

## การศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของยางธรรมชาติดัดแปรเพื่อเป็น แนวทางในการจัดการของเสียจากยางธรรมชาติ

เพชรดาพัชญ์ บุญสุข

สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

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

รับบทความ: 23 ตุลาคม 2566 แก้ไขบทความ: 8 เมษายน 2567 ยอมรับตีพิมพ์: 8 เมษายน 2567

### บทคัดย่อ

ยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติมีการผลิตและการใช้เพิ่มขึ้นในทุกวัน ก่อให้เกิดปัญหาในการจัดการของเสียจากยางธรรมชาติ เนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้นได้ยาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นดัดแปรยางธรรมชาติโดยนำยางธรรมชาติ (NR) กราฟต์แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (CST) ที่มีสัดส่วน CST 50 phr (NR-g-CST 50 phr) เพื่อศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพและเปรียบเทียบแป้งมันสำปะหลังดัดแปรร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (CST) ยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr (พอลิเมอร์ผสม NR/CST 50 phr) ยางธรรมชาติกราฟต์กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr และผสมกลีเซอรอลร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (พอลิเมอร์ผสม NS-GE) ยางพรีวัลคาไนซ์ผสมกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr (พอลิเมอร์ผสม PR/CST 50 phr) ยางธรรมชาติร้อยละ 30 DRC (NR 30% DRC) ยางพรีวัลคาไนซ์ร้อยละ 30 DRC (PR 30% DRC) และถุงมือยาง โดยนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างฝังกลบในดินธรรมชาติ พบว่า แผ่นฟิล์ม CST ย่อยสลายทางชีวภาพได้ประมาณร้อยละ 97 โดยน้ำหนัก ใน 8 สัปดาห์ แผ่นฟิล์ม NR-g-CST 50 phr ย่อยสลายทางชีวภาพได้หมดใน 12 สัปดาห์ แผ่นฟิล์ม NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr PR 30% DRC NR 30% DRC และถุงมือยาง ย่อยสลายทางชีวภาพได้ประมาณร้อยละ 54 53 52 38 32 และ 24 โดยน้ำหนักใน 24 สัปดาห์ ตามลำดับ การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างเคมีก่อนและหลังการฝังดิน พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายทางชีวภาพ ดังนั้นการดัดแปรยางธรรมชาติโดยนำยางธรรมชาติกราฟต์แป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีสัดส่วน CST 50 phr สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนายางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติให้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และเป็นแนวทางในการจัดการของเสียจากยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติในสิ่งแวดล้อมต่อไป

**คำสำคัญ:** การย่อยสลายทางชีวภาพ ยางธรรมชาติ แป้งมันสำปะหลัง การดัดแปรโครงสร้าง ยางธรรมชาติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

# Study on Biodegradation of Modified Natural Rubber to Serve as Guidelines for Natural Rubber Waste Management

Phetdaphat Boonsuk

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

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

Received: 23 October 2023 Revised: 8 April 2024 Accepted: 8 April 2024

## Abstract

Natural rubber and its products have been produced and used increasingly every day. This has caused waste management problem because biodegradation is difficult to occur. Therefore, this research focused on the modification of natural rubber with grafted natural rubber with modified cassava starch at the ratio of 50 phr (NR-g-CST 50 phr) for study on biodegradation by compare 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 which buried in natural soil. It was found that the CST film was biodegraded about 97 wt% within 8 weeks. The NR-g-CST 50 phr film was completely biodegraded within 12 weeks. The NS-GE, NR/CST 50 phr, PR/CST 50 phr, PR 30% DRC, NR 30% DRC and rubber gloves films were biodegraded about 54 wt%, 53 wt% 52 wt%, 38 wt%, 32 wt% and 24 wt% within 24 weeks, respectively. From the study of physical appearance and chemical structures before and after burial, it was found that there were changes related to biodegradation. Therefore, NR modification by grafting modified CST at the ratio of 50 phr can be applied as guideline for the development of biodegradable NR and its products and for the waste management of NR and its products in the environment in the future.

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

## บทนำ

จากสถิติการผลิตยางธรรมชาติและปริมาณการใช้ยางธรรมชาติทั่วโลกตั้งแต่ พ.ศ. 2558–2565 พบว่า ปริมาณการผลิตยางธรรมชาติทั่วโลกเพิ่มขึ้นจาก 12.25 ล้านตัน ใน พ.ศ. 2558 เป็น 14.42 ล้านตัน ใน พ.ศ. 2565 ในขณะที่ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติทั่วโลกก็เพิ่มขึ้นจาก 12.25 ล้านตันในปี พ.ศ. 2558 เป็น 15.02 ล้านตันในปี พ.ศ. 2565 ตามการเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวของเศรษฐกิจโลก และปริมาณการผลิตและการใช้ยางธรรมชาติทั่วโลกลดลงเหลือ 12.6 และ 12.8 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2563 ตามลำดับ เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโควิด-19 ทั่วโลก ต่อมาปริมาณการผลิตและการใช้ยางธรรมชาติทั่วโลกเพิ่มขึ้นเป็น 14.01 และ 14.43 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2564 ตามลำดับ ตามภาวะเศรษฐกิจโลกที่จะเติบโตขึ้นหลังการระบอบของโควิด-19 คลี่คลายลง (Rubber Authority of Thailand, 2021, 2023) อย่างไรก็ตามจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ทำให้มีการใช้ยางธรรมชาติเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะถุงมือยาง ส่งผลทำให้มีขยะหรือของเสียที่มาจากยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น เกิดปัญหาในการจัดการขยะ (Mohd *et al.*, 2020) นักวิจัยจึงพยายามที่จะพัฒนากระบวนการย่อยสลายของยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติด้วยวิธีการต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อทำให้ยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้ง่าย การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาขยะและของเสียจากยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ

