



การเตรียมและการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกวัดคอมพอสิต LDPE สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมและการศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกวัดคอมพอสิต LDPE สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION AND STUDY OF VISCOELASTIC PROPERTIES OF LDPE
COMPOSITE MATERIALS FOR 3D PRINTING



By
MR. Kiattisak SOPHON

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Silpakorn University

Academic Year 2022

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การเตรียมและการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกวัสดุคอมพอสิต
LDPE สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ
โดย นายเกียรติศักดิ์ โสผล
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. ณิชฎากัญจน์ หงส์ศรีพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติ
ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจิระจำเนียร) เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณิชฎา ชัยยุตต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณิชฎากัญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธัญญลักษณ์ ฉายสุวรรณ)

630920003 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ, พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, ไม้คอมพอสิต, สมบัติวิสโคอิลาสติก, ผงไม้สัก

นาย เกียรติศักดิ์ โสผล: การเตรียมและการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกวัสดุคอมพอสิต LDPE สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์

3D Printing เป็นเทคโนโลยีที่ขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างมีความหลากหลาย ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกของชิ้นงาน 3 มิติ โดยการพัฒนาเส้นฟิลาเมนต์จากคอมพอสิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับผงไม้สัก (Teak powder) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย (3-aminopropyl) trimethoxy silane ปริมาณ 0, 3, 6 และ 9 wt% เพื่อศึกษาปริมาณผงไม้สักที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สันฐานวิทยา สมบัติการไหลและการดูดซับน้ำของคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ออกมาเป็นเส้นฟิลาเมนต์ให้เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ โดยมีรูปทรง Semi-spherical, Cylindrical และ Cubic เป็นโมเดลทางวิศวกรรมที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลวิสโคอิลาสติกของชิ้นงาน 3 มิติที่มีรูปทรงโมเดลต่างกัน งานวิจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการเตรียมเส้นฟิลาเมนต์คอมพอสิต LDPE/TP ที่ปริมาณการเติมผงไม้สัก 0, 3, 6 และ 9 wt% จากผลการทดลองพบว่าการเติมผงไม้สักจะเพิ่มการดูดซับน้ำ ความเสถียรทางความร้อนและปริมาณผลึก (X_c) โดยผงไม้สักทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับ LDPE ส่วนค่า Tensile strength และ Elongation จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม TP ปริมาณ 3 wt% แต่เมื่อเติมผงไม้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Tensile strength และ Elongation ลดลง ค่าความเหนียวของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมผงไม้สัก จาก SEM จะพบมีช่องว่างของโพรงอากาศเกิดขึ้นที่กลางเส้นฟิลาเมนต์ ซึ่งส่งผลต่อการดูดซับน้ำ และส่วนที่สองเป็นการเตรียมชิ้นงาน 3 มิติจากคอมพอสิต LDPE/TP พบว่าค่า Hysteresis loss ของทุกชิ้นงานจะลดลงอย่างมากเมื่อให้โหลดในรอบแรกและจะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าคงที่หลังจากให้โหลดที่ 4-5 รอบ ส่วนค่า compressive stress และ compressive modulus เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไม้สักโดยระยะกดที่ strain 4 และ 6% ทำให้เกิดความแตกต่างของค่า compressive stress และจากรูปทรงโมเดลที่ต่างกัน Cubic จะมีความสามารถในการรับโหลดที่มากกว่า Semi-spherical และ Cylindrical ตามลำดับ โดยผลการเติมผงไม้สักไม่ส่งผลต่อการลดลงของ compressive stress ในโมเดล Cubic เนื่องจากเป็นโมเดลที่มีความแข็งแรงมากที่สุดเชิงโครงสร้างทางวิศวกรรม

630920003 : Major POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

Keyword : 3D printing, Low-density polyethylene, wood composites, viscoelastic, Teak powder

MR. Kiattisak SOPHON : Preparation and study of viscoelastic properties of LDPE composite materials for 3D printing Thesis advisor : Associate Professor Nattakarn Hongsriphan, D.Eng.

The 3D-printing technology has been popular due to it can fabricate products with various and complex forms. The objective of this thesis was to study the viscoelastic properties of 3D printed models by developing 3D filaments from low-density polyethylene composites mixed with teak powder treated with (3-aminopropyl) trimethoxy silane in a weight ratio of 100/0, 97/3, 94/6, and 91/9 wt% using a twin-screw extruder to form suitable diameter filaments. The filaments were then 3D-printed with Semi-spherical, Cylindrical, and Cubic shapes for use as engineering models in 3D printing. The research was carried out in 2 phases. For the first phase, LDPE/TP composite filaments were prepared by filling teak wood powder content of 0, 3, 6, and 9 wt%. The results showed that the addition of teak powder resulted in increased water absorption, thermal stability, and crystallinity (X_c). The teak powder acted as a nucleating agent for LDPE crystallization. Tensile strength and elongation increased slightly with TP of 3 wt%, but with increasing wood powder, tensile strength and elongation decreased. The complex viscosity of the composite increased with the amount of teak powder added. From SEM, voids were found in the middle of the filament line which affected water absorption. The second phase was to prepare the 3D parts from LDPE/TP composites. It was found that the hysteresis loss of all parts was greatly reduced when the first cycle was loaded and gradually decreased until it was stable when loading at 4-5 cycles. Compressive stress and compressive modulus increased with the amount of teak powder at the compressive strain at 4 and 6%, resulting in a difference in compressive stress. Among these selected models, the Cubic model had a higher loading capacity than the Semi-spherical and Cylindrical models. The addition of teak powder did not affect the decrease of compressive stress in the Cubic model due to it was the model that had the most structural engineering strength.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งเสียสละเวลาให้คำปรึกษา อบรมสั่งสอน ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย และการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญลักษณ์ ฉายสุวรรณ ที่สละเวลามาเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนให้คำแนะนำในการนำไปปรับใช้และแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผ่านลุล่วงไปได้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อบรมสั่งสอนให้วิชาความรู้และข้อเสนอแนะที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสถานที่ทำงาน อุปกรณ์เครื่องมือทดสอบและเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่คอยให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือและสารเคมีต่าง ๆ แนะนำการใช้เครื่องมือ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโท เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้กันเสมอมาจนถึงเป็นมิตรภาพที่ดีตลอดการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จตามที่วางแผนไว้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา ครูบาอาจารย์ และครอบครัวที่ส่งเสียเลี้ยงดูอบรม สั่งสอน และคอยเป็นกำลังใจที่สำคัญในเรื่องต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านการเรียนและการดำเนินชีวิตได้เป็นอย่างดี ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นาย เกียรติศักดิ์ โสพล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems)	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research).....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study).....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)	5
2.2 สารประสาน (Coupling agent) หรือสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer).....	10
2.2.1 การยึดระหว่างสารประสานและฟิลเลอร์หรือเส้นใย.....	10
2.2.2 การยึดระหว่างสารประสานและพอลิเมอร์.....	11
2.2.3 สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent).....	11
2.4 ผงขี้เลื่อยไม้ (Wood fiber).....	13
2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (Chemical composition of wood).....	13
2.4.2 ข้อดีและข้อเสียของไม้ (Advantages and disadvantages of wood)	14

2.5 การพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)	15
2.5.1 ข้อมูลทั่วไป.....	15
2.5.2 หลักการทำงานของ การพิมพ์ 3 มิติ.....	16
2.5.3 ประเภทของการพิมพ์ 3 มิติ.....	16
2.6 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature).....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	30
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.3 วิธีการดำเนินงาน	31
3.3.1 การเตรียมเส้นฟิลาเมนต์และฟิวชั่นเอกซิกซ์วัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้ สัก (LDPE/TP).....	31
3.3.2 การเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ และฟิวชั่นเอกซิกซ์วัสดุคอมพอสิต LDPE/TP.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	53
4.1 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สักที่ ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (APTMS-Teak powder).....	53
4.1.1 การศึกษาความเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)	55
4.1.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC).....	59
4.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบสมบัติการดึงยืด (Tensile testing).....	62
4.1.4 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุคอมพอสิต.....	64
4.1.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM).....	67
4.1.6 การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption)	71

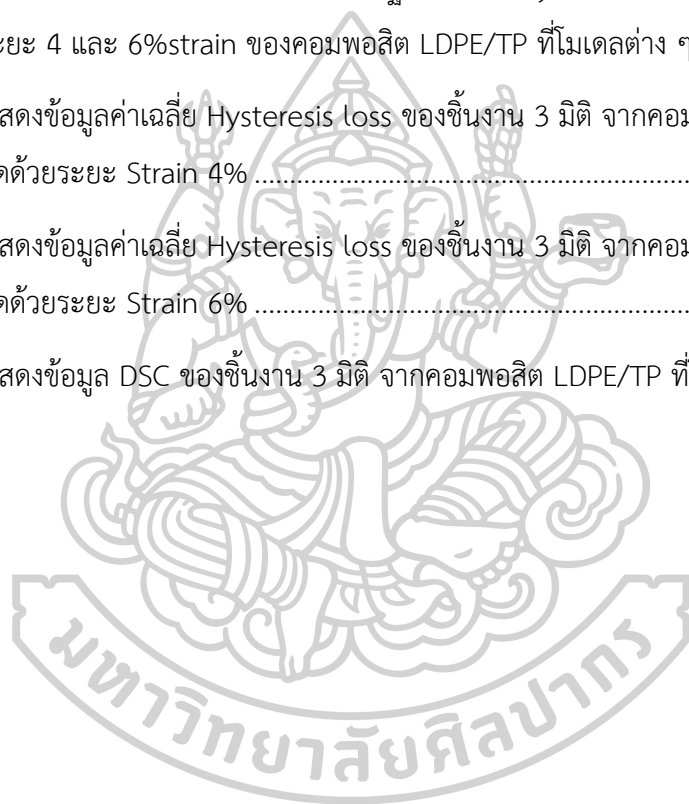
4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอสิต LDPE และผงขี้เลื่อยไม้สัก (LDPE/TP) ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ	72
4.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM).....	75
4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลวิสโคอีลาสติก	81
4.2.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน 3 มิติ.....	92
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	94
5.1 สรุปผลงานวิจัย	94
5.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิต LDPE และผงขี้เลื่อยไม้สัก (LDPE/TP) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (APTMS-Teak powder)	94
5.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ชิ้นงาน 3 มิติจากวัสดุคอมพอสิต LDPE และผงขี้เลื่อยไม้สัก (LDPE/TP) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (APTMS-Teak powder)	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	96
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก ข้อมูลและการทดสอบสมบัติต่าง ๆ.....	98
ภาคผนวก ข แสดงวิธีการคำนวณ.....	131
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย	134
รายการอ้างอิง	143
ประวัติผู้เขียน	149

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างสารคู่ควบไซเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่าง ๆ.....	13
ตารางที่ 2 แสดงประเภทการพิมพ์ 3 มิติ.....	17
ตารางที่ 3 ดัชนีความหนาแน่นและการไหล (MFI) ของโคโตะซานที่รวมอยู่ในเม็ด LDPE และเม็ด LDPE บริสุทธิ์	24
ตารางที่ 4 สมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง PE, PE-b-PS และ PE-b-PEP	25
ตารางที่ 5 อัตราส่วนผสมของ LDPE/TP.....	33
ตารางที่ 6 แสดงขนาดของ Models ต่าง ๆ.....	45
ตารางที่ 7 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing)	49
ตารางที่ 8 แสดงข้อมูลจาก Thermogravimetric analysis ของ Teak powder (TP), APTMS-Teak powder และคอมพอลสิต LDPE/TP	57
ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่เหลือจากการทดสอบ TGA กับน้ำหนักที่เหลือจากการคำนวณ โดยอ้างอิงจากน้ำหนักที่เหลืออยู่ของ APTMS-TP 24.47%.....	58
ตารางที่ 10 แสดงข้อมูล DSC ในขั้นตอนของการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP	60
ตารางที่ 11 แสดงข้อมูล DSC ในขั้นตอนของการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP	61
ตารางที่ 12 แสดงข้อมูลของค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (1 st Derivative) กับความถี่ (Frequency) ของ LDPE และวัสดุคอมพอลสิต LDPE/TP	66
ตารางที่ 13 แสดงค่า Complex viscosity ของพอลิเมอร์ neat LDPE และคอมพอลสิต LDPE/TP ที่ความถี่ 1 rad/s.....	66
ตารางที่ 14 แสดงค่า Water Absorption ของวัสดุคอมพอลสิต LDPE/TP	72
ตารางที่ 15 แสดงตัวอย่างชิ้นงาน 3 มิติ ของวัสดุคอมพอลสิตที่ขึ้นรูปในโมเดลต่าง ๆ.....	73

ตารางที่ 16 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Compressive stress at Yield ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ.....	82
ตารางที่ 17 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Compressive stress ที่ระยะ 4 และ 6%strain ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ.....	83
ตารางที่ 18 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Compressive modulus ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ.....	85
ตารางที่ 19 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Dynamic compressive stress ที่ระยะ 4 และ 6%strain ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ.....	88
ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย Hysteresis loss ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่กัดด้วยระยะ Strain 4%.....	91
ตารางที่ 21 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย Hysteresis loss ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่กัดด้วยระยะ Strain 6%.....	92
ตารางที่ 22 แสดงข้อมูล DSC ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ.....	93



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน	5
ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแบบต่าง ๆ.....	7
ภาพที่ 3 แสดงแผนภาพการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	9
ภาพที่ 4 การพอลิเมอไรเซชันของ LDPE.....	9
ภาพที่ 5 แสดงแบบจำลองการยึดเกาะระหว่างสารควบคู่ไซเลน สารตัวเติม และวัสดุอื่น ๆ.....	12
ภาพที่ 6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารควบคู่ไซเลน	12
ภาพที่ 7 โครงสร้างเซลล์ยูนิตของไม้	14
ภาพที่ 8 กระบวนการพิมพ์ 3 มิติ.....	15
ภาพที่ 9 หลักการทำงานของระบบฉีดเส้นวัสดุ (extrusion deposition).....	18
ภาพที่ 10 หลักการทำงานของระบบเรซิน	19
ภาพที่ 11 หลักการทำงานของระบบผงวัสดุ	19
ภาพที่ 12 หลักการทำงานของระบบอัดลามิเนต	20
ภาพที่ 13 อุณหภูมิหลอมเหลวของตัวอย่าง A-E (A (LDPE), B (ไคโตซาน 10% wt), C ไคโตซาน (20% wt), D (ไคโตซาน 30% wt) และตัวอย่าง E (ไคโตซาน 40% wt)	21
ภาพที่ 14 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของพอลิเมอรั่มผสมต่ออุณหภูมิ	22
ภาพที่ 15 แสดงความแข็งแรงเชิงกลของตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของไคโตซานที่แตกต่างกัน	22
ภาพที่ 16 สันฐานวิทยาของพอลิเมอรั่มผสมกับปริมาณที่แตกต่างกันของไคโตซาน	23
ภาพที่ 17 กราฟ Stress-strain ของการทดสอบ cyclic tests ของพอลิโพรพิลีน (16 รอบ).....	26
ภาพที่ 18 อัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุคอมพอสิต CHF/polyester.....	27
ภาพที่ 19 การบวมตัวของคอมพอสิต CHF/polyester ที่แตกต่างกัน.....	27
ภาพที่ 20 Relative absolute complex viscosity ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนของ filler และ compatibilizer ที่ความถี่เชิงมุม 0.05 rad/s	28

ภาพที่ 21 Storage modulus G' ที่เป็นฟังก์ชันของ ω_1 ที่ $T_{ref} = 150$ °C ของ LDPE บริสุทธิ์ และคอมพอสิตที่เติมเซลลูโลส 10 และ 45 wt% โดย (a) modified amylose (mA) และ (b) modified starch (mS).....	29
ภาพที่ 22 แสดงผงซีลี้อยไม้สักที่พรมให้เปียกด้วยสารละลายไซเลน	32
ภาพที่ 23 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder)	33
ภาพที่ 24 แสดงเครื่อง Labtech compression.....	34
ภาพที่ 25 แสดงขั้นตอนการเตรียมเส้นฟิลาเมนต์และพีสจันเอกลักษณะของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP	35
ภาพที่ 26 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA)	36
ภาพที่ 27 เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC)	37
ภาพที่ 28 เครื่อง Instron Universal Testing Machine (UTM)	38
ภาพที่ 29 เครื่อง Rotational Rheometer.....	39
ภาพที่ 30 เครื่อง Sputtering	40
ภาพที่ 31 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	40
ภาพที่ 32 แสดงแผนผังการเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติและพีสจันเอกลักษณะวัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/TP).....	42
ภาพที่ 33 แสดงรูปร่างและขนาดของแบบจำลองโมเดลที่ 1 Semi-spherical (ในหน่วยมิลลิเมตร) 43	
ภาพที่ 34 แสดงรูปร่างและขนาดของแบบจำลองโมเดลที่ 2 Cylindrical (ในหน่วยมิลลิเมตร)	44
ภาพที่ 35 แสดงรูปร่างและขนาดของแบบจำลองโมเดลที่ 3 Cubic (ในหน่วยมิลลิเมตร)	45
ภาพที่ 36 แสดงโมเดลที่ 1 Semi-spherical ที่แปลงเป็นไฟล์นามสกุล GCODE (ในหน่วยมิลลิเมตร)	46
ภาพที่ 37 แสดงโมเดลที่ 2 Cylindrical ที่แปลงเป็นไฟล์นามสกุล GCODE (ในหน่วยมิลลิเมตร)	47
ภาพที่ 38 แสดงโมเดลที่ 3 Cubic ที่แปลงเป็นไฟล์นามสกุล GCODE (ในหน่วยมิลลิเมตร).....	48

ภาพที่ 39 แสดงโมเดล 3 มิติ ที่เขียนจากโปรแกรม (ซ่าย) และชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP (ขวา) ; (A) โมเดลที่ 1 Semi-spherical, (B) โมเดลที่ 2 Cylindrical และ (C) โมเดลที่ 3 Cubic.....	50
ภาพที่ 40 เครื่อง Shimadzu Universal Testing Machine	52
ภาพที่ 41 แสดงลักษณะผิวของเส้นฟิลาเมนต์ (A) neat LDPE, (B) LDPE/TP3, (C) LDPE/TP6 และ (D) LDPE/TP9.....	54
ภาพที่ 42 แสดงตัวอย่างเส้นฟิลาเมนต์ของ (A) neat LDPE, (B) LDPE/TP3, (C) LDPE/TP6 และ (D) LDPE/TP9.....	54
ภาพที่ 43 แสดง TGA Thermogram ของ neat-LDPE และ LDPE/TP ที่เติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt%.....	56
ภาพที่ 44 แสดง TGA Thermogram ของ neat-LDPE และ LDPE/TP ที่เติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt% แสดงให้เห็นการลดลงของน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส	56
ภาพที่ 45 แสดง TGA Thermogram ของ Teak powder (TP) และ APTMS-TP	57
ภาพที่ 46 กราฟแท่งเปรียบเทียบ (A) อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และ (B) ปริมาณผลึก (X_c) ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1	60
ภาพที่ 47 กราฟแท่งเปรียบเทียบ (A) อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m). และ (B) ปริมาณผลึก (X_c) ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2	61
ภาพที่ 48 แสดงค่า Tensile strength และค่า Elongation ของเส้นฟิลาเมนต์พอลิเมอร์ LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP	63
ภาพที่ 49 แสดงค่า Modulus ของเส้นฟิลาเมนต์พอลิเมอร์ LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP.....	63
ภาพที่ 50 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) และค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (1 st Derivative) ของพอลิเมอร์ LDPE และวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	65
ภาพที่ 51 แสดงภาพ SEM แบบตัดขวางของเส้นฟิลาเมนต์ neat-LDPE ที่หักในไนโตรเจนเหลว....	68
ภาพที่ 52 แสดงภาพ SEM แบบตัดขวางของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP ที่หักในไนโตรเจนเหลวที่ กำลังขยาย 100 เท่า (A-C) และที่กำลังขยาย 1000 เท่า (D-F).....	68

ภาพที่ 53 แสดงภาพ SEM แบบตัดขวางของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงที่กำลังขยาย 100 เท่า (A-C) และที่กำลังขยาย 1000 เท่า (D-F).....	69
ภาพที่ 54 แสดงภาพ SEM ที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์ของ neat-LDPE ที่กำลังขยาย 80 เท่า...	69
ภาพที่ 55 แสดงภาพ SEM ที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP ที่กำลังขยาย 80 เท่า (A-C) และที่กำลังขยาย 3000 เท่า (D-F).....	70
ภาพที่ 56 แสดง Water Absorption ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP	71
ภาพที่ 57 ชิ้นงาน 3 มิติ โมเดล Semi-spherical ที่ผ่านการกด (static compression test).....	74
ภาพที่ 58 ชิ้นงาน 3 มิติ โมเดล Cylindrical ที่ผ่านการกด (static compression test)	74
ภาพที่ 59 ชิ้นงาน 3 มิติ โมเดล Cubic ที่ผ่านการกด (static compression test).....	75
ภาพที่ 60 ภาพ SEM แบบตัดขวางของชิ้นงาน 3 มิติ โมเดลที่ 1 Semi-spherical.....	76
ภาพที่ 61 ภาพ SEM แบบตัดขวางของชิ้นงาน 3 มิติ โมเดลที่ 2 Cylindrical	76
ภาพที่ 62 ภาพ SEM แบบตัดขวางของชิ้นงาน 3 มิติ โมเดลที่ 3 Cubic	77
ภาพที่ 63 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังจากทดสอบ static cimpresion test โมเดลที่ 1 Semi-spherical จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 (A-B), LDPE/TP6 (C-D) และ LDPE/TP9 (E-F) ที่กำลังขยาย 50 และ 150 เท่า.....	78
ภาพที่ 64 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังจากทดสอบ static cimpresion test โมเดลที่ 2 Cylindrical จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 (A-B), LDPE/TP6 (C-D) และ LDPE/TP9 (E-F) ที่กำลังขยาย 50 และ 150 เท่า.....	79
ภาพที่ 65 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังจากทดสอบ static cimpresion test โมเดลที่ 3 Cubic จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 (A-B), LDPE/TP6 (C-D) และ LDPE/TP9 (E-F) ที่กำลังขยาย 50 และ 150 เท่า.....	80
ภาพที่ 66 ค่า Compressive stress at Yield ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ.....	82
ภาพที่ 67 ค่า Compressive stress at Yield ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ.....	83
ภาพที่ 68 ค่า Compressive modulus ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ.....	84

ภาพที่ 69 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 4 % (A) โมเดล Semi-spherical, (B) โมเดล Cylindrical และ (C) โมเดล Cubic.....	86
ภาพที่ 70 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 6 % (A) โมเดล Semi-spherical, (B) โมเดล Cylindrical และ (C) โมเดล Cubic.....	87
ภาพที่ 71 ค่า Dynamic compressive stress at 1 st cycle ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ	88
ภาพที่ 72 แสดงค่า Hysteresis loss ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่กดด้วยระยะ Strain 4% (A) โมเดล Semi-spherical, (B) โมเดล Cylindrical และ (C) โมเดล Cubic	90
ภาพที่ 73 แสดงค่า Hysteresis loss ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่กดด้วยระยะ Strain 6% (A) โมเดล Semi-spherical, (B) โมเดล Cylindrical และ (C) โมเดล Cubic	91
ภาพ ก.1 TGA Thermogram ของผงขี้เลื่อยไม้สัก (TP).....	99
ภาพ ก.2 TGA Thermogram ของผงขี้เลื่อยไม้สักที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน (APTMS-TP).....	99
ภาพ ก.3 TGA Thermogram ของ neat-LDPE.....	100
ภาพ ก.4 TGA Thermogram ของ LDPE/TP3.....	100
ภาพ ก.5 TGA Thermogram ของ LDPE/TP6.....	101
ภาพ ก.6 TGA Thermogram ของ LDPE/TP9.....	101
ภาพ ก.7 DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE	102
ภาพ ก.8 DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP3	102
ภาพ ก.9 DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP6	103
ภาพ ก.10 DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP9	103
ภาพ ก.11 กราฟ stress-strain ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE	104

