การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนาโนไฟบริลเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าวด้วยกระบวนการปั่นเชิงกล เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงของฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์/นาโนไฟบริลเซลลูโลส

The Reduction Diameter of Nano Fibrils Cellulose Extracted from Rice Straws via the Mechanical Grinding Process to be Used as a Reinforcing Material in PVA:NFC Bioplastic Films

ประสบพร จุลบุตร[1] สุพรรณี ปริญญาวุฒิชัย[1] และ พิไลพร หนูทองคำ[1*]
Prasopporn Junlabhut[1] Supannee Parinyavuttichai[1] and Pilaipon Nuthongkum[1]
[1]สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
[1]Department of Applied Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University
วันที่ส่งบทความ : 10 มีนาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 24 เมษายน 2566 วันที่ตอบรับบทความ : 14 มิถุนายน 2566
Received: 10 March 2023, Revised: 24 April 2023, Accepted: 14 June 2023

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ทำการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนาโนไฟบริลเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าวเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการปั่นเชิงกล เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงของฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์/นาโนไฟบริลเซลลูโลส การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลสภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาในการปั่นเชิงกล 0, 30 และ 60 นาที ที่ความเร็วรอบ 25,000 รอบต่อนาที ผลการศึกษาพบว่า เวลาในการปั่น 60 นาที ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลสจาก 5.01 ± 0.38 ไมโครเมตร ลดลงเป็น 16.31 ± 1.31 นาโนเมตร ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางโครงสร้าง และหมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้ ยืนยันการเป็นเซลลูโลสชนิด I ผลการศึกษาลักษณะทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลสลดลงถึงระดับนาโนเมตร ขนาดที่เล็กลงจากกระบวนการปั่นเชิงกล ส่งผลต่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของเซลลูโลส เป็นผลดีต่อการประยุกต์เป็นวัสดุเสริมแรงในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพในเมทริกซ์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ผลการศึกษาการขึ้นรูปอัตราส่วนปริมาณโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ต่อนาโนไฟบริลเซลลูโลส (PVA:NFC) 10:0 7:3 5:5 3:7 และ 0:10 พบว่าเมื่อปริมาณนาโนไฟบริลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากเดิมที่มีลักษณะใส โปร่งแสง จะมีความโปร่งแสงลดลงตามปริมาณของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงพบว่าปริมาณเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสียูวีและวิชิเบิลที่ดีขึ้น นอกจากนี้ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าปริมาณนาโนไฟบริลเซลลูโลสยังส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากให้มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.12 ± 0.22 เมกะปาสคาล

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: miss.pilaipon@gmail.com

เมื่อเติมวัสดุเสริมแรงนาโนไฟบริลเซลลูโลสในอัตราส่วน 7:3 ลงในสายโซ่เมทริกซ์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำหนักในฟิล์มได้ดี ทำให้ค่ายังมอดูลัสของฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด โดยรวมแล้วงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าวเหลือทิ้งทางการเกษตร สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในฟิล์มพลาสติกชีวภาพ PVA:NFC โดยเน้นความสำคัญของการปรับสัดส่วนของ PVA:NFC เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพให้เหมาะสม

คำสำคัญ : พลาสติกชีวภาพ เซลลูโลส ฟางข้าว วัสดุเสริมแรง การปั่นเชิงกล

Abstract

In this research, nano fibril cellulose was extracted from rice straw waste using a mechanical grinding process and used as a reinforcing material in bio-based films made of polyvinyl alcohol and cellulose nanofibrils. The size reduction of the cellulose fibers was studied under different grinding times of 0, 30 and 60 minutes at a speed of 25,000 rpm. The results showed that the size of the cellulose fibers decreased from 5.01 ± 0.38 micrometers to 16.31 ± 1.31 nanometers after 60 minutes. The physical, structural, and chemical properties of the extracted nano fibril cellulose confirmed that the fibers were cellulose I. The surface morphology of the cellulose was examined by FE-SEM, which revealed that the nano fibril cellulose had a smaller size compared to conventional methods, and uniform dispersion was obtained, which is beneficial for its application as a reinforcing material in the production of bio-based films. In the bio-based film process, the effect of the ratio of polyvinyl alcohol to nano fibril cellulose (PVA:NFC) on the optical and mechanical properties was studied. The addition of nano cellulose in films increased the UV blocking ability, indicating that the increased amount of cellulose had an effect on the ability of the films to prevent UV radiation. Furthermore, the reinforced cellulose had an effect on the mechanical properties, with the tensile strength at yield reaching a maximum of 7.12 ± 0.22 MPa with a ratio of PVA:NFC of 7:3. Adding cellulose to the matrix of PVA improved the Young's modulus of the film. This research demonstrates the potential of using nano fibril cellulose extracted from rice straw waste as a reinforcing material in bio-based films made of PVA:NFC. The study also highlights the optimized ratio of PVA:NFC to achieve suitable bio plastic films.

Keywords: Bio-based films, Cellulose, Rice straws, Reinforcement material, Mechanical grinding process

1. บทนำ

พลาสติกเป็นที่นิยมนำมาใช้อย่างมากในชีวิตประจำวัน ผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนมากผลิตจากสารปิโตรเคมีซึ่งมีจำนวนการผลิตตอบสนองผู้บริโภคเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากและเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน เนื่องจากพลาสติกใช้เวลาในการย่อยสลายนาน ทำให้ดินเสื่อมคุณภาพ เมื่อเผาทำลายเกิดเป็นมลพิษทางอากาศสูง พลาสติกชีวภาพจึงเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่เป็นที่ได้รับความสนใจในการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้สามารถนำมาทดแทนการใช้พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี วัสดุชีวมวลหลายชนิด เช่น โปรตีนจากถั่ว ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง [1]-[2] ที่ถูกนำมาสกัดและผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องถิ่น กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ และที่สำคัญเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