การย่อยสลายทางชีวภาพในดินของยาง

ธรรมชาติเกิดขึ้นได้ยากด้วยสมบัติความไม่ชอบน้ำ) ของซีเอส-1,4-พอลิไอโซพรีนในยางธรรมชาติ และน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นนักวิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะตัดแปรยางธรรมชาติโดยการกราฟต์ (graft) พอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำสูงและย่อยสลายได้ทางธรรมชาติลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ และโดยการผสมพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำสูงกับยางธรรมชาติ ปัจจุบันแบ็งและอนุพันธ์ของแบ็งถูกนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมต่อการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ เนื่องจากแบ็งและอนุพันธ์ของแบ็งสามารถเพิ่มสมบัติความชอบน้ำให้กับยางธรรมชาติได้ ทำใหยางธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Riyajan *et al.*, 2012) แบ็งเป็นพอลิเมอร์ทางเลือกหนึ่งที่ใช้อย่างกว้างขวางในการกราฟต์กับโมเลกุลของยางธรรมชาติ หรือผสมกับยางธรรมชาติ เนื่องจากคุณลักษณะของแบ็งหลาย ๆ ประการ ได้แก่ ราคาถูก พบได้มากในธรรมชาติ เป็นแหล่งของวัตถุดิบที่ใช้แล้วสามารถเกิดขึ้นทดแทนได้ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และเร่งให้ยางธรรมชาติสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เร็วขึ้น (Izmar *et al.*, 2012; Afig and Azura, 2013; Riyajan, 2015)

งานวิจัยนี้จึงสนใจเปรียบเทียบการย่อยสลายทางชีวภาพในดินของยางธรรมชาติกราฟต์แบ็งมันสำปะหลังตัดแปร ยางธรรมชาติผสมแบ็งมันสำปะหลังตัดแปร ยางธรรมชาติกราฟต์แบ็งมันสำปะหลังตัดแปรและผสมกับกลีเซอรอล ยางพรีวัลคาไนซ์ผสมแบ็งมันสำปะหลังตัดแปร ยางธรรมชาติ ยางพรีวัลคาไนซ์ ถุงมือยาง และแบ็งมันสำปะหลังตัดแปร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบการย่อยสลายทางชีวภาพมาก่อน รวมถึงการ

จัดการของเสียจากยางธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติในสิ่งแวดล้อม การศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในดินดัดแปลงจากงานวิจัยของ Riyajan *et al.* (2012) ทำได้โดยนำตัวอย่างฝักรวมในดินธรรมชาติ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา เป็นระยะเวลา 24 สัปดาห์ ทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนด ศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer หรือ FT-IR) ก่อนและหลังการฝังดินและคำนวณร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%weight loss) หรือร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายทางชีวภาพของตัวอย่างทั้งหมด

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพในดินของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง จำนวน 8 ตัวอย่าง ได้แก่ 1) แป้งมันสำปะหลังดัดแปร (CST) 2) ยางธรรมชาติกราฟต์แป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 50 ส่วนในยาง 100 ส่วน (NR-g-CST 50 phr) 3) ยางธรรมชาติกราฟต์กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 50 ส่วนในยาง 100 ส่วนและผสมกับกลีเซอรอล (NS-GE) 4) ยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 50 ส่วนในยาง 100 ส่วน (NR/CST 50 phr) 5) ยางพรีวัลคาไนซ์ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 50 ส่วน ในยาง 100 ส่วน (PR/CST 50 phr) 6) ยางธรรมชาติที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 30 (NR 30% DRC) 7) ยางพรีวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 30 (pre-vulca-

nized rubber 30% DRC; PR 30% DRC) และ 8) ถูงมื่ออย่าง โดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Riyajan *et al.* (2012) และทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนด การเตรียมแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

เตรียมแผ่นฟิล์มจำนวน 8 ตัวอย่าง โดยเตรียมแผ่นฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (CST) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยให้ความร้อนน้ำกลั่น ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 5 นาที นำน้ำกลั่นที่ได้เติมลงในบีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร ที่มีแป้งมันสำปะหลัง (cassava starch: ST ตราเจนเนอรัลสตาร์ท) 60 กรัม และน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนตลอดเวลาและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้แป้งสุก ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้เย็น จากนั้นนำแป้งสุก ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เติมน้ำโพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต ( $K_2S_2O_8$ , Loba Chemie, India) 0.5 กรัม เป็นตัวเริ่มต้นของปฏิกิริยากวนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง ได้สารละลายแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มโดยเทลงบนแผ่นกระจก ให้มีความหนาประมาณ 1.0 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 4 วัน จากนั้นนำแผ่นฟิล์มออกจากแผ่นกระจกแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แห้งสนิท

เตรียมแผ่นฟิล์ม NR-g-CST 50 phr โดยชั่งน้ำยางข้น (บริษัททดลองน้ำยางข้น จำกัด) ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 ปริมาณ 34 กรัม (ยางแห้ง 20 กรัม) ใส่แอมโมเนีย 10 นาที เติมน้ำ Triton X-100 (Loba Chemie, India) ความ

เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ปริมาตร 5 มิลลิ- ลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 34 มิลลิลิตร และกวน ต่อ 30 นาทีเพื่อให้สารเพิ่มความเสถียรกระจาย ตัวดีในน้ำยาง เตรียมชุดปฏิบัติการและขวดกัน กลม 5 คอ เติมน้ำยางลงในชุดปฏิบัติการและให้ ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสแล้วค่อย ๆ เติมโพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต 0.5 กรัม ที่ละลาย ในน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย แป้งมันสำปะหลังตัดแปรความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (CST) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้กรวยหยดสาร ทำปฏิบัติการต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หยุดปฏิบัติการ ด้วยการหล่อเย็นด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง ได้ NR- g-CST 50 phr แล้วเก็บอยู่ในรูปคอลลอยด์หรือฟิล์ม ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มทำเช่นเดียวกับการเตรียม แผ่นฟิล์ม CST

เตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม NS-GE เตรียมได้เช่นเดียวกับการเตรียม NR-g-CST 50 phr จากนั้นเติมกลีเซอรอล (Glycerol: GE) 3 กรัม ลงใน NR-g-CST 100 กรัม ได้พอลิเมอร์ผสม NS-GE เก็บตัวอย่างอยู่ในรูปคอลลอยด์หรือฟิล์ม ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มทำเช่นเดียวกับการเตรียม แผ่นฟิล์ม CST

แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม NR/CST 50 phr เตรียมเช่นเดียวกับการเตรียม NR-g-CST 50 phr แต่ไม่เติมโพแทสเซียมเพอร์ซัลเฟต

แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PR/CST 50 phr เตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิ- เมอร์ผสม NR/CST 50 phr แต่ใช้น้ำยางพรีวัล- คาไนซ์สำเร็จรูป (จัดจำหน่ายโดย บริษัท ดาด้า จำกัด) ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 แทน น้ำยางชั้น

แผ่นฟิล์ม NR ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง

ร้อยละ 30 (NR 30% DRC) เตรียมโดยชั่งน้ำยาง ชั้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 ปริมาณ 17 กรัม (ยางแห้ง 10 กรัม) เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 17 มิลลิลิตร ใส่แอมโมเนีย 10 นาที ขึ้นรูปเป็นแผ่น ฟิล์มทำเช่นเดียวกับการเตรียมแผ่นฟิล์ม CST

แผ่นฟิล์ม PR มีปริมาณเนื้อยางแห้ง ร้อยละ 30 (PR 30% DRC) เตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมแผ่นฟิล์ม NR ที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง ร้อยละ 30 แต่ใช้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์สำเร็จรูปที่มี ปริมาณเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 แทนน้ำยางชั้น

แผ่นฟิล์มถุงมือยาง เตรียมโดยใช้ถุงมือ แพทย์แบบมีแบ่งขนาด L (บริษัทแอโกรศรีตรัง อินดัสทรี จำกัด (มหาชน))

#### การทดสอบสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพ

การทดสอบสมบัติการย่อยสลายทางชีว- ภาพเป็นการทดสอบสมบัติการย่อยสลายของจุลิน- ทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย งานวิจัยนี้ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพในดิน สภาวะการทดลองทำโดยตัดแปลงจากงานวิจัยของ Riyajan *et al.* (2012) เปรียบเทียบน้ำหนักก่อน และหลังฝังดิน โดยตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่เตรียม ได้ขนาด 2×2 เซนติเมตร อบแห้งที่ 50 องศา- เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแผ่น ฟิล์มก่อนฝังดิน จากนั้นนำแผ่นฟิล์มฝังในดิน ธรรมชาติ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ปริมาณ 600 กรัม ซึ่งบรรจุในแก้วพลาสติก ขนาด 22 ออนซ์ ด้านล่างเจาะรู เพื่อให้น้ำไหลผ่าน โดยฝังในดิน ลึก 5 เซนติเมตรจากระดับพื้นผิว และห่างจาก กันแก้ว 7 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวางกลางแจ้ง โดยมีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อยู่ในช่วง 28±2 องศาเซลเซียส และร้อยละ 70±10 ตาม ลำดับ รดน้ำ 50 มิลลิลิตร ทุกสัปดาห์ ติดตามผล การทดลองโดยนำแผ่นฟิล์มขึ้นมาจากดิน ล้าง

ด้วยน้ำกลั่นอย่างระมัดระวัง อบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักหลังการผึ่งดิน ทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักทุก 1

4 8 12 16 และ 24 สัปดาห์ คำนวณร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%weight loss) หรือร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพตามสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนผึ่งดิน} - \text{น้ำหนักหลังผึ่งดินที่เวลา } t}{\text{น้ำหนักก่อนผึ่งดิน}} \times 100 \quad \dots (1)$$

### การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างก่อนและหลังการผึ่งดิน วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบแสงสะท้อน (attenuated total reflection–fourier transform infrared spectrophotometer: ATR–FTIR, รุ่น Tensor 27, Bruker, Germany) ซึ่งมีส่วนรองรับตัวอย่างเป็นเพชร (diamond) ทดสอบในช่วงเลขคลื่น (wavenumber) 4000–600  $\text{cm}^{-1}$  ความละเอียด (resolution) 4  $\text{cm}^{-1}$  สแกนทั้งหมด 512 ครั้ง ก่อนการทดสอบต้องนำแผ่นฟิล์มตัวอย่างไปอบที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ดินธรรมชาติ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ที่ใช้ในการผึ่งกลบตัวอย่าง มีความเป็นกรด–เบส (pH) 6.0 อินทรีย์วัตถุ (organic matter) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ความชื้นร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 6.8 มีเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ประกอบด้วยดินเหนียว (clay) ร้อยละ 10.7 ทรายแป้ง (silt) ร้อยละ 12.1 และดินทราย (sand) ร้อยละ 77.2 โดยน้ำหนัก และจากการซึ่งจุลินทรีย์ในดินธรรมชาติ อ.เมือง จ.สงขลา โดยใช้เครื่อง Sequencing (รุ่น novaseq 6000, Illumine, USA) พบว่า มีแบคทีเรียเรียงลำดับปริมาณจากมากไปน้อย 10 ลำดับ ตามสกุล (genus) ของแบคทีเรีย ดังนี้ คือ

