

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสเปลือกทุเรียน

พิมณิฉภา กันทาตง* มินตรา พีเกาะ และ อรธีรา สีน่านจาก

คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 10 พฤษภาคม 2561 ; แก้ไขบทความ 16 กรกฎาคม 2561 ตอรับบทความ 23 กรกฎาคม 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรคอมพาวด์ของพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพต้นแบบจากแป้งมันสำปะหลัง (CS) เสริมแรงด้วยเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งทางการเกษตร ทำการสกัดเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อนและฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การกำจัดองค์ประกอบของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียนถูกตรวจสอบโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังคอมโพสิตชีวภาพถูกเตรียมด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย ซึ่งประกอบด้วยร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนักเส้นใยเปลือกทุเรียน (DR) หรือ DRC ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง และยูเรีย/กลีเซอรอล (อัตราส่วน GU = 50:50) ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ร่วม ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพพลาสติกไซด์แป้งมันสำปะหลัง (TPS)/DR และ TPS/DRC พบว่าค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม CS ซึ่งฟิล์มจาก 15TPS/DR+GU (80/20) คอมโพสิตนั้นแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.28 เป็น 14.00 เมื่อเทียบกับฟิล์ม CS ควบคุม ในขณะที่ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ 15TPS/DRC (80/20) แสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงที่สุดถึงร้อยละ 77 และการเติมเส้นใยเปลือกทุเรียน (DR หรือ DRC) นั้นยังช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำของฟิล์มแป้งพลาสติกไซด์คอมโพสิตชีวภาพมีค่าลดลงอีกด้วย นอกจากนี้การมีองค์ประกอบของ DRC ในแป้งคอมโพสิตสามารถเพิ่มความเสถียรภาพของฟิล์มในน้ำได้ดีกว่า DR ดังนั้นผลของการเสริมแรง DRC ในฟิล์ม TPS คอมโพสิตชีวภาพสามารถปรับปรุงค่าความต้านทานน้ำและสมบัติเชิงกลโดยเฉพาะด้านความยืดหยุ่นและในลำดับสุดท้ายของฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ในกระบวนการฝังในดิน

คำสำคัญ: เซลลูโลสเปลือกทุเรียน; แป้งมันสำปะหลังเปลือกทุเรียน; ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ; ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร.: +6644 233 000 (4013), ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: pimpanitpa@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Bio-composite Films based on Cassava Starch Reinforced with Durian Rind Cellulose Fibers

Pimpanitpa Kunthadong* Mintra Peekoh and Ontheera Sindanjark

Faculty of Science and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan
744 Suranarai Road, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 10 May 2018; Revised 16 July 2018; Accepted 23 July 2018

Abstract

This research aimed to develop compound of prototypes polymer bio-composites from cassava starch (CS) reinforced with agriculture residue, the rind of durian fruit. Cellulose extracted from durian rind using hot sodium hydroxide and bleaching treatment with hydrogen peroxide. The removal of lignin and hemicellulose components from durian rind were investigated by fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). Cassava starch bio-composite films were prepared by solution-casting technique which includes 0-50 wt% of durian rind (DR) or durian rind cellulose (DRC) as reinforcement agent and urea/glycerol (GU ratio = 50:50) as plasticizer. The physical and chemical properties of thermoplastic starch (TPS)/DR and TPS/DRC bio-composite films were investigated. The percent elongation at break of bio-composite films were increased when compared to control CS film. From 15TPS/DR (80/20) films showed increase the elongation at break from 7.28 to 14.00% when compared to CS control films. While 15TPS/DRC (80/20) bio-composite films exhibited that the highest elongation at break to 77%. Durian fiber (DR or DRC) loading decreased the water absorption of plasticized bio-composite films. Furthermore, incorporation of DRC in composite can be enhanced film stability in water better than DR. Therefore, the effect of DRC reinforcement agent on TPS bio-composite films can improve water resistance and mechanical properties, especially in terms of flexibility. Finally, the waste of bio-composite films was degraded completely in soil burial test.

Keywords : Durian Rind Cellulose; Cassava Starch; Bio-composites; Biodegradable

* Corresponding Author. Tel.: +6644 233 000 (4013), E-mail Address: pimpanitpa@gmail.com

1. บทนำ

ปัจจุบันแป้งได้รับความสนใจจากอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ มีราคาถูก และสามารถหาได้ง่ายจากพืชหลากหลายชนิด เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง เป็นต้น อย่างไรก็ตามแป้งมีข้อจำกัดในการใช้งานด้านพลาสติก คือ แป้งมีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงแต่เปราะ ขึ้นรูปด้วยความร้อนได้ยากแป้งเมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวก่อนที่จะหลอมเหลว และมีความต้านทานน้ำต่ำ [1]-[3] งานวิจัยจำนวนมากได้พยายามปรับปรุงสมบัติของแป้ง โดยเทคนิคการผสมแป้งแบบเบลนด์ (Blend) หรือคอมโพสิต (Composite) ด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพตัวอื่นๆ รวมทั้งกระบวนการพลาสติกไซซ์ (Plasticization) แป้ง [3] พลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้สำหรับแป้ง คือ กลีเซอรอล (Glycerol) เนื่องจากความเข้ากันได้ดีกับโมเลกุลของแป้ง ราคาถูก และการใช้พลาสติกไซเซอร์ร่วม (Mixed Plasticizer) อาทิเช่น กลีเซอรอล/ยูเรีย [4] ยูเรีย/เอทานอลามีน [5] เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางสัณฐานวิทยาและลดการหดตัวของฟิล์มแป้งมากกว่าใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้แป้งที่เสริมแรง (Reinforcement) ด้วยเส้นใยพืชที่เหลือทิ้งทางการเกษตรยังสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต เช่น เส้นใยปอ [6] ป่าน [7] สับปะรด [8] ปาล์ม ลินิน [9] เป็นต้น เส้นใยพืชมงคลประกอบหลักทางเคมี คือ ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส สำหรับการใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตนั้นต้องมีการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยพืชด้วยอัลคาไลน์ (Alkali Treatment) และการฟอกขาว (Bleaching) พื้นผิวของเส้นใยมีความหยาบเพิ่มขึ้นส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์แมทริกซ์ดีขึ้น เนื่องด้วยอัลคาไลน์เข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในโครงสร้างเส้นใยพืช ดังนั้นเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีเป็นองค์ประกอบ

