

ลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่าง เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวและฟางข้าว

Characterization of Sandwich Structured Composites between Rice Flour-based Thermoplastic Starch and Rice Straw

นันทยา เก่งเขตรักกิจ^{1*} และ ธาปanee วงศ์ปรีดี²

Nanthaya Kengkhetkit^{1*} and Thapanee Wongpreedee²

Received: 30 April 2021, Revised: 18 July 2021, Accepted: 31 August 2021

บทคัดย่อ

วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (TPS) จากแป้งข้าว และฟางข้าว (RS) ถูกเตรียมเพื่อศึกษาผลของชนิด TPS ของแป้งข้าวเหนียว (GTPS) ข้าวเจ้า (RTPS) และแป้งผสม (MTPS) รวมถึงรูปแบบวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช (3 และ 5 ชั้น) ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นและสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุ พบว่าวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS ทุกสูตรมีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่อเทียบกับ TPS และรูปแบบการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ได้ จากสมบัติความทนแรงดึงพบว่าวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS มีแนวโน้มค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 193-461 และ 111-194 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ TPS เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ประสิทธิภาพการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง TPS ของวัสดุเชิงประกอบ วัสดุเชิงประกอบ RS-GTPS พบว่ามีแนวโน้มการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงได้สูงสุด จากภาพถ่าย SEM พบว่า GTPS ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลที่สูง สามารถไหลเข้าไปแทรกในชั้นเสริมแรง RS ได้ดีกว่า TPS ชนิดอื่นๆ ในระหว่างการกดอัด ส่งผลให้สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุดังกล่าวเพิ่มขึ้น ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบใช้ RTPS ที่มีค่าดัชนีการไหลต่ำซึ่งพบการไหลแทรกตัวในชั้น RS ได้น้อย วัสดุเชิงประกอบระบบนี้มีการปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึงเท่านั้น แต่ไม่พบการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึง นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช 3 ชั้น พบว่ามีสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช 5 ชั้นในทุกระบบที่ศึกษา

คำสำคัญ: เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช, ฟางข้าว, แป้งข้าว, วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดพิจิตร 65000

¹ Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Phitsanulok 65000, Thailand.

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง จังหวัดระยอง 21120

² Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong Campus, Rayong 21120, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): nanthaya@rmutl.ac.th

ABSTRACT

The sandwich structured composites with rice flour-based thermoplastic starch (TPS) and rice straw (RS) were prepared. The effects of different TPS types (glutinous rice flour (GTPS), rice flour (RTPS), and mixed rice flour (MTPS)) and types of sandwiched composite (3 and 5 layers) on the density and tensile properties of these composites were investigated. The results showed that the density of all RS-TPS composites was lower than each neat TPSs. The differences of TPSs types and sandwiched composite types did not affect the density of these materials. On the contrary, the tensile modulus and tensile strength of all RS-TPS composites showed a strong improvement with an increase up to 193-461% and 111-194%, respectively, compared with each neat TPS. However, the efficiency of composite's tensile property improvement strongly depended on the TPS types. Composite using GTPS having high melt flow index displayed high potential to improve the tensile properties. The SEM investigation revealed that the GTPS matrix easily flowed and wetted into the RS reinforcement layer during compression. This resulted in enhancing the composite's tensile properties. In contrast, using RTPS with a low melt flow index in composites did not show evidence of RTPS penetrating into RS layer. So, RS-RTPS composite showed only the improvement in tensile modulus but not in tensile strength. The sandwich composite with three layers showed better improvement in tensile properties compared with five layers in all TPS composite types.

Key words: thermoplastic starch, rice straw, rice flour, sandwich structured composites

บทนำ

ในปัจจุบันวิกฤตปัญหาภาวะโลกร้อน ปัญหายยะพลาสติก และสถานการณ์การขาดแคลนแหล่งเชื้อเพลิงและวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมี ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นหนึ่งในสถานการณ์ที่ทำให้ในทุกภาคส่วนมีการคำนึงถึงและตื่นตัวในเรื่องการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกันอย่างมากมาย แนวทางหนึ่งที่ได้ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นคือแนวทางในการพัฒนาวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งจะเป็นการนำวัสดุทางธรรมชาติ (Bio-based materials) มาใช้ในการผลิตเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) (Mohanty *et al.*, 2002) วัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกดังกล่าวได้มีหลายชนิด เช่น แป้ง (Starch)

เซลลูโลส (Cellulose) คอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุจากธรรมชาติเหล่านี้เป็นวัตถุดิบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมี และยังเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ (Bayer *et al.*, 2014) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุจากธรรมชาติทั้งหลาย แป้งนับเป็นวัตถุดิบหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากมีปริมาณมาก หาง่าย ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เมล็ด หัว ราก เป็นต้น พืชที่มีปริมาณแป้งมากได้แก่ ข้าว มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวสาลี ซึ่งผลผลิตของพืชเหล่านี้มีปริมาณที่มาก หาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถปลูกทดแทนได้ (Varda *et al.*, 2014) และพืชต่างๆ เหล่านี้ที่เป็นแหล่งวัตถุดิบของแป้งล้วนแต่เป็นพืชเศรษฐกิจของไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตข้าวได้เป็นปริมาณมาก และสามารถผลิตข้าวได้หลายชนิด มีพื้นที่ปลูกข้าวกระจายอยู่ทั่วทุกภาคและมีแนวโน้มในการผลิตเพิ่มขึ้นทุกปี ที่ผ่านมามีประเทศไทยเคยประสบปัญหาการผลิตข้าวในปริมาณที่เกินความต้องการอยู่มาก ในอนาคตจึงต้องมีแนวคิดในการจัดการการผลิตและการใช้ประโยชน์จากข้าวให้สมดุล (Honnak, 2020) นอกจากนี้ในแต่ละรอบการปลูกข้าว จะมีปริมาณของเศษเหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวข้าวต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น แกลบและฟางข้าว มีการประมาณถึงปริมาณของเศษเหลือใช้จากการปลูกข้าวไว้ว่า จากนาข้าวที่ได้รับผลผลิตข้าวเปลือก 1,000 กิโลกรัม จะมีปริมาณฟางข้าวจำนวนมากถึง 1,300 กิโลกรัม ถึงแม้ฟางข้าวอาจจัดเป็นฟางก้นจำหน่าย เพื่อจะมีรายได้เพิ่มขึ้นมาอีก แต่ก็ยังมีเพียงบางกลุ่มของเกษตรกรเท่านั้น ชาวนาโดยส่วนใหญ่ยังคงมีพฤติกรรมการเผาฟางข้าวอยู่ เนื่องจากโดยส่วนมากชาวนาต้องการเร่งการผลิตจึงมักจะเลือกใช้วิธีการเผาฟางเพื่อเริ่มรอบการปลูกใหม่ (Pollution Control Department, 2004)