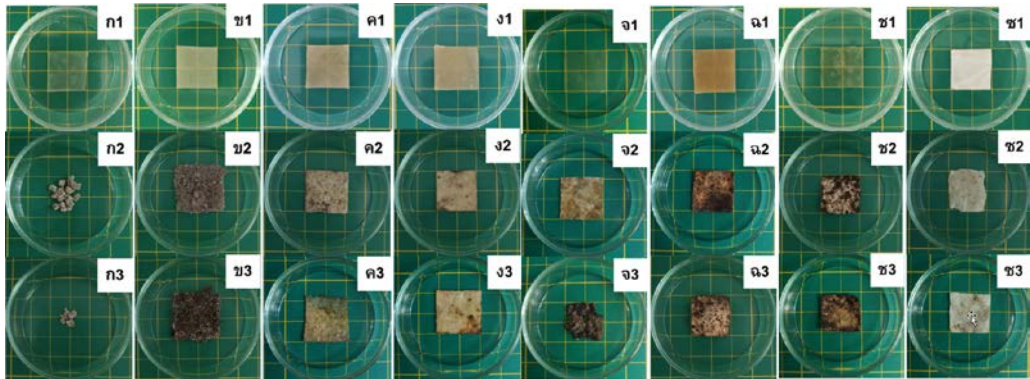
*Stenotrophomonas*, Subgroup\_13, *Acidothermus*, *Bacillus*, *Prevotella*, *Neisseria*, *Acidipila*, *Haemophilus*, *Sphingomonas* และ *Fusobacterium* และราเรียงลำดับปริมาณจากมากไปน้อย 10 ลำดับตามสกุลของรา ดังนี้ *Aspergillus*, *Trichosporon*, *Ramularia*, *Acremonium*, *Ganoderma*, *Archaeorhizomyces*, *Malassezia*, *Mortierella*, *Humicola* และ *Cladosporium*

### ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง (ภาพที่ 1) พบว่า ลักษณะของแผ่นฟิล์ม CST ก่อนการผึ่งดิน จะเป็นสีใส ส่วน NR–g–CST 50 phr NS–GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30% DRC และ PR 30% DRC ก่อนการผึ่งดิน เป็นสีเหลืองอ่อนถึงเหลืองน้ำตาล ส่วนถุงมืออย่างก่อนการผึ่งดินเป็นสีขาวขุ่น ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแผ่นฟิล์มตัวอย่างระหว่างการย่อยสลาย พบว่า แผ่นฟิล์ม CST ในสัปดาห์ที่ 4 มีลักษณะแยกเป็นชั้นส่วนอย่างชัดเจน และในสัปดาห์ที่ 8 ถูกย่อยสลายเป็นชั้นส่วนละเอียดจนเกือบย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแบ้งสามารถย่อยสลายในดินได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือโดยการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หรือทั้งสองอย่าง ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพระหว่างการย่อยสลาย ของแผ่นฟิล์ม NR–g–CST 50 phr หลังจากสัปดาห์ที่ 1 พบว่า แผ่นฟิล์ม NR–g–CST 50 phr มีดินเกาะติดบริเวณพื้นผิวทั้งหมด และ

ย่อยสลายอย่างสมบูรณ์เป็นเนื้อเดียวกับดินใน สัปดาห์ที่ 12 ในขณะที่แผ่นฟิล์ม NS-GE NR/ CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30% DRC PR 30% DRC และถุงมือยาง มีรอย (patch) สีเหลือง

สีน้ำตาลอ่อน และสีน้ำตาลเข้ม กระจายบนแผ่น ฟิล์มในสัปดาห์ที่ 12 และเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นจน เกือบเป็นสีดำและมีรอยแตกเพิ่มมากขึ้น ในสัปดาห์ ที่ 24 แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์เริ่มย่อยสลายอย่าง



ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มก่อนและหลังฝังดินซึ่งถ่ายด้วยกล้องดิจิทัล (ก) คือ CST (ข) คือ NR-g-CST phr เลข 1, 2, 3 ที่กำกับภาพ (ก) และ (ข) คือ ที่ 0, 4, 8 สัปดาห์ ตามลำดับ ส่วน (ค) คือ NS-GE (ง) คือ NR/CST 50 phr (จ) PR/CST 50 phr (ฉ) NR 30% DRC (ช) PR 30% DRC (ซ) ถุงมือยาง เลข 1, 2, 3 ที่กำกับภาพ (ค) – (ซ) คือ ที่ 0 12 24 สัปดาห์ ตามลำดับ

### ผลการศึกษาร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ

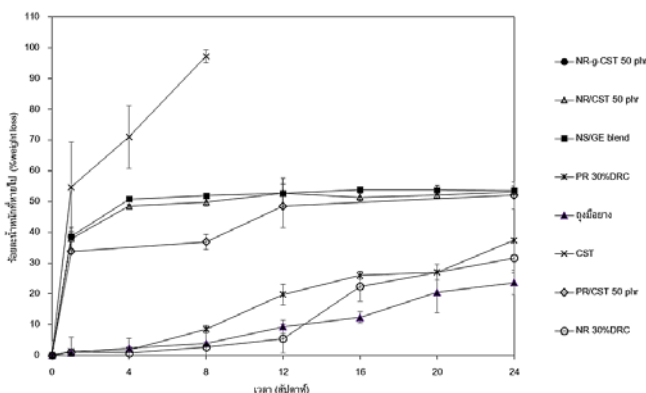
จากการศึกษาร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพในดินของแผ่นฟิล์ม CST NR-g-CST 50 phr NS-GE, NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr NR 30% DRC PR 30% DRC และถุงมือยาง (ภาพที่ 2) พบว่า CST สามารถย่อยสลายได้เร็วที่สุด โดยสามารถย่อยสลายได้เกือบหมดภายใน 8 สัปดาห์ คือ ประมาณร้อยละ 97 โดยน้ำหนัก เนื่องจาก CST มีโครงสร้างประกอบด้วยพอลิ-แซ็กคาไรด์ สามารถย่อยสลายได้แบบไฮโดรไลซิส โดย CST ดูดซึมน้ำในดิน เกิดการบวมตัว (Riyajan, 2015; Sanhawong *et al.*, 2017) โดยน้ำอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุล CST ส่งผลทำให้อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลของ CST ถูกทำลาย ทำให้ CST ถูกย่อยสลายเป็นชิ้นเล็ก ๆ นอกจากนี้ CST ย่อยสลาย

