

Improving coconut fiber sheet performance via stepwise chemical treatments

Thitarini Suropan^{1*}, Surawut Puangmalee¹, Jarawee Leksuksri¹

¹Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author's e-mail: thitarinee@dss.go.th

Received: 27 May 2025, Revised: 10 March 2026, Accepted: 19 March 2026

Abstract

Coconut fibers have gained increasing attention due to their sustainability, eco-friendly characteristics, and potential as a reinforcing component in composite materials. However, coconut fibers possess a hydrophilic nature, a heterogeneous structure, and poor interfacial adhesion with matrix materials. Therefore, surface modification is essential to enhance their properties before application. This research aims to improve the physical, mechanical, hydrophobic, and interfacial adhesion properties of coconut fibers for the development of interior decorative wall panels, using polyvinyl alcohol (PVA) as a binder. Sequential chemical surface treatments were investigated using potassium permanganate combined with sulfuric acid and benzoyl chloride as well as a treatment sequence starting with sodium hydroxide followed by potassium permanganate combined with sulfuric acid and benzoyl chloride. The morphological characteristics of the fibers were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and the elemental composition was detected by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Physical and mechanical properties of the fiber sheets were underwent testing. The sodium hydroxide pre-treatment effectively removed some of the outer layer of fibers that were damaged and peeled off during the grinding process, resulting in improved accessibility of reactive sites for subsequent chemical modifications and reduced water absorption. Subsequent oxidation with potassium permanganate combined with sulfuric acid increased surface roughness and surface area, leading to a significant enhancement in tensile strength and interfacial bonding with the PVA matrix. In the final step with benzoyl chloride treatment, the hydrophilicity was reduced and the flame-retardant properties were improved, although a slight decrease in tensile strength was observed. Overall, the results indicate that sequential chemical modification significantly influences the structural, morphological, physical, and mechanical properties of coconut fibers and coconut fiber sheets. The most effective treatment was the sodium hydroxide pre-treatment followed by potassium permanganate / sulfuric acid oxidation, which provided optimal improvement for composite applications requiring high mechanical strength, reduced water absorption, and enhanced fiber-matrix interfacial adhesion with PVA binders.

Keywords: Coconut fiber, Chemical treatment, Composite materials, Polyvinyl alcohol, Mechanical properties

บทคัดย่อ

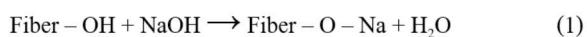
เส้นใยมะพร้าวได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากคุณสมบัติด้านความยั่งยืน ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และศักยภาพในการใช้งานร่วมในวัสดุเชิงประกอบ อย่างไรก็ตาม เส้นใยมะพร้าวมีลักษณะความชอบน้ำสูง โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ และความสามารถในการยึดเกาะกับวัสดุประสานต่ำ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวเส้นใยให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ เชิงกล ความไม่ชอบน้ำ และการยึดติดระหว่างวัสดุประสานกับเส้นใยมะพร้าว เพื่อประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแผ่นวัสดุตกแต่งผนังภายในอาคารจากเส้นใยมะพร้าวร่วมกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยการศึกษาการปรับปรุงสภาพเส้นใยด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้น ได้แก่ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ รวมถึงกระบวนการปรับปรุงสภาพที่เริ่มจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ ทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา พื้นผิวของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การตรวจสอบองค์ประกอบเชิงธาตุ และการทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของแผ่นเส้นใยมะพร้าว พบว่า การปรับปรุงสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดผิวชั้นนอกของเส้นใยบางส่วนที่ถูกทำลาย หลุดลอกออกจากกระบวนการบด ส่งผลให้เปิดโครงสร้างผิวเส้นใยให้สารเคมีสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีในขั้นตอนต่อมา และช่วยลดการดูดซึมน้ำ ตามด้วยกระบวนการออกซิเดชัน โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับกรดซัลฟิวริกช่วยเพิ่มความหยาบและพื้นที่ผิวของเส้นใย ส่งผลให้ความต้านแรงดึงของแผ่นเส้นใยเพิ่มขึ้นและเสริมประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับตัวประสาน ขณะที่การปรับปรุงสภาพขั้นสุดท้ายด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ ซึ่งช่วยลดการดูดซึมน้ำและเพิ่มสมบัติการทนไฟ ถึงแม้ว่าส่งผลให้ความต้านแรงดึงลดลง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงสภาพด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้าง สัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของของเส้นใยมะพร้าว/แผ่นเส้นใยมะพร้าว โดยการปรับปรุงสภาพเส้นใยมะพร้าวแบบลำดับขั้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยมะพร้าวให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ ในวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแข็งแรงเชิงกลสูง การลดการดูดซึมน้ำ และการยึดเกาะที่ระหว่างเส้นใยกับตัวประสานชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

คำสำคัญ: เส้นใยมะพร้าว, การปรับปรุงสภาพทางเคมี, วัสดุคอมโพสิต, โพลีไวนิลแอลกอฮอล์, สมบัติเชิงกล

1. บทนำ (Introduction)

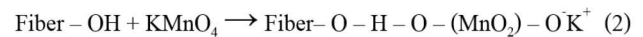
เส้นใยมะพร้าว (Coconut fiber หรือ Coir fiber) เป็นวัสดุธรรมชาติที่ได้จากเปลือกของผลมะพร้าวที่มีลักษณะเหนียว แข็งแรงและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ทำให้ได้รับความสนใจอย่างมากในด้านวัสดุศาสตร์และอุตสาหกรรมที่เน้นความยั่งยืน เส้นใยมะพร้าวประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 32-43% เฮมิเซลลูโลส 15-25% และลิกนิน 40-45% รวมถึงสารแทรกอื่น ๆ เช่น เพคตินและเกลืออินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใย อย่างไรก็ตามเส้นใยมะพร้าวยังมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้าง ความชื้นสูงและความสามารถในการยึดเกาะกับตัวประสานพอลิเมอร์ [1-2] โดยการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความสามารถในการยึดเกาะของเส้นใยเซลลูโลสมักมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาการปรับสภาพทางเคมี (Chemical treatment) ของเส้นใย ได้แก่ การปรับสภาพด้วยด่าง (Alkaline treatment) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Permanganate treatment) อะซิไทลเลชัน (Acetylation) และเบนโซอิลเลชัน (Benzoylation) เป็นต้น โดยมีการศึกษาการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า การปรับสภาพดังกล่าวทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง ส่งผลให้วัสดุประสานสามารถสัมผัสกับเซลลูโลสในเส้นใยได้มากขึ้น การปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารออกซิไดซ์ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ช่วยเพิ่มความหยابของพื้นผิวและเปิดรูพรุนของโครงสร้างเส้นใย เพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและตัวประสานในวัสดุเชิงประกอบมากขึ้น นอกจากนี้ การปรับสภาพแบบออกซิเดชันยังช่วยลดความชอบน้ำของเส้นใย [1-5] เป็นต้น

