



การศึกษาอิทธิพลของแบคทีเรียเซลลูโลสจากน้ำมะพร้าวต่อการเสริมแรงยางธรรมชาติคอมโพสิต
A Study of Bacterial Cellulose Prepared from Coconut Water Affecting on Natural Rubber Composite Reinforcement

ธนาวุฑ วยูพา¹, ณัฐฐา สุขสุภาพ¹, ปกจิรัตน์ สิงหบุตร², เฉลา เทพเฉลิม^{1*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
องครักษ์ นครนายก 26120

²คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ นครนายก 26120

Tanawut Wayupa¹, Nuttha Suksupap¹, Pakjirat Singhaboot², Chalao Thepchalem^{1*}

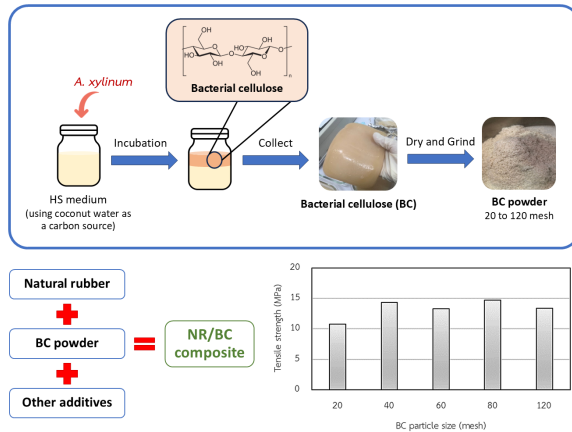
¹Department of Polymer Materials Technology, Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhon Nayok 26120

²Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Nakhon Nayok 26120

Received 29 June 2024; Received in revised 24 October 2025; Accepted 13 November 2025

GRAPHICAL ABSTRACT

ABSTRACT



This study aimed to apply bacterial cellulose as a bio-based filler for natural rubber. Bacterial cellulose was prepared by culturing *Acetobacter xylinum* on Hestrin-Schramm (HS) medium using coconut water as a carbon source. The obtained bacterial cellulose was dried, ground into powder, and separated using a shaker sieve. The cellulosic functional groups were analyzed by fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Natural rubber composites were prepared by blending natural rubber, various chemicals, and bacterial cellulose using a double-roll mixer. The effects of the amount (1, 2.5 and 5 parts per hundred rubber, phr) and particle size (20, 40, 60, 80 and 120 mesh) of bacterial cellulose on the dimensional stability and mechanical properties, including tensile strength and elongation to break, of the natural rubber composites were investigated.

The results showed that bacterial cellulose could be successfully synthesized, and that neither its particle size nor its content significantly affected the dimensional stability of the rubber. In addition, the use of 80 mesh (180 μm) bacterial cellulose at a ratio of 1 phr provided the highest tensile strength. However, the elongation to break of the different natural rubber composite formulations did not differ significantly.

คำสำคัญ	บทคัดย่อ
<p>น้ำมะพร้าว; แบคทีเรียเซลลูโลส; ยางธรรมชาติ; คอมโพสิต</p> <p>Keywords</p> <p>Coconut water; Bacterial cellulose; Natural rubber; Composite</p>	<p>การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นสารตัวเติมฐานชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ ซึ่งแบคทีเรียเซลลูโลสเตรียมจากการเลี้ยงเชื้อ <i>Acetobacter xylinum</i> ด้วยอาหารสูตร Hestrin-Schramm (HS) โดยใช้ น้ำมะพร้าวเป็นแหล่งคาร์บอน แบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้นำไปทำให้แห้งและบดเป็นผงและนำไปแยกขนาดด้วย เครื่องเยาะตะแกรงร่อน วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเซลลูโลสด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ยางธรรมชาติคอมโพสิตเตรียมโดยการผสมยางธรรมชาติ สารเคมีต่างๆ และแบคทีเรียเซลลูโลส ด้วยเครื่องผสมสอง ลูกกลิ้ง ศึกษาผลของปริมาณ (1, 2.5 และ 5 ส่วนในยาร้อยส่วน) และขนาดอนุภาค (20, 40, 60, 80 และ 120 เมช) ของแบคทีเรียเซลลูโลสต่อพฤติกรรมการคงรูปและสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติคอมโพสิต ผลการศึกษาพบว่าสามารถสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสได้ ซึ่งขนาดและ ปริมาณของแบคทีเรียเซลลูโลสไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคงรูปของยาง นอกจากนี้การใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาด 80 เมช (180 ไมครอน) ปริมาณ 1 ส่วนในยาร้อยส่วน ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติคอมโพสิตแต่ละสูตรมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก</p>

*ผู้รับผิดชอบบทความ: Chalao@g.swu.ac.th

DOI:

