

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุคล้ายหนังจากเส้นใยเห็ดโดยการปรับสภาพทางเคมี

ปวีรศา วาสุกี¹, เยาวภา อร่ามศิริจุฑาเวทย์¹ และ เจษฎา โพธิรัตน์^{1*}

¹ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*fscicsd@ku.ac.th

บทคัดย่อ

วัสดุคล้ายหนังจากเส้นใยเห็ดผลิตโดยการเพาะเลี้ยงเส้นใยเห็ดในของเหลือทิ้งทางการเกษตร ให้ลักษณะเทียบเคียงกับหนังสัตว์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การปรับสภาพทางเคมีเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงและปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมต่อการใช้งานยิ่งขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับสภาพทางเคมีเพื่อพัฒนาวัสดุให้มีสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ดีขึ้น โดยในงานวิจัยนี้เพาะเลี้ยงเชื้อเห็ดขอนป่า (*Lentinus* sp.) สายพันธุ์ KU091 ในซีลี้อยู่เพื่อผลิตวัสดุคล้ายหนัง โดยเปรียบเทียบการปรับสภาพทางเคมีระหว่าง 4% NaOH และ 75% ethanol สำหรับกระบวนการ deacetylation และ 10% Citric acid และ 5% Tannic acid ในกระบวนการ cross-linking ผลการทดสอบแรงดึงพบว่า การปรับสภาพด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 10% Citric acid ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) เท่ากับ 4.49 MPa และค่า strain at maximum เท่ากับ 4.1% ซึ่งสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า 4% NaOH และ 10% Citric acid มีศักยภาพในการเสริมสร้างสมบัติเชิงกลของวัสดุคล้ายหนังจากเส้นใยเห็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: วัสดุคล้ายหนังจากเส้นใยเห็ด การปรับสภาพทางเคมี สมบัติเชิงกล

Improvement of Mechanical Properties of Leather-like Materials from Mushroom Mycelia using Chemical Modification

Pawarisa Wasukree¹, Yaovapa Aramsirirujwet¹ and Chetsada Pothiratana^{1*}

¹Department of Microbiology, Faculty of Science, Kasetsart University

*fscicsd@ku.ac.th

Abstract

Leather-like materials from mushroom mycelia are produced by mycelial cultivation in agricultural waste, comparable to animal leather and environmental friendly. Chemical modification is a key approach to improve mechanical strength and tailoring material properties for practical applications. Therefore, this study aimed to investigate the effects of chemical treatments on improving the mechanical properties of mycelium-based leather substitutes. In this work, sawdust, an agricultural waste material, was used as a substrate for cultivating wild mushroom mycelium (*Lentinus* sp.), strain KU091, to produce leather-like materials. Chemical modification was performed by comparing 4% NaOH and 75% ethanol for the deacetylation process, and 10% citric acid and 5% tannic acid for the cross-linking process. Tensile testing results showed that the combination of treatment 4% NaOH and 10% citric acid yielded the highest ultimate tensile strength (UTS) of 4.49 MPa and a strain at maximum of 4.1 %, outperforming all other experimental conditions. These findings demonstrate that treatment with 4% NaOH and 10% citric acid effectively enhances the mechanical properties of leather-like materials from mushroom mycelia.

Keywords: Leather-like materials from mushroom mycelia, Chemical modification, Mechanical properties

1. บทนำ

วัสดุทดแทนหนังที่ได้จากเส้นใยเห็ดเป็นวัสดุรูปแบบใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และกำลังได้รับความนิยมในฐานะทางเลือกทดแทนหนังสัตว์ เช่น หนังวัว เป็นต้น วัสดุชนิดนี้ผลิตจากการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเพาะเลี้ยงเส้นใยเห็ด ซึ่งมีพอลิเมอร์ชีวภาพในผนังเซลล์ ได้แก่ ไคตินและพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของวัสดุ [1] และหลังจากการปรับสภาพทางกายภาพและทางเคมี จะได้แผ่นชีวมวลจากเส้นใยเห็ดที่มีลักษณะและคุณสมบัติเสมือนหนังสัตว์

การผลิตหนังตามแบบเดิมนั้นอาจต้องใช้เวลาานาน โดยหนังสัตว์อาศัยการทำปศุสัตว์ซึ่งใช้เวลา รวมทั้งอาหารและพื้นที่มาก อีกทั้งการทำปศุสัตว์ก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจกในปริมาณมาก รวมถึงกระบวนการฟอกและผลิตหนังยังมีการใช้สารเคมีอันตรายที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [2] ในทางตรงกันข้าม การผลิตวัสดุทดแทนหนังจากเส้นใยเห็ดสามารถทำได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่สัปดาห์ และยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงนับเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืน

โดยงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยเห็ดขอนป่า (*Lentinus* sp.) สายพันธุ์ KU091 ซึ่งเป็นเห็ดกลุ่มย่อยของเห็ดขอนและเป็นกลุ่มเห็ดที่ย่อยสลายไม้ (wood-decay fungi) [3] มีศักยภาพในการเจริญเติบโตบนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้ดี และสามารถสร้างโครงข่ายเส้นใยที่มีความหนาแน่น เหมาะต่อการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุชีวภาพจากเส้นใยเห็ด [4]

อย่างไรก็ตาม วัสดุทดแทนหนังจากเส้นใยเห็ดยังมีข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และความเสถียรของโครงสร้างวัสดุ ซึ่งส่งผลต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุทดแทนหนังจากเส้นใยเห็ด โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการปรับสภาพทางเคมี ได้แก่ ดีอะเซทิลเลชัน (deacetylation) และการเกิดพันธะเชื่อมขวาง (crosslinking) เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล (mechanical properties) [5]

2. วิธีการศึกษา

2.1 สายพันธุ์ของเห็ดและการเตรียมหัวเชื้อ

เชื้อเห็ดขอนป่า (*Lentinus* sp.) สายพันธุ์ KU091 ถูกนำมาใช้ในการศึกษา โดยเริ่มจากการเพาะเลี้ยงบนอาหาร Potato Dextrose Agar ซึ่งประกอบด้วย Dextrose 20 กรัม Potato Infusion 4 กรัม และ Agar 15 กรัม นำมาหลอมในน้ำ 1 ลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

สำหรับการเตรียมหัวเชื้อเมล็ดข้าวฟ่าง นำเมล็ดข้าวฟ่างล้างในน้ำสะอาด แช่เมล็ดข้าวฟ่างในน้ำ ประมาณ 3 ชั่วโมง จากนั้นล้างเมล็ดข้าวฟ่างที่แช่น้ำไว้โดยใช้น้ำระบบ RO 2 ครั้ง และนำไปต้มในน้ำ RO เดือด ให้เมล็ดข้าวฟ่างมีลักษณะข้างนอกนิ่มแต่ข้างในแข็ง และผึ่งให้แห้ง จากนั้นนำไปใส่ขวดแล้วปิดปากขวดด้วยจุกสำลี นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำเส้นใยเห็ดที่เลี้ยงบน PDA ออกมาโดยใช้ Cork borer เบอร์ 3 นำไปเพาะเลี้ยงในเมล็ดข้าวฟ่าง 1 ขวดใช้ขึ้นวัน 2 ขึ้น บ่มที่อุณหภูมิห้อง จนเจริญเต็มขวด

2.2 การผลิตวัสดุคล้ายหนังจากเส้นใยเห็ด

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยทำการปรับความชื้นให้อยู่ที่ 60% จากนั้นบรรจุขี้เลื่อยลงในถุงเพาะเห็ดในปริมาณถุงละ 100 กรัม แล้วทำการนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้น นำหัวเชื้อเมล็ดข้าวฟ่างที่มีการเจริญของเส้นใยเห็ดใส่ลงในถุงวัสดุเพาะขี้เลื่อยภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ โดยใช้อัตราส่วนหัวเชื้อต่อวัสดุเพาะเท่ากับ 1:10 (w/w) และนำไปบ่มจนเส้นใยเจริญและกระจายเต็มถุงวัสดุเพาะ

เมื่อเส้นใยเจริญเต็มถุงแล้ว นำใส่ลงกล่องแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปแผ่นเส้นใยเห็ด โดยแต่ละกล่องบรรจุวัสดุเพาะจำนวน 2 ถุง ประมาณ 200 กรัม จากนั้นกดอัดผิวหน้าให้แน่นเพื่อให้ผิวหน้ามีความเรียบสม่ำเสมอ และบ่มในสภาวะที่มีดเป็นเวลา 7 วัน เพื่อส่งเสริมการเจริญของเส้นใยในวัสดุเพาะ หลังจากนั้นย้ายไปบ่มในสภาวะได้รับแสงธรรมชาติเป็นเวลา 21 วัน เพื่อให้เส้นใยเจริญปกคลุมผิวหน้าอย่างสมบูรณ์ เมื่อเส้นใยเจริญทั่วผิวหน้าแล้วทำการลอกเฉพาะแผ่นเส้นใยเห็ดออก จากนั้นนำแผ่นที่ได้ไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำให้เส้นใยหยุดกิจกรรม (inactivation) ก่อนนำไปใช้ในการปรับสภาพทางเคมีในขั้นตอนต่อไป