จากแนวโน้มการปลูกข้าวที่เพิ่มขึ้น ร่วมกับวิกฤตของปัญหาของปริมาณเศษเหลือใช้จากการปลูกข้าวที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แนวทางหนึ่งของการพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ที่น่าสนใจ คือ การนำเอาแป้งจากข้าวและวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวมาเพิ่มมูลค่า โดยงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ของการนำแป้งจากข้าวแต่ละชนิดมาเตรียมเป็นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch; TPS) และเสริมแรงด้วยฟางข้าว (Rice straw; RS) ซึ่งนอกจากจะเป็นแนวทางพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทดแทนวัสดุจากปิโตรเคมีที่ย่อยสลายไม่ได้และตกค้างกลายเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการส่งเสริมให้มีแนวทางในการใช้ประโยชน์จากข้าว

และวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวในรูปแบบที่หลากหลาย และเป็นการสร้างคุณค่าและมูลค่าเพิ่มให้กับวัตถุดิบจากกระบวนการปลูกข้าวอีกด้วย

โดยทั่วไปแล้วแป้งไม่สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางความร้อนเหมือนพลาสติกทั่วไป เนื่องจากเกิดการไหม้และเสื่อมสภาพก่อนหลอม ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงให้เป็นเทอร์มอพลาสติก เพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการเดียวกับพลาสติกทั่วไป ซึ่งวิธีในการเตรียมแป้งให้เป็นเทอร์มอพลาสติก ทำได้โดยการเติมสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) เช่น น้ำ กลีเซอรอล และซอร์บิทอล เป็นต้น เมื่อนำสารเสริมสภาพพลาสติกมาผสมกับแป้งในสถานะที่มีการให้ความร้อน ความดัน และแรงเฉือน จะได้วัสดุที่เรียกว่าเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชซึ่งสามารถขึ้นรูปโดยกระบวนการหลอมได้ อย่างไรก็ตามการใช้งานของวัสดุจำพวกเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชยังมีข้อจำกัดในเรื่องของสมบัติเชิงกลที่มีค่าต่ำ แนวทางหนึ่งที่นิยมใช้ในการปรับปรุงเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้นคือ การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุดังกล่าว จากรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านมาต่างๆ พบว่า การใช้เส้นใยเสริมแรงในเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและทำให้ได้วัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้นได้ (Ma *et al.*, 2005; Prachayawarakorn *et al.*, 2011; Kaewtatip and Thongmee, 2012) อย่างไรก็ตาม ในงานต่างๆ ที่มีการรายงานมาส่วนมากมักจะขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบนี้โดยผ่านขั้นตอนสองขั้นตอนคือ การผสมแป้งกับเส้นใยด้วยเครื่องผสมแบบให้ความร้อนเพื่อให้ได้เม็ดคอมปาวด์เสียก่อน จากนั้นจึงนำเม็ดคอมปาวด์มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบ (Battezzore *et al.*, 2016; Prachayawarakorn *et al.*, 2013; Saiah *et al.*, 2009) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้

มีข้อจำกัดในส่วนของ การเตรียมวัสดุที่ต้องใช้ เครื่องมืออุตสาหกรรมเฉพาะทางที่มีราคาค่อนข้างสูง อาจจะเป็นข้อจำกัดหนึ่งสำหรับการนำไปใช้งาน บางอย่าง ที่มีความต้องการวัสดุที่มีต้นทุนการผลิตไม่ สูงมากนัก

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการขึ้นรูป วัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิดและ RS ในรูปแบบแซนวิชและจะทำการประเมินถึงปัจจัย ของชนิดของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวแต่ละ ชนิด และรูปแบบการขึ้นรูปแบบโครงสร้างแซน วิช ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและกายภาพของวัสดุเชิง ประกอบที่ได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้แนวทางการขึ้นรูปวัสดุ เชิงประกอบเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชอีกแนวทาง หนึ่ง ที่สามารถผลิตได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก มีต้นทุนในการ ผลิตต่ำลง (ลดขั้นตอนการใช้เครื่องมือผสมที่มีราคา สูง) และง่ายต่อการนำไปผลิตได้จริง ซึ่งจะเป็น แนวทางในการส่งเสริมให้มีการใช้งานวัสดุจากเทอร์

มอพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยธรรมชาติอย่าง กว้างขวางมากขึ้น

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 การเตรียมฟางข้าว

นำฟางข้าว (RS) มาทำความสะอาดโดยการ ล้างน้ำ เพื่อเอาสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ออก ฟึ่งให้แห้ง และ นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วตัดให้มีขนาดประมาณ 25 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูงประมาณ 30 วินาที เพื่อให้ RS กระจายตัว โดย RS ที่เตรียมได้ มีลักษณะดังภาพที่ 1 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวเฉลี่ย 1 มิลลิเมตร และ 7.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ลักษณะของฟางข้าวที่เตรียมได้ในงานวิจัย

1.2 การเตรียมแป้งข้าว

การเตรียมแป้งข้าว โดยการ โม่ น้ำ (Kengkhetkit and Mopoung, 2019) มีวิธีการดังนี้ นำ ข้าวเจ้า (พันธุ์ กข 41) และ ข้าวเหนียว (พันธุ์ กข 6) มาเตรียมเป็นผงแป้งด้วยเครื่องบดโม่ หลังจากโม่แล้ว ทิ้งให้แป้งข้าวตกตะกอนแยกจากน้ำ 24 ชั่วโมง ที่ อุณหภูมิห้อง รินส่วนน้ำออกและนำไปตากให้แห้ง