1. บทนำ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) หรือ ยางพารา เป็นพืชให้น้ำยางสกุล *Hevea brasiliensis* ที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบ *Cis*-1,4-polyisoprene เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นตรงที่สามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้ในสภาวะอุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกแรงดึงยืด ทำให้เกิดเป็นผลึก (Crystallisation) จึงทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่น คือ ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความเหนียว (Toughness) และความยืดหยุ่น จึงทำให้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ออสโตเมอร์ เช่น ยางรถยนต์ สายพาน ถุงมือ ยางยึด ยางรัดของ รองเท้า และอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การที่หน่วยไอโซพรีนประกอบด้วยพันธะคู่และหมู่แอลฟาเมทิลีน จึงส่งผลให้ยางธรรมชาติไม่ทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากแสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น รวมถึงสามารถการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายอินทรีย์ [1]

จากการที่ยางธรรมชาติจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีจึงทำให้สามารถใช้สารตัวเติมราคาถูก เช่น เคลย์ แคลเซียมคาร์บอเนต และทัลคัม เพื่อลดต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ต้องการสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงมากนัก แต่ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ดอกยางรถยนต์ จำเป็นต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 ชนิด คือ เขม่าดำและซิลิกา ซึ่งเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงชนิด Black filler ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางธรรมชาติ เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดีและมีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติดีกว่าซิลิกา สำหรับซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิด Non-black filler ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการให้มีสีสวยงดงาม แต่การที่พื้นผิวของซิลิกามีหมู่ฟังก์ชันของซิลานอล (Silanol group) ซึ่งมีความมีขั้วสูง ส่งผล

ให้มีความเข้ากันได้กับยางต่ำ จำเป็นต้องใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้เพิ่มเติม [2]

สารตัวเติมที่ใช้กับยางธรรมดานั้นส่วนใหญ่ได้มาจากทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป กล่าวคือ เคลย์ แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัม และซิลิกา เป็นวัสดุที่ได้จากการขุดเจาะชั้นดินหรือระเบิดภูเขา ส่วนเขม่าดำได้มาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของกากน้ำมันเตาจากโรงกลั่นและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งกระบวนการผลิตสามารถก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกได้ [3] ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการศึกษาวัสดุคอมโพสิตที่มีการใช้วัสดุชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ผงไม้ ขี้เถ้ากลบ เส้นใยสับปะรด เส้นใยมะพร้าว เส้นใยไผ่ เป็นต้น มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ซึ่งพบว่าวัสดุจากธรรมชาติเหล่านั้นสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติได้ซึ่งเป็นผลจากความแข็งแรงของเส้นใยเซลลูโลสในพืช [4] อย่างไรก็ตามการที่เซลลูโลสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และมีลิกนินและเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ทำให้โครงสร้างเซลลูโลสจากพืชมีความเป็นผลึกและเข้ากันกับยางได้ยาก จึงมีงานวิจัยที่มีการพัฒนาเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากกลบ (Rice husk nanocellulose; RHNC) เพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้กับยางเพื่อลดปริมาณการใช้เขม่าดำ โดยพบว่าการใช้เขม่าดำ 25 phr ร่วมกับ RHNC 5 phr สามารถเพิ่มสมบัติการวัลคาไนซ์และให้สมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับการใช้เขม่าดำ 30 phr [5,6] นอกเหนือจากนี้พบว่า มีแบคทีเรียหลายชนิดที่สามารถสังเคราะห์เส้นใยเซลลูโลสได้ โดยใช้แหล่งคาร์บอนจากน้ำตาลกลูโคส ซูโครส หรือฟรุกโตส เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ เรียกวัสดุที่เกิดขึ้นนี้ว่า เซลลูโลสจากแบคทีเรีย หรือแบคทีเรียเซลลูโลส (Bacterial cellulose; BC) เป็นเส้นใยขนาดเล็กเชื่อมกันเป็นร่างแห มีความเหนียวสูง มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีส่วนประกอบของลิกนิน เพคติน และเฮมิเซลลูโลส การนำไปใช้งานส่วนใหญ่จึงเกี่ยวข้องกับวัสดุทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร

และเครื่องสำอาง [7,8,9] จากการที่การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสใช้น้ำตาลกลูโคส ซูโครส หรือ ฟรุคโตส เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย จึงมีงานวิจัยหลากหลายที่ใช้ผลผลิตทางการเกษตรเป็นแหล่งคาร์บอน เช่น น้ำมะพร้าว [10], น้ำผลไม้สำเร็จรูป 100% (แอปเปิ้ล องุ่น และส้ม) ผีอก แครอท และมันฝรั่ง [11], น้ำคั้นจากเปลือกสับปะรด [12], เป็นต้น ซึ่งแหล่งให้คาร์บอนแต่ละชนิดสามารถทำให้เกิดแบคทีเรียเซลลูโลสได้ในปริมาณที่ต่างกัน