2.3 การปรับสภาพทางเคมีของวัสดุ

การปรับสภาพทางเคมีของวัสดุในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการดีอะเซทิลเลชัน (deacetylation) และกระบวนการเชื่อมขวางทางเคมี (cross-linking) เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยแต่ละกระบวนการเลือกใช้สารเคมีจำนวน 2 ชนิดเป็นตัวแทนในการศึกษา ได้แก่ 4% sodium hydroxide (NaOH) และ 75% ethanol สำหรับกระบวนการ deacetylation และ 10% citric acid และ

5% tannic acid สำหรับกระบวนการ cross-linking ซึ่งขั้นตอนการทดลองดัดแปลงจากวิธีที่มีรายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [5-9]

ขั้นตอนการปรับสภาพวัสดุด้วยสารเคมีแต่ละชนิดดำเนินการดังนี้

4% NaOH : แช่แผ่นเส้นใยเห็ดในสารละลาย 4% NaOH ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำ DI

75% ethanol : แช่แผ่นเส้นใยเห็ดในสารละลาย 75% ethanol ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ DI

10% citric acid : แช่แผ่นเส้นใยเห็ดในสารละลาย 10% citric acid ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ DI

5% tannic acid : แช่แผ่นเส้นใยเห็ดในสารละลาย 5% tannic acid ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ DI

หลังจากปรับสภาพทางเคมีแล้ว นำแผ่นเส้นใยเห็ดแช่ในสารละลาย polyethylene glycol (PEG 400) ความเข้มข้น 20% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นวัสดุด้วยเครื่อง hot press ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 10 นาที

เพื่อประเมินผลของสารเคมีแต่ละชนิด รวมถึงผลของการใช้ร่วมกันของสารเคมี จึงกำหนดการทดลองทั้งหมด 9 รูปแบบ ดังนี้ ได้แก่ control (ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี), การใช้สารเดี่ยว 4 ชนิด (4% NaOH, 75% ethanol, 10% citric acid, 5% tannic acid) และการใช้ร่วมกันระหว่าง NaOH/citric acid, NaOH/tannic acid, ethanol/citric acid และ ethanol/tannic acid

2.4 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ

2.4.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของวัสดุเริ่มจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของแผ่นวัสดุด้วยตาเปล่า ได้แก่ สี ลักษณะพื้นผิว ความสม่ำเสมอ และการเกิดตำหนิบนผิววัสดุ จากนั้นจึงศึกษาลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยเตรียมตัวอย่างด้วยการแช่ในไนโตรเจนเหลวและชุบให้แตกเป็นชิ้นเล็ก จากนั้นนำขึ้นตัวอย่างติดบนแท่นด้วยเทปคาร์บอน และเคลือบผิวด้วยทองด้วยเครื่อง sputter coater ก่อนนำไปตรวจสอบด้วย SEM (SU3800, Hitachi High-Tech, Japan) นอกจากนี้ยังวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวอย่างด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) (Ultim Max 65, Oxford Instruments, UK) และประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม AZtec

2.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง (tensile strength) โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยขึ้นทดสอบถูกตัดเป็นรูปกระดูกสันหลังตามวิธีการของงานวิจัยก่อนหน้านี้ [10] กำหนดค่า preload ที่ 0 N และอัตราความเร็วหัวจับ (crosshead speed) ที่ 5 mm/min ผลการทดสอบได้ค่า ultimate tensile strength (UTS), strain at maximum load และ Young's modulus

