ยางคอมโพสิตไมโครเซลลูโลส จากกากมันสำปะหลัง

Micro-Cellulose Composite Rubber from Cassava Bagasse

เกษนภา บัวทอง[1] กิตติยา วงษ์ขันธ์[1] ไพโรจน์ จิตธรรม[2] และ รักเกียรติ จิตคติ[1*]

Ketnapha Buathong[1] Kittiya Wongkhan[1] Pairote Jittham[2] and Rukkiat Jitchati[1*]

[1] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[2] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

[1] Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

[2] National Metal and Materials. Technology Center, National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

[*]E-mail : rukkiat_j@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมไมโครเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลัง เพื่อนำไปเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในคอมโพสิตยางธรรมชาติ จากการศึกษาพบว่า การสกัดเซลลูโลสและฟอกขาวด้วยสารละลายผสม NaOH กับ H_2O_2 สามารถทำให้ได้เซลลูโลสที่บริสุทธิ์ โดยยืนยันด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเซลลูโลสด้วย FT-IR spectroscopy พบว่าลิกนินและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไปได้ ผลการศึกษาสภาวะในการเตรียมไมโครเซลลูโลส พบว่า การเตรียมไมโครเซลลูโลส โดยการใช้แรงกลมีร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงถึง 95 และไมโครเซลลูโลสที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับไมโครเมตร ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางคอมโพสิต

คำสำคัญ : กากมันสำปะหลัง ไมโครเซลลูโลส ยางคอมโพสิต สารเสริมแรง

Abstract

This study aimed to extract micro-cellulose from cassava bagasse for using as a reinforcement in natural rubber composites. The study found that cellulose extracted and bleached with mixed NaOH and H2O2 yielded a pure cellulose. The Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy was used to confirm that the lignin and hemicellulose had been removed. The results showed that using mechanical force can be prepared the micro-cellulose to obtain with a high yield (95%). The micro-cellulose showed a linear shape with a diameter of micrometer which used as reinforcement filler in natural rubber composite.

Keywords : Cassava Bagasse, Micro-Cellulose, Composite Rubber, Reinforcing Filler

บทนำ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ชานอ้อย ซังข้าวโพด ลำต้นปาล์ม ลำต้นมันสำปะหลัง และกากมันสำปะหลัง มีองค์ประกอบพื้นฐานจากลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (พรรณวิไล, 2554)

ชีวมวล	ส่วนประกอบของลิกโนเซลลูโลสภายในพืช (%)		
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ฟางข้าว	32.1	24.0	12.5
ฟางข้าวสาลี	30.5	28.4	18.0
ชานอ้อย	33.4	30.0	18.9
ซังข้าวโพด	45.0	35.0	15.0
ลำต้นปาล์ม	37.14	30.59	22.32
ลำต้นมันสำปะหลัง	32.2	13.85	26.96
กากมันสำปะหลัง	26.5	10.3	20.7

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ มีโครงสร้างประกอบด้วยกลูโคส (Glucose) ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่งบีต้า-1,4 (β (1-4 glycosidic bond)เป็นสายยาวกว่า 1,000-10,000 โมเลกุล (สุภาวดี, 2557; Cazón et al., 2017) เซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้มีความแข็งแรง มีอุณหภูมิการหลอมตัวสูงและไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป (อุษารัตน์, 2557)

ไมโครเซลลูโลสเป็นสารที่ได้จากการสกัดเซลลูโลสโดยผ่านกระบวนการทางเคมีหรือทางกายภาพ โดยมีโครงสร้างระดับไมโครเมตร ที่มีความแข็งแรง จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน อาทิเช่น สารเสริมเส้นใยในผลิตภัณฑ์อาหารและช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสของอาหาร (Nsor-Atindana et al., 2017) สารเติมแต่งในเครื่องสำอาง (Bianchet et al., 2020) และสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ (Pasquini et al., 2010) งานวิจัยนี้นำเสนอการเตรียมไมโครเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลัง เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางพารา ซึ่งกากมันสำปะหลังเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะลัง

วิธีการวิจัย

เครื่องมือและสารเคมีในการทดลอง

เครื่องบดลูกบอลแบบจานหมุน (Planetary Ball Mill) รุ่น QM-3SP4 ยี่ห้อ T-BOTA เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น XK360 FORCE กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชั่น (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) รุ่น JSM-7610F ยี่ห้อ JEOL เครื่องวัดความแข็ง (Shore Durometer Test Stand) รุ่น SLX-A ยี่ห้อ Sundoo กากมันสำปะหลัง โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ยางพาราแท่งเกรด STR 5L (Standard Thai Rubber 5L) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซิลิกา (SiO_2) พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin Wax) ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dycumyl Peroxide, DCP) และบิวทิลไฮดรอกซี่โทลูอีน (Butylated Hydroxytoluene, BHT) จากบริษัทเคมิคอลแอนด์แมททีเรียล (ไทยแลนด์) จำกัด

1. การสกัดเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลัง

นำกากมันสำปะหลังมาล้างทำความสะอาด อบให้แห้ง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh ต้มสกัดผงกากมันสำปะหลังที่ได้ ปริมาณ 210 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 7% น้ำหนักต่อปริมาตร 7 ลิตร ที่อุณหภูมิ 60 °C กวนตลอดเวลา เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นล้างเซลลูโลสด้วยน้ำกลั่น จนเป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้ง นำเซลลูโลสแห้งปริมาณ 8 กรัม มาทำการฟอกขาว ด้วยสารละลายผสม 5% NaOH ปริมาตร 4 มิลลิลิตร

กับ 30% H_2O_2 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ต้มและกวนตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 60 °C เวลา 2 ชั่วโมง กรอง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แล้วอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2. การเตรียมไมโครเซลลูโลส

2.1 การเตรียมไมโครเซลลูโลสโดยใช้กรด

เซลลูโลส ปริมาณ 1 กรัม ละลายด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 65% น้ำหนักต่อปริมาตร 20 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 60 °C กวนตลอดเวลาเป็นระยะเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลานำไมโครเซลลูโลสที่ได้ไปล้างโดยใช้การปั่นเหวี่ยงจนมีค่า pH เป็นกลาง จากนั้นกำจัดน้ำด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry)

2.2 การเตรียมไมโครเซลลูโลสโดยใช้แรงกล

เซลลูโลส ปริมาณ 1 กรัม ใส่ลงในโถบดเซรามิกและบด โดยใช้เครื่องบดลูกบอลแบบจานหมุน (Planetary Ball Mill) ที่ใช้ลูกบดเซรามิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร น้ำหนักรวม 50 กรัม ที่อัตราเร็ว 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที โดยปริมาตรของแข็งคิดเป็น 50% ของโถบด

3. การเตรียมยางคอมโพสิตไมโครเซลลูโลส

โดยมีวิธีขั้นตอนการเตรียมยางคอมโพสิตแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรการเตรียมยางคอมโพสิต

สูตร	ปริมาณสารที่ใช้ (phr)						
	STR 5L	Wax	$CaCO_3$	SiO_2	Cellulose	BHT	DCP
B1	100	1	60	-	-	1	2
B2	100	1	60	10	-	1	2
B3	100	1	60	-	10	1	2
B4	100	1	60	5	5	1	2

3.1 ชั่งยางพาราแท่งเกรด STR 5L และสารเคมีต่าง ๆ ตามตาราง ทั้ง 4 สูตร จากนั้นทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง เป็นเวลา 25 นาที เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2 นำยางคอมโพสิตที่ได้ หาระยะเวลาในการคงรูป 90% (Tc_{90}) โดยใช้เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิทดสอบ 160 °C ตามมาตรฐาน ASTM D5289-95