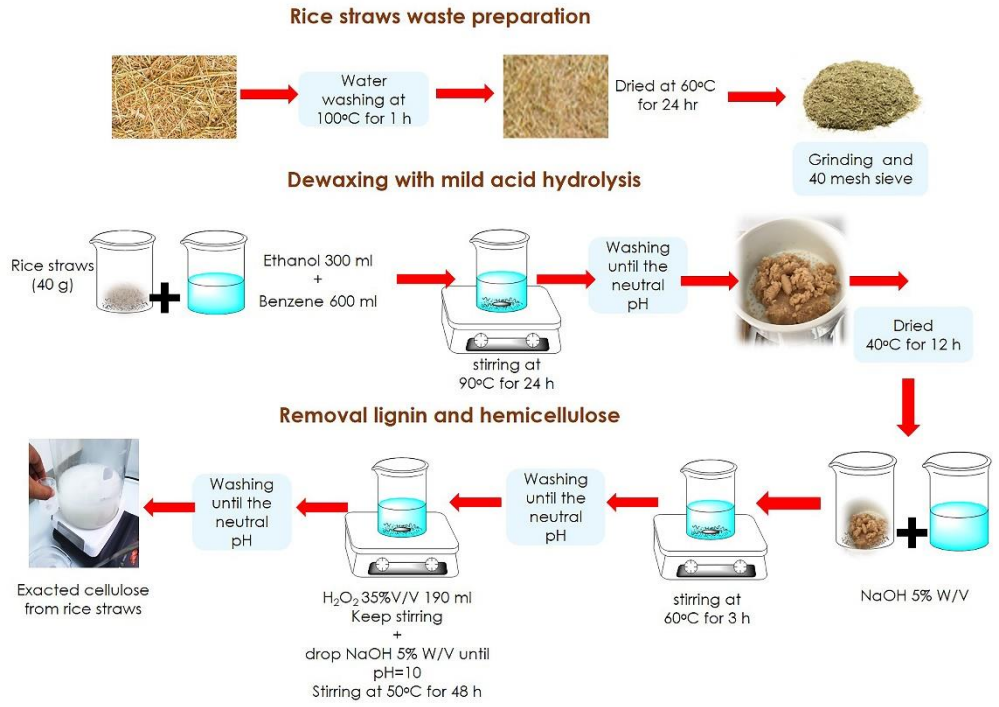
ฟางข้าวก็เป็นวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรที่น่าสนใจ ตามข้อมูลจากกรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [3] ในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 10.25 ล้านไร่ คิดเป็นร้อยละ 17 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด โดยภายหลังฤดูการเก็บเกี่ยวผลผลิตจะมีฟางข้าวเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก เนื่องจากฟางข้าวไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ทันก่อนที่เกษตรกรจะทำการปลูกข้าวรอบใหม่ เกษตรกรจึงนิยมกำจัดตอซังและฟางข้าว ด้วยวิธีการเผา และวิธีการไถกลบ เพื่อเตรียมปลูกข้าวในรอบใหม่ ส่งผลทำให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อมหลายมิติ ผลเสียต่อดิน เป็นมลพิษทางอากาศ เป็นตัวการทำให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก ส่งผลระยะยาวต่อสภาวะแก๊สเรือนกระจกของไทยในปัจจุบัน จากการศึกษาองค์ประกอบของฟางข้าว พบว่าฟางข้าวมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสโดยเฉลี่ยร้อยละ 39.56 เฮมิเซลลูโลสโดยเฉลี่ยร้อยละ 27.36 ลิกนินโดยเฉลี่ยร้อยละ 14.12 และปริมาณอื่นๆ เฉลี่ยร้อยละ 18.96 [4] ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะนำชีวมวลจากฟางข้าวมาสกัดโดยใช้กระบวนการไฮโดรไลซิสเชิงเคมีร่วมกับกระบวนการลดขนาดเชิงกล เพื่อให้ได้เส้นใยเซลลูโลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และสม่ำเสมอ เพิ่มการกระจายตัวที่ดีเพื่อประยุกต์เป็นวัสดุเสริมแรงในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพ จากการศึกษาพบว่านอกจากเส้นใยเซลลูโลสจะมีศักยภาพเป็นวัสดุเสริมแรงในการขึ้นรูป ซึ่งมีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าว เส้นใยเซลลูโลสยังมีความแข็งแรง ทนต่อแรงกระทำได้มาก นอกจากนั้นยังมีสมบัติช่วยป้องกันแสงยูวีและวิซิเบิล [5] เพื่อเพิ่มมูลค่าในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานคือเมื่อความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นของฟิล์มจะมีค่าลดลง ทำให้เกิดการฉีกขาด เสียรูปได้ง่าย ส่งผลถึงการนำไปใช้งานในวงจำกัด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพด้วยสารเติมแต่ง [6] จากการศึกษาพบว่าโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นเมทริกซ์ที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากพอลิเมอร์ไม่มีสี มีความความยืดหยุ่นสูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีสมบัติเชิงกลที่ดี [7] นอกจากนี้ยังมีความปลอดภัย ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งจึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงการแพทย์อีกด้วย [8] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากวัสดุผสมระหว่าง PVAและเซลลูโลสที่สกัดจากวัสดุชนิดต่างๆ เช่นก้านใบบัวหลวง [8] แป้ง [9] กล้วย [10] และกากมันสำปะหลัง [11] เป็นต้น ผลการรายงานพบว่าวัสดุผสมระหว่างเมทริกซ์ PVA และเซลลูโลสค่าความทนต่อแรงกระแทกและการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลส และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำและการแพร่ผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มที่ดีขึ้น นอกจากนี้เซลลูโลสยังมีสมบัติในการดูดซับแสงยูวีอีกด้วย เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มจะช่วยเพิ่มการดูดกลืนรังสียูวีได้ [12]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวมวลทางการเกษตรโดยการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าวเหลือทิ้ง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเป็นวัสดุเสริมแรงในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพโดยอาศัยโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 ศึกษาการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าว

กระบวนการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าว แสดงดังรูปที่ 1 เริ่มต้นจากทำความสะอาดฟางข้าวพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105) อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยการต้มในน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตัดฟางข้าวด้วยกรรไกรตัดขนาดประมาณ 5 มิลลิเมตรและนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติกำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์ รุ่น BE-127A เพื่อลดขนาด ร่อนกำหนดความละเอียดของฟางข้าวด้วยตะแกรงขนาด 0.4 มิลลิเมตร (40 Mesh) จากนั้นแช่ฟางข้าวละเอียดปริมาณ 40 กรัม ลงในเอทานอล 300 มิลลิลิตรผสมกับเบนซีน 600 มิลลิลิตร พร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดแวกซ์ สี และน้ำมัน [13]-[16] แล้วล้างด้วยน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 4000 รอบต่อวินาที เพื่อแยกเส้นใยที่เหลือโดยได้นำเส้นใยฟางข้าวที่ผ่านการล้างมาอบให้แห้งด้วย



รูปที่ 1. กระบวนการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าว

อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 น้ำหนักต่อปริมาตร (W/V) ในฟางข้าว [13] ปั่นกวนให้เข้ากันพร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเถ้า แล้วล้างด้วยน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 4000 รอบต่อวินาที ขั้นตอนกำจัดลิกนิน เฮมิเซลลูโลสและการฟอกสีทำโดยเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 35 ปริมาตรต่อปริมาตร (V/V) ปริมาตร 190 มิลลิลิตร ลงในเส้นใยฟางข้าว ปั่นกวนให้เข้ากัน จากนั้นค่อยๆ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 น้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 120 มิลลิลิตร จนมีค่า pH 10 ปั่นกวนให้เข้ากันพร้อมให้ความร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง [16] ล้างด้วยน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็ว 4000 รอบต่อวินาที ให้มีค่า เป็นกลาง pH 7 จะได้เส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการสกัดจากฟางข้าว

2.2 ศึกษาการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลสด้วยกระบวนการเชิงกล โดยใช้เครื่องปั่นอัตโนมัติ รุ่น BE-127A กำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์ ความเร็วรอบ 25,000 รอบต่อนาที ทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงและจำกัดเวลาในกระบวนการปั่น 10 นาที 30 นาที และ 60 นาที

การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลส ทำโดยนำเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการสกัดจากฟางข้าว เติมน้ำปลอดประจุ และปั่นด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติกำลังไฟฟ้า 1,200 วัตต์ รุ่น BE-127A ความเร็วรอบ 25,000 รอบต่อนาที ทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงและจำกัดเวลาในกระบวนการปั่น 10 นาที 30 นาที และ 60 นาที จะได้เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากกระบวนการเชิงกล

2.3 กระบวนการวิเคราะห์สมบัติของนาโนไฟบริลเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการสกัดและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกระบวนการปั่นเชิงกล

วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractrometer: XRD) วิเคราะห์พันธะเคมี และหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโทรไมโครสโคป (Fourier-transform Infrared Spectroscopy: FTIR) วิเคราะห์ลักษณะทางพื้นผิว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อีมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)

2.4 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์/นาโนไฟบริลเซลลูโลส (PVA:NFC) และทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรง

โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ น้ำหนักโมเลกุล 89,000-98,000 ความหนาแน่น 1.4406 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เตรียมสารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ปั่นกวนสารพร้อมให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส และเตรียมสารละลายเส้นใยนาโนไฟบริลเซลลูโลสที่ผ่านการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเครื่องปั่นเชิงกลเป็นเวลา 60 นาที ในน้ำให้มีความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์/นาโนไฟบริลเซลลูโลส โดยการผสมสารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์กับสารละลายนาโนไฟบริลเซลลูโลสที่เตรียมไว้ในอัตราส่วน 10:0 7:3 5:5 3:7 และ 0:10

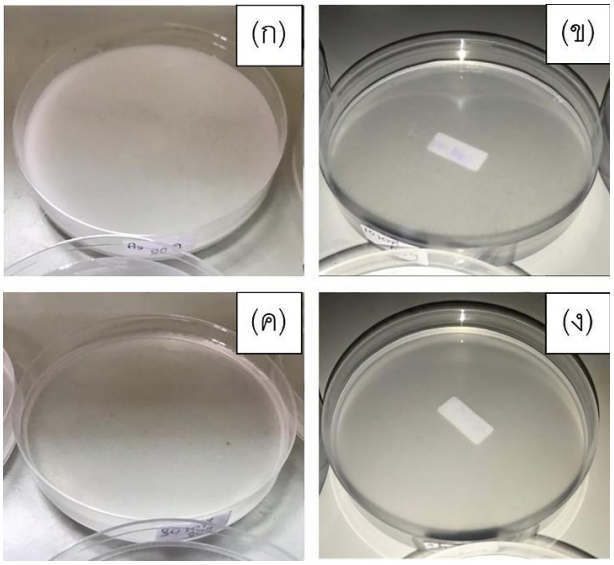
ปริมาตรต่อปริมาตร ปริมาณ 30 มิลลิลิตร [8] จากนั้นปั่นกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทลงแม่พิมพ์วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 90 มิลลิเมตรเพื่อขึ้นรูป และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์/นาโนไฟบริลเซลลูโลส (PVA:NFC) ถูกทดสอบสมบัติเชิงแสงด้วยด้วยเครื่องมืออัลตราไวโอเลตและวิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) สมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรงนาโนไฟบริลเซลลูโลสที่เจืออยู่ในฟิล์มพลาสติกชีวภาพ PVA:NFC ด้วยการทดสอบการรับแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile Strength at Yield) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break) และค่ายังมอดูลัส (Young's Modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D882

