

การศึกษาสัณฐานวิทยา ความเสถียรทางความร้อน และสมบัติเชิงกล ของการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติดัดแปร

เพชรดาพัชญ์ บุญสุข

สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

E-mail: jariyaporn.k@psu.ac.th

รับบทความ: 8 กันยายน 2567 แก้ไขบทความ: 29 มกราคม 2568 ยอมรับตีพิมพ์: 16 กุมภาพันธ์ 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของการย่อยสลายทางชีวภาพในดินของยางธรรมชาติดัดแปร โดยนำยางธรรมชาติ (natural rubber: NR) กราฟต์แบริ่งมันสำปะหลังดัดแปร (cassava starch: CST) ที่มีสัดส่วน CST 50 phr (NR-g-CST 50 phr) เปรียบเทียบกับแบริ่งมันสำปะหลังดัดแปรร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (CST) ยางธรรมชาติกราฟต์กับแบริ่งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr และผสมกลีเซอรอล (glycerol: GE) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (พอลิเมอร์ผสม NS-GE) ยางธรรมชาติผสมกับแบริ่งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr (พอลิเมอร์ผสม NR/CST 50 phr) ยางพรีวัลคาไนซ์ (pre-valcanized rubber: PR) ผสมกับแบริ่งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr (พอลิเมอร์ผสม PR/CST 50 phr) ยางธรรมชาติ 30%DRC (dry rubber content) ยางพรีวัลคาไนซ์ 30%DRC และถูมือยาง จากการศึกษาคrosslinking สัณฐานวิทยาพบว่าพื้นผิวของแผ่นฟิล์มทุกตัวอย่างมีลักษณะขรุขระ มีรู มีรูพรุนมีรอยแตกมากขึ้น และสังเกตเห็นเส้นใยบนพื้นผิวตัวอย่างเมื่อฝังดินนานขึ้น จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนก่อนการฝังดิน พบว่า เทอร์โมแกรมของ NR-g-CST 50 phr เลื่อนไปยังที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่า NS-GE NR/CST 50 phr และ PR/CST 50 phr ในช่วงอุณหภูมิ 330–500 องศาเซลเซียส และเมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนหลังการฝังดิน แผ่นฟิล์มทุกตัวอย่างทนความร้อนได้ลดลงเมื่อฝังดินนานขึ้น และจากการศึกษาสมบัติการทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ของ CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และถูมือยาง ก่อนการฝังดินพบว่าค่าการทนทานต่อแรงดึงเท่ากับ 5 ± 0.5 , 8 ± 0.6 , 11 ± 0.4 , 6 ± 0.6 , 7 ± 0.6 , 10 ± 0.6 , 8 ± 0.5 , และ 25 ± 0.8 และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับ 10 ± 2 , 200 ± 10 , 350 ± 20 , 270 ± 30 , 250 ± 30 , 300 ± 40 , 450 ± 20 และ 750 ± 30 ตามลำดับ สรุปได้ว่าการดัดแปรยางธรรมชาติโดยนำยางธรรมชาติ (NR) กราฟต์แบริ่งมันสำปะหลังดัดแปร (CST) ที่มีสัดส่วน CST 50 phr (NR-g-CST 50 phr) สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติให้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติในสิ่งแวดล้อม ทนต่อความร้อน และทนทานต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ได้ดี

คำสำคัญ: การย่อยสลายทางชีวภาพ ยางธรรมชาติ แบริ่งมันสำปะหลัง การดัดแปรโครงสร้าง
ยางธรรมชาติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Study on Morphological, Thermal Stability and Mechanical Properties of Biodegradation of Modified Natural Rubber

Phetdaphat Boonsuk

Physical Science Division, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90110, Thailand

E-mail: jariyaporn.k@psu.ac.th

Received: 8 September 2024 Revised: 29 January 2025 Accepted: 16 February 2025

Abstract

This research studied the morphology, thermal properties and mechanical properties of biodegradation in soil of modified natural rubber by natural rubber (NR) grafted with modified cassava starch (cassava starch: CST) at the ratio of 50 phr (NR-g-CST 50 phr) were compared with modified cassava starch 10 % by weight (CST), natural rubber blended with modified cassava starch at the ratio of 50 phr (NR/CST 50 phr), natural rubber grafted with modified cassava starch at the ratio of 50 phr and glycerol 3% by weight (NS-GE), pre-vulcanized rubber blended with modified cassava starch at the ratio of 50 phr (PR/CST 50 phr), natural rubber 30%DRC (NR 30%DRC), pre-vulcanized rubber 30%DRC (PR 30%DRC) and rubber gloves. From the study of the morphological structure, it was found that the surface of every film sample was rough, had more holes, pores, cracks and fungal hyphae were observed on the surface when buried in the soil for a long time. From the study of the thermal properties before burial, it was found that thermogram of NR-g-CST 50 phr shifts to a higher temperature than NS-GE, NR/CST 50 phr, and PR/CST 50 phr in the temperature range from 330–500°C. By studying thermal properties after burial, it was found that the decomposition temperature decreased when buried in the soil for a long time. As a consequence of studying the mechanical properties, it was found that the tensile strength of CST, NR-g-CST 50 phr, NS-GE, NR/CST 50 phr, PR/CST 50 phr, NR 30%DRC, PR 30%DRC and rubber gloves were 5 ± 0.5 , 8 ± 0.6 , 11 ± 0.4 , 6 ± 0.6 , 7 ± 0.6 , 10 ± 0.6 , 8 ± 0.5 and 25 ± 0.8 , and the maximum elongation at break were 10 ± 2 , 200 ± 10 , 350 ± 20 , 270 ± 30 , 250 ± 30 , 300 ± 40 , 450 ± 20 and 750 ± 30 , respectively. In conclusion, the modification of natural rubber by grafting natural rubber (NR) with modified cassava starch (CST) with a proportion of CST 50 phr (NR-g-CST 50 phr) could be used as a guideline for improvement and development natural rubber products were biodegradable and managed waste

from natural rubber and its products in the environment. It was thermal stability, tensile strength and maximum elongation at break properties well.