หลักสำคัญที่ช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล การคงสภาพ และเพิ่มค่าการต้านน้ำในฟิล์มคอมโพสิตอีกด้วย [10]-[11]

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) มาจากพืชหลากหลายชนิด อาทิเช่น ชานอ้อย ชั่งข้าวโพด ผักตบชวา เปลือกทุเรียน เป็นต้น ซึ่งเปลือกทุเรียนเป็นวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากในฤดูเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะจากกระบวนการแปรรูปทุเรียนทอดกรอบ [12] ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการจัดการและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เปลือกทุเรียนเป็นแหล่งที่มีปริมาณเซลลูโลสอยู่ในเกณฑ์ที่ดีสามารถนำมาเตรียมเส้นใยเซลลูโลสคุณภาพสูงได้ [13]

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพต้นแบบจากแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch: CS) เสริมแรงด้วยเซลลูโลสเปลือกทุเรียน (Durian Rind Cellulose: DRC) หรือเปลือกทุเรียน (Durian Rind) โดยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย รวมทั้งศึกษาลักษณะทางกายภาพ สมบัติต่างๆ ของพลาสติกชีวภาพคอมโพสิตที่เตรียมได้ สำหรับประเมินการนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้งานด้านพลาสติกบางประเภทที่เหมาะสมในอนาคต ทั้งนี้ยังเป็นการลดปัญหาขยะพลาสติกและได้แนวทางเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สารเคมี

แป้งมันสำปะหลัง (CS) ความอนุเคราะห์จาก บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด เปลือกทุเรียน (DR) บริเวณตลาดสด จังหวัดนครราชสีมา ผงเซลลูโลสทางการค้า (Microcrystalline Cellulose: MCC; Sigma-Aldrich) กลีเซอรอล (เกรตวิเคราะท์; QRc Chemical) และ ยูเรีย (เกรตการค้ำ; Ajax Finechem) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sigma-Aldrich) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Ajax Finechem)

2.2 การเตรียมเซลลูโลสเปลือกทุเรียน (DRC)

ทำความสะอาดเปลือกทุเรียนและหั่นเป็นชิ้นบางๆ ทำให้แห้งด้วยตูบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นำมาต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองเยื่อเปลือกทุเรียนและล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สถานะเดิมซ้ำอีกครั้ง ปั่นเยื่อเปลือกทุเรียนจนเส้นใยแยกออกจากกัน ฟอกขาวเยื่อเปลือกทุเรียนด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยปริมาตรเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองเยื่อเปลือกทุเรียนแล้วล้างสารละลายด้วยน้ำกลั่น นำเส้นใยเซลลูโลสเปลือกทุเรียนที่ได้ไปอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ บดเส้นใยเซลลูโลสเปลือกทุเรียนด้วยเครื่องบดจนเป็นผงละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 180 ไมโครเมตร เก็บรักษาด้วยโถดูดความชื้น ก่อนนำไปลักษณะเฉพาะและนำไปใช้งาน

2.3 การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ

2.3.1 ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพแป้งมันสำปะหลัง/เปลือกทุเรียน (CS/DR) และฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ พลาสติกไฮดรอกไซด์แป้งมันสำปะหลัง/เปลือกทุเรียน (TPS/DR)

เตรียมฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพจาก CS เสริมแรงด้วยเส้นใย DR ที่อัตราส่วน CS/DR ดังนี้ 100/0 90/10 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 โดยน้ำหนัก และทำการพลาสติกไฮดรอกไซด์แป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic Starch ; TPS) ด้วยสารพลาสติกไซเซอร์ (GU) 10 และ 15 pph (part per hundred; สัดส่วนปริมาณสารพลาสติกไซเซอร์เมื่อเทียบกับแป้ง 100 ส่วน) และเสริมแรงด้วย DR ในอัตราส่วนเช่นเดียวกับ CS/DR โดยกำหนดสูตรคอมพาวด์เป็น 10TPS/DR และ 15TPS/DR ตามลำดับ และแสดงสัญลักษณ์สูตรคอมพาวด์ดังตารางที่ 1

ตามสูตรคอมพาวด์เตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต ในสถานะสารละลายพอลิเมอร์ผสมที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 5-6 โดยมวล/ปริมาตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย ชั้นแรกเตรียมแป้งเจลาตินไนซ์ (Gelatinization) ในน้ำกลั่นปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร และเติมสารพลาสติกไซเซอร์ GU (กรณีที่เติมสารพลาสติกไซเซอร์) ที่อุณหภูมิ 85±1 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 10-15 นาที จนกระทั่งได้สารละลายแป้งที่มีลักษณะของเหลวหนืดคล้ายเจล เติม DR ลงในแป้งเจลาตินไนซ์และกวนต่อเป็น 15-20 นาที ถ่ายสารละลายพอลิเมอร์ผสมลงในแม่พิมพ์ (ถาดพลาสติก) ขนาด 10x17 ตารางเซนติเมตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient Temperature) เพื่อระเหยไล่ตัวทำละลายเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำให้แห้งในตูบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ลอกฟิล์มและเก็บรักษาในโถดูดความชื้นก่อนไปทดสอบสมบัติต่างๆ