อย่างง่ายโดยแบคทีเรีย และเชื้อรา (fungi) ในดิน (Riyajan *et al.*, 2012) ส่งผลให้ CST สามารถย่อยสลายในดินได้อย่างรวดเร็ว รองลงมาคือ NR-g-CST 50 phr NS-GE NR/CST 50 phr PR/ CST 50 phr PR 30% DRC NR 30% DRC และ ถุงมือยางตามลำดับ โดย NR-g-CST 50 phr ย่อยสลายเป็นเนื้อเดียวกับดินใน 12 สัปดาห์ ส่วน NS-GE และ NR/CST 50 phr ย่อยสลายได้ประมาณร้อยละ 54 และ 53 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ใน 24 สัปดาห์ เนื่องจากการกราฟต์ของ NR-g-CST ทำให้จุลินทรีย์ในดินสามารถย่อยสลายส่วนของ CST ต่อเนื่องถึงโมเลกุลของ NR ได้ (Riyajan *et al.*, 2012) ส่วน NS-GE เตรียมจาก NR-g-CST ผสมกลีเซอรอล กลีเซอรอลอาจตอบสนองกับจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน (Riyajan *et al.*, 2018) ทำให้การย่อยสลายของ NS-GE ช้ากว่า NR-g-CST

50 phr ส่วน NR/CST 50 phr เกิดการแยกเฟสระหว่าง NR และ CST ทำให้เกิดการย่อยสลาย CST ก่อนในช่วงแรก จากนั้นจึงย่อยสลายในส่วนที่เป็นยางธรรมชาติทำให้การย่อยสลายช้ากว่า NR-g-CST 50 phr ส่วน PR/CST 50 phr และ PR 30% DRC ย่อยสลายได้ประมาณร้อยละ 52 และ 38 โดยน้ำหนัก ใน 24 สัปดาห์ ซึ่งย่อยสลายได้ช้ากว่า NR-g-CST 50 phr NS-GE และ NR/CST 50 phr ตามลำดับ เนื่องจากการผลิตน้ำยางพรีวัลคาไนซ์มีการผสมสารเคมีลงในน้ำยาง ซึ่งขัดขวางการเจริญของจุลินทรีย์ในดิน แต่ PR/CST 50 phr ย่อยสลายได้เร็วกว่า PR 30% DRC เนื่องจาก PR/CST 50 phr มีส่วนผสมของ CST ประมาณ 1 ใน 3 ของทั้งหมดเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสม NR/CST ทำให้จุลินทรีย์ในดินสามารถย่อยสลายได้และช่วยเร่งให้การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดขึ้น NR 30% DRC ย่อยสลายได้ประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักใน 12 สัปดาห์ เนื่องจาก NR มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีโครงสร้างไม่ชอบน้ำ (hydrophobic structure) ดูดซับน้ำได้น้อยมาก ทำให้สภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ในดิน แต่เมื่อฝังดินนานขึ้น พบว่า NR 30%

DRC ย่อยสลายได้ประมาณร้อยละ 32 โดยน้ำหนักใน 24 สัปดาห์ เนื่องจากยางธรรมชาติดูดซับน้ำจากดินมากขึ้น เกิดการบวมตัว ทำให้สภาพแวดล้อมเหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ในดิน โดย Bhatt *et al.* (2008) รายงานว่า NR ย่อยสลายช้าในธรรมชาติ เนื่องจากการย่อยสลายของ NR ต้องอาศัยจุลินทรีย์ที่มีความจำเพาะเจาะจง ส่วนถุงมือยาง สามารถย่อยสลายได้ประมาณร้อยละ 24 โดยน้ำหนักใน 24 สัปดาห์ เนื่องจากการผลิตถุงมือยางมีการผสมสารเคมีมากกว่าการผลิตน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติถุงมือยางตามที่ต้องการ และเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ทำให้เกิดการต่อต้านการย่อยสลายทางชีวภาพ (Afig and Azura, 2013) ทำให้การย่อยสลายช้ากว่า PR 30% DRC และ NR 30%DRC ดังนั้นถุงมือยางย่อยสลายได้ช้าที่สุด ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างก่อนและหลังการฝังดิน โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง CST NR/CST 50 phr NR-g-CST 50 phr NS-GE PR/CST 50 phr NR 30% DRC