Keywords: Biodegradation, Natural rubber, Cassava starch, Structure modification, Biodegradable natural rubber

บทนำ

ขยะจากยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก การฝังกลบและการเผาในที่โล่งถือเป็นวิธีการกำจัดทิ้งทั่วไป ถูกที่สุด และง่ายที่สุด นำไปสู่มลภาวะทางน้ำ อากาศ และดิน ทั่วโลก กลายเป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาขยะจากยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากจุลินทรีย์และเชื้อราสามารถย่อยสลายยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติได้แม้ว่ากระบวนการจะใช้เวลานาน (Chairat *et al.*, 2018) นักวิจัยจึงพยายามที่จะปรับปรุงสมบัติยางธรรมชาติโดยนำแป้งและอนุพันธ์ของแป้งมาทำปฏิกิริยาโดยการกราฟต์หรือผสมในระบบน้ำยางธรรมชาติ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น ถู่มือย่อยสลายได้ (Mohd *et al.*, 2020) งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ดัดแปรยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติ (natural rubber: NR) กราฟต์กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (cassava starch: CST) ที่มีสัดส่วน CST 50 phr (NR-g-CST 50 phr) ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (CST) ยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50

phr (พอลิเมอร์ผสม NR/CST 50 phr) ยางธรรมชาติกราฟต์กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr และผสมกลีเซอรอล (glycerol: GE) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (พอลิเมอร์ผสม NS-GE) ยางพรีวัลคาไนซ์ (pre-valcanized rubber: PR) ผสมกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr (พอลิเมอร์ผสม PR/CST 50 phr) ยางธรรมชาติ 30% DRC (dry rubber content) ยางพรีวัลคาไนซ์ 30% DRC และถู่มือยาง โดยศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพทุก 1 4 8 12 16 และ 24 สัปดาห์ ทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนด วัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็น เช่น การเปลี่ยนแปลงสี การเกิดรูหรือรอยฉีกขาด การแตกหักหรือแยกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล วัดค่าน้ำหนักที่หายไปโดยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการฝังดิน คำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%weight loss) หรือร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (%biodegradation) และศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลโดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายทางชีวภาพบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์มตัวอย่างดังกล่าวทุกตัวอย่าง (Boonsuk, 2024) ส่งผลต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ ดังนั้นเพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น บรรลุวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงสมบัติยางธรรมชาติเพื่อเป็นแนวทาง

ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และการจัดการของเสียจากผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติในสิ่งแวดล้อมได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analysis: TGA) ก่อนและหลังการฝังดิน ศึกษาสมบัติการทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ก่อนการฝังดิน เนื่องจากไม่มีรายงานการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของตัวอย่างดังกล่าวอย่างเป็นระบบมาก่อน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (TGA) ก่อนและหลังการฝังดิน ศึกษาสมบัติการทนทานต่อแรงดึงทนทานต่อแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ก่อนการฝังดินของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง 8 ประเภท ได้แก่ 1) แป้งมันสำปะหลังดัดแปร ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (cassava starch: CST) 2) ยางธรรมชาติ (natural rubber: NR) กราฟต์แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (CST) ที่มีสัดส่วน CST 50 phr (NR-g-CST 50 phr) 3) ยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr (พอลิเมอร์ผสม NR/CST 50 phr) 4) ยางธรรมชาติกราฟต์กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr และผสมกลีเซอรอล (glycerol: GE) ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (พอลิเมอร์ผสม NS-GE) 5) ยางพรีวัลคาไนซ์ (pre-valcanized

rubber: PR) ผสมกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr (พอลิเมอร์ผสม PR/CST 50 phr) 6) ยางธรรมชาติที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง ร้อยละ 30 (NR 30% dry rubber content: NR 30%DRC) 7) ยางพรีวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง ร้อยละ 30 (PR 30% dry rubber content: PR 30%DRC) และ 8) ถู่มือยาง จากนั้นตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ ขนาด 2×2 เซนติเมตร อบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำแผ่นฟิล์มฝังในดินธรรมชาติ อ.เมือง จ.สงขลา โดยชั่งน้ำหนักดิน ปริมาณ 600 กรัม บรรจุในแก้วพลาสติก ขนาด 22 ออนซ์ ด้านล่างเจาะรูเพื่อให้น้ำไหลผ่าน นำแผ่นฟิล์มฝังในดินลึก 5 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว และห่างจากกันแก้ว 7 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางกลางแจ้ง โดยมีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อยู่ในช่วง 28 ± 2 องศาเซลเซียส และร้อยละ 70 ± 10 ตามลำดับ รดน้ำ 50 มิลลิลิตร ทุกสัปดาห์ โตรเตรียมแผ่นฟิล์มตัวอย่างทั้ง 8 ประเภท ตามงานวิจัยของ Boonsuk (2024)

การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทำโดยนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างก่อนและหลังฝังดินเป็นระยะเวลา 12 และ 24 สัปดาห์ ล้างด้วยน้ำกลั่นอย่างระมัดระวัง อบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้แห้งและเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น Quanta 400 (Thermo Fisher Scientific, Czech Republic) โดยใช้กระแสอิเล็กตรอนเท่ากับ 10 kV

การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (TGA) โดยนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างก่อนฝังดินเช่นเดียวกับ

การศึกษาสัณฐานวิทยา และหลังฝังดินเป็นระยะเวลา 8 และ 24 สัปดาห์ อบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราฟิเมตริกอนาไลเซอร์ (TGA 8000, Perkin Elmer, USA) ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 900 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน

การศึกษาสมบัติการทนทานต่อแรงดึง และการยืดสูงสุด ณ จุดขาด ทำโดยนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างก่อนฝังดิน เช่นเดียวกับการศึกษาสัณฐานวิทยา ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการทนต่อแรงดึง (universal testing machine: UTM, Z010, Zwick/Roell, Germany) ตัดตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D638 Die type V ความเร็ว (speed) 100 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) โหลดเซลล์ (load cell) 100 นิวตัน

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และถุงมือยาง ทั้งก่อนและหลังฝังดิน (ภาพที่ 1) พบว่า แผ่นฟิล์ม CST ก่อนฝังดิน พื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบ ซึ่งเกิดจากการกระจุกตัวของโมเลกุล CST ดังในภาพที่ 1(ก1) ทำให้สมบัติของ CST มีความเปราะ ไม่ทนต่อแรงที่กระทำ เมื่อฝังดินนาน 8 สัปดาห์ พบว่า พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ สังเกตเห็นเส้นใยขนาดเล็ก และมีช่องว่างหรือรูพรุนจำนวนมาก (ภาพที่ 1(ก2) และ (ก3)) ตามลำดับ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Chaisuwan *et al.* (2023) ซึ่งรายงานว่าการศึกษา SEM ของแผ่นฟิล์ม cassava starch/

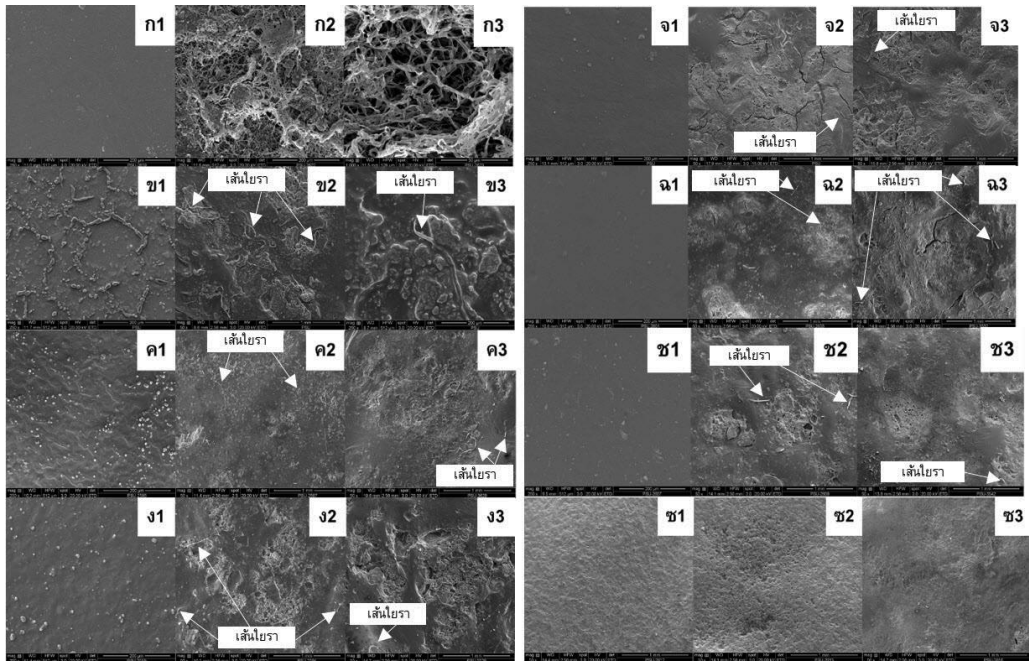
chitosan (C/CS) และ starch/chitosan/lemongrass essential oil (C/CS/LEO) หลังฝังดินนาน 10 วัน สังเกตเห็นเส้นใยขนาดเล็ก (fibrils) และรูจำนวนมากบนพื้นผิวเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มก่อนการฝังดิน แต่เมื่อฝังดินนาน 20 วัน จำนวนรูของแผ่นฟิล์ม C/CS จะมีจำนวนมากกว่า C/CS/LEO เล็กน้อย ยืนยันได้ว่า CST ย่อยสลายทางชีวภาพได้ ไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม จากการศึกษา SEM ของแผ่นฟิล์ม NR-g-CST 50 phr ก่อนการฝังดิน พบว่า พื้นผิวมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันระหว่าง NR กับ CST เนื่องจากการกราฟต์ระหว่าง NR กับ CST เชื่อมด้วยพันธะเคมี ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Riyajan *et al.* (2012) จึงทำให้ไม่เกิดการแยกเฟสเหมือน NR/CST 50 phr และมี CST กระจุกเป็นก้อนเล็ก ๆ กระจายอย่างสม่ำเสมอบนแผ่น NR (ภาพที่ 1(ข1)) แผ่นฟิล์ม NS-GE พื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบ เนื่องจากการผสมกาลีเซอรอล (GE) ซึ่งมีขี้ ทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่าง NR กับ GE และมี CST กระจุกเป็นก้อนเล็ก ๆ กระจายอย่างสม่ำเสมอ (ภาพที่ 1(ค1)) แผ่นฟิล์ม NR/CST 50 phr พื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบ เนื่องจาก CST เป็นพอลิเมอร์ชนิดมีขี้ มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) เมื่อผสมกับ NR ที่เป็นพอลิเมอร์มีขี้ต่ำ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เกิดการแยกเฟสระหว่าง NR กับ CST สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Riyajan *et al.* (2012) และมี CST กระจุกเป็นก้อนเล็ก ๆ และกระจายอย่างสม่ำเสมอบนแผ่น NR (ภาพที่ 1(ง1)) แผ่นฟิล์ม PR/CST 50 phr พื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบ ซึ่งเกิดจากการกระจุกตัวของโมเลกุล CST และเกิดการแยกเฟสระหว่าง PR กับ CST (ภาพที่ 1(จ1)) เช่นเดียวกับ NR/CST 50 phr ส่วนแผ่นฟิล์ม NR 30%DRC และ PR 30%DRC พื้นผิวมี

ลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน (ภาพที่ 1(ฉ1) และ (ช1)) และถุงมียาง พื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบ (ภาพที่ 1(ช1))

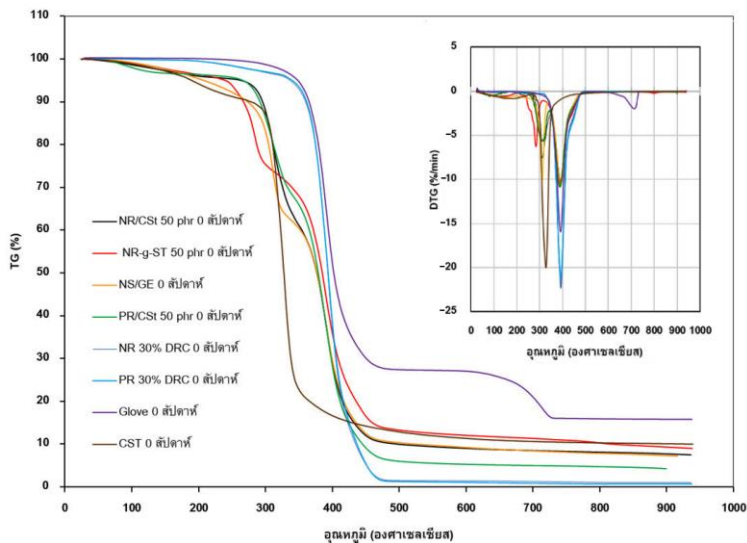
ผลการศึกษา SEM ของแผ่นฟิล์ม NR-g-CST 50 phr หลังจากฝังดินนาน 1 สัปดาห์ และ NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และถุงมียาง หลังจากฝังดินนาน 12 สัปดาห์ พบว่า พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ เป็นหลุม โพรง รู (hole) รูพรุน (pyrosity) รอยแตก (crack) และสังเกตเห็นเส้นใยรา (hyphae) โดยเฉพาะบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม NS-GE สังเกตเห็นอนุภาคทรงกลมกระจายอยู่ทั่วไปดังในภาพที่ 1(ก1) 1(ข2) 1(ค2) 1(ง2) 1(จ2) 1(ฉ2) 1(ช2) และ 1(ช2) ตาม ลำดับ ผลการศึกษา SEM ของ NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และถุงมียาง ฝังดินนาน 24 สัปดาห์ พบว่า พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ เป็นหลุม โพรง มีรู มีรูพรุนและมีรอยแตกมากยิ่งขึ้น และสังเกตเห็นเส้นใยราดังในภาพที่ 1(ค3) 1(ง3) 1(จ3) 1(ฉ3) 1(ช3) และ 1(ช3) ตาม ลำดับ การเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวบนแผ่นฟิล์ม ตัวอย่างทั้งหมดเมื่อฝังดินนานขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bosco *et al.* (2018) รายงานว่า เมื่อ บ่มแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติด้วย *Pseudomonas* sp. นาน 4 เดือน พบว่า พื้นผิวขรุขระ สังเกตเห็นโพรงขนาดเล็กไม่สม่ำเสมอและเกิดอนุภาคทรงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.5 ไมโครเมตร ถึงระดับหลายร้อยนาโนเมตร กระจายอยู่เป็นเนื้อเดียวกัน แสดงถึงการเกิดเซลล์แบคทีเรียบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ เมื่อบ่มแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติด้วยยีสต์ *Rhodotorula mucilaginosa* นาน 4 เดือน พบว่า พื้นผิวขรุขระ สังเกตเห็นพื้นผิวเป็นหลุมและกระจายอยู่ทั่วไป บาง-

