวอินเทอร์เฟซของคอมโพสิต อีกทั้งยังทำให้เกิดสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon chain) ซึ่งช่วยยับยั้งการบวมตัวของเส้นใย

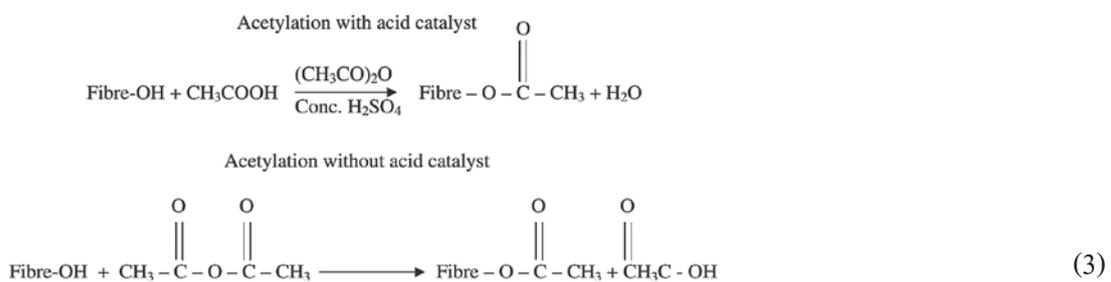
(Fiber swelling) [32, 52] เป็นผลทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ดีขึ้นและทำให้คุณสมบัติของคอมโพสิตมีความสม่ำเสมอขึ้น [40] เส้นใยธรรมชาติโดยปกติจะมีรูพรุนเล็กๆ จำนวนมากที่ผิวของตัวมัน โดยสารเคลือบไซเลนจะทำหน้าที่เคลือบพื้นผิวซึ่งจะแทรกซึมเข้าสู่รูพรุนและพัฒนากลไกการเคลือบประสานลงบนพื้นผิวของเส้นใย โดยเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยไซเลน เมื่อนำมาผลิตเป็นคอมโพสิตจะให้คุณสมบัติความแข็งแรงดึงที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ใช้การปรับสภาพด้วยอัลคาไลน์ [53] Seki [54] ศึกษาทดลองผลกระทบของการปรับสภาพผิวด้วยอัลคาไลน์ (5% NaOH for 2 h) และไซเลน (1% oligomeric siloxane with 96% alcohol solution for 1 h) ที่มีต่อคุณสมบัติการคัดของวัสดุคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอ/อีพ็อกซีและเส้นใยปอ/พอลิเอสเทอร์ พบว่าสำหรับคอมโพสิตเส้นใยปอ/อีพ็อกซีการปรับสภาพด้วยไซเลนให้ผลดีกว่าอัลคาไลน์ โดยให้สมบัติความแข็งแรงและมอดูลัสที่เหนือกว่าการปรับสภาพด้วยอัลคาไลน์คิดเป็นร้อยละ 12 และ 7 ในขณะที่คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอ/พอลิเอสเทอร์ก็จะให้ผลในทำนองเดียวกัน โดยการปรับสภาพด้วยไซเลนให้ผลที่เหนือกว่าคิดเป็นร้อยละ 20 และ 8 เมื่อเทียบกับการปรับสภาพด้วยอัลคาไลน์ Sever และคณะ [55] ทำการทดลองการปรับสภาพด้วยไซเลน ( $\gamma$ -Methacryloxy-propyl-trimethoxy-silane) ของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอ/พอลิเอสเทอร์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ (0.1%, 0.3% และ 0.5%) โดยทดสอบคุณสมบัติความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงคัด, และความแข็งแรงเฉือนระหว่างชั้นลามินาร์เปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่เส้นใยปอไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ โดยผลที่ได้พบว่าการปรับสภาพผิวเส้นใยปอด้วย 0.3% ไซเลนจะทำให้คอมโพสิตที่ได้มีความแข็งแรงดึง, ความแข็งแรงคัด, และความแข็งแรงเฉือนระหว่างชั้นลามินาร์เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 40, 30 และ 55 ตามลำดับ



#### 4.2.3 การปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการอะซิทิเลชัน (Acetylation treatment)

อะซิทิเลชันทรีทเมนต์อาศัยการเติมหมู่ฟังก์ชันของอะซิทิล (Acetyl group) ลงไปในสารประกอบอินทรีย์ เพื่อทำให้ความชอบน้ำของเส้นใยธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยหมู่อะซิทิล ( $\text{CH}_3\text{CO}$ ) จะทำปฏิกิริยากับหมู่

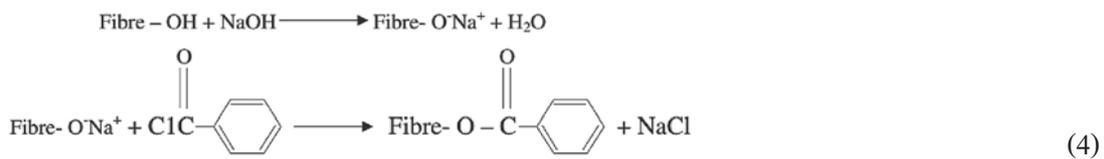
ไฮดรอกซิล (OH) ของเส้นใยและดึงความชื้นออกไป ทำให้คอมโพสิตที่ได้มีเสถียรภาพทางด้านมิติ และรูปร่างเพิ่มขึ้น [56] นอกจากนี้ อะซิทธิลเลชันทรีทเมนต์ยังช่วยทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีความหยาบและความพรุนตัวน้อย [57, 40] เส้นใยจะถูกนำมาปรับสภาพตามกระบวนการอะซิทธิลเลชันด้วยการใช้หรือไม่ใช้กรดเป็นตัวเร่ง (Acid catalyst) เพื่อต่อเติมหรือปลูกถ่ายที่เรียกว่าการกราฟต์ (Graft) หมู่อะซิทธิลลงไปในเส้นใย ซึ่งโดยปกติแล้ว กรดอะซิทธิล (Acetic acid) และอะซิทธิลแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) หากเลือกใช้เพียงตัวใดตัวหนึ่ง จะไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับเส้นใยได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นเริ่มต้นเส้นใยจะถูกจุ่มแช่ในกรดอะซิทธิลแล้วจึงตามด้วยอะซิทธิลแอนไฮไดรด์ 1-3 ชั่วโมงในระดับอุณหภูมิที่สูงกว่า โดยปฏิกิริยาอะซิทธิลเลชัน (Acetylation reaction) บนเส้นใยที่มีและไม่มีกรดเป็นตัวเร่งแสดงใน สมการที่ (3) [58] Rowell และคณะ [59] ศึกษาการทำอะซิทธิลแอนไฮไดรด์ทรีทเมนต์ (Acetic anhydride treatment) กับเส้นใยธรรมชาติชนิดต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) โดยพบว่าเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการทำอะซิทธิลแอนไฮไดรด์ทรีทเมนต์จะมีสมบัติความต้านทานความชื้นเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกกำจัดออกไป Mishra และคณะ [60] ศึกษาการทำอะซิทธิลแอนไฮไดรด์ทรีทเมนต์ด้วยกรดกลacial อะซิทธิล (Glacial acetic acid) หรือกรดน้ำส้มและกรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid) หรือกรดกำมะถันบนเส้นใยป่านสนรายณ์ที่ผ่านการทรีทเมนต์ขั้นต้น หรือพรี-ทรีทเมนต์มาแล้วด้วยสารอัลคาไลน์ (Pre-treated ด้วย 5% และ 10% NaOH ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดแว็กซ์ออก) พบว่าทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ดีขึ้น Bledzki และคณะ [61] ศึกษาการทำอะซิทธิลเลชันทรีทเมนต์ด้วยความเข้มข้นต่างๆ บนเส้นใยป่านลินินพบว่าทำให้สมบัติทางความร้อนเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 50 นอกจากนี้เมื่อนำเส้นใยป่านลินินที่ผ่านการทำ 18% อะซิทธิลเลชันทรีทเมนต์มาผลิตคอมโพสิตโดยใช้ พอลิพรอพิลีนเป็นเมทริกซ์จะทำให้สมบัติการดึงและสมบัติการดัดงอเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 25



