



Research Article

การพัฒนากระถางต้นไม้ชีวภาพจากพอลิเมอร์คอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/
ผักตบชวา/เปลือกถั่วลิสง

Development of Biodegradable Plant Pots from Thermoplastic Starch/
Water Hyacinth/Peanut Hulls Polymer Composites

พิมภนิฏา กันทาตง*, รัตฐภัท บุนเฑร์, จัทรชัชชญาณ์ โชติชญาณ์พงศ์ และ พนิดา สวัสดิ์

Pimpanitpa Kunthadong*, Rattaphat Bunkerd, Chatrachatchaya Chotichayapong and Panida Sawadee

สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
Program of Applied Chemistry, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima Campus, Mueang,
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-04-16

Revised: 2024-06-16

Accepted: 2024-06-25

Keywords:

biodegradable pots;

bio-composites;

thermoplastic starch;

peanut hulls;

water hyacinth

This study prepared a biodegradable polymer composite for a prototype plant bio-pot from thermoplastic starch (TPS), poly (L-lactide) (PLL), reinforced with water hyacinth (WH) and peanut hulls (P) through a melt forming process. The TPS compounds were prepared from native tapioca starch using a plasticizer mixture consisting of glycerol and other plasticizers in a 2:1 weight ratio. The mixture included glycerol/sorbitol (GS), glycerol/urea (GU) and glycerol/distilled water (GW), and were compared with glycerol (Gly) alone. The results showed that plastic sheet from TPS_{GS} has tensile mechanical properties, thermal stability, and water resistance better than other TPS compounds. When TPS_{GS} was reinforced with water hyacinth fiber and peanut shell (WHP) at 10 % by weight and 5 phr PLL was added as an additive (90TPS_{GS}/10WHP+5PLL), the tensile and water absorption properties of the composite sheets were studied. It appeared that the reinforcement with 10% WHP by weight increased the elongation at break to 20.39%, while also reducing water absorption and improving the stability of the plastic sheet during testing. Additionally, the polymer composites can be formed into conical plant pots using a vertical ram extruder. The resulting plant pots exhibited a dark brown color with creamy streaks evenly distributed throughout, a smooth surface texture and morphology stability. They are suitable for use as small plant pots.

© 2025 Kunthadong, P., Bunkerd, R., Chotichayapong, C. and Sawadee, P. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: pimpanitpa.ku@rmuti.ac.th

Cite this article as:

Kunthadong, P., Bunkerd, R., Chotichayapong, C. and Sawadee, P. 2025. Development of Biodegradable Plant Pots from Thermoplastic Starch/Water Hyacinth/Peanut Hulls Polymer Composites. *Recent Science and Technology* 17(3): 262954.

บทคัดย่อ

ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพสำหรับเป็นกระถางต้นไม้ชีวภาพต้นแบบ จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch; TPS) พอลิ(แอล-แลคไทด์) (poly (L-lactide); PLL) เสริมแรงด้วยผักตบชวา (water hyacinth; WH) และเปลือกถั่วลิสง (peanut hulls; P) โดยกระบวนการหลอมขึ้นรูป TPS คอมพาวด์เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่างกลีเซอรอลกับพลาสติกไซเซอร์อื่น ๆ ในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ดังนี้ กลีเซอรอล/ซอร์บิทอล (glycerol/sorbitol; GS) กลีเซอรอล/ยูเรีย (glycerol/urea; GU) และ กลีเซอรอล/น้ำกลั่น (glycerol/distilled water; GW) เทียบกับกลีเซอรอล (glycerol; Gly) เพียงอย่างเดียว ผลการศึกษาพบว่าแผ่นพลาสติก TPS_{GS} ที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลแรงดึง เสถียรภาพทางความร้อน และการต้านทานน้ำได้ดีกว่า TPS สูตรคอมพาวด์อื่น และเมื่อนำ TPS_{GS} มาเสริมแรงด้วยเส้นใยผสมผักตบชวาและเปลือกถั่วลิสง (WHP) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และใช้ 5 phr PLL เป็นสารเติมแต่ง (90TPS_{GS}/10WHP+5PLL) โดยศึกษาสมบัติเชิงกลแรงดึงและการดูดซับน้ำของแผ่นพลาสติกคอมโพสิต แสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงด้วย WHP ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการยืดยืดเพิ่มขึ้นเป็น 20.39 เป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แก่แผ่นพลาสติก อีกทั้งยังลดค่าการดูดซับน้ำและเพิ่มความเสถียรของแผ่นพลาสติกในระหว่างการทดสอบอีกด้วย ลำดับสุดท้ายพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพนี้สามารถนำไปขึ้นรูปกระถางแบบทรงกรวยด้วยเครื่องอัดรีดแนวตั้งได้กระถางเพาะชำชีวภาพต้นแบบมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มปนครีมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ผิวสัมผัสเรียบและมีความคงรูป สามารถนำไปใช้เป็นกระถางปลูกต้นไม้ขนาดเล็กได้

คำสำคัญ: กระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพ, คอมโพสิตชีวภาพ, เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช, เปลือกถั่วลิสง, ผักตบชวา

1. บทนำ

กระถางหรือถาดเพาะชำพลาสติกมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย สำหรับการหว่านเมล็ดและการเพาะปลูกดอกไม้ ผัก และต้นกล้าต่าง ๆ ในฟาร์มดอกไม้ พืชไร่ พืชสวน เป็นต้น พลาสติกเหล่านี้ผลิตมาจากพอลิเมอร์ฐานปิโตรเลียมประเภทไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ (non-degradable polymer) หลังการใช้งานกลายเป็นขยะพลาสติกที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Grazuleviciene *et al.*, 2012; Gupta and Urahn, 2023) รวมถึงในประเทศไทยซึ่งเป็นแหล่งเกษตรกรรมมีการเพาะปลูกพืชจำนวนมากทำให้มีผลกระทบจากขยะพลาสติกทางการเกษตร ทั้งด้านการตกค้างของไมโครพลาสติก (microplastics) ในดิน และจากกระบวนการจัดการขยะ เช่น ต้นทุนการจัดการขยะ การเสื่อมสภาพของดิน (การฝังกลบ) ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (การเผาไหม้) เป็นต้น (Soontornchai *et al.*, 2016; FAO, 2021) ดังนั้นการนำพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) หรือพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระถางต้นไม้ทดแทนพอลิเมอร์จากฐานปิโตรเลียมหรือพลาสติกโภคภัณฑ์ (commodity plastic) ถือเป็นหนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหา/ลดปริมาณขยะ และลดต้นทุนการจัดการขยะพลาสติก ทนทานหลังใช้งานทางการเกษตรได้ เนื่องด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้สภาวะการหมัก (compostable) หรือการฝังดิน (soil burial)

ปัจจุบันการเตรียมพลาสติกชีวภาพกลุ่มที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (starch based) ได้รับความสนใจ (Jiang *et al.*, 2020) เนื่องด้วยแป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายและสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่น/ฟิล์มได้ จึงเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ (Theamdee and Rueangrung, 2019) โดยเฉพาะแป้งมันสำปะหลัง

ปัจจุบันประเทศไทยมีนโยบายขับเคลื่อนอุตสาหกรรมมันสำปะหลังไทยด้วยเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (Bio Circular Green Economy; BCG Model) ของกระทรวงอุตสาหกรรม งานวิจัยจำนวนมากได้มีการพัฒนาเปลี่ยนโครงสร้างแป้งให้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch; TPS) โดยผ่านกระบวนการพลาสติกไซซ์ (plasticization) เม็ดแป้งด้วยสารเพิ่มสภาพความยืดหยุ่นหรือพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) ที่เหมาะสม ภายใต้สภาวะการให้ความร้อน ความดัน และแรงเฉือน (Sriroth and Piyachomkwan, 2003) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียม TPS พบว่าการใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่างกลีเซอรอล (glycerol) กับกลุ่มพอลิออล (polyol) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น ซอร์บิทอล (sorbitol) ซิลิทอล (xylitol) และมอลทิทอล (maltitol) หรือกลุ่มหมู่เอไมด์ (amide groups) เช่น ยูเรีย (urea) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถพัฒนาสมบัติความแข็งแรงเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อนและสัณฐานวิทยาในการเก็บรักษาให้แก่ TPS ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบการใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว (Qiao *et al.*, 2011; Paluch *et al.*, 2022) ซึ่ง TPS นั้นถือเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพทางเลือกสำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการความทนทานและการเสื่อมสภาพของสมบัติเชิงกลในระยะยาว (Gironès *et al.*, 2012) อย่างไรก็ตามเนื่องด้วย TPS มีสมบัติชอบน้ำสูง (hydrophilic) และมีความเปราะ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานเป็นกระถางต้นไม้ การปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของ TPS เป็นวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (polymer composite) ซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ (natural fiber reinforcement) (Obasi, 2015; Islam *et al.*, 2021; Paczkowski *et al.*, 2021) ซึ่งมีข้อได้เปรียบในด้านน้ำหนักเบาและการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับ TPS เมทริกซ์ ส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของ TPS โดยยังคงสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Gironès *et al.*, 2012; Fekete *et al.*, 2018) นอกจากนี้ยัง

ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน การลดอัตราหดตัวขณะขึ้นรูปของ TPS (Sriroth and Piyachomkwan, 2003) และเมื่อมีการย่อยสลายทางชีวภาพแล้วเส้นใยธรรมชาติยังสามารถเป็นปุ๋ยหรือสารอาหารของจุลินทรีย์ในดินได้อีกด้วย (Buachum and Towatana, 2015)

ผักตบชวา (water hyacinth; WH) และเปลือกถั่วลิสง (peanut shell; P) เป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่สามารถนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในพลาสติกชีวภาพเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรง (Obasi, 2015; Islam *et al.*, 2021) และจากการศึกษาการปลดปล่อยธาตุปุ๋ยที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของวัสดุปลูกอินทรีย์พบว่าเปลือกถั่วลิสงมีปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์สูงที่สุดในแต่ละสัปดาห์การหมักเมื่อเทียบกับถ่านแกลบและมูลวัว (Buachum and Towatana, 2015)

ในงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการผลิตกระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้น นิยมใช้วัสดุเส้นใยเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบหลักและมีการขึ้นรูปกระถางแบบขั้นตอนเดียว โดยทำการผสมวัสดุและใช้แบ่งเปียงเป็นตัวประสานนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปกระถางแบบอัดไฮโดรลิก (Piyang *et al.*, 2018; Tanpaiboonkul *et al.*, 2022) หรือผลิตจากเยื่อกระดาษที่มีแบ่งเป็นตัวประสานขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (Juanga-Labayen and Yuan, 2021) ซึ่งกระบวนการเตรียมกระถางชีวภาพแบบขั้นตอนเดียวนั้นมีข้อจำกัดในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้เป็นมาตรฐานเดียวกันและขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเชิงพาณิชย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเตรียมเม็ดพอลิเมอร์คอมพาวด์ชีวภาพชนิดคอมโพสิต จากเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์เสริมแรงด้วยผักตบชวาและเปลือกถั่วลิสง ที่ใช้พอลิ(แอล-แลคไทด์) ((poly(L-lactide); PLL)) เป็นสารตัวเติม (additive) และประเมินศักยภาพในการขึ้นรูปเป็นกระถางพลาสติกชีวภาพต้นแบบด้วยเครื่องอัดรีดแนวตั้ง ด้วยการศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติต่าง ๆ เบื้องต้น ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ มุมสัมผัสหยดน้ำ และดัชนีการไหลของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยเม็ดคอมพาวด์พลาสติกชีวภาพที่มีส่วนประกอบของสารเสริมแรงผักตบชวาผสมเปลือกถั่วลิสง และความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเป็นกระถางพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อทดแทนการใช้เม็ดพลาสติกทนทานและลดปริมาณขยะพลาสติกทนทานจากการใช้งานทางการเกษตร ลดต้นทุนในการจัดการขยะและเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร/วัชพืช อีกทั้งยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหลังการใช้งานไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือมีสารตกค้างในดินทางการเกษตร

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

ผงแป้งมันสำปะหลัง (ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แป้งมันเอี่ยมเฮง อุตสาหกรรม จำกัด) ลำต้นผักตบชวา (อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา) นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา ฉีกลำต้นผักตบชวาเป็นเส้นขนาดความกว้างประมาณ 30-50 มิลลิเมตรและตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ พึ่งแดดให้แห้งเป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (ULM600/I, Memmert) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และบดเป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบด (SK 100, Retsch) และเปลือกถั่วลิสง (อำเภอบัวใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา) นำมาล้างทำความสะอาด พึ่งแดดเป็นเวลา 3-5 วัน จากนั้นนอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และบดเป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบด โดยผงวัตถุดิบทั้งสามชนิดร่อนผ่านตะแกรงที่ความละเอียด 80 Mesh (180 ไมโครเมตร) และบรรจุใส่ถุงซิปลพลาสติกเก็บรักษาในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน สำหรับสารเติมแต่ง คือ พอลิ(แอล-แลคไทด์) (3051D grade, NatureWorks LLC, USA) และสารพลาสติกไซเซอร์ ได้แก่ กลีเซอรอล (เกรดวิเคราะห์; Leonid chemicals Ltd., India) ยูเรีย (เกรดห้องปฏิบัติการ; Ajax Finechem Ltd., New Zealand) ซอร์บิทอล (เกรดห้องปฏิบัติการ; KemAus™, Australia) และน้ำกลั่น (D82100, Schott)

2.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์

การเตรียม TPS ในสภาวะการหลอมผสมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (Volpe *et al.*, 2018) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อ พลาสติกไซเซอร์ ร้อยละ 70:30 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาการใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่าง กลีเซอรอลต่อพลาสติกไซเซอร์ ชนิดอื่นในอัตราส่วน 2:1 ได้แก่ กลีเซอรอล/ซอร์บิทอล (GS) กลีเซอรอล/ยูเรีย (GU) และ กลีเซอรอล/น้ำกลั่น (GW) เทียบกับการใช้กลีเซอรอล (Gly) เพียงอย่างเดียว โดยนำแป้งมันสำปะหลัง (ผ่านการอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง) และพลาสติกไซเซอร์แต่ละสูตร (Table 1) มาผสมกันอย่างหยาบ (pre-mixed) ในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน ทำการเขย่าเพื่อให้พลาสติกไซเซอร์กระจายตัวและดูดซึมเข้าสู่เม็ดแป้งจัดเก็บรักษาในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมผสมระบบปิด (internal mixer; CHAREON TUT, co., Ltd.) ที่อุณหภูมิการหลอมผสม 140 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของสกรูเท่ากับ 60 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที คอมพาวด์ที่ได้ตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก และนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกสี่เหลี่ยมจัตุรัส ด้วยกระบวนการกดอัดเข้าแม่พิมพ์ (หัวข้อที่ 4)

Table 1 Composition of the mixtures used for the preparation of the thermoplastic starch compounds

TPS compounds	Tapioca starch (%wt)	Glycerol (%wt)	Sorbitol (%wt)	Urea (%wt)	Water distillation (%wt)
TPS _{Gly}	70	30	-	-	-
TPS _{GS}	70	20	10	-	-
TPS _{GU}	70	20	-	10	-
TPS _{GW}	70	20	-	-	10

Table 2 The composition ratio of polymer composite compounds

Polymer compounds	TPS _{GS} (%wt)	Water Hyacinth (%wt)	Peanut Hulls (%wt)	PLL (phr)
TPS _{GS} +5PLL	100	-	-	5
TPS _{GS} +10PLL	100	-	-	10
TPS _{GS} +15PLL	100	-	-	15
90TPS _{GS} /10WH+5PLL	90	10	-	5
90TPS _{GS} /10WHP+5PLL	90	5	5	5
80TPS _{GS} /20WHP+5PLL	80	10	10	5
90TPS _{GS} /10P+5PLL	90	-	10	5

2.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

พอลิเมอร์คอมโพสิตเตรียมระหว่าง TPS_{GS} และเส้นใยเสริมแรง (ผักตบชวาและ/หรือเปลือกถั่วลิสง) ที่ใช้ PLL เป็นสารเติมแต่ง (วัตถุดิบตั้งต้นก่อนผสมผ่านการอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง) ดังอัตราส่วนใน Table 2 โดยนำพอลิเมอร์มาผสมอย่างหยาบในถุงพอลิเอทิลีน ทำการหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนของสกรูเท่ากับ 60 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก และนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่พิมพ์ (หัวข้อที่ 4)

2.4 การขึ้นรูปแผ่นพลาสติก

กระบวนการหลอมขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกของเม็ดคอมปาวด์ตัวอย่าง ขนาดแม่พิมพ์ 150×150×1.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding; CHAREON TUT, co., ltd.)

ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการใช้เวลาและความดันในการอัดเข้าแม่พิมพ์มีดังนี้ ขั้นที่ 1 ให้ความร้อนโดยไม่ใช้แรงอัด (pre-heating) เป็นเวลา 4 นาที ขั้นที่ 2 ใช้แรงอัด 15000 ปอนด์ เป็นเวลา 5 นาที ขั้นที่ 3 ใช้แรงอัด 25000 ปอนด์ เป็นเวลา 5 นาที และขั้นที่ 4 ทำการหล่อเย็นเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นลอกแผ่นพลาสติกใส่งูชิปและเก็บรักษาในโถดูดความชื้นก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

2.5 การขึ้นรูปกระถางชีวภาพต้นแบบ

การขึ้นรูปกระถางของพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพ เม็ดคอมพาวด์สูตร 90TPS_{GS}/10WHP/5PLL ด้วยเครื่องอัดรีดแนวตั้ง (ram extruder) (Figure 1 (A)) ให้อุณหภูมิการหลอมที่ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เม็ดคอมพาวด์เกิดการหลอม แล้วใช้แรงดันให้พอลิเมอร์ไหลจากหัวตายเข้าสู่แม่พิมพ์และแข็งตัวในแม่พิมพ์กระถางแบบทรงกรวยเย็น ขนาดแม่พิมพ์ความสูงและความกว้างปากกระถาง 2.5 นิ้ว ขนาดก้นกระถาง 2.0 นิ้ว (Figure 1(B))



Figure 1 The vertical ram extruder machine for the conical plant pots.

(A) vertical ram extruder and (B) conical plant pots mold

2.6 การหาลักษณะเฉพาะของเม็ดพอลิเมอร์คอมพาวด์

2.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของแผ่นพลาสติกตัวอย่าง ขนาด 1×1 ซม.² ด้วยเทคนิคแอสเพนนูโทโทโลฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (ATR-FTIR) ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น spectrum 100

2.6.2 สมบัติทางความร้อน

ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเม็ดคอมพาวด์ ตัวอย่าง ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก แอแนไลซิส (TGA) ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น STA6000 ช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศ แก๊สไนโตรเจน วัดการเปลี่ยนแปลงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของ ตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัว เริ่มต้น (onset of thermal decomposition, $T_{d,onset}$) และอุณหภูมิ การสลายตัวที่สูญเสียน้ำหนักร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (decomposition temperature at 5% weight loss; $T_{d,5\%}$)

2.7 ศึกษาสมบัติแผ่นพลาสติกคอมโพสิต

2.7.1 สมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638 เตรียมชิ้นงานขนาดกว้าง 13 มิลลิเมตร ความยาว 57 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เอนกประสงค์ (LLOYD Instrument, รุ่น LR10K plus) ใช้แรงดึง (load cell) 10 กิโลนิวตัน ความเร็วในการทดสอบ (crosshead speed) 50 มิลลิเมตร/นาที โดยวิเคราะห์ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด (tensile strength; TS) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (elongation at

break; EB) และมอดูลัสของยัง (Young's modulus) ทำการทดสอบ ชิ้นงานตัวอย่างละ 5 ชิ้น

2.7.2 การวัดมุมสัมผัสผิวน้ำ

การวัดมุมสัมผัสน้ำของแผ่นพลาสติก ด้วยเครื่องวัดมุม สัมผัส (contact angle measurement, OCA20) เตรียมตัวอย่าง แผ่นพลาสติก ขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร และทำความสะอาดพื้นผิวตัวอย่างด้วย 95% เอทานอล และนำมาอบให้แห้ง เนื่องจากมุมสัมผัสมีความไวสูงต่อการ ปนเปื้อน จากนั้นนำไมโครปิเปตตูดน้ำกลั่นปริมาตร 1 ไมโครลิตร และหยดน้ำกลั่นลงบนแผ่นพลาสติก วัดมุมสัมผัสด้วยเครื่องวัดมุม สัมผัส มีหน่วยเป็นองศา (°) วัดมุมสัมผัสบนแผ่นพลาสติกจำนวน 3 ตำแหน่ง ตัวอย่างละ 5 ชิ้น ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (Bunkerd *et al.*, 2018) และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยนำมาหาค่าเฉลี่ยของค่ามุม สัมผัส

2.7.3 การดูดซับน้ำ

ทดสอบการดูดซับน้ำ (water absorption; W_A) ของแผ่น พลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D570-98 เพื่อประเมิน ประสิทธิภาพของตัวอย่างในน้ำหรือสภาวะที่มีความชื้นระหว่างการ ใช้งาน โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 20×20 มิลลิเมตร นำแผ่นพลาสติก อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักแผ่น พลาสติกตัวอย่างด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่งแล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าเข้าสู่ สมดุล จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างออกจากน้ำแล้วซับด้วยผ้าสะอาด เพื่อดูดซับเอาน้ำที่ผิวชิ้นงานส่วนเกินออกแล้วชั่งน้ำหนักตาม ระยะเวลาที่กำหนด คือ 6 9 12 และ 24 ชั่วโมงตามวิธีมาตรฐาน และทำการแช่ในน้ำกลั่นจนครบ 72 ชั่วโมงเพื่อติดตามลักษณะทาง

กายภาพของแผ่นพลาสติก โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และคำนวณหาร้อยละการดูดซับน้ำของแผ่นพลาสติกคอมโพสิตชีวภาพ (Tarique *et al.*, 2022) แสดงดังสมการ (1)

$$W_A (\%) = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_0 และ W_i คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่น้ำกลั่นและน้ำหนักหลังแช่น้ำกลั่น ตามลำดับ

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) เวอร์ชัน 29 โดยนำข้อมูลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย ($\pm$ SD) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ตามวิธี Paired-Sample T-Test และ Independent Sample T-Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จากชุดข้อมูลตัวอย่างน้อย 3 ซ้ำ

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

TPS ที่เตรียมด้วยกระบวนการหลอมผสมทุกสูตรมีความเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างเม็ดแป้งมันสำปะหลังและพลาสติกไซเซอร โดยเม็ด TPS ที่พลาสติกไซต์ด้วย Gly GU และ GS ผิวสัมผัสมีลักษณะลื่นไม่เหนอะและไม่เกิดการรวมตัวเป็นก้อน ในขณะที่ TPS พลาสติกไซต์ด้วย GW เกิดการรวมตัวเป็นก้อนและมีผิวสัมผัสค่อนข้างเหนียวเหนอะหนะ เมื่อนำเม็ดคอมพาวด์ TPS ทุกสูตรมาขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกลักษณะทางกายภาพแสดงดัง Figure 2 พบว่าแผ่น TPS_{Gly} และ TPS_{GS} มีลักษณะผิวเรียบ โปร่งแสงเป็นเนื้อเดียวกันและมีความคงรูป สำหรับแผ่น TPS_{GU} นั้นเกิดการหลอมที่ไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวขรุขระ มีลักษณะเป็นสีเหลือง-น้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับ TPS สูตรอื่น เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ของโมเลกุลแป้งที่มียูเรียในขั้นตอนการหลอมขึ้นรูป (Galdeano *et al.*, 2009) ในขณะที่แผ่น TPS_{GW} มีลักษณะผิวเรียบ แต่มีรอยแตกร้าว ส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกลลดลงภายหลังสภาวะการขึ้นรูป เป็นผลเนื่องมาจากโมเลกุลของน้ำที่เป็นสารโมเลกุลเล็กและมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลแป้งอย่างอ่อน ๆ ทำให้เกิดการสูญเสีย (เกิดระเหยกลายเป็นไอน้ำ) ระหว่างกระบวนการหลอมขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิสูง (Lourdin *et al.*, 1997)

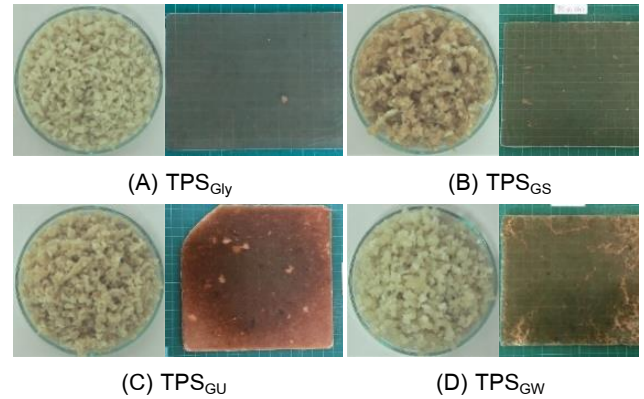


Figure 2 TPS compounds pellet and sheet prepared with different types of plasticizers.