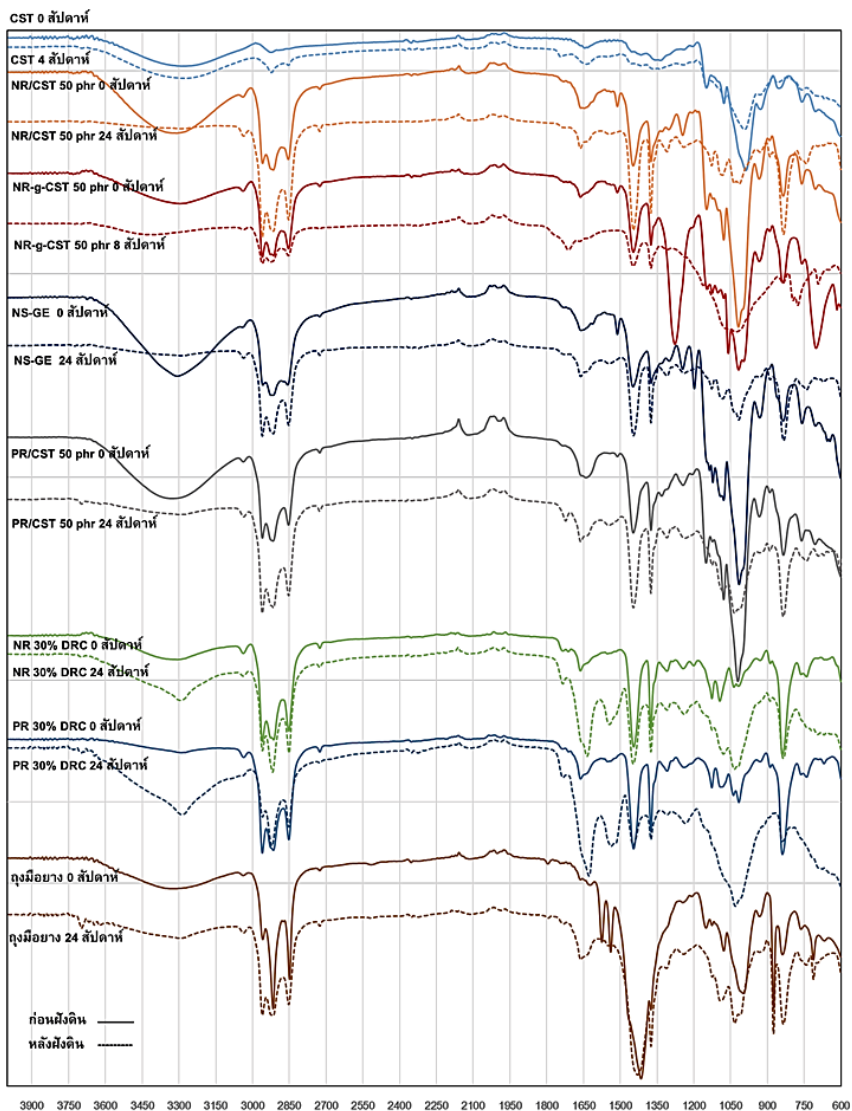
ภาพที่ 2 การย่อยสลายทางชีวภาพในดินของแผ่นฟิล์มของตัวอย่างที่ระยะเวลาแตกต่างกัน



PR 30% DRC และถุงมือยาง ก่อนและหลังการฝังดิน ด้วยเทคนิค ATR-FTIR (ภาพที่ 3) พบว่า CST ก่อนการฝังดิน ปรากฏตำแหน่งเลขคลื่นที่  $3277\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง -OH stretching เป็นสมบัติของพอลิเมอร์ชอบน้ำ เลขคลื่นที่  $2925\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง -C-H stretching เลขคลื่นที่  $1645\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-O bending ที่เกี่ยวข้องกับ OH group เลขคลื่นที่  $1416\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง -CH<sub>2</sub> bending (Riyajan *et al.*, 2012; Riyajan and Patisat, 2018) เลขคลื่นที่  $1148$  และ  $1077\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-O-H stretching และ C-C stretching ตามลำดับ เลขคลื่น  $988$  และ  $928\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-O-C bending ของ  $\alpha$ -(1-4) glucosidic bonds และ  $\alpha$ -(1-6) bonds ตามลำดับ เลขคลื่นที่  $853$  และ  $760\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง CH<sub>3</sub> bending และ C-O bending ใน C-O-C ring vibration ตามลำดับ (Boonsuk *et al.*, 2019, 2022; Ramírez-Hernández *et al.*, 2017) เมื่อนำ CST หลังฝังดินนาน 4 สัปดาห์ มาศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่า พีดใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่  $1743\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C=O stretching มีการลดลงของพีด C-O stretching ใน C-O-C glycosidic linkage และพีด C-O bending ใน C-O-C ring เลขคลื่นที่  $993$  และ  $760\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ CST แสดงว่า CST เกิดการย่อยสลาย (Boonsuk *et al.*, 2019) แต่การย่อยสลายยังเกิดไม่สมบูรณ์ เนื่องจากยังพบพีดที่เลขคลื่น  $993$  และ  $760\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากการย่อยสลายทางชีวภาพ ของ CST เมื่อฝังดินนาน 4 สัปดาห์ พบว่า ร้อยละน้ำหนักที่หายไปประมาณ 70 โดยน้ำหนัก แสดงว่าการย่อยสลายยังไม่สมบูรณ์

จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของตัว-

อย่าง NR/CST 50 phr NR-g-CST 50 phr NS-GE PR/CST 50 phr NR 30% DRC PR 30% DRC และถุงมือยางก่อนการฝังดินด้วย ATR-FTIR พบว่า ตำแหน่งหลักของ CST ปรากฏเลขคลื่นที่  $3550$ - $3200\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ -OH stretching ซึ่งแสดงความมีขั้วของหมู่ไฮดรอกซิลของ CST เลขคลื่นที่  $2960$   $2915$  และ  $2853$  แสดงถึง -C-H stretching เลขคลื่นที่  $1148\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-O-C stretching เลขคลื่นที่  $1078\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-O stretching และเลขคลื่นที่  $760\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C-O bending ใน C-O-C ring นอกจากนี้ตำแหน่งหลักของยางธรรมชาติ ปรากฏตำแหน่งของหมู่ -C=CH stretching ที่เลขคลื่น  $1644$  และ  $1662\text{ cm}^{-1}$  มีหมู่ฟังก์ชัน -CH<sub>3</sub> deformation ปรากฏเลขคลื่นที่  $1447\text{ cm}^{-1}$  และ -CH<sub>2</sub> deformation แสดงที่ตำแหน่ง  $1375\text{ cm}^{-1}$  และที่เลขคลื่น  $835\text{ cm}^{-1}$  เป็นของ -C=CH bending ของยางธรรมชาติ นอกจากนี้ NR-g-CST ปรากฏพีดเลขคลื่นที่  $1277\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ C-O-C stretching และปรากฏพีดตำแหน่งเลขคลื่นที่  $1102\text{ cm}^{-1}$  เช่นเดียวกับ NS-GE ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ตำแหน่งเลขคลื่นที่  $1102\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง NR เกิดการกราฟต์กับ CST ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Riyajan *et al.* (2012) แต่ไม่ปรากฏอย่างชัดเจนในสเปกตรัมของ NS-GE เนื่องจากกลีเซอรอลเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) กับ CST ทำให้แรงกระทำระหว่าง NR และ CST ลดลง (Ghasemliou *et al.*, 2011) โดยกลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยากับแบ่งได้ทั้งขณะที่อุณหภูมิสูงและขณะเก็บตัวอย่างเป็นแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิห้อง (Vieira *et al.*, 2011) หรืออาจเกิดจากสมบัติความชอบน้ำของกลีเซอรอลที่สามารถแทรกกระหว่างโมเลกุลของ NR และ CST ได้ (Chen *et al.*, 2017)