#### 4.2.4 การปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการเบนโซอิลเลชัน (Benzoylation treatment)

เบนโซอิลเลชันทรีทเมนต์จะใช้เบนโซอิลคลอไรด์ (Benzoyl chloride) เพื่อลดความชอบน้ำของเส้นใยลง และเพิ่มการยึดเกาะให้กับเส้นใย ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงและเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น [40, 62] ในการทำเบนโซอิลเลชันทรีทเมนต์เส้นใยจะผ่านการพรี-ทรีทเมนต์ด้วยสารอัลคาไลน์มาก่อนซึ่งในขั้นตอนนี้ ลิกนิน, แวกซ์, และไขมันบนเส้นใยจะถูกกำจัดออกไปและหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive

hydroxyl (OH) groups) จะถูกแตกออกลงพื้นผิวของเส้นใยมากขึ้น จากนั้นเส้นใยจะถูกปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์หมู่ OH ของเส้นใยจะถูกแทนที่โดยหมู่เบนโซอิลและยึดติดกับแกนเซลลูโลส ซึ่งเป็นผลทำให้เส้นใยมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นและเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกับเมทริกซ์ Joseph และคณะ [63] ได้แสดงให้เห็นว่าการทรีทเมนต์ด้วยเบนโซอิลคลอไรด์บนเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารอัลคาไลน์จะทำให้คอมโพสิตที่ได้มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่เส้นใยไม่ได้ผ่านการทรีทเมนต์ ต่อมา Wang และคณะ [32] ได้ใช้การทรีทเมนต์ในลักษณะเดียวกันบนเส้นใยป่านลินินเสริมแรงในคอมโพสิตที่มีพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นเมทริกซ์ (Low density polyethylene) ผลที่ได้พบว่าคอมโพสิตจะให้ค่าความแข็งแรงดึงและสมบัติความต้านทานความชื้นที่สูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 6 และ 33 ตามลำดับ ปฏิกริยาระหว่างหมู่เซลลูโลส -OH ของเส้นใยกับเบนโซอิลคลอไรด์แสดงดัง สมการที่ (4) [15]



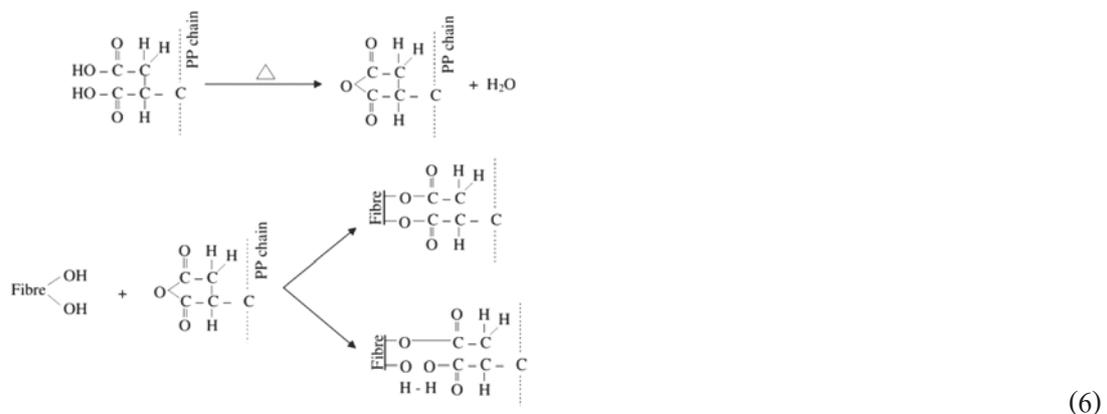
#### 4.2.5 การปรับสภาพผิวด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide treatment)

การทำเปอร์ออกไซด์ทรีทเมนต์ทำให้เกิดการกราฟต์ของพอลิเอทิลีนลงบนพื้นผิวเส้นใย นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยและเมทริกซ์เพิ่มการยึดเกาะตลอดแนวอินเตอร์เฟซ อีกทั้งยังช่วยลดการดูดซึมความชื้นและทำให้เส้นใยมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น [32, 64] โดย Sapieha และคณะ [65] รายงานว่าการพรี-ทรีทเมนต์ (Pre-treatment) ให้กับเส้นใยด้วยเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) หรือไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) จะทำให้คอมโพสิตมีคุณสมบัติทางกลที่สูงกว่า โดยเริ่มจากการพรี-ทรีทเมนต์เส้นใยด้วยสารอัลคาไลน์จากนั้นจึงทำการเคลือบเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์หรือไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (ที่ความเข้มข้นประมาณ 6%) ในสารละลายอะซิโตน (Acetone solution) เป็นเวลา 30 นาที โดยมีการให้ความร้อนกับสารละลายเพื่อทำให้เปอร์ออกไซด์แตกตัวอย่างสมบูรณ์ [40, 64] Joseph และคณะ [63] ศึกษาเกี่ยวกับความเข้มข้นที่เหมาะสมของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (6%) หรือไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (4%) สำหรับการปรับสภาพของเส้นใยป่านศรนารายณ์ชนิดแบบตัดสั้นในคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิเอทิลีน พบว่าคอมโพสิตที่ได้มีสมบัติความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยปฏิกริยาระหว่างหมู่เซลลูโลส -OH ของเส้นใยและการแตกองค์ประกอบของเปอร์ออกไซด์แสดงดัง สมการที่ 5 [15]



#### 4.2.6 การปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควมมาเลอเทด (Maleated coupling agents)

การดัดแปลงเส้นใยด้วยสารคู่ควมมาเลอเทดนี้จะแตกต่างจากวิธีอื่นๆ คือมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) จะเข้าไปทำปฏิกิริยาทั้งที่ผิวเส้นใยและผิวเมทริกซ์พอลิเมอร์ในระหว่างการกราฟต์ติ้ง (Grafting) มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในบริเวณออสันฐานและกำจัดหมู่ OH ออกจากเซลล์เส้นใยและลดความชอบน้ำของเส้นใยลง สารคู่ควมมาเลอเทดจะฟอร์มพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (Carbon-carbon) กับสายโซ่พอลิเมอร์ในเมทริกซ์ [52] พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยและหมู่แอนไฮไดรด์ (Anhydride groups) ที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้ให้เส้นใยและเมทริกซ์สามารถเชื่อมประสานกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ [66] กลไกการเกิดปฏิกิริยาของมาเลอิกแอนไฮไดรด์, พอลิพรอพิลีน (MAPP), และเส้นใยแสดงดังสมการที่ (6) [15] พอลิเมอร์ร่วมหรือ MAPP โคพอลิเมอร์ (MAPP copolymer) จะถูกกระตุ้นที่ระดับอุณหภูมิ 1700 °C ซึ่งการทรีทเมนต์ทำให้ความสามารถในการเปียก (Wettability) ของเส้นใยดีกว่าและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ [40, 66] Mishra และคณะ [67] ศึกษาการปรับสภาพผิวเส้นใยกล้วย (Banana fiber), เส้นใยกล้วยง, และเส้นใยป่านศรนารายณ์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เสริมแรงให้กับโนโวแลกเรซิน (Novolac resin) เมทริกซ์ พบว่าคอมโพสิตให้ค่าสมบัติทางกลเช่น โมดูลัสของแข็ง, โมดูลัสดัดงอ (Flexural modulus), ความแข็ง (Hardness), และความแข็งแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น Mohanty และคณะ [68] ศึกษาการดัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจา (ปริมาณเส้นใย 30%, ความยาว 6 มม.) ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์, พอลิพรอพิลีน (MAPP) ความเข้มข้น 0.5% ในโทลูอีน (Toluene) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อเสริมแรงในพอลิพรอพิลีน (PP) เมทริกซ์โดยคอมโพสิตมีสมบัติความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 72 อีกทั้งคอมโพสิตที่เส้นใยผ่านการปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควมมาเลอเทดมีแนวโน้มในการดูดซึมน้ำลดลง Mohanty และคณะ [69] ศึกษาในลักษณะเดียวกับข้างต้นโดยใช้ 1% MAPP ทรีทเมนต์เส้นใยป่านศรนารายณ์เสริมแรงใน PP เมทริกซ์ ซึ่งพบว่าคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และ PP จะมีสมบัติความแข็งแรงดัด, ความแข็งแรงดัด, และความแข็งแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 50, 30 และ 58 ตามลำดับ