(A) glycerol (Gly), (B) glycerol/sorbitol (GS), (C) glycerol/urea (GU) and (D) glycerol/water distillation (GW)

ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสูญเสียน้ำหนักเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค TGA ของแป้งมันสำปะหลังและเม็ด TPS ทุกสูตร ผล TGA เทอร์โมแกรมแสดงดัง Figure 3 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อนของแป้งมันสำปะหลังเกิดขึ้นสองขั้นตอน โดยขั้นแรกเกิดการสูญเสียโมเลกุลน้ำ (weakly bound water) ที่อยู่ภายในโครงสร้างของแป้ง (Bogacheva *et al.*, 2002) ประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ช่วงอุณหภูมิประมาณ 50-120 องศาเซลเซียส และขั้นที่สองเป็นการสลายตัวของโครงสร้างหลักของแป้งช่วงอุณหภูมิ 275-400 องศาเซลเซียส ประมาณ ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก (Triwises *et al.*, 2016) ในขณะที่ TPS ซึ่งมีองค์ประกอบของพลาสติกไซเซอร์ผสม (GU GS หรือ GW) นั้น มีค่าอุณหภูมิ $T_{d,5\%}$ สูงกว่า TPS_{Gly} แสดงได้ว่าสารพลาสติกไซเซอร์ผสมนั้นสามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่เม็ดคอมพาวด์ TPS (Zhong and Li, 2014; Zahiruddin *et al.*, 2019) เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแป้งกับพลาสติกไซเซอร์ผสมนั้นสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว และยังส่งผลต่อเสถียรภาพทางร้อนของพลาสติกไซเซอร์ผสมใน TPS เมื่อนำไปหลอมขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง มากไปกว่านั้น จากงานวิจัยของ Zhang *et al.* (2008) และ Paluch *et al.* (2022) พบว่าการใช้สารพลาสติกไซเซอร์ผสม GU และ GS ยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางสัณฐานวิทยาให้แก่ TPS โดยไม่เกิดการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (migration) ของพลาสติกไซเซอร์สู่พื้นผิวของแผ่นพลาสติกอีกด้วย

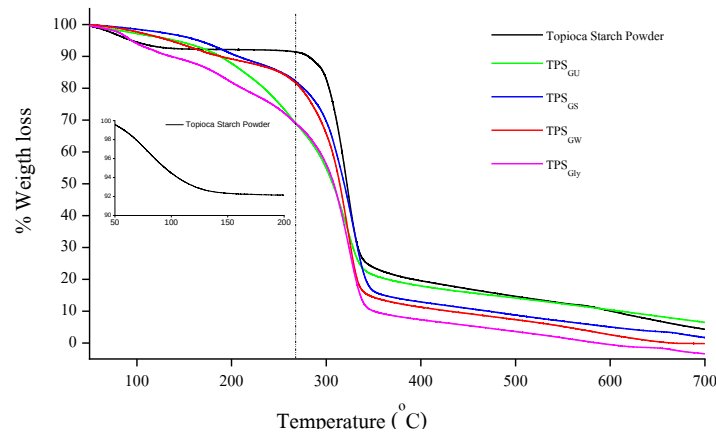


Figure 3 TGA thermograms of tapioca starch powder and the TPS compounds.

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นพลาสติก TPS เมื่อพิจารณาค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด (TS) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (EB) และค่ามอดูลัสของยัง พบว่าแผ่น TPS_{GS} มีค่าเท่ากับ 2.64 ± 0.48 MPa $60.21 \pm 9.71\%$ และ 62.99 ± 4.85 MPa ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ TPS_{Gly} ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.74 ± 0.07 MPa $123.83 \pm 3.76\%$ และ 15.20 ± 3.52 MPa ตามลำดับ แสดงได้ว่าการพลาสติไซต์แบ่งด้วย GS ให้สมบัติเชิงกลแรงดึงที่มีความแข็งแรงและเหนียวกว่า TPS_{Gly} เนื่องจาก GS สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลแป้งที่แข็งแรงกว่าใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว และซอร์บิทอลมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ากลีเซอรอลจึงช่วยไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงทำให้ค่า TS และมอดูลัสของยังสูงกว่า TPS_{Gly} (Ma *et al.*, 2006) ในขณะที่แผ่น TPS_{GU} เกิดการหลอมไม่สม่ำเสมอและแผ่นพลาสติก TPS_{GW} นั้นมีลักษณะที่แข็งและมีรอยร้าวเกิดการแตกหัก ทำให้ไม่สามารถเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดที่ใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง (160°C) ทำให้โมเลกุลของน้ำใน TPS_{GW} นั้นเกิดการระเหยเป็นแก๊สในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป แล้วทำให้แผ่นพลาสติกที่ได้มีความแข็งและเปราะมากขึ้นนั้นอาจเรียกว่า เกิดปรากฏการณ์แอนติ-พลาสติไซเซชัน (anti-plasticization) ได้ (Muller *et al.*, 2016) นอกจากนี้ผลการศึกษามุมสัมผัสผิวน้ำบนพื้นผิวแผ่นพลาสติก TPS ที่เตรียมจากพลาสติไซเซอร์ผสม GS (75°) ให้ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำสูงกว่าพลาสติไซต์ด้วยกลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว (65°) บ่งบอกได้ว่าแผ่น TPS_{GS} มีความชอบน้ำน้อยกว่า TPS_{Gly} หรือกล่าวได้ว่าการพลาสติไซต์แบ่งด้วย GS สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำให้แก่ TPS ได้ดีกว่าการใช้กลีเซอรอลเพียงอย่างเดียว

จากผลการศึกษาการใช้พลาสติไซเซอร์ผสม GS GU และ GW ต่อสมบัติต่าง ๆ ของ TPS ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ พลาสติไซเซอร์ผสม GS ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง TPS_{GS} ร่วมกับ PLL ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถการต้านทานน้ำและช่วยยืดเวลาการย่อยสลายทางชีวภาพให้กับพลาสติกจาก TPS ในลำดับถัดไป