ครั้งอาจเกิดจากการเจริญของยีสต์ และเมื่อบ่มด้วยรา *Alternaria alternata* นาน 4 เดือน จะสังเกตเห็นโครงข่ายของเส้นใยรา (hyphal network) อย่างหนาแน่น เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มตัวอย่างก่อนฝังดิน ซึ่งมีลักษณะเรียบ เป็นเนื้อเดียวกันและมีรูพรุนจำนวนหนึ่ง นอกจากนี้ลักษณะของเส้นใยราสอดคล้องกับ Nevoralova *et al.* (2020) ที่รายงานว่า การศึกษา สันฐานวิทยาของการผสมกันระหว่าง poly (ε-caprolactone: PCL) และ thermoplastic starch (TPS) ในอัตราส่วน PCL/TPS 70/30 PCL/TPS 50/50 และ PCL/TPS 30/70 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด หลังฝังดินนาน 20 วัน พบว่า สังเกตเห็นเส้นใยรา (hyphae) บนพื้นผิวทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังนั้น ยืนยันได้ว่า CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/ CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และถุงมียาง สามารถย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ในดินได้

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อน เริ่มทดสอบตั้งแต่ 50–900 องศาเซลเซียส ศึกษาสมบัติความร้อนของ CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และถุงมียาง ก่อนและหลังการฝังดิน พบว่า เทอร์โมแกรมของ NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/ CST 50 phr และ PR/CST 50 phr มีลักษณะคล้ายกัน แต่ความเสถียรทางความร้อนต่างกัน เนื่อง-จากความแตกต่างขององค์ประกอบและการเกิดอันตรกิริยาทางเคมี (chemical interaction) เทอร์โมแกรมแสดงในภาพที่ 2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของ CST ก่อนฝังดิน พบว่า มีการสลายตัว 3 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้น



ภาพที่ 1 สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์ม CST 0, 8, 8 สัปดาห์ กำลังขยาย 250, 250 และ 1000 เท่า ตามลำดับ (ก1, ก2, ก3) สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์ม NR-g-CST 50 phr 0 1 1 สัปดาห์ (ข1, ข2, ข3) กำลังขยาย 250 50 และ 250 เท่า ตามลำดับ (ค1, ค2, ค3) สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์ม NS-GE, NR/CST 50 phr (ง1, ง2, ง3), PR/CST 50 phr (จ1, จ2, จ3), NR 30 % DRC (ฉ1, ฉ2, ฉ3), PR 30%DRC (ช1, ช2, ช3) ที่ 0 12 24 สัปดาห์ กำลังขยาย 250 50 และ 50 เท่า ตามลำดับ และ สัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มถุงมือยาง 0 12 24 สัปดาห์ กำลังขยาย 50 เท่าตามลำดับ (ซ1, ซ2, ซ3)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของ CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30 DRC และถุงมือยาง ก่อนฝังดิน

และ $K_2S_2O_8$ ที่อุณหภูมิประมาณ 50–250 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของแป้งที่ 310–370 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เป็นการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ ที่อุณหภูมิ 370–500 องศาเซลเซียส และเป็นถ้ำคาร์บอนที่อุณหภูมิอย่างน้อย 500 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jankovic (2013) ซึ่งศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของแป้ง พบว่า แป้งเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 248 องศาเซลเซียส และขั้นตอนสุดท้ายของการสลายตัวทางความร้อนของแป้งเกิดจากการออกซิเดชันของอินทรีย์วัตถุ (oxidation) ที่อุณหภูมิ 450–600 องศาเซลเซียส โดยสลายตัวเป็นกากคาร์บอน (carbonaceous residues) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ NR-g-CST 50 phr และ NS-GE ก่อนผึ่งดิน พบว่า มีการสลายตัว 4 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้น $K_2S_2O_8$ และกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 50–250 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของแป้งที่อุณหภูมิ 250–320 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิประมาณ 320–470 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 4 เป็นการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุของ CST ที่อุณหภูมิ 470–550 และเป็นถ้ำคาร์บอนที่อย่างน้อยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Riyajan and Chantawee (2019) รายงานว่า การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์ม CSBR/CS blend ที่มีการเติมกลีเซอรอลปริมาณต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง TGA พบว่า น้ำและกลีเซอรอล สลายตัวที่อุณหภูมิ 100–250 องศาเซลเซียส ส่วนงานวิจัยของ Riyajan (2015) รายงานว่า การศึกษาสมบัติทางความร้อนของ MENR/NR-g-CSt โดยใช้เครื่อง TGA พบว่า แป้ง-