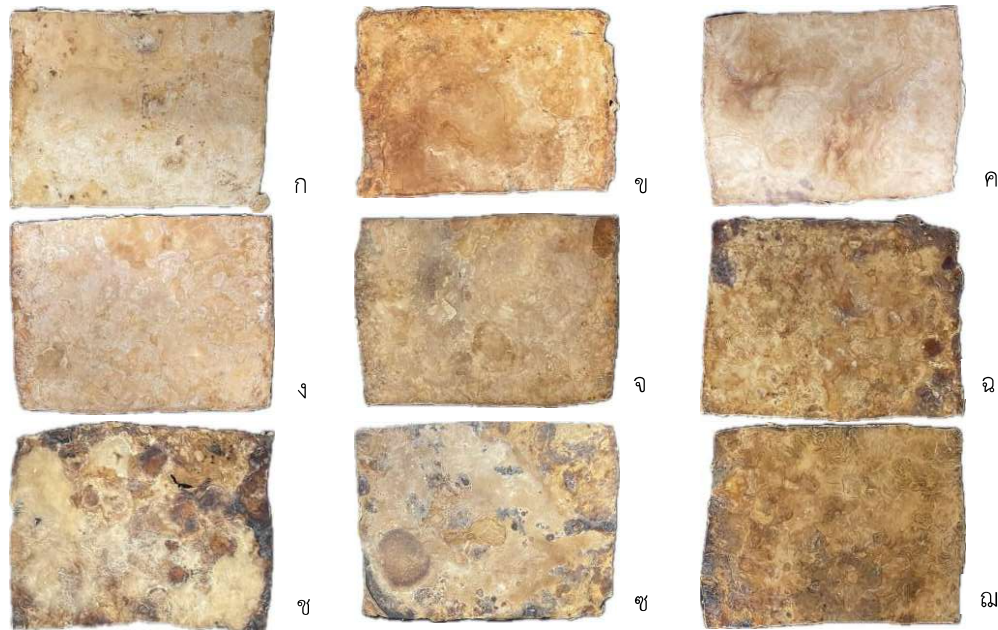
2.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลการทดลองแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD) จากการทดลองอย่างน้อย 4 ซ้ำ ($n = 4$) วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย one-way analysis of variance (ANOVA) โดยใช้โปรแกรม SPSS และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วย Tukey's post hoc test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะของแผ่นวัสดุเส้นใยเห็ด

ลักษณะของแผ่นวัสดุจากเส้นใยเห็ดภายใต้สภาพทางเคมีที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 1 พบว่า แผ่นวัสดุทุกชุดการทดลองมีลักษณะพื้นผิวเรียบและมีสีน้ำตาลคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม แผ่นวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีด้วย NaOH ความเข้มข้น 4% และ tannic acid ความเข้มข้น 5% มีสีน้ำตาลเข้มกว่าการปรับสภาพทางเคมีด้วยวิธีอื่น (ภาพที่ 1ข, 1จ, 1ช และ 1ฉ)



ภาพที่ 1 ลักษณะแผ่นวัสดุจากเส้นใยเห็ดภายใต้สภาพทางเคมีที่แตกต่างกัน

(ก) Control (ข) 4% NaOH (ค) 75% ethanol (ง) 10% citric acid (จ) 5% tannic acid
(ฉ) 4% NaOH + 10% citric acid (ช) 4% NaOH + 5% tannic acid
(ฅ) 75% ethanol + 10% citric acid (ฉ) 75% ethanol + 5% tannic acid