3.2 ผลการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ $TPS_{GS}+PLL$

จากการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ $TPS_{GS}+PLL$ ที่เติม PLL ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr ในสภาวะหลอมผสมที่อุณหภูมิ 160°C องศาเซลเซียส พบว่าทั้งสามสูตร $TPS_{GS}+5PLL$ $TPS_{GS}+10PLL$ และ $TPS_{GS}+15PLL$ (Figure 4 (A)-(C)) สามารถหลอมผสมได้ทั้ง TPS_{GS} และ PLL เนื่องมาจากกลีเซอรอลและซอร์บิทอลสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของ PLL (Muller *et al.*, 2016) เหนียวน่าให้แรงยึดเหนี่ยวพันธะภายในโมเลกุลของ PLL ลดลงส่งผลให้เกิดการหลอมผสมในสภาวะที่ศึกษา ในขณะที่สูตร $TPS_{GU}+5PLL$ นั้น PLL ไม่สามารถเกิดการหลอมผสมเข้ากับ TPS_{GU} ได้ในสภาวะการศึกษาดังกล่าวกับ TPS_{GS} (Figure 4 (D)) และเมื่อนำเม็ดคอมพาวด์ $TPS_{GS}+PLL$ ทั้งสามสูตรไปขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติก (Figure 4) พบว่าที่เติม PLL ปริมาณ 5 และ 10 phr มีการกระจายตัวของ PLL ในเนื้อ TPS_{GS} เมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ (Li and Huneault, 2010) แผ่นพลาสติกมีลักษณะที่บวมใส น้ำตาลอ่อน ผิวสัมผัสเรียบและคงรูป อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของ PLL เพิ่มขึ้นเป็น 15 phr พบว่าแผ่นพลาสติกบางบริเวณเป็นสีน้ำตาลใส คือ PLL ส่วนเกิดการรวมตัวอยู่ด้วยตัวเอง เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคระหว่าง TPS_{GS} กับ PLL เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำที่แตกต่างกันของโมเลกุลแป้ง (hydrophilic; ชอบน้ำ) และ PLL (hydrophobic; ไม่ชอบน้ำ) จากลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรงดึงของแผ่นพลาสติก อีกทั้งยังทำให้อัตราการดูดซับความชื้น (น้ำ) ของแผ่นพลาสติกของ TPS เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ $TPS_{GS}+5PLL$ และ $TPS_{GS}+10PLL$ เมื่อนำ $TPS_{GS}+PLL$ ทั้งสามสูตรไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR เทียบกับ TPS_{GS} แสดงดัง Figure 5 พบว่า $TPS_{GS}+PLL$ ทั้งสามสูตรแสดง FT-IR สเปกตรัมที่ใกล้เคียงกับ TPS_{GS} และยังปรากฏการผันผวนการสั่นแบบยืดของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในโครงสร้างของ PLL ในช่วงเลขคลื่น 1746 cm^{-1} (Chiang *et al.*, 2014) โดยความเข้มของพีคเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PLL ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสูตรคอมพาวด์ แสดงได้ว่ามี PLL เป็นส่วนประกอบที่กระจายตัวในเนื้อ TPS_{GS} เมทริกซ์

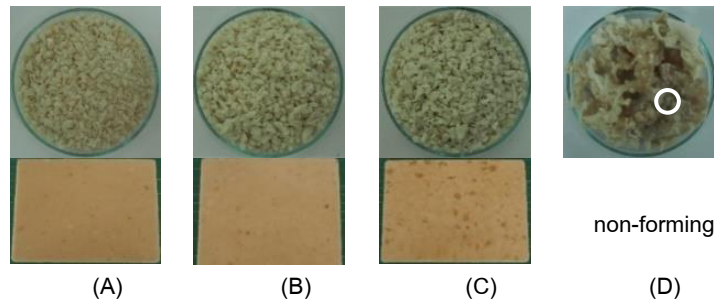


Figure 4 The TPS blend granulates, and sheets prepared with the addition of PLL content.

(A) TPS_{GS}+5PLL, (B) TPS_{GS}+10PLL, (C) TPS_{GS}+15PLL and (D) TPS_{GU}+5PLL

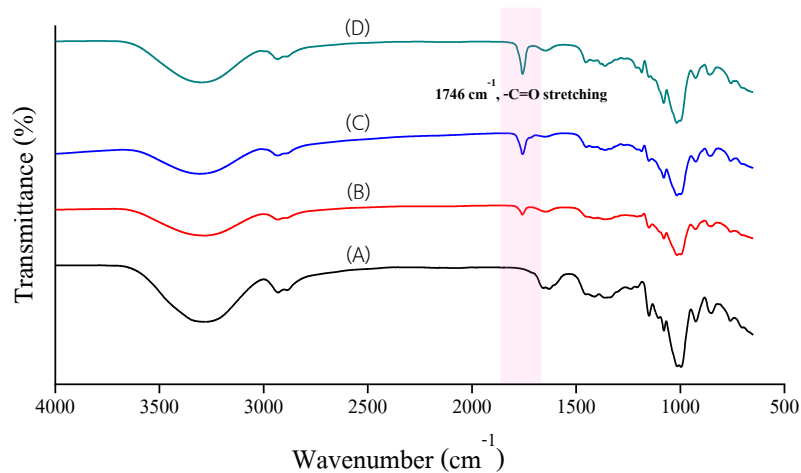


Figure 5 FT-IR spectra of TPS_{GS} and TPS_{GS} blends.

(A) TPS_{GS}, (B) TPS_{GS}+5PLL, (C) TPS_{GS}+10PLL and (D) TPS_{GS}+15PLL

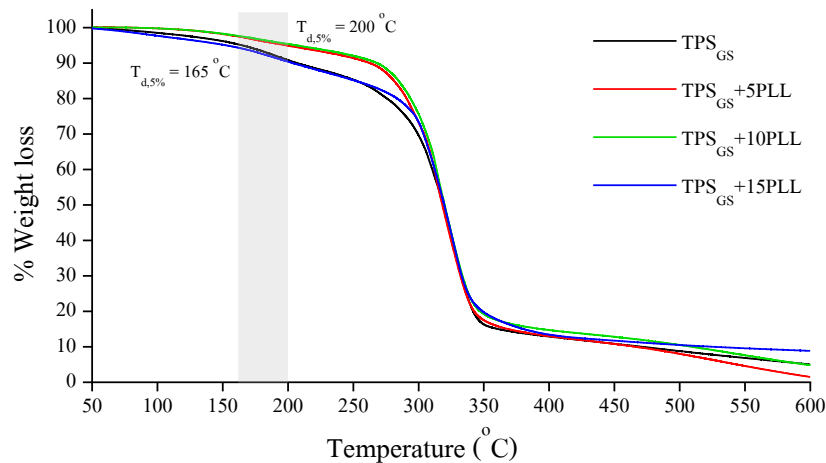
ผลทดสอบสมบัติเชิงกลแรงดึงของแผ่นพลาสติกพอลิเมอร์เบลนด์ TPS_{GS}+PLL ทั้งสามสูตรเทียบกับ TPS_{GS} ใน Table 3 พบว่าการเติม PLL 5 phr ลงใน TPS_{GS} ส่งผลทำให้ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และมอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ TPS_{GS} จากผลการศึกษาแสดงได้ว่าการมี PLL 5 phr เป็นองค์ประกอบใน TPS_{GS} นั้นสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลแรงดึงให้แก่แผ่นพลาสติก TPS ได้ โดยพิจารณาทั้งด้านความแข็งแรงเชิงกลและลักษณะทางกายภาพของแผ่นพลาสติกที่มีการกระจายตัวของ PLL ในเนื้อ TPS_{GS} เมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ PLL (10 และ 15 phr) ในพอลิเมอร์เบลนด์ทำให้ PLL บางส่วนเกิดการรวมตัวกันเองและมีแนวโน้มเกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองจึงส่งผลต่อสมบัติเชิงกลแรงดึง อีกทั้งเมื่อพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA แสดงดัง Figure 6 พบว่า TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนด์ TPS_{GS}+5PLL และ TPS_{GS}+10PLL มีลักษณะคล้ายคลึงกันและมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูญเสียน้ำหนักร้อยละ 5 ($T_{d,5\%}$) สูงกว่าถึง 35 °C เมื่อเทียบกับ

TPS_{GS} และ TPS_{GS}+15PLL จากผลดังกล่าวสามารถบอกโดยอ้อมได้ว่าการเติม PLL ปริมาณ 5 และ 10 phr นั้น มีแรงระหว่างยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล PLL กับ TPS_{GS} (interfacial interaction) ได้ดีทำให้เกิดการกระจายตัวของ PLL ใน TPS เมทริกซ์ได้อย่างสม่ำเสมอ (Li and Huneault, 2010) และยังเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่พอลิเมอร์พื้นฐาน (TPS_{GS}) อีกทั้งแผ่นพลาสติก TPS_{GS}+5PLL ยังมีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ TPS_{GS} 75° เป็น 77° แสดงได้ว่า PLL 5 phr สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำเล็กน้อย อันเนื่องมาจากโครงสร้างของ PLL มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Khumyat, 2015) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ปริมาณของ PLL 15 phr ในพอลิเมอร์ผสม TPS_{GS}+15PLL นั้นให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (71°) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ TPS_{GS} และ TPS_{GS}+5PLL เป็นผลมาจากการรวมตัวกันเองของอนุภาค PLL ที่มีปริมาณมากเกินไปใน TPS เมทริกซ์ ทำให้แผ่น TPS_{GS}+15PLL เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคจึงทำให้สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นพอลิเมอร์เบลนด์ TPS_{GS}+15PLL ต่ำกว่าพอลิเมอร์เติมก่อนนำไปผสม