การปรับสภาพด้วยด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นิยมใช้เพื่อกำจัดลิกนิน เพคติน เฮมิเซลลูโลส รวมถึงแว็กซ์ออกจากพื้นผิวของเส้นใยบางส่วน ช่วยเพิ่มความหยابของผิว ทำให้พื้นที่สัมผัสกับวัสดุประสานพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น จากการศึกษาการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% เป็นเวลา 72 ชั่วโมง กับตัวประสานโพลีเอสเตอร์ พบว่าความแข็งแรงในการดัดงอและการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 40% เมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยกระบวนการนี้ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเซลลูโลสสามารถเกิดปฏิกิริยากับวัสดุประสานได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้การยึดเกาะของเส้นใยกับพอลิเมอร์ดีขึ้นและยังเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสบนพื้นผิวที่มีบทบาทสำคัญในการรับแรงกล การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสถูกดึงโปรตอน (H^+) ออกไปเป็นประจุลบ (O^-) และจับกับโซเดียมไอออน (Na^+) เกิดเป็นเกลืออัลคอกไซด์ (O^-Na^+) ด้วยเหตุนี้จึงลดปริมาณความชื้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่และทำให้สมบัติการดูดซับน้ำของเส้นใยลดลง [3,6-7] ปฏิกิริยาทางเคมีแสดงสมการได้ ดังนี้:

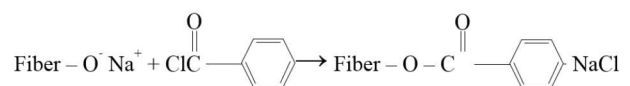
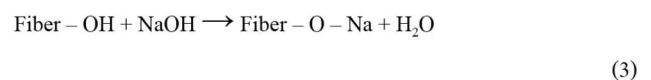


การปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ทำหน้าที่ออกซิไดซ์หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเส้นใย ปฏิกิริยานี้มักเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นกรดและส่งผลให้มีการนำหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น หมู่คาร์บอกซิลและหมู่แอลดีไฮด์เข้าสู่พอลิเมอร์เซลลูโลส การศึกษาพบว่า การปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตหลังจากการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบได้อย่างมีนัยสำคัญ [3,8-10] การศึกษาการปรับสภาพเส้นใยเซลลูโลส โดยใช้ระบบออกซิไดซ์ร่วมระหว่าง $KMnO_4$ และ H_2SO_4 พบว่าการใช้ H_2SO_4 ช่วยกระตุ้นการรีดิวซ์ของ $Mn(VII)$ ไปเป็น $Mn(II)$ ทำให้กระบวนการออกซิเดชันมีประสิทธิภาพสูงขึ้น [11] การปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแบบออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพสำหรับเส้นใยธรรมชาติ โดยที่ $KMnO_4$ ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเซลลูโลส สามารถเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ผิวเส้นใยให้เป็นหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) หรือ

คาร์บอกซิลิก (-COOH) เมื่อผ่านกลไกการรีดักชันของ $Mn(VII)$ ไปเป็น $Mn(IV)$ ปฏิกิริยาดำเนินไปโดยการสร้างเซลลูโลส-แมงกานีส เกิดการตกตะกอนของ MnO_2 โดยกลไกออกซิเดชันนี้ยังส่งเสริมการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสบางส่วน เพิ่มความหยابของพื้นผิว และส่งผลให้เกิดการเพิ่มจำนวนตำแหน่งที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะเคมีร่วมกับตัวประสานได้ดีขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวช่วยปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวและประสิทธิภาพเชิงกลในวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ [10,12] ปฏิกิริยาทางเคมีแสดงสมการได้ ดังนี้



การปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ (C_6H_5COCl) ปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชัน (Benzoylation) เกิดหมู่เบนโซเอต ($-OCOC_6H_5$) ซึ่งเป็นหมู่ที่มีวงแหวนเบนซีน (Aromatic ring) มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลบนผิวเส้นใยบางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิล ส่งผลให้เส้นใยมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น เพิ่มการกระจายตัวของตัวประสานพอลิเมอร์ เพิ่มการยึดเกาะกับพอลิเมอร์ เช่น อีพอกซีและโพลียูรีเทน พร้อมทั้งปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ [3,14] โดยทั่วไปการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลเลชันมีการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน การศึกษาผลของปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันต่อเส้นใยธรรมชาติ พบว่า สัณฐานพื้นผิวมีร่องและรอยแยกขนาดเล็ก มีความเรียบและสม่ำเสมอขึ้น ลดการดูดซับน้ำ มีการเกิดหมู่เบนโซเอตบนโครงสร้างเซลลูโลส ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น และความเป็นผลึกของเส้นใยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [10,13] ปฏิกิริยาทางเคมีแสดงสมการได้ ดังนี้



การศึกษาการปรับปรุงเส้นใยจากเปลือกหุ้มเมล็ดด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ เพื่อการผลิตวัสดุเชิงประกอบไฮบริดโพลีเอสเตอร์และเสริมแรงด้วยเส้นใยหุ้มเมล็ดด้วยโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-Density polyethylene) และเรซินอัลคิติกจากน้ำมันละหุ่ง พบว่า การปรับปรุงเส้นใยทำให้สมบัติเชิงกลได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง ความเค้นดัด ความแข็ง และแรงกระแทก (Impact load) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน พร้อมทั้งสังเกตว่าการดูดซับน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังจากการปรับสภาพ [14]

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวก่อนและหลังการปรับสภาพทางเคมีแบบหลายขั้นตอน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพเชิงกล ลดความชอบน้ำ และการยึดเกาะกับวัสดุประสานพอลิเมอร์ของวัสดุเส้นใยมะพร้าวในการนำไปใช้พัฒนาแผ่นติดผนังตกแต่งภายในอาคารจากเส้นใยธรรมชาติ

2. วัสดุและวิธีวิจัย (Materials and methods)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance รุ่น Type AC2105, Sartorius) เตาให้ความร้อน (Hot Plate รุ่น SP131320-33, Barnstead Thermolyne) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven รุ่น UF30, Memmert) เครื่องบด (Willey mill รุ่น Thomas willey mills model 4, Thomas scientific) เครื่องทดสอบความหนา (Thickness tester รุ่น 49-s6-10-0003, Technidyne) เครื่องทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile tester รุ่น TMI/84-56, TMI)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM รุ่น JSM-6610LV, JEOL) เครื่องเคลือบด้วยโลหะนำไฟฟ้า (รุ่น 150R ES plus, Quorum)

2.2 สารเคมีและวัสดุ

เปลือกมะพร้าวสับขนาดประมาณ 3x3 เซนติเมตร จากจังหวัดตรัง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 10% w/v, Merck), กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4 , 4 N, Merck) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$, 0.1 N, Carlo) เบนโซอิลคลอไรด์ (C_6H_5COCl 98%, Tokyo chemical industry) โซในขั้นตอนการปรับสภาพเส้นมะพร้าว โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (10% w/v, Chemipan) โซเดียมซิลิเกต ($Na_2O(SiO_2)$, Sigma-Aldrich) กรดซิตริก ($C_6H_8O_7$, Loba Chemie) ตัวช่วยประสาน (Emulsifier X-1, Chemical Max) โซในตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เอทิลแอลกอฮอล์ (C_2H_5O , 95%, Merck)

2.3 วิธีดำเนินงาน

2.3.1 การเตรียมเส้นใย

การเตรียมเส้นใยมะพร้าวโดยนำเปลือกมะพร้าวสับขนาด 3 X 3 เซนติเมตร ล้างทำความสะอาดและตากให้แห้ง นำไปบดด้วยเครื่องบด Willey mill จากนั้นร่อนด้วยตะแกรง 100 เมช ขนาดเส้นใยประมาณ 1.5 - 1.8 มิลลิเมตร