3.3 นำยางคอมโพสิตขึ้นรูป ด้วยเครื่องอัดเบ้าพิมพ์ (Compression molding) ขนาด 20 x 20 x 0.2 cm^3 ขึ้นรูปที่ 160 °C เป็นเวลา 12 นาที เก็บแผ่นยางคอมโพสิตที่ขึ้นรูปแล้วไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

4. การพิสูจน์เอกลักษณ์ และทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังชันก์ทางเคมีของไมโครเซลลูโลส โดยใช้เครื่อง ฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปคโทรไมโครสโคป (FT-IR)

4.2 การวัดขนาดอนุภาคของไมโครเซลลูโลส และลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางคอมโพสิต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.3 การทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ของยางคอมโพสิต โดยใช้เครื่อง Shore hardness tester

ผลการศึกษา

1. การสกัดเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลัง

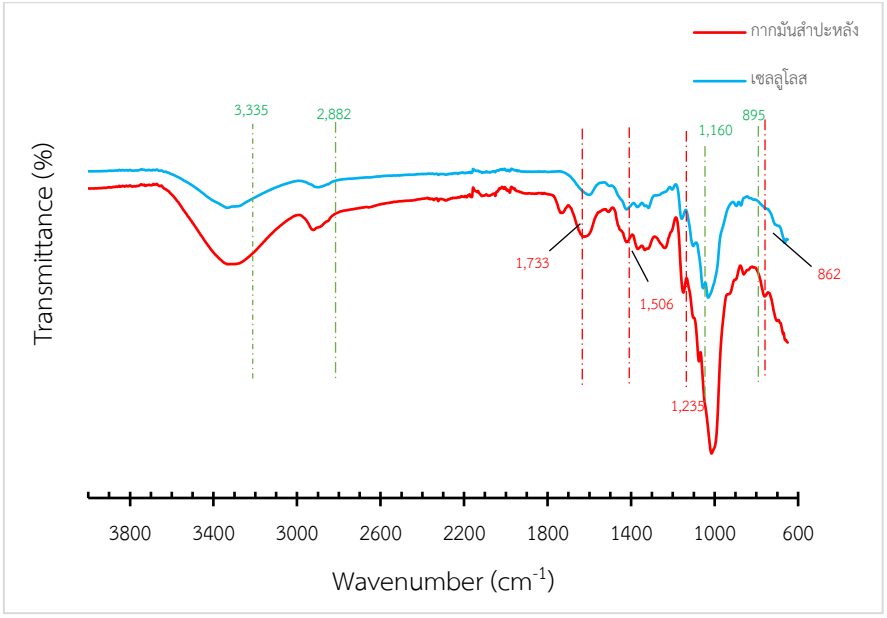
การสกัดเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลัง สามารถทำได้โดยการกำจัดองค์ประกอบลิกนินและเฮมิเซลลูโลส โดยทำการต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาว ด้วยสารละลายผสม NaOH กับ H_2O_2 พบว่า ลักษณะทางกายภาพของผงกากมันสำปะหลัง เป็นผงสีขาวอมน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) แล้วเมื่อทำการสกัดและฟอกขาว พบว่า เซลลูโลสที่สกัดได้ จะมีลักษณะเป็นผงที่จับตัวกันเป็นก้อนเล็ก ๆ มีสีขาวอมเหลือง ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เป็น 23.6 ดังแสดงในรูปที่ 1(ข)

(ก) (ข)

รูปที่ 1 ภาพถ่ายผงกากมันสำปะหลัง (ก) และ ภาพถ่ายเซลลูโลสจากผงกากมันสำปะหลัง (ข)