Table 3 Tensile properties of TPS_{GS} and TPS_{GS}+PLL blend sheets

Plastic sheets	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young' modulus (MPa)
TPS _{GS}	2.46±0.21 ^a	60.21±8.41 ^{a1}	62.95±3.14 ^{a2}
TPS _{GS} +5PLL	3.17±0.25 ^b	86.00±6.92 ^{b1}	107.76±7.69 ^{b2}
TPS _{GS} +10PLL	2.74±0.38 ^a	66.26±9.34 ^{c1}	90.50±14.84 ^{c2}
TPS _{GS} +15PLL	5.61±0.68 ^c	22.37±2.82 ^{d1}	268.63±11.90 ^{d2}

Note: Letters show statistically significant differences ($p < 0.05$) of each sample group using the Paired-Sample T-Test method

**Figure 6** TGA thermograms of TPS_{GS} and TPS_{GS}+PLL compounds.

จากผลการศึกษาปริมาณของ PLL มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์เบลนด์ TPS_{GS}+PLL เพื่อให้มีศักยภาพในการขึ้นรูปเป็นกระถางเพาะชำ โดยพิจารณาทางด้านความเข้ากันได้บางส่วน/การกระจายตัวของ PLL ในเนื้อ TPS_{GS} เมทริกซ์ ที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้านเชิงกลแรงดึง เสถียรทางความร้อน รวมถึงสมบัติการต้านทานน้ำ พบว่าปริมาณของ PLL 5 phr มีความเหมาะสม สำหรับศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง TPS_{GS}+5PLL กับเส้นใยธรรมชาติ คือ ผักตบชวา (WH) และเปลือกถั่วลิสง (P) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้แก่ TPS_{GS}

3.3 ผลการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต TPS_{GS}/WHP/5PLL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่องหลอมผสมภายในสภาวะการหลอมผสมที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยกระบวนการหลอมผสมพบว่าในกระบวนการหลอมผสมมีค่าแรงบิดหรือทอร์ก (torque)

ต่ำสุดของแกนหมุนในการบดผสมอยู่ในช่วง 13-17 Nm อีกทั้งยังพบว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยผสม (WHP) เพิ่มขึ้น ค่าทอร์กต่ำสุดในการหลอมผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนืดขณะหลอม (melt viscosity) ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้น ผลของค่าทอร์กที่สูงขึ้นส่งผลต่อการกระจายตัวของวัฏภาคกระจาย (WHP) ในเนื้อเมทริกซ์ (TPS_{GS}) ไม่สม่ำเสมอ (Suppakarn and Meekum, 2003) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ปริมาณ WHP ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนักสำหรับการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

ผลการหลอมผสมของ TPS_{GS}+5PLL และเส้นใยเสริมแรง (WH และ/หรือ P) สูตรต่าง ๆ (Table 2) พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสามองค์ประกอบสามารถหลอมผสมเข้ากันและสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกได้ มีลักษณะสีน้ำตาลถึงสีน้ำตาลเข้มในทุกสูตร โดยอนุภาคเส้นใยกระจายตัวในเนื้อ TPS เมทริกซ์โดยไม่เกิดการแยกวัฏภาคเมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพด้วยตาเปล่าและภาพถ่ายดิจิทัล แสดงดัง Figure 7

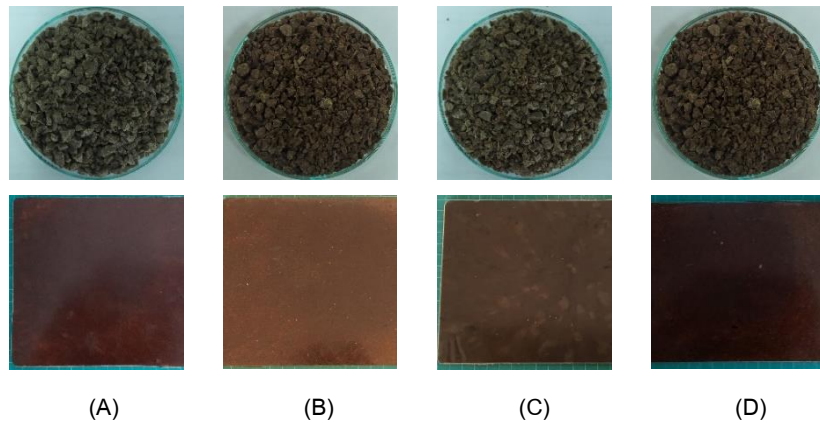


Figure 7 Physical appearance of polymer composites. (A) 90TPS_{GS}/10WH+5PLL, (B) 90TPS_{GS}/10P+5PLL, (C) 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL and (D) 80TPS_{GS}/20WHP+5PLL

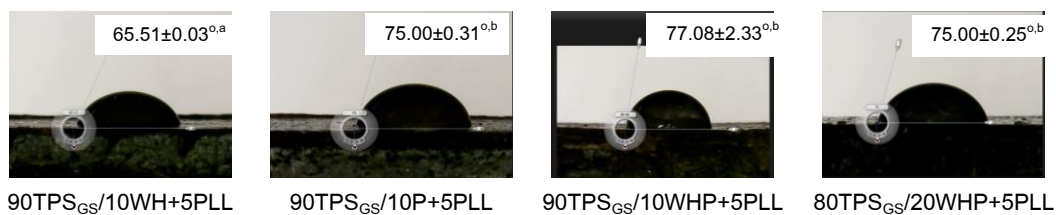


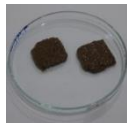
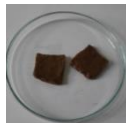
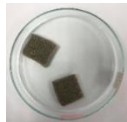
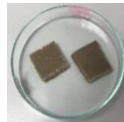
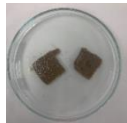
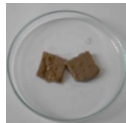
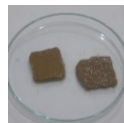
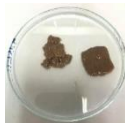
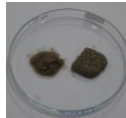
Figure 8 Contact angles of water droplet on natural fiber reinforced TPS_{GS}+5PLL sheets.

Note: Letter show the statistically significant difference ($p < 0.05$) of each sample using the Paired-Sample T-Test method

ผลการทดสอบมุมสัมผัสหยดน้ำของพอลิเมอร์คอมโพสิต ดัง Figure 8 พบว่าแผ่น 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL มีค่ามุมสัมผัสหยดน้ำสูงที่สุด คือ 77° ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับ 90TPS_{GS}/10P+5PLL และ 80TPS_{GS}/20WHP+5PLL (75-77°) อย่างไรก็ตามพบว่าสูตรที่เสริมแรงด้วยผักตบชวาเพียงอย่างเดียว (90TPS_{GS}/10WH+5PLL) นั้นให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสูตรคอมพาวด์ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยผสม (WHP) หรือเปลือกถั่วลิสง (P) เพียงอย่างเดียว จาก 75-77° เป็น 65.5° อันเป็นผลมาจากโครงสร้างภายในของผงลำต้นผักตบชวามีรูพรุนจำนวนมากทำให้สามารถดูดซับน้ำเข้าสู่ภายในได้มากกว่า (Ji *et al.*, 2021) เมื่อเทียบกับใช้เปลือกถั่วลิสงเพียงอย่างเดียว ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับผลการดูดซับน้ำ แสดงภาพถ่ายและร้อยละการดูดซับน้ำใน Table 4 ตามลำดับ พบว่าแผ่นพลาสติกคอมโพสิตมีแนวโน้มการดูดซับน้ำในลักษณะเดียวกันคือในช่วงแรก (0-12 ชั่วโมง) แผ่นพลาสติกมีอัตราการดูดซับน้ำอย่างรวดเร็วและเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง และมีการเปื่อยยุ่ยหรือ