ภาพ ก.12 กราฟ stress-strain ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP3	104
ภาพ ก.13 กราฟ stress-strain ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP6	105
ภาพ ก.14 กราฟ stress-strain ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP9	105
ภาพ ก.15 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	110
ภาพ ก.16 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	110
ภาพ ก.17 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP6 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	111
ภาพ ก.18 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP9 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	111
ภาพ ก.19 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดลที่ 1 Semi-spherical.....	115
ภาพ ก.20 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดลที่ 1 Semi-spherical.....	115
ภาพ ก.21 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดลที่ 1 Semi-spherical.....	116
ภาพ ก.22 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดลที่ 2 Cylindrical.....	116
ภาพ ก.23 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดลที่ 2 Cylindrical	117
ภาพ ก.24 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดลที่ 2 Cylindrical	117
ภาพ ก.25 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดลที่ 3 Cubic	118
ภาพ ก.26 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดลที่ 3 Cubic	118

ภาพ ก.27 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดลที่ 3 Cubic	119
ภาพ ก.28 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 6 % โมเดล Semi-spherical.....	125
ภาพ ก.29 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 6 % โมเดล Cylindrical	125
ภาพ ก.30 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 6 % โมเดล Cubic.....	125
ภาพ ก.31 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดล Semi-spherical	126
ภาพ ก.32 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดล Semi-spherical	126
ภาพ ก.33 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดล Semi-spherical	127
ภาพ ก.34 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดล Cylindrical.....	127
ภาพ ก.35 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดล Cylindrical.....	128
ภาพ ก.36 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดล Cylindrical.....	128
ภาพ ก.37 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดล Cubic.....	129
ภาพ ก.38 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดล Cubic.....	129
ภาพ ก.39 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดล Cubic.....	130

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems)

วัสดุพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นเครื่องใช้ต่าง ๆ ในบ้าน เช่น เสื้อผ้า ของเล่น วัสดุก่อสร้าง อุปกรณ์กีฬา ถุงพลาสติกชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมากมาย เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความหลากหลายชนิด ต่างก็มีสมบัติหรือเอกลักษณ์พิเศษหลากหลายประการ จึงมีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป เมื่อมีการใช้ประโยชน์จากพลาสติกจำนวนมากขึ้น จึงก่อให้เกิดปัญหาปริมาณขยะที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นสาเหตุของการเกิดภาวะเรือนกระจกในปัจจุบันที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและอุณหภูมิของโลก เกิดภัยธรรมชาติที่ทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ทำให้ภาคอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ที่ตระหนักถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นได้ให้ความสำคัญในการร่วมมือกันและหาวิธีการแก้ไขไม่ว่าจะเป็นการสร้างนโยบายต่าง ๆ การผลิตวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อ การเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะ ในอุตสาหกรรมพลาสติกจึงได้หันมาให้ความสำคัญต่อการลดปริมาณการใช้วัสดุพอลิเมอร์ เช่น การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตที่มีการนำพอลิเมอร์มาผสมเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น [1]

ปัจจุบันเป็นยุคช้อปปิ้งทางออนไลน์ ซึ่งทุกคนสามารถช้อปปิ้งได้ทุกเพศทุกวัย เนื่องจากมีความสะดวกสบาย ราคาถูกกว่า ซึ่งเป็นการสร้างความสุขให้กับผู้ซื้อ แต่จากความสุขที่ได้มานั้นได้กลายเป็นภาระให้กับสิ่งแวดล้อม เพราะเมื่อตลาดการซื้อขายออนไลน์เติบโตมากขึ้น สิ่งที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือ ขยะจากแพ็คเกจจิ้ง (Garbage from packaging) หรือหีบห่อพัสดุที่ใช้แล้ว จึงเกิดขยะจำนวนมากจากการซื้อสินค้าออนไลน์เหล่านี้ โดยเฉพาะขยะจากวัสดุสำหรับรับแรงกระแทกที่ใช้ในการป้องกันความเสียหายจากสินค้าเมื่อซื้อสินค้าจำพวกอิเล็กทรอนิกส์หรือสินค้าที่แตกหักได้ง่ายอื่น ๆ จะเห็นว่าวัสดุเหล่านี้ล้วนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ยาก และใช้เวลานานหลายปีในการย่อยสลาย ดังนั้นจึงก่อให้เกิดปัญหาเรื่องขยะตามมา [2]

วัสดุพลาสติกชนิด LDPE ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการโดยเฉพาะสมบัติที่มีความหนาแน่นต่ำจึงมีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง และทนทาน เหมาะสำหรับการใช้งานด้านต่าง ๆ นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่ถูกนำมาผลิตเป็นภาชนะและของใช้แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง เนื่องจากมีราคาถูก จึงทำให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจนก่อให้เกิดมลภาวะอันเนื่องมาจากขยะพลาสติกไม่ย่อยสลายหรือย่อยสลายได้ยาก โดย LDPE เป็นวัสดุที่ได้รับการยอมรับในการนำมาผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้งหรือรีไซเคิล พลาสติก

ประเภทนี้สามารถขึ้นรูปโดยการเป่าพลาสติกเหลวหนืดให้พองตัวในอากาศและรีดให้ออกมาเป็นถุงพลาสติกหรือเป็นแผ่นพลาสติกบาง (ฟิล์ม) สามารถฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานและกระบวนการอื่น ๆ เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ สามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อใช้เสร็จแล้วสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้โดยการบดและหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีก [3]

ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติ มีความแข็ง ได้จากแก่นลำต้นของต้นไม้ ซึ่งไม้สามารถแบ่งออกเป็นไม้เนื้อแข็ง เช่น ไม้เต็ง ไม้แดง และไม้เนื้ออ่อน เช่น ไม้สัก ไม้ยาพารา โดยไม้สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ประโยชน์อย่างหนึ่งคือ ใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหรือฟืน บางครั้งก็ใช้ในงานศิลปะ ทำเฟอร์นิเจอร์ ทำอาวุธ หรือเป็นวัสดุก่อสร้าง ไม้ยังคงเป็นส่วนประกอบสำคัญในการก่อสร้าง ตั้งแต่มนุษย์เริ่มสามารถสร้างบ้านที่อยู่อาศัย หรือเรือ โดยเรือแทบทุกลำในช่วงปี 80 ทำมาจากไม้แทบทั้งสิ้น ซึ่งในปัจจุบันบ้านหรือเรือที่ทำจากไม้ เริ่มมีจำนวนลดลง โดยปัจจุบันมีการนำวัสดุอื่นมาใช้ในการสร้างแทน แต่ไม้ยังคงมีส่วนสำคัญในด้านการเสริมโครงสร้าง หรือเป็นวัสดุเสริม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสร้างหลังคา และของประดับนอกบ้าน ไม้ที่ใช้ในงานก่อสร้างรู้จักกันในชื่อ ไม้แปรรูป เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากเศษไม้มากที่สุด ในทางพอลิเมอร์จึงได้มีการนำเอาผงไม้มามาเป็นสารเติมแต่งเพื่อเสริมแรง เพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับวัสดุ และเป็นการเพิ่มความสามารถในการสลายตัวให้กับวัสดุคอมพอสิตอีกด้วย [4, 5]

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นนวัตกรรมคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ ที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานจำลอง 3 มิติ ที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะทำการฉีดหรือหลอมเหลวออกมาทีละชั้น ๆ เมื่อแข็งตัวจะได้ออกมาเป็นรูปชิ้นงานที่มีขนาดตามที่ต้องการ โดยมีจุดเด่นตรงที่ความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความละเอียดสูง มีพื้นผิวของชิ้นงานที่เรียบร้อย สามารถใช้เป็นชิ้นงานต้นแบบเพื่อใช้ในการทดลองใช้ได้ทันทีหลังจากการขึ้นรูป ซึ่งในการจะขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิตินั้น จะต้องมีการออกแบบชิ้นงาน 3 มิติ ในรูปแบบดิจิทัล 3 มิติก่อน ด้วยโปรแกรม CAD ที่เป็นต้นแบบและผ่านการควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ จะเห็นว่าในปัจจุบันเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการนำไปใช้งานประยุกต์ใช้ได้หลากหลายด้านมาก ไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ ด้านไฟฟ้า ด้านอุตสาหกรรมของเล่น เป็นต้น [6, 7]

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการเตรียมวัสดุคอมพอสิตระหว่าง LDPE และผงขี้เลื่อยไม้สัก ซึ่งผงขี้เลื่อยเป็นของเสียในการผลิตเฟอร์นิเจอร์ที่สามารถนำมาผสมเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต โดยทำการขึ้นรูปเป็นเส้นฟิลาเมนต์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ผสมพอลิเมอร์และสารเติมแต่งและได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปต่อไปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ

อย่างไรก็ตาม การผสมกันระหว่างพอลิเมอร์กับตัวเติม (Filler) นอกจากจะเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกล หรือเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ ยังสามารถพบข้อด้อยซึ่งก็คือ ความเข้ากันได้และการ

กระจายตัวที่สม่ำเสมอระหว่างวัสดุทั้งสอง เนื่องจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ (พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ, LDPE) มีความไม่ชอบน้ำหรือมีความเป็นขี้ดต่ำ ส่วนผงซีลีอ์ไมล์กมีความชอบน้ำสูงหรือมีความเป็นขี้ดสูง เมื่อผสมวัสดุทั้งสองเข้าด้วยกันจึงมีโอกาที่จะส่งผลต่อความเข้ากันและกระจายตัวของอนุภาคได้ต่ำ ดังนั้นเพื่อความเข้ากันและการกระจายตัวที่ดีของผงซีลีอ์ไมล์กในวัสดุคอมพอสิต จึงปรับปรุงผิวของผงซีลีอ์ไมล์กด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxy-silane (APTMS) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Compatibilizer) ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และผงซีลีอ์ไมล์ก [3]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสมบัติวิโคอิสติกของวัสดุคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการเตรียมเส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับผงซีลีอ์ไมล์กที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย (3-Aminopropyl) trimethoxy-silane (APTMS) ในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงซีลีอ์ไมล์กที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติการไหลและสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิตระหว่าง LDPE กับผงซีลีอ์ไมล์ก จากนั้นทำการเตรียมชิ้นงาน 3 มิติจากวัสดุคอมพอสิตเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลวิโคอิสติก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research)

งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาเส้นฟิลาเมนต์จากคอมพอสิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมผงซีลีอ์ไมล์กสำหรับนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) เป็นบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถรับโหลดจากการสั่นสะเทือนหรือรองรับแรงกระแทกได้ เหมาะสำหรับใช้ในการขนส่งสินค้าหรือผลิตภัณฑ์อื่น เป็นต้น ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลดี ไม่เสียรูปทรงง่าย มีความยืดหยุ่น มีความสามารถในการรับโหลดจากการสั่นสะเทือนได้และเป็นวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง โดยการนำพลาสติกประเภทกลุ่มโอเลฟิน (olefins) มาผสมกับผงซีลีอ์ไมล์กซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่สัดส่วนการผสมแตกต่างกัน โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ได้แก่

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการเติมปริมาณผงซีลีอ์ไมล์กที่ปรับปรุงพื้นผิวต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติการไหลและสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิตระหว่าง LDPE กับผงซีลีอ์ไมล์ก

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลวิโคอิสติกและสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE กับผงซีลีอ์ไมล์ก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study)

1.3.1 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density Polyethylene, LDPE) เกรด LD2420K จากบริษัท PTT Global Chemical จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย

1.3.2 สารเชื่อมประสาน (Compatibilizer) ที่ใช้ในงานวิจัยคือ (3-Aminopropyl) trimethoxy-silane (APTMS) ความบริสุทธิ์ 97% จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

1.3.3 ผงขี้เลื่อยไม้สัก (Teak powder) ชื้อจากกลุ่มร้านค้าชุมชนป่าสักแม่จิวะ จังหวัดแพร่ ประเทศไทย โดยผงขี้เลื่อยไม้สักมีขนาดอนุภาคประมาณ 200-400 mesh size

1.3.4 การเตรียมเส้นฟิลาเมนต์จากคอมพอสิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เสริมแรงจากผงขี้เลื่อยไม้สัก จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) โดยจะมีการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นฟิลาเมนต์ที่ 1.5-1.7 มิลลิเมตร

1.3.5 แบบจำลองโมเดลชิ้นงาน 3 มิติ ที่ใช้ในงานวิจัยสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการพิมพ์ 3 มิติ คือ รูปทรงกลม ทรงกระบอก และลูกบาศก์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถพัฒนาเส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับผงขี้เลื่อยไม้สักที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นฟิลาเมนต์สม่ำเสมอเพื่อนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติได้

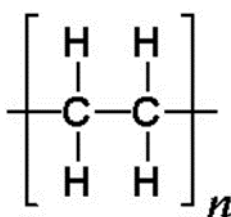
1.4.2 สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีในด้านการรับโหลดจากการสั่นสะเทือน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)

พอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ Polythene) ถูกค้นพบในปี 1933 โดย Reginald Gibson and Eric Fawcett แห่งบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ในประเทศอังกฤษ [8] มีสูตรโครงสร้างโมเลกุล คือ $(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n$ ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนจะมีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจะรู้สึกลื่น มีความยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ใสสีผสมได้ง่าย มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายแก๊สเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือผิวจะแตกรานได้ง่ายขึ้น นิยมนำมาผลิตเป็นสินค้า ภาชนะต่าง ๆ เครื่องเล่นของเด็ก ถุงยาง ภาชนะทำน้ำแข็ง ชิ้นส่วนแบตเตอรี่ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ฉนวนไฟฟ้า ถุงใส่ของ แผ่นฟิล์มสำหรับห่อของโตะ แก้วอู๋ เป็นต้น พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะใสจนถึงสีขาวแสงผ่านได้ ถ้าเป็นฟิล์มบาง ๆ จะใส แต่ถ้าหนาจะขุ่นขาว คล้ายขี้ผึ้ง และสามารถทำให้เป็นสีต่าง ๆ ได้ [9] ซึ่งสามารถแบ่งประเภทตามความหนาแน่นได้ 3 ประเภท คือ ความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) และความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยพอลิเอทิลีนทั้ง 3 นี้มีการผลิต การขึ้นรูป และการใช้งานที่มีความหลากหลายแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานกับภาครีวเรอหรือภาคอุตสาหกรรม



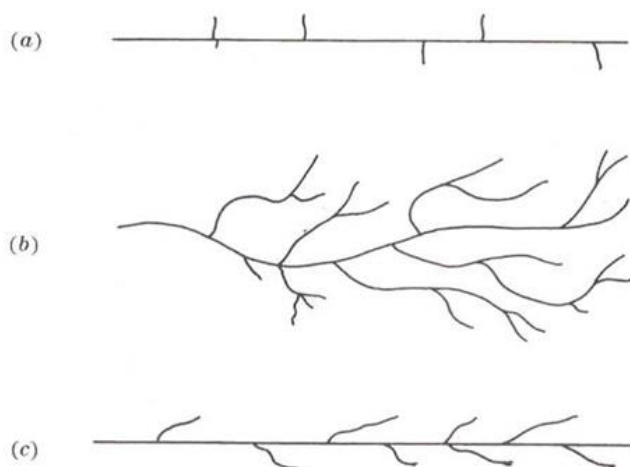
ภาพที่ 1 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [8]

ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนที่แตกต่างกัน 3 ระดับ นอกจากมีการใช้งานที่แตกต่างกัน ยังมีสมบัติอื่น ๆ ที่แตกต่างกันอีกด้วยดังนี้

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นเม็ดพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำ เบบาง จนสามารถที่จะขึ้นรูปออกมาเป็นแผ่นที่มีความบางได้แล้วใช้งานง่าย ฉีกขาดได้ แต่ก็มีคุณสมบัติทนทานและแข็งแรงในระดับหนึ่ง ความโดดเด่นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำคือมีความสามารถทนต่อสารเคมีได้ดี มีความยืดหยุ่นในเนื้อพลาสติกสูงจนสามารถที่จะป้องกันการขาดหรือถูกที่มทะเลได้ ทั้งที่มีความบางแต่ก็แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงได้ดี ที่สำคัญคือราคาของ LDPE ไม่สูงมากจนเกินไป มักจะนิยมนำมาผลิตเป็นฟิล์มยืด ฟิล์มหัด ขวดน้ำ ฝาขวดน้ำ และของเล่นรูปแบบต่าง ๆ ช่วงความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะอยู่ที่ช่วงประมาณ 0.91-0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความแข็งแรงและความหนาแน่นมากกว่า LDPE สมบัติในการใช้งานก็มักจะเน้นไปที่ความแข็งแรงเป็นหลัก เพราะมีความหนาแน่นของโมเลกุลที่สูงกว่า ทนต่อการฉีกขาดได้ยากขึ้นกว่าเดิม 2 เท่า ทนทานต่อสารทำลายและความร้อนได้ดี จึงนิยมนำมาทำเป็นท่อแก๊ส ท่อน้ำ แก้วพลาสติก และฟิล์มบรรจุภัณฑ์ทั่วไป โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.93-0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง จึงมีความแข็งแรงและทนทานมากกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นปานกลาง เพราะมีโมเลกุลภายในที่ยึดเกาะตัวกันและเชื่อมโยงกันอยู่อย่างหนาแน่น จึงมีความโปร่งแสงที่น้อยกว่าหรือมีเนื้อพลาสติกที่มีความทึบแสง ทนทานต่อสารละลายต่าง ๆ จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำคัญ เช่น ถังน้ำมันรถ ท่อส่งสารเคมี ท่อส่งแก๊สธรรมชาติ หีบห่อที่มีความแข็งแรงสูง โตะหรือเก้าอี้พลาสติกที่ใช้ภายในครัวเรือน ขวดบรรจุสารเคมี งานหรือขามชนิดที่สามารถทนต่อความร้อนได้ดี เป็นต้น โดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.95-0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [10]



ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทิลีนแบบต่าง ๆ [9]

- (a) แบบความหนาแน่นสูง (high-density)
- (b) แบบความหนาแน่นต่ำ (low-density)
- (c) แบบโครงสร้างเป็นเส้นตรงความหนาแน่นต่ำ (linear-low-density)

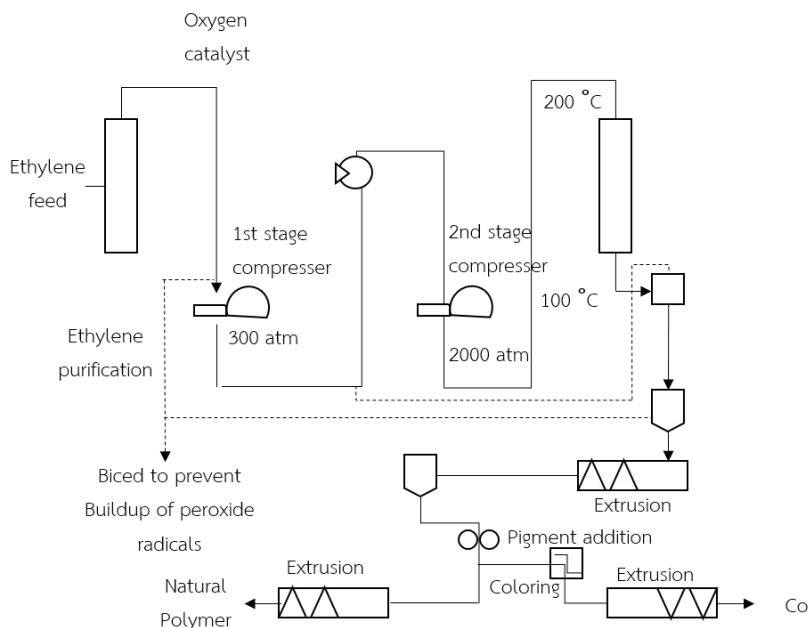
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา (branch-chain) ดังแสดงในภาพที่ 2(b) แต่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง (straight-chain) ดังแสดงในภาพที่ 2(a) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขาแยกออกจากสายโซ่โมเลกุลหลักมากมาย ซึ่งมีทั้งกิ่งสั้น (short chain branch, SCB) และกิ่งยาว (long chain branch, LCB) กระจายปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดความยาวของสายโซ่โมเลกุล ทำให้มีความหนาแน่นต่ำ โมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ และไม่สม่ำเสมอ พอลิเอทิลีนจะค่อนข้างใส และมีความเหนียวพอสมควร นอกจากนี้สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (average molecular weight) ปริมาณการเกิดผลึก (crystallinity) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight distribution) อีกด้วย [11] จากผลของโครงสร้างที่ได้จากการสังเคราะห์ PE ด้วยกลไกในแบบต่าง ๆ (Free radical & Ziegler Natta polymerizations) จึงทำให้มีความใสพอสมควร สมบัติต่าง ๆ ดีกว่า HDPE แต่ความต้านทานแรงต่าง ๆ น้อยกว่า มักใช้เป็น Sealing layer มีความทนทานต่อสารเคมีที่เป็นกรดและด่างสามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้ และไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์รวมถึงความสามารถในการรับแรงกระแทกและความยืดหยุ่นได้ดี [12]

โดยทั่วไป LDPE มีสีขาวขุ่น โปรงแสง มีความลื่นมันในตัว มีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ มีความนิ่ม ความใสแต่ใสไม่เท่าพลาสติกชนิด PP (Polypropylene) จากโครงสร้างทางเคมีของ LDPE ที่เป็นกิ่งสาขา (branching) มากกว่าโครงสร้างทางเคมีของ HDPE (High-density polyethylene) จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่ำกว่า และมีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า HDPE ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ มีความสามารถในการป้องกันสารเคมีได้เป็นอย่างดี ป้องกันการผ่านของความชื้นได้ดี ออกซิเจนและอากาศซึมผ่านได้ ไขมันซึมผ่านได้ โดยปกติแล้ว LDPE จะมี Impact strength, toughness และ ductility สูง มีความนิ่ม ยืดหยุ่นได้ดีทนต่อการที่มทะเลและการฉีกขาด เหนียว ไม่กรอบแตกง่าย ไม่ว่องไวต่อสารเคมี ทนต่อกรดและด่างได้ดี [13]

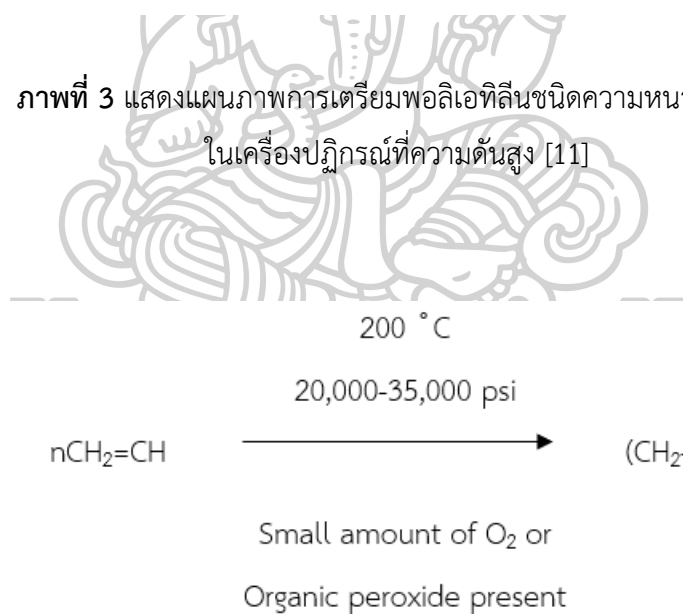
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในทางการค้า เมื่อปี ค.ศ. 1939 โดยบริษัท อิมพีเรียลเคมีคัลอินดัสตรี (ICI) ประเทศอังกฤษ ในการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในทางการค้าจะใช้กระบวนการความดันสูง (high pressure process) ดังแสดงในภาพที่ 3 และภาพที่ 4 โดยในกระบวนการผลิตปกติจะใช้ความดัน 1,000-3,000 บรรยากาศ อุณหภูมิ 80-300 องศาเซลเซียส กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันเริ่มจากการใส่เอทิลีนมอนอเมอร์ และตัวเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งแตกตัวให้ฟรีแรดิคัล (free radical) ได้แก่ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide, BPO) อะโซบิสไอโซบิวไทโรไนไตรล์ (azobis-isobutyronitrile, AIBN) เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก จึงต้องมีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพสูง เช่น ใช้น้ำหรือของเหลวเฉื่อย (inert liquid) เช่น เบนซีน ไทลผ่านท่อเพื่อช่วยระบายความร้อน มอนอเมอร์จะเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 แล้วแยกพอลิเอทิลีนออกมาจากเอทิลีนมอนอเมอร์ แล้วนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ได้มาอัดรีดออกมาเป็นแถบเล็ก ๆ และตัดเป็นเม็ดต่อไป

ลักษณะเฉพาะของการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำภายใต้ความดันสูง คือ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูงมาก ปฏิกิริยานี้จะขึ้นกับความเข้มข้นของมอนอเมอร์ จึงกล่าวได้ว่าการใช้มอนอเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูงๆ ทำปฏิกิริยาที่ความดันสูง ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีกิ่งก้านสาขา ซึ่งกิ่งก้านสาขาที่เกิดขึ้นจะไม่ยาวนานนักมีคาร์บอนเพียง 2-4 อะตอม

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน ชนิดของตัวเริ่มปฏิกิริยา ตัวย้ายสายโซ่ (chain transfer agent) และการใส่ตัวเริ่มปฏิกิริยาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทำให้ได้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีลักษณะแตกต่างกัน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ได้จะมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา ทำให้เรียงตัวไม่เป็นระเบียบจึงมีความหนาแน่นต่ำ



ภาพที่ 3 แสดงแผนภาพการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ความดันสูง [11]



ภาพที่ 4 การพอลิเมอร์ไรเซชันของ LDPE [11]

ประโยชน์ของพอลิเอทิลีน โดยส่วนใหญ่จะนิยมนำไปผลิตเป็นถุง ภาชนะใส่อาหาร พลาสติกถ่ายภาพ และของเล่น เนื่องจากพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็ง โปร่งแสงบ้างเล็กน้อย มีความเหนียวและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี ส่วนใหญ่นำมาหลอมเหลวและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ [14]

2.2. สารประสาน (Coupling agent) หรือสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

สำหรับสารเพิ่มความเข้ากันได้หรือสารประสานเชื่อมเป็นสารเคมีที่ใช้เติมลงในส่วนผสมของพอลิเมอร์ที่เข้ากันไม่ได้ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความเสถียรของสาร โดยทั่วไปของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันไม่ได้จะสามารถศึกษาได้จากสัณฐานวิทยาของเฟสพอลิเมอร์ที่หยาบและไม่เสถียร ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมนั้นมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ของระบบจะทำให้สัณฐานวิทยาของเฟสผสมมีความเสถียรและมีอันตรกิริยากันระหว่างพอลิเมอร์ผสมกับสารเติมแต่ง [15]

โดยหน้าที่ส่วนใหญ่ของสารประสาน (Coupling agent) จะทำให้ฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงกระจายตัวและยึดเกาะได้ดีกับพอลิเมอร์ ซึ่งฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรงส่วนใหญ่จะเป็น hydrophilic ขณะที่พอลิเมอร์เป็น hydrophobic ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ ต้องมีการเติมสารประสาน (Coupling agent) ซึ่งจะมีสูตรทั่วไปของสารประสาน (Coupling agent) คือ



M = Si, Ti, Zr

X = หมู่ไวนิล (-CH=CH₂) หรือ หมู่อะมิโน (-RNH₂)

R = หมู่อินทรีย์ที่เชื่อมระหว่าง X กับ M

R'O = หมู่ที่เกิดพันธะกับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรง

คุณสมบัติของ Coupling agent ส่วนใหญ่จะมักถูกใช้เพื่อทำให้พอลิเมอร์เข้ากันได้กับสารเติมแต่ง หรือปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดียิ่งขึ้น โดยในปัจจุบัน Coupling agent ที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม ได้แก่ Chromium complexes, Silanes, Titanates, Zirconium aluminate และ Maleic anhydride เป็นต้น

2.2.1 การยึดระหว่างสารประสานและฟิลเลอร์หรือเส้นใย

- เกิดปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างหมู่ R'O ของสารประสานกับหมู่ OH ของฟิลเลอร์



- หมู่ R'O ของสารประสานถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความชื้นที่อยู่บนผิวของฟิลเลอร์ให้กลายเป็นหมู่ OH ก่อน



- หมู่ OH ที่เกิดขึ้นบนสารประสานจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ OH บนฟิลเลอร์



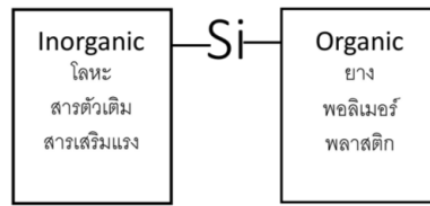
2.2.2 การยึดระหว่างสารประสานและพอลิเมอร์

- หมู่ X บนสารประสานเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์
- ถ้า X เป็นหมู่ไวนิล (-CH=CH₂) หรือ หมู่อะคริลิก (RCO-CH=CH₂) จะใช้กับพอลิเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัวหรือพอลิโอเลฟินชนิดเชื่อมขวาง
- ถ้า X เป็นหมู่อะมิโน (-RNH₂) จะใช้กับอีพอกซีเรซินหรือพอลิเอไมด์ [16]

2.2.3 สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent)

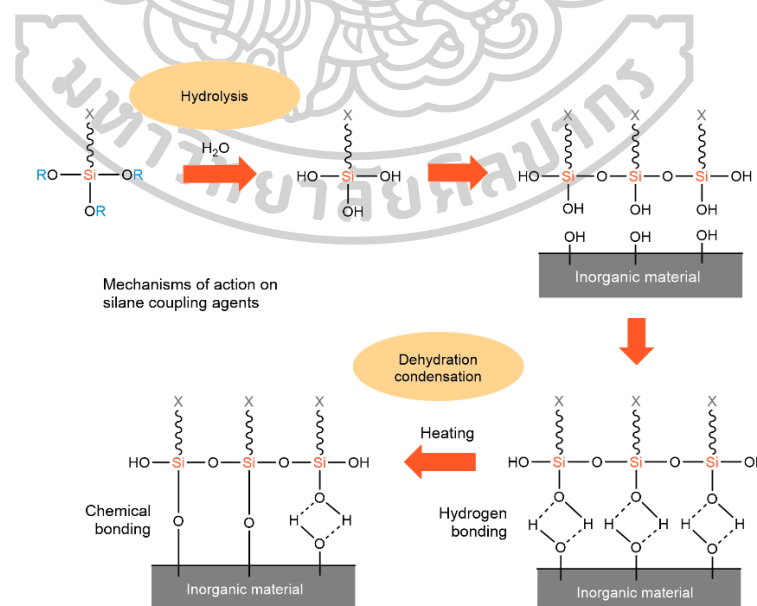
สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) หรือสารประสานเป็นสารที่มีสมบัติในการยึดเกาะ ส่งเสริมการยึดติด (Adhesive promoter) หรือเชื่อมระหว่างสารประกอบให้มีความเข้ากันได้ และเกิดการกระจายตัวได้ดีในวัสดุ โดยที่สารตัวเติมหรือเส้นใยเสริมแรงต่าง ๆ จะเป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูงหรือสารประเภท Hydrophilic ในขณะที่พอลิเมอร์เป็นสารประเภท Hydrophobic ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวที่ต่ำ จึงทำให้ต้องมีการเติมสารคู่ควบไซเลน เพื่อเป็นการปรับปรุงการยึดติดกันของสารตัวเติมและพอลิเมอร์

สารประกอบไซเลน เป็นสารเคมีประเภทหนึ่งที่มีสูตรทั่วไปทางเคมีคือ (R)_n-Si-X_(4-n) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่จะประกอบด้วยธาตุซิลิกอน (silicon : Si) ที่อยู่เป็นศูนย์กลางของโมเลกุลของไซเลน มีหมู่ฟังก์ชัน X ที่เชื่อมกับอะตอมของซิลิกอนโดยตำแหน่งนี้จะเกิดพันธะเชื่อมระหว่างอะตอมซิลิกอนกับสารอนินทรีย์ (Inorganic substrate) โดยหมู่ฟังก์ชัน X จะต้องเป็นหมู่ที่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ โดยส่วนใหญ่จะเป็นหมู่อัลคอกซี (alkoxy group), หมู่เอซิลอกซี (acyloxy group), หมู่เอมีน (amine group) หรือหมู่คลอรีน (chlorine group) เป็นต้น ซึ่งหมู่อัลคอกซี (alkoxy group) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบมากที่สุดไนไซเลน ตัวอย่างเช่น หมู่เมทอกซี (methoxy group) และหมู่เอทอกซี (ethoxy group) ซึ่งจะให้เมทานอลและเอทานอลเป็นผลพลอยได้ (Byproduct) ระหว่างเกิดปฏิกิริยา coupling นอกจากนี้ยังมีไซเลนที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ (Chlorosilanes) เมื่อเกิดปฏิกิริยา coupling จะได้ไฮโดรเจนคลอไรด์เป็นผลพลอยได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะนิยมใช้อัลคอกซีไซเลนมากกว่าคลอโรไซเลน นอกจากนี้สารประกอบไซเลนยังมีหมู่ฟังก์ชัน R เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ไม่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ (non-hydrolyzable) ซึ่งจะเป็นส่วนที่เชื่อมติดกับสารเรซินอินทรีย์และพอลิเมอร์ โดยออร์กาโนไซเลนส่วนใหญ่มักจะมอดักรวมเป็นสารอินทรีย์ (Organic substrate) ดังแสดงในภาพที่ 5 [17]



ภาพที่ 5 แสดงแบบจำลองการยึดเกาะระหว่างสารควบคู่ไซเลน สารตัวเติม และวัสดุอื่น ๆ [18]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารควบคู่ไซเลนจะถูกแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งจะประกอบด้วย การเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารควบคู่ไซเลน จากน้ำที่ใส่เพิ่มหรือความชื้นบนผิว เกิดเป็นหมู่ไซลันอล (Silanols) จากนั้นหมู่ไซลันอลจับกับหมู่ -OH บนพื้นผิวของน้ำหลุดออกเกิดเป็นพันธะออกเซน (Oxane bonds) และเกิดการยึดติดกับผิวของสารอนินทรีย์หรือสารตัวเติม และสุดท้ายสารควบคู่ไซเลนทำปฏิกิริยากันเองเกิดการยึดเกาะกันหลายชั้นเป็นตาข่ายหรืออาจเกิดเป็นสารโซ่พันกัน โดยชนิดของสารควบคู่ไซเลนมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 1 ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีของเรซินหรือพอลิเมอร์ ความมีขี้และไม่ขี้หรือความสามารถในการละลาย โดยที่สารควบคู่ไซเลนถูกนำไปใช้ในงาน อาทิเช่น การปรับปรุงผิวของสารตัวเติมเพื่อให้สารตัวเติมและพอลิเมอร์ยึดเกาะกันได้ดีหรือใช้ในการลดความหนืด ปรับปรุงคุณสมบัติความทนทานต่อความร้อนและสภาพอากาศ และปรับปรุงสมบัติการแปรรูปในวัสดุเชิงประกอบ [17, 19, 20]



ภาพที่ 6 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารควบคู่ไซเลน [20]

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างสารคู่ควบไซเลนและการนำไปใช้งานกับพลาสติกชนิดต่าง ๆ [19]

สารคู่ควบไซเลน	ตัวอย่างชนิดของพลาสติกที่นำมาใช้
1. Vinyl triethoxy silane	PVC, PS, ABS, SAN และ Polyesters
2. vinyl tris(2-methoxy) silane	
3. (3 aminopropyl) triethoxysilane	PP, PE, Epoxy, PC และ PHR
4. 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane	Epoxy, Phenolic, and Melamine Resins, Unsaturated Polyesters, PUR, PC, ABS
5. 3-mercaptopropyltrimethoxysilane	Phenolic and Epoxy Resins, PVC, PS, PS, EPPM, Polysulfones และ Polysulfide

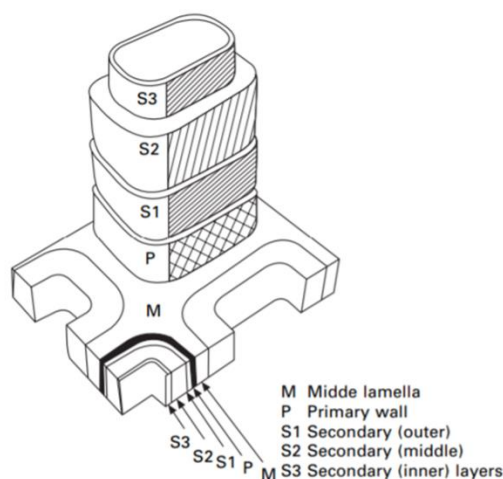
2.4 ผงซีเลื่อยไม้ (Wood fiber)

ผงไม้เป็นสารตัวเติมที่ใช้ลดปริมาณการใช้เทอร์โมพลาสติกที่ไม่ให้ความสำคัญกับสีของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นแผ่นของสารประกอบพวกฟีนอลิก สำหรับการเติมลงในพอลิเมอร์จำพวกพอลิเอเลฟินและพอลิสไตรีน จะส่งผลทำให้ลดการบวมของตาย (die swell) โดยได้มีนักวิจัยทำการนำผงไม้มาช่วยให้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ โดยการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้และตัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ เช่น ในกรณีที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของไม้โดยการทำปฏิกิริยาเบนซิลเลชัน (Benzylation) รวมกับการตัดแปลงโครงสร้างของพอลิพรอสลิน โดยการทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่มีชื่อว่า มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Maleic Anhydride) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากการผสมกันของผงไม้กับพอลิเมอร์ไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี [21]

2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ (Chemical composition of wood)

ผงไม้วัสดุธรรมชาติที่ได้มาจากต้นไม้ ที่ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส (40–50 %) และเฮมิเซลลูโลส (15–25 %) ที่จับกันกับลิกนิน (15–30 %) โดยไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในด้านองค์ประกอบทางเคมี และทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิดต่างกัน ไม้เนื้ออ่อนประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 43% เฮมิเซลลูโลส 28% และลิกนิน 29% ไม้เนื้อแข็งประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 43% เฮมิเซลลูโลส 35% และลิกนิน 22% ผงไม้เส้นใยไม้ทั่วไปประกอบด้วยสี่ชั้นหลักดังแสดงในภาพที่ 7 ชั้นหลักและผนังรองสามชั้น ชั้นนอก (S1), ชั้นกลาง (S2) และชั้นใน (S3) ความหนาของชั้นอื่น ๆ นอกเหนือจากชั้น S2 ยังคงค่อนข้างคงที่จากเส้นใยหนึ่งไปยังอีกเส้นใยหนึ่ง

ดังนั้นความแตกต่างระหว่างไม้สปริงที่มีผนังบางและเส้นใยไม้ฤดูร้อนที่มีผนังหนานั้นเกิดจากความแตกต่างของความหนาของชั้น S2 เส้นใยในไม้เชื่อมประสานกันด้วยลิกนิน [22]



ภาพที่ 7 โครงสร้างเซลล์ยูนิตของไม้ [22]

2.4.2 ข้อดีและข้อเสียของไม้ (Advantages and disadvantages of wood)

ไม้เป็นส่วนสำคัญของอารยธรรมมนุษย์นับตั้งแต่วิวัฒนาการของมนุษย์ และมีผลอย่างมากต่อชีวิตทางเศรษฐกิจและสังคมของประชากรมนุษย์ทั่วโลก ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา มีการใช้ไม้จำนวนมากในวงกว้างได้เกิดขึ้นมากมายจนนำไปสู่การใช้วัสดุมากเกินไป ทำให้เกิดการบุกรุกป่าและเป็นภัยคุกคามต่อการดำรงอยู่ของระบบนิเวศ [22]

ข้อดีของไม้

- ไม้เป็นวัสดุจากธรรมชาติ
- เป็นวัสดุแข็งแบบแอนไอโซทรอปิก แข็ง และเหนียวซึ่งมีความสามารถในการรับน้ำหนักสูง
- ไม่กักร้อนและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- มีการใช้งานที่หลากหลายในเกือบทุกสาขาวิศวกรรมตั้งแต่ของใช้ในครัวเรือน เครื่องครัวเฟอร์นิเจอร์ ประตู หน้าต่าง โครง สัน สะพาน โครงสร้างและวัสดุก่อสร้างเพื่อใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในคอมพอสิต

ข้อเสียของไม้

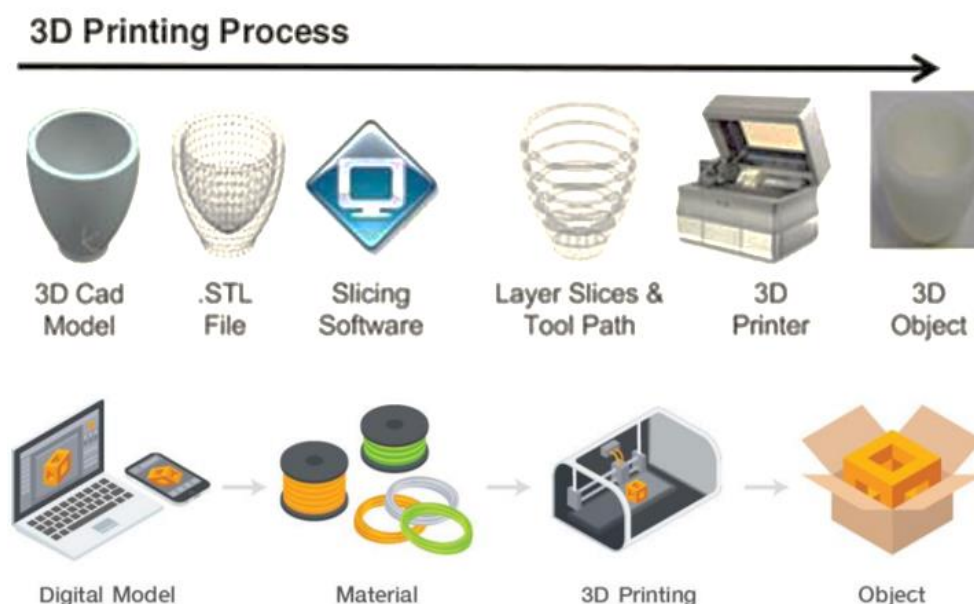
- มีลักษณะเป็นรูพรุน
- ดูดซับความชื้น
- ไม่ทนต่อการเสียดสีและการหลุดลอก
- ไม่ทนต่อความร้อน แสงและการสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต

2.5 การพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

2.5.1 ข้อมูลทั่วไป

การพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) คือ กระบวนการสร้างวัตถุสามมิติ ซึ่งมีขั้นตอนในลักษณะเดียวกันกับการพิมพ์ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้ในการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (rapid prototype) และการผลิตแบบเรียงชั้น (additive manufacturing) วัสดุจะถูกขึ้นรูปหรือวางเชื่อมต่อกันภายใต้การควบคุมของคอมพิวเตอร์ วัตถุ 3 มิติสร้างขึ้นจากข้อมูลดิจิทัลของแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ทั้งในรูปแบบข้อมูล 3 มิติ (3D model) หรือ ในรูปแบบชุดข้อมูล 2 มิติที่เรียงซ้อนเป็นชั้น ๆ (sequential layers) ซึ่งทำให้สามารถขึ้นรูปได้เกือบทุกรูปทรง [23]

ขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติ สามารถสรุปได้ตามภาพที่ 8 กล่าวคือ เริ่มจากสร้างไฟล์รูปร่างสามมิติของชิ้นงานหรือที่นิยมเรียกว่าไฟล์ CAD (Computer Aided Design) ซึ่งสามารถสร้างได้ทั้งจากการวาดในซอฟต์แวร์ CAD หรือใช้เครื่องสแกนสามมิติ (3D scanner) สแกนรูปร่างของวัตถุให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ CAD สำหรับรูปแบบของไฟล์ CAD ที่จะนำเข้าเครื่องพิมพ์สามมิติได้คือ ไฟล์ STL (Stereo Lithography/Standard Triangle Language /Standard Tessellation Language) ซึ่งจัดเก็บข้อมูลรูปร่างของวัตถุโดยใช้หลักการการนำสามเหลี่ยมมาต่อ ๆ กันบนผิวของวัตถุจากนั้นซอฟต์แวร์สำหรับแบ่งชั้นวัตถุ (slicing software) จะแบ่งรูปร่างของวัตถุในไฟล์ STL เป็นชั้น ๆ ในแนวระดับเพื่อส่งข้อมูลนี้ให้เครื่องพิมพ์สามมิติสร้างวัตถุออกมา [24]



ภาพที่ 8 กระบวนการพิมพ์ 3 มิติ [24, 25]

2.5.2 หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

การทำงานของเครื่องพิมพ์ทุกประเภทมีหลักการเดียวกัน คือการขึ้นรูปชิ้นงานทีละชั้น ซ้อนกันจนกลายเป็นวัตถุที่ต้องการ โดยผู้ใช้งานต้องสร้างแบบของชิ้นงานในรูปของ 3D CAD (Computer Aided Design) หรือใช้ สแกนเนอร์ 3 มิติ ในการเปลี่ยนวัตถุในโลกความเป็นจริงไปเป็นไฟล์ดิจิทัล เพื่อนำไปใช้งานกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยไฟล์ดังกล่าวจะมีรายละเอียดของชิ้นงานที่ต้องการ ทั้งขนาดของความกว้าง ความยาว และความลึก โดยสามารถแบ่งหลักการทำงานออกเป็นดังนี้

2.5.2.1 การพิมพ์ 2 มิติเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ

ใช้หลักการเดียวกับการพิมพ์ 2 มิติในแนวนอน แล้วนำมาต่อซ้อนกันเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นที่พิมพ์คือภาพตัดขวาง (cross section) ของวัตถุนั้น เมื่อพิมพ์เสร็จในสองมิติในชั้นแรกแล้ว เครื่องพิมพ์จะเลื่อนแท่นรับงานพิมพ์ขึ้นหรือลงในแนวตั้ง เพื่อพิมพ์ชั้นถัดไป จากนั้นการพิมพ์ซ้อนและเลื่อนแท่นรับงานลงในแนวตั้งที่ละชั้นอย่างต่อเนื่องจนออกมาเป็นรูปร่าง 3 มิติ

2.5.2.2 การพิมพ์ 3 มิติโดยตรง

เป็นการพิมพ์ที่ไม่อาศัยการพิมพ์ซ้อนกันชั้น ๆ อาจเป็นลักษณะการวาดขึ้นรูปวัสดุสามมิติด้วยมืออย่างอิสระ (3D pen)

2.5.3 ประเภทของการพิมพ์ 3 มิติ

ปัจจุบันประเภทของการพิมพ์ 3 มิติ แบ่งตามวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปได้ดังตารางที่ 2

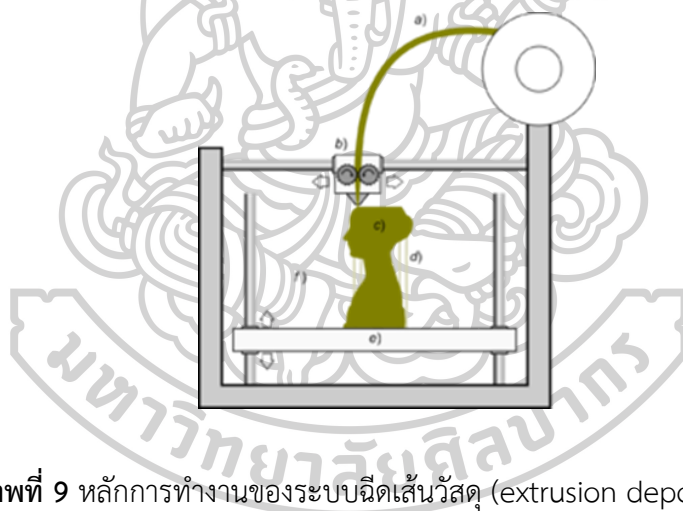


ตารางที่ 2 แสดงประเภทการพิมพ์ 3 มิติ [23]