2.3.2 การปรับสภาพเส้นใยด้วยสารเคมี

การปรับสภาพด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้นมีการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับสภาพผิวเส้นใยในการช่วยกำจัดลิกนินเฮมิเซลลูโลส และเพคตินที่เคลือบอยู่บนผิวเส้นใย รวมถึงช่วยให้เปิดโครงสร้างเส้นใยให้สารเคมีอื่นสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายขึ้น การใช้สารโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกเพื่อช่วยออกซิไดซ์ผิวเส้นใยให้เกิดร่องและเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะกับตัวประสานได้ดี ซึ่งเมื่อเส้นใยมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น อาจส่งผลให้พื้นผิวสามารถดูดซับน้ำได้ดีขึ้นด้วย จึงใช้ขั้นตอนการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์เพื่อให้เส้นใยลดสมบัติความชอบน้ำ โดยการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารเคมีแบบลำดับขั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มตัวอย่าง R เป็นกลุ่มเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพตัวอย่างก่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีการใช้สารเคมีในขั้นตอน คือ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ กลุ่มตัวอย่าง N เป็นกลุ่มเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพตัวอย่างก่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ ดังกระบวนการปรับสภาพเส้นใยในตารางที่ 1 โดยเส้นใยมะพร้าวที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพจะใช้สัญลักษณ์ R1 ในการปรับสภาพครั้งแรกใช้สัญลักษณ์ R2 ด้วยการนำเส้นใยปริมาณ 100 กรัม แช่ในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 4 นอร์มัล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำเส้นใยล้างน้ำให้สะอาด นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจนเส้นใยแห้ง สัญลักษณ์ R3 โดยนำเส้นใยที่ผ่านกระบวนการ R2 ปริมาตร 100 กรัม ไปแช่ในเบนโซอิลคลอไรด์ 98%

ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ก่อนนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้งเส้นใยแห้งและปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

ในการปรับสภาพสัญลักษณ์ N1 โดยนำเส้นใยปริมาณ 100 กรัม แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซนต์น้ำหนักต่อปริมาตร 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำเส้นใยล้างน้ำให้สะอาด อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนเส้นใยแห้ง จากนั้นนำเส้นใยที่ได้จาก N1 ไปทำการปรับสภาพเป็น N2 และ N3 โดยใช้กระบวนการเดียวกับ R2 และ R3

ตารางที่ 1 กระบวนการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารเคมี

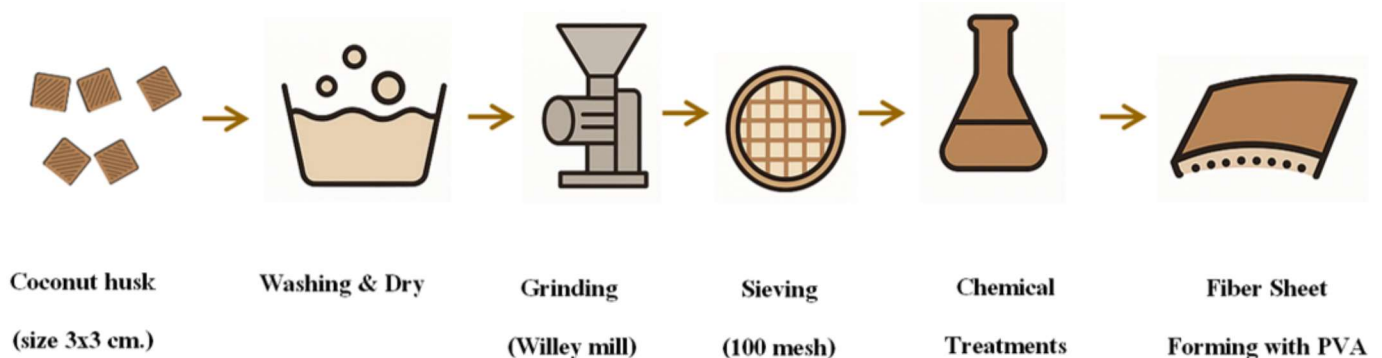
ตัวอย่าง	กระบวนการปรับสภาพเส้นใย
R1	เปลือกมะพร้าวที่ผ่านการบด
R2	นำ R1 - แช่ใน $KMnO_4$ 0.1 N ร่วมกับ H_2SO_4 4 N
R3	นำ R2 - แช่ C_7H_5ClO 98%
N1	นำ R1 - แช่ใน NaOH 10% w/v
N2	นำ N1 - $KMnO_4$ 0.1 N ร่วมกับ H_2SO_4 4 N
N3	นำ N2 - แช่ใน C_7H_5ClO 98%

2.3.3 การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยมะพร้าว

การขึ้นแผ่นเส้นใยมะพร้าวกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยนำโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ละลายในน้ำให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เติมน้ำโซเดียมซิลิเกต กรดซิตริก และตัวช่วยประสาน ในอัตราส่วนโพลีไวนิลแอลกอฮอล์:น้ำ:โซเดียมซิลิเกต:กรดซิตริก (1:10:0.5:0.25) จากนั้นนำเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพแต่ละตัวอย่างจำนวน 10 กรัม ผสมกับการโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมปริมาณ 200 มิลลิลิตร เทลงในแม่พิมพ์ขนาด 15 x 30 เซนติเมตร ทั้งให้เซตตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะได้แผ่นเส้นใยที่มีความหนา 2 ± 0.25 มิลลิเมตร โดยรูปแบบการจัดเรียงตัวของเส้นใยเป็นแบบสุ่ม

2.3.4 การทดสอบสมบัติ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวและการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) โดยนำตัวอย่างเส้นใยเคลือบโลหะทองด้วยเครื่องเคลือบโลหะนำไฟฟ้า นำตัวอย่างที่ได้ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 1,000X และการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) โดยอุปกรณ์ EDX ทำงานร่วมกับ SEM ตรวจจบบัรรีส์เอ็กซ์และวิเคราะห์พลังงานด้วยโปรแกรมวิเคราะห์และสร้างสเปกตรัมที่แสดงสัดส่วนธาตุที่ตรวจพบ



ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent sheet density) บ่งชี้ถึงลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยที่มีผลจากการปรับสภาพเส้นใย โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 534:2011 ทำการวัดน้ำหนักของแผ่นเส้นใยต่อพื้นที่และความหนาของแผ่นเส้นใย เพื่อนำมาคำนวณหาความหนาแน่นปรากฏของแผ่นเส้นใย

การดูดซึมน้ำ (Water drop absorption) บ่งชี้ความสามารถของแผ่นเส้นใยในการดูดซับน้ำ โดยทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T835 Om - 14 ใช้การหยดน้ำกลั่นในปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร ลงบนแผ่นเส้นใยและจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาจนกว่าหยดน้ำจะถูกดูดซับและหายไป