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

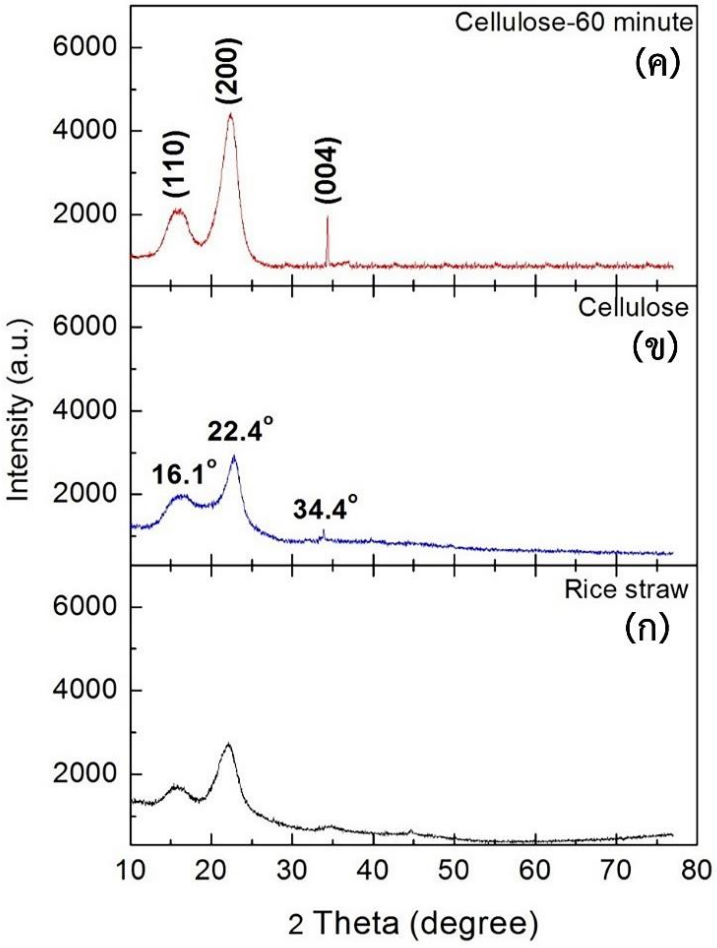
3.1 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าว และการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนเซลลูโลสโดยกระบวนการเชิงกล ด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติ

การสกัดเซลลูโลสจากฟางข้าว และการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลลูโลสโดยกระบวนการเชิงกลด้วยเครื่องปั่นอัตโนมัติ ความเร็วรอบ 25,000 รอบต่อนาที ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาในการปั่น 0-60 นาที สามารถทำได้โดยผ่านกระบวนการกำจัดแวกซ์ สี น้ำมัน เถ้า เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และกระบวนการฟอกสี จากการสกัดพบว่าลักษณะทางกายภาพของเซลลูโลสแบบเปียกที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ



รูปที่ 2. ลักษณะทางกายภาพเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าวในสภาวะเปียก ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาในการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยกระบวนการปั่นเชิงกล (ก) 0 นาที (ข) 10 นาที (ค) 30 นาที และ (ง) 60 นาที

ลดขนาด มีลักษณะทางกายภาพเป็นสีขาวขุ่น เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ชัดเจน ไม่สม่ำเสมอ มีการทะลุผ่านของแสงได้น้อย ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) แต่เมื่อนำเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้ไปผ่านกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเครื่องปั่นเชิงกล ภายใต้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขเวลาในการปั่นที่แตกต่างกัน 10, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ พบว่าระยะเวลามีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เล็กลง ส่งผลให้เซลลูโลสมีความใสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีการกระจายตัวได้ดีขึ้น จึงเกิดการทะลุผ่านของแสงได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3. ลักษณะทางโครงสร้างของเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าว ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาในการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยกระบวนการปั่นเชิงกล (ก) ฟางข้าว (ข) 0 นาที และ (ค) 60 นาที

การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม 10-70 องศา แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าฟางข้าวก่อนการนำมาสกัดเป็นเซลลูโลส มีรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม 16.1 องศา และ 22.4 องศา ตรงกับระนาบ (110) และ (200) ตามลำดับ ซึ่งสเปคตรัมการเลี้ยวเบนสามารถยืนยันว่าฟางข้าวมีลักษณะทางโครงสร้างเป็นเซลลูโลสที่มีในธรรมชาติ เมื่อนำสเปคตรัมการเลี้ยวเบนที่ได้ไปคำนวณค่าดัชนีความเป็นผลึก (Crystallinity index) ของเซลลูโลส [17]-[21] ตามสมการที่ (1)

$$Crystallinility\ index\ \% = \frac{I_{200} - I_{am}}{I_{200}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ I_{200} คือค่าความเข้มสูงสุด (Peak intensity) ที่ระนาบการเลี้ยวเบน (200)

I_{am} คือความเข้มของส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous background) โดยพิจารณาที่ตำแหน่งมุมประมาณ 18°

ผลจากการคำนวณพบว่าค่าดัชนีความเป็นผลึกของเส้นใยฟางข้าวมีค่าร้อยละ 32 ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐานน้อยมาก โดยปกติส่วนที่เป็นผลึกของเซลลูโลสจะยึดติดกันอย่างมีระเบียบด้วยพันธะไฮโดรเจน แต่สำหรับส่วนที่เป็นอสัณฐานจะมีความไม่เป็นระเบียบ และมีจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมากกว่าส่วนที่เป็นระเบียบ [22] เมื่อพิจารณาฟางข้าวที่ผ่านขั้นตอนการสกัดเส้นใยเซลลูโลสโดยไม่ผ่านกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและเส้นเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยวิธีเชิงกลเป็นเวลา 60 นาที พบว่ารูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ความเข้มที่ระนาบการเลี้ยวเบน (200) สูงขึ้นอย่างเด่นชัด แสดงถึงความเป็นผลึกที่มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นที่ตำแหน่งการเลี้ยวเบน 34.4 องศา ซึ่งตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (004) มีความเข้มเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเส้นใยฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการสกัด ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางโครงสร้างของ Cellulose I [23] ค่าดัชนีผลึกดังตารางที่ 1 ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการกำจัดลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และส่วนประกอบอื่นเพื่อสกัดเส้นใยเซลลูโลส และกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สามารถทำให้ส่วนที่เป็นโครงสร้างของอสัณฐานลดลง [21] ส่งผลให้ค่าดัชนีความเป็นผลึกของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 37 และ 54 ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับพีคการเลี้ยวเบนที่แคบลง และความเข้มที่ระนาบการเลี้ยวเบนที่เด่นชัดขึ้น