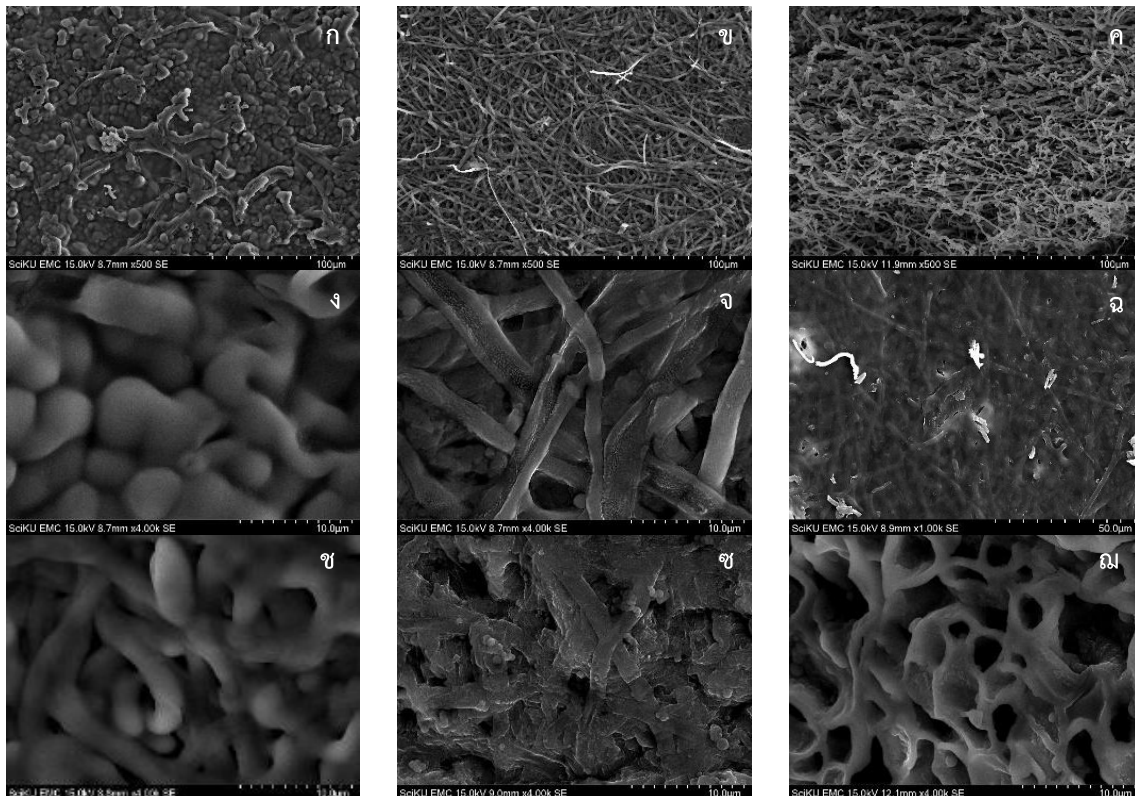
3.2 สันฐานวิทยาของวัสดุ

การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของการปรับสภาพทางเคมีแสดงดังภาพที่ 2 เพื่อศึกษาลักษณะสันฐานวิทยาของเส้นใยภายใต้สภาวะการปรับสภาพที่แตกต่างกัน และประเมินผลของสารเคมีแต่ละชนิดต่อโครงสร้างเส้นใยเบื้องต้น พบว่า ในทุกการปรับสภาพทางเคมี บริเวณด้านบนและด้านล่างของแผ่นไมซีเลียม ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2ก และ 2ข เส้นใยมีลักษณะสานกันอย่างหนาแน่น ซึ่งอาจเกิดจากแรงกดอัดระหว่างกระบวนการ hot press ขณะที่บริเวณภายในแผ่นเส้นใย ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2ค มีลักษณะสานกันอย่างหลวมและมีช่องว่างระหว่างเส้นใยมากกว่า ซึ่งอาจเกิดจากการทับซ้อนแบบสุ่มของเส้นใยภายในโครงสร้าง

ตัวอย่างพื้นผิวด้านบนของวัสดุที่ไม่ปรับสภาพทางเคมีกำลังขยาย 4000 เท่า พบว่าเส้นใยมีลักษณะพื้นผิวโดยรวมค่อนข้างเรียบ สม่ำเสมอ และไม่พบความขรุขระหรือโครงสร้างผิวที่เด่นชัด ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2ง ซึ่งอาจสะท้อนว่าโครงสร้างผนังเซลล์ของเส้นใยยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในขณะที่ตัวอย่างการปรับสภาพด้วย 4% NaOH ปรากฏลักษณะเป็นตุ่มขนาดเล็กกระจายอยู่บนผิวเส้นใย (ภาพที่ 2จ) ซึ่งอาจเกิดจากการตกค้างหรือตกตะกอนของสารเคมีระหว่างกระบวนการ deacetylation หรือ 4% NaOH ไปทำปฏิกิริยาให้เกิดลักษณะเป็นรอยแตกบนผนังเซลล์ ขณะที่ตัวอย่างที่ผ่าน

การปรับสภาพด้วย 10% citric acid ที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบลักษณะคล้ายการเคลือบบนพื้นผิวเส้นใย (ภาพที่ 2ฉ) ซึ่งอาจเกิดจากการสะสมของ citric acid หรือการเริ่มเกิดพันธะเชื่อมขวางบริเวณพื้นผิวของเส้นใย

สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 75% ethanol ไม่พบลักษณะเด่นทางสัณฐานวิทยาที่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น (ภาพที่ 2ข) ซึ่งอาจเนื่องมาจาก ethanol มีบทบาทหลักเป็นตัวทำละลายและไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผนังเซลล์อย่างเด่นชัด อย่างไรก็ตาม การปรับสภาพด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid พบว่าพื้นผิวเส้นใยมีลักษณะขรุขระมากขึ้น และเส้นใยมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่น อัดแน่น (ภาพที่ 2ซ) ซึ่งอาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเส้นใยภายหลังการเกิด deacetylation ร่วมกับการเกิดพันธะเชื่อมขวาง ทำให้เส้นใยยึดเหนี่ยวกันมากขึ้น และเมื่อใช้ 75% ethanol ร่วมกับ 10% citric acid พบว่าเส้นใยมีลักษณะหลอมรวมกันและเรียงตัวแน่นมากขึ้น (ภาพที่ 2ณ) ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงการเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยเพิ่มขึ้นภายหลังการปรับสภาพทางเคมี