แป้งที่ตากแห้งแล้วนำมาบด ร่อน เพื่อนำไปใช้เตรียม เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (TPS) ต่อไป แป้งข้าวที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ มี 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า (Rice flour), แป้งข้าวเหนียว (Glutinous rice flour) และแป้งผสม ระหว่างแป้งข้าวเจ้าผสมแป้งข้าวเหนียว (Mixed flour) ที่อัตราส่วน 1:1 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว แต่ละชนิดที่เตรียมได้นั้นจะมีความชื้นในปริมาณที่

ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน โดยจะพบว่าปริมาณอะไมโลสของแป้งข้าวเจ้าจะมีปริมาณสูงสุด ตามด้วยแป้งผสมและแป้งข้าวเหนียว ตามลำดับ (Kengkhetkit and Mopoung, 2019)

2. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวและฟางข้าว

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิด และ RS มีปัจจัยที่ใช้สำหรับทำการศึกษา คือ ชนิดของ TPS จากแป้งข้าวชนิดต่างๆ และรูปแบบการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่าง TPS และ RS 2 รูปแบบ (ขึ้นรูปแบบโครงสร้างแซนวิช 3 ชั้น และ 5 ชั้น) โดยมีขั้นตอนดังนี้

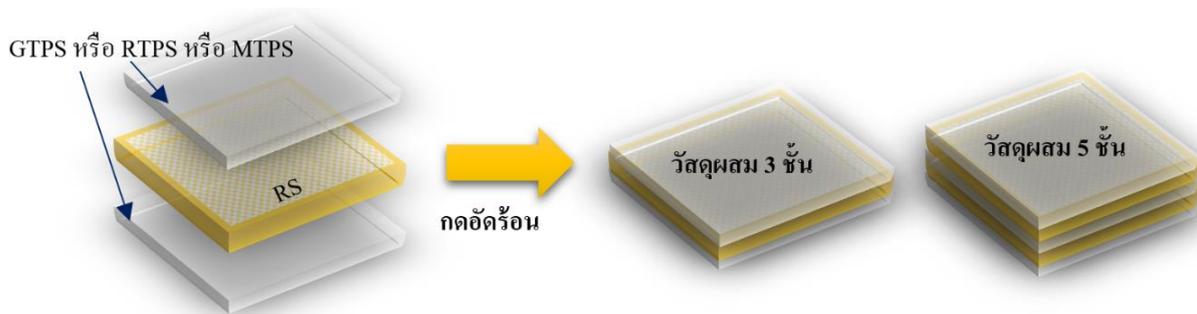
2.1 การเตรียมแผ่นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าว

นำแป้งข้าวแต่ละชนิดผสมกับกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) ในอัตราส่วน 60:40 ตามลำดับ นวดส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในถุงพอลิโพรพิลีนประมาณ 3 นาที เก็บส่วนผสมที่ได้ไว้ 24 ชั่วโมงในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จากนั้นนำส่วนผสมแป้งมาทำการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ที่กำลัง 1000 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที (คนส่วนผสม ทุกๆ 15 วินาที) เพื่อให้แป้งบางส่วนเกิดเจล นำเจลแป้ง 15 กรัมมาวางบนแม่พิมพ์ ทำการกดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระยะเวลา 15 นาที จะได้แผ่น TPS ที่มีความหนาประมาณ 0.8-1 มิลลิเมตร นำแผ่น TPS มาตัดเป็น

แผ่นขนาด 120×120 มิลลิเมตร โดยแต่ละแผ่น TPS ที่เตรียมได้มีน้ำหนักประมาณ 8 กรัม ทั้งนี้ TPS ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้า, แป้งข้าวเหนียว และ แป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าผสมแป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วน 1:1 จะถูกกำหนดเป็นตัวอักษรย่อว่า RTPS, GTPS และ MTPS ตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาที่ผ่านมาของผู้วิจัย (Kengkhetkit and Mopoung, 2019) พบว่า TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิดนั้นมีค่าดัชนีการไหลแตกต่างกัน โดย GTPS มีค่าดัชนีการไหลมากกว่า MTPS และ RTPS ตามลำดับ

2.2 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวแต่ละชนิดและฟางข้าว

นำแผ่น TPS จากข้อ 2.1 วางบนแผ่นแม่พิมพ์ขนาด 120×120 มิลลิเมตร นำ RS ประมาณ 8 กรัม วางกระจายให้สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น TPS จากนั้นนำแผ่น TPS อีกแผ่น ประกบด้านบนชั้น RS จากนั้นนำไปกดอัดที่ อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระยะเวลา 15 นาที (ก่อนอัดอุ่นร้อน 15 นาที) ทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบระหว่าง TPS และ RS ทั้งแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น ดังภาพที่ 2 หลังจากนั้นนำแผ่นวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชที่ได้มาทำการตัดเป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป ทั้งนี้มีการกำหนดชื่อตัวอย่างที่ศึกษา คือ RS-X-Y เมื่อ RS, X และ Y หมายถึง ฟางข้าว, ชนิดของ TPS จากแป้งข้าวที่ใช้ และจำนวนชั้นของวัสดุเชิงประกอบ ตามลำดับ โดยส่วนผสมของแต่ละตัวอย่างที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ลักษณะการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ โครงสร้างแบบแซนวิชแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น

ตารางที่ 1 สูตรวัสดุเชิงประกอบที่ทำการศึกษา

ตัวอย่าง	จำนวนชั้น		ร้อยละโดยน้ำหนักของ
	เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช	ฟางข้าว	ฟางข้าวในวัสดุเชิงประกอบ
RS-GTPS-3	แป้งข้าวเหนียว 2 ชั้น	1 ชั้น	33.33
RS-GTPS-5	แป้งข้าวเหนียว 3 ชั้น	2 ชั้น	40
RS-RTPS-3	แป้งข้าวเจ้า 2 ชั้น	1 ชั้น	33.33
RS-RTPS-5	แป้งข้าวเจ้า 3 ชั้น	2 ชั้น	40
RS-MTPS-3	แป้งผสม 2 ชั้น	1 ชั้น	33.33
RS-MTPS-5	แป้งผสม 3 ชั้น	2 ชั้น	40

3. การทดสอบลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบ โครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติก สตาร์ชจากแป้งข้าวและ ฟางข้าว

3.1 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวและ RS ในแต่ละสูตร

ชิ้นงานตัวอย่างแต่ละสูตรจะถูกนำมาตัด แฉกขวาง จากนั้นทำการศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิว ภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ของบริษัท Hitachi รุ่น TM-1000 ที่กำลังขยาย 50x, 100x และ 1200x

3.2 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง TPS จากแป้งข้าวและ RS ในแต่ละสูตร

ชิ้นงานถูกตัดให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร และ ยาว 20 มิลลิเมตร เพื่อทำการหาความหนาแน่นของชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งเชิงวิเคราะห์ของบริษัท METTLER TOLEDO รุ่น XS105 Dual Range แต่ละวัสดุทำการหาค่าความหนาแน่นจำนวน 3 ชิ้น เพื่อหาค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบนั้นๆ

3.3 สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ ระหว่าง TPS จากแป้งข้าวและ RS ในแต่ละสูตร

นำแผ่นวัสดุเชิงประกอบ โครงสร้างแบบแซนวิชทั้ง 3 ชั้น และ 5 ชั้น ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด โดยมีความหนาประมาณ 2 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ มาทำการตัดให้ชิ้นงานมีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร และยาว 90 มิลลิเมตร แล้วนำมาทดสอบสมบัติความทนแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

(Universal testing machine) ของบริษัท Testometric รุ่น M350-10CT ใช้น้ำหนักโหลดเซลล์ (Load cell) 1 กิโลนิวตัน มีระยะทดสอบ (Gauge length) 50 มิลลิเมตร ซึ่งงานถูกดึงด้วยอัตราการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ร้อยละความเครียดเท่ากับ 1 (Tensile modulus at 1% strain) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของแต่ละตัวอย่างหาจากค่าเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่างสุทธละ 5 ชิ้น

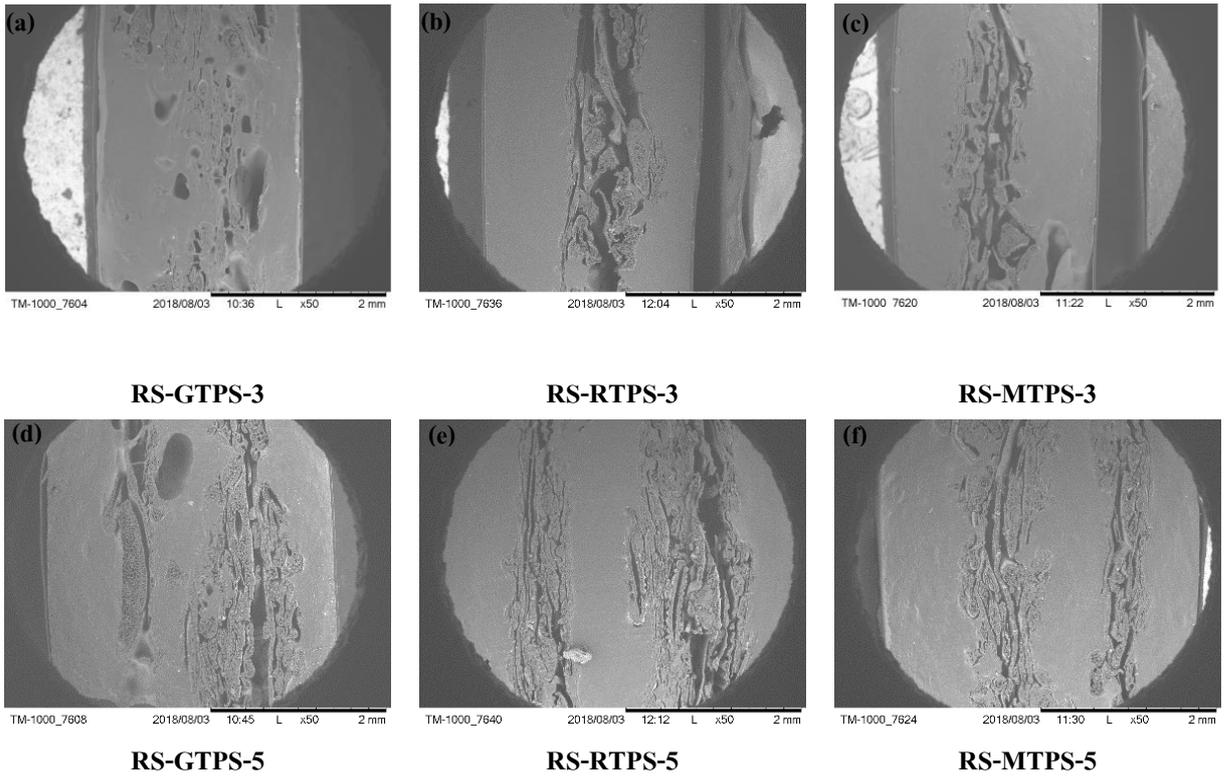
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ลักษณะพื้นผิวภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบ โครงสร้างแบบแซนวิชระหว่าง TPS จากแป้งข้าว และ RS ที่กำลังขยาย 50x, 100x และ 1200x แสดงดังภาพที่ 3-5 ตามลำดับ จากภาพ SEM ภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบ โครงสร้างแบบแซนวิชสูตรต่างๆ ที่กำลังขยายต่ำ 50x (ภาพที่ 3) พบว่าวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิดที่เตรียมได้ มีลักษณะของจำนวน 3 และ 5 ชั้น ตามรูปแบบที่ได้ขึ้นรูปไว้