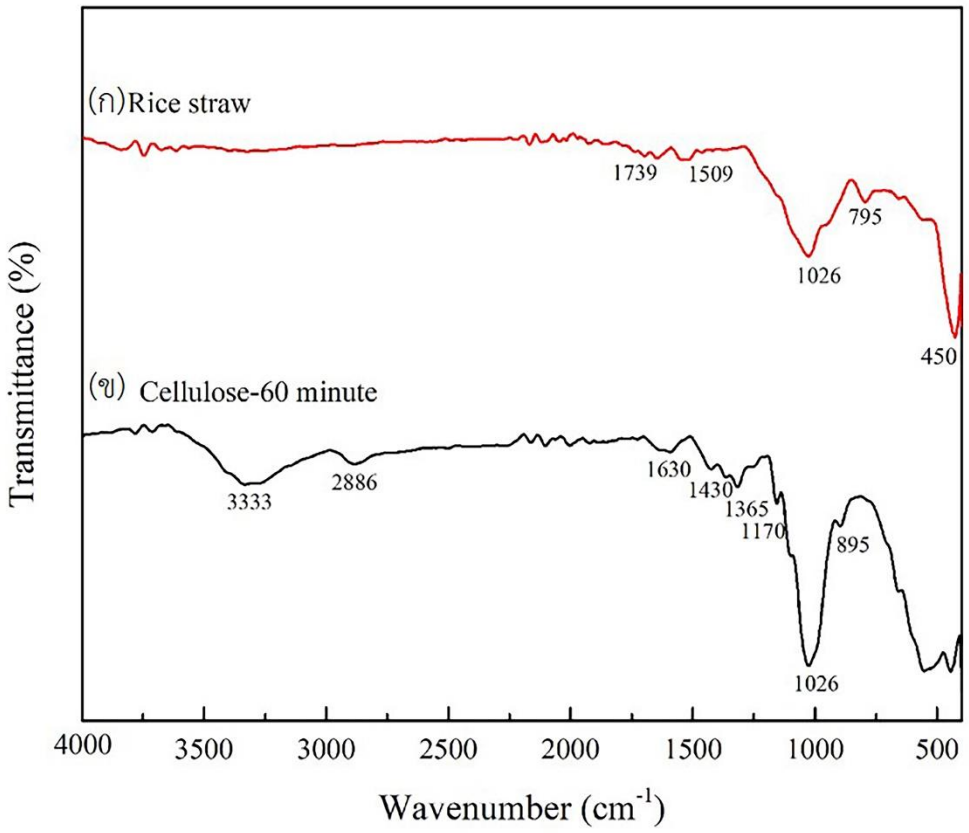
เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับงานวิจัยอื่น พบว่ากระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง นอกจากจะส่งผลต่อค่าความเป็นผลึกที่สูงขึ้น กระบวนการเชิงกล ความเร็วรอบของการปั่นเชิงกล และเวลาในการปั่นยังส่งผลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยด้วย นอกจากนั้นกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันมีผลต่อชนิดของเซลลูโลสที่สกัดได้ด้วย

ตารางที่ 1. เปรียบเทียบค่าดัชนีผลึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย และชนิดของเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าวด้วยกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยวิธีต่างกัน

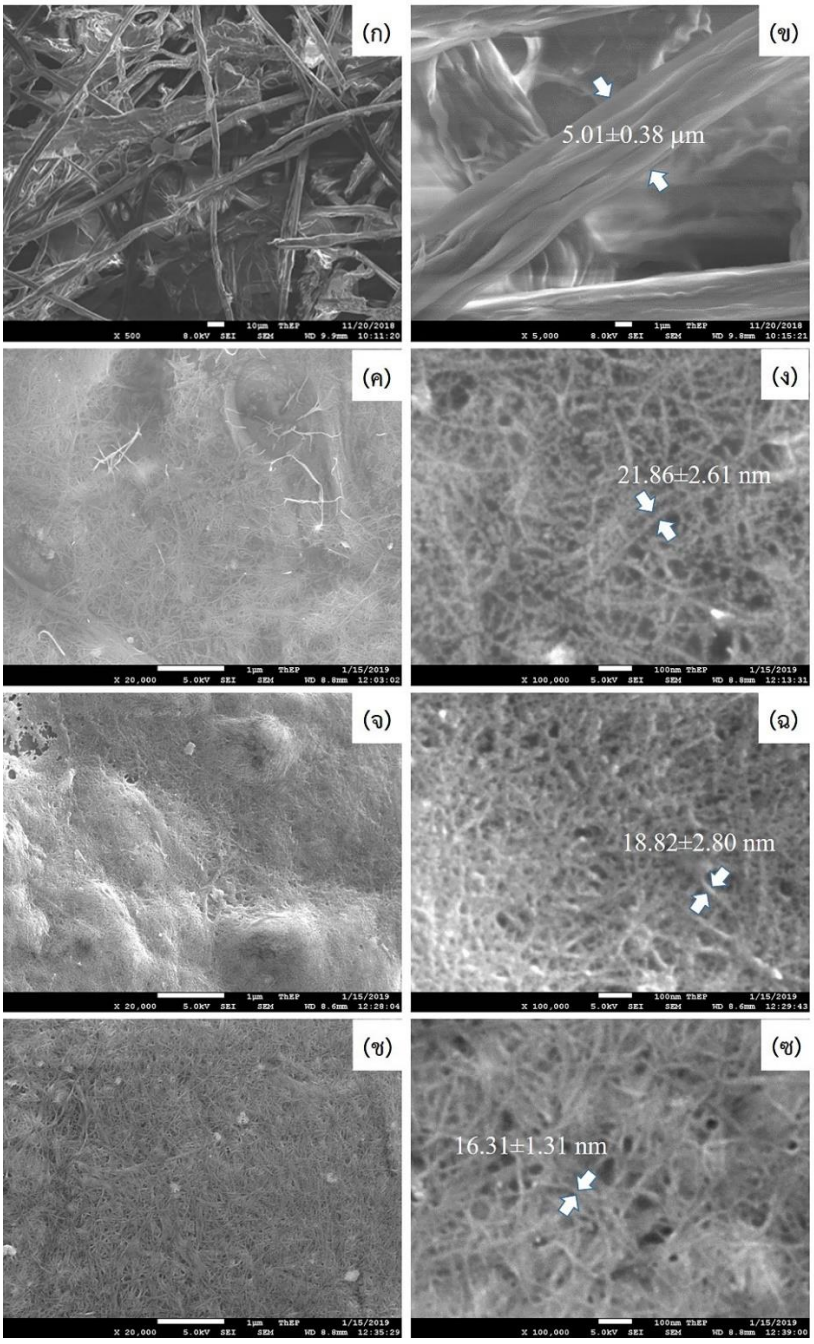
ตัวอย่าง	ค่าดัชนีผลึก (%)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย	ชนิดของเซลลูโลส
This work			
ฟางข้าว	32.18	N/A	N/A
เซลลูโลส	36.90	5.01±0.38 μm	ไมโครไฟบริล
ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกระบวนการปั่นเชิงกล 25,000 rpm 60 นาที	53.80	16.31±1.31 nm	นาโนไฟบริล
Dilamian, M., et.al. (2019). [20]			
ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกระบวนการปั่นเชิงกล 15,000 rpm 3 ชั่วโมง	65.78	370 nm	นาโนไฟบริล
Agustin, M. B., et.al. (2014). [23]			
ลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด โดยใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 50 %V/V เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	76.10	10-12 nm	นาโนคริสตัล

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมีของฟางข้าวและเซลลูโลสที่ผ่านการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเครื่องปั่นเชิงกลเป็นเวลา 60 นาที ช่วงเลขคลื่น 4,000–400 ต่อเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์สเปคตรัมการสั่นของแสงในย่านอินฟราเรดพบว่า ฟางข้าวแสดงฟังก์ชันของพันธะทางเคมีที่อยู่ระหว่างตำแหน่งเลขคลื่น 1740–1736 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืด (Stretching vibration) ของพันธะ C=O สอดคล้องกับหมู่อะซิติล (Acetyl groups) และยูโรนิคเอสเทอร์ (Uronic ester groups) ที่เกิดในเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และหมู่ฟีนอลไฮดรอกซิล (Phenolic hydroxyl group) ในลิกนิน [24]-[26] และตำแหน่งเลขคลื่น 1596–1509 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C=C ในวงแหวนอะโรมาติกของลิกนิน [24] ซึ่งหลังผ่านกระบวนการสกัดเส้นใยเซลลูโลส พบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวหายไปซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าลิกนินและเฮมิเซลลูโลสสามารถกำจัดออกได้ทั้งหมด หลังผ่านกระบวนการสกัด จากภาพพบว่าเซลลูโลสปรากฏการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3333 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ในพอลีแซคคาไรด์ ซึ่งเกิดจากการสั่นภายในและระหว่างโมเลกุลของพันธะไฮโดรเจนในเซลลูโลส การเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมชี้ให้เห็นว่าจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลอิสระหรือในโครงสร้างเซลลูโลสเพิ่มขึ้น การสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่นใกล้เคียง 2900 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของไฮโดรคาร์บอน (C-H) การสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1630 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนพันธะของน้ำในเซลลูโลส [21] การปรากฏของพีคขนาดเล็กที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1430 และ 1365 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับการสั่นแบบงอ (Bending vibration) ของพันธะ $-CH_2$ และพันธะ –CH ตามลำดับ ที่พบในเซลลูโลส [24],[27]-[29] และพีคขนาดเล็กที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1170 ต่อเซนติเมตร แสดงการสั่นแบบยืดที่ไม่สมมาตรของพันธะ C-O-C ในเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเซลลูโลส การสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1026 และ 895 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับการสั่นของวงแหวนไพราโนส (Pyranose ring) และพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา (β-Glycosidic linkage) ระหว่างโมเลกุลหน่วย