แบคทีเรียเซลลูโลสมีค่าการคงรูปร่าง (Shape retention) และความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ที่สูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์หลายชนิด และมีสมบัติทนทานต่อแรงดึงที่ตึกกว่าเส้นใยสังเคราะห์และพอลิเมอร์บางชนิด นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างเส้นใยมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยของพืชชั้นสูงประมาณ 10-1,000 เท่า และเล็กกว่าเส้นใยสังเคราะห์มากกว่า 100 เท่า เส้นใยมีลักษณะใส ไม่ละลายในตัวทำละลายต่างๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เมทานอล (Methanol) และอะซิโตน (Acetone) [13] อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ ซึ่งการที่แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีการปนเปื้อนจากกลีนิลและเฮมิเซลลูโลส และให้สมบัติเชิงกลที่ดี จึงมีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมชีวฐานสำหรับยางธรรมชาติ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาสารเติมแต่ง (Additives) ทางชีวภาพที่มีความยั่งยืน ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่เข้แล้วหมดไป ที่จะสามารถประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ได้ในอนาคต

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลสและการวิเคราะห์

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ *Acetobacter xylinu* สูตร Hestrin-Schramm (HS) โดยใช้ Yeast extract (Scharlau, Spain) 5 กรัม, Peptone (Scharlau, Spain) 5 กรัม, Sodium hydrogen orthophosphate (QRèC, New Zealand) 2.7 กรัม, และกรดซิตริก

(Scharlau, Spain) 1.15 กรัม เติมน้ำมะพร้าว (6.5 องศาบริกซ์) จนได้ปริมาตร 1 ลิตร ปรับค่า pH เป็น 4.2 ด้วยกรดอะซิติก (RCI Labscan, Thailand) ฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที แบ่งใส่ภาชนะ 360 มิลลิลิตร เติมห้าเชื้อ *Acetobacter xylinum* 40 มิลลิลิตร ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 วัน จะเกิดแบคทีเรียเซลลูโลสลักษณะเป็นวุ้นบนผิวอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นจึงนำแบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อขจัดสารอาหารที่เหลือทิ้ง แล้วต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อขจัดเซลล์แบคทีเรีย จากนั้นจึงนำมาหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ แช่น้ำกลั่นทิ้งไว้ 2 วัน เพื่อปรับ pH ให้เป็นกลาง หลังจากนั้นนำแบคทีเรียเซลลูโลสที่สะอาดไปตากให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน บดเป็นผงด้วยเครื่องบดแบบเกลียวอัด (Cutting mill) และแยกขนาด 20, 40, 60, 80 และ 120 เมชด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker) นำตัวอย่างผงแบคทีเรียเซลลูโลสไปวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR) (รุ่น Nicolet iS5, สหรัฐอเมริกา) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 4500–500 cm^{-1} ด้วยความละเอียด 4 cm^{-1}

2.2 การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิต

ยางธรรมชาติคอมโพสิตโดยใช้แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นสารเสริมแรง (NR/BC composite) เตรียมโดยผสมยางและสารเคมี (บริษัท เอ็ม.บี.เจ. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด) (Table 1) ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด) ทำการศึกษา 2 ตัวแปร คือ การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของปริมาณแบคทีเรียเซลลูโลสที่ 0, 1, 2.5 และ 5 phr เมื่อขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ใช้คือ 20 เมช และการทดลองที่ 2 ศึกษาผลของขนาดแบคทีเรียเซลลูโลสที่ 20, 40, 60, 80, 120 เมช โดยเลือกปริมาณของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ให้การเสริมแรงที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 ยางคอมพาวด์ที่ได้นำไปทดสอบสมบัติการคงรูปยางตามมาตรฐาน ASTM D5289-07a ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคายเค็ล่อนที่

(Moving die rheometer; MDR) (TECH PRO) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจึงขึ้นรูปยางคอมปาวด์เป็นแผ่นด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) (บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส สำหรับใช้เตรียมเป็นชิ้นตัวอย่างในการทดสอบสมบัติเชิงกล

2.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

ตัดชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D-412 Die C นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ (Universal testing machine; UTM) (รุ่น Instron 5966, สหรัฐอเมริกา) โดยใช้ความเร็วในการดึงที่ 500 มม./นาที และ Lode cell ขนาด 50 นิวตัน

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส

แบคทีเรียเซลลูโลสที่เตรียมจากการหมักเชื้อ *Acetobacter xylinum* โดยใช้น้ำตาลมะพร้าวเป็นแหล่งคาร์บอน ได้ลักษณะเป็นวุ้นสีน้ำตาลอ่อน (Figure 1A) มีความเหนียว ตัดออกเป็นชิ้นเล็กได้ยาก เนื่องจากแบคทีเรียเซลลูโลสเป็นกลุ่มของเส้นใยเซลลูโลสขนาดเล็ก (Microfibrils) เชื่อมกันเป็นร่างแหด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา 1,4 ไม่มีส่วนประกอบของลิกนิน เพคติน และเฮมิเซลลูโลส จึงมีความบริสุทธิ์สูงและทำให้มีความเหนียวสูง [7,8,9] เมื่อนำไปตากแห้งและบดเป็นผงจะได้ลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อนเช่นเดียวกันกับก่อนตากแห้ง (Figure 1B) ผงแบคทีเรียเซลลูโลสที่ได้จะนำไปแยกขนาดและใช้เป็นสารตัวเติมในสูตรยางโดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการทำให้ปราศจากสิ่งปนเปื้อน