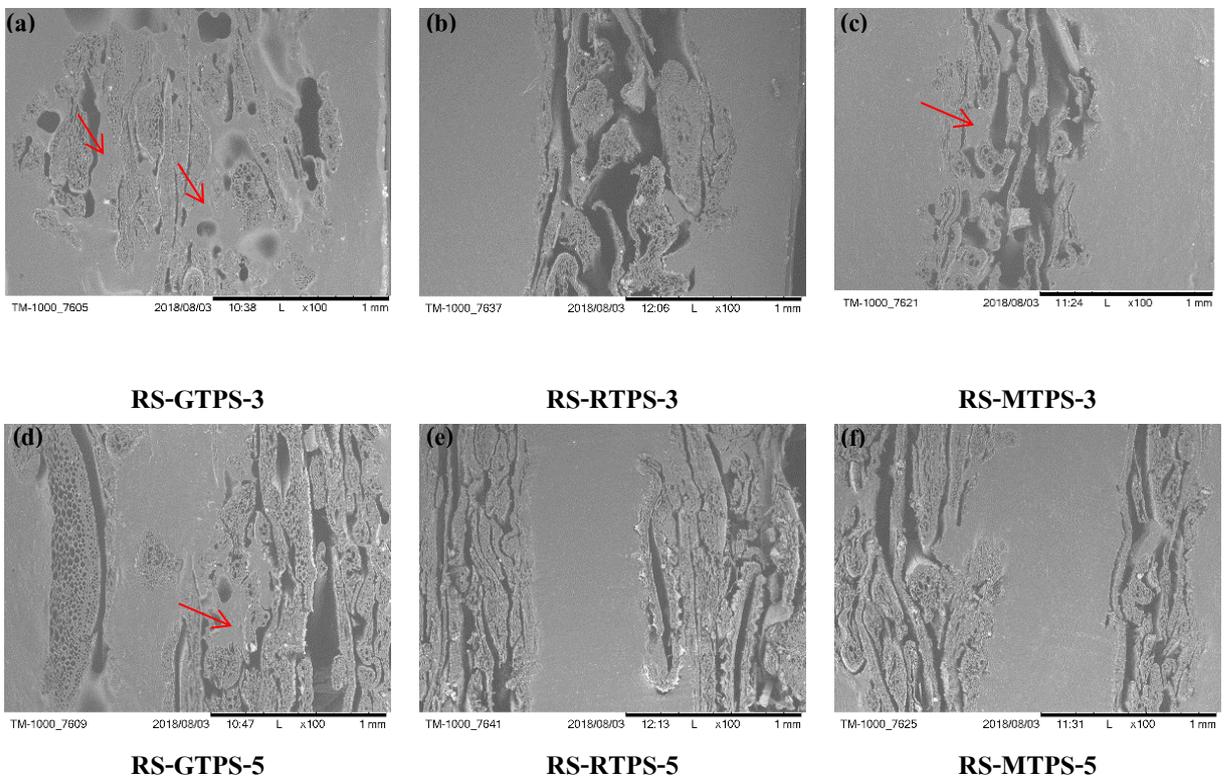
ภาพที่ 4 แสดงภาพ SEM ที่กำลังขยาย 100x ทำให้เห็นถึงลักษณะการไหลแทรกตัวของ TPS (ลูกศรสีแดง) แต่ละชนิดในชั้น RS ซึ่งแม้ว่าจากภาพ SEM ของวัสดุเชิงประกอบทุกสูตร (ภาพที่ 4a-4f) จะไม่พบส่วนของ TPS ไหลเข้าไปแทรกอยู่เลยในส่วนบริเวณตรงกลางของชั้น RS เลย แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบจาก TPS แต่ละชนิดในภาพที่ 4 นั้น จะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิดมีลักษณะ

การไหลแทรกเข้าไปในชั้น RS ที่แตกต่างกัน TPS จากแป้งข้าวเหนียว (GTPS) จะพบว่ามีการไหลแทรกเข้าไปในส่วนชั้น RS ได้ดีที่สุด (ภาพที่ 4a และ 4d) ในขณะที่วัสดุที่ใช้ TPS จากแป้งผสม (MTPS) พบว่ามีการไหลแทรกเข้าไปในชั้น RS เพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 4c และ 4f) และวัสดุที่ใช้ TPS จากแป้งข้าวเจ้า (RTPS) จะไม่พบว่ามี RTPS ไหลแทรกในชั้น RS เลยแต่จะพบอยู่แค่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น RS เท่านั้น (ภาพที่ 4b และ 4e)

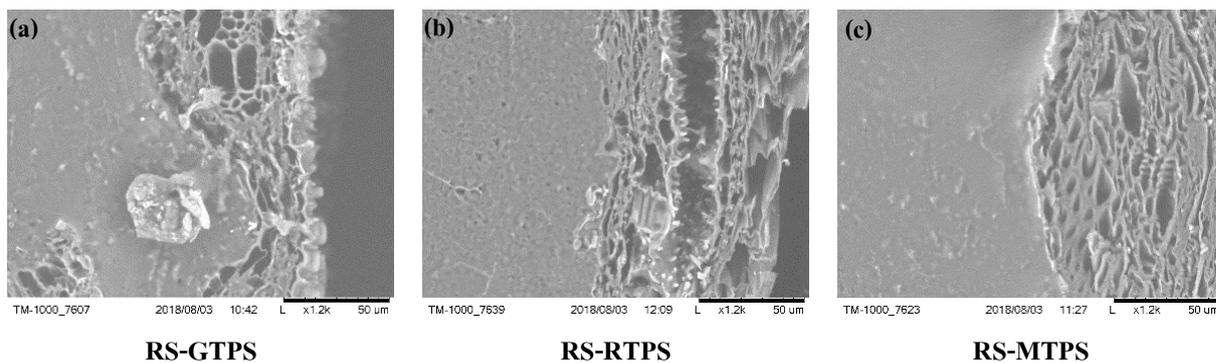
ผลความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวด้วย SEM ที่ได้ นี้ เป็นผลมาจาก TPS แต่ละชนิดมีค่าดัชนีการไหลที่ต่างกัน พบว่าค่าดัชนีการไหลของ GTPS มีค่าสูงสุด ตามด้วย MTPS และ RTPS ตามลำดับ (Kengkhetkit and Mopoung, 2019) ซึ่งค่าดัชนีการไหลนี้เป็นค่าที่แสดงถึงความหนืดของสารเมื่อหลอมเหลว สารที่มีค่าดัชนีการไหลสูงจะมีความหนืดที่ต่ำ ด้วยเหตุนี้วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ GTPS (ดัชนีการไหลสูง) จึงพบการไหลแทรกเข้าไปในชั้น RS ได้มากที่สุด ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ RTPS (ดัชนีการไหลต่ำ) จะไม่พบการไหลแทรกเข้าไปในชั้น RS เลย อย่างไรก็ตามเนื่องจากทั้งในส่วน ของ TPS จากแป้งข้าวและ RS ถือว่าเป็นสารที่มีสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ดังนั้นจากภาพที่ 5a-5c จะพบได้ชัดเจนว่าตรงบริเวณรอยต่อของพื้นผิวของ RS กับ TPS ทุกชนิด มีความเข้ากันได้ดี ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้พบได้เช่นเดียวกันในงานวิจัยต่างๆ ที่ได้มีการรายงานไว้ (Zhang *et al.*, 2011; Kaewtatip and Thongmee, 2014)