ความต้านแรงดึง (Tensile strength) บ่งชี้ความสามารถที่ทนต่อแรงดึงสูงสุดต่อหน่วยความกว้างที่แผ่นเส้นใยสามารถต้านทานได้ก่อนจะขาด โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1924-2:2008 เตรียมตัวอย่างขนาดความกว้าง 15 มิลลิเมตร ความยาว 180 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ ความต้านแรงดึงชนิดอัตราการยืดตัวคงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้สมการ (4)

$$S = \frac{F}{W_i} \quad (4)$$

เมื่อ S คือ ความต้านแรงดึง

F คือ ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึง

W_i คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ

อัตราการเผาไหม้ (Burning rate) ใช้ในการประเมินพฤติกรรมและลักษณะในการติดไฟของแผ่นเส้นใย โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1210:1996 เตรียมตัวอย่างขนาด 50 x 125 มิลลิเมตร วางตัวอย่างในแนวตั้ง ใช้เปลวไฟขนาดเล็กตั้งแกนกลางของท่อหัวเตาให้ตั้งตรง ตั้งหัวเตาให้เปลวไฟสีน้ำเงินสูง 20 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร ทดสอบเปลวไฟเป็นเวลา 30 วินาที โดยไม่เปลี่ยนตำแหน่ง นำหัวเตาออกหลังจาก 30 วินาที หรือทันทีที่ส่วนหน้าการเผาไหม้ของชิ้นงานทดสอบถึงเครื่องหมาย 25 มิลลิเมตร เริ่มจับเวลาอีกครั้งของส่วนการเผาไหม้จากเครื่องหมาย 25 มิลลิเมตร จนการเผาไหม้สิ้นสุดวัดความยาวที่เสียหายจากการเผาไหม้ คำนวณอัตราการเผาไหม้เชิงเส้น หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้สมการ (5)

$$v = \frac{60L}{t} \quad (5)$$

เมื่อ V คือ อัตราการเผาไหม้เชิงเส้น

L คือ ความยาวที่เสียหายจากการเผาไหม้

t คือ เวลา

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 สันฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวและการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX

รูปที่ 1 (A) R1 แสดงภาพสันฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวหลังจากผ่านกระบวนการบดด้วยแรงกล พบว่า เส้นใยมีลักษณะผิวไม่เรียบและมีเศษสิ่งเจือปนบางส่วนเกาะติดอยู่บนพื้นผิว บางส่วนถูกทำลายและหลุดลอกออกจากโครงสร้างหลัก ซึ่งเป็นผลจากแรงเฉือนและแรงกระแทกระหว่างกระบวนการบด ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX พบว่า บนผิวเส้นใยประกอบด้วยธาตุออกซิเจน โพแทสเซียม ซิลิคอน คลอรีน และโซเดียม ซึ่งบ่งชี้ถึงการคงอยู่ของสารอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนจากกระบวนการการเจริญเติบโตของมะพร้าวทางธรรมชาติ เช่น แร่ธาตุในเนื้อเยื่อพืช หรือสารตกค้าง

จากสภาพแวดล้อม การปรากฏของธาตุดังกล่าวสะท้อนถึงสภาพพื้นผิวเส้นใยก่อนการปรับสภาพทางเคมีที่ประกอบด้วยสารประกอบที่ไม่ใช่เซลล์ลูลอส เช่น เอมิเซลล์ลูลอส ลิกนิน เพคตินและแร่ธาตุที่สะสมอยู่กับผนังเส้นใยชั้นนอก ซึ่งมีผลต่อสมบัติการยึดเกาะและการซึมผ่านของสารเคมีในขั้นตอนการปรับสภาพลำดับต่อไป [1-2]

รูปที่ 1 (B) R2 แสดงสันฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟูริก พบว่า พื้นผิวของเส้นใยมีลักษณะเรียบมากขึ้น สามารถสังเกตเห็นพื้นผิวเส้นใยได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ บ่งชี้ถึงสิ่งเจือปนและสารประกอบที่ไม่ใช่เซลล์ลูลอสบนพื้นผิวเส้นใยถูกกำจัดออก การเปลี่ยนแปลงเชิงสันฐานดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงผลการปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟูริกที่ช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสบนพื้นผิวคล้ายกับ Abisha และคณะ [15] ที่รายงานการแสดงผลสันฐานวิทยาของเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตว่าเกิดรอยตื้นตามแกนยาวบนผิวเส้นใย โดยปฏิกิริยาของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตบนเส้นใยที่อาจกัดกร่อนส่วนประกอบออสันฐานโดยการทำลายพันธะระหว่างเซลล์ลูลอสและเอมิเซลล์ลูลอส ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX พบว่า บนพื้นผิวของเส้นใยประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างธาตุที่ผ่านการออกซิไดซ์บางส่วนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตภายใต้สภาวะกรด ปฏิกิริยาดังกล่าวอาจทำให้หมู่ไฮดรอกซิลบนเซลล์ลูลอสถูกออกซิไดซ์ให้เป็นหมู่คาร์บอนิล ส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีขี้ข่วนและความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะเคมีร่วมกับตัวประสานได้ดีขึ้น [15]

รูปที่ 1 (C) R3 แสดงสันฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพแบบลำดับขั้น โดยเริ่มจากการออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟูริก และตามด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ พบว่า หลังการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ทำให้ชั้นนอกของเส้นใยถูกกำจัดออก พื้นผิวเส้นใยมีลักษณะเปลี่ยนแปลงโดยปรากฏโครงสร้างบางส่วน เช่น ปากหลุม (Border pit) บางส่วนที่มีไทลอส (Tylose) ปิดอยู่ รวมถึงมีร่องและรอยแยกขนาดเล็กบนพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบขึ้น สอดคล้องกับ Boussehel และคณะ [13] และ Olusanya และคณะ [17] ที่รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิวเส้นใยที่มีลักษณะเรียบขึ้นหลังผ่านการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX พบว่า บนพื้นผิวของเส้นใยหลังการปรับสภาพประกอบด้วยออกซิเจน ซิลิคอน และคลอรีนที่ยืนยันถึงปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลล์ลูลอสกับเบนโซอิลคลอไรด์ทำให้เกิดพันธะเอสเทอร์บนพื้นผิวเส้นใย [13,17] และธาตุซิลิคอนที่พบสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Gil และคณะ [18] ยืนยันการมีอยู่ของซิลิคอนโดยใช้เทคนิค EDX ระบุจุดสีขาวบนพื้นผิวดังที่เห็นในในภาพเป็นวัสดุที่อุดมด้วยซิลิกา โดยถูกระบุว่าเป็นไทลอส และเป็นหลักฐานว่าเส้นใยไม่ได้ถูกปรับปรุงมากเกินไป

รูปที่ 1 (D) N1 แสดงภาพสันฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ผนังชั้นนอกของเส้นใยถูกกำจัดออกบางส่วน ส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีความสะอาดมากขึ้นและสามารถสังเกตเห็นปากหลุมที่เป็นบริเวณสะสมอาหาร รวมถึงร่องระหว่างเส้นใย การเปลี่ยนแปลงทางสันฐานวิทยาดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเส้นใย กระบวนการดังกล่าวมีผลในการกำจัดสิ่งเจือปนและสารประกอบที่ไม่ใช่เซลล์ลูลอส เช่น เอมิเซลล์ลูลอส ลิกนิน และเพคตินออกจากโครงสร้างของเส้นใย [7] โดยส่งผลให้พื้นผิวมีความหยาบและพื้นผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการยึดเกาะเส้นใยกับตัวประสานต่อไป ทั้งนี้ผลที่ได้สอดคล้องกับการรายงานของ Bachtiar และ

คณะ [19] และ Osman และคณะ [20] ที่พบว่าการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถเปิดโครงสร้างเส้นใยและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับวัสดุประสานในวัสดุเชิงประกอบได้ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX พบธาตุออกซิเจน คาร์บอน และโซเดียมบนพื้นผิวเส้นใย ซึ่งสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าว