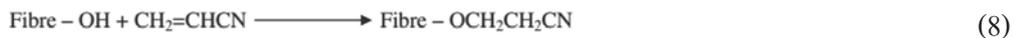
#### 4.2.7 การปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมคลอไรท์ (Sodium chlorite treatment)

โซเดียมคลอไรท์ ( $\text{NaClO}_2$ ) ถูกใช้สำหรับการฟอก (Bleaching) เส้นใยในสารละลายกรดโดย  $\text{NaClO}_2$  จะถูกปรับสภาพความเป็นกรดและปลดปล่อยกรดคลอรัส ( $\text{HClO}_2$ : Chlorous acid) ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และฟอร์มตัวเป็นคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide:  $\text{ClO}_2$ ) ซึ่ง  $\text{ClO}_2$  จะช่วยกำจัดลิกนินออกจากเส้นใย อีกทั้งยังทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลิกไฮดรอกซิลของเฮมิเซลลูโลส [70] ทำให้ความชื้นถูกกำจัดออกและเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับเส้นใย หลังจากการกำจัดลิกนิน (Delignification) เส้นใยจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้น (More flexible) และมีสมบัติความแข็งแรงดิ่งต่ำลง [40] Li และคณะ [71] ศึกษาผลกระทบของการทำโซเดียมคลอไรท์ทรีทเมนต์ (Sodium chlorite treatment, ด้วยอัตราส่วนโซเดียมคลอไรท์ : น้ำ เป็น 1 : 25, ที่  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชม.) บนเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการปรับสภาพผิวเบื้องต้นด้วยสารอัลคาไลน์ (5% NaOH, 1 ชม.) พบว่าทำให้สมบัติความแข็งแรงดิ่งเพิ่มขึ้นและมีอัตราการดูดซับความชื้นลดลง โดย Mishra และคณะ [72] ก็ได้รายงานผลลัพธ์ที่ได้ในลักษณะเดียวกันเมื่อนำเส้นใยป่านสรนารายณ์ที่ผ่านการทรีทเมนต์ด้วยวิธีดังกล่าวมาเสริมแรงให้กับคอมโพสิตที่มีพอลิเอสเทอร์แบบย่อยสลายได้ (Polyester biocomposites) เป็นเมทริกซ์

#### 4.2.8 การปรับสภาพผิวด้วยอะคริเลชันและอะคริโลไนไตรล์ กราฟต์ติ้ง (Acrylation and acrylonitrile grafting)

กรดอะคริลิก (Acrylic acid:  $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ ) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ (พอลิพรอพิลีน : PP)  $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$  จะทำปฏิกิริยากับหมู่เซลลูโลสไฮดรอกซิล (Cellulosic hydroxyl groups) ของเส้นใยและทำให้อนุมูลอิสระของเซลลูโลสสามารถเข้าถึงตัวกลางพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization medium) ได้มากขึ้น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids) จากสารคู่ควบทำให้เกิดการเชื่อมโยงเอสเทอร์ (Ester linkages) กับหมู่เซลลูโลสไฮดรอกซิล (Cellulose hydroxyl groups) ซึ่งเป็นการลดหมู่ไฮดรอกซิลิกไฮดรอกซิลของเส้นใย และเพิ่มสมบัติในการต้านทานความชื้น การกราฟต์ติ้งด้วยกรดอะคริลิกลงบนเมทริกซ์จะเริ่มต้นโดยอนุมูลอิสระ เปอร์ออกไซด์ (Peroxide radicals) ซึ่งเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดพันธะออกซิเจน-ออกซิเจน (Oxygen-oxygen) เพื่อที่จะดึงไฮโดรเจนอะตอม (Hydrogen atoms) จากคาร์บอนลำดับที่สาม (Tertiary carbon) ของสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain) กลไกคู่ควบระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์โดยกรดอะคริลิกช่วยเพิ่มการส่งผ่านความเค้นที่อินเตอร์เฟซ ทำให้คุณสมบัติของคอมโพสิตดีขึ้น [40, 73, 74] กระบวนการทรีทเมนต์เริ่มจากเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นมาแล้วด้วยสารอัลคาไลน์จากนั้นจุ่มแช่ในกรดอะคริลิกที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันเป็นเวลา 1 ชม. แล้วล้างออกด้วยสารละลายแอลกอฮอล์ (Alcohol) และอบแห้ง [40] ปฏิกิริยาระหว่างหมู่  $-\text{OH}$  ของเส้นใย (Fiber  $-\text{OH}$  groups) และกรดอะคริลิกแสดงดัง สมการที่ (7) [15] Li และคณะ [75] รายงานว่าเส้นใยป่านลินินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดอะคริลิกเสริมแรงให้กับคอมโพสิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene : HDPE) เมทริกซ์จะทำให้ความแข็งแรงดิ่งเพิ่มขึ้นและความชอบน้ำของเส้นใยมีแนวโน้มที่ลดลง Patel และคณะ [76] ศึกษาการทำอะคริเลชันบนเส้นใยปอกระเจาที่ผ่านการฟรี-ทรีทเมนต์ด้วยอัลคาไลน์ในคอมโพสิตที่พ็อกซี-ฟีนอลิก (Phenolic) พบว่าทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงดิ่งและความแข็งแรงดิ่งเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 42.2 และ 13.9 ตามลำดับ กระบวนการกราฟต์ติ้งบนพื้นผิวเส้นใยด้วยอะคริโลไนไตรล์

(AN(CH<sub>2</sub>=CH-C≡N)) โดย AN(CH<sub>2</sub>=CH-C≡N) เริ่มต้นจากอนุมูลอิสระที่จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของเซลลูโลส โดยปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) ออกซิเดชัน (Oxidation) จากนั้นทางด้านอนุมูลอิสระที่ถูกกระตุ้นแล้วจะมีปฏิกิริยากับ มอนอเมอร์ (Monomer) ของเมทริกซ์ทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer process) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ทำให้เกิดการเชื่อมประสานกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ [77] ซึ่งเส้นใยปานสรณารายณ์ที่ผ่านการทรีทเมนต์ด้วยอะคริโลไนไตรล์ทำให้แนวโน้มในการดูดซับน้ำลดลงร้อยละ 25, ให้สมบัติความแข็งแรงดึง, และมอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นเมื่อนำไปผลิตคอมโพสิต [40] Mishra และคณะ [78] ศึกษาผลกระทบของการทำอะคริโลไนไตรล์ทรีทเมนต์บนเส้นใยปานสรณารายณ์เสริมแรงในคอมโพสิตพอลิเอสเทอร์ เอไมด์ (Polyesteramide : BAK) เมทริกซ์ และรายงานว่าคอมโพสิตจะมีสมบัติความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 13 และ 11 ตามลำดับ โดยปฏิกิริยาระหว่างหมู่ -OH ของเส้นใย (Fiber -OH groups) กับอะคริโลไนไตรล์แสดงดัง สมการที่ (8) [15]