ภาพที่ 2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นวัสดุจากเส้นใยเห็ดภายหลังการปรับสภาพทางเคมีที่แตกต่างกันภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- (ก) พื้นผิวด้านบนของตัวอย่างควบคุม (500X)
- (ข) พื้นผิวด้านล่างของตัวอย่างควบคุม (500X)
- (ค) โครงสร้างภายในของตัวอย่างควบคุม (500X)
- (ง) พื้นผิวด้านบนของตัวอย่างควบคุม (4000X)
- (จ) ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 4% NaOH (4000X)
- (ฉ) ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 10% citric acid (1000X)
- (ช) ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 75% ethanol (4000X)
- (ซ) ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid (4000X)
- (ณ) ตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 75% ethanol ร่วมกับ 10% citric acid (4000X)

3.3 องค์ประกอบธาตุของวัสดุ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค SEM-EDS ของแผ่นไมซีลเลียมที่ได้จากการปรับสภาพทางเคมีที่แตกต่างกัน พบว่าตัวอย่างประกอบด้วยธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน (C) ในช่วง 54.1%–65.3% และออกซิเจน (O) ในช่วง 33.7%–45.4% ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างผนังเซลล์ของเส้นใยเห็ด [11]

นอกจากนี้ ตรวจพบธาตุรอง ได้แก่ โซเดียม (Na) โดยแผ่นควบคุมมีปริมาณโซเดียมต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.11% ขณะที่แผ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 5% tannic acid มีปริมาณโซเดียมเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.20–0.44% และแผ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid มีค่าอยู่ในช่วง 0.35–0.54% ส่วนแผ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 4% NaOH เพียงอย่างเดียวมีปริมาณโซเดียมสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.12–1.27% ซึ่งอาจเกิดจากการตกค้างของโซเดียมจากสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพแม้ผ่านกระบวนการล้างแล้ว

ธาตุรองอื่นที่ตรวจพบ ได้แก่ คลอรีน (Cl) (0.09%–0.11%), โพแทสเซียม (K) (0.02%–0.33%), แมกนีเซียม (Mg) (0.06%–0.15%), อะลูมิเนียม (Al) (0.06%–0.19%), แคลเซียม (Ca) (0.07%–0.33%) และฟอสฟอรัส (P) (0.08%–0.23%) ขณะที่ซิลิกอน (Si) พบเฉพาะในตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 5% tannic acid

3.4 สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุเส้นใยเห็ด

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของวัสดุเพาะเชื้อเลี้ยงที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพทางเคมีที่แตกต่างกัน พบว่า การปรับสภาพด้วยสารละลาย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid ให้ค่า Ultimate Tensile Strength (UTS) สูงที่สุด เท่ากับ 4.49 MPa และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่น ($p < .05$) ขณะที่การปรับสภาพด้วย 4% NaOH ให้ค่า UTS รองลงมา เท่ากับ 4.37 MPa ส่วนค่าต่ำสุดพบในตัวอย่าง control และ 5% tannic acid ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.55 และ 1.67 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า 5% tannic acid ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ control ($p \geq .05$) และทั้งสองสภาวะอยู่ในกลุ่มค่าต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่น

นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับสภาพด้วยสารละลาย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid ให้ค่า strain at maximum load สูงที่สุด เท่ากับ 4.1% ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่น ($p < .05$) ขณะที่การปรับสภาพด้วย 5% tannic acid ให้ค่า strain ต่ำสุด เท่ากับ 1.51%

อย่างไรก็ตาม ค่า Young's modulus ของวัสดุเพาะเชื้อเลี้ยงในทุกสภาวะการปรับสภาพทางเคมีมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq .05$) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การปรับสภาพทางเคมีด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid สามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุได้ แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเชิงยืดหยุ่นของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุจากเส้นใยเห็ดภายหลังการปรับสภาพทางเคมีที่แตกต่างกัน

การปรับสภาพทางเคมี	UTS (MPa)		Strain at Max (%)		Young's Modulus (MPa)	
	Mean $\pm$ SD	C.V.(%)	Mean $\pm$ SD	C.V.(%)	Mean $\pm$ SD	C.V.(%)
Control	1.55 $\pm$ 0.6 ^a	38.60	1.91 $\pm$ 0.44 ^{ab}	23.23	127.35 $\pm$ 52.07 ^a	40.89
4% NaOH	4.37 $\pm$ 1.77 ^{bc}	40.53	3.5 $\pm$ 0.77 ^{bc}	22.10	291.55 $\pm$ 86.28 ^a	29.59
75% ethanol	2.75 $\pm$ 0.64 ^{abc}	23.19	3.7 $\pm$ 1.63 ^{bc}	43.98	145.23 $\pm$ 57.7 ^a	39.73
10% citric acid	2.24 $\pm$ 1.3 ^{abc}	58.31	1.96 $\pm$ 0.53 ^{ab}	27.28	193.08 $\pm$ 134.95 ^a	69.90
5% tannic acid	1.67 $\pm$ 0.91 ^a	54.75	1.51 $\pm$ 0.4 ^a	26.31	162.23 $\pm$ 97.44 ^a	60.07
4% NaOH + 10% citric acid	4.49 $\pm$ 1.57 ^c	35.04	4.1 $\pm$ 0.86 ^c	21.05	220.9 $\pm$ 77.33 ^a	35.01