ภาพที่ 3 สัณฐานวิทยาพื้นผิวภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวแต่ละชนิดกับฟางข้าว ที่กำลังขยาย 50X



ภาพที่ 4 สัณฐานวิทยาพื้นผิวภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวแต่ละชนิดกับฟางข้าว ที่กำลังขยาย 100X



ภาพที่ 5 สันฐานวิทยาพื้นผิวภาคตัดขวางบริเวณรอยต่อของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวแต่ละชนิดกับฟางข้าวแบบแซนวิช 3 ชั้น ที่กำลังขยาย 1200X

ตารางที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวชนิดต่างๆ และ RS โดยพบว่า ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบในแต่ละสูตรมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.08-1.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบรูปแบบแซนวิชในงานวิจัยนี้ มีแนวโน้มความหนาแน่นต่ำกว่าวัสดุ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิด (GTPS, RTPS และ MTPS) ที่มีค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกัน ซึ่งอยู่ในช่วง 1.36-1.37 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Kengkhetkit and Mopoung, 2019) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการขึ้น

รูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช TPS ไม่ได้ไหลเข้าไปแทรกในชั้น RS ทั้งหมด จึงพบช่องว่างในบริเวณของชั้นของ RS (ดังภาพที่ 4a-4f) ซึ่งส่งผลได้แนวโน้มความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวและ RS มีค่าที่ต่ำกว่าวัสดุ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิด (GTPS, RTPS และ MTPS) เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบพบว่า วัสดุเชิงประกอบในระบบที่ใช้ GTPS มีแนวโน้มความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ RTPS และ MTPS เล็กน้อย

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของเทอร์มอพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าว และวัสดุเชิงประกอบเทอร์มอพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวแต่ละชนิด และฟางข้าว

ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (g/cm ³)	แหล่งข้อมูล
GTPS	1.36±0.01	(Kengkhetkit and Mopoung, 2019)
RTPS	1.37±0.01	(Kengkhetkit and Mopoung, 2019)
MTPS	1.37±0.01	(Kengkhetkit and Mopoung, 2019)
RS-GTPS-3	1.20±0.05	
RS-GTPS-5	1.20±0.06	
RS-RTPS-3	1.11±0.01	
RS-RTPS-5	1.08±0.02	
RS-MTPS-3	1.11±0.03	
RS-MTPS-5	1.17±0.01	

สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS แต่ละชนิดแบ่งขาว แสดงดังภาพที่ 6 ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ร้อยละความเครียดเท่ากับ 1 (Tensile modulus at 1%strain; ภาพที่ 6a) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเสียรูปในช่วงต้นของการรับแรงดึง (ที่ระยะยืดร้อยละ 1) ส่วนค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength; ภาพที่ 6b) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการรับความเค้นสูงสุดก่อนที่วัสดุจะเริ่มขาดหรือแตกออกจากกัน จากผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุ TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวต่างๆ พบว่าสมบัติความทนแรงดึงของ TPS แต่ละชนิด (GTPS, RTPS และ MTPS) จะมีค่าค่อนข้างต่ำ และมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ TPS จากแป้งข้าวนี้นี้มีค่าอยู่ในช่วง 7.23-8.20 เมกะพาสคัล และ 0.44-0.48 เมกะพาสคัล ตามลำดับ (Kengkhetkit and Mopoung, 2019)

จากภาพที่ 6a แสดงได้ชัดเจนว่า การใช้ RS สามารถเป็นตัวเสริมแรงให้กับ TPS ได้ โดยวัสดุเชิงประกอบ TPS จากทุกชนิด และ RS มีแนวโน้มค่ามอดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุ TPS ที่ไม่ได้ผสม RS ซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่ได้รายงานไว้เกี่ยวกับพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ TPS ซึ่งได้พบเช่นเดียวกันว่า การเติมเส้นใยจากธรรมชาติสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึงของ TPS ได้ (Ma *et al.*, 2005; Prachayawarakorn *et al.*, 2011; Wattanakornsiri *et al.*, 2011) นอกจากนี้ ภาพที่ 6a ยังเห็นได้ชัดเจนว่า แม้ว่าการใช้ RS เป็นตัวเสริมแรงในระบบ GTPS, MTPS และ RTPS นั้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบในทุกๆ ระบบ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ประสิทธิภาพในการปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบแต่ละระบบ (RS-GTPS, RS-MTPS และ

RS-RTPS) มีค่าที่แตกต่างกันคือ ร้อยละ 311-461, ร้อยละ 210-265 และร้อยละ 193-219 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่ได้เติม RS