ประเภท	เทคโนโลยี	วัสดุ
ระบบฉีดเส้นวัสดุ (Extrusion)	Fused deposition modeling (FDM) or Fused filament fabrication (FFF)	เทอร์โมพลาสติก วัสดุที่กินได้ ยาง ดินปั้น
	Robocasting or Direct Ink Writing (DIW)	วัสดุเซรามิก โลหะผสม วัสดุผสมเซรามิก โลหะ (cermet)
	Composite Filament Fabrication (CFF)	ไนลอน หรือไนลอนที่มีเส้นใยคาร์บอน เสริมแรง เคพลาร์ แก้ว
ระบบเรซิน (Light polymerized)	Stereolithography (SLA)	พลาสติกพอลิเมอร์ไวแสง
	Digital Light Processing (DLP)	พลาสติกพอลิเมอร์ไวแสง
	Continuous Liquid Interface Production (CLIP)	พลาสติกพอลิเมอร์ไวแสง
ระบบผงวัสดุ (Powder Bed, Powder Fed)	Powder bed and inkjet head 3D printing (3DP)	โลหะผสม ผงพอลิเมอร์ พลาสติก
	Electron-beam melting (EBM)	โลหะผสม รวมทั้งไทเทเนียมอัลลอย
	Selective laser melting (SLM)	ไทเทเนียมอัลลอย โครเมียมอัลลอย เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม
	Selective heat sintering (SHS)	ผงเทอร์โมพลาสติก
	Selective laser sintering (SLS)	เทอร์โมพลาสติก ผงโลหะ ผงเซรามิก
	Direct metal laser sintering (DMLS)	โลหะผสม
	Directed Energy Deposition	โลหะผสม
ระบบอัดลามิเนต (Laminated)	Laminated object manufacturing (LOM)	กระดาษ แผ่นฟิล์มโลหะ แผ่นฟิล์มพลาสติก

2.5.3.1 ระบบฉีดเส้นวัสดุ

ระบบฉีดเส้นวัสดุ (extrusion deposition) ได้แก่ FDM (Fused Deposit Modeling) [3] หรือ FFF (Fused Filament Fabrication) เป็นรูปแบบการพิมพ์ 3 มิติ ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเนื่องจากการใช้งานที่ง่าย มีหลักการทำงานคือ การหลอมเส้นวัสดุให้กลายเป็นของเหลวแล้วฉีดออกมาเป็นเส้นผ่านหัวฉีด (Nozzle) (ในลักษณะเดียวกับปืนกาที่ใช้งานทั่วไป) หัวฉีดของเครื่องพิมพ์จะวาดเส้นพลาสติกที่ถูกฉีดออกมาเป็นรูปร่างในระนาบแนวนอน เมื่อเสร็จชั้นหนึ่ง ๆ พอลิเมอร์ก็จะเริ่มเกิดการแข็งตัว แล้วพิมพ์ในชั้นต่อ ๆ ไป (layers) จำนวนชั้นเป็นไปตามความสูงของแบบ และ ความละเอียดในการพิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 9 ที่แสดงหลักการทำงานในระบบฉีดเส้นวัสดุ ตำแหน่ง (a) คือเส้นวัสดุที่ถูกป้อนไปยังชุดหัวพิมพ์ที่เคลื่อนที่ในแนวนอนในตำแหน่ง (b) จากนั้นจะถูกหลอมด้วยความร้อน ฉีดออกมาเป็นเส้นผ่านหัวฉีดและวาดเส้นตามรูปทรงที่ตำแหน่ง (c) ที่กำหนดเป็นชั้น ๆ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงของแท่นรับ (e), การพิมพ์ในระบบนี้อาจจำเป็นต้องใช้วัสดุรองรับเพื่อรับน้ำหนักวัสดุพิมพ์ที่ยื่นออกมาในลักษณะนี้

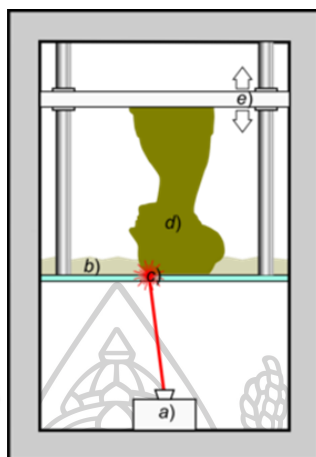


ภาพที่ 9 หลักการทำงานของระบบฉีดเส้นวัสดุ (extrusion deposition) [23]

2.5.3.2 ระบบเรซิน

ระบบเรซินหรือระบบลาดเรซิน ได้แก่ SLA (Stereolithography) หรือ DLP (Digital Light Processing) เป็นระบบที่ใช้การฉายแสงไปที่ตัววัสดุพอลิเมอร์ไวแสง (Photo Resin, Photopolymer) บรรจุในภาตที่เคลื่อนที่ขึ้นลงได้ เมื่อเรซินถูกแสงจะแข็งตัวเฉพาะจุดที่โดนแสง จึงใช้หลักการแข็งตัวของเรซินนี้ในการทำชิ้นงานให้เกิดรูปร่างขึ้นมา เมื่อทำให้เกิดรูปร่างขึ้นในชั้นหนึ่ง ๆ แล้วเครื่องก็จะเริ่มทำให้แข็งเป็นรูปร่างในชั้นต่อ ๆ ไปโดยการเคลื่อนภาตลงไปที่ละชั้น จนเกินเป็นชิ้นงานวัตถุที่จับต้องได้ดังภาพที่ 10(a) เครื่องฉายแสงอาจเป็นได้ทั้งเลเซอร์หรือลำแสง UV จะฉายแสงไปที่วัสดุผ่านภาตที่โปร่งแสงที่บรรจุเรซินเหลว 10(b) จากนั้นเรซินเหลวจะแข็งตัวเฉพาะจุดที่

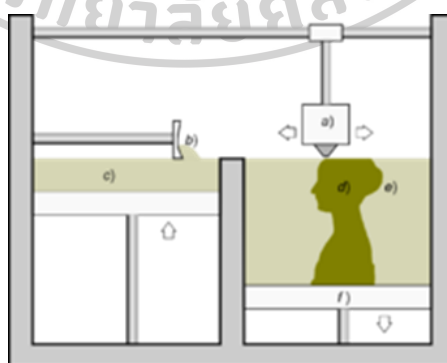
โดนแสงที่กำหนดไว้ 10(c) จากนั้นอาศัยการเลื่อนขึ้นของแท่นจับงาน 10(e) ยกส่วนที่แข็งตัวแล้ว 10(d) สำหรับการพิมพ์ทีละชั้นถัดไป



ภาพที่ 10 หลักการทำงานของระบบเรซิน [23]

2.5.3.3 ระบบผงวัสดุ

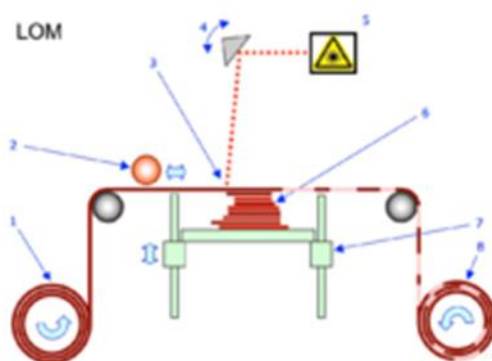
ระบบผงวัสดุ มีการพิมพ์ 2 รูปแบบคือ การพิมพ์ตัวยึดจับ (Binder) หรือ กาว ลงไปรวมผงวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 11 เพื่อผสมานยึดตัวเข้าด้วยกันเป็นรูปร่าง เมื่อสร้างเสร็จในชั้นหนึ่ง เครื่องพิมพ์จะเกลี่ยผงวัสดุมาทับเป็นชั้นบาง ๆ ในชั้นต่อไป ได้แก่ 3DP (Powder Bed and Inkjet Printer) เป็นระบบที่ใช้ผงยึดจับร่วมกับสี Ink Jet (Powder 3D Printer หรือ Color Jet Printing) เป็นระบบใช้ผงยึดจับ/ผงพลาสติก เป็นตัวกลางในการขึ้นชิ้นงาน โดยจะพิมพ์สีลงไปเป็นตัวยึดจับ



ภาพที่ 11 หลักการทำงานของระบบผงวัสดุ [23]

2.5.3.4 ระบบอัดลามิเนต

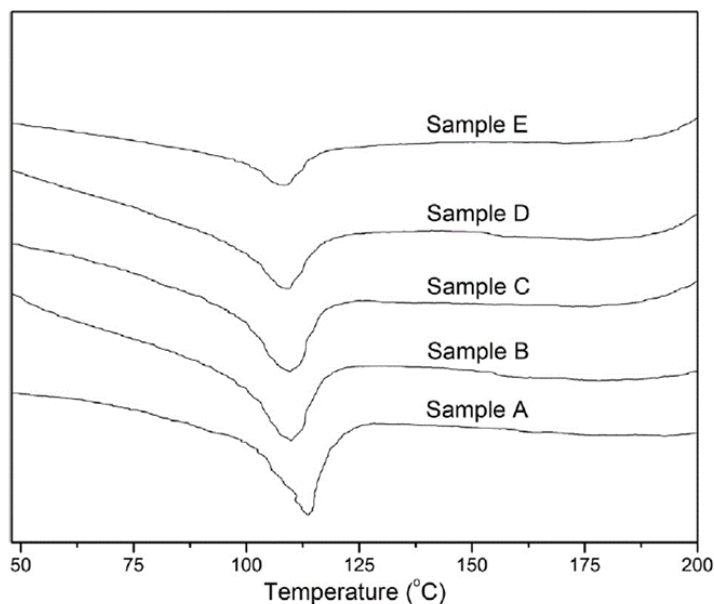
ระบบอัดลามิเนตไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย มีหลักการคือ ใช้การตัดรูปกระดาษเคลือบพลาสติก แผ่นฟิล์มโลหะ หรือแผ่นฟิล์มพลาสติก ด้วยมีดหรือเครื่องตัดด้วยเลเซอร์และติดกาวยึดกันเป็นชั้น ๆ วัสดุที่พิมพ์ด้วยเทคนิคนี้อาจได้รับการแก้ไขเพิ่มเติมโดยการตัดเฉือนหรือการเจาะหลังจากการพิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 หลักการทำงานของระบบอัดลามิเนต [23]

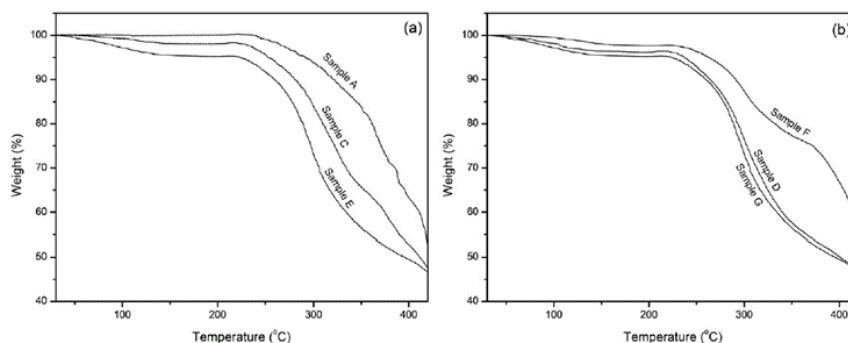
2.6 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

Yuni Kusumastuti และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมไคโตซานที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับไคโตซาน ศึกษาความเข้ากันได้และความสามารถในการย่อยสลายของวัสดุ โดยทำการผสมกันระหว่าง LDPE กับไคโตซาน 0, 10, 20 และ 30%wt และยังมี การเติม MA-g-LDPE 4%wt และ TBPB 1%wt เป็น compatibilizer และ initiator ตามลำดับ โดยใช้เทคนิคการอัดขึ้นรูป ซึ่งจะทำการผสมสารดังกล่าวให้ได้เป็นคอมพอสิตที่หลอมจากเครื่องผสม Labo Plastomill แล้วจะถูกกดโดยใช้เครื่องอัดร้อน (hot presser) ภายใต้ความดัน 40 kgf/cm² เพื่อให้ได้ฟิล์มคอมพอสิต จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า ตัวอย่าง A (LDPE) ตัวอย่างผสม B (ไคโตซาน 10% wt) ตัวอย่างผสม C (ไคโตซาน 20% wt) ตัวอย่างผสม D (ไคโตซาน 30% wt) และตัวอย่างผสม E (40% wt ไคโตซาน) มีอุณหภูมิหลอมเหลว 113, 110, 109, 109 และ 108 °C ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 13 เมื่อเทียบกับฟิล์ม LDPE พบว่าตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำกว่า โดยเมื่อเพิ่มปริมาณของไคโตซานส่งผลต่อให้อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง และมีอุณหภูมิหลอมเหลวเพียงอุณหภูมิเดียวในตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนผสมของ LDPE กับไคโตซานค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ 13 อุณหภูมิหลอมเหลวของตัวอย่าง A-E (A (LDPE), B (ไคโตซาน 10% wt), C ไคโตซาน (20% wt), D (ไคโตซาน 30% wt) และตัวอย่าง E (ไคโตซาน 40% wt) [26]

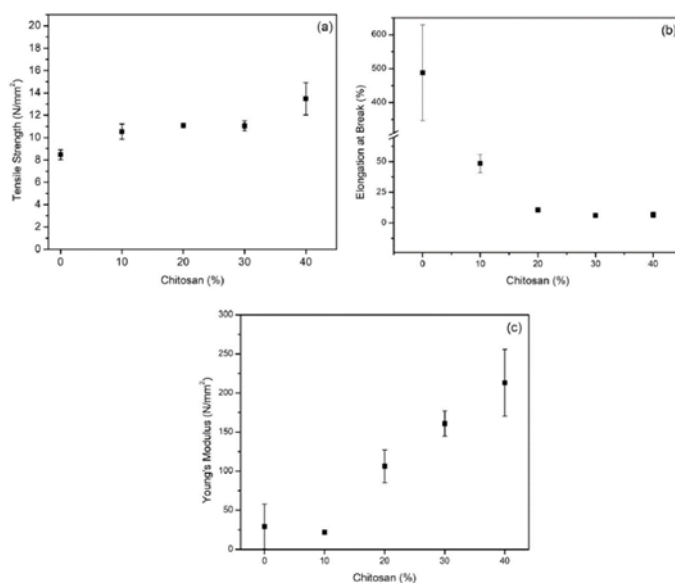
จากผลการทดลองด้วยเทคนิค TGA ดังแสดงในภาพที่ 14 พบว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงขั้นตอนการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียวในขณะที่ LDPE-chitosan มีขั้นตอนการสลายตัวสองขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 °C แสดงการสูญเสียน้ำและสารระเหยอื่น ๆ จากกราฟพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ตัวอย่าง A) เริ่มย่อยสลายที่ 240 °C ในขณะที่ตัวอย่างผสม C (ไคโตซาน 20% wt) และตัวอย่างผสม E (ไคโตซาน 40% wt) เริ่มสลายตัวทางความร้อนที่ 230 °C และ 220 °C ตามลำดับ เมื่อเทียบกราฟการสลายตัวทางความร้อนของตัวอย่างผสม C และ E กับตัวอย่าง A (LDPE) จะพบการสลายตัวของไคโตซานที่เป็นส่วนประกอบของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งการสลายตัวของไคโตซานดังกล่าวเกี่ยวข้องกับการคายน้ำ deacetylation และ chain scission ซึ่งสิ่งนี้บ่งชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของไคโตซานมีแนวโน้มปรับปรุงการสลายตัวทางความร้อนเล็กน้อย สำหรับการเกิดพอลิเมอร์โซชันเริ่มต้นโดยใช้สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มคือ tert-butyl peroxybenzoate (TBPB) ซึ่งสามารถเกิด homolytic ได้ง่ายเพื่อสร้างอนุมูลอิสระ การเพิ่มปริมาณของตัวริเริ่มต้นส่งผลให้ระดับของการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญดังนั้นจึงปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม สำหรับปริมาณของตัวริเริ่มต้นจะมีปริมาณต่ำดังตัวอย่างผสม G ก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตอกที่ต่ำไปด้วย ในขณะที่ตัวริเริ่มต้นที่มีปริมาณสูงดังตัวอย่างผสม D ส่งผลให้การตอกเกิดอย่างรวดเร็วและอาจยับยั้งการเกิดกึ่งบางกึ่งเพื่อให้ได้กราฟที่มีระดับการเชื่อมขวางเกือบคงที่



ภาพที่ 14 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมต่ออุณหภูมิ [26]

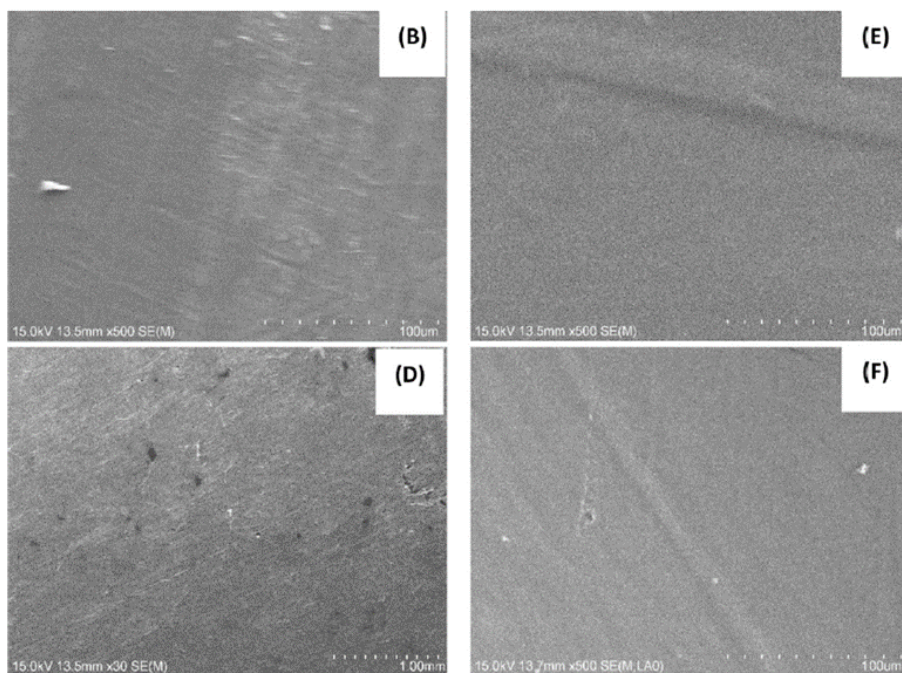
(a) พอลิเมอร์ผสมกับปริมาณของไคโตซานที่แตกต่างกัน: ตัวอย่าง A (LDPE), C (ไคโตซาน 20% wt) และ E (40% wt ไคโตซาน) และ (b) พอลิเมอร์ผสมกับตัวริเริ่มที่มีปริมาณแตกต่างกัน: ตัวอย่าง G (0.25% wt/wt) ตัวอย่าง F (0.5% wt / wt)

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต์ดังแสดงในภาพที่ 15 พบว่า เมื่อปริมาณไคโตซานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของยังค์ เพิ่มขึ้น แต่สมบัติการยืดตัวลดลง เนื่องจากไคโตซานเป็นส่วนประกอบที่ไม่เข้ากัน มีความเหนียวต่ำและเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเปราะ ดังนั้นการเพิ่มไคโตซานจึงทำให้ส่วนผสมมีความแข็งมากกว่าฟิล์ม LDPE บริสุทธิ์



ภาพที่ 15 แสดงความแข็งแรงเชิงกลของตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของไคโตซานที่แตกต่างกัน ได้แก่ (a) ความต้านทานแรงดึง, (b) การยืดตัวเมื่อขาด และ (c) มอดุลัสของยังค์ [26]

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมกับปริมาณของไคโตซานและปริมาณของ TBPB ที่แตกต่างกัน วิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยตัวอย่างทั้งหมดที่ทำการทดสอบมีพื้นผิวเรียบดังแสดงในภาพที่ 16 แสดงให้เห็นการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคไคโตซานในพอลิเมอร์ผสม LDPE จึงทำให้พอลิเมอร์ผสม LDPE/chitosan เห็นเป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ 16 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมกับปริมาณที่แตกต่างกันของไคโตซาน (B และ E) และ TBPB (D และ F) [26]

K.V. Reesha และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มคอมพอสิตระหว่าง LDPE/chitosan สำหรับใช้บรรจุสเต็มพลาสติก ด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยทำการผสม LDPE/chitosan 1%, 3% และ 5% โดยน้ำหนักของ LDPE และ MA-g-LDPE โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่ความเร็วรอบสกรู 90 รอบต่อนาที และอุณหภูมิการหลอมที่ 185 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ที่อุณหภูมิหลอม 184 องศาเซลเซียส และความดัน 20 บาร์ จากการเติม chitosan ส่งผลต่อความหนาแน่นของเม็ดแกรนูลเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ไคโตซาน ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของแกรนูลเพิ่มขึ้นและค่า MFI ลดลง การลดลงของค่า MFI บ่งบอกว่าความหนืดของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น เม็ด LDPE บริสุทธิ์มีค่า MFI 3.57 g/10 min ในขณะที่ค่า MFI ลดลงเมื่อมีการเติมไคโตซาน 1, 3 และ 5% เท่ากับ 2.94, 2.58 และ 2.37 g/10 min ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ดัชนีความหนาแน่นและการไหล (MFI) ของโคโตะซานที่รวมอยู่ในเม็ด LDPE และเม็ด LDPE บริสุทธิ์[27]

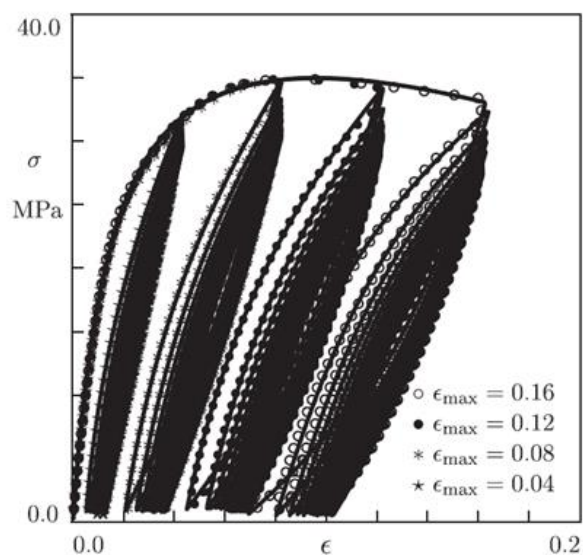
Types of granules	Density (g/cc)	MFI value (g/10 min)
Virgin LDPE	0.923 ± 0.03	3.57 ± 0.01
1%LDPE/CS	0.945 ± 0.01	2.94 ± 0.04
3%LDPE/CS	0.950 ± 0.04	2.58 ± 0.02
5%LDPE/CS	0.951 ± 0.03	2.37 ± 0.08