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุจากเส้นใยเห็ดภายใต้การปรับสภาพทางเคมีที่แตกต่างกัน (ต่อ)

การปรับสภาพทางเคมี	UTS (MPa)		Strain at Max (%)		Young's Modulus (MPa)	
	Mean $\pm$ SD	C.V.(%)	Mean $\pm$ SD	C.V.(%)	Mean $\pm$ SD	C.V.(%)
4% NaOH + 5% tannic acid	2.81 $\pm$ 1.5 ^{abc}	53.55	3.77 $\pm$ 0.86 ^{bc}	22.89	164.4 $\pm$ 112.52 ^a	68.44
75% ethanol + 10% citric acid	1.81 $\pm$ 0.28 ^{ab}	15.77	1.83 $\pm$ 0.23 ^{ab}	12.32	145.8 $\pm$ 45.49 ^a	31.20
75% ethanol + 5% tannic acid	1.72 $\pm$ 0.43 ^{ab}	25.01	2.8 $\pm$ 0.93 ^{abc}	33.21	98.35 $\pm$ 17.1 ^a	17.38

หมายเหตุ ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n = 4) วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติแยกภายในแต่ละคอลัมน์ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับแตกต่างกัน (a-c) แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดย C.V. (%) = (SD/Mean) $\times$ 100

ผลการศึกษาพบว่า การปรับสภาพด้วย 4% NaOH ให้สมบัติเชิงกลของวัสดุสูงกว่าการใช้ 75% ethanol ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการ deacetylation ภายใต้สภาวะต่าง โดย NaOH สามารถไฮโดรไลซ์หมู่เอซิติลในโครงสร้างไคติน/ไคโตซาน ส่งผลให้เกิดหมู่เอมิโนอิสระเพิ่มขึ้น และช่วยส่งเสริมการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยภายในโครงสร้างวัสดุ [12] ขณะที่ ethanol มีบทบาทหลักเป็นตัวทำละลายและไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอย่างมีนัยสำคัญ [13] จึงอาจส่งผลต่อการเพิ่มสมบัติเชิงกลได้น้อยกว่า

นอกจากนี้ การใช้ citric acid สามารถส่งเสริมการเกิด chemical crosslinking ภายในผนังเซลล์ของเส้นใยเห็ด ผ่านปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลขององค์ประกอบกลูแคน ส่งผลให้โครงสร้างวัสดุมีความหนาแน่นและต่อเนื่องมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึงและค่า strain ที่เพิ่มขึ้นในงานวิจัยนี้ [14] ในทางตรงกันข้าม แม้ tannic acid จะสามารถเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยผ่านพันธะไฮโดรเจนได้ แต่มีรายงานว่าอาจทำให้โครงสร้างวัสดุมีความแข็งตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่า tannic acid ให้ค่า strain at maximum load ต่ำ [9]

การใช้ NaOH ร่วมกับ citric acid อาจก่อให้เกิดผลเสริมกัน (synergistic effect) โดย NaOH ช่วยเพิ่มหมู่เอมิโนอิสระผ่านกระบวนการ deacetylation ขณะที่ citric acid ช่วยส่งเสริมการเกิด crosslinking ระหว่างเส้นใย จึงทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยังพบว่า แผ่นวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid มีลักษณะการสานตัวของเส้นใยที่แน่นมากยิ่งขึ้น (ภาพที่ 2ข)

แม้ว่าการปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับ citric acid จะช่วยเพิ่มค่า UTS และ strain แต่ค่า Young's modulus ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพดังกล่าวส่งผลต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยและความสามารถในการรับแรงดึงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงเชิงยืดหยุ่นของโครงสร้างวัสดุ ดังนั้น การประยุกต์ใช้กระบวนการ deacetylation ร่วมกับ crosslinking จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุทดแทนหนังจากเส้นใยเห็ด โดยเฉพาะด้านความต้านทานแรงดึงและความสามารถในการยืดตัว ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญต่อการนำวัสดุไปพัฒนาเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและความยืดหยุ่น