#### 4.2.9 การปรับสภาพผิวด้วยไอโซไซยานเนต (Isocyanate treatment)

ไอโซไซยานเนตเป็นสารคู่ควบในการดัดแปลงพื้นผิวเส้นใย หมู่ฟังก์ชัน (-N=C=O) ของไอโซไซยานเนต จะทำปฏิกิริยากับหมู่อะครอซิลของเซลลูโลสและส่วนที่เป็นลิกนินของเส้นใยแล้วฟอร์มตัวการเชื่อมโยงยูรีเทน (Urethane linkage) ขึ้นทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ไอโซไซยานเนตจะทำปฏิกิริยากับความชื้นบนผิวเส้นใยและฟอร์มตัวเป็นยูเรีย (Urea) โดยยูเรียจะทำปฏิกิริยากับหมู่อะครอซิลของเซลลูโลส [52] ซึ่งปฏิกิริยาลำดับที่ 2 นี้ทำให้เส้นใยมีความต้านทานความชื้นสูงขึ้นเพิ่มการยึดเกาะกับเมทริกซ์ ทำให้คอมโพสิตมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น [77] ปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยและสารคู่ควบไอโซไซยานเนตแสดงดัง สมการที่ (9) [15] โดย R สามารถเป็นหมู่อะครอซิลที่แตกต่างกันได้ George และคณะ [79] ใช้ไอโซไซยานเนตด้วยตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มามาไมด์ (Dimethyl formamide : DMF) ในการปรับสภาพเส้นใยปานลีนิน โดยตัวทำละลาย DMF มีจุดเดือดสูงและให้การละลาย (Solubility) ของไอโซไซยานเนตและเส้นใยที่ดีกว่าทำให้เส้นใยมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น โดยผลของการทรีทเมนต์เส้นใยเมื่อนำไปเสริมแรงในอีพ็อกซีเมทริกซ์จะทำให้คอมโพสิตที่ได้มีสมบัติความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 12.5 และ 17.7 เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปลง



#### 4.2.10 การปรับสภาพผิวด้วยกรดสเตียริก (Stearic acid treatment)

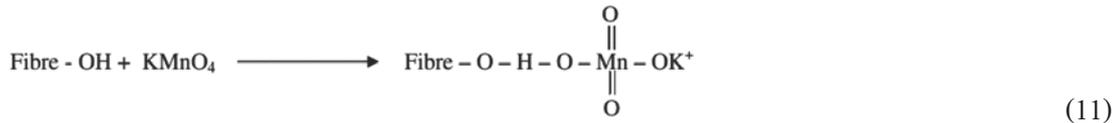
กรดสเตียริก ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ ) ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol solution) ถูกใช้สำหรับการดัดแปลงพื้นผิวเส้นใย โดยหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl groups) ของกรดสเตียริกจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยและทำให้เส้นใยมีสมบัติความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น โดยการทรีทเมนต์นี้ทำให้ส่วนของโครงสร้างที่มีลักษณะไม่เป็นผลึก (Non-crystalline) เช่น เพกทิน, แวกซ์, ไขมัน, และสารอื่นๆ บนผิวของเส้นใยถูกกำจัดออก ทำให้เส้นใยที่มัดตัวกันเป็นกลุ่มๆ แยกกระจายออกเป็นเส้นใยขนาดเล็กๆ [80, 81] ทำให้เกิดการยึดเกาะที่อินเตอร์เฟซได้ดีกว่าและทำให้คุณสมบัติของคอมโพสิตดีขึ้น โดย Kalaprasad และคณะ [64] ใช้การปรับสภาพผิวด้วยกรดสเตียริกบนเส้นใยป่านศรนารายณ์ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์และแสดงให้เห็นว่าสมบัติความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้น Torres และคณะ [82] ใช้กรดสเตียริก 3% ในการปรับสภาพเส้นใยป่านศรนารายณ์เสริมแรงในพอลิเอทิลีนคอมโพสิตและรายงานว่าการดัดแปลงจะให้ความแข็งแรงเฉือนที่สูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 23 โดยปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยและกรดสเตียริกแสดงดัง สมการที่ (10) [15]



#### 4.2.11 การปรับสภาพผิวด้วยเปอร์แมงกาเนต (Permanganate treatment)

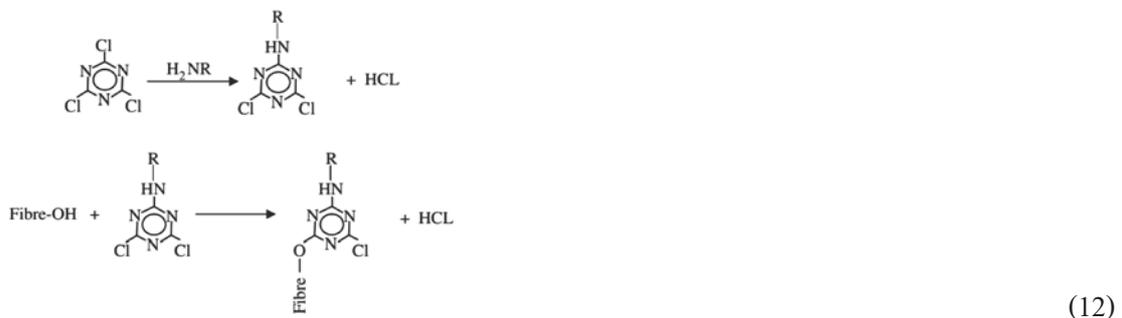
เปอร์แมงกาเนตทรีทเมนต์กระทำโดยการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate :  $\text{KMnO}_4$ ) หรือด่างทับทิมในสารละลายอะซิโตนซึ่งจะฟอร์มตัวไอออนเปอร์แมงกาเนตปฏิกิริยาสูง ( $\text{Mn}^{3+}$ ) เพื่อทำปฏิกิริยากับหมู่เซลลูโลสไฮดรอกซิลและฟอร์มตัวเป็นเซลลูโลส-แมงกาเนต (Cellulose-manganate) สำหรับการเริ่มต้นการกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Graft copolymerization) การทรีทเมนต์นี้ช่วยยกระดับการเชื่อมประสานกันทางเคมีที่อินเตอร์เฟซทำให้เกิดการยึดเกาะกันที่ดีกว่ากับเมทริกซ์ [83] การฟอร์มตัวของเซลลูโลส-แมงกาเนตทำให้เส้นใยมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่า อีกทั้งยังทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นลิกนิน (Hydrophilic -OH groups) และแยกตัวออกจากผนังเซลล์เส้นใยทำให้ความชอบน้ำของเส้นใยลดลง แต่อย่างไรก็ดีถ้า  $\text{KMnO}_4$  มีระดับความเข้มข้นที่สูงมากเกินไป (มากกว่า 1%) จะเป็นสาเหตุทำให้ลิกนินซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในองค์ประกอบโครงสร้างของเซลลูโลสถูกกำจัดออกมากเกินไปซึ่งลิกนินจะมีคุณลักษณะเป็นวัสดุเกาะประสาน (Cementing materials) ตามธรรมชาติ ดังนั้นการกำจัดลิกนินออกมากเกินไปเป็นสาเหตุทำให้คุณสมบัติของเส้นใยด้อยลง [81, 40] โดย Paul และคณะ [81] ได้รายงานว่าในระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน  $\text{KMnO}_4$  จะกัดเซาะพื้นผิวเส้นใยทำให้เพิ่มความหยابทางกายภาพให้กับพื้นผิวเส้นใย ทำให้สามารถเชื่อมประสานกันทางกลกับเมทริกซ์ได้เป็นอย่างดี โดยการทรีทเมนต์นี้ทำให้คอมโพสิตระหว่างเส้นใยกล้วยและพอลิพรอพิลีนเมทริกซ์มีสมบัติความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 5 และ 10 ตามลำดับ Li และคณะ [75] ได้ประยุกต์ใช้สารละลาย 0.2% โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (ใน 2% อะซิโตน) บนเส้นใยป่านลิกนินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารอัลคาไลน์ (2%  $\text{NaOH}$ , 1 h) มาแล้ว พบว่าเมื่อนำเส้นใยป่านลิกนินเสริมแรงให้กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิง

เส้น (Linear low density polyethylene : LLDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เมทริกซ์จะทำให้คอมพอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติความแข็งแรงดึงสูงกว่าเมื่อเทียบกับคอมพอลิเมอร์ที่เส้นใยไม่ได้ผ่านการตัดแปลงโดยปฏิกิริยาระหว่างหมู่-OH ของเส้นใยและโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแสดงดัง สมการที่ (11) [15]



#### 4.2.12 การปรับสภาพผิวด้วยไตรอะซีน (Triazine treatment)

ไตรอะซีน ( $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_3$ ) ทริทเมนต์สำหรับการตัดแปลงเส้นใยธรรมชาติ โดยอนุพันธ์ไตรอะซีน (เช่น  $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_3\text{Cl}_3$ ) จะมีหมู่มัลติฟังก์ชัน (Multifunctional groups) ภายในตัวมัน โดยรีแอคทีฟคลอรีน (Reactive chlorines) ที่มีอยู่ในโครงสร้างวงแหวนรูปหกเหลี่ยม (Heterocyclic ring) จะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ (Esterification) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างเซลลูโลสเฟส (Cellulose phase) และสารคู่ควบ (Coupling agent) ซึ่งพันธะคู่คาร์บอน-คาร์บอน (C-C) ก่อให้เกิดพันธะโควาเลนต์กับเมทริกซ์โดยการกราฟต์ดิ่งอีกทั้งยังทำให้เกิดปฏิกิริยาลำดับที่ 2 กับหมู่ไฮโดรฟิลิกไฮดรอกซิลของเซลลูโลสและลิกนินทำให้ได้สมบัติความต้านทานความชื้นที่ดีกว่า [40, 77, 84] การตัดแปลงพื้นผิวเส้นใยด้วยวิธีนี้จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามผ่าน (Crosslinking) ระหว่างเซลลูโลสและเมทริกซ์ผ่านพันธะไฮโดรเจนทำให้การยึดเกาะกันที่อินเทอร์เฟซมีความแข็งแรง Zadorecki และคณะ [85] ทำการทริทเมนต์เส้นใยเซลลูโลสด้วยสารคู่ควบต่างชนิดโดยใช้ไตรคลอโร-เอส-ไตรอะซีน (Trichloro-s-triazine) เป็นพื้นฐาน จากนั้นจึงนำเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการตัดแปลงแล้วเสริมแรงให้กับพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) เมทริกซ์ พบว่าทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ดีขึ้นและคอมพอลิเมอร์มีสมบัติความต้านทานความชื้นเพิ่มขึ้นโดยปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างอนุพันธ์ไตรอะซีนและหมู่ -OH ของเส้นใยแสดงดัง สมการที่ (12) [15]



#### 4.2.13 การปรับสภาพผิวด้วยอนุพันธ์กรดไขมัน (Fatty acid derivate treatment)

อนุพันธ์กรดไขมันหรือโอลีโออิลคลอไรด์ (Oleoyl chloride) ถูกใช้เป็นสารคู่ควบในการตัดแปลงเส้นใยเพื่อปรับปรุงความสามารถในการเปียก (Wettability) และเพิ่มการยึดเกาะของเส้นใยและเมทริกซ์โอลีโออิลคลอไรด์

ไรต์เป็นอนุพันธ์กรดไขมันซึ่งจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์และเกิดการกราฟต์ลงบนแกนเซลลูโลสของเส้นใยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์โมเลกุลจะเกิดการแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างเซลลูโลส และทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยและเมทริกซ์ นอกจากนี้หมู่ไฮโดรฟิสิกไฮดรอกซิลที่ผิวด้านนอกจะถูกกำจัดออกไปและทำให้เส้นใยมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งยกระดับสมบัติการเปียก (Wetting) และการยึดเกาะของเส้นใยภายในเมทริกซ์ทำให้คอมโพสิตที่ได้มีคุณสมบัติดีขึ้น Corrales และคณะ [86] ทำการดัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยปอกระเจาด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) และไพริดีน (Pyridine) พบว่าทำให้เส้นใยมีคุณลักษณะความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นและคอมโพสิตที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

#### 4.2.14 การปรับสภาพผิวด้วยเชื้อรา (Fungal treatment)

ในปัจจุบันการปรับสภาพผิวด้วยเชื้อราได้รับความสนใจและสนับสนุนให้เป็นทางเลือกสำหรับใช้ในการดัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเป็นวิธีการดัดแปลงทางชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพ การทรีทเมนต์ด้วยเชื้อราถูกใช้ในการกำจัดองค์ประกอบในส่วนที่ไม่ใช่เซลลูโลส (Non-cellulosic) เช่นแวกซ์ให้หลุดออกจากพื้นผิวเส้นใยโดยการกระทำของเอนไซม์เฉพาะ (Specific enzymes) ราไวท์รอต (White rot fungi คือเชื้อราที่สามารถย่อยสลายสารประกอบประเภทลิกโนเซลลูโลส) จะผลิตออกซิเดสเอนไซม์ที่ทำงานภายนอกเซลล์ (Extracellular oxidases enzymes) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นลิกนิน (Lignin peroxidase : เป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายลิกนินได้) ซึ่งทำให้ลิกนินถูกกำจัดออกจากเส้นใยอีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการละลายตัว (Solubility) ให้กับเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้เชื้อรา (Fungi) ยังผลิตไฮฟา (Hyphane) ซึ่งทำให้เกิดรูพรุนละเอียดๆ ทำให้พื้นผิวมีความหยาบเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้สามารถเชื่อมประสานกับเมทริกซ์ ได้ดีขึ้น [22, 87] โดยกระบวนการทรีทเมนต์เส้นใยด้วยเชื้อราจะเริ่มจากการทำสเตอริไลเซชัน (Sterilization) เพื่อนำเชื้อให้กับเส้นใย ในหม้อหนึ่งความดัน (Autoclave) เป็นเวลา 15 นาที ที่ 120°C หลังจากนั้นจะเติมเชื้อราลงไปตามอัตราส่วนกับเส้นใย และทำการบ่ม (Incubate) เป็นเวลา 2 สัปดาห์ ที่ 27°C หลังจากนั้นเส้นใยจะถูกกำจัดเชื้อรา (Sterilized) ออกตามด้วยการล้างน้ำ (Washing) และอบแห้งด้วยเตาอบ Pickeringetal. [22] ศึกษาการทรีทเมนต์ด้วยเชื้อราบนเส้นใยกล้วย และพบว่าคอมโพสิตจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 22 เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่เส้นใยไม่ได้ผ่านการดัดแปลง ยิ่งไปกว่านั้นสำหรับคอมโพสิตระหว่างเส้นใยกล้วยและพอลิพรอพิลีนการทรีทเมนต์ด้วยเชื้อราให้ผลลัพธ์ที่เหนือกว่าการทำอัลคาไลน์ทรีทเมนต์ โดยคอมโพสิตที่เส้นใยผ่านการทรีทเมนต์ด้วยเชื้อราจะมีความแข็งแรงมากกว่าคิดเป็นร้อยละ 32 เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่เส้นใยผ่านการทำอัลคาไลน์ทรีทเมนต์