Table 1 Rubber and additives for NR/BC composite preparation

Rubber and additives	Content (phr*)
STR20	100
ZnO	4
Stearic acid	2
Wingstay L	2
CaCO ₃	30
White oil	3
TMTD	1.5
CBS	0.5
Sulfur	0.5
Bacterial cellulose	0, 1, 2.5, 5

* phr = part per hundred of rubber

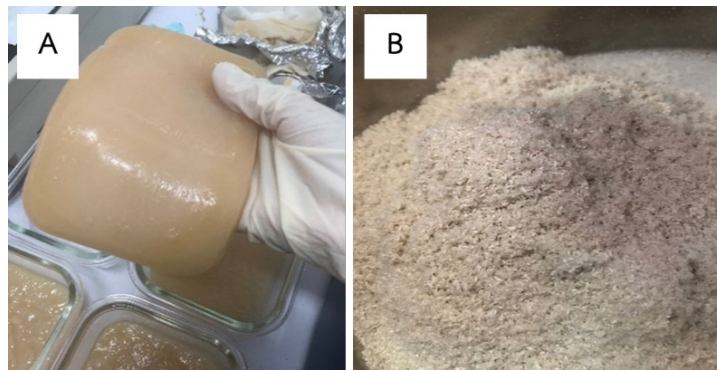


Figure 1 Characteristics of bacterial cellulose obtained by fermentation (A), and characteristics of bacterial cellulose powder used as filler in natural rubber (B).

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมี

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติคอมโพสิต ด้วยเทคนิค FT-IR (Figure 2) ซึ่งแบคทีเรียเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ปรากฏสัญญาณที่เลขคลื่น 3290 cm^{-1} (O-H Stretching), 2970 cm^{-1} (C-H Stretching), 1380 cm^{-1} (C-H Bending), และ 1100-1073 cm^{-1} (C-O-C Stretching) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างๆ นี้ เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนโครงสร้างเคมีของเซลลูโลส

ซึ่งเซลลูโลสจากพืชและแบคทีเรียมีโครงสร้างเคมีเหมือนกัน [14,15] ผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่าสามารถสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสได้สำหรับยางธรรมชาติ ปรากฏสัญญาณที่เลขคลื่น 2854 cm^{-1} (C-H Stretching), 1637 cm^{-1} (C=C Stretching), และ 1378 cm^{-1} (C-H Bending) [16] และยางธรรมชาติคอมโพสิต (Figure 2 C) พบว่า ปรากฏสัญญาณทั้งจากยางธรรมชาติและแบคทีเรียเซลลูโลส

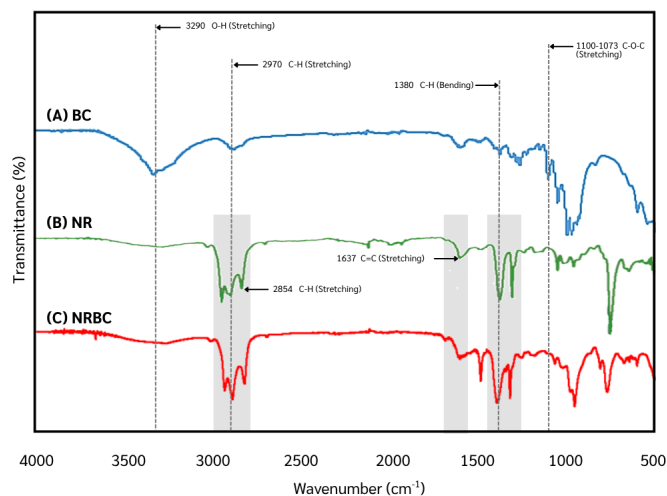


Figure 2 FT-IR spectra of (A) bacterial cellulose (BC), (B) natural rubber (NR), and (C) natural rubber/bacterial cellulose composite (NRBC).

3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติคอมโพสิต

3.3.1 ผลของปริมาณแบคทีเรียเซลลูโลส

จากการเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาด 20 เมช (850 ไมครอน) แปรปริมาณที่ 0, 1, 2.5, และ 5 phr เมื่อนำยางคอมพาวด์ไปทดสอบสมบัติการคงรูปยาง (Table 2) พบว่าเวลาสกอร์ช (Scorch time; ts2) ของแต่ละสูตรมีค่าไม่ต่างกัน และเวลาวัลคาไนซ์ (Curing time; tc90) ของยางคอมพาวด์ที่มีการเติมแบคทีเรียเซลลูโลสมีค่าลดลงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณ 1 นาที) อย่างไรก็ตาม การใช้แบคทีเรียเซลลูโลสในปริมาณที่ต่างกัน ไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาวัลคาไนซ์

เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติคอมโพสิต พบว่า การใช้แบคทีเรียเซลลูโลสปริมาณ 0, 1, 2.5, และ 5 phr ให้ค่า Tensile strength (Figure 3) ที่ 8.8, 9.0, 7.8, และ 6.1 MPa ตามลำดับ และให้ค่า Elongation at break (Figure 4) ที่ 224, 242, 234, และ 254% ตามลำดับ ซึ่งการใช้ในปริมาณ 1 phr ให้ค่า Tensile strength สูงที่สุด และเมื่อใช้ปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลง และมีค่าต่ำกว่าสูตรที่ไม่ใช้แบคทีเรียเซลลูโลส อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบการใช้แบคทีเรียเซลลูโลส 1 phr กับสูตรยางที่ไม่ใช้แบคทีเรียเซลลูโลสพบว่าสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกัน นั่นคือ การใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาด

Table 2 Scorch time (ts2) and curing time (tc90) of NR/BC composite using bacterial cellulose 0, 1, 2.5, and 5 phr

BC content (phr)	0	1	2.5	5
Ts2 (min)	2.39	2.31	2.37	2.40
Tc90 (min)	6.52	5.21	5.21	5.44

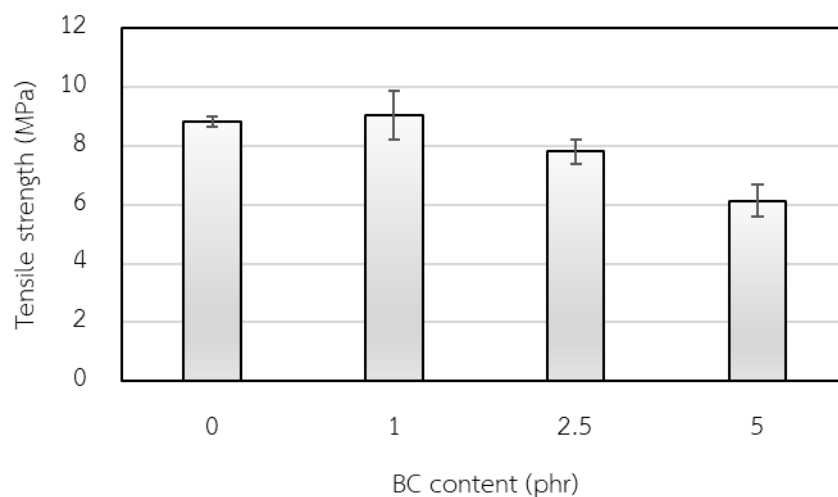


Figure 3 Effect of bacterial cellulose content on tensile strength of NR/BC composite.

20 เมช ปริมาณ 1 phr แม้ไม่สามารถเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแบคทีเรียเซลลูโลสขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคของแบคทีเรียเซลลูโลสไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลยางขณะดึงยืด ความทนทานต่อแรงดึงจึงลดลงตามปริมาณแบคทีเรียเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ายางธรรมชาติคอมโพสิตทั้ง 4 สูตรมีความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ไม่ต่างกันมากนัก

3.3.2 ผลของขนาดแบคทีเรียเซลลูโลส

จากผลการทดลองในข้อ 3.3.1 การใช้แบคทีเรียเซลลูโลสปริมาณ 1 phr ให้ค่า Tensile strength สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ในปริมาณ 2.5 และ

5 phr จึงนำสูตรนี้ไปใช้ในการศึกษาผลของขนาดแบคทีเรียเซลลูโลส โดยใช้ขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ 20, 40, 60, 80 และ 120 เมช (หรือ 850, 425, 250, 180 และ 125 ไมครอน ตามลำดับ) เมื่อนำยางคอมปาวด์ไปทดสอบสมบัติการคงรูปยาง (Table 3) พบว่าเวลาสกอร์ช (Scorch time; Ts2) และเวลาวัลคาไนซ์ (Curing time; Tc90) ของแต่ละสูตรมีค่าไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้น ขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการคงรูปของยาง

เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติคอมโพสิตที่ใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาด 20, 40, 60, 80, และ 120 เมชปริมาณ 1 phr ให้ค่า Tensile

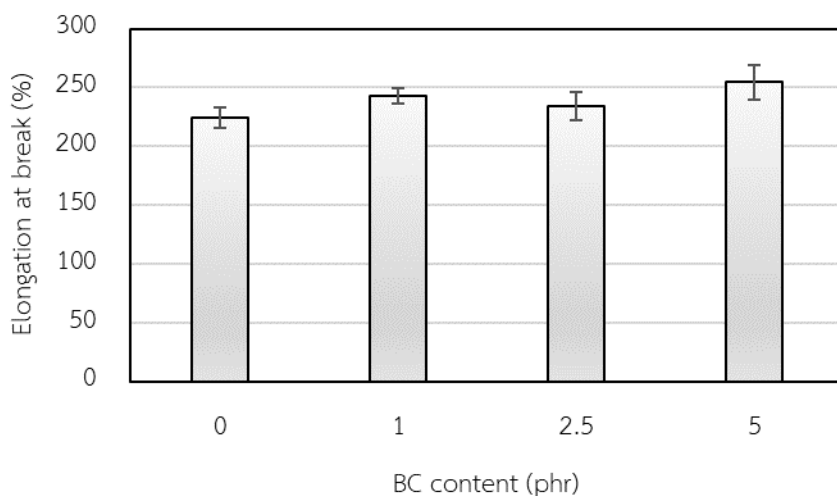


Figure 4 Effect of bacterial cellulose content on elongation at break of NR/BC composite.