2.3.2 ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพพลาสติกไฮดรอกไซด์แป้งมันสำปะหลัง/เซลลูโลสเปลือกทุเรียน (TPS/DR)

ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วย DRC หรือ MCC อัตราส่วน 80/20 และพลาสติกไฮดรอกไซด์ด้วย GU 15 pph สูตรคอมพาวด์เป็น 15TPS/DR และ 15TPS/MCC ตามลำดับ (ตารางที่ 1) เตรียมพอลิเมอร์ผสมในสถานะสารละลายที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 5-6 โดยมวล/ปริมาตร ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย ชั้นแรกเตรียมแป้งเจลาตินไนซ์และ GU ในน้ำกลั่นเป็นปริมาตร 90 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 85±1 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 10-15 นาที ณ ขณะเดียวกันเตรียมสารละลายเซลลูโลส (DRC หรือ MCC) ในตัวทำละลาย NaOH/Urea/H₂O ที่อัตราส่วน 7:12:81 โดยน้ำหนัก [14] ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในอ่างน้ำร้อนรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 85±1 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนสารเป็นเวลา 10 นาที ได้สารละลายเซลลูโลสลักษณะคล้ายเจลหนืด

เติมสารละลายเซลลูโลสลงในแป้งเจลาตินซ์และปั่นกวนต่อเป็นเวลา 15-20 นาที ถ่ายสารละลายพอลิเมอร์ผสมลงในแม่พิมพ์ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิโดยรอบระเหยไล่ตัวทำละลายเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการลอกฟิล์มและเก็บรักษาในโถดูดความชื้นก่อนไปทดสอบสมบัติต่างๆ

ตารางที่ 1 ตารางแสดงสัญลักษณ์สูตรคอมพาวด์การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ

Composite code	แป้งมันสำปะหลัง	เส้นใยเสริมแรง (DR/DRC/MCC)	GU
CS	+	-	-
CS/DR	+	+	-
10TPS/DR	+	+	10 pph
15TPS/DR	+	+	15 pph
15TPS/DRC	+	+	15 pph
15TPS/MCC	+	+	15 pph

2.4 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเส้นใยเสริมแรง

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของเปลือกทุเรียน (DR) เซลลูโลสเปลือกทุเรียน (DRC) และเซลลูโลสทางการค้า (MCC) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR: Perkin Elmer; Spectrum 100) และศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (TGA: Perkin Elmer; STA6000)

2.5 สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

ศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; LLOYD Instrument, LF plus) ตามมาตรฐาน ASTM

D882-91 โดยใช้ตัววัดแรงดึง (Load Cell) 1 กิโลนิวตัน ความเร็วในการทดสอบ (Crosshead Speed) 10 มิลลิเมตร/นาที และระยะห่างตัวรองรับตัวอย่าง (Gauge Length) 50 มิลลิเมตร ชิ้นงานตัวอย่างฟิล์มคอมโพสิตขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และหนา 1.0 ± 0.1 มิลลิเมตร โดยวัดค่าทนต่อแรงสูงสุด (Tensile Strength; TS) และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break; EB) ทำการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

2.6 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ศึกษาความสามารถการต้านทานน้ำและความเสถียรภาพของฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพเมื่อแช่ในน้ำ ด้วยการทดสอบการดูดซึมน้ำ เตรียมชิ้นงานตัวอย่างฟิล์มคอมโพสิตขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิโดยรอบ ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของฟิล์มตัวอย่าง แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่น ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ตามระยะเวลาทดสอบ 6, 9, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง จากนั้นนำฟิล์มตัวอย่างออกมาตามเวลาที่ทดสอบชั่งน้ำหนักที่พื้นผิวและชั่งน้ำหนักขณะเปียก โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

2.7 ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยกระบวนการฝังในดิน (Soil Burial Test)

การย่อยสลายทางชีวภาพโดยกระบวนการฝังในดิน ศึกษาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพการเสถียรภาพ หรือการแตกหักของฟิล์มตัวอย่าง นำฟิล์มตัวอย่างขนาด 20×20 ตารางมิลลิเมตร อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งชิ้นงานตัวอย่างเย็นตัวลงในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งหาน้ำหนักที่แน่นอนของชิ้นงานตัวอย่าง แล้วทำการฝังชิ้นงานตัวอย่างให้ลึกจากผิวดิน ประมาณ 25-30 เซนติเมตร โดยรักษาความชื้นภายใน

ดินและทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร และเก็บตัวอย่างทุกๆ 1 วัน

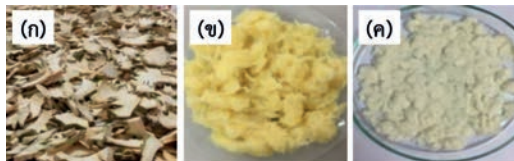
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการเตรียมเซลลูโลสเปลือกทุเรียน