## 5. สรุป

เส้นใยธรรมชาติแม้ว่าจะไม่ใช่วัสดุใหม่แต่ก็นับว่าเป็นวัสดุทางเลือกที่มีความน่าสนใจต่อการพัฒนาเพื่อเพิ่มศักยภาพเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น ราคาถูก, ความหนาแน่นต่ำ, ความแข็งแรงจำเพาะสูง, และที่สำคัญที่สุดคือเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันมีการ

นำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงแทนเส้นใยสังเคราะห์ในการผลิตคอมโพสิตเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้างและอุตสาหกรรมยานยนต์ แต่อย่างไรก็ดีด้วยความชอบน้ำตามธรรมชาติของเส้นใยเป็นอุปสรรคสำคัญทำให้เส้นใยเข้ากันได้ไม่ดีกับเมทริกซ์ ซึ่งส่งผลทำให้คอมโพสิตที่ได้มีคุณสมบัติทางกลไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติก่อนที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในเมทริกซ์ของคอมโพสิต โดยวิธีการตัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือการตัดแปลงทางกลและการตัดแปลงทางเคมี ซึ่งวิธีการตัดแปลงทางกลจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติพื้นผิวของเส้นใยซึ่งมีอิทธิพลต่อการสร้างพันธะในการยึดเกาะกับเมทริกซ์แต่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเส้นใยแต่อย่างใด ในขณะที่การตัดแปลงทางเคมี เป็นกระบวนการสำคัญเพื่อลดระดับความชอบน้ำตามธรรมชาติของเส้นใยลง โดยการปรับสภาพผิวเบื้องต้นให้กับเส้นใยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและลักษณะของพื้นผิว จากนั้นหมู่ไฮโดรฟิลิกไฮดรอกซิลจะถูกกำจัดออกจากเส้นใยด้วยการกระทำทางเคมีที่แตกต่างกัน หมู่รีแอคทีฟไฮดรอกซิลทำให้เกิดการควบประสานกับเมทริกซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเส้นใยที่ผ่านการตัดแปลงพื้นผิวทางกลหรือทางเคมีมีเป้าหมายสำคัญในการนำไปเสริมแรงให้กับเมทริกซ์ของคอมโพสิต โดยมุ่งเน้นในการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของคอมโพสิตให้ดีขึ้นซึ่งในบทความนี้มีเป้าหมายในการศึกษาเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการตัดแปลงพื้นผิวของเส้นใยป่านศรนารายณ์เพื่อนำไปเสริมแรงให้กับพอลิเอสเตอร์เรซินเมทริกซ์ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Espert, F. Vilaplana, S. Karlsson, "Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood one year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties," Applied Science and Manufacturing; Vol. 35, pp. 1267-1276, DOI: 10.1016/J.compositesa. 2004.04.004, 2004.
- [2] R. Chandra and R.Rustgi, "Biodegradable Polymers," Progress in Polymer Science, Vol. 23, pp.1273-1335, 1998.
- [3] Girisha. C, Sanjeevamurthy, Gunti Rangasrinivas, "Effect of alkali treatment, fiber loading and hybridization on tensile properties of sisal fiber, banana empty fruit bunch fiber and bamboo fiber reinforced thermoset composites," International Journal of Engineering Science and Advanced Technology, Vol. 2(3), pp.706-711, 2012.
- [4] P.V. Joseph, K. Joseph and S. Thomas, "Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites," Composites Science and Technology, Vol.59(11), pp.1625-1640, 1999.

- [5] K. Oksman, M. Skrifuarsi and J.F. Selin, "Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 63(9), pp.1317-1324, 2003.
- [6] S. Mohanty and S.K. Nayak, "Dyanamic and steady state visco-elastic behaviour and morphology of MAPP treated pp/sisal composites," *Materials Science and Engineering*, Vol. 443(1-2), pp.202-208, 2007.
- [7] M. Wollerdorfer and H. Bader, "Influence of natural fibre on the mechanical properties of biodegradable polymer," *Industrial crops and products*, Vol. 8, pp.105-112, 1998.
- [8] R. Malkapuram, V. Kumar and S.N. Yuvraj, "Recent Development in Natural Fibre Reinforced Polypropylene Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, pp.1169-1189, 2008.
- [9] P. Wambua, J. Ivens and I.Verpoest, "Natural Fibres: Can They Replace Glass in Fibre Reinforced Plastics," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp.1259-1264, 2003.
- [10] A.K. Bledzki and J.Gassan, "Composites reinforced with cellulose based fibres," *Prog Polym Sci*, Vol. 24(2), pp.221-74, 1999.
- [11] S. Fakirov and D. Bhattacharyya, editors, *Engineering biopolymers: homopolymers, blends and composites*. Munich Hanser Publishers, ISBN: 978-1-56990-405-3, 2007.
- [12] A.K. Mohanty, M. Misra and G. Hinrichsen, "Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites : an overview," *Macromol Mater Eng*, Vol. 266-277(1), pp.1-24, 2000.
- [13] Y.M. Leonard and P.A.Martin, "Chemical modification of hemp, sisal, jute and kapok fibres by alkalization," *Appl Polym Sci*, Vol. 84(12), pp.2222-2234, 2002.
- [14] D.N. Saheb and J.P. Jog, "Natural fibre polymer composites: a review," *Adv Polym Tech*, Vol. 18(4), pp.351-363, 1999.
- [15] M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau and F. Cardona, "Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites:An overview," *Composites: Part B*, Vol. 43, pp.2883-2892, 2012.
- [16] M.J. John and R.D. Anandjiwala, "Recent developments in chemical modification and characterization of natural fibre-reinforced composites," *Polym Compos*, Vol. 29(2), pp.187-207, 2008.
- [17] L.Y. Mwaikambo and M.P.Ansell, "The effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok fibres for composite reinforcement," *Angew Makromol Chem*, Vol. 272, pp.108-16, 1999.
- [18] H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang and M.O.W. Richardson, "Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites," *Compos Sci Technol*, Vol. 67(7-8), pp.1674-83, 2007.

- [19] ภาควิชาพืชไร่ ภาควิชา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บทปฏิบัติการที่ 23 ป่านศรนารายณ์ (sisal), Available URL: [http://agri.kps.ku.ac.th/agron/main.php?pg=chapter&et\\_id=23&e\\_id=1](http://agri.kps.ku.ac.th/agron/main.php?pg=chapter&et_id=23&e_id=1). (สืบค้นวันที่ 25 พฤษภาคม 2558).
- [20] R.P. Kumar, K.C. Manikanda Nair, S. Thomas, S.C. Schit and K. Ramaburthy, "Morphology and melt rheological behaviour of short-sisal-bre-reinforced SBR composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp.1737-1751, 2000.
- [21] P.V. Joseph, K. Joseph, S. Thomas, C.K.S. Pillai, V.S. Prasad, G. Groeninckx, et al., "The thermal and crystallisation studies of short sisal fibre reinforced polypropylene composites," *Compos Part A – Appl Sci Manuf*, Vol. 34(3), pp.253–266,2003.
- [22] K.L. Pickering, Y. Li, R.L. Farrell and M.Lay, "Interfacial modification of hemp fibre reinforced composites using fungal and alkali treatment," *J Biobased Mater Bioenergy*, Vol. 1(1), pp.109–117, 2007.
- [23] K. Adekunle, D. Akesson and M.Skrifvars, "Biobased composites prepared by compression molding with a novel thermoset resin from soybean oil and a natural-fiber reinforcement," *J Appl Polym Sci*, Vol. 116(3), pp.1759–1765, 2010.
- [24] M. Abdelmouleh, S. Boufis, M.N. Belgacem and A. Dufresne, "Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: effect of silane coupling agents and fibre loading," *Compos Sci Technol*, Vol. 67(7–8), pp.1627–1639, 2007.
- [25] N. Sgriccia, M.C. Hawley and M.Misra, "Characterization of natural fibre surfaces and natural fibre composites," *Compos Part A – Appl Sci Manuf*, Vol. 39(10), pp.1632–1637, 2008.
- [26] S. Taj, M. Ali and S. Khan, "Review: NATURAL FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES," *Proc Pak Acad Sci*, Vol. 44(2), pp.129–144, 2007.
- [27] Salar Bagherpour, *Fibre Reinforced Polyester Composites, Polyester*, Dr. Hosam El-Din Saleh (Ed.), ISBN: 978-953-51-0770-5, InTech, DOI: 10.5772/48697, 2012, Available from: <http://www.intechopen.com/books/polyester/fibre-reinforced-polyester-composites> (29/05/2014).
- [28] K.J. Bowles and S. Frimpong, "Void effects on the interlaminar shear strength of unidirectional graphite–fiber-reinforced composites," *J Compos Mater*, Vol. 26(10), pp.1487–1509, 1992.
- [29] A. Vaxman, M. Narkis, A. Siegmann and S. Kenig, "Void formation in short-fiber thermoplastic composites," *Polym Compos*, Vol. 10(6), pp.449–453, 2004.
- [30] S. Zakaria and L.K. Poh, "Polystyrene-benzoylated EFB reinforced composites," *Polym Plast Technol Eng*, Vol. 41(5), pp.951–962, 2002.