ย่อยของกลูโคสที่พบในเซลลูโลส [21],[24],[27]-[28],[30] นอกจากนี้พบการสั่นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 795 และ 450 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับการสั่นแบบบิดงอของพันธะ Si-O-Si ในเส้นใยฟางข้าว [31]-[33] ซึ่งพบว่าความเข้มของสเปกตรัมที่ตำแหน่งดังกล่าวหายไปและมีขนาดลดลงตามลำดับในเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ อาจกล่าวได้ว่ากระบวนการสังเคราะห์สามารถกำจัดสารประกอบซิลิกาออกจากเส้นใยฟางข้าวได้ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเซลลูโลสที่ผ่านการสังเคราะห์จากฟางข้าวและผ่านกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้น มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและมีความบริสุทธิ์สูง



รูปที่ 4. รูปแบบพันธะและหมู่ฟังก์ชันของ (ก) ฟางข้าว และ (ข) นาโนไฟบริลเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกระบวนการปั่นเชิงกลเป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 5. ลักษณะทางพื้นผิวของเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าว และขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลสภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาในการลดขนาดโดยกระบวนการปั่นเชิงกล (ก)-(ข) 0 นาที (ค)-(ง) 10 นาที (จ)-(ฉ) 30 นาที และ (ช)-(ซ) 60 นาที ที่กำลังขยายต่างกัน

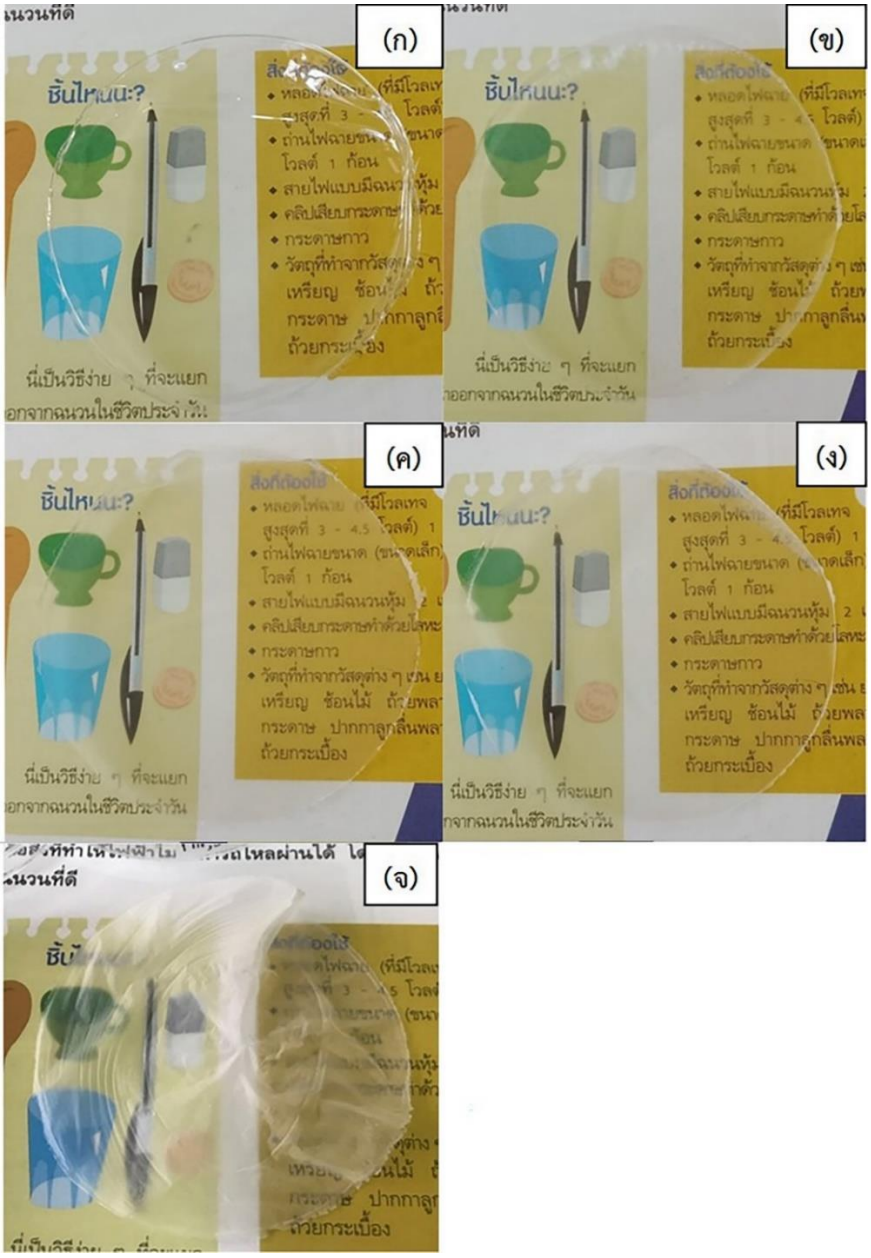
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดจากฟางข้าว และเส้นใยเซลลูโลสภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงเวลาในการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยกระบวนการปั่นเชิงกลที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายต่างกัน สามารถระบุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและยืนยันการเป็นเส้นใยเซลลูโลสในระดับนาโน เส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากรูปที่ 5 (ก)-(ข) เส้นผ่านศูนย์กลางมีลักษณะเป็นเส้นยาว ขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.01±0.38 ไมโครเมตร เมื่อผ่านกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกระบวนการเชิงกล พบว่าเส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงอยู่ในระดับนาโนเมตร ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรม ImageJ มีค่าเท่ากับ 21.86±2.61 นาโนเมตร 18.82±2.80 นาโนเมตร และ 16.31±1.31 นาโนเมตร ตามเวลาในการปั่นที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค)-(ซ) ในระดับพื้นผิวหน้าสังเกตได้ว่าลักษณะของเส้นใยมีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเวลาในการปั่นเพิ่มขึ้น ผลของลักษณะทางพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกระบวนการปั่นเชิงกลส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการหมุนของใบมีดในเครื่องปั่นจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนที่มีทิศตรงกันข้ามกับการไหลของเซลลูโลสที่อยู่ในสภาวะเปียก ฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนไหวของของเหลวส่งผลให้เกิดแรงไฮโดรไดนามิกส์และเกิดการชนของฟองอากาศกับเส้นใยเซลลูโลสด้วยความเร็วสูง ทำให้อนุภาคของเส้นใยเซลลูโลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง เมื่อระยะเวลาในการปั่นเชิงกลเพิ่มมากขึ้น [34]

ดังนั้นในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพ จึงเลือกเงื่อนไขการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนปั่นเชิงกล 60 นาที มาทำการศึกษาเนื่องจากกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนาโนไฟบริลเซลลูโลสส่งผลต่อการกระจายตัวได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ นอกจากนี้การกระจายตัวของปริมาณเซลลูโลสในกระบวนการขึ้นรูปยังส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปอีกด้วย

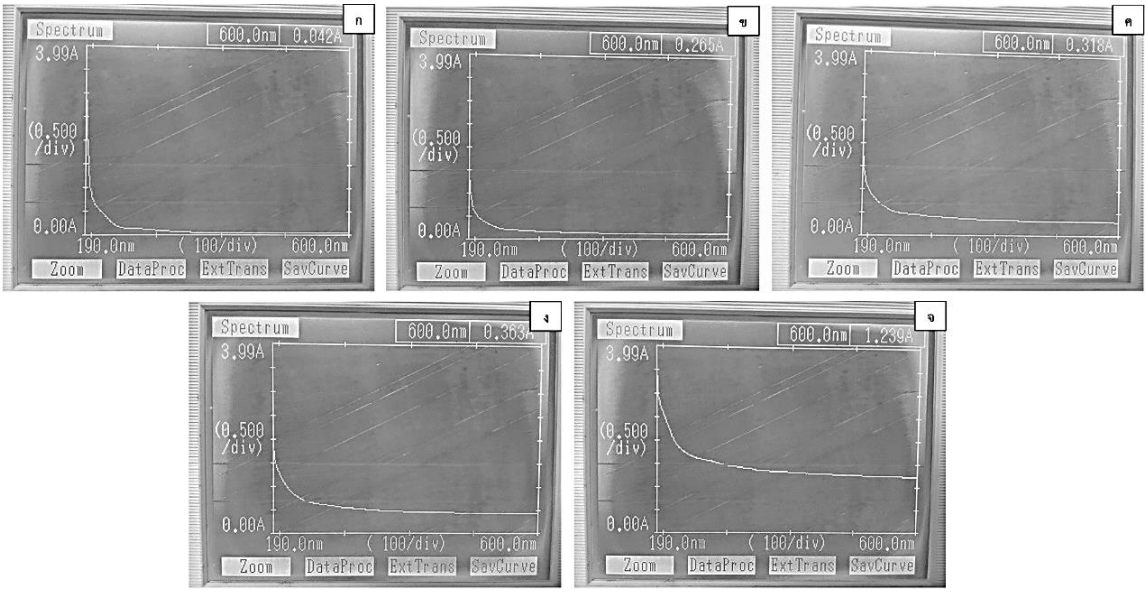
3.2 การทดสอบสมบัติเชิงแสง และสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมแรงของการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพระหว่างโพลีไวนิลแอลกอฮอล์/นาโนไฟบริลเซลลูโลส

ฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์/นาโนไฟบริลเซลลูโลสจากฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยกระบวนการปั่นเชิงกลที่เวลา 60 นาที ถูกขึ้นรูปในอัตราส่วน 10:0, 7:3, 5:5, 3:7 และ 0:10 ปริมาตรต่อปริมาตร ตามลำดับ ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่ผ่านการขึ้นรูปแสดงดังรูปที่ 6 โดยฟิล์มที่ได้มีความหนาเฉลี่ย 0.45, 0.46, 0.48, 0.50 และ 0.59 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการขึ้นรูปพบลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ถูกเติมด้วยวัสดุเสริมแรงเซลลูโลสนาโนไฟบริลในปริมาณต่างกัน พบว่าฟิล์มพลาสติกชีวภาพที่ขึ้นรูปด้วย PVA ในอัตราส่วน 10:0 มีลักษณะใส โปร่งแสง ไม่มีสี มีความยืดหยุ่นสูง ฉีกขาดได้ง่ายเมื่อออกแรงดึง และเมื่อเติมวัสดุเสริมแรงด้วยเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ในอัตรา 7:3, 5:5 และ 3:7 พบว่าฟิล์มพลาสติกชีวภาพมีลักษณะสีขาวขุ่นเนื่องจากสีของเซลลูโลส มีค่าความทึบแสงมากขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6 (ข)-(ง) ฉีกขาดได้ยากเมื่อเทียบ

กับแผ่นฟิล์มเงื่อนไข 10:0 แต่เมื่อทดสอบขึ้นรูปฟิล์มด้วยเซลลูโลสล้วน โดยไม่เติมเมทริกซ์ PVA ในอัตราส่วน 0:10 พบว่าขึ้นรูปได้ยาก ทึบแสง ดังรูปที่ 6 (จ)



รูปที่ 6. การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพระหว่างโพลีไวนิลแอลกอฮอล์กับนาโนไฟบริลเซลลูโลส ในอัตราส่วน (ก) 10:0 (ข) 7:3 (ค) 5:5 (ง) 3:7 และ (จ) 0:10 ปริมาตรต่อปริมาตร



รูปที่ 7. สเปคตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มพลาสติกชีวภาพระหว่างโพลิไวนิลแอลกอฮอล์กับนาโนไฟบริลเซลลูโลส PVA:NFC ในอัตราส่วน (ก) 10:0 (ข) 7:3 (ค) 5:5 (ง) 3:7 และ (จ) 0:10 ปริมาตรต่อปริมาตร

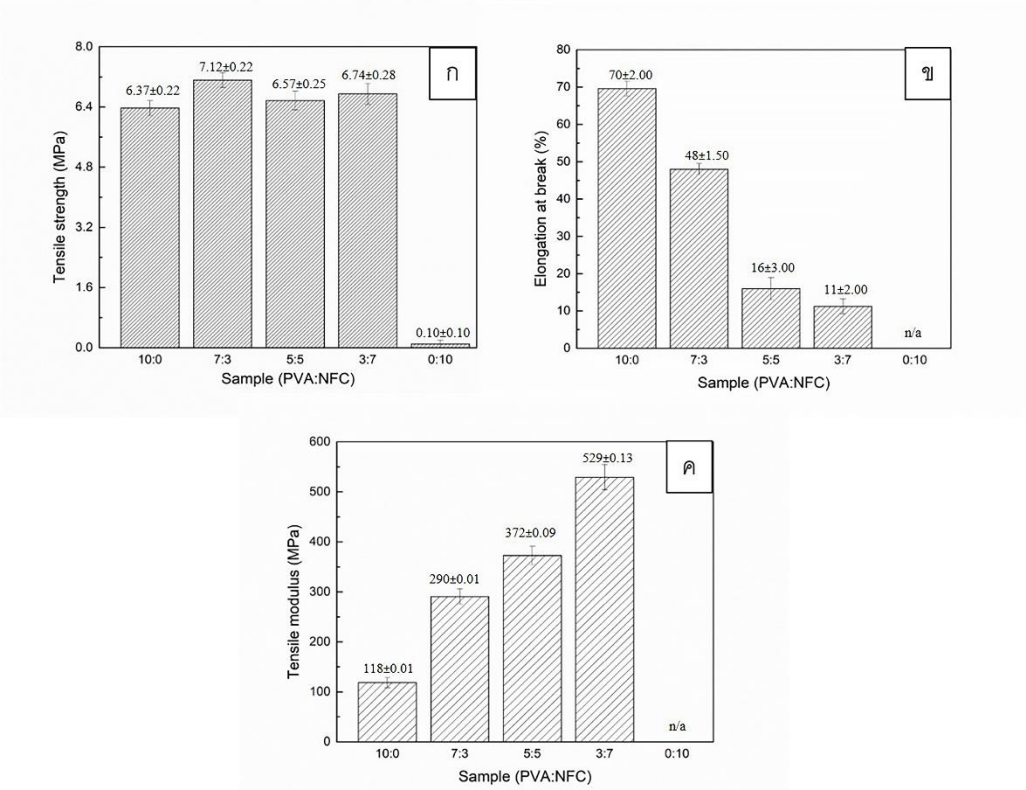
ตารางที่ 2. ตารางเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงในย่านยูวีและวิซิเบิลที่ความยาวคลื่น 200 และ 600 นาโนเมตรของของฟิล์มพลาสติกชีวภาพระหว่างโพลิไวนิลแอลกอฮอล์กับนาโนไฟบริลเซลลูโลส PVA:NFC ในอัตราส่วนต่างกัน

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพ PVA:NFC ในอัตราส่วนต่างกัน				
	10:0	7:3	5:5	3:7	0:10
ยูวี 200	2.00	1.25	1.71	1.77	3.83
วิซิเบิล 600	0.04	0.26	0.31	0.36	1.23

การทดสอบสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิค UV-Vis ของพลาสติกชีวภาพโพลิไวนิลแอลกอฮอล์กับเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 190 - 600 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มพลาสติกชีวภาพที่ขึ้นรูปมีค่าการดูดกลืนรังสียูวีและวิซิเบิลช่วงความยาวคลื่น 200 และ 600 นาโนเมตรได้ดีขึ้น เมื่อเติมเซลลูโลสนาโนไฟบริลในปริมาณเพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงแสดงดังตารางที่ 2 เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสมีความทึบแสง เมื่อเติมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปมีความสามารถในการปิดกั้นการส่งผ่านรังสียูวีและวิซิเบิลได้ [35] ซึ่งประสิทธิภาพทางแสงจะขึ้นกับปริมาณของเซลลูโลสโดยตรง ดังนั้นในการใช้งานจะสามารถปรับเปลี่ยนปริมาณของเซลลูโลสในการประยุกต์ในงานทางด้านบรรจุภัณฑ์ให้ตรงกับความต้องการได้

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ถูกเติมด้วยวัสดุเสริมแรงนาโนไฟบริลเซลลูโลสในอัตราส่วน PVA:NFC ที่ต่างกัน พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของฟิล์มพลาสติกชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 8(ก) เมื่อปริมาณนาโนไฟบริลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นในอัตรา 10:0, 7:3,