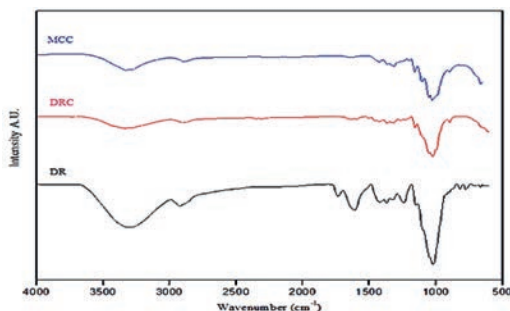
เปลือกทุเรียนที่ทำความสะอาดและหั่นเป็นชิ้นบางๆ มีลักษณะดังรูปที่ 1 (ก) เมื่อทำการสกัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าเส้นใยเซลลูโลสเปลือกทุเรียนที่สกัดได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองอ่อน (ข) เมื่อทำให้แห้งได้เซลลูโลสเปลือกทุเรียนสีขาวครีม และทำให้เป็นผงละเอียดขนาดน้อยกว่า 180 ไมโครเมตร (ค) โดยเซลลูโลสเปลือกทุเรียนที่เตรียมได้มีค่าร้อยละของผลผลิตเซลลูโลสเท่ากับร้อยละ 43.02 ± 1.70 โดยน้ำหนัก สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

ร้อยละผลผลิต

$$= \frac{\text{น้ำหนักแห้งเซลลูโลสเปลือกทุเรียน}}{\text{น้ำหนักแห้งเปลือกทุเรียน}} \times 100 \quad (1)$$



รูปที่ 1 ภาพถ่ายของเปลือกทุเรียน
(ก) เซลลูโลสเปลือกทุเรียนขณะเปียก และ
(ค) เซลลูโลสเปลือกทุเรียน



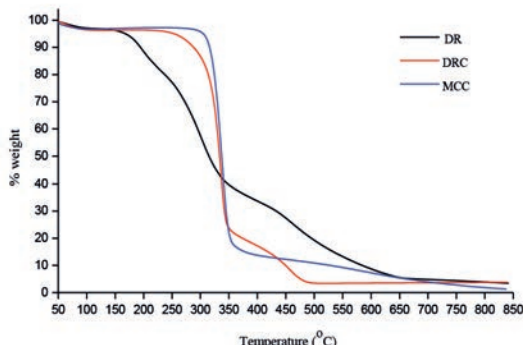
รูปที่ 2 FT-IR สเปกตรัมของ DR DRC และ MCC

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของเปลือกทุเรียน (DR) เซลลูโลสเปลือกทุเรียน (DRC) และเซลลูโลสทางการค้า (MCC) ด้วยเทคนิค FT-IR ในช่วงเลขคลื่น $4500-500 \text{ cm}^{-1}$ ได้สเปกตรัมดังรูปที่ 2 พบว่าทั้ง DR DRC และ MCC ปรากฏพีคการสั่นหมู่ไฮดรอกซิล (-O-H Stretching) ที่เลขคลื่น 3290, 3331 และ 3333 cm^{-1} ตามลำดับ และตัวอย่าง DR ปรากฏพีคการสั่นแบบยืดหมู่คาร์บอนิล (-C=O) ของโครงสร้างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ที่เลขคลื่น $1,736 \text{ cm}^{-1}$ [15] และเมื่อนำเปลือกทุเรียนมาสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (DRC) ไม่ปรากฏพีคการสั่นแบบยืดหมู่คาร์บอนิล ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับสเปกตรัมของเซลลูโลสทางการค้า (MCC) [16] จากผล FT-IR สามารถยืนยันได้ว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถสกัดเอาลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเปลือกทุเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของ DR DRC และ MCC ด้วยเทคนิค TGA แสดงดังตารางที่ 2 และ รูปที่ 3 จาก TGA เทอร์โมแกรมของทุกตัวอย่างพบว่าขั้นแรก (50-150 องศาเซลเซียส) เป็นการสูญเสียน้ำหนักของน้ำ/ความชื้น สำหรับตัวอย่าง DR เกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในขั้นตอนที่สอง (180-360 องศาเซลเซียส) เป็นขั้นตอนที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการสลายตัวของลิกนิน [17] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และคณะ [18] ที่พบว่าผลการสลายตัวด้วยความร้อนขององค์ประกอบลิกนินนั้นมีความยากและซับซ้อน ซึ่งเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (160-900 องศาเซลเซียส) ในขณะที่ตัวอย่าง DRC พบว่าเกิดการสลายตัวของโครงสร้างเซลลูโลสโดยมากในขั้นที่สอง และมีโครงสร้างเซลลูโลสบางส่วนเกิดการสลายตัวขั้นที่สาม เนื่องจากการสกัดเอาลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกส่งผลให้สายโซ่ของเซลลูโลสเกิดการจัดเรียงโมเลกุลใหม่เข้าใกล้กัน เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่แข็งแรงมากขึ้นทำให้เซลลูโลสในส่วนนี้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Rueangyodjantana และ Buntem [15] และผลการสลายตัวของ DRC มีลักษณะคล้ายกันกับ MCC แต่อย่างไรก็ตามเซลลูโลสทางการค้ามีความบริสุทธิ์สูงและเป็นเซลลูโลสสายสั้นที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรทำให้มีการจัดเรียงโมเลกุลที่มีความเป็นผลึกที่หนาแน่นสูง [16] ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวในขั้นสุดท้ายสูงกว่าเซลลูโลสเปลือกทุเรียน (DRC)

ตารางที่ 2 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ DR DRC และ MCC

ตัวอย่าง	ขั้นตอน	อุณหภูมิ (°C)		%น้ำหนักที่สูญเสีย	
		เริ่ม	สุดท้าย	แต่ละขั้น	รวม
DR	1 st	50	150	3.25	
	2 nd	180	360	58.10	94.71
	3 rd	360	700	33.36	
DRC	1 st	50	120	3.26	
	2 nd	210	360	74.65	96.68
	3 rd	360	550	18.77	
MCC	1 st	50	120	2.03	
	2 nd	270	410	83.68	95.64
	3 rd	410	720	9.932	