รูปที่ 1 (E) N2 แสดงสัญญาณวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพแบบหลายขั้นตอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริก ผลจากกระบวนการดังกล่าวทำให้พื้นผิวเส้นใยถูกกำจัดออกเพิ่ม ส่งผลให้โครงสร้างภายในของเส้นใยปรากฏชัดเจนขึ้น โดยสามารถสังเกตเห็นปากหลุมและไทลอสได้ชัดอีกทั้งร่องระหว่างเส้นใยมีความลึกและชัดมากกว่าตัวอย่างหลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว (รูปที่ 1 (D) N1) Arsyad และคณะ [5] รายงานว่าการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมร่วมกับสารออกซิไดซ์ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตช่วยเพิ่มความหยابของพื้นผิวและเปิดรูพรุนของโครงสร้างเส้นใย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงถึงปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิสขององค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส ที่ถูกกำจัดออกจากโครงสร้างเส้นใยบางส่วน กระบวนการนี้มีผลช่วยเพิ่มความสะอาดของพื้นผิวเส้นใยและเพิ่มพื้นผิวเส้นใยให้สามารถยึดเกาะกับตัวประสานของวัสดุเชิงประกอบได้มากยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ยืนยันการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว โดยพบธาตุออกซิเจน คาร์บอน และแคลเซียมบนพื้นผิวเส้นใย ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการคงเหลือของสารประกอบหรือแร่ธาตุในเส้นใยหลังการปรับสภาพ

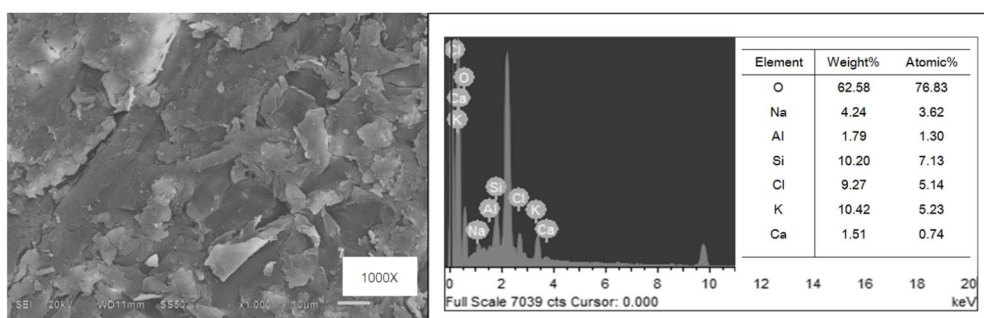
รูปที่ 1 (F) N3 แสดงสัญญาณวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวหลังการปรับสภาพแบบหลายขั้นตอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซอิลคลอไรด์ ตามลำดับหลังการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ พบว่า พื้นผิวเส้นใยมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง N2 (รูปที่ 1(E) N2) โดยยังสามารถมองเห็นโครงสร้างปากหลุมและไทลอส ซึ่งเป็นบริเวณที่เกี่ยวข้องกับการสะสมและลำเลียงอาหารในเส้นใย โดยร่องบนพื้นผิวมีลักษณะเรียบและตื้นขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวเส้นใยบางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิล จึงทำให้ผิวของเส้นใยมีลักษณะเรียบขึ้น [13] การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX สนับสนุน

ข้อสังเกตดังกล่าว โดยพบธาตุออกซิเจน คาร์บอน แคลเซียม และคลอรีนบนพื้นผิวเส้นใยที่ยืนยันถึงปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส

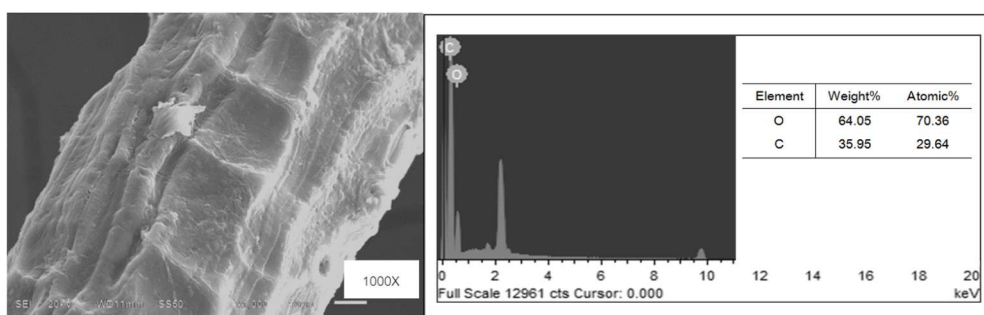
3.2 สมบัติของแผ่นเส้นใย

3.2.1 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent sheet density)

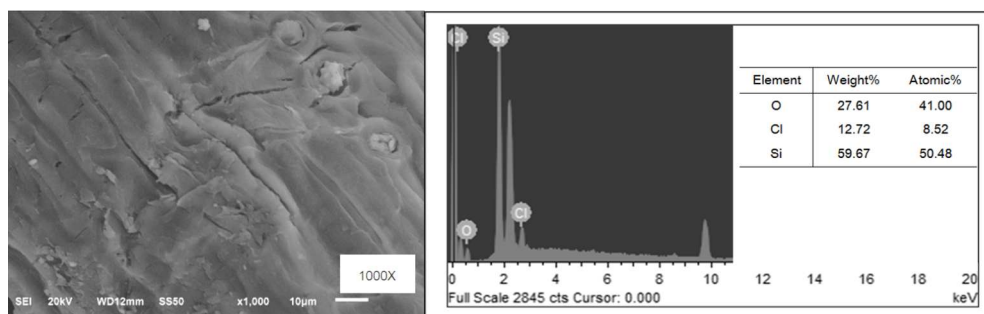
จากตารางที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏของแผ่นเส้นใยมะพร้าวพบว่า ตัวอย่าง R1, R2 และ R3 มีค่าเฉลี่ย 536.36 ± 24.71 , 541.42 ± 28.36 และ 535.21 ± 25.48 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่าง N1, N2 และ N3 มีค่าเฉลี่ย 588.10 ± 27.60 , 603.33 ± 22.15 และ 711.49 ± 26.62 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับภาพถ่ายสัญญาณวิทยาของเส้นใยมะพร้าว (รูปที่ 1) ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวระหว่างชุดตัวอย่าง R และ N อย่างชัดเจน โดยพบว่าตัวอย่าง R1-R3 พื้นผิวเส้นใยยังคงมีลักษณะไม่เรียบและมีเศษเจือปนเกาะติดอยู่บางส่วนบนผิวเส้นใยชั้นนอก แม้ผ่านการปรับสภาพแบบลำดับขั้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและตามด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพในลำดับดังกล่าวยังไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของแผ่นเส้นใยมะพร้าว R1, R2 และ R3 มากนัก (รูปที่ 2) สำหรับตัวอย่าง N1-N3 ที่ผ่านการปรับสภาพตามลำดับขั้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและตามด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ พบว่า พื้นผิวเส้นใยชั้นนอกถูกกำจัดออกมากขึ้นจนถึงชั้นร่องเส้นใยมีความสะอาด ช่วยให้แผ่นเส้นใยสามารถจัดเรียงตัวระหว่างเส้นใยได้ดีขึ้น ส่งผลต่อความหนาของแผ่นเส้นใยลดลงและค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะในตัวอย่าง N3 ที่พื้นผิวเส้นใยถูกกำจัดออกมากที่สุดบางส่วนถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิลทำให้พื้นผิวมีความเรียบ ซึ่งช่วยลดช่องว่างภายในแผ่นเส้นใยได้ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นปรากฏสูงสุดสอดคล้องกับ Pulkkinen และคณะ [21] ที่พบว่าเส้นใยที่มีผนังเส้นใยบางและมีความหยابน้อยกว่ามักจะส่งผลต่อการเรียงตัวของตัวเส้นใยได้ดีกว่าในโครงสร้างของแผ่นเส้นใย เนื่องจากความหนาแน่นปรากฏที่คำนวณได้จะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับความพรุนของแผ่นใยเส้น การปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนกระบวนการออกซิเดชันและเบนโซอิลเลชันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นเส้นใย