A. T. Lorenzo และคณะ [28] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกของ polyethylene-b-polystyrene (PE-b-PS) และ polyethylene-b-poly(ethylene-alt-propylene) (PE-b-PEP) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์แบบไดบล็อกพอลิเมอร์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ anionic polymerization ของ butadiene, styrene, และ isoprene ในสารละลาย benzene ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (สำหรับ styrene) และ 60 องศาเซลเซียส (สำหรับ butadiene และ isoprene) ใช้ sec-BuLi (sec-Butyllithium) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) และใช้ isopropanol เป็นตัวหยุดปฏิกิริยา จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาการเกิดผลึกและเอนทัลปีการหลอมผลึกภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น Standard DSC ใช้อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ไปที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส แล้วคงที่ไว้เป็นเวลา 3 นาที สำหรับการทดสอบ Isothermal DSC จะทำการหลอมผลึกที่ 140 องศาเซลเซียส แล้วคงที่ไว้เป็นเวลา 3 นาทีเพื่อกำจัดประวัติทางความร้อนจากนั้นหล่อเย็นอย่างรวดเร็ว ด้วยอัตรา 80 องศาเซลเซียสต่อนาที ไปอุณหภูมิตกผลึก จากนั้นให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสอีกครั้งด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า ผลลัพธ์ DSC มาตรฐานสำหรับไดบล็อกโคพอลิเมอร์ PE-b-PS อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) จะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดถ้าบล็อก PE ก่อรูปเฟสต่อเนื่องหรือเฟส percoated ($E_{53}S_{47}^{51}$) ดังที่สังเกตได้ในตารางที่ 4 เมื่อมีการจำกัดทางสัณฐานวิทยาเพิ่มขึ้น ($E_{26}S_{74}^{105}$ และ $E_{11}S_{89}^{244}$) ค่า T_m ลดลงอย่างเห็นได้ชัด (สำหรับ $E_{11}S_{89}^{244}$ ค่า T_m คือ 85.2 °C) อุณหภูมิหลอมเหลวที่ลดลง (และในเอนทัลปีการหลอมรวมที่เกี่ยวข้อง) บ่งชี้ว่ากระบวนการตกผลึกก่อนหน้านี้ถูกจำกัดมากขึ้นภายใน MD แต่ละตัว เมื่อการจำกัดเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณของ PS

ตารางที่ 4 สมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง PE, PE-b-PS และ PE-b-PEP [28]

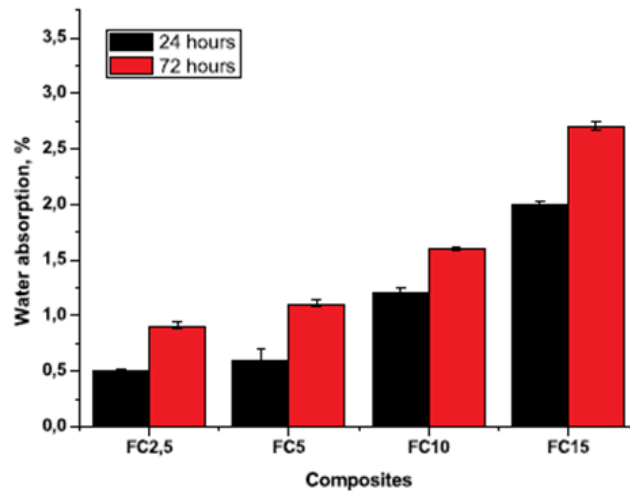
	T_c (°C)			ΔH_c (J/g)	$T_{m,peak}$ (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)	T_g (°C)	solid state morphology
PE ²⁵	85.2			-101	98.7	98	35		bulk
E ₅₃ S ₄₇ ⁵¹	74.4			-68	97.9	66	23	107.2	lamellar
E ₂₆ S ₇₄ ¹⁰⁵	71.8	56.5		-54	93.0	54	18	107.2	PE cylinders
E ₁₁ S ₈₉ ²⁴⁴	68.7	55.6	46.6	-36	85.2	45	15	107.4	PE spheres
E ₅₄ EP ₄₆ ⁵³	66.2			-79	91.3	76	27		lamellae
E ₂₉ EP ₇₁ ⁹⁹	65.7			-77	88.7	73	27		lamellae
E ₁₂ EP ₈₈ ²³⁸	45.2	35.1		-54	82.4	30	17		

A.D. Drozdov [29] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนที่เป็นการเสียรูปแบบวิสโคอีลาสติก โดยการทดสอบแรงดึงเป็นรอบต่าง ๆ ที่ความเครียดสูงสุดต่อรอบ เพื่อจำลองวัฏจักรความหนืดและหาค่าคงที่ของวัสดุในความสัมพันธ์ของ stress-strain เพื่อพัฒนาสมการจลนศาสตร์สำหรับการพัฒนาพารามิเตอร์ที่ปรับได้ โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine Instron-5569 ที่มีการควบคุมด้วยเซ็นเซอร์กลไฟฟ้า ใช้ Load cell 50 kN สำหรับการทดสอบ uniaxial tensile cyclic tests จะทดสอบในอุณหภูมิห้อง ตัวอย่างที่ทดสอบจะทดสอบซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง ยึดชิ้นงานด้วยความเร็วในการดึง 100 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ strain rate 1.6×10^{-2} s⁻¹ ถึง strain สูงสุด จากนั้นปลดแรงออก (unloading) ไปที่ stress ต่ำสุด ประมาณ 1 MPa จากนั้น ก็ให้แรง (loading) อีกครั้ง ในการทดสอบจะใช้ strain สูงสุดที่ 0.04, 0.08, 0.12 และ 0.16 โดยในการทดสอบมากถึง 150 รอบ จากการทดสอบพบว่า เมื่อทดสอบความเค้นสำหรับการเสียรูปเมื่อทำการทดสอบเป็นรอบ ๆ (16 รอบการให้แรง-ปลดแรง) แสดงดังภาพที่ 17 จะเห็นว่าหลังจากการเริ่มต้นทดสอบ 2-3 รอบ ความแตกต่างระหว่างเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่สอดคล้องกับรอบถัดไปของการให้แรง-ปลดแรง จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงที่ค่า strain สูงสุดที่ 0.04 และ 0.08



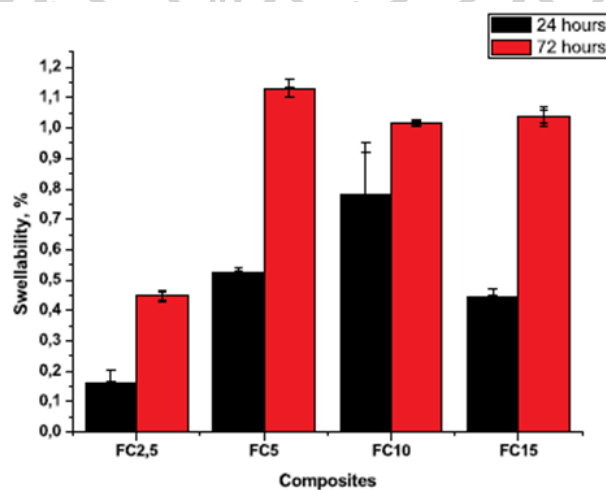
ภาพที่ 17 กราฟ Stress-strain ของการทดสอบ cyclic tests ของพอลิโพรพิลีน (16 รอบ) [29]

Nasmi Herlina Sari และคณะ [30] ได้ศึกษาสมบัติการกระแทกและความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุคอมพอสิตระหว่างเส้นใยกล้วยข้าวโพดกับพอลิเอสเทอร์ โดยเส้นใยกล้วยข้าวโพดได้รับการปรับปรุงด้วย NaOH เข้มข้น 8% ที่ระยะเวลาแตกต่างกันคือ 24 และ 72 ชั่วโมง เส้นใยมีความยาว 40 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เทคนิค hot press ในการเตรียมวัสดุคอมพอสิต จากการทดสอบการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิตดังแสดงในภาพที่ 18 พบว่า หลังจากแช่เส้นใยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัสดุมีการดูดซับน้ำเปลี่ยนไปจาก 0.24% เป็น 0.58% ส่วนเส้นใยที่แช่ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง มีการดูดซับน้ำเปลี่ยนแปลงจาก 0.98% ไปเป็น 1.38% ซึ่งจะเห็นว่าการดูดซับน้ำจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณหรือสัดส่วนของเส้นใยในคอมพอสิต การดูดซับน้ำส่วนใหญ่จะเกิดจากการมีรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ซึ่งจะเพิ่มโอกาสการเกิดพันธะไฮโดรเจนในเส้นใยกล้วยข้าวโพด สำหรับระยะเวลาในการแช่ 24 ชั่วโมงและ 72 ชั่วโมง จะเห็นว่าตัวอย่าง FC15 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณของเส้นใยมากที่สุด



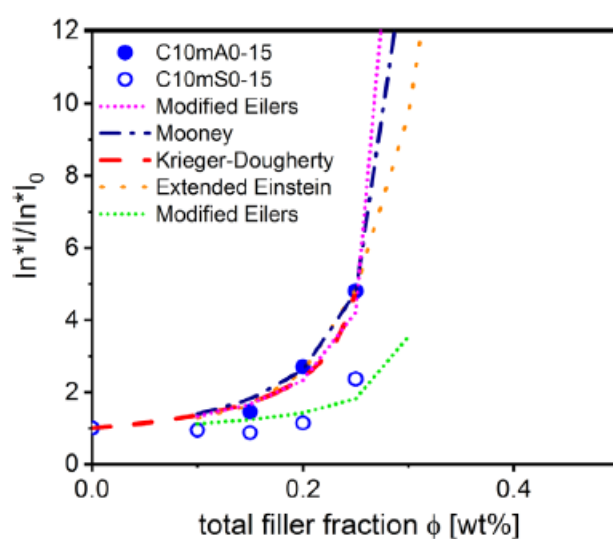
ภาพที่ 18 อัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุคอมพอสิต CHF/polyester [30]

จากผลการศึกษาความสามารถในการบวมตัว จะเห็นได้ว่ามีความบวมตัวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการดูดซึมน้ำ หลังจากแช่ 24 ชั่วโมงมีการเปลี่ยนแปลง 0.08% เป็น 0.44% ซึ่งค่าเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นหลังจากแช่เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มีการเปลี่ยนแปลง 0.45% ถึง 1.04% การบวมตัวของคอมพอสิต CHF/polyester มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการดูดซึมน้ำ โดยที่วัสดุผสมที่มีการดูดซึมน้ำสูงก็มีค่าการบวมตัวสูงเช่นกัน ดังนั้นอัตราการบวมของวัสดุผสม FC จึงได้รับอิทธิพลจากการดูดซึมน้ำของวัสดุคอมพอสิต CHF/polyester



ภาพที่ 19 การบวมตัวของคอมพอสิต CHF/polyester ที่แตกต่างกัน [30]

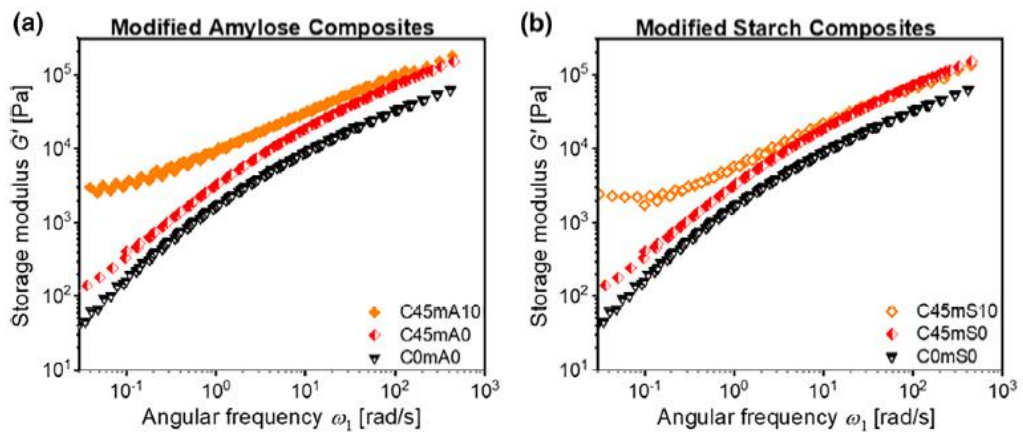
Philip Benjamin Vincent Scholten และคณะ [31] ได้ศึกษาวัสดุคอมพอสิตจากเซลลูโลสกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ได้จากการสังเคราะห์จากวัสดุหมุนเวียน คือ อะไมโลส (Amylose) แป้ง (starch) ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับน้ำมันทานตะวัน เพื่อศึกษาปริมาณและชนิดของ compatibilizer และปริมาณของเซลลูโลส (10 และ 45%wt) โดยนำ LDPE, Bulk cellulose และ compatibilizer ที่ได้จากการสังเคราะห์ มาผสมกันด้วยกระบวนการ Extrusion แล้วกดอัดด้วยความดันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม จากผลการศึกษาสมบัติทางรีออลยีดังแสดงในภาพที่ 20 พบว่าตัวอย่างคอมพอสิตมี linear viscoelastic ปรากฏที่ $\gamma_0 = 10\%$ ยกเว้นตัวอย่างคอมพอสิตที่มีปริมาณของเซลลูโลสที่สูงที่สุด (C45mA/mS10) ซึ่งมี linear viscoelastic ปรากฏที่ $\gamma_0 = 4\%$ จากกราฟของ complex viscosity ดังภาพที่ 20 ที่ความถี่เชิงมุม $\omega_1 = 0.05$ rad/s จะเห็นว่าเมื่อสัดส่วนของ filler และ compatibilizer เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดของวัสดุคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้นด้วย จะเห็นได้การเพิ่มขึ้นของค่า complex viscosity ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชียล ดังนั้นพฤติกรรมของ complex viscosity จึงเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนของน้ำหนักของ filler และ compatibilizer



ภาพที่ 20 Relative absolute complex viscosity ที่เป็นฟังก์ชันสัดส่วนของ filler และ compatibilizer ที่ความถี่เชิงมุม 0.05 rad/s [31]

จากภาพที่ 21 จะเห็นว่ากราฟของ Storage modulus G' ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เชิงมุม ω_1 ที่อุณหภูมิอ้างอิง $T_{ref} = 150$ °C แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมพอสิตมีความเข้ากันได้เนื่องจากกราฟที่ปรากฏมีลักษณะเป็นเนินเขาค่อนข้างคงที่ จากภาพที่ 20 เป็นการเพิ่มปริมาณของเซลลูโลสเป็น

45%wt โดยตัวอย่างคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม compatibilizer (C45mA/mS0) และตัวอย่างคอมพอสิตที่มีการเติม compatibilizer 10%wt (C45mA/mS10) จะปรากฏการเพิ่มขึ้นของ Storage modulus G' เมื่อมีการเติมสาร compatibilizer จากกราฟคอมพอสิตที่ไม่มี compatibilizer เส้นโค้งของกราฟจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ (เส้นสีแดง) แต่เมื่อเพิ่ม compatibilizer 10%wt พบว่า Storage modulus G' ของ C45mA/mS10 เพิ่มขึ้น 49 เท่า ส่วน C45mA10 เพิ่มขึ้น 38 เท่า ที่ $\omega_1 = 0.04$ rad/s โดยจะเห็นกราฟมีลักษณะเป็นที่ราบสูงที่เด่นชัดที่ความถี่ต่ำ ซึ่งจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเติม compatibilizer ในคอมพอสิต เป็นการปรับปรุงการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของเซลลูโลสกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ของ LDPE ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 21 Storage modulus G' ที่เป็นฟังก์ชันของ ω_1 ที่ $T_{ref} = 150$ °C ของ LDPE บริสุทธิ์ และคอมพอสิตที่เติมเซลลูโลส 10 และ 45 wt% โดย (a) modified amylose (mA) และ (b) modified starch (mS) [31]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)

ชื่อทางการค้า	: LDPE
สูตรทางเคมี	: $-(CH_2-CH_2)_n-$
ผู้ผลิต	: บริษัท PTT Global Chemical จำกัด (มหาชน)
เกรด	: InnoPlus LD2420K
ค่า MFI	: 4 g/10 min
ค่าความหนาแน่น (Density)	: 0.924 g/cm ³
อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป	: 150-190 °C

3.1.2 (3-Aminopropyl) trimethoxy-silane (APTMS) ความบริสุทธิ์ 97% จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.3 ฟองซีเลื่อยไม้สักแบบละเอียด ขนาด 200-400 mesh size จากกลุ่มร้านค้าชุมชนป่าสักแม่จิวะ จังหวัดแพร่ ประเทศไทย

3.1.4 ซิลิกาเจล

3.1.5 น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) รุ่น SHJ-25 ผลิตโดยบริษัท เอ็นแมช จำกัด ประเทศจีน โดยใช้หัวตายแบบบูรเดียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร

3.2.2 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D Printer) รุ่น 557E1 ผลิตโดยบริษัท NTT Pro IIID Printer ประเทศไทย

3.2.3 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA/DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.4 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) รุ่น DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.5 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) รุ่น 5969 ผลิตโดยบริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.6 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Shimadzu Universal testing machine) รุ่น AGX-V, 5kN ผลิตโดยบริษัท SHIMADZU Corporation ประเทศญี่ปุ่น

3.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น Tabletop Microscope TM3030 ผลิตโดยบริษัท Hitachi-High-Technologies Corporation ประเทศญี่ปุ่น

3.2.8 เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Rotational Rheometer) รุ่น ARES G2 ผลิตโดยบริษัท TA Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.9 เครื่องกดอัด (Compression Molding Machine) รุ่น LP-S-50 ผลิตโดยบริษัท Labtech Engineering จำกัด ประเทศไทย

3.2.10 ตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven)

3.2.11 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker)

3.2.12 ชุดอุปกรณ์หล่อเย็น

3.2.13 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

3.2.14 ไมโครมิเตอร์

3.3 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้แบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 การเตรียมเส้นฟิลาเมนต์และพีสจูจน์เอกลักษณะวัสดุคอมพอลิทีด LDPE และผงซีลี้อยไม้สั๊ก (LDPE/TP)

3.3.1.1 การเตรียมผงซีลี้อยไม้สั๊ก

นำผงซีลี้อยไม้สั๊กที่ได้จัดซื้อมาจากกลุ่มร้านค้าชุมชนป่าสักแม่จั่วะ จังหวัดแพร่ ประเทศไทย ไปอบในตู้อบสุญญากาศ (vacuum oven) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการ Sieve ให้ได้ขนาดของอนุภาค 200-400 mesh size นำผงซีลี้อยไม้สั๊กที่ผ่านการ Sieve เพื่อแยกขนาดมาทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน คือ (3-Aminopropyl) trimethoxy-silane (APTMS) ที่จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (Coupling agent) โดยเป็นสารเชื่อมประสานที่มีหมู่อะมิโน (amino-silane) สำหรับขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้สั๊กนั้น จำเป็นต้องเตรียมสารละลายของไซเลนด้วยเอทานอลที่มีความเข้มข้น 99.99% จำนวน 95%V/V ผสมกับน้ำกลั่นจำนวน 5%V/V (ไม่ต้องเติมกรดอะซิติก) จากนั้นจึงเติม APTMS ที่ความเข้มข้น 2% ของน้ำหนักผงซีลี้อยไม้สั๊ก และคนสารละลายให้เข้ากันเป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นหมู่ Silanol (Silanol group) และปฏิกิริยาการควบแน่นเป็นโอลิโกเมอร์ของไซเลน ในขั้นตอนถัดไปทำการฉีดพรมสารละลายไซเลนที่เตรียมไว้ลงบนผงซีลี้อยไม้สั๊กให้

เปียกอย่างสม่ำเสมอแสดงในภาพที่ 22 จากนั้นนำ APTMS-Teak powder ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางของสารเชื่อมประสานกับอนุภาคผงซีลี้อยไม้สัก [17] และทำการระเหยตัวทำละลายออกให้หมดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ก่อนนำ APTMS-Teak powder มาบดให้ละเอียดแล้วทำการแบ่งร้อยละน้ำหนักของผงซีลี้อยไม้สัก (APTMS-Teak powder) ออกเป็น 0, 3, 6 และ 9% โดยน้ำหนักตามลำดับ



ภาพที่ 22 แสดงผงซีลี้อยไม้สักที่พรมให้เปียกด้วยสารละลายไซเลน

3.3.1.2 การเตรียมเส้นฟิลาเมนต์ของวัสดุคอมพอสิต

นำผงซีลี้อยไม้สัก (APTMS-Teak powder) ไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นก่อนนำมาผสมกับเม็ดพอลิเมอร์ LDPE ด้วยกระบวนการอัดรีดพลาสติกโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ดังแสดงในภาพที่ 23 ด้วยหัวตาย (Die) 1 รู ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูตาย 2 มิลลิเมตร มีสภาวะการหลอมผสมคือ 110, 130, 140, 150, 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่หัวตาย 180 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของสกรูที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 30 รอบต่อนาที ความเร็วในการดึงเส้นฟิลาเมนต์ (Puller) ประมาณระดับ 5-6 โดยจะหล่อเย็นเส้นฟิลาเมนต์ด้วยอ่างน้ำก่อนจากนั้นจะค่อย ๆ ดึงเส้นฟิลาเมนต์เข้าสู่ชุดอุปกรณ์หล่อเย็นที่เป็นกล่องใส่น้ำแข็ง มีท่อเหล็กสำหรับให้เส้นฟิลาเมนต์ลอดผ่าน ในระหว่างการขึ้นรูปจะต้องทำการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นฟิลาเมนต์ให้มีขนาดประมาณ 1.5-1.75 มิลลิเมตร สำหรับนำไปขึ้นรูปต่อในกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) โดยมีอัตราส่วนการผสมของผงซีลี้อยไม้สัก (APTMS-Teak powder) คือ 0, 3, 6 และ 9% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อัตราส่วนผสมของ LDPE/TP

Sample	LDPE(%wt)	Silane(%wt)	TP(%wt)
Neat LDPE	100	0	0
LDPE/TP3	97	2	3
LDPE/TP6	94	2	6
LDPE/TP9	91	2	9



ภาพที่ 23 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder)

3.3.1.3 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงรีอโลยี

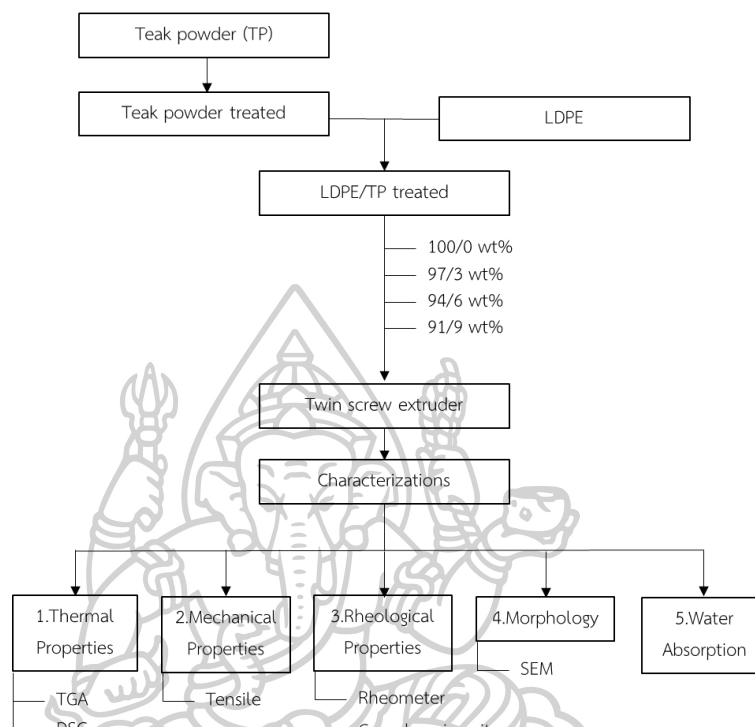
นำเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และคอมพอลสิต LDPE/TP ตัดให้เป็นเม็ด Pellet ด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดให้เป็นแผ่นซีทที่มีความหนาประมาณ 3.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องกดอัด (Compression Molding Machine) ดังแสดงในภาพที่ 24 โดยมีอุณหภูมิการขึ้นรูปเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการกดอัดเท่ากับ 1,200 psi และกำหนดระยะเวลาในการให้ความร้อน (Pre-heat) เท่ากับ 4 นาที ระยะเวลาในการกดอัดอากาศ (Pressing and Venting) เท่ากับ 4 นาที 30 วินาที ระยะเวลาในการกดอัด (Full pressing) เท่ากับ 4 นาที และระยะเวลาในการหล่อเย็น (Cooling) เท่ากับ 4 นาที



ภาพที่ 24 แสดงเครื่อง Labtech compression



3.3.1.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สักจะถูกแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 แสดงขั้นตอนการเตรียมเส้นฟิลาเมนต์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP

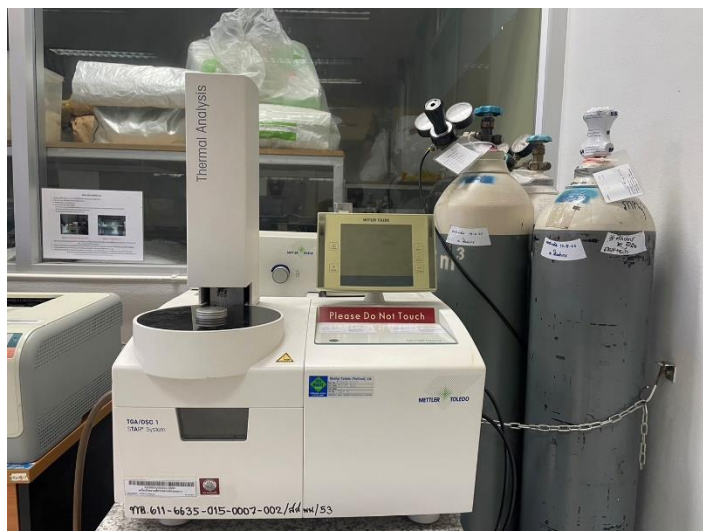
3.3.1.4.1 การศึกษาความเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ดังแสดงในภาพที่ 26

เตรียมผงซีลี้อยไม้สักที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว (APTMS-Teak powder) ผงซีลี้อยไม้สักที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว, neat LDPE และคอมพอสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/Teak powder, LDPE/TP) น้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม โดยทดสอบในโหมด Temperature scan ที่ช่วงอุณหภูมิ 50-800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และอัตราการให้ความร้อนที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการทดสอบเป็น 3 ชั้น ดังนี้

ชั้นที่ 1 Hold ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

ชั้นที่ 2 Heat จากอุณหภูมิ 50-800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

ชั้นที่ 3 Hold ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที



ภาพที่ 26 เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA)

3.3.1.4.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ดังแสดงในภาพที่ 27

เตรียม neat LDPE และคอมพอลิเมอร์ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับผงขี้เลื่อยไม้สัก (LDPE/Teak powder, LDPE/TP) น้ำหนักประมาณ 8 มิลลิกรัม โดยทดสอบในโหมด Heat-Cool-Heat ที่ช่วงอุณหภูมิ 30-250 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ขั้นตอนการทดสอบสามารถแบ่งเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 Hold ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

ขั้นที่ 2 Heat จากอุณหภูมิ 30-250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ขั้นที่ 3 Hold ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

ขั้นที่ 4 Cool จากอุณหภูมิ 250-30 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ขั้นที่ 5 Hold ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

ขั้นที่ 6 Heat จากอุณหภูมิ 30-250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ขั้นที่ 7 Hold ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

การคำนวณหาปริมาณผลึก (X_c) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ตามงานวิจัยของ Sewda, K และคณะ [32]

$$X_c = \frac{1}{1 - W_t} \left(\frac{\Delta H_{\text{experimental}}}{\Delta H_{\text{theoretical}}} \right) \times 100 \quad (\text{สมการที่ 1})$$

เมื่อ X_c คือ ปริมาณผลึกของ LDPE
 $\Delta H_{\text{experimental}}$ คือ ค่า Heat of fusion ของอุณหภูมิลอมผลึก
 $\Delta H_{\text{theoretical}}$ คือ ค่า Heat of fusion ที่ลอมผลึก 100% ของ LDPE
 คือ 293 J/g [33]
 $1 - W_t$ คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ LDPE ใน LDPE/TP
 W_t คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพวงซีล้อยไม้สัก (TP)



ภาพที่ 27 เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC)

3.3.1.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงยืดของเส้นฟิลาเมนต์ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ดังแสดงในภาพที่ 28

การทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing) ของเส้นฟิลาเมนต์จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-D885 (Yarn and Cord Tensile Testing) ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 23 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 10 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบด้วยอัตราเร็วของการดึงยืดเท่ากับ 400 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยโหลด (Load cell) ขนาด 500 N ชิ้นงานทดสอบคือเส้นฟิลาเมนต์ของ neat LDPE และ LDPE/TP (3, 6 และ 9%) ที่มีความยาว Gauge length 25.40 เซนติเมตร จะถูกทดสอบทั้งหมดสูตรละ 10 ตัวอย่าง เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Tensile strength และค่า % Elongation at break



ภาพที่ 28 เครื่อง Instron Universal Testing Machine (UTM)

3.3.1.4.4 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุคอมพอสิตด้วยเครื่อง Rotational Rheometer Machine ดังแสดงในภาพที่ 29

การศึกษาพฤติกรรมการไหลด้วยเครื่อง Rotational Rheometer รุ่น ARESG2 จากบริษัท TA Instrument ทดสอบโดยใช้แผ่นคู่ขนาน (Parallel plate) ที่ทำมาจากเหล็กกล้า ปลอดสนิม (Stainless steel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ใช้ระบบ Forced convection oven (FCO) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิการทดสอบคงที่ 160 องศาเซลเซียส ในช่วงปรับเปลี่ยนความถี่ (Angular Frequency sweep) จาก 0.1 ถึง 100 เรเดียนต่อวินาที ซึ่งชิ้นงานทดสอบได้จากการตัดเส้นฟิลาเมนต์ให้เป็นเม็ด แล้วนำไปกดอัดด้วยเครื่องกดอัด (Compression) ให้เป็นแผ่น จากนั้นตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ให้มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ในการทดสอบจะใช้ระยะการตัดขอบ (Trim gap) ที่ความสูง 2.1 มิลลิเมตร แล้วจึงทำการทดสอบที่ระยะ Gap สูงเท่ากับ 1.984 มิลลิเมตร โดยเริ่มจากโหมด strain sweep เพื่อหา %strain ที่เป็น linear viscoelasticity ก่อน แล้วเลือกค่า %strain สำหรับทดสอบพฤติกรรมการไหลในโหมด Frequency sweep เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลจากค่า Complex viscosity ความเข้ากันได้และการกระจายตัวของฟองซีล้อยู่ในพอลิเมอร์คอมพอสิต



ภาพที่ 29 เครื่อง Rotational Rheometer

3.3.1.4.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 31

นำผงซีลี้อยไม้สักที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว (APTMS-Teak powder), ผงซีลี้อยไม้สักที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว และเส้นฟิลาเมนต์ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่อบไล่ความชื้นแล้วมาติดลงบนคาร์บอนเทป โดยสำหรับเส้นฟิลาเมนต์ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP สามารถเตรียมชิ้นงานได้โดยการนำเส้นฟิลาเมนต์ไปแช่แข็งในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) จากนั้นทำให้แตกหักก่อนนำมาติดบนคาร์บอนเทปแล้วทำการเคลือบทองและแพลตตินัมบริเวณพื้นที่หน้าตัดของเส้นฟิลาเมนต์ (Cross-section) และผงซีลี้อยด้วยเทคนิค Sputtering ก่อนทำการทดสอบ SEM ดังแสดงในภาพที่ 30 เพื่อป้องกันการสะสมของประจุขณะทำการทดสอบ SEM



ภาพที่ 30 เครื่อง Sputtering



ภาพที่ 31 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.1.4.6 การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption)

การศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิต จะถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 โดยทำการตัดเส้นฟิลาเมนต์คอมพอสิต LDPE/TP3, LDPE/TP6 และ LDPE/TP9 ให้ความยาวประมาณ 45 เซนติเมตร จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นเป็นระยะเวลาหนึ่งจนกว่าน้ำหนักแห้ง (Dry weight) ของชิ้นงานจะคงที่ จากนั้นนำไปฝังให้เย็น ทันทันทีที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิเย็นลงแล้วจะถูกนำไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง โดยควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลาจึงนำชิ้นงานตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักด้วยผ้าสะอาดโดยต้องไม่ให้เกิดขุยที่ผิวชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อชั่งเสร็จแล้วนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก (Wet weight) เพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป สำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิตสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 ตามงานวิจัยของ H.N. Dhakal และคณะ [34]

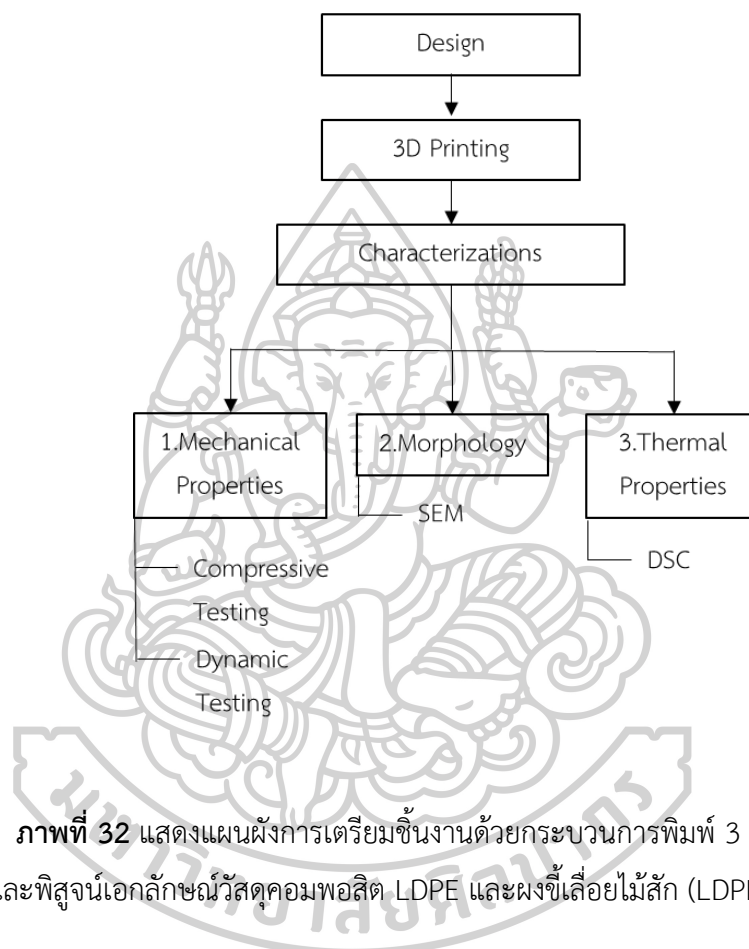
$$\% \text{ Water absorption} = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2})$$

เมื่อ W_{wet} คือ น้ำหนักที่ผ่านการแช่น้ำกลั่น (Wet weight)
 W_{dry} คือ น้ำหนักแห้ง (Dry weight)

สำหรับผลการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP จะวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวด้วยการคำนวณเชิงสถิติ (One-way ANOVA) ของปริมาณการเติมผงซีลี้อยู่ไม้สักกับการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP กำหนดนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยการดูดซับน้ำที่ร้อยละ 95 ($P < 0.05$) ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics version 26

3.3.2 การเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ และพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอลิิต LDPE/TP

การเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ และพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอลิิต LDPE และผงซีลี้อยไม้ส้ก (LDPE/TP) จะแสดงดังภาพที่ 32

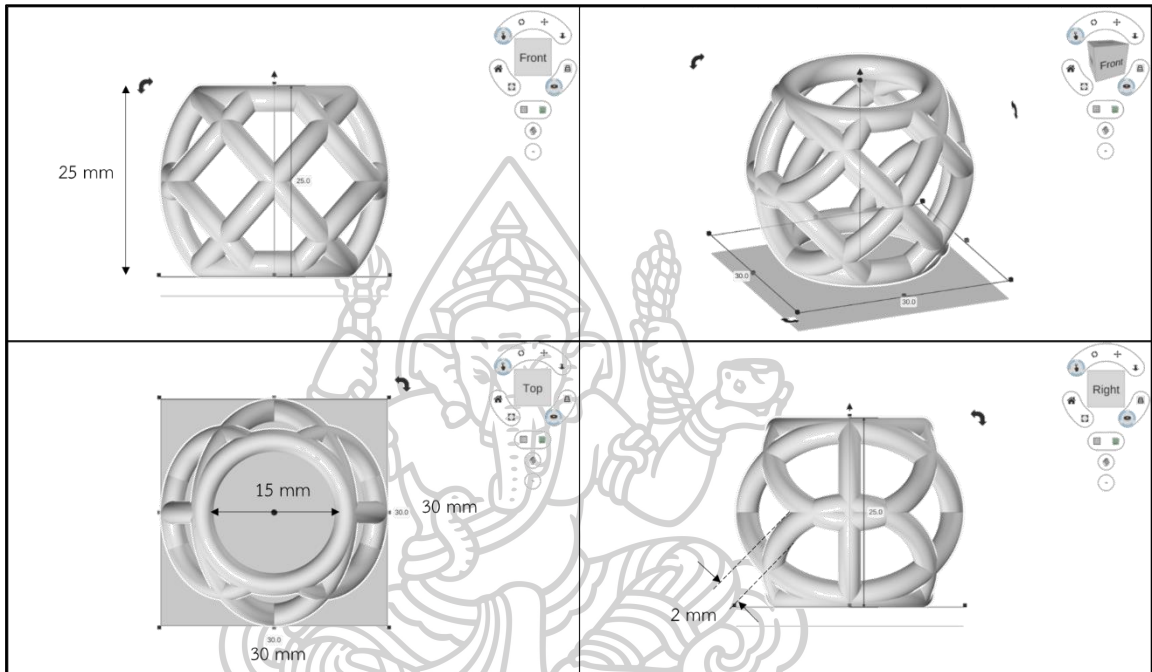


ภาพที่ 32 แสดงแผนผังการเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ และพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอลิิต LDPE และผงซีลี้อยไม้ส้ก (LDPE/TP)

3.3.2.1 การออกแบบและขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ

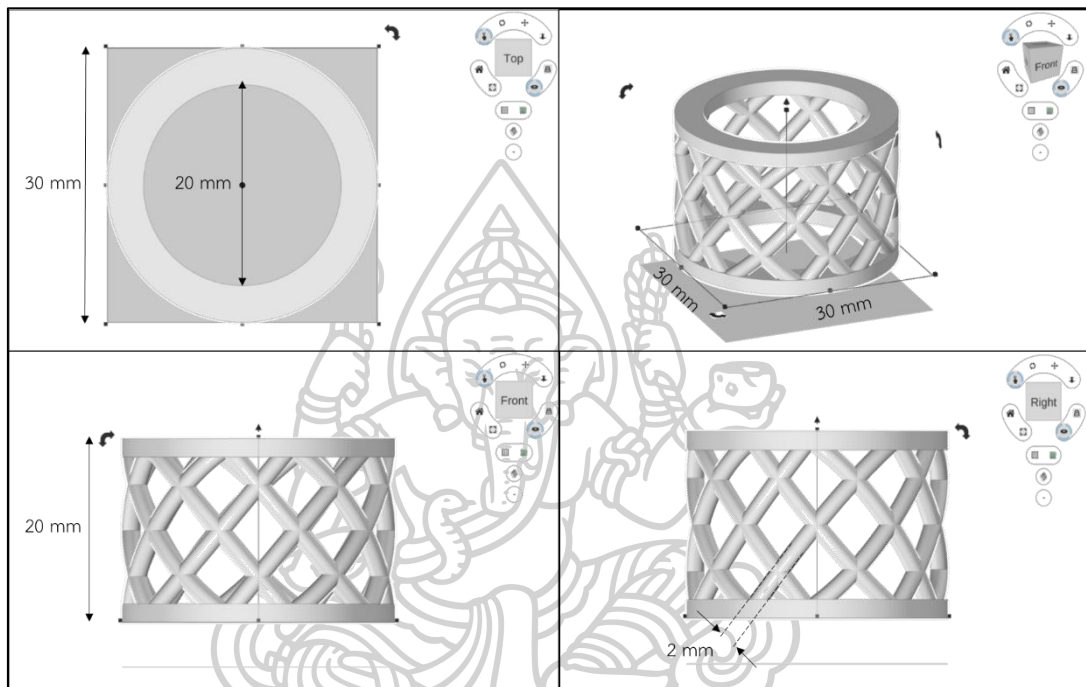
ทำการออกแบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติ ให้มีรูปทรงทางวิศวกรรมได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก และลูกบาศก์ ซึ่งเป็นรูปทรงที่นิยมใช้งานในการสร้างอาคาร เครื่องจักร ยานพาหนะ และโครงสร้างอื่น ๆ โดยในงานวิจัยนี้จะออกแบบชิ้นงานให้มีลักษณะพิเศษก็คือ ชิ้นงานมีช่องกลวง ลักษณะคล้ายการสาน เพื่อความสามารถในการขึ้นรูปในระยะเวลาที่ไม่ยาวนานมากนัก และมีความสูงที่ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างอย่างมากของการเย็นตัว (เปรียบเทียบระหว่างชั้นบนสุดและชั้นฐานของรูปทรง) ในระหว่างการพิมพ์ขึ้นรูป โดยหาผู้เขียนแบบจำลองด้วยโปรแกรมเขียนแบบด้านวิศวกรรมจากบริษัท แอททริตี ปรีน จำกัด จำนวน 3 โมเดล ดังต่อไปนี้

- โมเดลที่ 1 ใช้ชื่อว่า Semi-spherical ซึ่งมีขนาดและรูปร่างจะคล้ายทรงเรขาคณิตคือ ทรงกลม ภายในกลวง มีเส้นตาข่ายคล้ายการสานกัน โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 33



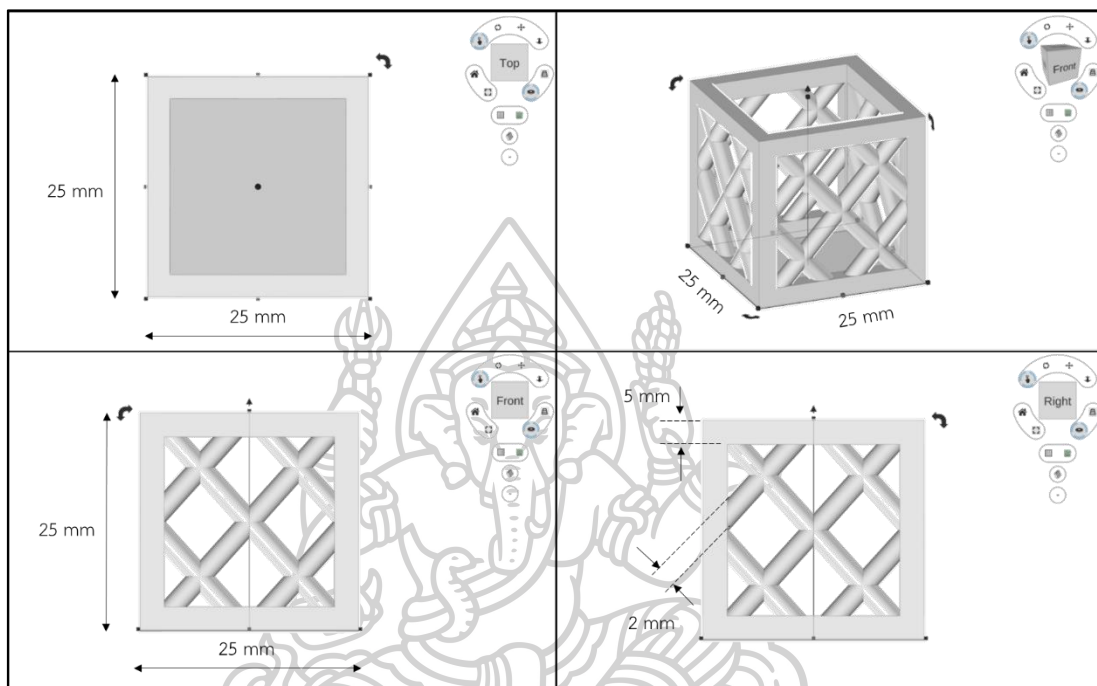
ภาพที่ 33 แสดงรูปร่างและขนาดของแบบจำลองโมเดลที่ 1 Semi-spherical (ในหน่วยมิลลิเมตร)

- โมเดลที่ 2 ใช้ชื่อว่า Cylindrical ซึ่งมีขนาดและรูปร่างคล้ายทรงกระบอกในรูปทรงเรขาคณิต ภายในกลวง และมีเส้นตาข่ายคล้ายการสานกัน โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 แสดงรูปร่างและขนาดของแบบจำลองโมเดลที่ 2 Cylindrical (ในหน่วยมิลลิเมตร)

- โมเดลที่ 3 ใช้ชื่อว่า Cubic ซึ่งมีขนาดและรูปทรงคล้ายลูกบาศก์ในรูปทรงเรขาคณิตภายในกลวง มีเส้นตาข่ายคล้ายการสานกัน โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 35

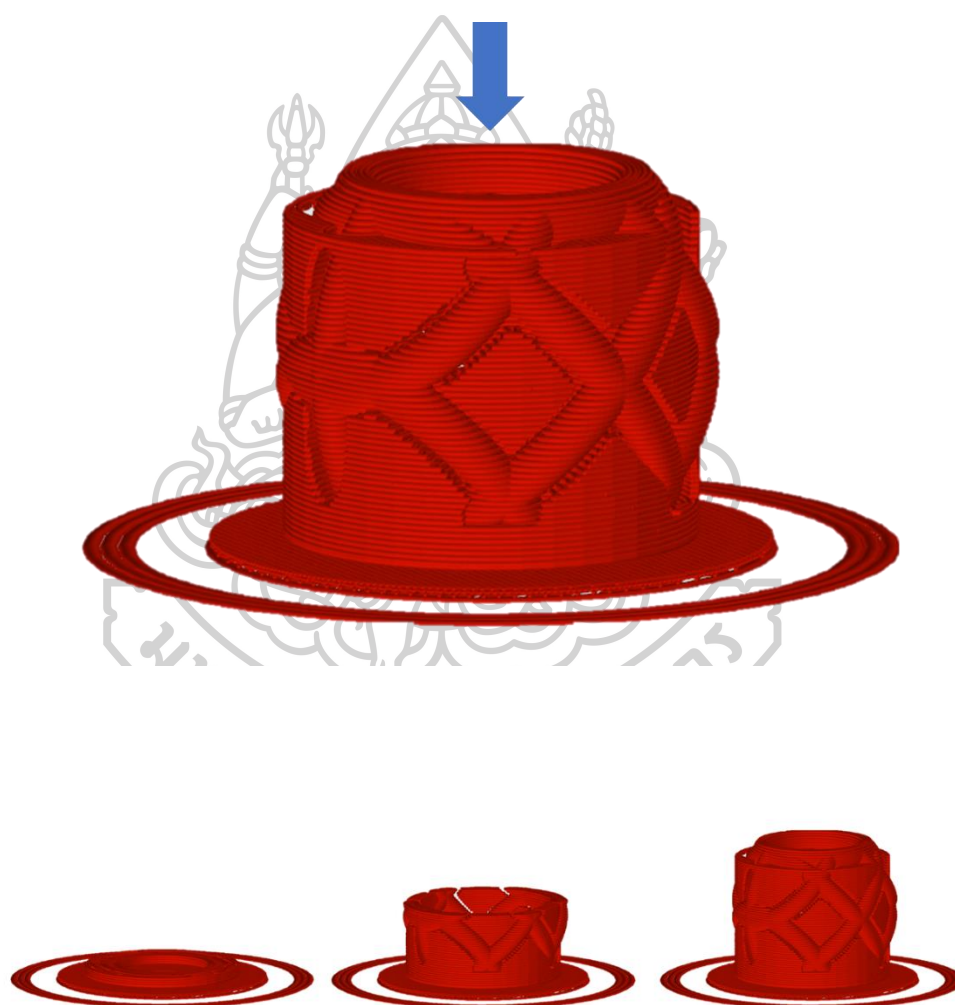


ภาพที่ 35 แสดงรูปร่างและขนาดของแบบจำลองโมเดลที่ 3 Cubic (ในหน่วยมิลลิเมตร)