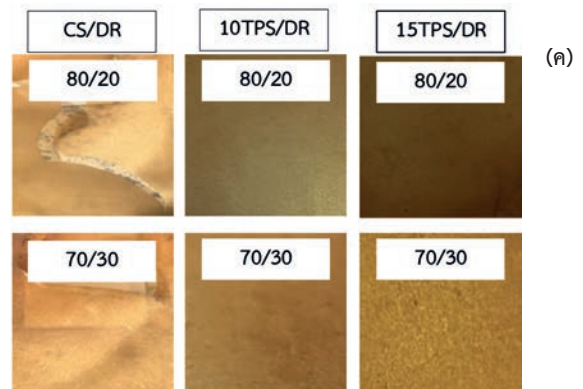


รูปที่ 3 TGA เทอร์โมแกรมของ DR DRC และ MCC

3.2 การเตรียมฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ

3.2.1 ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพแป้งมันสำปะหลัง/เปลือกทุเรียน (CS/DR) และฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ พลาสติกไซต์แป้งมันสำปะหลัง/เปลือกทุเรียน (TPS/DR)

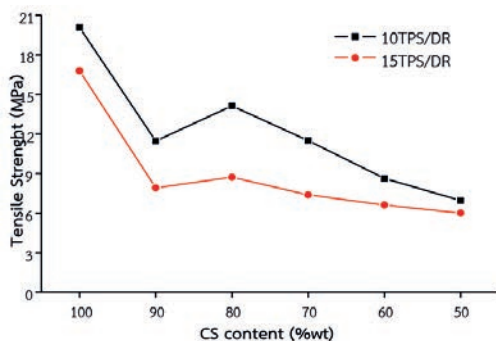
ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ CS/DR และฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพพลาสติกไซต์ 10TPS/DR และ 15TPS/DR ที่อัตราส่วน 70/30 และ 80/20 แสดงลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องดิจิทัล ดังรูปที่ 4 พบว่าฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ CS/DR ที่เตรียมได้มีลักษณะเกิดการหดตัวไม่คงรูป มีความเปราะ และไม่สามารถลอกเป็นแผ่นออกจากแม่พิมพ์ได้ในทุกอัตราส่วน ในขณะที่ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ TPS/DR พลาสติกไซต์ด้วย GU 10 และ 15 pph นั้นสามารถลอกฟิล์มจากแม่พิมพ์โดยไม่เกิดการแตกหัก และมีลักษณะพื้นผิวเรียบคงรูป นอกจากนี้ยังพบว่ามีการกระจายอนุภาคของ DR ในเนื้อ TPS เมทริกซ์ อย่างสม่ำเสมอโดยไม่เกิดรอยแยกระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ทั้งสอง



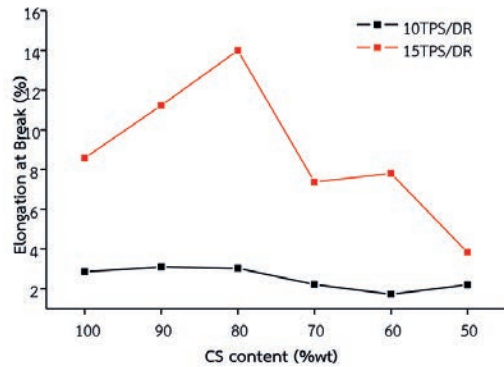
รูปที่ 4 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ CS/DR 10TPS/DR และ 15TPS/DR ด้วยกล้องดิจิทัล

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์ม CS และฟิล์มคอมโพสิต 10TPS/DR และ 15TPS/DR อัตราส่วนต่างๆ พบว่าฟิล์ม CS (ไม่ได้ผลแสดงในกราฟ) มีค่า TS สูง (34 MPa) แต่ให้ค่า EB ต่ำ (7.28%) บ่งบอกได้ว่าฟิล์ม CS มีสมบัติเชิงกลที่แข็งและเปราะ ในขณะที่ฟิล์ม

คอมโพลีต CS/DR นั้นไม่สามารถทำการทดสอบสมบัติเชิงกลได้เนื่องจากเกิดการแตกหักขณะลอกฟิล์ม ในขณะที่ฟิล์ม TPS/DR คอมโพลีตนั้นสามารถลอกฟิล์มและทดสอบสมบัติเชิงกลได้ทุกอัตราส่วน โดยแสดงข้อมูลค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด (TS) และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (EB) ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่าฟิล์ม TPS/DR ที่มี GU ปริมาณ 10 pph นั้น ให้ค่าทั้ง TS และ EB ลดลงทุกอัตราส่วนเมื่อเทียบกับฟิล์ม 10TPS (CS = 100 %wt) แสดงว่าปริมาณ GU 10 pph ที่เติมลงในระบบ TPS/DR ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมโพลีตที่เตรียมได้ในขณะที่ที่เติม GU ปริมาณ 15 pph ใน TPS/DR คอมโพลีตที่อัตราส่วน 90/10 และ 80/20 ให้ค่า EB เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ 15TPS (CS = 100 %wt) โดยที่อัตราส่วน 80/20 ให้ค่า EB มากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น และเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม 15TPS จากร้อยละ 8.58 เป็น 14 และค่า TS ลดลงทุกอัตราส่วน ซึ่งเป็นผลที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ถ้าสมบัติเชิงกลด้านความยืดหยุ่นเพิ่ม ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเติม GU 15 pph เป็นปริมาณการเติมสารพลาสติกไซเซอร์ GU ที่เหมาะสมและช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของ TPS/DR (80/20) คอมโพลีต โดยให้สมบัติเชิงกลโดยเฉพาะความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นและยังลดความเปราะของฟิล์มซึ่งผลสอดคล้องกับภาพถ่ายพื้นผิว