มันสำปะหลังตัดแปรร (CSt) ใน NR-g-CSt สลายตัวที่อุณหภูมิ 250–315 องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติ (NR) สลายตัวที่อุณหภูมิ 315–470 องศาเซลเซียส และการสลายตัวระหว่างอุณหภูมิ 630–730 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุของ CSt ใน NR-g-CSt และงานวิจัยของ Riyajan (2017) รายงานว่า NR-g-CSt สลายตัว 4 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้น ที่อุณหภูมิ 50–140 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 200–300 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 3 เป็นการสลายตัวที่อุณหภูมิ 300–450 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 4 เป็นการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 450–650 องศาเซลเซียส และเป็นถ้ำคาร์บอน และส่วนของ CSt ใน NR-g-CSt มีการสลายตัวใน 2 ช่วงหลัก ซึ่งไม่รวมถึงการสลายตัวของความชื้น โดยในช่วงแรกเป็นการสลายตัวแอมิโลส (amylose) และแอมิโลเพกทิน (amylopectin) ของแป้งที่อุณหภูมิ 200–370 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 2 เป็นการ “glowing combustion” ที่อุณหภูมิ 450–550 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ NR/CST 50 phr และ PR/CST 50 phr ก่อนการผึ่งดิน พบว่า มีการสลายตัว 3 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้นที่อุณหภูมิ 50–220 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของแป้ง มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 220–350 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 3 เป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิประมาณ 350–450 องศาเซลเซียส และจากเทอร์โมแกรม (ภาพที่ 2) พบว่า เทอร์โมแกรมของ NR-g-CST 50 phr เลื่อนไปยังที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่า NS-GE NR/CST 50 phr และ PR/CST 50 phr ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 435–550 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Riyajan *et al.*

(2012) ที่รายงานว่า NR-g-ST เลื่อนไปยังที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่า NR/ST ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 450–550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัวของ NR-g-CST 50 phr สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยนำยางธรรมชาติกราฟต์กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่สัดส่วน 50 phr (NR-g-CST 50 phr) ทำให้สมบัติความเสถียรทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เนื่องจาก NR-g-CST 50 phr เป็นการปรับปรุงแรงกระทำระหว่างเฟส (phase interface interaction) ของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง (Riyajan *et al.*, 2012)

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของ NR 30%DRC และ PR 30%DRC ก่อนผึ่งดิน พบว่า มีการสลายตัว 2 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้นที่อุณหภูมิ 50–200 องศาเซลเซียสช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิประมาณ 320–450 องศาเซลเซียส และเป็นเถ้าคาร์บอน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของถุ้มืออย่างก่อนผึ่งดิน พบว่า มีการสลายตัว 3 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้นที่อุณหภูมิ 50–200 องศาเซลเซียสช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิประมาณ 320–450 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 เป็นการสลายตัวของสารเคมีและอื่น ๆ ในถุ้มืออย่าง ที่อุณหภูมิประมาณ 450–750 องศาเซลเซียส และเป็นเถ้าคาร์บอน

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติความร้อนของ CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และถุ้มืออย่างทั้งก่อนและหลังการผึ่งดิน พบว่า

หลังผึ่งดิน อุณหภูมิการสลายตัวของ CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC และ PR 30%DRC ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนผึ่งดิน (ตาราง 1) แสดงว่า NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC และ PR 30%DRC สามารถทนต่อความร้อนหรือมีความเสถียรต่อความร้อนลดลง เมื่อผึ่งดินนานขึ้น ยกเว้นถุ้มืออย่าง เนื่องจากแผ่นฟิล์มตัวอย่าง CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC และ PR 30%DRC เกิดการย่อยสลาย ทำให้อันตรกิริยาทางเคมีลดลง เป็นผลให้สมบัติการทนต่อความร้อนลดลง ส่วนถุ้มืออย่างเกิดการย่อยสลายเล็กน้อย ทำให้สมบัติการทนต่อความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง

จากการศึกษาการทนทานต่อแรงดึงของ CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC, PR 30%DRC และถุ้มืออย่าง พบว่า มีค่าประมาณ 5 ± 0.5 , 8 ± 0.6 , 11 ± 0.4 , 6 ± 0.6 , 7 ± 0.6 , 10 ± 0.6 , 8 ± 0.5 และ 25 ± 0.8 MPa ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบสมบัติการทนทานต่อแรงดึงของ NR-g-CST 50 phr และ NS-GE กับ NR/CST 50 phr และ PR/CST 50 phr พบว่า NR-g-CST 50 phr และ NS-GE มีค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงกว่า NR/CST 50 phr และ PR/CST 50 phr เนื่องจาก NR-g-CST 50 phr และ NS-GE ส่วนของ CST เกิดการกราฟต์กับ NR เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมี จึงมีความแข็งแรงสูงกว่า NR/CST 50 phr และ PR/CST 50 phr (ภาพที่ 3) ส่วน NR/CST 50 phr มีค่าการทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่า NR-g-CST และ NS-GE เนื่องจากอาจเกิดรูและเกิดการแยกเฟสระหว่าง NR และ CST (Riyajan and Patisat, 2018) เช่น-

ตาราง 1 อุณหภูมิ Onset ของตัวอย่าง CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และถุงมือยางก่อนและหลังฝังดินที่ระยะเวลา 8 และ 24 สัปดาห์

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ Onset (องศาเซลเซียส)	
	แบ่ง (CST)	ยางธรรมชาติ (NR)
CST		
0 สัปดาห์	310.9	–
4 สัปดาห์	301.3	–
NR-g-CST 50 phr		
0 สัปดาห์	275.3	366.8, 438.5
1 สัปดาห์	274.0	350.0, 414.5
NS-GE		
0 สัปดาห์	297.5	372.3, 438.1
8 สัปดาห์	–	368.1, 434.8
24 สัปดาห์	–	362.2, 434.3
NR/CST 50 phr		
0 สัปดาห์	293.1	373.2, 435.1
8 สัปดาห์	–	366.0, 435.0
24 สัปดาห์	–	361.1, 433.8
PR/CST 50 phr		
0 สัปดาห์	282.8	367.6, 438.0
8 สัปดาห์	–	364.6, 433.5
24 สัปดาห์	–	360.3, 443.3
NR 30%DRC		
0 สัปดาห์	–	373.3, 438.0
8 สัปดาห์	–	367.2, 434.8
24 สัปดาห์	–	365.8, 431.7
PR 30%DRC		
0 สัปดาห์	–	368.6, 438.1
8 สัปดาห์	–	366.0, 435.5
24 สัปดาห์	–	365.6, 427.3
Glove		
0 สัปดาห์	–	366.1, 440.5
8 สัปดาห์	–	366.1, 435.2
24 สัปดาห์	–	366.1, 423.2