การวิเคราะห์หมู่ฟังชันก์ทางเคมีด้วยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อิฟราเรดสเปคโทรไมโครสโคปี (FT-IR) ของกากมันสำปะหลังและเซลลูโลส ในรูปที่ 2 พบว่ากากมันสำปะหลังจะมีพีคที่สำคัญที่ 1,733, 1,506, 1,235 และ 862 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องพีคของ C=O stretching vibration, C=C aromatic skeleton vibration, C(=O)-O stretching และ C-H aromatic out of plane bending ตามลำดับ ซึ่งเป็นพีคสำคัญนี้แสดงถึงลิกนินและเฮมิเซลลูโลส (Mandal and Chakrabarty, 2011; Abraham et al., 2011; Chen et al., 2009) และเมื่อทำการสกัดและฟอกขาว พบว่า เซลลูโลสที่ได้ไม่พบพีคสัญญาณข้างต้น

โดยเซลลูโลสบริสุทธิ์จะแสดงสัญญาณของ O-H stretching, C-H stretching, C-O-C anti symmetric และ C-H rocking ขึ้นที่ 3,335, 2,882, 1,160, 895 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งสองคล้องกับงานวิจัยของ Sun et al. (2004)



รูปที่ 2 FTIR spectrum ของกากมันสำปะหลัง (เส้นสีแดง) และ เซลลูโลส (เส้นสีฟ้า)

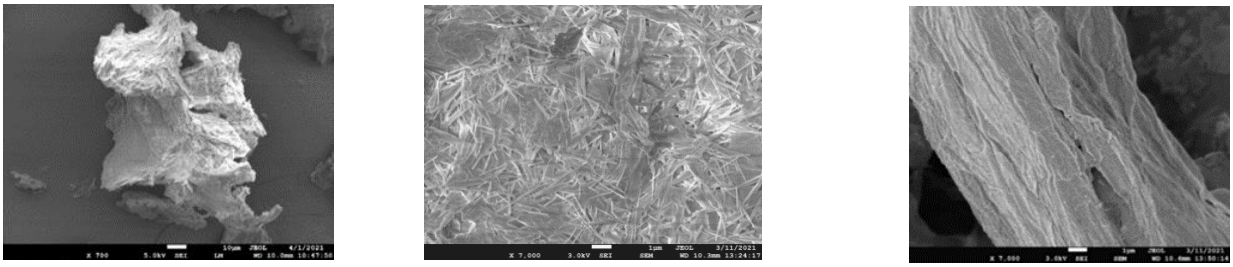
2. การเตรียมไมโครเซลลูโลส

การเตรียมไมโครเซลลูโลส สามารถทำได้ 2 วิธี คือ โดยการใช้กรดซัลฟิวริก (Feng et al., 2018) และการเตรียมโดยใช้แรงกล (Nagarajan, Balaji and Ramanujam, 2019) พบว่า ลักษณะทางกายภาพของไมโครเซลลูโลสที่เตรียมโดยใช้กรด จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำ และมีร้อยละของผลิตภัณฑ์เป็น 6 ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) ในขณะที่ไมโครเซลลูโลสที่ผ่านการเตรียมโดยใช้แรงกลจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวอมเหลือง และมีร้อยละของผลิตภัณฑ์เป็น 95 ดังแสดงในรูปที่ 3(ข)

(ก) (ข)

รูปที่ 3 ภาพถ่ายของไมโครเซลลูโลสที่เตรียมโดยใช้กรดซัลฟิวริก (ก) และแรงกล (ข)

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของไมโครเซลลูโลส ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า ไมโครเซลลูโลสที่ผ่านการเตรียมโดยใช้กรดซัลฟิวริก ที่ถ่ายด้วยกำลังต่ำ (700 เท่า) มีลักษณะเกาะกลุ่มเป็นก้อน ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 7,000 เท่า จะสังเกตเห็นเป็นแท่งไมโครเซลลูโลส เกาะกันกระจายอยู่โดยทั่วไป ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไมโครเซลลูโลส ประมาณ 0.05-0.18 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Feng et al. (2018) ในขณะที่ไมโครเซลลูโลสที่ผ่านการเตรียมโดยใช้แรงกล ที่ถ่ายด้วยกำลัง 7,000 เท่า มีลักษณะเป็นเส้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 10-200 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4(ค) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคุณ Nagarajan et al. (2019)