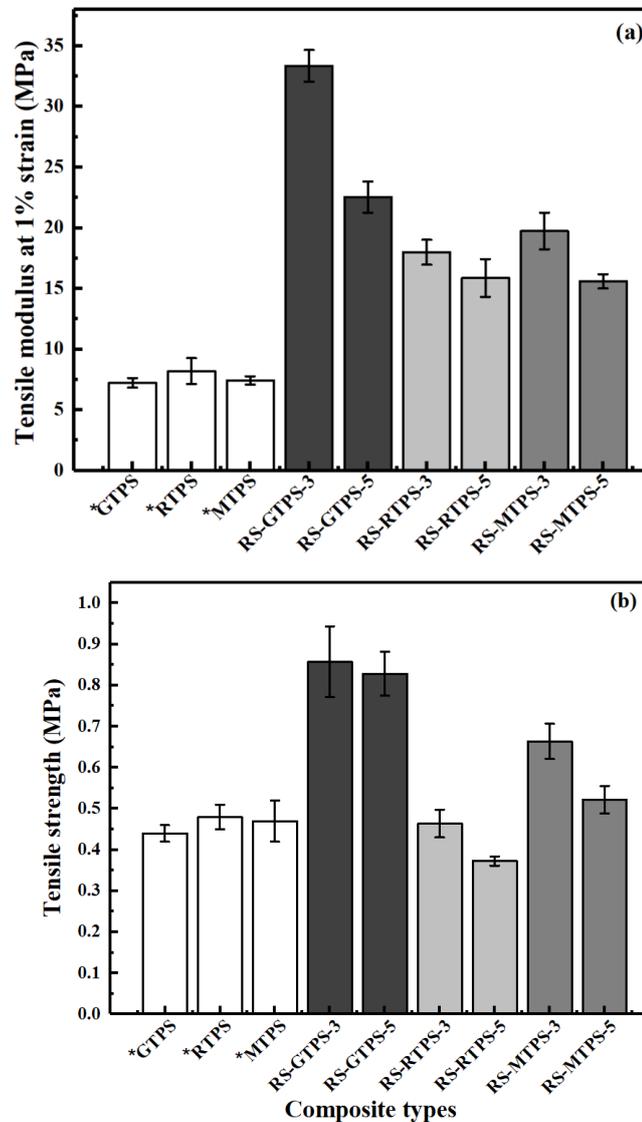
โดยจากหลักฐานภาพ SEM สามารถใช้อธิบายแนวโน้มค่ามอดูลัสแรงดึงข้างต้นได้อย่างชัดเจนว่า เนื่องจากบริเวณรอยต่อของพื้นผิวของ RS และ TPS ทั้ง 3 ชนิดมีความเข้ากันได้ดี (ภาพที่ 5) ดังนั้นในช่วงต้นของการได้รับแรงดึงที่ร้อยละความเครียดเท่ากับ 1 จึงทำให้การถ่ายโอนแรงที่ได้รับระหว่างเมทริกซ์และตัวเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบนี้เกิดขึ้นได้ดี วัสดุเชิงประกอบทุกสูตรจึงมีค่าความต้านทานการเสียรูปที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ TPS แต่ละชนิดแบ่งขาว จะพบว่า วัสดุเชิงประกอบในระบบ GTPS จะมีความเข้ากันได้ดีมากกว่าวัสดุเชิงประกอบระบบอื่นๆ ด้วยเหตุนี้วัสดุเชิงประกอบระบบ GTPS จึงมีแนวโน้มประสิทธิภาพการปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึงที่ดีที่สุด ซึ่งลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกันนี้พบได้ในงานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับการใช้ TPS ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ ที่ได้มีการรายงานไว้ (Ma *et al.*, 2005; Prachayawarakorn *et al.*, 2011; Kaewtatip and Thongmee, 2012)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการขึ้นรูปแบบโครงสร้างแซนวิช 3 ชั้น มีแนวโน้มค่ามอดูลัสแรงดึงที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีการขึ้นรูปแบบโครงสร้างแซนวิช 5 ชั้นในทุกๆ ระบบที่ทำการศึกษา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช 3 ชั้น มีความเข้ากันได้ดีระหว่าง TPS และ RS ที่ดีกว่า ดังภาพ SEM (ภาพที่ 3-4) ที่พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่ทำการขึ้นรูปโครงสร้างแบบแซนวิชจำนวน 3 ชั้น มี TPS ไหลเข้าไปแทรกในชั้น RS ได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ทำการขึ้นรูปโครงสร้างแบบแซนวิช 5 ชั้น ด้วยเหตุนี้ค่า

มอดูลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS แบบ
แกนวิช 3 ชั้นจึงพบว่ามีแนวโน้มที่สูงกว่า

ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิง
ประกอบ RS-TPS แต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 6b โดย
จากผลการทดลองพบว่า ชนิดของ TPS ที่ใช้ในการ
เตรียมวัสดุเชิงประกอบส่งผลอย่างมากต่อค่าความ
ต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ โดยพบได้
ชัดเจนว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิง
ประกอบระบบที่ใช้ GTPS มีค่าสูงสุด ตามด้วยวัสดุ
เชิงประกอบระบบ MTPS โดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ

188-194 และ ร้อยละ 111-141 ตามลำดับ เมื่อเทียบ
กับ TPS ที่ไม่ได้เติม RS ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบ
ระบบที่ใช้ RTPS จะไม่พบการปรับปรุงค่าความ
ต้านทานแรงดึงเลย เมื่อพิจารณาอิทธิพลของรูปแบบ
การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบต่อค่าความต้านทานแรง
ดึงพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปโครงสร้างแบบ
แกนวิชจำนวน 3 ชั้นจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่
สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปโครงสร้างแบบแกน
วิช 5 ชั้นในทุกๆระบบที่ทำการศึกษา



ภาพที่ 6 สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบแต่ละสูตร (a) tensile modulus at 1%strain และ (b) tensile strength เปรียบเทียบกับระบบ GTPS, RTPS และ MTPS (Kengkhetkit and Mopoung, 2019)*

แนวโน้มการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS แต่ละชนิดที่แตกต่างกันนี้อาจเนื่องมาจาก TPS ที่ใช้ในวัสดุเชิงประกอบแต่ละระบบ มีค่าดัชนีการไหลที่แตกต่างกัน จากภาพ SEM (ภาพที่ 3-5) พบว่า ในวัสดุเชิงประกอบระบบที่ TPS สามารถไหลเข้าไปแทรกในส่วนของชั้น RS ได้ดี (RS-GTPS และ RS-MTPS) ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวเชิงกล (เกิด Mechanical interlocking) ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชและชั้นเสริมแรง (ฟางข้าว) ซึ่งเป็นกลไกเข้ามาช่วยในการถ่ายโอนความเค้นขณะได้รับแรง (Prachayawarakorn *et al.*, 2013; Wattanakornsiri *et al.*, 2011) ดังนั้นจึงทำให้พบว่าวัสดุเชิงประกอบในระบบที่ใช้ GTPS และ MTPS มีค่าความต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุ TPS ที่ไม่ได้เติม RS ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบในระบบ RTPS ที่มีค่าดัชนีการไหลที่ต่ำกว่า ในระหว่างกดอัด RTPS ที่มีความหนืดสูง ยากที่จะไหลเข้าไปแทรกในชั้นของ RS ทำให้วัสดุเชิงประกอบในระบบนี้ขาดกลไกที่ช่วยถ่ายโอนแรงที่ได้รับระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย ด้วยเหตุนี้วัสดุเชิงประกอบระบบ RTPS จึงไม่พบการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงเลย

สรุป

จากผลการศึกษาแนวทางการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวและฟางข้าว พบว่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบในแต่ละชนิดของแป้งข้าวที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีไม่แตกต่างกัน มีค่าอยู่ในช่วง 1.08-1.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อย่างไรก็ตามจากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงเห็นได้ชัดเจนว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการใช้ RS เป็นตัวเสริมแรงมีแนวโน้มสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุ TPS ที่ไม่ได้เติม RS อย่างไรก็ตามชนิดของ

TPS จากแป้งข้าวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว ส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ โดยจากการทดลองจะพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการใช้เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว (GTPS) จะพบว่ามีแนวโน้มของสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบในระบบที่ใช้ MTPS และ RTPS โดยในวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ GTPS สามารถปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึง และ ค่าความต้านทานแรงดึง ได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 311-461 และ ร้อยละ 188-194 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุ GTPS ที่ไม่ได้มีการเติม RS ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลทางสถิติฐานวิทยาที่ได้ทำการศึกษาด้วยภาพ SEM ที่พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการใช้ GTPS (มีค่าดัชนีการไหลที่สูงกว่า MTPS และ RTPS) จะพบว่ามี GTPS สามารถไหลเข้าไปแทรกในส่วนของชั้น RS ได้ดีกว่าการใช้ MTPS และ RTPS ซึ่งทำให้วัสดุเชิงประกอบในระบบที่ใช้ GTPS นี้ เกิดการยึดเหนี่ยวเชิงกลระหว่าง GTPS และ RS ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระบบนี้นอกจากนี้จากผลของจำนวนชั้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ TPS และ RS โครงสร้างแบบแซนวิช 3 ชั้นจะมีสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช 5 ชั้นในทุกๆระบบที่ทำการศึกษา ทั้งนี้แนวคิดข้างต้นเป็นการพัฒนาองค์ความรู้การใช้ประโยชน์จากข้าวในรูปแบบใหม่ แม้ว่าข้าวจะมีรูปแบบการใช้ประโยชน์พื้นฐานหลักคือ การบริโภค แต่ที่ผ่านมาในบางช่วงปี เกษตรกรประสบปัญหาวิกฤตราคาข้าวตกต่ำ ดังนั้นการพัฒนาองค์ความรู้การใช้ประโยชน์จากข้าวในประเภทต่างๆ อาจเป็นประโยชน์และเป็นทางเลือกหนึ่งแก่เกษตรกรผู้ผลิตข้าวได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก

เอกสารอ้างอิง

- Battegazzore, D., Bocchini, S. and Frache, A. 2016. Thermomechanical improvement of glycerol plasticized maize starch with high loading of cellulose, flax and talc fillers. **Polymer International** 65: 955-962.
- Bayer, I.S., Guzman-Puyol, S., Heredia-Guerrero, J.A., Ceseracciu, L., Pignatelli, F., Ruffilli, R., Cingolani, R. and Athanassiou, A. 2014. Direct transformation of edible vegetable waste into bioplastics. **Macromolecules** 47: 5135-5143
- Honnak, C. 2020. Guidelines for development, production and marketing of Thai rice. **Journal of Thai Ombudsman** 13(1): 91-116. (in Thai)
- Kaewtatip, K. and Thongmee, J. 2012. Studies on the structure and properties of thermoplastic starch/luffa fiber composites. **Materials and Design** 40: 314-318.
- Kaewtatip, K. and Thongmee, J. 2014. Preparation of thermoplastic starch/treated bagasse fiber composites. **Starch/Staerke** 66: 724-728.
- Kengkhetkit, N. and Mopoung, R. 2019. Physical and Mechanical Properties of Thermoplastic Starches from Wet Milled Rice Flours. **Agricultural Science Journal** 50(Suppl. I): 442-448. (in Thai)
- Ma, X., Yu, J. and Kennedy, J.F. 2005. Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites. **Carbohydrate Polymers** 62: 19-24.
- Mohanty, A.K., Misra, M. and Drzal, L.T. 2002. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. **Journal of Polymers and the Environment** 10: 19-26.
- Pollution Control Department. 2004. Effects of open burning. **Journal of Burning-Free Agriculture** 2: 2-3. (in Thai)
- Prachayawarakorn, J., Chaiwatyothin, S., Mueangta, S. and Hanchana, A. 2013. Effect of jute and kapok fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites. **Materials and Design** 47: 309-315.
- Prachayawarakorn, J., Ruttanabus, P. and Boonsom, P. 2011. Effect of Cotton Fiber Contents and Lengths on Properties of Thermoplastic Starch Composites Prepared from Rice and Waxy Rice Starches. **Journal of Polymers and the Environment** 19: 274-282.
- Saiah, R., Sreekumar, P.A., Gopalakrishnan, P., Leblanc, N., Gattin, R. and Saiter, J.M. 2009. Fabrication and characterization of 100% green composite: Thermoplastic based on wheat flour reinforced by flax fibers. **Polymer Composites** 30: 1595-1600.
- Varda, M., Darshan, M. and Nishith, D. 2014. Can a starch based plastic be an option of environmental friendly plastic?. **Journal of Global Biosciences** 3(3): 681-685.
- Wattanakornsiri, A., Pachana, K., Kaewpirom, S., Sawangwong, P. and Migliaresi, C. 2011. Green composites of thermoplastic corn

starch and recycled paper cellulose fibers.

Songklanakarin Journal of Science and Technology 33(4): 461-467.

Zhang, Y., Thompson, M. and Liu, Q. 2011. The effect of pea fiber and potato pulp on thermal property,

surface tension, and hydrophilicity of starch-based bioplastics. **Carbohydrate Polymers** 86: 700-707.