Thai Science and Technology Journal Vol. 34 No. 2 March-April 2026 ISSN 3027-6365 (Online)

Thai Science and Technology Journal
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
Journal Homepage : http://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj

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

ธนาวุฒ วายุพา[1], ณัฏฐา สุขสุภาพ[1], ภัคจิรัตน์ สิงหบุตร[2], เฉลา เทพเฉลิม[1]*

[1]*ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ นครนายก 26120*

[2]*คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ นครนายก 26120*

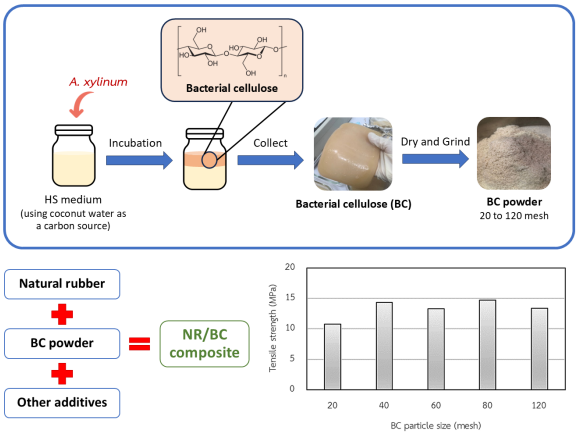
Tanawut Wayupa[1], Nuttha Suksupap[1], Pakjirat Singhaboot[2], Chalao Thepchalerm[1]*

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

[2]*Faculty 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

น้ำมะพร้าว; แบคทีเรียลเซลลูโลส; ยางธรรมชาติ; คอมโพสิต

Keywords

Coconut water; Bacterial cellulose; Natural rubber; Composite

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสเป็นสารตัวเติมฐานชีวภาพสำหรับยางธรรมชาติ ซึ่งแบคทีเรียลเซลลูโลสเตรียมจากการเลี้ยงเชื้อ *Acetobacter xylinum* ด้วยอาหารสูตร Hestrin-Schramm (HS) โดยใช้น้ำมะพร้าวเป็นแหล่งคาร์บอน แบคทีเรียลเซลลูโลสที่ได้นำไปทำให้แห้งและบดเป็นผงและนำไปแยกขนาดด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นเซลลูโลสด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ยางธรรมชาติคอมโพสิตเตรียมโดยการผสมยางธรรมชาติ สารเคมีต่างๆ และแบคทีเรียลเซลลูโลส ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ศึกษาผลของปริมาณ (1, 2.5 และ 5 ส่วนในยางร้อยส่วน) และขนาดอนุภาค (20, 40, 60, 80 และ 120 เมช) ของแบคทีเรียลเซลลูโลสต่อพฤติกรรมการคงรูปและสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติคอมโพสิต ผลการศึกษาพบว่าสามารถสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลสได้ ซึ่งขนาดและปริมาณของแบคทีเรียลเซลลูโลสไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคงรูปของยาง นอกจากนี้การใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสขนาด 80 เมช (180 ไมครอน) ปริมาณ 1 ส่วนในยางร้อยส่วน ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการยืดจนขาดของยางธรรมชาติคอมโพสิตแต่ละสูตรมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

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

DOI: 10.14456/tstj.2026.9

1. บทนำ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) หรือยางพารา เป็นพืชให้น้ำยางสกุล *Hevea brasiliensis* ที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบ *Cis*-1,4-polyisoprene เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นตรงที่สามารถจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้ในสภาวะอุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกแรงดึงยืด ทำให้เกิดเป็นผลึก (Crystallisation) จึงทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่น คือ ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความเหนียว (Toughness) และความยืดหยุ่น จึงทำให้ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อิลาสโตเมอร์ เช่น ยางรถยนต์ สายพาน ถุงมือ ยางยืด ยางรัดของ รองเท้า และอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การที่หน่วยไอโซพรีนประกอบด้วยพันธะคู่และหมู่อัลฟาเมทธิลีน จึงส่งผลให้ยางธรรมชาติไม่ทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากแสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน 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 ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการให้มีสีสันสวยงาม แต่การที่พื้นผิวของซิลิกามีหมู่ฟังก์ชันของไซลานอล (Silanol group) ซึ่งมีความมีขั้วสูง ส่งผลให้มีความเข้ากันได้กับยางต่ำ จำเป็นต้องใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้เพิ่มเติม [2]