- [31] V. Tanobe, T. Flores-Sahagun, S. Amico, G. Muniz and K. Satyanarayana, "Sponge Gourd (*Luffa Cylindrica*) Reinforced Polyester Composites: Preparation and Properties," *Defence Science Journal*, Vol. 64(3), pp.273-280, 2014.
- [32] B. Wang, S. Panigrahi, L. Tabil, W. Crerar, "Pre-treatment of flax fibres for use in rotationally molded biocomposites," *J Reinf Plast Compos*, Vol. 26(5), pp.447-463, 2007.
- [33] B.N. Dash, A.K. Rana, S.C. Mishra, H.K. Mishra, S.K. Nayak and S.S. Tripathy, "Novel lowcost jute-polyester composite. II. SEM observation of the fracture surfaces," *Polym Plast Technol Eng*, Vol. 39(2), pp.333-350, 2000.
- [34] J. Gassan and V.S. Gutowski, "Effects of corona discharge and UV treatment on the properties of jute-fibre epoxy composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 60(15), pp.2857-2863, 2000.
- [35] M. Ragoubi, D. Bienaimé, S. Molina, B. George, A. Merlin, "Impact of corona treated hemp fibres onto mechanical properties of polypropylene composites made thereof," *Industrial Crops and Products*, Vol. 31(2), pp.344-349, 2010.
- [36] S. Maraisa, F. Gouanve', A. Bonnesoeur, J. Grenet, F. Poncin-Epaillard, C. Morvan and M. Me'tayer, "Unsaturated polyester composites reinforced with flax fibers: effect of cold plasma and autoclave treatments on mechanical and permeation properties," *Composites: Part A*, Vol. 36, pp.975-986, 2005.
- [37] A.R. Martin, S. Manolache, L.H.C. Mattoso, R.M. Rowell and F. Denes, "Plasma modification of sisal and high-density polyethylene composites : effect on mechanical properties," *Proceedings from the Third International Symposium on Natural Polymers and Composites--ISNaPol/2000 and the Workshop on Progress in Production and Processing of Cellulosic Fibres and Natural Polymers*, pp.431-436, 2000.
- [38] K. Stana-Kleinschek, V. Ribitsch, T. Kreze, M. Sfiligoj-Smole and Z. Persin, "Correlation of regenerated cellulose fibres morphology and surface free energy components," *Lenzinger Berichte*, Vol. 82, pp.83-95, 2003.
- [39] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A.P. Duarte, A.B. Salah and A. Gandini, "Modification of cellulosic fibres with functionalized silanes: development of surface properties," *Int J Adhes Adhes*, Vol. 24(1), pp.43-54, 2004.
- [40] X. Li, L.G. Tabil and S. Panigrahi, "Chemical treatment of natural fibre for use in natural fibre-reinforced composites: a review," *Polym Environ*, Vol. (1), pp.25-33, 2007.
- [41] L.Y. Mwaikambo, N. Tucker and A.J. Clark, "Mechanical properties of hemp fibre reinforced euphorbia composites," *Macromol Mater Eng*, Vol. 292(9), pp.993-1000, 2007.

- [42] D. Ray, B.K. Sarkar, A.K. Rana, and N.R. Bose, "Effect of alkali treated jute fibres on composite properties," *Bull Mater Sci*, Vol. 24(2), pp.129–135, 2001.
- [43] A.M. Mohd Edeerozey, Hazizan Md Akil, A.B. Azhar and M.I. Zainal Ariffin, "Chemical modification of kenaf fibers," *Materials Letters*, Vol. 61, pp.2023–2025, 2007.
- [44] Valcineide O.A. Tanobe, Thais H.S. Flores-Sahagun, Sandro C. Amico, Graciela I.B. Muniz, and K.G. Satyanarayana, "Sponge Gourd (*Luffa Cylindrica*) Reinforced Polyester Composites: Preparation and Properties," *Defence Science Journal*, Vol. 64(3), pp.273-280, 2014.
- [45] Haydar U. Zaman and M.D.H. Beg, "Preparation, structure, and proper ties of the coir fiber/polypropylene composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 48(26), pp.3293–3301, 2014.
- [46] Mustafa Hauwa Mohammed and Benjamin DAUDA, "Unsaturated Polyester Resin Reinforced With Chemically Modified Natural Fibre," *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering (IOSR-JPTE)*, Vol. 1(4), pp.31-38, 2014.
- [47] S. Ouajai and R.A. Shanks, "Composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatment," *Polym Degrad Stab*, Vol. 89(2), pp.327–335, 2005.
- [48] V.P. Cyras, C. Vallo, J.M. Kenny and A. Vazquez, "Effect of chemical treatment on the mechanical properties of starch-based blends reinforced with sisal fibre," *J Compos Mater*, Vol. 38(16), pp.1387–1399, 2004.
- [49] S.V. Prasad, C. Pavithran and P.K. Rohatgi, "Alkali treatment of coir fibres for coir– polyester composites," *J Mater Sci*, Vol. 18(5), pp.1443–1454, 1983.
- [50] Alexander Bismarck, Amar K. Mohanty, Ibon Aranberri-Askargorta, Syliva Czaplá, Manjusri Misra, Georg Hinrichsen and Jürgen Springer, "Surface characterization of natural fibers; surface properties and the water up-take behavior of modified sisal and coir fibers," *Green Chem.*, Vol. 003, pp.100-107, 2001.
- [51] M.S. Sreekala, M.G. Kumaran, S. Joseph and M. Jacob, "Oil palm fibers reinforced phenol formaldehyde composites: influence of fibers surface modifications on the mechanical performance," *Appl Compos Mater*, Vol. 7(5–6), pp.295–329, 2000.
- [52] J. George, MS. Sreekala and S. Thomas, "A review of interface modification and characterisation of natural fibre reinforced plastic composites," *Polym Eng Sci*, Vol. 41(9), pp.1471–1485, 2001.
- [53] A. Valadez-Gonzalez, J.M. Cervantes-Uc, R. Olayo and P.J. Herrera-Franco, "Chemical modification of henequen fibres with an organosilane coupling agent," *Compos Part B – Eng*, Vol. 30(3), pp.321–331, 1999.