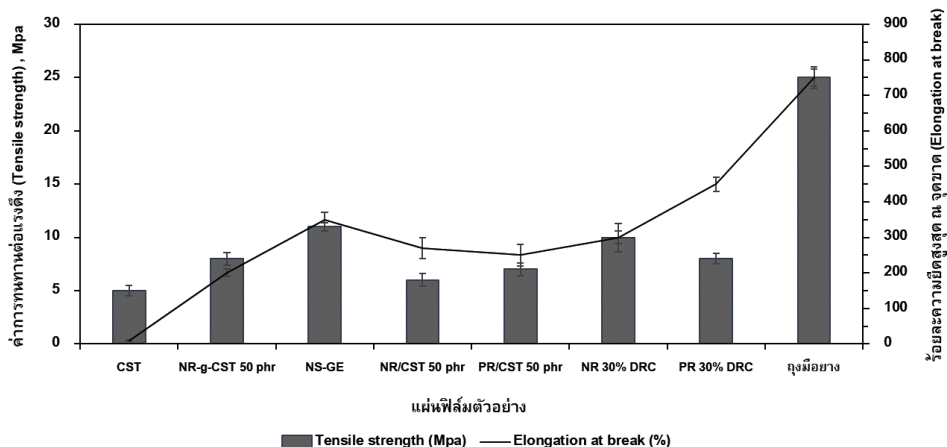
เดียวกับ PR/CST 50 phr

จากการศึกษาการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%

DRC และถุงมือยาง พบว่า ร้อยละการยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าประมาณ 10 ± 2 , 200 ± 10 , 350 ± 20 , 270 ± 30 , 250 ± 30 , 300 ± 40 , 450 ± 20 และ 750 ± 30 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ NR/CST 50 phr และ NR 30%DRC พบว่า ร้อยละการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ NR/CST 50 phr มีค่าน้อยกว่า NR 30%DRC เนื่องจาก NR/CST 50 phr เกิดการแยกเฟสระหว่าง NR และ CST และบางส่วนเกิดรู จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ส่วนร้อยละการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ NR-g-CST 50 phr ต่ำกว่า NR/CST 50 phr เนื่องจาก NR-g-CST 50 phr ส่วนของ CST เกิดการกราฟต์กับ NR แสดงสมบัติแข็งแรงซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการทนทานต่อแรงดึง แต่เมื่อเติมกลีเซอรอลใน NR-g-CST 50 phr ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (NS-GE) พบว่า ร้อยละการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ NS-GE สูงกว่า NR-g-CST 50 phr NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr และ NR 30%DRC ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Riyajan and Patisat (2018) ที่รายงานว่า ร้อยละการยืดสูงสุด ณ จุดขาดของ 95/5 CS/NR blend ที่เติมกลีเซอรอลร้อยละ 10 20 30 40 50 โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ทำให้ NS-GE มีสมบัติการการยืดสูงสุด ณ จุดขาด สูงขึ้น (ภาพที่ 3)

สรุปผลการทดลอง

การศึกษากายการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติดัดแปรโดยนํายางธรรมชาติกราฟต์แบ่งมันสำปะหลังดัดแปร (NR-g-CST 50 phr) โดยศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง TGA ก่อนและหลังฝังดิน และ



ภาพที่ 3 ค่าการทนทานต่อแรงดึงและร้อยละความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ของ CST NR-g-CST 50 phr NR/CST 50 phr NS-GE PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30% DRC และยางมียาง ก่อนการฝังดิน

การศึกษาสมบัติการทนทานต่อแรงดึงและการยืดสูงสุด ณ จุดขาด ก่อนการฝังดิน เปรียบเทียบกับแบงก์น้ำมันสำหรับหลังตัดแปรร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (CST) อย่างธรรมชาติกราฟต์แบงก์น้ำมันสำหรับหลังตัดแปรรวมกับกลีเซอรอล (NS-GE) อย่างธรรมชาติผสมแบงก์น้ำมันสำหรับหลังตัดแปรร (NR/CST 50 phr) อย่างพรีวัลคาไนซ์ผสมแบงก์น้ำมันสำหรับหลังตัดแปรร (PR/CST 50 phr) อย่างธรรมชาติ (NR 30% DRC) อย่างพรีวัลคาไนซ์ (PR 30%DRC) ยางมียาง และแบงก์น้ำมันสำหรับหลังตัดแปรร (CST) โดยนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 24 สัปดาห์ พบว่า CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และยางมียาง สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งยืนยันได้จากการศึกษาฐานฐานวิทยาศาสตร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และสังเกตเห็นเส้นใยราบบนพื้นผิวของตัวอย่าง จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน เริ่มทดสอบตั้ง-