ภาพที่ 3 สเปกตรัมของ CST NR/CST 50 phr NR-g-CST 50 phr NS-GE, PR/CST 50 phr NR 30% DRC PR 30% DRC และยางมียางก่อนและหลังการฝังดิน

อาจทำให้ชัดเจนการกราฟระหว่าง NR และ CST ทำให้การกราฟระหว่าง NR และ CST เกิดขึ้นได้น้อยหรืออาจเกิดขึ้นได้ยาก เมื่อนำ NR-g-CST 50 phr หลังฝังดิน 4 สัปดาห์ และ NR/CST 50 phr NS-GE PR/CST 50 phr, NR 30% DRC PR 30%DRC และยางมียาง หลังฝังดิน 24 สัปดาห์

มาศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วย ATR-FTIR พบว่า มีการลดลงของพีคตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1447 1375 และ 835  $\text{cm}^{-1}$  เนื่องจากเกิดการแตกหักของหมู่ฟังก์ชัน  $-\text{CH}_3$   $-\text{CH}_2$  และพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนของยางธรรมชาติโดยออกซิเจน (primary alcohol) (Linos *et al*, 2000; Rose and Stein-

buchel, 2005) เป็นผลทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันอัลดีไฮด์และคีโตน เลขคลื่นที่  $1600\text{--}1770\text{ cm}^{-1}$  (Rose and Steinbuchel, 2005) โดยเกิดผ่านหมู่อีพอกไซด์  $1010\text{--}1190\text{ cm}^{-1}$  (Isa et al., 2007) มีการปรากฏพีคที่กว้างขึ้นในช่วงเลขคลื่นที่  $1020\text{--}1050\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่อีพอกไซด์ที่ตำแหน่งพันธะคู่ของคาร์บอนในสายโซ่โมเลกุลของยาง (Muniandy et al., 2012) มีการปรากฏพีคใหม่และกว้างขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่  $1635$  และ  $1545\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน amide I และ amide II ตามลำดับ (Linos et al., 2000) ซึ่งเป็นโปรตีนองค์ประกอบของเซลล์จุลินทรีย์ที่เกาะติดบนผิวของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนใน NR 30%DRC และ PR 30% DRC ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ โดยเมื่อฝังตัวอย่างในดินนานขึ้น แผ่นฟิล์มตัวอย่างมีการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีน้ำตาลเข้ม และสังเกตเห็นเส้นใยราบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง แสดงว่าจุลินทรีย์เกิดการย่อยสลาย นอกจากนี้เมื่อ NR-g-CST 50 phr ฝังดินนาน 4 สัปดาห์ พบว่า พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1277\text{ cm}^{-1}$  หายไป แสดงถึงหมู่ C-O-C stretching แสดงถึง NR เกิดการกราฟต์กับ CST

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและเปรียบเทียบการย่อยสลายทางชีวภาพในดินของยางธรรมชาติดัดแปร โดยนำยางธรรมชาติกราฟต์แบงมันสำปะหลังดัดแปร (NR-g-CST 50 phr) ยางธรรมชาติกราฟต์แบงมันสำปะหลังดัดแปรและผสมกับกลีเซอรอล (NS-GE) ยางธรรมชาติผสมแบงมันสำปะหลังดัดแปร (NR/CST 50 phr) ยางพรีวัลคาไนซ์ผสมแบงมันสำปะหลังดัดแปร (PR/CST 50 phr) ยาง

ธรรมชาติ (NR 30% DRC) ยางพรีวัลคาไนซ์ (PR 30% DRC) ถู่มือยาง และแบงมันสำปะหลังดัดแปร (CST) พบว่า CST สามารถย่อยสลายได้ประมาณร้อยละ 97 โดยน้ำหนักใน 8 สัปดาห์ ซึ่งย่อยสลายได้เร็วที่สุด รองลงมา คือ NR-g-CST 50 phr สามารถย่อยสลายได้ใน 12 สัปดาห์ ส่วน NS-GE NR/CST 50 phr PR/CST 50 phr PR 30% DRC NR 30% DRC และถู่มือยาง ย่อยสลายได้ประมาณร้อยละ 54 53 52 38 32 และ 24 โดยน้ำหนักตามลำดับ ใน 24 สัปดาห์ จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์มตัวอย่างดังกล่าวที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า หลังฝังดินทุกตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายทั้งแบบไฮโดรไลซิส ออกซิเดชัน และการย่อยสลายทางชีวภาพ สรุปได้ว่า การนำยางธรรมชาติกราฟต์กับแบงมันสำปะหลังดัดแปร สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากการกราฟต์ของ NR-g-CST ทำให้จุลินทรีย์ในดินสามารถย่อยสลายส่วนของ CST ต่อเนื่องถึงโมเลกุลของ NR ได้ ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ จัดการของเสียจากยางธรรมชาติและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ ส่วนยางธรรมชาติกราฟต์แบงมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับกลีเซอรอล ยางธรรมชาติผสมแบงมันสำปะหลังดัดแปร และยางพรีวัลคาไนซ์ผสมแบงมันสำปะหลังดัดแปรย่อยสลายทางชีวภาพได้และใช้เวลาในการย่อยสลายทางชีวภาพไม่แตกต่างกัน เนื่องจากแบงมันช่วยเร่งให้ยางธรรมชาติหรือยางพรีวัลคาไนซ์ย่อยสลายทางชีวภาพได้เร็วขึ้น แต่เกิดได้ช้ากว่ายางธรรม-