รูปที่ 5 ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุดของฟิล์ม TPS/DR



รูปที่ 6 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของฟิล์ม TPS/DR

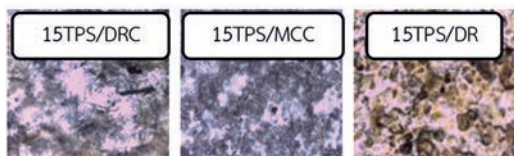
3.2.2 ฟิล์มคอมโพลีตชีวภาพพลาสติกไฮดรอกซีแอลกอฮอล์/เซลลูโลสเปลือกทุเรียน (TPS/DRC)

ศึกษาการเตรียมขึ้นรูปและพัฒนาความเข้ากันได้ของฟิล์มคอมโพลีตชีวภาพระหว่าง TPS เสริมแรงด้วย DRC ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่เติมพลาสติกไซเซอร์ GU 15 pph (15TPS/DRC อัตราส่วน 80/20) โดยทำการเปรียบเทียบศักยภาพเส้นใยเสริมแรงระหว่าง DRC MCC และ DR ศึกษาที่สภาวะและปัจจัยเดียวกัน เนื่องจากความเข้ากันได้ระหว่างโมเลกุลของเนื้อแป้งเมทริกซ์และเส้นใยนั้นมีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป็นอย่างมาก

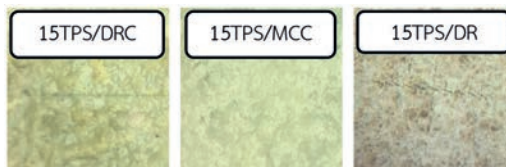
ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มคอมโพลีตชีวภาพ 15TPS/DRC 15TPS/MCC และ 15TPS/DR ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (10X) และกล้องจุลทรรศน์แบบสแตเรียโอ (4X) ดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม TPS ที่เสริมแรงด้วยเซลลูโลส (15TPS/DRC และ 15TPS/MCC) นั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค แสดงว่าอนุภาคของ TPS กับเซลลูโลส (DRC และ MCC) มีการยึดเกาะระหว่างอนุภาคและมีความเข้ากันได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับ DR ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีพอลิเมอร์-เบลนด์ (Polymer Blend) ชนิดเข้ากันได้บางส่วน (Partially Compatible Blend) [19] และฟิล์ม

ที่เตรียมได้มีความคงรูป โดยไม่เกิดการหดตัว และพื้นผิวมีความขรุขระ (Surface Roughness) ผิวสัมผัสมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่น เนื่องมาจากขั้นตอนการเตรียมฟิล์มใช้เซลลูโลสเป็นสารละลายชนิดคล้ายเจล [14] ก่อนผสมกับสารละลาย TPS ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแกร่งนั้น ลดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีลักษณะที่ยืดหยุ่น (Flexible) และอ่อนนุ่มเพิ่มขึ้น (Ductile)

สำหรับฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ TPS/DR มีลักษณะเป็นเนื้อผสมที่มีการกระจายของอนุภาค DR ใน TPS เนื้อเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ โดยมีอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคทั้งสอง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีพอลิเมอร์คอมโพสิต ดังนั้นจากลักษณะทางกายภาพด้วยภาพถ่ายสามารถบอกได้ว่าการเตรียมพอลิเมอร์ผสม TPS กับเซลลูโลส (DRC และ MCC) นั้นมีความเข้ากันได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับเปลือกทุเรียน (DR) เนื่องจากเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากในโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของแป้ง ส่งผลให้พอลิเมอร์ทั้งสองสามารถผสมเข้ากันได้ดีเมื่อเตรียมเซลลูโลสเป็นสารละลาย อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีของ DR มีโครงสร้างของลิกนินที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีส่วนของสารอะโรมาติกในโครงสร้าง มีความเข้ากันได้ยากกับโมเลกุลของแป้งที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก



รูปที่ 7 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มคอมโพสิต 15TPS/DRC 15TPS/MCC และ 15TPS/DR ที่อัตราส่วน 80/20 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10 เท่า (10X)



รูปที่ 8 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มคอมโพสิต 15TPS/DRC 15TPS/MCC และ 15TPS/DR ที่อัตราส่วน 80/20 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอกำลังขยาย 4 เท่า (4X)

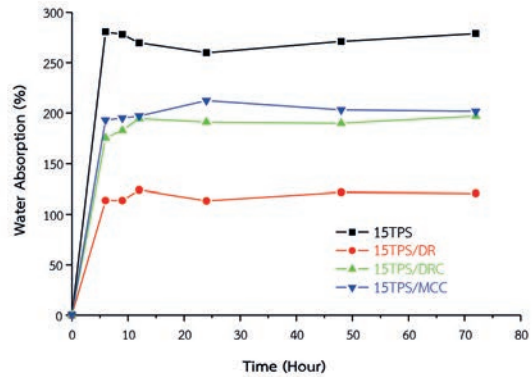
ผลจากสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ 15TPS/DRC 15TPS/MCC และ 15TPS/DR ที่อัตราส่วน 80/20 พลาสติกซ์ด้วย GU 15 pph แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าฟิล์มคอมโพสิต 15TPS/DRC และ 15TPS/MCC ให้ค่า EB เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ค่า TS ของฟิล์มลดลงเช่นเดียวกันเมื่อเทียบกับมี DR เป็นองค์ประกอบ ทำให้ได้ฟิล์มที่มีลักษณะที่ยืดหยุ่นและอ่อนนุ่ม แต่ค่าความแข็งแรงของฟิล์มลดลง จากผลของสมบัติเชิงกลสามารถยืนยันได้ว่าเซลลูโลสนั้นนอกจากเพิ่มความเข้ากันได้กับ TPS แล้วนั้น เซลลูโลสยังเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ฟิล์มคอมโพสิตอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของฟิล์มคอมโพสิต อย่างไรก็ตาม DRC ซึ่งเป็นเซลลูโลสที่สกัดจากเปลือกทุเรียนนั้นยังคงเป็นเซลลูโลสสายโซ่ยาวจึงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า MCC ที่เป็นเซลลูโลสสายสั้นที่ผลิตโดยการย่อยแอลฟา-เซลลูโลสของเส้นใยพืชด้วยกรดจนได้เซลลูโลสสายสั้น [16]

ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ พลาสติกซ์แป้งมันสำปะหลัง/เส้นใยเสริมแรง ที่อัตราส่วน 80/20 เติม GU 15 pph

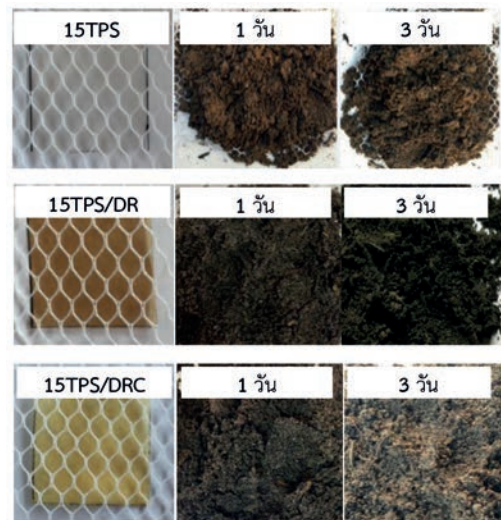
ฟิล์มคอมโพสิต	TS (MPa)	EB (%)
15TPS/DRC	0.66±0.21	77.72±6.80
15TPS/MCC	0.43±0.18	37.94±3.01
15TPS/DR	8.72±0.62	14.00±1.60

การศึกษาความสามารถการต้านทานน้ำ (ความชื้น) ของฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชีวภาพ 15TPS/DR 15TPS/MCC และ 15TPS/DR อัตราส่วน 80/20 เทียบกับฟิล์ม 15TPS โดยวิเคราะห์จากผลทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของฟิล์มตัวอย่างแสดงดังรูป 9 พบว่าฟิล์ม 15TPS มีร้อยละการดูดซึมน้ำสูงที่สุด (ประมาณร้อยละ 280 ของน้ำหนักแห้ง) และในตัวอย่างฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชีวภาพ 15TPS/DR และ 15TPS/MCC มีค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 190-200 ของน้ำหนักแห้ง ในขณะที่ฟิล์ม 15TPS/DR นั้นมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดร้อยละ 120-130 ของน้ำหนักแห้ง จากผลการทดสอบสมบัติดูดซึมน้ำสามารถยืนยันได้ว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติทั้ง DR และ DRC ช่วยเพิ่มค่าการต้านทานน้ำให้แก่ฟิล์มที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน เนื่องจากโมเลกุลของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีสมบัติชอบน้ำจำนวนมากทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปภายในฟิล์มได้ง่าย เมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานฟิล์มบางส่วนเกิดการละลายและเสียหาย แต่อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์ม TPS ที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส (DRC หรือ MCC) เมื่อฟิล์มผ่านการแช่ในน้ำเป็นเวลานานนั้นฟิล์มเกิดการละลายบางส่วน โดยที่ฟิล์มไม่เกิดการเสียหายและมีความคงรูป เมื่อเทียบกับฟิล์ม 15TPS และ 15TPS/DR นั้นเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานฟิล์มเกิดการรอยแตกขาดและเปื่อยยุ่ย จากข้อมูลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชีวภาพ TPS/DR จากกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มแบบหล่อสารละลายและมีการเตรียมเซลลูโลสให้เป็นสารละลายชนิดลักษณะคล้ายเจล [14] ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสที่เตรียมได้จึงมีลักษณะเป็นไฮโดรเจลฟิล์มที่มีสามารถดูดซึมน้ำและกักเก็บน้ำได้โดยไม่เกิดการละลาย และลำดับสุดท้ายศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยกระบวนการฝังในดินพบว่าฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชีวภาพทั้งสามตัวอย่างสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ภายใน 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 10 เนื่องจากการทดสอบสภาวะการฝังดินที่มีความชื้นสูงและมีแบคทีเรีย

(จุลินทรีย์) เป็นตัวเร่งอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพสำหรับฟิล์มตัวอย่าง



รูปที่ 9 ร้อยละการซึมน้ำของของฟิล์ม 15TPS และ 15TPS/DR 15TPS/MCC และ 15TPS/DR ที่อัตราส่วน 80/20



รูปที่ 10 แสดงการย่อยสลายทางชีวภาพโดยกระบวนการฝังในดินของของฟิล์มคอมโพลีเมอร์ชีวภาพ 15TPS 15TPS/DR และ 15TPS/DRC

4. สรุป

การสกัดเซลลูโลสเปลือกทุเรียนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่ามีประสิทธิภาพสำหรับการกำจัดลิกนิน