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

และเครื่องสำอาง [7,8,9] จากการที่การสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลสใช้น้ำตาลกลูโคส ซูโครส หรือฟรุกโตส เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย จึงมีงานวิจัยหลากหลายที่ใช้ผลผลิตทางการเกษตรเป็นแหล่งคาร์บอน เช่น น้ำมะพร้าว [10] น้ำผลไม้สำเร็จรูป 100% (แอปเปิ้ล องุ่น และส้ม) เผือก แครอท และมันฝรั่ง [11] น้ำคั้นจากเปลือกสับปะรด [12] เป็นต้น ซึ่งแหล่งให้คาร์บอนแต่ละชนิดสามารถทำให้เกิดแบคทีเรียลเซลลูโลสได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

แบคทีเรียลเซลลูโลสมีค่าการคงรูปร่าง (Shape retention) และความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ที่สูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์หลายชนิด และมีสมบัติทนทานต่อแรงดึงที่ดีกว่าเส้นใยสังเคราะห์และพอลิเมอร์บางชนิด นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างเส้นใยมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยของพืชชั้นสูงประมาณ 10-1,000 เท่า และเล็กกว่าเส้นใยสังเคราะห์มากกว่า 100 เท่า เส้นใยมีลักษณะใส ไม่ละลายในตัวทำละลายต่างๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เมทานอล (Methanol) และอะซิโตน (Acetone) [13] อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ ซึ่งการที่แบคทีเรียลเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีการปนเปื้อนจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลส และให้สมบัติเชิงกลที่ดี จึงมีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมชีวฐานสำหรับยางธรรมชาติ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาสารเติมแต่ง (Additives) ทางชีวภาพที่มีความยั่งยืน ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป ที่จะสามารถประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ได้ในอนาคต

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมแบคทีเรียลเซลลูโลสและการวิเคราะห์

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ *Acetobacter xylinu* สูตร Hestrin-Schramm (HS) โดยใช้ Yeast extract (Scharlau, Spain) 5 กรัม, Peptone (Scharlau, Spain) 5 กรัม, Sodium hydrogen orthophosphate (QRëC, 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 เติมกล้าเชื้อ *Acetobacter xylinum* 40 มิลลิลิตร ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 วัน จะเกิดแบคทีเรียลเซลลูโลสลักษณะเป็นวุ้นบนผิวอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นจึงนำแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อขจัดสารอาหารที่เหลือทิ้ง แล้วต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อขจัดเซลล์แบคทีเรีย จากนั้นจึงนำมาหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ แช่น้ำกลั่นทิ้งไว้ 2 วัน เพื่อปรับ pH ให้เป็นกลาง หลังจากนั้นนำแบคทีเรียลเซลลูโลสที่สะอาดไปตากให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน บดเป็นผงด้วยเครื่องบดแบบเกลียวอัด (Cutting mill) และแยกขนาด 20, 40, 60, 80 และ 120 เมชด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker) นำตัวอย่างผงแบคทีเรียลเซลลูโลสไปวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR) (รุ่น Nicolet iS5, สหรัฐอเมริกา) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 4500–500 cm^{-1} ด้วยความละเอียด 4 cm^{-1}

2.2 การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิต

ยางธรรมชาติคอมโพสิตโดยใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสเป็นสารเสริมแรง (NR/BC composite) เตรียมโดยผสมยางและสารเคมี (บริษัท เอ็ม.บี.เจ. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด) (Table 1) ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด) ทำการศึกษา 2 ตัวแปร คือ การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของปริมาณแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ 0, 1, 2.5 และ 5 phr เมื่อขนาดของแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ใช้คือ 20 เมช และการทดลองที่ 2 ศึกษาผลของขนาดแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ 20, 40, 60, 80, 120 เมช โดยเลือกปริมาณของแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ให้การเสริมแรงที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1 ยางคอมปาวด์ที่ได้นำไปทดสอบสมบัติการคงรูปยางตามมาตรฐาน ASTM D5289-07a ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายเคลื่อนที่

(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 การสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลส

แบคทีเรียลเซลลูโลสที่เตรียมจากการหมักเชื้อ *Acetobacter xylinum* โดยใช้น้ำมะพร้าวเป็นแหล่งคาร์บอน ได้ลักษณะเป็นวุ้นสีน้ำตาลอ่อน (Figure 1A) มีความเหนียว ตัดออกเป็นชิ้นเล็กได้ยาก เนื่องจากแบคทีเรียลเซลลูโลสเป็นกลุ่มของเส้นใยเซลลูโลสขนาดเล็ก (Microfibrils) เชื่อมกันเป็นร่างแหด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา 1,4 ไม่มีส่วนประกอบของลิกนิน เพคติน และเฮมิเซลลูโลส จึงมีความบริสุทธิ์สูงและทำให้มีความเหนียวสูง [7,8,9] เมื่อนำไปตากแห้งและบดเป็นผงจะได้ลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อนเช่นเดียวกันกับก่อนตากแห้ง (Figure 1B) ผงแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ได้จะนำไปแยกขนาดและใช้เป็นสารตัวเติมในสูตรยางโดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการการทำให้ปราศจากสิ่งปนเปื้อน

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

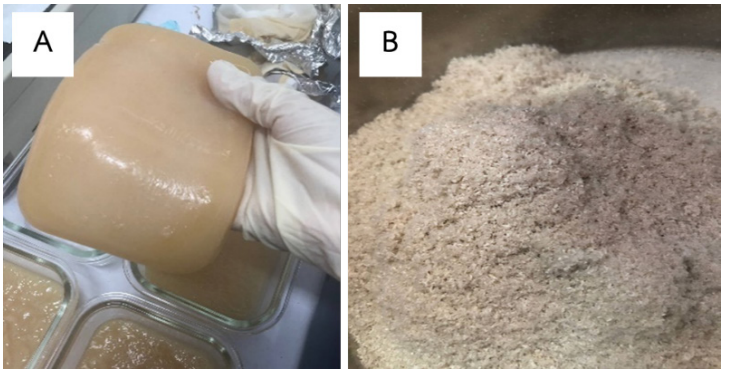


Figure 1 Characteristics of bacterial cellulose obtained by fermentation (A), and characteristics of bacterial cellulose powder used as filler in natural rubber (B).

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมี

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียลเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ ยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติคอมโพสิต ด้วยเทคนิค FT-IR (Figure 2) ซึ่งแบคทีเรียลเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้ปรากฏสัญญาณที่เลขคลื่น 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) ซึ่งหมู่ฟังก์ชั่นต่างๆ นี้ เป็นหมู่ฟังก์ชั่นที่ปรากฏบนโครงสร้างเคมีของเซลลูโลสซึ่งเซลลูโลสจากพืชและแบคทีเรียมีโครงสร้างเคมีเหมือนกัน [14,15] ผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่าสามารถสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลสได้สำหรับยางธรรมชาติปรากฏสัญญาณที่เลขคลื่น 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 ปรากฏสัญญาณทั้งจากยางธรรมชาติและแบคทีเรียลเซลลูโลส

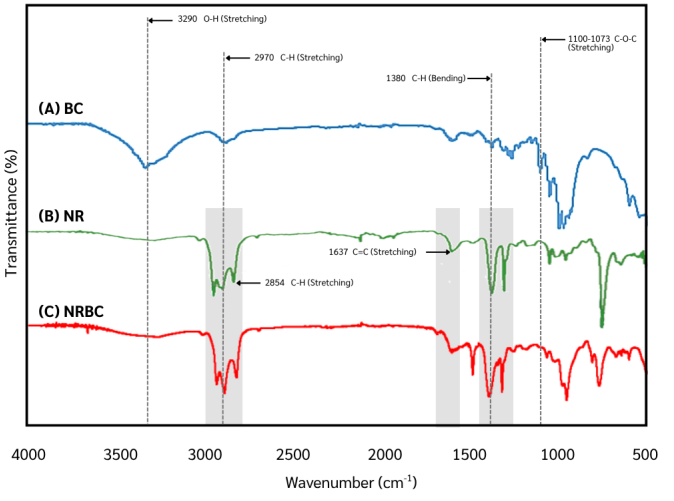


Figure 2 FT-IR spectra of (A) bacterial cellulose (BC), (B) natural rubber (NR), and (C) natural rubber/bacterial cellulose composite (NRBC).