4. สรุปผลการวิจัย

การปรับสภาพทางเคมีมีผลต่อโครงสร้างพื้นผิว องค์ประกอบธาตุ และสมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุจากเส้นใยเห็ดอย่างชัดเจน โดยการปรับสภาพด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด ทั้งในด้านค่า Ultimate Tensile Strength (UTS) และค่า strain at maximum load ซึ่งอาจเกิดจากผลร่วมกันของกระบวนการ deacetylation และ chemical crosslinking ที่ช่วยเพิ่มการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยภายในโครงสร้างวัสดุ ขณะที่การใช้ 5% tannic acid ให้ค่าความต้านทานแรงดึงและความสามารถในการยึดตัวต่ำกว่าสถานะอื่น

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ SEM แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพทางเคมีส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย ขณะที่ผลการวิเคราะห์ EDS แสดงความแตกต่างขององค์ประกอบธาตุของวัสดุ โดยเฉพาะการตกค้างของโซเดียมในกลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย 4% NaOH ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพด้วย 4% NaOH ร่วมกับ 10% citric acid เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนาวัสดุจากเส้นใยเห็ดให้มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานวัสดุชีวภาพ

5. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Vandelook, S., Elsacker, E., Van Wylick, A., De Laet, L., & Peeters, E. (2021). Current state and future prospects of pure mycelium materials. *Fungal Biology and Biotechnology*, 8(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s40694-021-00128-1>
- [2] Amobonye, A., Lalung, J., Awasthi, M. K., & Pillai, S. (2023). Fungal mycelium as leather alternative: A sustainable biogenic material for the fashion industry. *Sustainable Materials and Technologies*, 38, e00724.
- [3] Karunarathna, S. C., Yang, Z. L., Zhao, R.-L., Vellinga, E. C., Bahkali, A., Chukeatirote, E., & Hyde, K. D. (2011). Three new species of *Lentinus* from northern Thailand. *Mycological Progress*, 10(4), 389-398.
- [4] Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., & Athanassiou, A. (2017). Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties. *Scientific reports*, 7(1), 41292.
- [5] Xu, R., Wu, W., Zhong, Y., Zhang, L., Xu, H., Mao, Z., & Ji, B. (2025). High-Strength and Biodegradable Mycelial Leather Materials Cross-linked with Dialdehyde Carboxymethyl Cellulose. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(21), 8057-8067.
- [6] Wang, Z., Wu, S., Fan, C., Zheng, X., Zhang, W., Wu, D., Wang, X., & Kong, H. (2021). Optimisation of enzymatic saccharification of wheat straw pre-treated with sodium hydroxide. *Scientific reports*, 11(1), 23234.
- [7] Song, L., Liu, Y., Xiao, S., Yuan, X., & Han, X. (2025). Revolutionizing Eco-Friendly Leather Production: A Freeze-Thaw and Liquid Fermentation Approach with Fungal Mycelium. *Journal of Fungi*, 11(4), 326.
- [8] Crawford, A., Miller, S. R., Branco, S., Fletcher, J., & Stefanov, D. (2024). Growing mycelium leather: a paste substrate approach with post-treatments. *Research Directions: Biotechnology Design*, 2, e6.
- [9] Benetti, B., Conti, F., & Dimitriadis, P. (2025). Mycelium-based leather: A review on post-processing treatments and material enhancements. *Environmental and Climate Technologies*, 29(1), 390-404.



- [10] Appels, F. V. W., Van den Brandhof, J. G., Dijksterhuis, J., De Kort, G. W., & Wösten, H. A. B. (2020). Fungal mycelium classified in different material families based on glycerol treatment. *Communications Biology*, 3(1), 334. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-1064-4>
- [11] Gow, N. A., Latge, J.-P., & Munro, C. A. (2017). The fungal cell wall: structure, biosynthesis, and function. *Microbiology spectrum*, 5(3), 10.1128/microbiolspec. funk-0035-2016.
- [12] Huq, T., Khan, A., Brown, D., Dhayagude, N., He, Z., & Ni, Y. (2022). Sources, production and commercial applications of fungal chitosan: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 7(2), 85-98.
- [13] Tan, X., Wang, G., Zhong, L., Xie, F., Lan, P., & Chi, B. (2021). Regeneration behavior of chitosan from ionic liquid using water and alcohols as anti-solvents. *International journal of biological macromolecules*, 166, 940-947.
- [14] Elsacker, E., Vandeloek, S., & Peeters, E. (2023). Recent technological innovations in mycelium materials as leather substitutes: a patent review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1204861.