Table 3 Scorch time (ts2) and curing time (tc90) of NR/BC composite using bacterial cellulose 20, 40, 60, 80 and 120 mesh

BC particle size (mesh)	20	40	60	80	120
Ts2 (min)	3.85	3.89	4.03	3.76	4.10
Tc90 (min)	6.15	7.37	6:59	5.98	6.65

strength (Figure 5) ที่ 10.8, 14.3, 13.3, 14.7, และ 13.4 MPa ตามลำดับ และให้ค่า Elongation at break (Figure 6) ที่ 650, 665, 679, 673 และ 669% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้ได้ผลทดสอบจากศูนย์บริการทดสอบรับรองภาคกลาง ฝ่ายวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยาง การยางแห่งประเทศไทย ผลการทดลองที่ได้เป็นรายงานผลการทดสอบที่ไม่มีค่าความคลาดเคลื่อน จึงไม่แสดงค่าดังกล่าวในกราฟผลการ

ทดลอง (Figure 5 and 6) การพิจารณาความแตกต่างของแต่ละตัวแปรจึงเป็นการดูจากค่าที่ได้เท่านั้น ซึ่งการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาด 80 เมชให้ค่า Tensile strength สูงที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาด 40 เมช นอกจากนี้ เมื่อใช้ขนาดที่เล็กลง คือ 120 เมชกลับให้ค่า Tensile strength ที่ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ของยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้ง

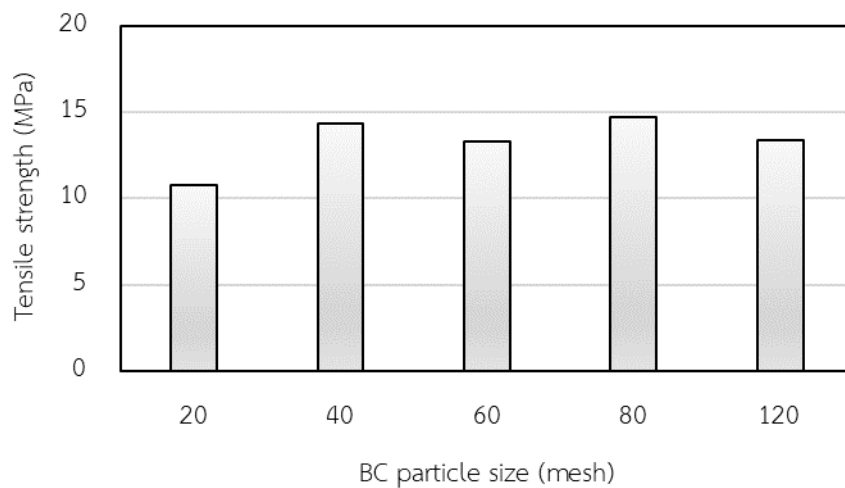


Figure 5 Effect of bacterial cellulose particle size on tensile strength of NR/BC composite.

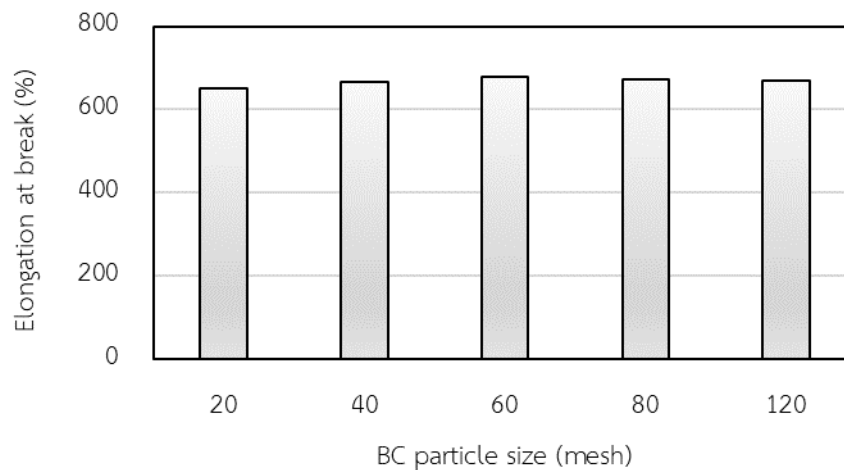


Figure 6 Effect of bacterial cellulose particle size on elongation at break of NR/BC composite.