3.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติคอมโพสิต

3.3.1 ผลของปริมาณแบคทีเรียลเซลลูโลส

จากการเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสขนาด 20 เมช (850 ไมครอน) แปรปริมาณที่ 0, 1, 2.5, และ 5 phr เมื่อนำยางคอมปาวด์ไปทดสอบสมบัติการคงรูปยาง (Table 2) พบว่าเวลาสกอร์ช (Scorch time; ts2) ของแต่ละสูตรมีค่าไม่ต่างกัน และเวลาวัลคาไนซ์ (Curing time; tc90) ของยางคอมปาวด์ที่มีการเติมแบคทีเรียลเซลลูโลสมีค่าลดลงเล็กน้อยเท่านั้น (ประมาณ 1 นาที) อย่างไรก็ตาม การใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสในปริมาณที่ต่างกัน ไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาวัลคาไนซ์

เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติคอมโพสิต พบว่า การใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสปริมาณ 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 และมีค่าต่ำกว่าสูตรที่ไม่ใช้แบคทีเรียลเซลลูโลส อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลส 1 phr กับสูตรยางที่ไม่ใช่แบคทีเรียลเซลลูโลสพบว่าสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกัน นั่นคือ การใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสขนาด

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

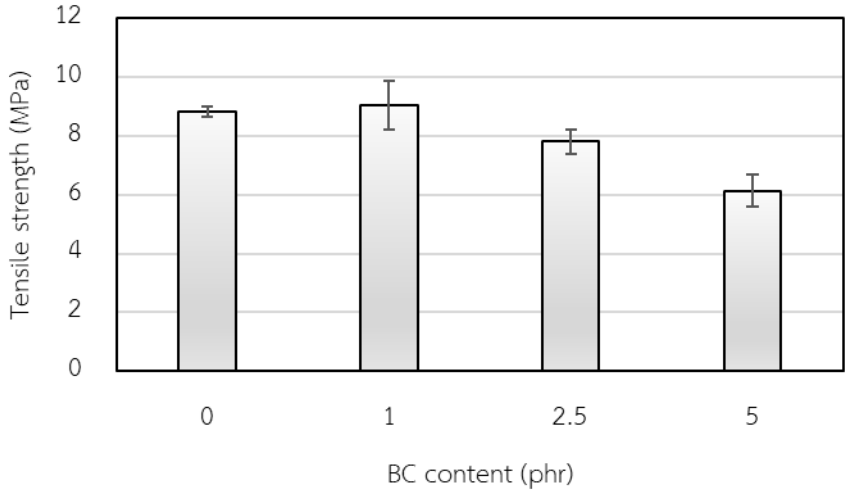


Figure 3 Effect of bacterial cellulose content on tensile strength of NR/BC composite.

20 เมช ปริมาณ 1 phr แม้ไม่สามารถเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแบคทีเรียลเซลลูโลสขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคของแบคทีเรียลเซลลูโลสไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลยางขณะดึงยืด ความทนทานต่อแรงดึงจึงลดลงตามปริมาณแบคทีเรียลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ายางธรรมชาติคอมโพสิตทั้ง 4 สูตรมีความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ไม่ต่างกันมากนัก

3.3.2 ผลของขนาดแบคทีเรียลเซลลูโลส

จากผลการทดลองในข้อ 3.3.1 การใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสปริมาณ 1 phr ให้ค่า Tensile strength สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ในปริมาณ 2.5 และ 5 phr จึงนำสูตรนี้ไปใช้ในการศึกษาผลของขนาดแบคทีเรียลเซลลูโลส โดยใช้ขนาดของแบคทีเรียลเซลลูโลสที่ 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 ขนาดของแบคทีเรียลเซลลูโลสไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการคงรูปของยาง

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

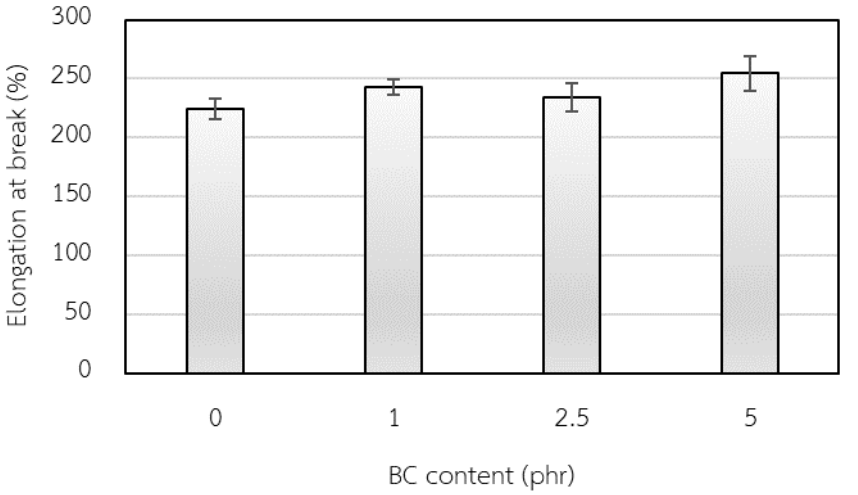


Figure 4 Effect of bacterial cellulose content on elongation at break of NR/BC composite.