5:5 และ 3:7 จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากเพิ่มขึ้นจาก 6.37 ± 0.22 เป็น 7.12 ± 0.22 6.57 ± 0.25 และ 6.74 ± 0.28 เมกะปาสคาลตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.07, 3.07 และ 5.73 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเมทริกซ์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 10:0) ในขณะที่ฟิล์มที่ขึ้นรูปจากนาโนไฟบริลเซลลูโลสเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:10) มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากเท่ากับ 0.10 ± 0.10 เมกะปาสคาล ซึ่งต่ำกว่าฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์อย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องจากความเข้มข้นของนาโนไฟบริลเซลลูโลสที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการขึ้นรูปจึงส่งผลต่อการทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ 8. (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และ (ค) ยังมอดูลัสของฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์/นาโนไฟบริลเซลลูโลส PVA:NFC ในอัตราส่วน 10:0, 7:3, 5:5, 3:7 และ 0:10 ปริมาตรต่อปริมาตร

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากมีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.12 ± 0.22 เมกะปาสคาล เมื่อเติมนาโนไฟบริลเซลลูโลสในอัตรา 7:3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณนาโนไฟบริลเซลลูโลสส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างเมทริกซ์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และนาโนไฟบริลเซลลูโลสทำให้การยึดเกาะระหว่างส่วนประกอบทั้งสองดีขึ้นส่งผลให้ฟิล์มพลาสติกชีวภาพมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของวัสดุเสริมแรงนาโนไฟบริลเซลลูโลสในฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนน้ำหนักในฟิล์มได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเมทริกซ์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 10:0) [36]

จากการทดสอบค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ พบว่าฟิล์มที่ขึ้นรูปจากนาโนไฟบริลเซลลูโลสเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วน 0:10) ไม่สามารถวัดค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มได้เนื่องจากฟิล์มขึ้นรูปได้ไม่ดี จึงไม่ยืดเมื่อวัดค่าการดึง และสำหรับฟิล์มที่ขึ้นรูปกับเมทริกซ์ PVA โดยการเติมวัสดุเสริมแรง นาโนไฟบริลเซลลูโลสในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง จาก 70 ± 2.00, 48 ± 1.50, 16 ± 3.00, 11 ± 2.00 และ N/A ตามลำดับ ดังรูปที่ 8(ข) เนื่องจากการเติมนาโนไฟบริลเซลลูโลส ทำให้เกิดการจำกัดการเคลื่อนไหวของสายโซ่เมทริกซ์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ จึงส่งผลให้ความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างของฟิล์มภายใต้แรงดึงลดลง [37]

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของฟิล์มพลาสติกชีวภาพเพิ่มเล็กน้อยและค่ายังมอดูลัสของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังรูปที่ 8(ค) ชี้ให้เห็นว่าฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณนาโนไฟบริลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพคือ อัตราส่วน 7:3 ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงที่สุด

4. สรุปผลการทดลอง

จากการสกัดเซลลูโลสจากฟางข้าวเหลือทิ้งทางการเกษตรและการลดขนาดด้วยกระบวนการปั่นเชิงกล ผลการศึกษาพบว่าลักษณะทางโครงสร้าง หมู่ฟังก์ชันและพันธะทางเคมี สามารถยืนยันความเป็นเซลลูโลสชนิด I การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลสให้อยู่ในระดับนาโนสามารถทำได้โดยใช้การปั่นเชิงกล ขนาดและลักษณะของเส้นใยเซลลูโลสสามารถยืนยันจากผลการศึกษาลักษณะทางพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าสามารถลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูโลสจาก 5.01 ± 0.38 ไมโครเมตร ให้อยู่ในระดับ 16.31 ± 1.31 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงจากกระบวนการเชิงกลส่งผลต่อการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของเซลลูโลส ส่งผลดีต่อการขึ้นรูป เมื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในฟิล์มพลาสติกชีวภาพในเมทริกซ์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA:NFC) ในอัตราส่วน 10:0, 7:3, 5:5, 3:7 และ 0:10 ผลการศึกษาการเติมปริมาณนาโนไฟบริลเซลลูโลสพบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้สามารถป้องกันรังสียูวีและวิชิเบิลได้ดีขึ้น เมื่อปริมาณนาโนไฟบริลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าปริมาณนาโนไฟบริลเซลลูโลสส่งผลต่อการความแข็งแรงของฟิล์มพลาสติกชีวภาพเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.12 ± 0.22 เมกะปาสคาล เมื่อเติมนาโนไฟบริลเซลลูโลสในอัตราส่วน 7:3 ซึ่งการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของนาโนไฟบริลเซลลูโลสในแผ่นฟิล์มส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนน้ำหนักในฟิล์มได้ดี แต่ปริมาณของเซลลูโลสลงในสายโซ่เมทริกซ์โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ลดความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างของฟิล์มลดลงภายใต้แรงดึงส่งผลให้ความเหนียวของฟิล์มลดลง ส่งผลให้ค่าร้อยละความยืด ณ จุดขาดของฟิล์มลดลง และการเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดของค่ายังมอดูลัสของฟิล์มชี้ให้เห็นว่าฟิล์มพลาสติกชีวภาพโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่านาโนไฟบริลเซลลูโลสสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสามารถป้องกันรังสียูวีและวิชิเบิลได้ งานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปต่อยอดเพื่อศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต และเอาชนะข้อจำกัดบางประการเพื่อประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยเชิงพื้นที่ (FRMU) ปีงบประมาณ 2560 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่สนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง (References)

[1] ศิริพร เต็งรัง. 2558. วิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ. [Siriporn Tengrang. 2015. Packaging Technology Research and Development Project. Department of Agriculture, Bangkok. (in Thai)]

[2] Hopewell, J., Dvorak, R. and Kosior, E. 2009. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.

[3] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2566. แหล่งข้อมูล: https://www.oae.go.th/. ค้นเมื่อวันที่ 18 เมษายน 2566.

[4] วิภาดา ศิริอนุสรณ์ศักดิ์ และนุษรา สินบัวทอง. 2556. การปรับสภาพฟางข้าวทางเคมีเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลังงานทดแทน. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 51, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 129-135. [Wipada Siri-anusornsak and Nusara Sinbuathong. 2013. Chemical pretreatment of rice straw for a raw material in the production of renewable energy. Proceedings of 51st Kasetsart University Annual Conference: Science, Natural Resources and Environment, Bangkok. 129-135. (in Thai)]

[5] Feng, Z., Xu, D., Shao, Z., Zhu, P., Qiu, J. and Zhu, L. 2022. Rice straw cellulose microfiber reinforcing PVA composite film of ultraviolet blocking through pre-cross-linking. *Carbohydrate Polymers*, 296(2022), 119886.

[6] สุธีรา วิทยากาญจน์ และวุฒินันท์ คงทัด. 2556. การผลิตผลึกนาโนเซลลูโลสจากฟางข้าว. การประชุมวิชาการประจำปี 2556 ครั้งที่ 10 สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, ครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ฝ่ายเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงธุรกิจ, กรุงเทพมหานคร, 54-60. [Suteera Withayakran and Wuttinant Kongtud. 2013. Preparation of cellulose nanowhiskers from rice straw. The Proceedings of 10th Annual Academic Conference 2015 Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok (Thailand), Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute, Business Product Development Technology, Bangkok. 54-60. (in Thai)]

[7] Chin, K.M., Ting, S.S., Lin, O.H. and Owi, W.T. 2017. Extraction of microcrystalline cellulose from rice straw and its effect on polyvinyl alcohol biocomposites film. Proceeding of the 3rd International Conference of Global Network for Innovative Technology 2016 (3rd IGNITE-2016), Penang, Malaysia, 040006-1-040006-6.

[8] Ratanasongtham, P. 2022. Preparation of Eco-friendly Blended Bioplastic Film between Blend of Polyvinyl Alcohol and Cellulose Extracted from Nelumbo nucifera Gaertn Stalk. *Journal of Applied Research on Science and Technology,* 21(2), 26-38.