4 สูตร พบว่าให้ค่า Elongation at break ไม่ต่างกันมากนักเช่นกัน

ในทางทฤษฎีนั้นสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลอย่างมากขึ้น และความสามารถในการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลอย่างเมื่อถูกระทำน้อย ส่งผลให้สารตัวเติมขนาดเล็กจะให้ค่า Tensile strength ของยางวัลคาไนซ์ที่สูง และมักให้ค่า Elongation at break ต่ำ [17] จึงคาดว่า การที่อนุภาคแบคทีเรียเซลลูโลสขนาดเล็กกว่า 80 เมช ไม่ได้ส่งเสริมให้เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลอย่างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติมแบคทีเรียเซลลูโลส พบว่าการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาดต่างๆ ในปริมาณ 1 phr สามารถเสริมความแข็งแรงของยางธรรมชาติคอมโพสิตได้ ซึ่งผลการทดลองนี้แตกต่างกับกรณีการใช้เส้นใยธรรมชาติที่เป็นเซลลูโลสจากพืช กล่าวคือ การผสมเส้นใยพืชในยางธรรมชาตินั้นส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นยังส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากองค์ประกอบที่ผิวของเส้นใย (ลิกนิน) ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติได้ จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลอย่างเมื่อถูกดึงยึด [18] เส้นใยพืชมีองค์ประกอบของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนร่วมกันกับเซลลูโลสจึงได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผลึกซึ่งยากแก่การถูกทำลาย [19] ดังนั้น การที่จะให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดอันตรกิริยากับเส้นใยพืชได้จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยพืชที่ไม่ปรับปรุงผิว [20,21] ในขณะที่เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรียจะมีความบริสุทธิ์ที่สูงกว่ามากเนื่องจากสามารถสังเคราะห์ทางชีวภาพได้ด้วยเอนไซม์ของแบคทีเรีย ได้เป็นแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนที่มีความแข็งแรงสูงจากการเกิด

โครงสร้างตาข่าย [22] ดังนั้น เมื่อผสมเข้ากับยางธรรมชาติ นอกเหนือจากความไม่เข้ากันจากผลของความเป็นขั้วที่ต่างกันแล้ว ยังสามารถเกิดขึ้นได้จากการที่สายโซ่โมเลกุลยางแทรกสอดไประหว่างช่องว่างของเส้นใยแบคทีเรียเซลลูโลสได้ยากอีกด้วย

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าแบคทีเรียเซลลูโลสจะสามารถเสริมความแข็งแรงให้กับยางธรรมชาติได้ แต่การใช้ในปริมาณที่น้อยมากไม่ได้ส่งผลต่อการลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์อย่างมากนัก ดังนั้นในการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสเพื่อเสริมยางธรรมชาติ จึงควรต้องทำการปรับปรุงผิวของแบคทีเรียเซลลูโลสเพื่อลดความเป็นขั้วจากหมู่ไฮดรอกซิลเพื่อให้สามารถเข้ากันกับยางธรรมชาติได้ดีขึ้น และการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาดที่เล็กจะทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นในการเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่ยางธรรมชาติ นอกเหนือจากนี้อาจนำแบคทีเรียเซลลูโลสไปใช้กับยางสังเคราะห์หรือพอลิเมอร์อื่นๆ ที่มีความเป็นขั้ว นอกจากนี้ การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระดับความเป็นผลึกของแบคทีเรียเซลลูโลสและสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติคอมโพสิต จะทำให้สามารถอธิบายถึงประสิทธิภาพการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น รวมไปถึงการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก และเศษวัสดุทางการเกษตรหลายชนิดสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ จึงมีความเป็นไปได้ในการศึกษาการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสจากเศษวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นการลดขยะชีวมวล เพื่อส่งเสริมเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable development goals: SDGs) โดยเฉพาะเป้าหมายที่ 9 และ 12 ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานและการส่งเสริมนวัตกรรม และการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน ตามลำดับ

4. สรุป

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสจากการหมักเชื้อ *Acetobacter xylinum* ในน้ำมะพร้าวได้ และเมื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคอมโพสิต พบว่า การใช้แบคทีเรียเซลลูโลสขนาด 80 เมช (180 ไมครอน) ปริมาณ 1 phr ให้ยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) สูงที่สุด คือ 14.7 MPa อย่างไรก็ตาม ปริมาณและขนาดของแบคทีเรียเซลลูโลสไม่ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดึงยืดจนขาด (Elongation at break) แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ แบคทีเรียเซลลูโลสไม่ได้ส่งผลกระทบต่อสมบัติการคงรูปของยาง อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระดับความเป็นผลึกของแบคทีเรียเซลลูโลสและสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติคอมโพสิต จะทำให้สามารถอธิบายถึงประสิทธิภาพการใช้แบคทีเรียเซลลูโลสในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และภาควิชาวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณบริษัท เอ็ม.บี.เจ. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีสำหรับยางในการทำงานวิจัยนี้