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

(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 จึงไม่แสดงค่าดังกล่าวในกราฟผลการทดลอง (Figure 5 and 6) การพิจารณาความแตกต่างของแต่ละตัวแปรจึงเป็นการดูจากค่าที่ได้เท่านั้น ซึ่งการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสขนาด 80 เมชให้ค่า Tensile strength สูงที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสขนาด 40 เมช นอกจากนี้ เมื่อใช้ขนาดที่เล็กลง คือ 120 เมช กลับให้ค่า Tensile strength ที่ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) ของยางธรรมชาติคอมโพสิตทั้ง

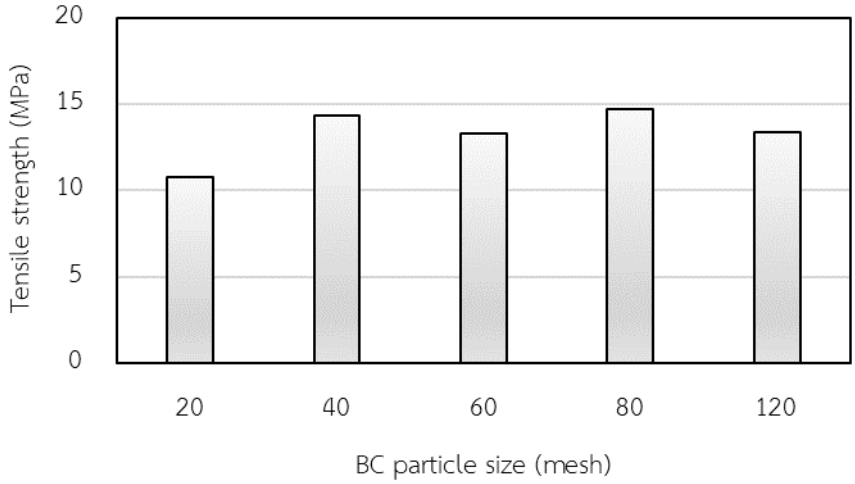


Figure 5 Effect of bacterial cellulose particle size on tensile strength of NR/BC composite.

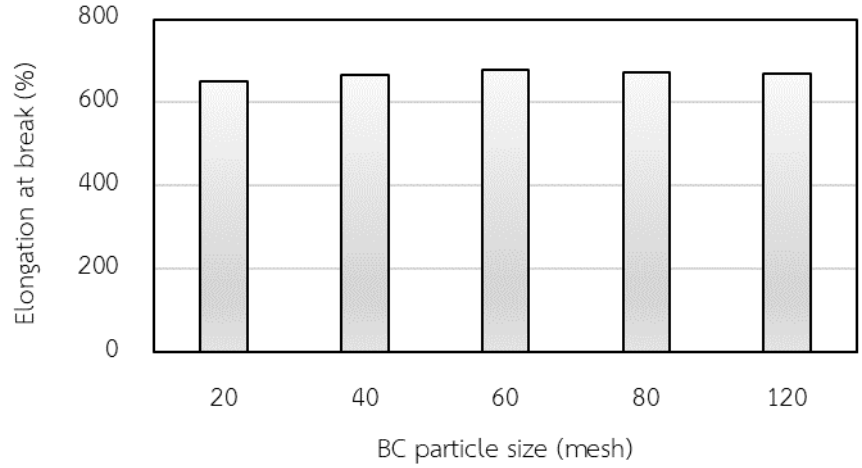


Figure 6 Effect of bacterial cellulose particle size on elongation at break of NR/BC composite.