[9] ดารณี ขันเพ็ชร และปิยะนุช รสเครือ. 2557. การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (พี วี เอ)/โซเดียมคาร์บอกซี่เมทิลเซลลูโลส (โซเดียม-ซี เอ็ม ซี) สำหรับประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 6 วันที่ 20 – 21 มีนาคม พ.ศ. 2557*, 19(3), 447-455. [Daranee Khunphet and Piyanuch Roskhrua. 2014. Improvement mechanical properties of polyvinyl alcohol (PVA)/sodium carboxymethyl cellulose (NaCMC) films for active packaging applications. *Burapha Science Journal, The 6th National Science Research Conference 20-21 March 2014*, 19(3), 447-455. (in Thai)]

[10] ยศฐา ศรีเทพ, ดรรชนีย์ พลหาญ, สุพรรณ ยั่งยืน และอรปรียา เวียงอินทร์. 2562. ผลของสารช่วยยืดสายโซ่พอลิเมอร์และเส้นใยกล้วยต่อสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์. *J Sci Technol MSU,* 38(4), 429-236. [Yottha Srithep, Dutchanee Pholharn, Supan Yangyuen and Onpreeya Veang-in. 2019. Effect of Chain Extender and Banana Fiber on Melt-Processing Properties of Poly (vinyl alcohol). *J Sci Technol MSU*, 38(4), 429-236. (in Thai)]

[11] ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ และไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์. 2563. ยางธรรมชาติดัดแปรเสริมแรงด้วยนาโนเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลัง. รายงานการวิจัย, สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. [Yupa Ruksakulpiwat and Chaiwat Ruksakulpiwat. 2020. Modified natural rubber reinforced with nanocellulose from casava pulp. Research project report, Suranaree University of Technology. (in Thai)]

[12] Plermjai, K., Boonyarattanakalin, K., Mekprasart, W., Pavasupree, S., Phoohinkong, W. and Pecharapa, W. 2018. Extraction and characterization of nanocellulose from sugarcane bagasse by ball-milling-assisted acid hydrolysis. *In AIP Conference Proceedings,* 2010(1), 020005-1-020005-7.

[13] Xu, K., Liu, C., Kang, K., Zheng, Z., Wang, S., Tang, Z. and Yang, W. 2018. Isolation of nanocrystalline cellulose from rice straw and preparation of its biocomposites with chitosan: Physicochemical characterization and evaluation of interfacial compatibility. *Composites Science and Technology*, 154, 8-17.

[14] Alcántara, J.C., González, I., Pareta, M.M. and Vilaseca F. 2020. Biocomposites from rice straw nanofibers: morphology, thermal and mechanical properties. *Materials*, 13 (9), 2138.

[15] Inglesby, M.K., Gray, G.M., Wood, D.F., Gregorski, K.S., Robertson, R.G. and Sabellano, G.P. 2005. Surface characterization of untreated and solvent-extracted rice straw. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 43(2), 83-94.

[16] Rosa, S.M., Rehman, N., de Miranda, M.I.G., Nachtigall, S.M. and Bica, C.I. 2012. Chlorine-free extraction of cellulose from rice husk and whisker isolation. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1131-1138.

[17] Lu, P. and Hsieh, Y.L. 2012. Preparation and characterization of cellulose nanocrystals from rice straw. *Carbohydrate Polymers,* 87(1), 564-573.

[18] Mandal, A. and Chakrabarty, D. 2011. Isolation of nanocellulose from waste sugarcane bagasse (SCB) and its characterization. *Carbohydrate Polymers,* 86(3), 1291-1299.

[19] Bouramdane, Y., Fellak, S., El Mansouri, F. and Boukir, A. 2022. Impact of Natural Degradation on the Aged Lignocellulose Fibers of Moroccan Cedar Softwood: Structural Elucidation by Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) and X-ray Diffraction (XRD). *Fermentation,* 8(12), 698.

[20] Dilamian, M. and Noroozi, B. 2019. A combined homogenization-high intensity ultrasonication process for individualizaion of cellulose micro-nano fibers from rice straw. *Cellulose,* 26, 5831-5849.

[21] Plermjai, K., Termkoa, K., Meechowas, E. and Pecharapa, W. 2020. Thermal and functional group characterization of cellulose from sugarcane bagasse. *Bulletin of Applied Sciences*, 9(9), 31-37.

[22] Hu, S., Gu, J., Jiang, F. and Hsieh, Y.L. 2016. Holistic rice straw nanocellulose and hemicelluloses/lignin composite films. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* 4(3), 728-737.

[23] Agustin, M.B., Ahmmad, B., Alonzo, S. M.M. and Patriana, F.M. 2014. Bioplastic based on starch and cellulose nanocrystals from rice straw. *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* 33(24), 2205-2213.

[24] Rosa, M.F., Medeiros, E.S., Malmonge, J.A., Gregorski, K.S., Wood, D.F., Mattoso, L.H.C. and Imam, S. H. 2010. Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior. *Carbohydrate polymers*, 81(1), 83-92.

[25] Sheng, T., Zhao, L., Gao, L., Liu, W., Wu, G., Wu, J. and Wang, A. 2018. Enhanced biohydrogen production from nutrient-free anaerobic fermentation medium with edible fungal pretreated rice straw. *RSC advances,* 8(41), 22924-22930.

[26] Javier-Astete, R., Jimenez-Davalos, J. and Zolla, G. 2021. Determination of hemicellulose, cellulose, holocellulose and lignin content using FTIR in Calycophyllum spruceanum (Benth.) K. Schum. and Guazuma crinita Lam. *PLoS One,* 16(10), e0256559.

[27] Poletto, M., Pistor, V., Zeni, M. and Zattera, A.J. 2011. Crystalline properties and decomposition kinetics of cellulose fibers in wood pulp obtained by two pulping processes. *Polymer Degradation and Stability,* 96(4), 679-685.

[28] Safwat, E., Hassan, M.L., Saniour, S., Zaki, D.Y., Eldeftar, M., Saba, D. and Zazou, M. 2018. Injectable TEMPO-oxidized nanofibrillated cellulose/biphasic calcium phosphate hydrogel for bone regeneration. *Journal of biomaterials applications,* 32(10), 1371-1381.

[29] Hospodarova, V., Singovszka, E. and Stevulova, N. 2018. Characterization of cellulosic fibers by FTIR spectroscopy for their further implementation to building materials. *American journal of analytical chemistry,* 9(6), 303-310.

[30] พัชราภรณ์ พิมพ์จันทร์, สุรีย์รัตน์ อู่สูงเนิน, แสงระวี บิดร, สิริกานต์ ดวงดี และอรุณรัตน์ อุทัยคู. 2563. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของธูปฤาษี และสารสกัดเซลลูโลสจากธูปฤาษีเพื่อประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร, *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*, 19(2), 116-128. [Patcharaporn Pimchan, Sureerat Usoungnern, Sangravee Bidon, Sirikan Duangde, A-roonrat Utaiku. 2020. Study on chemical composition of *Typha angustifalia* L and extracted cellulose from *Typha angustifalia* L for food applications. *The Journal of Applied Science*, 19(2), 116-128. (in Thai)]

[31] Lu, P. and Hsieh, Y.L. 2012. Preparation and characterization of cellulose nanocrystals from rice straw. *Carbohydrate Polymers*, 87(1), 564-573.

[32] Sakhiya, A.K., Anand, A., Vijay, V.K. and Kaushal, P. 2021. Thermal decomposition of rice straw from rice basin of India to improve energy-pollution nexus: Kinetic modeling and thermodynamic analysis. *Energy Nexus*, 4, 100026.

[33] Li, L., Jia, Z., Ma, H., Bao, W., Li, X., Tan, H., Xu, F., Xu, H. and Li, Y., 2019. The effect of two different biochars on remediation of Cd-contaminated soil and Cd uptake by Lolium perenne. *Environmental geochemistry and health*, 41, 2067-2080.

[34] Redlinger-Pohn, J.D., Petkovšek, M., Gordeyeva, K., Zupanc, M., Gordeeva, A., Zhang, Q. and Söderberg, L.D. 2022. Cavitation fibrillation of cellulose fiber. *Biomacromolecules,* 23(3), 847-862.

[35] Feng, Z., Xu, D., Shao, Z., Zhu, P., Qiu, J. and Zhu, L. 2022. Rice straw cellulose microfiber reinforcing PVA composite film of ultraviolet blocking through pre-cross-linking. *Carbohydrate Polymers*, 296, 119886.

[36] Kord, B., Malekian, B., Yousefi, H. and Najafi, A. 2016. Preparation and characterization of nanofibrillated Cellulose/Poly (Vinyl Alcohol) composite films. *Maderas. Cienciay tecnología,* 18(4), 743-752.

[37] Kakroodi, A.R., Cheng, S., Sain, M. and Asiri, A. 2014. Mechanical, thermal, and morphological properties of nanocomposites based on polyvinyl alcohol and cellulose nanofiber from Aloe vera rind. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 903498.