6. References

- [1] Kajornchaiyakul, V., 2004, Natural Rubber: Production and Applications, The Thailand Research Fund, Bangkok, 200 p. (in Thai)
- [2] Plastics Institute of Thailand 2024, Rubber Compound Technology, Available Source: <https://rubber.oie.go.th/EDocument.aspx?pid=1171&cid=1172>, June 25, 2024. (in Thai)
- [3] Lapphunthana-anan, C., Novel Carbon Black, Available Source: http://www.mahidolrubber.org/lc_rtec/basic_rubber/2554_carbonblack_rtec.pdf, June 25, 2024. (in Thai)
- [4] Intharapat, P., 2012, Filler in natural rubber from waste biomass, JSSE. 14(1): 30-43. (in Thai)
- [5] Lozada, E. R., Gutiérrez Aguilar, C. M., Jaramillo Carvalho, J. A., Sánchez, J. C. and Torres, G. B., 2023, Vegetable cellulose fibers in natural rubber composites, Polymers. 15(13): 1-16.
- [6] Dominic, M., Joseph, R., Sabura Begum, P.M., Parambath Kanoth, B., Chandra, J. and Thomas, S., 2020, Green tire technology: effect of rice husk derived nanocellulose (RHNC) in replacing carbon black (CB) in natural rubber (NR) compounding, Carbohydr. Polym. 230: 115620.
- [7] Isabela de Andrade, A. F., Alessandra, C. P., Valéria, R. R., Débora, G. B., Mellany Sarah, C. O., Giselle, M. M. and Charles Windson I. H., 2020, Bacterial cellulose: from production optimization to new applications, Int. J. Biol. Macromol. 164: 2598-2611.
- [8] Babac, C., Kutsal, T. and Piskin, E., 2009, Production and characterization of biodegradable bacterial cellulose membranes, Int. J. Nat. Eng. Sci. 3(2): 19-22.

- [9] Torres, F. G., Arroyo, J. J. and Troncoso, O. P., 2019, Bacterial cellulose nanocomposites: an all-nano type of material, *Mater. Sci. Eng. C*. 98: 1277-1293.
- [10] Chinsamran, K. and Suttisuwan, R., 2015, Development of bacterial cellulose production in molasses by using coconut juice as the nutrient supplement and adding of gelling agent, *RMUTSB Acad. J.* 3(2): 98-108. (in Thai)
- [11] Maichan, W., Kammanglakan, P., Sudpruek, S., Prudprom, K., Anchana, C., Pongpanich, J. and Laloknam, S., 2012, Production of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* TISTR086 using agricultural products as carbon sources, *J. Res. Unit Sci. Technol. Environ. Learning*. 3(2): 92-97. (in Thai)
- [12] Jaturapiree, A., Chaichana, E., Saowapark, T., Chuenpraphai, B. and Jaturapiree, P., 2019, Production and characterization of bacterial cellulose produced by *Acetobacter xylinum* TSTR 975 from pineapple peel juice, *RMUTP Res. J.* 13(1): 180-192. (in Thai)
- [13] Julaluk, K., 2016, The production of bacterial cellulose from *Acetobacter xylinum* and application in industry, *Rajabhat Agric.* 15(2): 25-33. (in Thai)
- [14] Park, J. K., Jung, J. Y. and Khan, T., 2009, Bacterial Cellulose, pp. 724-739, in Phillips, G. O. and Williams, P. A. (Eds.), *Handbook of Hydrocolloids*, 2nd ed., Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Cambridge, UK.
- [15] Reis, D. T., Santos Pereira, A. K., Scheidt, G. N. and Pereira, D. H., 2019, Plant and bacterial cellulose: production, chemical structure, derivatives and applications, *Orbital: Electron. J. Chem.* 11(5): 321-329.
- [16] Rolere, S., Liengprayoon, S., Vaysse, L., Jerome, S. B. and Bonfils, F., 2015, Investigating natural rubber composition with fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy: A rapid and non-destructive method to determine both protein and lipid contents simultaneously, *Polym. Test.* 43: 83-93.
- [17] Kajornchaiyakul, V., 2009, *Rubber Products: Manufacturing and Technology*, The Thailand Research Fund, Bangkok, 204 p. (in Thai)
- [18] Tantatherdtam, R., Kongtud, W. and Sriroth, K., 2010, Preparation and Properties of Natural Rubber Filled Coconut Shell and Palm Oil Bunch Fiber Composites, *Proceedings of 48th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, pp. 523-529. (in Thai)
- [19] Lee, J. S., Parameswaran, B., Lee, J. P. and Park, S. C., 2008, Recent developments of key technologies on cellulosic ethanol production, *J. Sci. Ind. Res.* 67(11): 865-873.
- [20] Wongsorat, W., Suppakarn, N. and Jarukumjorn, K., 2011, Influence of filler types on mechanical properties and cure characteristics of natural rubber

- composites, Adv. Mater. Res. 264-265: 646-651.
- [21] Thepchalerm, C., Koraneesak, C. and Paksa, J., 2021, Effect of Water Hyacinth Fibers Used as Filler in Natural Rubber Latex, Proceedings of the 14th Srinakarinwirot University Research Conference, pp. 492-501. (in Thai)
- [22] Martirani-VonAbercron, S.M. and Pacheco-Sánchez, D., 2023, Bacterial cellulose: a highly versatile nanomaterial, Microb. Biotechnol. 16(6): 1174-1178.