4 สูตร พบว่าให้ค่า Elongation at break ไม่ต่างกันมากนักเช่นกัน

ในทางทฤษฎีนั้นสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กลงจะมีพื้นที่ผิวในการเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางมากขึ้น และความสามารถในการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลยางเมื่อถูกกระทำน้อย ส่งผลให้สารตัวเติมขนาดเล็กจะให้ค่า Tensile strength ของยางวัลคาไนซ์ที่สูง และมักให้ค่า Elongation at break ต่ำ [17] จึงคาดว่าการที่อนุภาคแบคทีเรียลเซลลูโลสขนาดน้อยกว่า 80 เมช ไม่ได้ส่งเสริมให้เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีการเติมแบคทีเรียลเซลลูโลส พบว่าการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสขนาดต่างๆ ในปริมาณ 1 phr สามารถเสริมความแข็งแรงของยางธรรมชาติคอมโพสิตได้ ซึ่งผลการทดลองนี้แตกต่างกับกรณีการใช้เส้นใยธรรมชาติที่เป็นเซลลูโลสจากพืช กล่าวคือ การผสมเส้นใยพืชในยางธรรมชาตินั้นส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้นยิ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากองค์ประกอบที่ผิวของเส้นใย (ลิกนิน) ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติได้ จึงไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลยางเมื่อถูกดึงยืด [18] เส้นใยพืชมีองค์ประกอบของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสเกิดเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนร่วมกันกับเซลลูโลสจึงได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นผลึกซึ่งยากแก่การถูกทำลาย [19] ดังนั้น การที่จะให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดอันตรกิริยากับเส้นใยพืชได้จึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงผิวเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใยพืชที่ไม่ปรับปรุงผิว [20,21] ในขณะที่เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรียจะมีความบริสุทธิ์ที่สูงกว่ามากเนื่องจากสามารถสังเคราะห์ทางชีวภาพได้ด้วยเอนไซม์ของแบคทีเรีย ได้เป็นแบคทีเรียลเซลลูโลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนที่มีความแข็งแรงสูงจากการเกิดโครงร่างตาข่าย [22] ดังนั้น เมื่อผสมเข้ากับยางธรรมชาตินอกเหนือจากความไม่เข้ากันจากผลของความเป็นขั้วที่ต่างกันแล้ว ยังสามารถเกิดขึ้นได้จากการที่สายโซ่โมเลกุลยางแทรกสอดไประหว่างช่องว่างของเส้นใยแบคทีเรียลเซลลูโลสได้ยากอีกด้วย

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าแบคทีเรียลเซลลูโลสจะสามารถเสริมความแข็งแรงให้กับยางธรรมชาติได้ แต่การใช้ในปริมาณที่น้อยมากไม่ได้ส่งผลต่อการลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ยางมากนัก ดังนั้นในการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสเพื่อเสริมแรงยางธรรมชาติจึงควรต้องทำการปรับปรุงผิวของแบคทีเรียลเซลลูโลสเพื่อลดความเป็นขั้วจากหมู่ไฮดรอกซิลเพื่อให้สามารถเข้ากันกับยางธรรมชาติได้ดีขึ้น และการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสขนาดที่เล็กลงจะทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นในการเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่ยางธรรมชาติ นอกเหนือจากนี้อาจนำแบคทีเรียลเซลลูโลสไปใช้กับยางสังเคราะห์หรือพอลิเมอร์อื่นๆ ที่มีความเป็นขั้ว นอกจากนี้ การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระดับความเป็นผลึกของแบคทีเรียลเซลลูโลสและสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติคอมโพสิตจะทำให้สามารถอธิบายถึงประสิทธิภาพการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น รวมไปถึงการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก และเศษวัสดุทางการเกษตรหลายชนิดสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ จึงมีความเป็นไปได้ในการศึกษาการสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลสจากเศษวัสดุทางการเกษตรชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นการลดขยะชีวมวล เพื่อส่งเสริมเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable development goals: SDGs) โดยเฉพาะเป้าหมายที่ 9 และ 12 ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานและการส่งเสริมนวัตกรรม และ การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน ตามลำดับ

4. สรุป

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์แบคทีเรียลเซลลูโลสจากการหมักเชื้อ *Acetobacter xylinum* ในน้ำมะพร้าวได้ และเมื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคอมโพสิต พบว่า การใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสขนาด 80 เมช (180 ไมครอน) ปริมาณ 1 phr ให้ยางธรรมชาติคอมโพสิตที่มีค่าความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) สูงที่สุด คือ 14.7 MPa อย่างไรก็ตาม ปริมาณและขนาดของแบคทีเรียลเซลลูโลสไม่ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดึงยืดจนขาด (Elongation at break) แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ แบคทีเรียลเซลลูโลสไม่ได้ส่งผลกระทบต่อสมบัติการคงรูปของยาง อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระดับความเป็นผลึกของแบคทีเรียลเซลลูโลสและสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติคอมโพสิต จะทำให้สามารถอธิบายถึงประสิทธิภาพการใช้แบคทีเรียลเซลลูโลสในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น

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.