แต่ 50-900 องศาเซลเซียส พบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 330-450 องศาเซลเซียส เทอร์โมแกรมของ NR-g-CST 50 phr เลื่อนไปยังที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่า NS-GE NR/CST 50 phr และ PR/CST 50 phr แสดงให้เห็นว่า NR-g-CST 50 phr สามารถทนความร้อนได้สูงที่สุด รองลงมาคือ NS-GE PR/CST 50 phr และ NR/CST 50 phr ตามลำดับ ส่วนการศึกษาสมบัติทางความร้อนหลังฝังดิน พบว่า สมบัติการทนต่อความร้อนของแผ่นฟิล์มทุกตัวอย่างจะลดลงเมื่อฝังดินนานขึ้น เนื่องจากแผ่นฟิล์มตัวอย่างเกิดการย่อยสลาย และจากการศึกษาสมบัติการทนทานต่อแรงดึงของ CST NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30%DRC PR 30%DRC และยางมียาง ก่อนการฝังดิน พบว่า ค่าการทนทานต่อแรงดึงเท่ากับ 5 ± 0.5 , 8 ± 0.6 , 11 ± 0.4 , 6 ± 0.6 , 7 ± 0.6 , 10 ± 0.6 , 8 ± 0.5 และ 25 ± 0.8 ตามลำดับ และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด เท่ากับ 10 ± 2 , 200 ± 10 , 350 ± 20 , 270 ± 30 , 250 ± 30 , 300 ± 40 , 450 ± 20 และ 750 ± 30 ตามลำดับ

สรุปได้ว่า การดัดแปรยางธรรมชาติโดยนำยางธรรมชาติ (NR) กราฟต์แบงมันสำปะหลังดัดแปร (CST) ที่มีสัดส่วน CST 50 phr (NR-g-CST 50 phr) สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากการกราฟต์ของ NR-g-CST ทำให้จุลินทรีย์ในดินสามารถย่อยสลายส่วนของ CST ต่อเนื่องถึงโมเลกุลของ NR ได้ มีสมบัติทนต่อความร้อนสูง เนื่องจาก NR-g-CST 50 phr เป็นการปรับปรุงแรงกระทำระหว่างเฟส (phase interface interaction) ของยางธรรมชาติและแบงมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังมีสมบัติการทนทานต่อแรงดึงและค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ได้ดี จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนายางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติให้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และการจัดการของเสียจากยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติในสิ่งแวดล้อมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินกองทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2565 (Faculty of Science Research Fund) สัญญาทุนเลขที่ SCI DEV64006 และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สอาด ริยะจันทร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับคำแนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Boonsuk, P. (2024). Study on biodegradation of modified natural rubber to serve as

guidelines for natural rubber waste management. **Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning** 15(1): 25–37. (in Thai)

Bosco, F., and Mollea, C. (2021). Biodegradation of natural rubber: Microcosm study water air soil pollution. **Water and Air Soil Pollution** 232(6): 1–15.

Bosco, F., Antonioli, D., Casale, A., Gianotti, V., Mollea, C., Laus, M., and Malucelli, G. (2018). Biodegradation of unvulcanized natural rubber by microorganisms isolated from soil and rubber surface: A preliminary study. **Bioremediation Journal** 22: 43–52.

Chairat, N., Kamontam, U., and Natthawan, S. (2018). Rubber gloves biodegradation by a consortium, mixed culture and pure culture isolated from soil samples. **Brazilian Journal of Microbiology** 49: 481–488.

Chaisuwan, K., Anurakumphan, D., Hemmanee, S., Ruamcharoen, J., and Leelakriangsak, M. (2023). Soil burial degradation of starch-based film on microbial load and plant growth. **Journal of Sustainability Science and Management** 18(3): 110–124.

Chantawee, K., and Riyajan, S. (2019). Effect of glycerol on the physical properties of carboxylated styrene butadiene rubber/cassava starch blend films. **Journal of Polymers and the Environment** 27: 50–60.

Jankovic, B. (2013). Thermal characterization

- and detailed kinetic analysis of Cassava starch thermo-oxidative degradation. **Carbohydrate Polymers** 95(2): 621–629.
- Mohd, F. A. R., Arjulizan, R., Muhammad, A. M., and Azura, A. R. (2020). Biodegradable gloves for waste management post-covid-19 outbreak: A shelf-life prediction. **ACS Omega** 5(46): 30329–30335.
- Nevoralova, M., Koutny, M., Ujcic, A., Stry, Z., Sera, J., Vlkova, H., Slouf, M., Fortelny, I., and Krulis, Z. (2020). Structure characterization and biodegradation rate of poly(ϵ -caprolactone)/starch blends. **Frontiers in Materials** 7: 1–14.
- Riyajan, S. (2015). Robust and biodegradable polymer of cassava starch and modified natural rubber. **Carbohydrate Polymers** 134: 267–277.
- Riyajan, S. (2017). Physical property testing of a novel hybrid natural rubber-graft-cassava starch/sodium alginate bead for encapsulating herbicide. **Polymer Testing** 58: 300–307.
- Riyajan, S., and Patisat, S. (2018). A novel packaging film from cassava starch and natural rubber. **Journal of Polymers and the Environment** 26: 2845–2854.
- Riyajan, S., Sasithronsonti, Y., and Phinyocheep, P. (2012). Green natural rubber-g-modified starch for controlling urea release. **Carbohydrate Polymers** 89: 251–258.