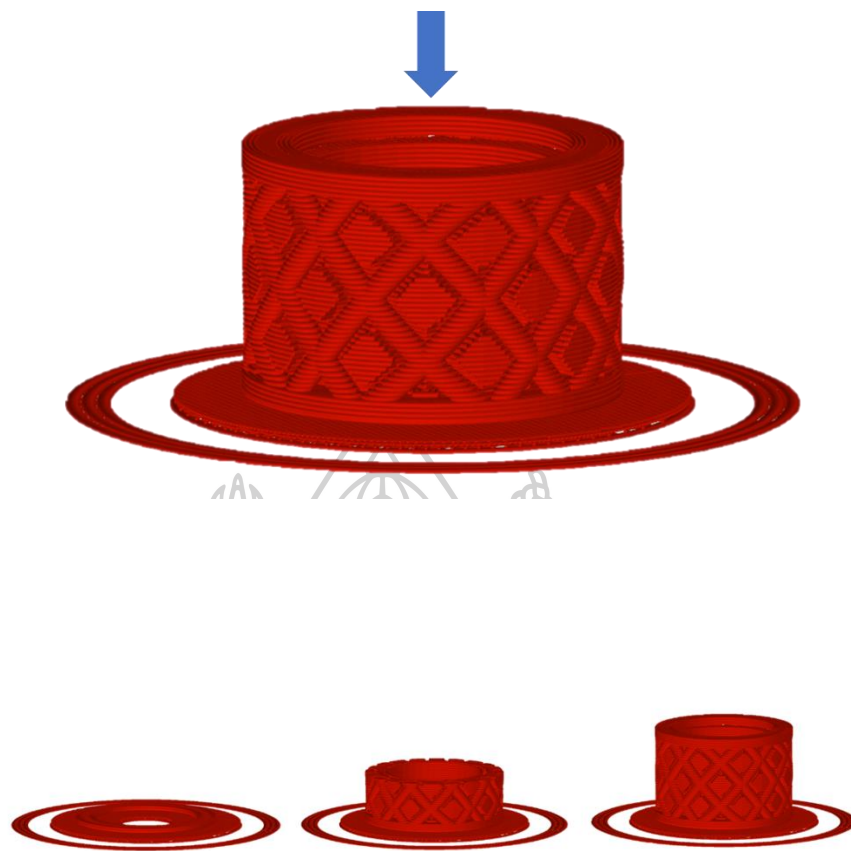
ตารางที่ 6 แสดงขนาดของ Models ต่าง ๆ

Models	Wide (mm)	Length (mm)	Height (mm)	Diameter (mm)	
				in	out
Semi-spherical	30	30	25	15	30
Cylindrical	30	30	20	20	30
Cubic	25	25	25	-	-

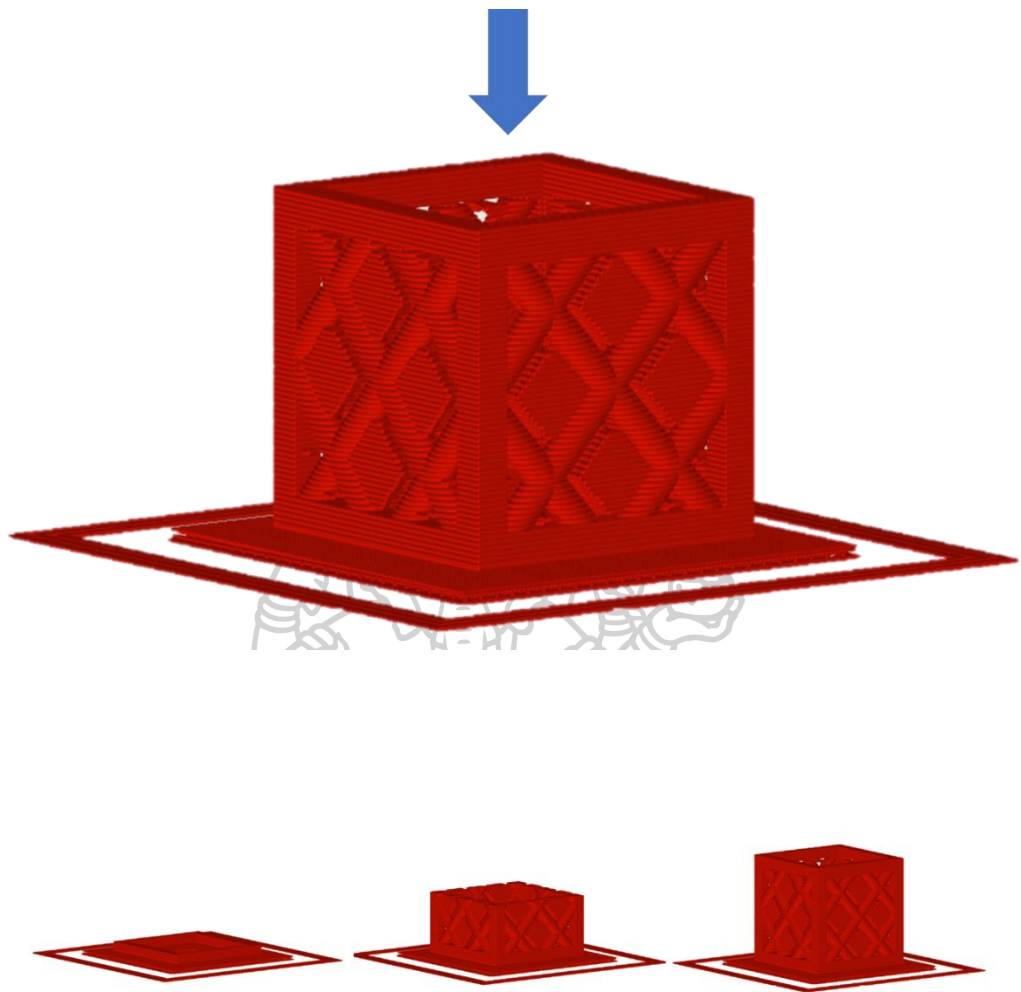
หลังจากทำการออกแบบชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรมเรียบร้อยแล้ว ทำการบันทึกไฟล์ข้อมูลเป็นนามสกุล Stereolithography (.STL) ซึ่งไฟล์ .STL เป็นไฟล์ที่กำหนดพื้นผิวเรขาคณิตของโมเดล 3 มิติ สำหรับนำไปแปลงจากไฟล์ .STL ไปเป็นไฟล์นามสกุล GCODE (Geometric Code) ด้วยโปรแกรม Matter Control version 2.0-64Bit เพื่อสร้างภาษาสำหรับการสั่งงานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยจะทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชั้น ๆ (Layer) นอกจากนี้ยังต้องทำการออกแบบตัวยึดชิ้นงาน (Support) เพื่อทำหน้าที่จับ ยึด ประคอง ชิ้นงานในขณะที่ทำการพิมพ์



ภาพที่ 36 แสดงโมเดลที่ 1 Semi-spherical ที่แปลงเป็นไฟล์นามสกุล GCODE (ในหน่วยมิลลิเมตร)



ภาพที่ 37 แสดงโมเดลที่ 2 Cylindrical ที่แปลงเป็นไฟล์นามสกุล GCODE (ในหน่วยมิลลิเมตร)

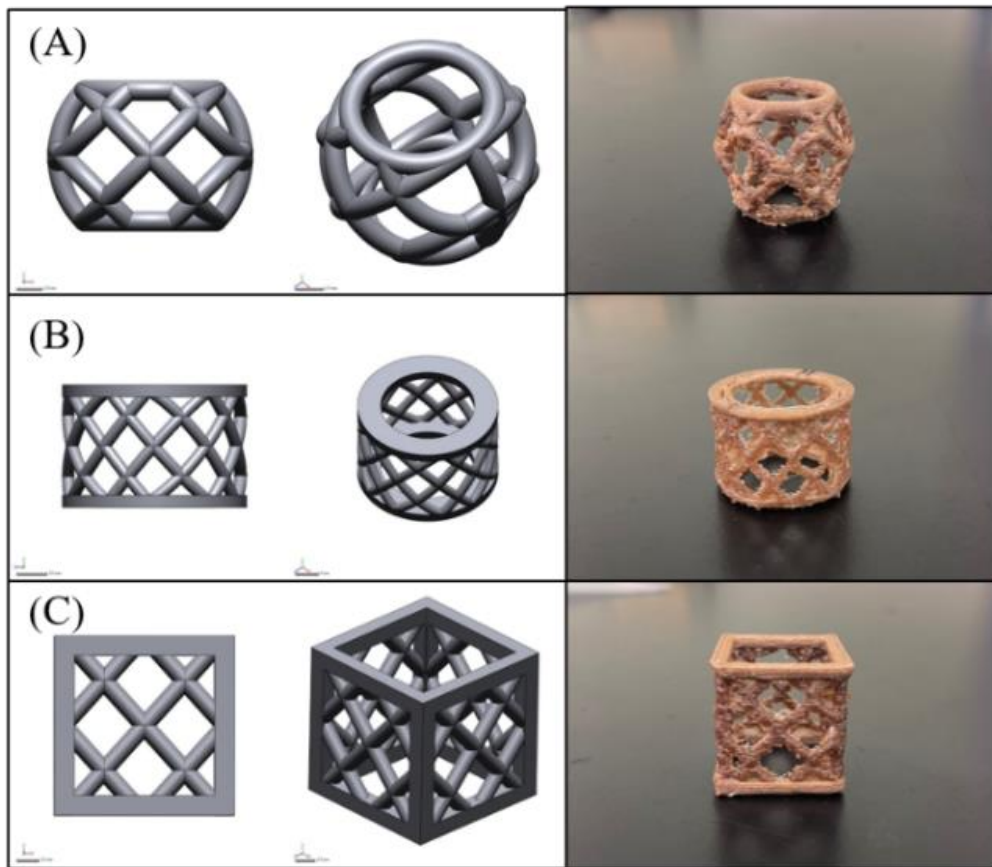


ภาพที่ 38 แสดงโมเดลที่ 3 Cubic ที่แปลงเป็นไฟล์นามสกุล GCODE (ในหน่วยมิลลิเมตร)

สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ จะถูกพิมพ์จากเส้นฟิลาเมนต์ของวัสดุคอมพอสิตที่มีสัดส่วนการผสมผงซีลีเนียม 0, 3, 6 และ 9 wt% โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing)

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้งาน
Infill type	Line
Infill density (%)	20
Printing speed (mm/s)	25
Layer thickness (mm)	0.4
Nozzle diameter (mm)	0.4
Nozzle temperature (°C)	250
Bed temperature (°C)	ambient
Raster orientation (°)	± 45
Filament diameter	1.5-1.7 mm



ภาพที่ 39 แสดงโมเดล 3 มิติ ที่เขียนจากโปรแกรม (ซ่าย) และชิ้นงาน 3 มิติที่พิมพ์จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP (ขวา) ; (A) โมเดลที่ 1 Semi-spherical, (B) โมเดลที่ 2 Cylindrical และ (C) โมเดลที่ 3 Cubic

3.3.2.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE และ ผงซีลี้อยไม้สัก ซึ่งมีการทดสอบดังนี้

3.3.2.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน 3 มิติ

ในการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) โดยนำชิ้นงาน 3 มิติ ไปหักในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) จากนั้นนำชิ้นส่วนที่แตกหักในแนวตัดขวาง (Cross-section) มาติดบนคาร์บอนเทปแล้วทำการเคลือบทองและ แพลตทินัมก่อนทำการทดสอบ

3.3.2.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลวิสโคอีลาสติก

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกของชิ้นงาน 3 มิติ ที่มีการทดสอบด้วยกัน 2 แบบ คือ Compressive Testing และ Dynamic Testing ดังนี้

การทดสอบ Compressive Testing จะทดสอบด้วยเครื่อง Instron Universal Testing Machine (UTM) ดังแสดงในภาพที่ 40 เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาความต้านทานต่อการกดของชิ้นงาน 3 มิติ ที่ขึ้นรูปจากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง Instron Universal Testing Machine (UTM) ในโหมด Compression mode ตามมาตรฐาน ASTM D695 ในการทดสอบนี้ใช้โหลด (Load cell) เท่ากับ 50 kN กดด้วยอัตราการกดเท่ากับ 1.3 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยกดชิ้นงานตัวอย่างไปที่ระยะ 80 เปอร์เซ็นต์ของความสูงชิ้นงาน จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต่อหนึ่งตัวอย่างเท่ากับ 10 ชิ้นงาน

สำหรับการทดสอบ Dynamic Testing จะทดสอบด้วยเครื่อง Shimadzu Universal Testing Machine เป็นการทดสอบแบบให้แรง-ปลดแรง (loading-unloading) ต่อชิ้นงาน 3 มิติ โดยจะทำการให้แรงกดชิ้นงานที่ค่า Strain ในช่วง Elastic deformation ประมาณ 10 รอบ ด้วยโหลด (Load cell) เท่ากับ 5 kN อัตราการกดเท่ากับ 1.3 มิลลิเมตรต่อวินาที จำนวนชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบต่อหนึ่งตัวอย่างเท่ากับ 5 ชิ้นงาน



ภาพที่ 40 เครื่อง Shimadzu Universal Testing Machine

3.3.2.2.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

เตรียม neat LDPE และคอมพอลิเตอร์หว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับผงซีลี้อยไม้ส้ก (LDPE/Teak powder, LDPE/TP) ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ แล้วที่น้ำหนักประมาณ 8 มิลลิกรัม โดยทดสอบในโหมด Heat-Cool-Heat ที่ช่วงอุณหภูมิ 30-250 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ขั้นตอนการทดสอบสามารถแบ่งเป็น 7 ขั้น ดังนี้

ขั้นที่ 1 Hold ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

ขั้นที่ 2 Heat จากอุณหภูมิ 30-250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ขั้นที่ 3 Hold ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

ขั้นที่ 4 Cool จากอุณหภูมิ 250-30 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ขั้นที่ 5 Hold ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

ขั้นที่ 6 Heat จากอุณหภูมิ 30-250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ขั้นที่ 7 Hold ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที

เพื่อศึกษาความผลึกและอสัณฐานของวัสดุคอมพอลิเตอร์ สำหรับการใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับการทดสอบ dynamic testing

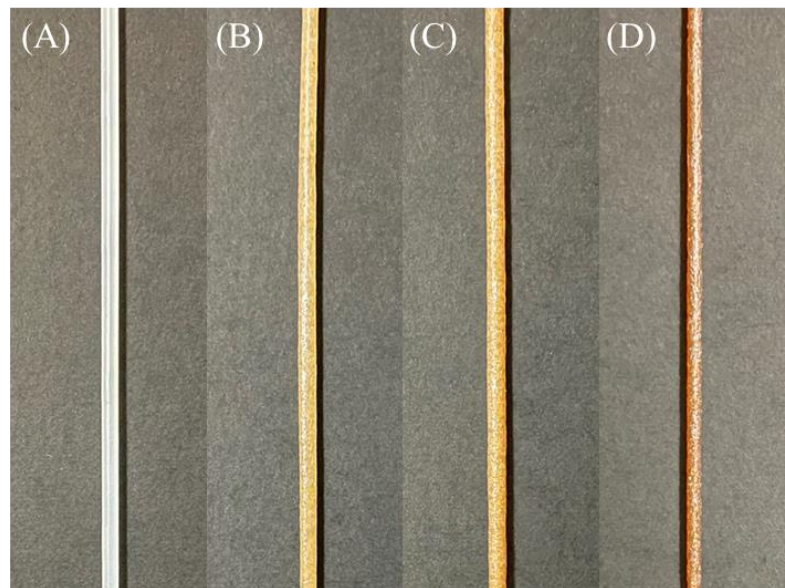
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

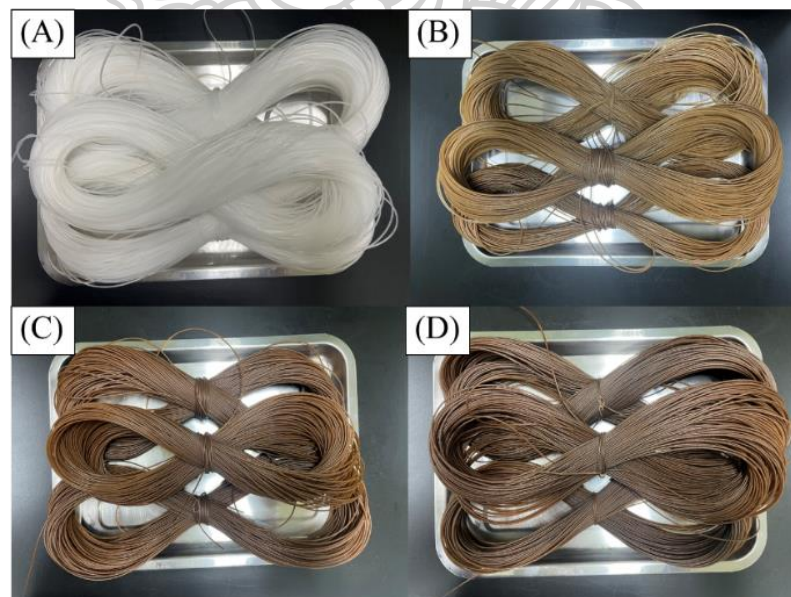
งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะทำการเตรียมวัสดุคอมพอสิตระหว่าง LDPE และผงซีลี้อยไม้สักที่เป็นของเสียจากงานเฟอร์นิเจอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน (Silane) สำหรับนำมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการผสมและขึ้นรูปเป็นเส้นฟิลาเมนต์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ควบคุมขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 1.5-1.7 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติการไหลและสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอสิตระหว่าง LDPE กับผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/TP) และศึกษาสมบัติเชิงกลวิสโคอีลาสติก จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 การเตรียมเส้นฟิลาเมนต์และพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/TP) โดยกำหนดปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ 0, 3, 6 และ 9wt% ตามลำดับ และตอนที่ 2 การเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ และพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/TP)

4.1 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สักที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (APTMS-Teak powder)

งานวิจัยนี้ต้องทำการเตรียมเส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP ที่สัดส่วน 0, 3, 6 และ 9wt% ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5-1.7 มิลลิเมตร ซึ่งจากเส้นฟิลาเมนต์ที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการอัดรีดนี้ เส้นฟิลาเมนต์ LDPE จะมีสีขาวขุ่น มีผิวเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งเส้น ส่วนเส้นฟิลาเมนต์ที่มีการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักจะมีสีน้ำตาล พื้นผิวของเส้นฟิลาเมนต์มีลักษณะผิวที่หยาบสม่ำเสมอตลอดทั้งเส้น เนื่องจากมีอนุภาคผงซีลี้อยไม้สักกระจายตัวที่บริเวณผิวด้านนอก โดยวัสดุคอมพอสิตจะมีสีเข้มและมีผิวที่หยาบมากขึ้นเมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยของ Mohd Nazri Ahmad และคณะ [35] ดังแสดงในภาพที่ 41 และภาพที่ 42



ภาพที่ 41 แสดงลักษณะผิวของเส้นฟิลาเมนต์ (A) neat LDPE, (B) LDPE/TP3, (C) LDPE/TP6 และ (D) LDPE/TP9

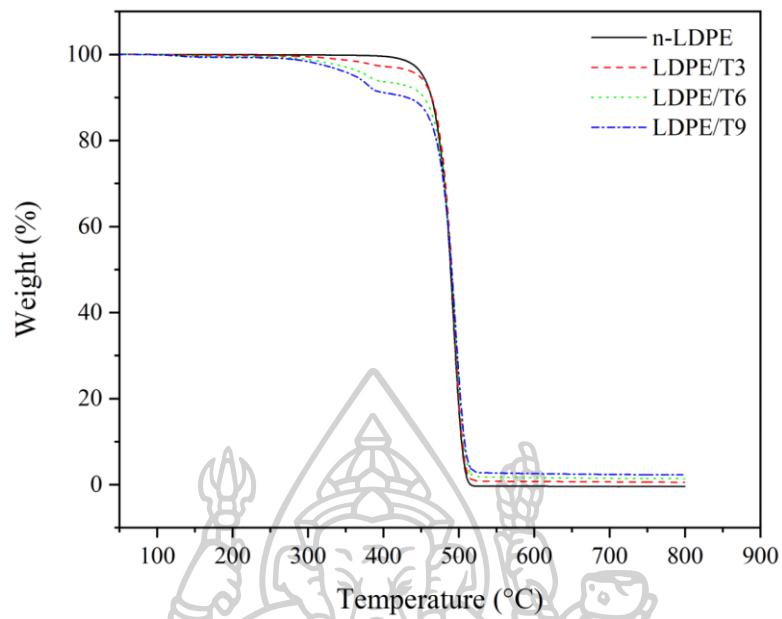


ภาพที่ 42 แสดงตัวอย่างเส้นฟิลาเมนต์ของ (A) neat LDPE, (B) LDPE/TP3, (C) LDPE/TP6 และ (D) LDPE/TP9

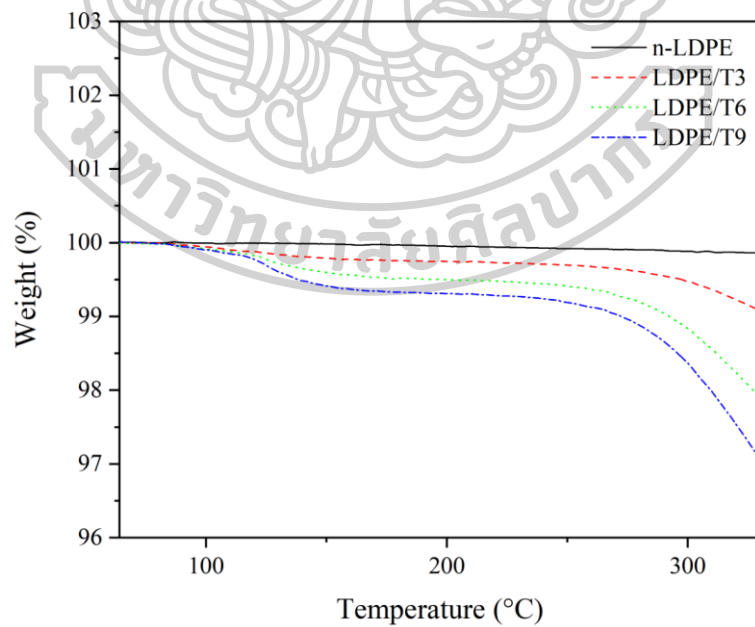
4.1.1 การศึกษาความเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

การศึกษาความเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่มีปริมาณ APTMS-Teak powder 0, 3, 6 และ 9wt% ทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส จนถึง 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที โดย TGA Thermogram จะแสดงดังในภาพที่ 43 ภาพที่ 44 และตารางที่ 8