แบ่งบางส่วนเกิดการละลายในน้ำกลั่น (72 ชั่วโมง) เมื่อพิจารณาผลการดูดซับแผ่นพลาสติก 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL และ 90TPS_{GS}/10P+5PLL นั้นมีลักษณะการดูดซับน้ำใกล้เคียงกันและยังมีร้อยละการดูดซับน้ำต่ำกว่า 90TPS_{GS}/10WH+5PLL อย่างเห็นได้ชัด และสังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพด้วยภาพถ่ายพบว่าแผ่นพลาสติก 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL ยังคงมีความคงรูปเป็นแผ่นแต่มีลักษณะอ่อนนุ่มไม่เกิดการฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใย WHP ช่วยเพิ่มความสามารถทางด้านทานน้ำให้แก่แผ่นพลาสติกคอมโพสิตได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นพลาสติกที่เสริมแรงด้วย WH เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามแผ่นพลาสติก 80TPS_{GS}/20WHP+5PLL พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปแทรกบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยผสมและ TPS เมทริกซ์ ส่งผลให้แผ่นพลาสติกเกิดการแตก/ฉีกขาดออกจากกันและในส่วนของ TPS เมทริกซ์เกิดการละลายน้ำได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับสูตรอื่นจนไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลการทดสอบได้

Table 4 Water absorption of natural fiber reinforced TPS_{GS}+5PLL sheets

Plastic sheets	Water absorption (%)					
	Time (hr)	3	6	12	24	72
90TPS _{GS} /10WH+5PLL		63.15±4.50	91.87±5.96	105.03±2.33	103.27±5.89	44.82±6.77
						
90TPS _{GS} /10WHP+5PLL		49.92±4.68	55.44±5.21	68.33±5.34	70.40±2.08	71.98±4.55
						
90TPS _{GS} /10P+5PLL		43.59±4.49	65.52±0.62	69.34±3.39	70.46±2.02	65.66±3.63
						
80TPS _{GS} /20WHP+5PLL		44.45±6.12	40.22±5.77	25.65±4.31	n/d	n/d
						

Note: Average and standard deviation values of three determinations by T-Test method ($p < 0.05$)

Table 5 Mechanical properties of TPS_{GS} polymer composites

Plastic sheet	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
90TPS _{GS} /10WH+5PLL	9.85±0.81 ^a	3.33±0.41 ^{a1}
90TPS _{GS} /10WHP+5PLL	7.94±0.33 ^b	20.39±2.67 ^{b1}
90TPS _{GS} /10P+5PLL	8.14±1.98 ^b	3.41±0.71 ^{a1}
80TPS _{GS} /20WHP+5PLL	7.42±0.41 ^c	12.91±1.87 ^{c1}

เมื่อพิจารณาผลสมบัติเชิงกลค่าทนต่อแรงดึงสูงสุด (TS) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (EB) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สูตรต่าง ๆ แสดงใน Table 5 พบว่าแผ่น 90TPS_{GS}/10WHP/5PLL มีสมบัติเชิงกลแรงดึงโดยรวมดีกว่าสูตรอื่น ๆ คือ มีค่า TS แตกต่างกันเล็กน้อย (ช่วง 7.7-10 MPa) แต่มีร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงที่สุด แสดงได้ว่าแผ่นพลาสติกสูตรคอมพาวด์นี้มีสมบัติเชิงกลแรงดึงดีกว่าสูตรอื่นที่ศึกษา

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมแผ่นพลาสติกคอมโพสิตนั้น พิจารณาทั้งการต้านทานน้ำ ความเสถียรภาพเมื่อสัมผัสน้ำที่มากเกินไปและสมบัติเชิงกลแรงดึงสูตรคอมพาวด์ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปกระถางต้นไม้ คือ 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL เมื่อเทียบกับสูตรคอมพาวด์อื่นที่ศึกษา อย่างไรก็ตามสูตรคอมพาวด์นี้ยังมีข้อจำกัดทางสมบัติการต้านทานน้ำและสมบัติอื่น ๆ ในระยะเวลา

การใช้งานเป็นกระถางต้นไม้ที่ต้องทำการศึกษาและพัฒนาสมบัติในงานวิจัยต่อไป

3.4 ผลการขึ้นรูปกระถางย่อยสลายได้ทางชีวภาพต้นแบบ

จากการพิจารณาสมบัติเชิงกล ความต้านทานน้ำ รวมถึงศักยภาพในกระบวนการหลอมผสมและการขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกพอลิเมอร์คอมโพสิตชีวภาพสูตร 90TPS_{GS}/10WHP+5PLL เหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นกระถางเพาะชำต้นแบบด้วยเครื่อง ram extruder พบว่าลักษณะทางกายภาพของกระถางเพาะชำมีผิวมัน สีน้ำตาลเข้มซึ่งเป็นผลดีต่อรากที่ไม่ต้องการแสงแดดจึงไม่ต้องทำคอมพาวด์สีเพิ่มเติม (Figure 9) (The Petroleum and Petrochemical College, 2010)



Figure 9 Conical plant pots.

4. สรุป

การเตรียม TPS จากแป้งมันสำปะหลังและพลาสติกไซเซอรอลผสมระหว่างกลีเซอรอลกับซอร์บิทอล (อัตราส่วน 2:1) เมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติกมีลักษณะพื้นผิวเรียบไม่เกิดรอยย่นและคงรูปเมื่อเทียบกับ TPS สูตรคอมพาวด์อื่น ๆ ผลการศึกษาสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ให้ค่าทนต่อแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสสูง ให้สมบัติเชิงกลที่แข็งแรงและเหนียวกว่า TPS สูตรคอมพาวด์อื่น รวมถึงยังให้สมบัติต้านทานน้ำและเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าคอมพาวด์อื่น เนื่องจากโครงสร้างของกลีเซอรอลและซอร์บิทอลมีหมู่ไฮดรอกซิล จึงสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลแล้วไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งและเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลแป้งที่แข็งแรงกว่าพลาสติกไซเซอรอลสูตรอื่น และเมื่อนำ TPS_{GS} มาหลอมผสมร่วมกับ PLL ปริมาณ 5 phr สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลแรงดึงและเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่ TPS_{GS} อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถต้านทานน้ำให้ได้เล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ PLL เป็น 10 และ 15 phr พบว่าแนวโน้มความเข้ากันได้ระหว่าง TPS_{GS} และ PLL สังเกตได้จากวัฏภาคของ PLL อยู่รวมกันเป็นกลุ่มแยกจากวัฏภาคของ TPS_{GS} อย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำ $TPS_{GS}+5PLL$ มาผสมแบบคอมโพสิตกับ WHP (อัตราส่วน WH:P คือ 1:1) ที่ปริมาณร้อยละ 10 พบว่าการใช้เส้นใยผสม นั้นให้สมบัติเชิงกลแรงดึงและความสามารถต้านทานน้ำได้ดีกว่าที่เสริมแรงด้วยผักตบชวาหรือเปลือกถั่วลิสงเพียงอย่างเดียวในปริมาณเดียวกัน (ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) และลำดับสุดท้ายนำพอลิเมอร์คอมโพสิต $90TPS_{GS}/10WHP+5PLL$ สูตรคอมพาวด์นี้ ไปขึ้นรูปเป็นกระถางชีวภาพ มีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม ผิวเรียบและมีความมัน โดยการศึกษานี้ได้เม็ดคอมพาวด์ชีวภาพชนิดคอมโพสิตสูตร $90TPS_{GS}/10WHP+5PLL$ ที่สามารถขึ้นรูปเป็นกระถางชีวภาพต้นแบบด้วยเครื่องอัดรีดแนวตั้ง ซึ่งเม็ดคอมพาวด์ชีวภาพนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพทางการค้า ที่สะดวกต่อการนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการขึ้นรูปกระถางรูปทรงต่าง ๆ ตามความต้องการของลูกค้า อย่างไรก็ตามในงานวิจัยลำดับต่อไปพัฒนากระบวนการขึ้นรูปและศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของกระถางเพาะชำ เพื่อให้ได้กระถางเพาะชำต้นแบบที่มีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน งบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ 2562 โดยได้รับการประเมินข้อเสนอจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งสาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และรองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนากร อาจารย์สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในการให้คำแนะนำและเครื่องมือการขึ้นรูปพลาสติก และสาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Bogracheva, T.Y., Wang, Y.L., Wang, T.L. and Hedley, C.L. 2002. Structural studies of starches with different water contents. **Biopolymers** 64: 268-281.
- Buachum, S. and Towatana, P. 2015. The utilization of aquatic weeds and agricultural residues for composting and planting material in Pak Phanang River basin, pp. 546-556. *In The 6th National and International Conference*. Suan Sunandha Rajabhat University, Thailand. (in Thai)
- Bunkerd, R., Molloy, R., Somsunan, R., Punyodom, W., Topham, P.D. and Tighe, B.J. 2018. Synthesis and characterization of chemically-modified cassava starch grafted with poly (2-ethylhexyl acrylate) for blending with poly(lactic acid). **Starch** 70: 1-10.
- Chiang, B.W., Ibrahim, N.A., Yunns, W.M.Z.W. and Hussein, M.Z. 2014. Poly(Lactic Acid)/Poly(Ethylene Glycol) Polymer Nanocomposites: Effects of Graphene Nanoplatelets. **Polymers** 6: 93-104.
- Fekete, E., Kun, D. and Móczó, J. 2018. Thermoplastic starch/wood composites: effect of processing technology, interfacial interactions, and particle characteristics. **Periodica Polytechnica Chemical Engineering** 62(2): 129-136.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2021. **Assessment of Agricultural Plastics and Their Sustainability-A Call for Action**. FAO, Rome, Italy.
- Galdeano, M.C., Grossmann, M.V.E., Mali, S., Bello-Perez, L.A., Garcia, M.A. and Zamudio-Flores, P.B. 2009.