ชาติกราฟต์แป้งมันสำปะหลังดัดแปร ส่วนยางธรรมชาติ ยางพรีวัลคาไนซ์และผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ เช่น ถูมมือยาง สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้แต่ใช้เวลานาน แต่การย่อยสลายทางชีวภาพในดินยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบสในดิน ความชื้น ชนิดของดิน ปริมาณจุลินทรีย์ สารอาหารที่อยู่ในดิน

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินกองทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ งบประมาณ 2565 (Faculty of Science Research Fund) สัญญาทุนเลขที่ SCIDEV64006 และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สอาด ริยะจันทร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับคำปรึกษาแนะนำจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- Afig, M. M., and Azura, A. R. (2013). Effect of sago starch loadings on soil decomposition of natural rubber latex (NRL) composite films mechanical properties. **International Biodeterioration & Biodegradation** 85: 139–149.
- Bhatt, R., Shah, D., Patel, K. C., Trivedi, U. (2008). PHA–rubber blends: Synthesis, characterization and biodegradation. **Bioresource Technology** 99: 4615–4620.
- Boonsuk, P., Sukolrat, A., Kaewtatip, K., Chantarak, S., Kelarakis, A. and Chibundit, C. (2019). Modified cassava starch/poly(vinyl

alcohol) blend films plasticized by glycerol: Structure and properties. **Journal of Applied polymer science**: app.48848.

- Boonsuk, P., Sukolrat, A., Kaewtatip, K., Chantarak, S., Kelarakis, A. and Chibundit, C. (2022). Poly(vinyl alcohol)/modified cassava starch blends plasticized by glycerol and sorbitol. **Journal of Applied Polymer Science**: app.52362.
- Ghasemlou, M., Khodaiyan, F., and Oromiehie, A. (2011). Physical, mechanical, barrier, and thermal properties of polyol–plasticized biodegradable edible film made from efriran. **Carbohydrate Polymer** 84(1): 477–483.
- Isa, S. Z., Yahya, R., Hassan, A., and Tahir, M. (2007). The influence of temperature and reaction time in the degradation of natural rubber latex. **Malaysian Journal of Analytical Sciences** 11(1): 42–47.
- Izmar, M. H., Afiq, M. M., and Azura, A.R. (2012). Effect of different additions of sago starch filler on physical and biodegradation properties of pre–vulcanized NR latex composites. **Composites: Part B** 43: 2746–2750.
- Linos, A., Berekaa, M. M., Reichelt, R., Keller, U., Schmitt, J., Flemming, H., Kroppenstedt, R. M., and Steinbüchel, A. (2000) Biodegradation of cis–1,4–polyisoprene rubbers by distinct actinomycetes: Microbial strategies and detailed surface analysis.

- Applied and Environmental Microbiology** 66(4): 1639–1645.
- 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.
- Muniandy, K., Ismail, H., and Othman, N. (2012). Biodegradation, morphological, and FTIR study of rattan powder–filled natural rubber composites as a function of filler loading and silane coupling agent. **Bioresources** 7(1): 957–971.
- Ramírez–Hernández, A., Aparicio–Saguilán, A., Reynoso–Mezaa, G., and Carrillo–Ahumada, J. (2017). Multi–objective optimization of process conditions in the manufacturing of banana (*Musa paradisiaca* L.) starch/natural rubber films. **Carbohydrate Polymers** 157: 1125–1133.
- Riyajan, S. (2015). Robust and biodegradable polymer of cassava starch and modified natural rubber. **Carbohydrate Polymers** 134: 267–277.
- 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.–A., Sasithronsonti, Y., and Phinyocheep, P. (2012). Green natural rubber–modified Starch for controlling urea release. **Carbohydrate Polymers** 89: 251–258.
- Rose, K., and Steinbuchel, A. (2005). Biodegradation of natural rubber and related compounds: recent insights into a hardly understood catabolic capability of microorganisms. **Applied Environmental Microbiology** 71: 2803–2812.
- Rose, K., Tenberge, K. B., and Steinbutchel, A. (2004). Identification and characterization of genes from *Streptomyces* sp. strain K30 responsible for clear zone formation on natural rubber latex and poly cis(1,4–isoprene) rubber degradation. **Biochemistry** 41: 181–186.
- Rubber Authority of Thailand (2021). Rubber situation of the world and Thailand during 2015–2020. **Rubber Journal** 1: 2–45.
- Rubber Authority of Thailand (2023). Summary of Rubber Situation. Retrieved from [http://www.raot.co.th/ewt\\_dl\\_link.php?nid=6750](http://www.raot.co.th/ewt_dl_link.php?nid=6750), July 9, 2023. (in Thai)
- Sanhawong, W., Banhalee, P., Boonsang, S., and Kaewpirom, S. (2017). Effect of concentrated natural rubber latex on the properties and degradation behavior of cotton–fiber–reinforced cassava starch biofoam. **Industrial Crops & Products** 108: 756–766.
- Vieira, M. G. A., da Silva, M. A., Santos, L. O., and Beppu, M. M. (2011). Natural–based plasticizers and biopolymer films: A review. **European Polymer Journal** 47: 254–263.