และเอมิเซลลูโลสได้ดี ยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR และ TGA สำหรับกระบวนการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพ โดยทำให้เซลลูโลสเปลือกทุเรียนเป็นสารละลายก่อนนำไปผสมกับแป้งเจลาตินนั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสอง ซึ่งฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพแป้งมันสำปะหลัง/เซลลูโลสเปลือกทุเรียน (15TPS/DRC) ที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ความยืดหยุ่นสูง และมีลักษณะความเป็นฟิล์มเจล โดยมีส่วนที่เกิดการละลายน้ำได้ต่ำ และมีความคงรูปเมื่อแช่ในน้ำ ในขณะที่ฟิล์ม 15TPS/DR ที่อัตราส่วนเดียวกันฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อผสมสมบัติเชิงกลเด่นด้านความทนต่อแรงดึง และต้านทานน้ำได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับเสริมแรงด้วย DRC ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้สำหรับเตรียมฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพต้นแบบจากแป้งมันสำปะหลังและเปลือกทุเรียน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาสมบัติของฟิล์มคอมโพสิตนี้ให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานบางประเภทในลำดับต่อไป อาทิเช่น TPS/DRC เหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นฟิล์มไฮโดรเจล เช่น แผ่นเจลมาร์คหน้า และสำหรับTPS/DR นั้นสามารถพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความคงรูปได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการอนุเคราะห์เครื่องมือและสารเคมีสำหรับทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. J. F. Carvalho, A. E. Job, N. Alves, A. A. S. Curvelo and A. Gandini, "Thermoplastic starch/natural blends," *Carbohydrate Polymers*, vol. 53, pp. 95-99, 2003.
- [2] Y. X. Xu, K. M. Kim, M. A. Hanna and D. Nag, "Chitosan-starch composite film: preparation and characterization," *Industrial Crops and Products*, vol. 21, pp. 185-192, 2005.
- [3] P. Khongjangreed, S. Sirisom, C. Chotchayapong, A. Paphongam, P. Sawadee, W. Punyodom and P. Kunthadong, "Preparation and properties testing of environmentally biodegradable based on starch for agricultural application," in *Proceeding of the 45th International Symposium on Macromolecules (MACRO 2014)*, Chiang Mai, Thailand, 2014, pp. 92-94.
- [4] V. Grazuleviciene, J. Treinyte and E. Zaleckas, "Film-forming starch composites for agricultural applications," *Journal of Polymers and the Environmental*, vol. 20, pp. 485-491, Jun. 2012.
- [5] X. F. Ma, J. G. Yu and J. J. Wan, "Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer for thermoplastic starch," *Carbohydrate Polymers*, vol. 64, pp. 267-273, Jan. 2006.
- [6] K. H. Song and I. S. Kim, "Effects of plasticizer on the mechanical properties of kenaf/starch bio-composites," *Fibers and Polymers*, vol. 14, pp. 2135-2140, Aug. 2013.
- [7] S. Ochi, "Durability of Starch Based Biodegradable plastics reinforced with Manila hemp fibers," *Materials*, vol. 4, no. 3, pp. 457-468, Feb. 2011.
- [8] M. Z. Selamat, M. Razi, A. N. Kasim, D. M. Sivakumar, P. Azma, M. A. M. Daud and Y. Yuhazri, "Mechanical properties of

- starch composite reinforced by pineapple leaf fiber (PLF) from josapine cultivar,” *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, pp. 9783-9788, Aug. 2016.
- [9] H. Ibrahim, M. Farag, H. Megahed and S. Mehanny, “Characteristics of starch-based biodegradable composites reinforced with date palm and flax fibers,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 101, pp. 11-19, Jan. 2014.
- [10] A. K. Bledzki and J. Gassan, “Composites reinforced with cellulose based fibres,” *Progress in Polymer Science*, vol. 24, pp. 221-274, 1990.
- [11] J. D. McMillan, “Pretreatment of lignocellulosic biomass,” in *Enzymatic conversion of biomass for fuels production*, vol. 566, M.E. Himmel, J.O. Baker and R.P. Overend, American Chemistry Society, 1994, pp. 292-324.
- [12] L. Luenam and J. Temprateep, “Study of materials to abandon remain from process to arrange flesh durian for fryer,” *RMUTTO Journal*, vol. 1, pp. 36-40, Jan. 2009.
- [13] P. Rachtanapun, S. Luangkamin, K. Tanprasert and R. Suriyatem, “Carboxymethyl cellulose film from durian rind,” *LWT – Food Science and Technology*, vol. 48, pp. 52-58, 2012.
- [14] J. Cai and L. Zhang, “Rapid dissolution of cellulose in LiOH/Urea and NaOH/Urea aqueous solution,” *Macromolecular Bioscience*, vol. 5, pp. 539-548, 2005.
- [15] J. Rueangyodjantana and R. Buntem, “Cellulose extraction and paper making from Khoi bark,” *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*, vol. 4, pp. 50-59, May. 2017.
- [16] 49th JECFA, “Microcrystalline Cellulose,” in *Compendium of Food Additive Specification: Addendum 5*, Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives 49th session, Rome, 1997, pp. 71-73.
- [17] M. R. Manshor et al., “Mechanical, thermal and morphological properties of durian skin fibre reinforced PLA biocomposites,” *Materials and Design*, vol. 59, pp. 279-286, Mar. 2014.
- [18] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee and C. Zheng, “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,” *Fuel*, vol. 86, pp. 1781-1788, 2007.
- [19] S. Sanchez-Valdes, L. F. D. Valle and O. Manero, “Polymer Blends,” in *Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing*, vol. 628, E. Saldivar-Guerra and E. Vivaldo-Lima, John Wiley & Sons, Inc., 2013, pp. 505-517.