- Effects of production process and plasticizers on stability of films and sheets of oat starch. **Materials Science Engineering C** 29: 492-498.
- Gironès, J., López, J.P., Mutjè, P., Carvalho, A.J.F., Curvelo, A.A.S. and Vilaseca, F. 2012. Natural fiber-reinforced thermoplastic starch composites obtained by melt processing. **Composites Science and Technology** 72: 858-863.
- Grazuleviciene, T., Treinyte, J. and Zaleckas, E. 2012. Film-forming starch composites for agriculture applications. **Journal of Polymers and the Environment** 20: 485-491.
- Gupta, A. and Urahn, N. 2023. Sustainable bio-based planting pots as an approach to reduce plastic waste in the agriculture industry. **International Journal of Agriculture Innovation, Technology and Globalisation** 3(3): 215-244.
- Islam, M.N., Rahman, F., Papri, S.A., Faruk, M.O., Das, A.K., Adhikary, N., Debrot, A.O. and Ahsan, M.N. 2021. Water Hyacinth (*Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solms.) as an alternative raw material for the production of bio-compost and handmade paper. **Journal of Environmental Management** 294: 1-9.
- Ji, M., Li, F., Li, J., Li, J., Zhang, C., Sun, K. and Guo, Z. 2021. Enhanced mechanical properties, water resistance, thermal stability, and biodegradation of the starch-sisal fibre composites with various fillers. **Materials and Design** 198: 1-10.
- Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H. and Yu, L. 2020. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research** 3(1): 8-18.
- Juanga-Labayen, J.P. and Yuan, Q. 2021. Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste Part B: Development and Evaluation of Seedling Pots. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 18: 1-14.
- Khumyat, N. 2015. Increasing Hydrophilicity of poly(lactic acid) by mixing with short chain PLA containing positive charges. Bachelor of Science (Chemistry), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Li, H. and Huneault, M.A. 2010. Comparison of sorbitol and glycerol as plasticizers for thermoplastic starch in TPS/PLA blends. **Journal of Applied Polymer Science** 19: 2439-2448.
- Lourdin, D., Bizot, H. and Colonna, P. 1997. Antiplasticization in starch-glycerol films. **Journal of Applied Polymer Science** 63(8):1047-1053.
- Ma, X.F., Yu, J.G. and Wan, J.J. 2006. Urea and ethanolamine as a mixed plasticizer from thermoplastic starch. **Carbohydrate Polymers** 64: 267-273.
- Muller, P., Bere, J., Fekete, E., Moczo, J., Nagy, B., Kallay, M., Gyarmati, B. and Pukanszky, B. 2016. Interactions, Structure and Properties in PLA/Plasticized Starch Blends. **Polymer** 103: 9-18.
- Obasi, H.C. 2015. Peanut husk filled polyethylene composites: effects of filler content and compatibilizer on properties. **Journal of Polymers** 2015: 1-9.
- Paczkowski, P., Puszla, A. and Gawdzik, B. 2021. Effect of eco-friendly peanut shell powder on the chemical resistance, physical, thermal, and thermomechanical properties of unsaturated polyester resin composites. **Polymers** 13: 1-20.
- Paluch, M., Ostrowska, J., Tyński, P., Sadurski, W. and Konkol, M. 2022. Structural and thermal properties of starch plasticized with glycerol/urea mixture. **Journal of Polymers and the Environment** 30: 728-740.
- Piyang, T., Chaichan, W. and Sagulsawasdipan, K. 2018. Environment-friendly Plant Pot Production from Palm Oil Sludge and Mushroom Cultured Waste. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 10(3): 497-511.
- Qiao, X., Tang, Z. and Sun, K. 2011. Plasticization of Corn Starch by Polyol Mixtures. **Carbohydrate Polymers** 83: 659-664.
- Soontornchai, S., Lertwittuttipaiboon, S. and Tosing, P. 2016. Bioplastics from agricultural crops to health and environment. **Journal of Health Management** 3(1): 24-36. (in Thai)
- Sriroth, K. and Piyachomkwan, K. 2003. **Starch Technology** (3rd ed). Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Suppakarn, N. and Meekum, U. 2003. **Preliminary study for using starch as filler for biodegradable polymer**. Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Tanpaiboonkul, N., Budnumpetch, T., Sukaranadara, K. and Photilangka, P. 2022. Biodegradable pots from water hyacinth using cassava starch and cassava

- pulp as binder. **Huachiew Chalermprakit Science and Technology Journal** 8(1): 56-69.
- Tarique, J., Zainudin, E.S., Sapuan, S.M., Ilyas, R.A. and Khalina, A. 2022. Physical, Mechanical, and Morphological Performances of Arrowroot (Maranta arundinacea) Fiber Reinforced Arrowroot Starch Biopolymer Composites. **Polymers** 14(388): 1-21.
- Theamdee, P. and Rueangrung, J. 2019. The effect of glycerol content on physical and mechanical properties of the biodegradable film from sweet potato flour for plastic plant bag application. **Journal Science and Technology Ubon Ratchathani University** 21: 14-24. (in Thai)
- The Petroleum and Petrochemical College. 2010. **Development of plastic resins and compounds projects; plant bio-pot**. Master Plan. Intellectual Infrastructure. (in Thai)
- Triwises, P., Ruksakulpiwat, Y. and Ruksakulpiwat, C. 2016. The modification of tapioca starch by esterification technique. **Suranaree Journal of Science and Technology** 23(2): 157-165.
- Volpe, V., De, F.G., De, M.I. and Pantani, R. 2018. Use of sunflower seed fried oil as an ecofriendly plasticizer for starch and application of this thermoplastic starch as a filler for PLA. **Industrial Crops & Product** 122: 545-552.
- Zahiruddin, S.M.M., Othman, S.H., Tawakkal, I.S.M.A. and Talib, R.A. 2019. Mechanism and thermal properties of tapioca starch films plasticized with glycerol and sorbitol. **Food Research** 3(2): 157-163.
- Zhang, J.S., Yu, J.G., Wu, Y. and Ma, X.F. 2008. Synthesis of aliphatic amidediol and used as a novel mixed plasticizer for thermoplastic starch. **Chinese Chemical Letters** 19: 395-398.
- Zhong, Y. and Li, Y. 2014. Effects of glycerol and storage relative humidity on the properties of kudzu starch-based edible films. **Starch/Starke** 66: 524-532.