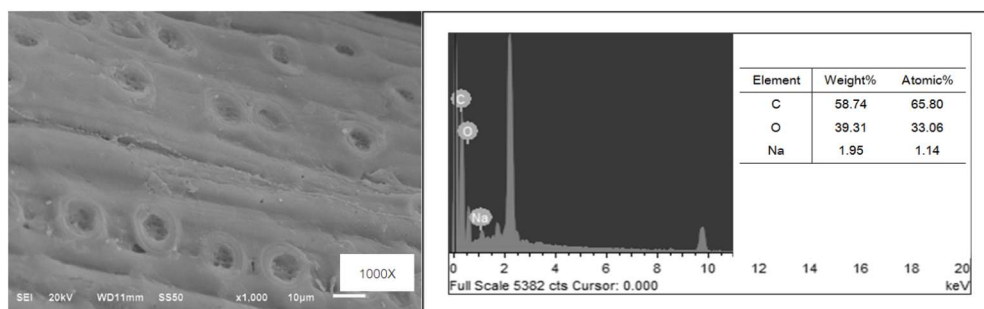
(A) R1



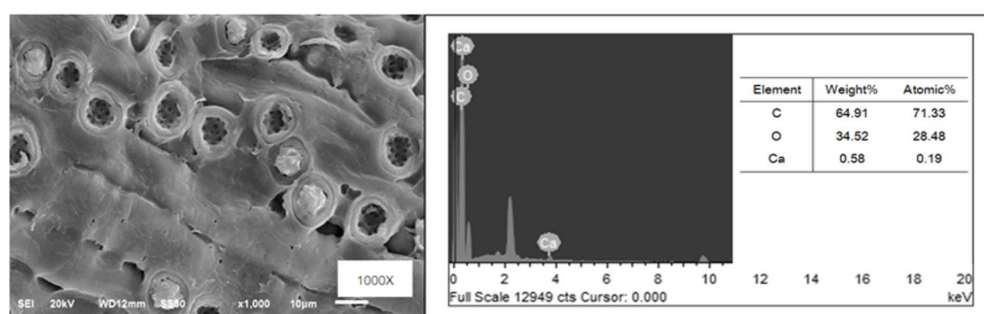
(B) R2



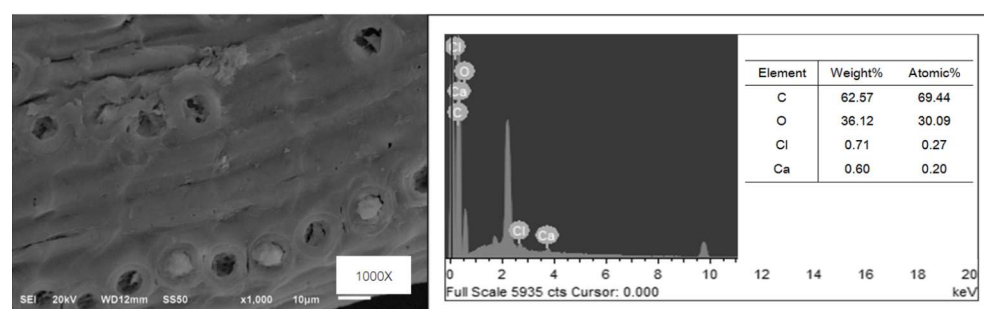
(C) R3



(D) N1



(E) N2



(F) N3

รูปที่ 1 ภาพถ่าย (SEM) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวและการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX



รูปที่ 2 ลักษณะแผ่นเส้นใยมะพร้าว R1, R2, R3

3.2.2 การดูดซึมน้ำ (Water drop absorption)

จากตารางที่ 2 แสดงค่าการดูดซึมน้ำแบบหยดของแผ่นเส้นใยมะพร้าว พบว่า การปรับสภาพเส้นใยแบบลำดับขั้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับการปรับสภาพ โดยตัวอย่าง R1 ซึ่งเป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 123.00 ± 48.09 วินาที แสดงถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำสูง เนื่องจากพื้นผิวชั้นนอกเส้นใยยังคงมีสิ่งเจือปนที่มีลักษณะชอบน้ำเป็นจำนวนมาก เช่น เฮมิเซลลูโลส และสารเพกติน เป็นต้น เมื่อเส้นใยถูกปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริก R2 ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเฉลี่ย 490.00 ± 32.13 วินาที เป็นผลมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตภายใต้สภาวะกรดที่กำจัดสิ่งเจือปนที่มีลักษณะชอบน้ำบนผิวเส้นใย ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และสารเพกติน นั้นถูกกำจัดออกเพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง R1 สอดคล้องกับภาพถ่ายสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวที่มีลักษณะผิวเส้นใยที่สะอาดและเรียบมากขึ้น (รูปที่ 1 (B) R2) ส่งผลให้สมบัติการดูดซึมน้ำของแผ่นเส้นใยลดลงอย่างมีนัยสำคัญสำหรับเส้นใยหลังการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ R3 พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำลดลงต่อเนื่องเฉลี่ย 551.00 ± 35.42 วินาที ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันที่ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิล ทำให้ถูกจำกัดการสัมผัสระหว่างน้ำกับเส้นใยโดยตรง ส่งผลให้พื้นผิวมีลักษณะไม่ชอบน้ำมากขึ้น ในกรณีของชุดการปรับสภาพแบบลำดับขั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและตามด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ N1–N3 พบว่า เส้นใยมีสมบัติการดูดซึมน้ำลดลง สามารถใช้เวลากการดูดซึมน้ำได้นานกว่า 30 นาที แสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการปรับสภาพแบบลำดับขั้นในการปรับเปลี่ยนพื้นผิวและสัณฐานวิทยาของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยกำจัดสิ่งเจือปนที่ชอบน้ำ เช่น เฮมิเซลลูโลสและเพกติน ทำให้ผิวเส้นใยสะอาดและเปิดพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อมา สอดคล้องกับการศึกษาของ Arsyad และคณะ [5] พบว่า การปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารออกซิไดซ์ เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยการปรับสภาพแบบออกซิเดชันนี้ช่วยลดความชอบน้ำของเส้นใยและเบนโซอิลคลอไรด์ส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง [13] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุด้วยเทคนิค EDX ที่ตรวจพบธาตุคลอรีนและคาร์บอนบนพื้นผิวเส้นใยหลังการปรับสภาพขั้นสุดท้าย สนับสนุนการเกิดพันธะเอสเทอร์และการแทนที่ของหมู่เบนโซอิลบนเส้นใย ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพแบบลำดับขั้นสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าวให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มความต้านทานการดูดซึมน้ำของแผ่นเส้นใย