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ของไมโครเซลลูโลสที่ผ่านการเตรียมด้วยกรดซัลฟิวริก ที่กำลังขยาย (ก) 700 เท่า (ข) 7,000 เท่า และผ่านการเตรียมโดยใช้แรงกล ที่กำลังขยาย (ค) 7,000 เท่า

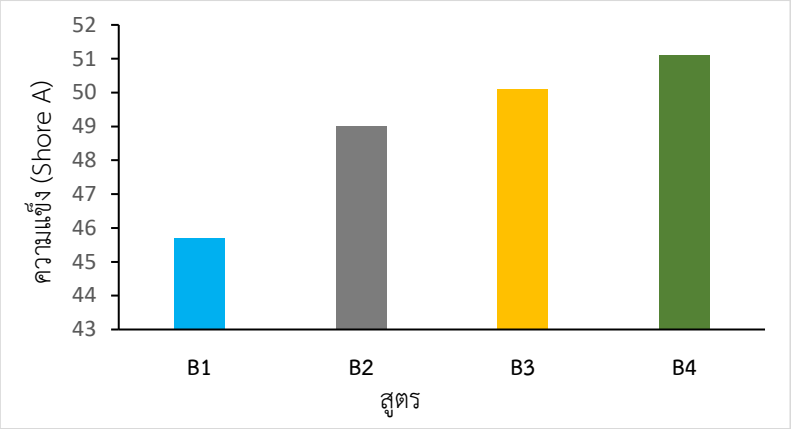
ดังนั้นวิธีการเตรียมไมโครเซลลูโลสที่เหมาะสมที่สุดคือการเตรียมโดยใช้แรงกล โดยวิธีการเตรียมโดยใช้แรงกล ทำให้ขนาดอนุภาคของเซลลูโลสมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร และนอกจากนี้ยังมีร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงถึง 95 ที่เพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางคอมโพสิต

3. การเตรียมยางคอมโพสิตไมโครเซลลูโลส

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมโพสิต มีดังนี้ พาราฟินแว็กซ์เป็นสารช่วยในการผสม $CaCO_3$ ใช้เป็นสารลดต้นทุน ซิลิกา (Silica) เป็นสารตัวเติมเสริมความแข็งแรง (Reinforcing filler) ทางการค้า BHT เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ และ DCP เป็นสารทำให้เกิดการคงรูปโดยใช้ ตามลำดับ

3.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิต

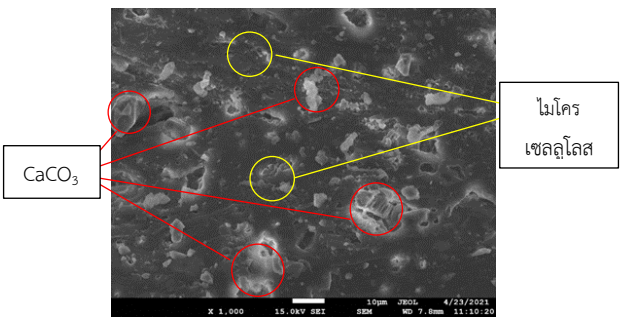
ผลการศึกษาความแข็งของยางคอมโพสิตแสดงในรูปที่ 5 พบว่า การที่ไม่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง (B1) จะทำให้ยางคอมปาวด์มีค่าความแข็ง 45.7 Shore A การเติมสารตัวเติมเสริมแรงซิลิกา (B2) และไมโครเซลลูโลส (B3) ปริมาณ 10 phr ทำให้มีค่าความแข็งยางคอมโพสิตเพิ่มเป็น 49 และ 50.1 Shore A ตามลำดับ และเมื่อเติมสารตัวเติมเสริมแรงไมโครเซลลูโลสผสมซิลิกา ปริมาณอย่างละ 5 phr (B4) ให้ค่าความแข็งมากที่สุด ถึง 51.1 ± Shore A