- [54] Y. Seki, "Innovative multifunctional siloxane treatment of jute fibre surface and its effect on the mechanical properties of jute/thermoset composites," *Mater Sci Eng A*, Vol. 508(1–2), pp.247–252, 2009.
- [55] K. Sever, M. Sarikanat, Y. Seki, G. Erkan and U.H. Erdogan, "The mechanical properties of  $\gamma$ -methacryloxypropyltrimethoxy silane-treated jute/polyester composites," *J Compos Mater*, Vol. 44(15), pp.1913–1924, 2010.
- [56] M.S. Sreekala, M.G. Kumaran, S. Joseph and M. Jacob, "Oil palm fibers reinforced phenol formaldehyde composites: influence of fibers surface modifications on the mechanical performance," *Appl Compos Mater*, Vol. 7(5–6), pp.295–329, 2000.
- [57] V. Tserki, N.E. Zafeiropoulos, F. Simon and C. Panayiotou, "A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres," *Compos Part A – Appl Sci Manuf*, Vol. 36(8), pp.1110–1118, 2005.
- [58] L.Y. Mwaikambo and M.P. Ansell, "The effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok fibres for composite reinforcement," *Macromol Mater Eng*, Vol. 272(1), pp.108–116, 1999.
- [59] R.M. Rowell, R.A. Young and J. Rowell, *Paper and composites from agro-based resources*, Taylor & Francis Ltd., CRC Press, ISBN 9781566702355, 1996.
- [60] S. Mishra, A.K. Mohanty, L.T. Drzal, M. Misra, S. Parija, S.K. Nayak, et al., "Studies on mechanical performance of biofiber/glass reinforced polyester hybrid composites," *Compos Sci Technol*, Vol. 63(10), pp.1377–1385, 2003.
- [61] A.K. Bledzki, A.A. Mamun, M. Lucka-Gabor and V.S. Gutowski, "The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites," *Express Polym Lett*, Vol. 2(6), pp.413–422, 2008.
- [62] K.C.M. Nair, S. Thomas and G. Groeninckx, "Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres," *Compos Sci Technol*, Vol. 61(16), pp.2519–2529, 2001.
- [63] K. Joseph, S. Thomas and C. Pavithran, "Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites," *Polymer*, Vol. 37(23), pp.5139–5149, 1996.
- [64] G. Kalaprasad, B. Francis, S. Thomas, C.R. Kumar, C. Pavithran, G. Groeninckx, et al., "Effect of fibre length and chemical modifications on the tensile properties of intimately mixed short sisal/glass hybrid fibre reinforced low density polyethylene composites," *Polym Int*, Vol. 53(11), pp.1624–1638, 2004.
- [65] S. Sapieha, P. Allard and Y.H. Zang, "Dicumyl peroxide-modified cellulose/LLDPE composites," *J Appl Polym Sci*, Vol. 41(9–10), pp.2039–2048, 1990.
- [66] T.J. Keener, R.K. Stuart and T.K. Brown "Maleated coupling agents for natural fibre composites," *Compos: Part A – Appl Sci Manuf*, Vol. 35(3), pp.357–362, 2004.

- [67] S. Mishra, J.B. Naik and Y.P. Patil., "The compatibilising effect of maleic anhydride on swelling and mechanical properties of plant-fiber-reinforced novolac composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 60(9), pp.1729-1735, 2000.
- [68] S. Mohanty, S.K. Nayak, S.K. Verma and S.S. Tripathy, "Effect of MAPP as a coupling agent on the performance of jute-PP composites," *J Reinf Plast Compos*, Vol. 23(6), pp.625-637, 2004.
- [69] S. Mohanty, S.K. Verma, S.K. Nayak and S.S. Tripathy, "Influence of fibre treatment on the performance of sisal-polypropylene composites," *J Appl Polym Sci*, Vol. 94(3), pp.1336-1345, 2004.
- [70] H. Chattopadhyay and P.B. Sarkar, "A new method for the estimation of cellulose," *Proc Natl Inst Sci India*, Vol. 12(1), pp.23-46, 1946)
- [71] X. Li, S. Panigrahi and L.G. Tabil, "A study of flax fibre-reinforced polyethylene biocomposites," *Appl Eng Agric*, Vol. 25(4), pp.525-531, 2009.
- [72] S. Mishra, M. Misra, S.S. Tripathy, S.K. Nayak and A.K. Mohanty, "The influence of chemical surface modification on performance of sisal-polyester biocomposites," *Polym Compos*, Vol. 23(2), pp.164-170, 2002.
- [73] G. Bogoeva-Gaceva, M. Avella, M. Malinconico, A. Buzarovska, A. Grozdanov, G. Gentile, et al., "Natural fibre eco-composites," *Polym Compos*, Vol. 28(1), pp.98-107, 2007.
- [74] M.K. Zahran and M.F. Rehan, "Grafting of acrylic acid onto flax fibres using Mn(IV)- citric redox system," *J Appl Polym Sci*, Vol. 102(3), pp.3028-3036, 2006.
- [75] X. Li, S. Panigrahi, L.G. Tabil and W.J. Crerar, "Flax fibre reinforced composites and the effect of chemical treatments on their properties," In: *Proc CSAE/ASAE annual intersectional meeting*, Winnipeg, 24-25 September, Canada, 2004.
- [76] V.A. Patel and P.H. Parsania, "Performance evaluation of alkali and acrylic acid treated-untreated jute composites of mixed epoxy-phenolic resins," *J Reinf Plast Compos*, Vol. 29(5), pp.725-730, 2010.
- [77] S. Kaliaa, B.S. Kaith and I. Kaur, "Pretreatments of natural fibres and their application as reinforcing material in polymer composites – a review," *Polym Eng Sci*, Vol. 49(7), pp.1253-1272, 2009.
- [78] S. Mishra, S.S. Tripathy, M. Misra, A.K. Mohanty and S.K. Nayak, "Novel eco-friendly biocomposites: biofibre reinforced biodegradable polyester amide composites-fabrication and properties evaluation," *J Reinf Plast Compos*, Vol. 21(1), pp.55-70, 2002.
- [79] J. George, J. Ivens and I. Verpoest, "Mechanical properties of flax fibre reinforced epoxy composites," *Macromol Mater Eng*, Vol. 272(1), pp.41-45, 1999.

- [80] S.A. Paul, C. Oommen, K. Joseph, G. Mathew and S. Thomas, “The role of interface modification on thermal degradation and crystallization behavior of composites from commingled polypropylene fibre and banana fibre,” *Polym Compos*, Vol. 31(6), pp.1113–1123, 2010.
- [81] S.A. Paul, K. Joseph, G. Mathew, L.A. Pothen and S. Thomas, “Influence of polarity parameters on the mechanical properties of composites from polypropylene fibre and short banana fibre,” *Compos: Part A – Appl Sci Manuf*, Vol. 41(10), pp.1380–1387, 2010.
- [82] F.G. Torres and M.L. Ubillas, “Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene,” *Polym Test*, Vol. 24(6), pp.694–698, 2005.
- [83] M.M. Rahman, A.K. Mallik and M.A. Khan, “Influences of various surface pretreatments on the mechanical and degradable properties of photografted oil palm fibers,” *J Appl Polym Sci*, Vol. 105(5), pp.3077–3086, 2007.
- [84] F. Mengeloglu and K. Karakus, “Thermal degradation, mechanical properties and morphology of wheat straw flour filled recycled thermoplastic composites,” *Sensors* 2008, Vol. 8(1), pp.500–519, 2008.
- [85] P. Zadorecki and P. Flodin, “Surface modification of cellulose fibres, II. The effect of cellulose fibre treatment on the performance of cellulose–polyester composites,” *J Appl Polym Sci*, Vol. 30(10), pp.3971–3983, 1985.
- [86] F. Corrales, F. Vilaseca, M. Llop, J. Girones, J.A. Mendez and P. Mutje, “Chemical modification of jute fibres for the production of green composites,” *J Hazard Mater*, Vol. 144(3), pp.730–735, 2007.
- [87] M.A. Jafari, A. Nikkhah, A.A. Sadeghi and M. Chamani, “The effect of *Pleurotus* spp. Fungi on chemical composition and in vitro digestibility of rice straw,” *Pak J Biol Sci*, Vol. 10(15), pp.2460–2464, 2007.