3.2.3 ความต้านแรงดึง (Tensile strength)

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าความต้านแรงดึงของแผ่นเส้นใยมะพร้าว ซึ่งสะท้อนถึงความแข็งแรงของแผ่นเส้นใยและการยึดประสานระหว่างเส้นใยกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังการปรับสภาพด้วยสารเคมี

แบบลำดับขั้น ตัวอย่าง R1 ซึ่งเป็นแผ่นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุด 689.30 ± 13.06 นิวตันต่อเมตร เนื่องจากการพบลักษณะพื้นผิวเส้นใยยังคงมีสิ่งเจือปนและสารประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลส ซึ่งขัดขวางการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อเส้นใยผ่านการปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริก R2 พบว่า ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น $1,686.00 \pm 41.24$ นิวตันต่อเมตร สำหรับตัวอย่าง R3 ซึ่งหลังการปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์มีค่าความต้านแรงดึงลดลงเหลือ $1,137.00 \pm 35.09$ นิวตันต่อเมตร สอดคล้องกับรูปร่างสัณฐานวิทยาของเส้นใยมะพร้าว (รูปที่ 1(C) R3) ที่แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวเส้นใยเรียบขึ้นร่องระหว่างเส้นใยมีลักษณะตื้นขึ้น โดยปฏิกิริยาเบนโซอิลเลชันยังทำให้หมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับตัววัสดุประสานถูกแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิลที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำและทำให้แรงยึดระหว่างเส้นใยและวัสดุประสานลดลง [20,17] แนวโน้มเดียวกันพบในชุดการปรับสภาพแบบลำดับขั้นของเส้นใยมะพร้าว N1–N3 ซึ่งมีค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ย 792.00 ± 26.44 นิวตันต่อเมตร, $1,974.00 \pm 29.38$ นิวตันต่อเมตร, และ 857.40 ± 30.15 นิวตันต่อเมตร ตามลำดับ โดยค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของตัวอย่าง N2 แสดงถึงประสิทธิภาพของการปรับสภาพแบบลำดับขั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่สามารถปรับปรุงสภาพพื้นผิวเส้นใยให้เหมาะสมต่อการยึดติดกับตัวประสานมากที่สุด ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่พบใน (รูปที่ 1 (E) N2) โดยผิวเส้นใยมีลักษณะสะอาดและมีความหยาบเพิ่มขึ้น จากการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนินและแว็กซ์ออกจากพื้นผิวเส้นใย ซึ่งส่งผลให้เกิดร่องและพื้นที่ผิวมากขึ้น ช่วยให้เกิดอัตรการยืดยาวระหว่างเส้นใยกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ได้มากขึ้นและเสริมแรงยึดประสานในเชิงกลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การปรับสภาพด้วยเบนโซอิลคลอไรด์ ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ลดลง เนื่องจากการเกิดการแทนที่ด้วยหมู่เบนโซอิลบนผิวเส้นใย โดยสรุปการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกเป็นขั้นตอนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการเพิ่มสมบัติการยึดเกาะและความแข็งแรงเชิงกลของแผ่นเส้นใยมะพร้าวร่วมกับตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

3.3.4 อัตราการเผาไหม้ (Burning rate)

จากตารางที่ 2 พบว่า อัตราการเผาไหม้ของแผ่นเส้นใยมะพร้าวมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเส้นใยผ่านการปรับสภาพทางเคมี โดยตัวอย่าง R1 ซึ่งเป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ มีอัตราการเผาไหม้เฉลี่ยสูงสุดที่ 14.00 ± 1.80 มิลลิเมตรต่อวินาที ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแบบลำดับขั้น ได้แก่ R2, R3, N1 N2 และ N3 มีค่าอัตราการเผาไหม้เฉลี่ย 11.00 ± 1.32 , 10.00 ± 1.24 , 11.00 ± 1.51 , 9.00 ± 1.13 และ 7.00 ± 1.33 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเส้นใยช่วยเพิ่มสมบัติด้านการหน่วงไฟของวัสดุ การลดลงของอัตราการเผาไหม้นี้สามารถ

ตารางที่ 2 สมบัติของแผ่นเส้นใยมะพร้าว

ตัวอย่างแผ่นเส้นใย	ความหนาแน่นปรากฏ, kg/m ³	ความต้านทานการดูดซึมน้ำ, s	ความต้านแรงดึง, N/m	อัตราการเผาไหม้, mm/min
R1	536.36 ± 24.71	123.00 ± 48.09	689.30 ± 13.06	14.00 ± 1.80
R2	541.42 ± 28.36	490.00 ± 32.13	$1,686.00 \pm 41.24$	11.00 ± 1.32
R3	535.21 ± 25.48	551.00 ± 35.42	$1,137.00 \pm 35.09$	10.00 ± 1.24
N1	588.10 ± 27.60	$> 1,800.00$	792.00 ± 26.44	11.00 ± 1.51
N2	603.33 ± 22.15	$> 1,800.00$	$1,974.00 \pm 29.38$	9.00 ± 1.13
N3	711.49 ± 26.62	$> 1,800.00$	857.40 ± 30.15	7.00 ± 1.33

อธิบายได้ว่ากระบวนการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกช่วยในการกำจัดสิ่งเจือปนและสารอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีคาร์บอนสูงและติดไฟง่ายบนพื้นผิวเส้นใยบางส่วนออกจากลักษณะพื้นฐานเส้นใยรูปที่ 1 เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ลดลง จึงทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันขณะเผาไหม้เกิดได้ยากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ลดลงอย่างชัดเจน ผลการทดสอบดังกล่าวยังสัมพันธ์กับแนวโน้มของค่าความหนาแน่นปรากฏที่เพิ่มขึ้นหลังการปรับสภาพ ซึ่งช่วยลดช่องว่างภายในแผ่นเส้นใยและลดการแพร่กระจายของเปลวไฟระหว่างเส้นใยได้ดีขึ้น นอกจากนี้การปรับสภาพด้วยเบนโซิลคลอไรด์ในขั้นสุดท้ายทำให้เกิดการแทนที่ของหมู่เบนโซิล ส่งผลให้ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเส้นใยลดลง เมื่อแผ่นเส้นใยได้รับความร้อนจึงทำให้ความเร็วในการเผาไหม้ช้าลง [22] สอดคล้องกับการศึกษาของ Boussehel และคณะ [13] ที่พบว่า การปรับสภาพด้วยเบนโซิลคลอไรด์ทำให้เกิดหมู่เบนโซเอตบนโครงสร้างเซลลูโลสและส่งผลให้ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น ผลรวมของกระบวนการเหล่านี้ทำให้ตัวอย่าง R3 และ N3 มีความทนไฟสูงสุดในกลุ่มตัว R และ N

4. สรุป (Conclusions)

การศึกษาผลของการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวด้วยกระบวนการทางเคมีแบบลำดับขั้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซิลคลอไรด์ ตลอดจนการปรับสภาพที่เริ่มต้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกและเบนโซิลคลอไรด์ พบว่ากระบวนการปรับสภาพทางเคมีแบบลำดับขั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใยมะพร้าว การปรับสภาพเส้นใยที่เริ่มจากโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดผิวชั้นนอกของเส้นใยบางส่วนที่ถูกทำลาย หลุดลอกออกจากกระบวนการบด เช่น รำธาตุ สารอินทรีย์ และอื่น ๆ ออกจากพื้นผิวเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้แผ่นเส้นใยมีสมบัติลดการดูดซึมน้ำและช่วยเปิดโครงสร้างของผิวเส้นใยให้สารเคมีสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดีในการปรับสภาพขั้นต่อไป การปรับสภาพต่อด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ร่วมกับกรดซัลฟิวริกช่วยเพิ่มความหนาแน่นที่ผิวของเส้นใย ส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงของแผ่นเส้นใยเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ขณะที่การปรับสภาพขั้นสุดท้ายด้วยเบนโซิลคลอไรด์ทำให้เกิดการแทนที่ของหมู่เบนโซเอตบนพื้นผิวเส้นใย ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติลดความไม่ชอบน้ำและการหน่วงไฟ แม้ว่าจะทำให้ค่าความต้านแรงดึงลดลง จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพเส้นใยมะพร้าวแบบลำดับขั้นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตร่วมกับกรดซัลฟิวริกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยมะพร้าวให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในวัสดุเชิงประกอบ โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแข็งแรงเชิงกลสูง การลดการดูดซึมน้ำ และการยึดเกาะที่ดีระหว่างเส้นใยกับตัวประสานชนิดตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

5. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Bhattacharya SS, Parmar PM. Effect of chemical treatment on physical and mechanical properties of coconut fibre. SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. 2022;14(4):1–5. <https://doi.org/10.18090/samriddhi.v14i04.32>

[2] Nissar M, Chethan KN, Birjerane YA, Patil S, Shetty S, Das A. Coconut coir fiber composites for sustainable architecture: A comprehensive review of properties, processing, and

applications. Journal of Composites Science. 2025;9(10):516. <https://doi.org/10.3390/jcs9100516>

[3] Sahu P, Tiwari S, Om Prakash S. Surface modifications of natural fibers for use in preparation of biocomposites. SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. 2021;13(1):26–34. <https://doi.org/10.18090/samriddhi.v13i01.6>

[4] Samanth M, Bhat KS. Conventional and unconventional chemical treatment methods of natural fibres for sustainable biocomposites. Sustainable Chemistry for Climate Action. 2023;3:100034. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100034>

[5] Arsyad M, Soenoko R. The effects of sodium hydroxide and potassium permanganate treatment on roughness of coconut fiber surface. In: International Mechanical and Industrial Engineering Conference 2018 (IMIEC 2018); 2018 Aug 30–31; State University of Malang, Indonesia. p. 05004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820405004>

[6] Pannu AS, Singh S, Dhawan V. Effect of alkaline treatment on mechanical properties of biodegradable composite (BF/PLA) rod. Materials Today: Proceedings. 2021;46(19):9367–9371. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.912>

[7] Verma D, Goh KL. Effect of mercerization/alkali surface treatment of natural fibres and their utilization in polymer composites: Mechanical and morphological studies. Journal of Composites Science. 2021;5(7):175. <https://doi.org/10.3390/jcs5070175>

[8] Madhushree M, Vairavel P, Mahesha GT, Bhat KS. Oxidative modifications of cellulose: Methods, mechanisms, and emerging applications. Journal of Natural Fibers. 2025;22(1):2497910. <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2497910>

[9] Mohammed AA, Bachtar D, Rejab MRM, Hasany SF. Effect of potassium permanganate on tensile properties of sugar palm fibre reinforced thermoplastic polyurethane. Indian Journal of Science and Technology. 2017;10(7):1–5. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i7/111453>

[10] Birniwa AH, Abdullahi SS, Ali M, Mohammad REA, Jagaba AH, Amran M, et al. Recent trends in treatment and fabrication of plant-based fiber-reinforced epoxy composite: A review. Journal of Composites Science. 2023;7(3):120. <https://doi.org/10.3390/jcs7030120>

[11] Budiati E, Saputri FZ, Prasasti RIK, Elwin MR. Study on varied bagasse fiber and epoxy resin compositions with rice bran filler to biocomposite characteristics. JKPK (Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia). 2024;9(1):102–114. <https://doi.org/10.20961/jkpk.v9i1.72587>

[12] Kavitha SA, Priya RK, Arunachalam KP, Avudaiappan S, Saavedra Flores EI, Blanco D. Experimental investigation on

- strengthening of *Zea mays* root fibres for biodegradable composite materials using potassium permanganate treatment. Scientific Reports. 2024;14:12754. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58913-y>
- [13] Boussehel H, Guerira B, Jawaid M, Fouad H, Khiari R. Effect of benzoyl chloride treatment on morphological, thermal, mechanical, and hydrothermal aging properties of date palm/polyvinyl chloride (PVC) composites. Scientific Reports. 2024;14:20384. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71489-x>
- [14] Babayo H, Musa H, Garba MD. Fabrication of benzoyl chloride treated tiger-nut fiber reinforced insect repellent hybrid composite. Scientific Reports. 2022;12:8797. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12876-0>
- [15] Abisha M, Priya RK, Arunachalam KP, Avudaiappan S, Saavedra Flores EI, Parra PF. Biodegradable green composites: Effects of potassium permanganate (KMnO₄) treatment on thermal, mechanical, and morphological behavior of *Butea Parviflora* (BP) fibers. Polymers. 2023;15(9):2197. <https://doi.org/10.3390/polym15092197>
- [16] Li X, Tabil LG, Panigrahi S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. Journal of Polymers and the Environment. 2007;15:25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>
- [17] Olusanya SO, Ajayi SM, Sodeinde KO, Fapojuwo DP, Atunde MO, Diduyemi AE, et al. Hydrophobic modification of cellulose from oil palm waste in aqueous medium. Polymer Bulletin. 2024;81:1349-1371. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04756-y>
- [18] Gil H, Zuleta AA, Reyes DE. Mechanical properties and sustainability aspects of coconut fiber modified concrete. Scientia et Technica. 2021;26(1):64–70. <https://doi.org/10.22517/23447214.22901>
- [19] Bachtiar D, Mohammed AA, Palanisamy S, Imran AI, Siregar JP, Rejab MRM, et al. Effect of alkaline treatment on the thermal and mechanical properties of sugar palm fibre reinforced thermoplastic polyurethane composites. Scientific Reports. 2025;15:14085. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99227-x>
- [20] Osman Z, Elamin M, Ghorbel E, Charrier B. Influence of alkaline treatment and fiber morphology on the mechanical, physical, and thermal properties of polypropylene and polylactic acid biocomposites reinforced with kenaf, bagasse, hemp fibers and softwood. Polymers. 2025;17(7):844. <https://doi.org/10.3390/polym17070844>
- [21] Pulkkinen I, Alopaeus V, Fiskari J, Joutsimo O. The use of fibre wall thickness data to predict handsheet properties of eucalypt pulp fibres. O Papel (Brazil). 2008;69(10):71–85. https://www.researchgate.net/publication/251927679_The_use_of_fibre_wall_thickness_data_to_predict_handsheet_properties_of_eucalypt_pulp_fibres
- [22] Xiao N, Zheng X, Song S, Pu J. Effects of complex flame retardant on the thermal decomposition of natural fiber. BioResources. 2014;9(3):4924–4933. <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4924-4933>