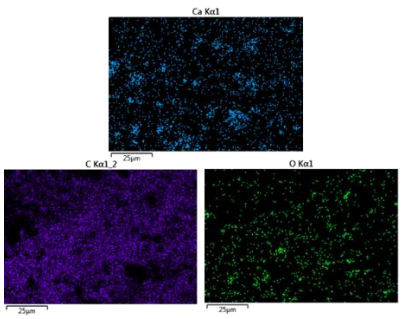
รูปที่ 5 กราฟค่าความแข็งของยางคอมโพสิต ไม่มีสารตัวเติมเสริมแรง (B1) ซิลิกา (B2) ไมโครเซลลูโลส (B3) และ ไมโครเซลลูโลสผสมซิลิกา (B4) ที่ใช้สารตัวเติม 10 phr

3.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

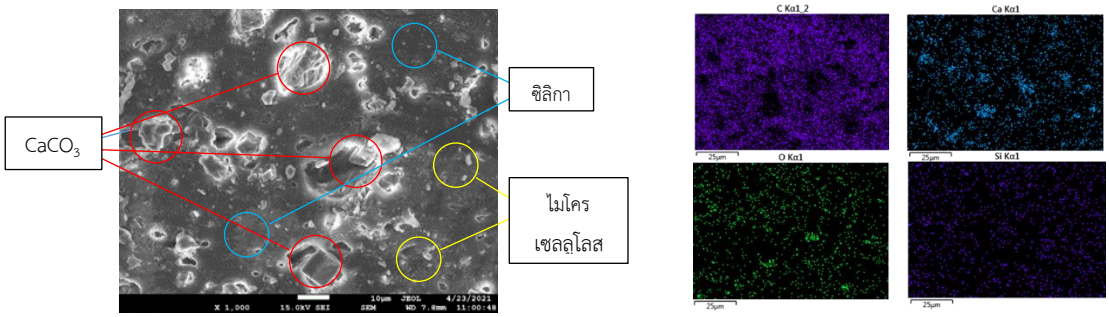
การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงในรูปที่ 6 พบว่าการเติมสารตัวเติมเสริมแรงไมโครเซลลูโลส (B3) รูปที่ 6 (ก) จะสังเกตเห็นอนุภาคของสารเคมีที่เติมในคอมโพสิตยางธรรมชาติ เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่และขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ เมื่อวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค SEM-EDS รูปที่ 6(ข) พบว่า อนุภาคที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เป็นของ $CaCO_3$ และขนาดเล็กที่เกิดการรวมกลุ่มกันเล็กน้อยเป็นของไมโครเซลลูโลส และการเติมสารตัวเติมเสริมแรงไมโครเซลลูโลสผสมซิลิกา (B4) แสดงในรูปที่ 6 โดยรูปที่ 6(ค) จะสังเกตเห็นอนุภาคของสารเคมีที่เติมในคอมโพสิตยางธรรมชาติเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก ขนาดใหญ่ และอนุภาคขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค SEM-EDS ดังรูปที่ 6(ง) พบว่า อนุภาคที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่จะเป็นของ $CaCO_3$ ขนาดอนุภาคที่เป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กเป็นของไมโครเซลลูโลส และอนุภาคขนาดเล็กที่กระจายตัวกันอยู่เป็นของซิลิกา



(ก)



(ข)



(ค) (ง)

รูปที่ 6 ลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM) ของการเติมสารตัวเติมเสริมแรง (ก) ไมโครเซลลูโลส (ค) ไมโครเซลลูโลสผสมซิลิกา และการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค (SEM-EDS) (ข) ไมโครเซลลูโลส (ง) ไมโครเซลลูโลสผสมซิลิกา

อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้สามารถสกัดและฟอกขาวเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลังโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาว ด้วยสารละลายผสม NaOH กับ H_2O_2 ตามลำดับ ผลการศึกษาสภาวะในการเตรียมไมโครเซลลูโลส พบว่า การเตรียมโดยใช้แรงกลมีลักษณะเป็นเส้นขนาดไมโครเมตร ที่ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์สูง 95 เปอร์เซ็นต์ และการศึกษาการเตรียมยางคอมโพสิต พบว่า การเติมเซลลูโลสเป็นสารตัวเติมทำให้ค่าความแข็ง 50.1 Shore A มีค่ามากกว่าการเติม ซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่ปริมาณเท่ากัน คือ 10 phr และพบว่าการเติม เซลลูโลสรวมกับซิลิการเป็นสารตัวเติม อย่างละ 5 phr ทำให้ยางคอมโพสิตมีค่าความแข็งมากที่สุด ที่ 51.1 Shore A

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีสำหรับการสนับสนุนในด้านเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) แก่ นางสาวเกษนภา บัวทอง ตามสัญญาทุนเลขที่ SCA-CO-2564-14594-TH ที่สนับสนุนทุนวิจัยสำรับทำงานวิจัยและทุนในการนำเสนอผลงาน

เอกสารอ้างอิง

พรรณวิไล กิ่งสุวรรณรัตน์. (2564). *การผลิตเอทานอลจากเหง้ามันสำปะหลัง.* [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]

สุภาวดี ผลประเสริฐ. (2557). การปรับสภาพวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสสาหรับการผลิตเอทานอล. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, *22*(5) 641-649.

อุษารัตน์ รัตนค้านวณ. (2557). *การเตรียมเซลลูโลสดัดแปรที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรภายใต้พลังงานไมโครเวฟ*. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

Abraham, E., Deepa, B., Pothan, L.A., Jacob, M., Thomas, S., Cvelbar, U. and Anandjiwala, R. (2011). Extraction of nanocellulose fibrils from lignocellulosic fibers: A novel approach. *Carbohydrate Polymer*, *86*, 1468-1475.

Bianchet, T. R., Cubas, V. L. A., Machado, M. M. and Moecke, S. H. E. (2020). Applicability of bacterial cellulose in cosmetics–bibliometric review. *Biotechnology Reports, 27.*

Cazón, P., Velazquez, G., Ramírez, A. J. and Vázquez, M. (2017). Polysaccharide-based films, and coatings for food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*, *68*, 136-148.

Chen, Y., Liu, C., Chang, P.R., Cao, X. and Anderson, D.P. (2009). Bionanocomposites based on pea starch and cellulose nanowhiskers hydrolyzed from pea hull fibre: Effect of hydrolysis time. *Carbohydrate Polymers, 76*(4), 607–615.

Feng, Y., Li, J., Wang, B. and Tian, X. (2018). Novel nanofibrillated cellulose/ chitin whisker hybrid nanocomposites and their use for mechanical performance enhancements. *BioResources, 13*(2), 3030-3044.

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

Nagarajan, K. J., Balaji, A. N., and Ramanujam, N. R. (2019). Extraction of cellulose nanofibers from cocos nucifera var aurantiaca peduncle by ball milling combined with chemical treatment. *Carbohydrate polymers*, *212*, 312-322.

Nsor-Atindana, J., Chen, M., Goff, D. H., Zhong, F., Sharif, R. H. and Li, Y. (2017). Functionality and nutritional aspects of microcrystalline cellulose in food. *Carbohydrate Polymers, 172*, 159-174.

Pasquini, D., Teixeira, E. D. M., Curvelo, A. A. D. S., Belgacem, M. N. and Dufresne, A. (2010). Extraction of cellulose whiskers from cassava bagasse and their applications as reinforcing agent in natural rubber. *Industrial Crops and Products*, *32*(3), 486-490.

Sun, X.-F., Sun, R.-C., Su, Y. and Sun, J.-X. (2004). Comparative study of crude and purifed cellulose from wheat straw. *Journal of agricultural and food chemistry, 52*, 839–847.