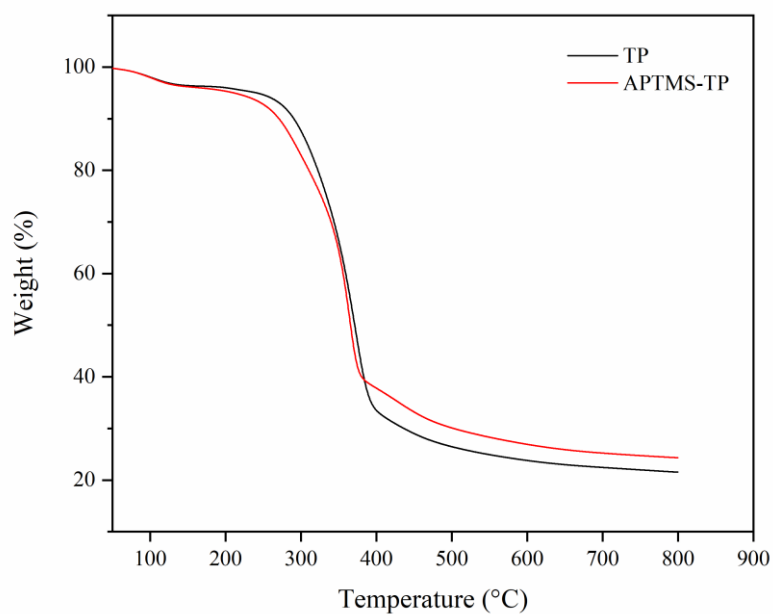
จากผลการทดสอบ TGA พบว่าเส้นฟิลาเมนต์ neat-LDPE จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนเพียงขั้นเดียวที่อุณหภูมิ 490.73 องศาเซลเซียส โดยสลายตัวทางความร้อน 100% และไม่เหลือเถ้า (Residual 0%) ในขณะที่เส้นฟิลาเมนต์ของวัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP จะเกิดการสลายตัวทางความร้อน 3 ขั้น โดยในขั้นแรกนั้นจะเป็นการระเหยของน้ำและความชื้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส เมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักขั้นนี้เพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากผงซีลี้อยไม้สักสามารถดูดความชื้นได้ดี ดังนั้นปริมาณความชื้นก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม ในขั้นที่ 2 และ 3 จะเป็นการสลายตัวของผงซีลี้อยไม้สักที่ช่วงอุณหภูมิ 250-500 องศาเซลเซียส และเป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์ LDPE ที่ช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยของ Norma E. Marcovich และคณะ [36] ที่ได้ทดสอบ TGA ของผงไม้โดยจะพบว่าเฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ที่เป็นส่วนประกอบในผงไม้จะมีการสลายตัว (thermal depolymerization) ในช่วงอุณหภูมิ 175-400 องศาเซลเซียส โดยจะเป็นการสลายตัวของพันธะกลูโคไซด์ิก (glucosides linkage) และในช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 450 องศาเซลเซียส จะเป็นการสลายตัวของสารประกอบลิกนิน (lignin) ไปเป็นเถ้า (Char) เมื่อทำการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักเพิ่มขึ้น พบว่าวัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP3, LDPE/TP6 และ LDPE/TP9 จะมีอุณหภูมิการสลายตัว ($T_{inflect}$) ในช่วงที่มีการลดลงของน้ำหนักสูงสุดที่ 495.09, 495.22 และ 496.22 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE เห็นว่าการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนเพิ่มขึ้นจะไปทำหน้าที่เป็นสารกั้นความร้อน (Heat barrier) ที่จะชะลอการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ เมื่อทำการทดสอบจนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่า LDPE สามารถเกิดการสลายตัวจนหมดไป แต่วัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP3, LDPE/TP6 และ LDPE/TP9 จะเหลือเถ้าที่ 0.58, 1.45 และ 2.28 % ตามลำดับ ซึ่งเถ้าจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของผงซีลี้อยไม้สักเมื่อเปรียบเทียบกับซีลี้อยไม้ที่เหลืออยู่ของ APTMS-TP ในตารางที่ 8 และตารางที่ 9



ภาพที่ 43 แสดง TGA Thermogram ของ neat-LDPE และ LDPE/TP ที่เติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt%



ภาพที่ 44 แสดง TGA Thermogram ของ neat-LDPE และ LDPE/TP ที่เติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt% แสดงให้เห็นการลดลงของน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 45 แสดง TGA Thermogram ของ Teak powder (TP) และ APTMS-TP

ตารางที่ 8 แสดงข้อมูลจาก Thermogravimetric analysis ของ Teak powder (TP), APTMS-Teak powder และคอมพอสิต LDPE/TP

Sample	T _{onset} (°C)			T _{endset} (°C)			T _{inflect.} (°C)			Residue (%)		
	1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd	1 st	2 nd	3 rd
TP	89.26	320.45	426.62	129.23	389.32	511.36	105.67	372.33	427.67	96.32	30.78	21.69
APTMS-TP	86.73	325.15	413.52	126.52	375.02	520.39	104.33	364.67	427.00	96.06	37.83	24.47
n-LDPE	473.31	-	-	505.12	-	-	490.73	-	-	0	-	-
LDPE/T3	105.15	333.97	478.18	128.85	391.03	504.89	108.67	382.45	495.09	99.59	97.15	0.58
LDPE/T6	119.69	344.49	475.45	138.09	390.55	507.65	125.33	382.12	495.22	99.36	93.60	1.45
LDPE/T9	111.11	338.42	476.56	139.02	389.49	508.41	124.33	381.47	496.22	99.16	91.10	2.28

จากภาพที่ 45 และตารางที่ 8 พบว่า APTMS-TP จะมีน้ำหนักเหลือจากขั้นตอนการสลายตัวในขั้นที่ 3 มากกว่าผงซีลี้อยไม้สักที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว (TP) โดย APTMS-TP จะมี Residue เท่ากับ 24.47 เปอร์เซ็นต์ หรือ 2.513 มิลลิกรัม ส่วน TP จะมี Residue เท่ากับ 21.69 เปอร์เซ็นต์ หรือ 2.245 มิลลิกรัม แสดงให้เห็นได้ว่าเก้าอี้ที่เหลืออยู่นั้นนอกจากเป็นเก้าอี้จากผงซีลี้อยไม้สักแล้วยังมีส่วนของสารเชื่อมประสานโซเลนเหลืออยู่ด้วย เมื่อนำสัดส่วนที่เหลืออยู่ของเก้าอี้จาก APTMS-TP มาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการเหลืออยู่ของเก้าอี้ในคอมพอสิต LDPE/TP จะได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งจะพบว่าน้ำหนักเก้าอี้ที่เหลือจากการทดสอบ TGA และที่ได้จากการคำนวณมีค่าไม่แตกต่างกัน ยืนยันได้ว่าสัดส่วนการผสมของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP ที่มีการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt% มีความเข้มข้นของผงซีลี้อยไม้สักใกล้เคียงตามสัดส่วนที่กำหนด

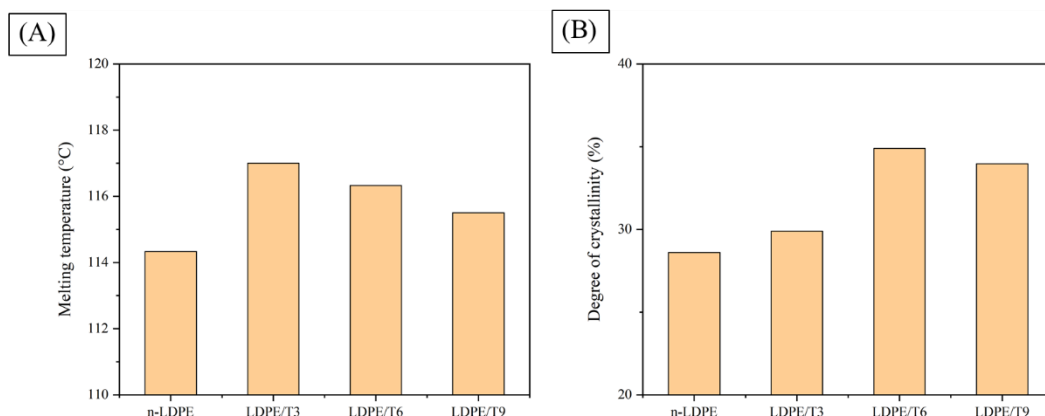
ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักที่เหลือจากการทดสอบ TGA กับน้ำหนักที่เหลือจากการคำนวณ โดยอ้างอิงจากน้ำหนักที่เหลืออยู่ของ APTMS-TP 24.47%

Sample	TGA test	APTMS-TP content (mg)	Residue at 3 rd (mg)	
	Weight (mg)		test value	Cal. Value
TP	10.353	10.353	2.245	-
APTMS-TP	10.270	10.270	2.513	2.513
n-LDPE	7.046	-	-	-
LDPE/T3	6.531	0.196	0.0386	0.0479
LDPE/T6	5.728	0.344	0.0852	0.0841
LDPE/T9	5.318	0.463	0.1282	0.1132

4.1.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนและหาปริมาณผลึกของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP ที่เติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9wt% ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ในโหมด Heat-Cool-Heat ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อศึกษาผลของการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่มีต่ออุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ดังที่แสดงในภาพที่ 46, ภาพที่ 47, ตารางที่ 10 และตารางที่ 11

สำหรับการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานครั้งที่ 1 (1st Heat) จะแสดงข้อมูลทางความร้อนในตารางที่ 8 จากผลการทดสอบ DSC ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP ที่เติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9wt% พบว่า neat LDPE มีค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ที่ 114.33 องศาเซลเซียส ส่วน LDPE/TP3, LDPE/TP6 และ LDPE/TP9 ที่ค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ที่ 117.00, 116.33 และ 115.50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า T_m ของคอมพอสิต LDPE/TP จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ LDPE ซึ่งจากงานวิจัยของ Y. H. Cui และคณะ [37] และงานวิจัยของ Hasan Biltekin และคณะ [38] ที่มีลักษณะผลการทดสอบเช่นเดียวกัน อนุภาคผงไม้จะไปเพิ่มความเสถียรทางความร้อนให้กับสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ต้องใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ LDPE สามารถเคลื่อนไหวได้ แต่เมื่อเติมผงไม้ในปริมาณที่มากขึ้นจาก 3 wt% ไป 6 wt% และ 9 wt% นั้น พบว่าค่า T_m จะค่อย ๆ ลดลงเป็นผลมาจากความสมบูรณ์ของผลึกพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นในตารางที่ 10 และอุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) ในตารางที่ 11 ปริมาณผงซีลี้อยไม้สักจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยก่อผลึก (nucleating agent) ให้การเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ 3 และ 6 wt% มีปริมาณผลึกและ T_c เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ neat LDPE เนื่องจากอนุภาคผงไม้จะเหนี่ยวนำให้สายโซ่พอลิเมอร์ LDPE ตกผลึกได้ในปริมาณมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของผลึกพอลิเมอร์ LDPE อย่างไรก็ตามในขณะเดียวกันการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักในจำนวนมากยังสามารถที่จะไปขวางกระบวนการเกิดผลึกของสายโซ่พอลิเมอร์ LDPE เห็นได้ในคอมพอสิต LDPE/TP9 ที่มีปริมาณผลึกลดลง ซึ่งงานวิจัยของ Ahmed M. Youssef และคณะ [39] พบปริมาณผลึกลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อเติมปริมาณสารเสริมแรงเพิ่มขึ้น



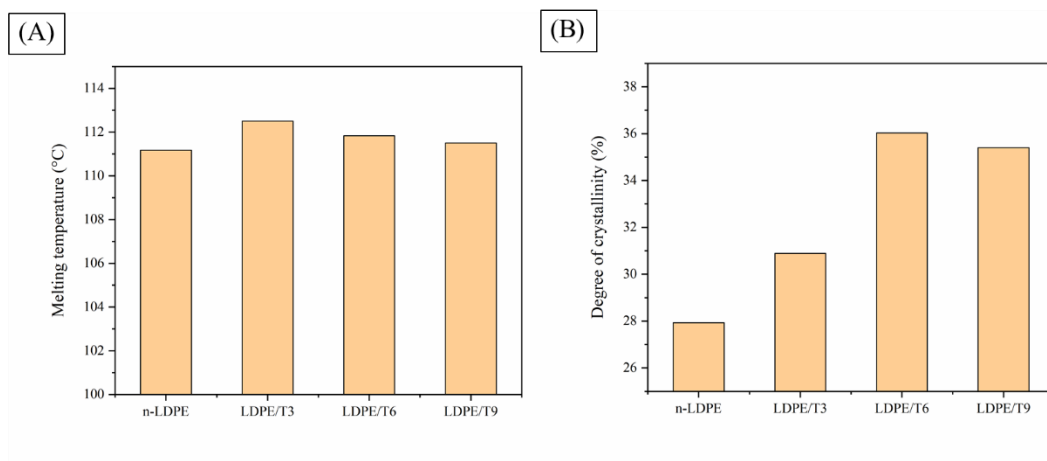
ภาพที่ 46 กราฟแท่งเปรียบเทียบ (A) อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และ (B) ปริมาณผลึก (X_c) ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1

ตารางที่ 10 แสดงข้อมูล DSC ในขั้นตอนของการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP

Sample	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
n-LDPE	114.33	83.84	28.61
LDPE/T3	117.00	84.99	29.90
LDPE/T6	116.33	96.12	34.90
LDPE/T9	115.50	90.58	33.97

สำหรับขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (2nd Heat) จะถูกแสดงในตารางที่ 11 โดยจะพบว่า อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 111-112 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากวัสดุถูกล้างประวัติทางความร้อนแล้วในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (1st Heat) และถูกทำให้เย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ (10 °C/min) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีระยะเวลาในการเคลื่อนไหว (Mobility) และการจัดเรียงตัวเกิดเป็นผลึกใหม่ (Rearrangement) จากผลการทดสอบ DSC ในขั้นตอนนี้คอมพอสิต LDPE/TP3, LDPE/TP6 และ LDPE/TP9 มีอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ที่ 97.50, 97.17 และ 97.33 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ LDPE ที่มีค่า T_c เท่ากับ

96.83 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าสายโซ่พอลิเมอร์ LDPE ในคอมพอสิตสามารถจัดเรียงตัวเกิดเป็นผลึกได้เร็วกว่า neat LDPE เป็นผลมาจากอิทธิพลของผงซีลีเนียมที่ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent)



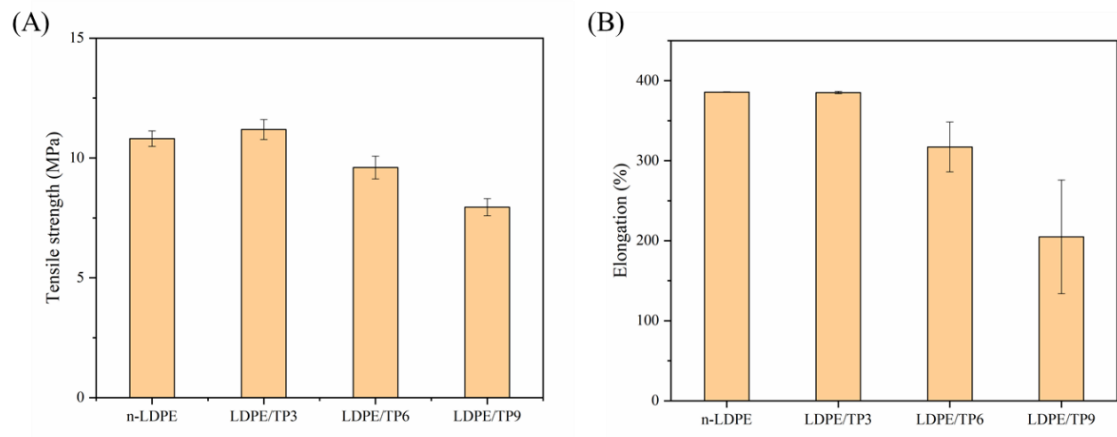
ภาพที่ 47 กราฟแท่งเปรียบเทียบ (A) อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และ (B) ปริมาณผลึก (X_c) ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

ตารางที่ 11 แสดงข้อมูล DSC ในขั้นตอนของการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP

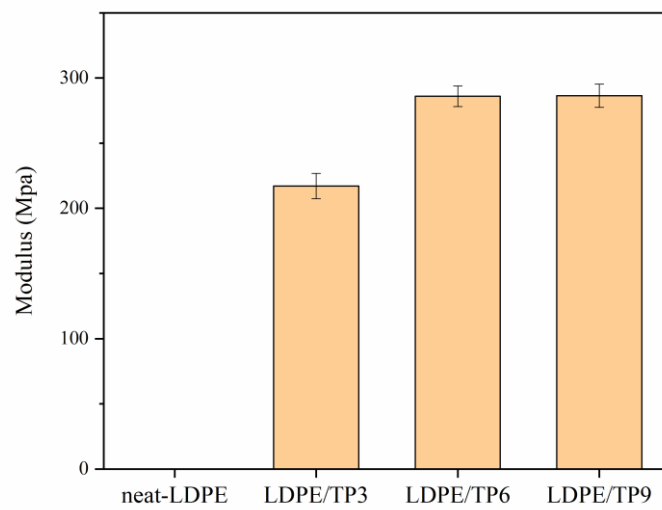
Sample	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
n-LDPE	111.17	96.83	81.84	27.93
LDPE/T3	112.50	97.50	87.80	30.89
LDPE/T6	111.83	97.17	99.23	36.03
LDPE/T9	111.50	97.33	94.40	35.40

4.1.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบสมบัติการดึงยืด (Tensile testing)

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยืดของเส้นฟิลาเมนต์ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) จากการทดสอบพบว่า neat LDPE จะเกิดการยืดแบบ cold drawing กล่าวคือสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเลื่อนผ่าน (slip) กันและเกิดการจัดเรียงตัวตามแนวแรงได้ โดยมีระยะยืดของ cold drawing ที่ค่อนข้างยาว และมีค่า Tensile strength เท่ากับ 10.803 MPa ค่า elongation เท่ากับ 385.62% เมื่อทำการเติมผงซีลี้อยไม้สักที่ 3, 6 และ 9 wt% พบว่าคอมพอสิตมีค่า Tensile strength เท่ากับ 11.186, 9.602 และ 7.947 MPa ตามลำดับ และมีค่า elongation เท่ากับ 385.15, 317.16 และ 204.83% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 48 จะเห็นว่าวัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ 3 wt% เหมือนกันกับงานวิจัยของ Mohd Nazri Ahm และคณะ [40] โดยขณะทำการทดสอบ LDPE/TP3 จะเกิดการดึงยืดแบบ cold drawing เช่นเดียวกันกับ neat LDPE แต่เมื่อปริมาณผงซีลี้อยไม้สักเพิ่มเป็น 6 และ 9 wt% พบว่าค่า Tensile strength และค่า Elongation ลดลง มีระยะการยืดแบบ cold drawing ที่สั้นก่อนเกิดการขาดออกขณะที่ทำการทดสอบ เนื่องจากปริมาณผงซีลี้อยไม้สักมีขนาดใหญ่กว่าและมีขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสายโซ่พอลิเมอร์ LDPE เมื่อให้แรงทดสอบการดึงยืดจะเกิดการสะสมของแรงเค้นที่บริเวณอนุภาคผงไม้ได้ภายในเส้นฟิลาเมนต์ ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดรอยร้าวและชิ้นงานขาดในที่สุด โดยจากงานวิจัยของ Yali Li [41] ที่ศึกษาผลของปริมาณ Wood ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต พบว่าการเติมปริมาณเส้นใยไม้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ ในขณะที่เดียวกันเมื่อเติมปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลง ส่วนในงานวิจัยของ Han-Seung Yang และคณะ [42] อธิบายการลดลงของ ค่า Tensile strength และค่า Elongation ว่าเกิดจากอนุภาคผงไม้ขวางแนวของโมเลกุลพอลิเมอร์ และยับยั้งการกระจายความเค้นที่วัสดุจึงส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวลดลงเมื่อเพิ่มอนุภาคผงไม้ แต่อย่างไรก็ตามการเติมผงซีลี้อยไม้สักจะไปเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการเสีรูปของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP ดังแสดงในภาพที่ 49 ที่จะเห็นว่า Modulus จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมผงซีลี้อยไม้สัก



ภาพที่ 48 แสดงค่า Tensile strength และค่า Elongation ของเส้นฟิลาเมนต์พอลิเมอร์ LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP



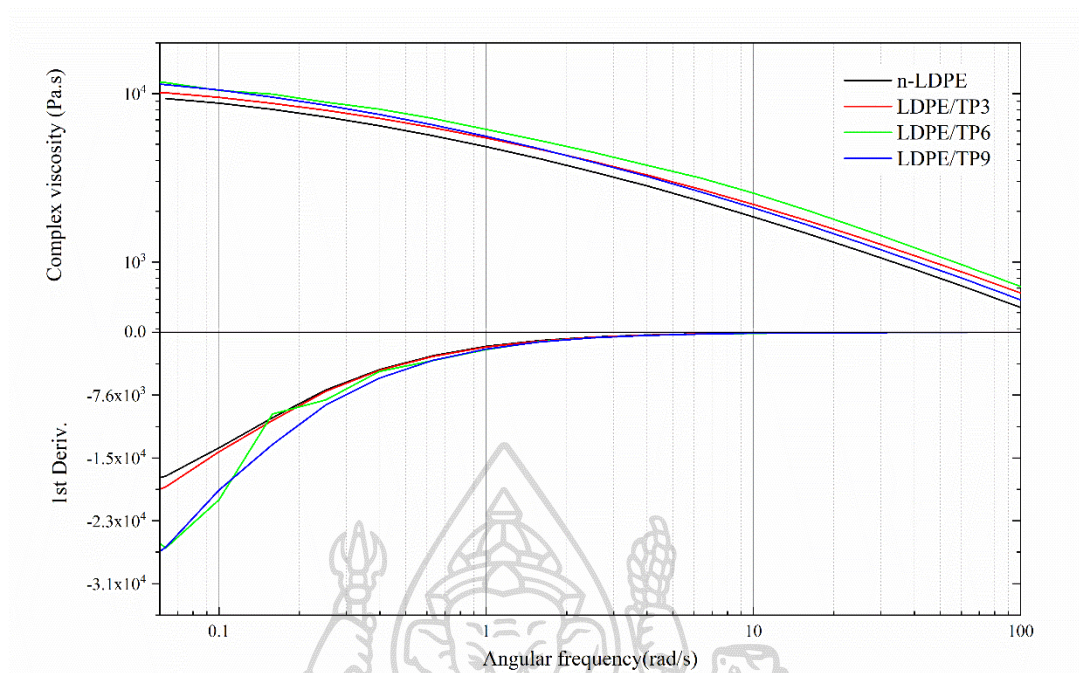
ภาพที่ 49 แสดงค่า Modulus ของเส้นฟิลาเมนต์พอลิเมอร์ LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP

*หมายเหตุ : neat-LDPE ไม่มีผลการทดสอบ จึงไม่ถูกรายงานในภาพที่ 49

4.1.4 การศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุคอมพอสิต

การศึกษา Rheology properties ด้วยเครื่อง Rotational rheometer แบบใช้แผ่นคู่ขนาน (Parallel Plate) ในการทดสอบนี้จะใช้ชิ้นงานที่ได้จากการนำเส้นฟิลาเมนต์ไปตัดเป็นเม็ดแล้วกดอัดด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding machine) ให้เป็นแผ่นซีท แล้วทำการตัดด้วยเลเซอร์ให้มีลักษณะเป็นวงกลมที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ 160 องศาเซลเซียส ในช่วงความถี่ (Frequency) 0.1 ถึง 100 เรเดียนต่อวินาที และทำการศึกษาในช่วงของ Linear viscoelasticity ที่มีค่า %strain เท่ากับ 5

จากภาพที่ 50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) กับ Angular frequency ของพอลิเมอร์ LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP ที่ปริมาณผงซีล้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt% พบว่าพอลิเมอร์และคอมพอสิตทั้งหมดแสดงพฤติกรรมแบบ Shear-thinning คือสมบัติการไหลของวัสดุมีความหนืดลดลง เมื่อมีอัตราการเฉือน (Shear rate) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการคลายเกลียว (Disentanglement) แล้วสามารถไหลไปตามแนวแรงได้ดีขึ้นจึงทำให้ค่าความหนืดลดลง กล่าวคือ พอลิเมอร์ LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP ทุกสัดส่วนจะไหลได้ง่ายขึ้นและมีค่าความหนืดที่ลดน้อยลงตามอัตราการเฉือนที่มากขึ้น เมื่อทำการเติมปริมาณผงซีล้อยไม้สักเพิ่มขึ้นที่ 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ในช่วงเริ่มต้น (ที่ความถี่ต่ำ) มีค่ามากไปตามปริมาณผงไม้ที่มากขึ้น เมื่อเพิ่มความถี่จะเกิดปรากฏการณ์ Pseudoplastic จากงานวิจัยของ Kishor Biswas และคณะ [43] ได้ศึกษาสมบัติการไหลของคอมพอสิต HDPE/Teak wood flour พบในลักษณะเดียวกันคือความหนืดเชิงซ้อนของคอมพอสิตจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมปริมาณ Teak เพิ่มมากขึ้นที่ระดับความเข้มข้นของผงซีล้อยไม้สักต่ำ ๆ เป็นเพราะมีความหนาแน่นของปริมาณผงไม้ในเมทริกซ์พอลิเมอร์มากขึ้น ทำให้อนุภาคผงไม้ไปขวางแนวการไหลตามแนวแรงของพอลิเมอร์ และมีการชนกันของอนุภาคผงไม้มากขึ้น โมเลกุลของพอลิเมอร์จึงไหลได้ยากขึ้นตามปริมาณของผงไม้ที่เติม จากงานวิจัยของ H.C. Chen และคณะ [44] แสดงลักษณะผลของความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันเมื่อเติมปริมาณของตัวเติมมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากการทดสอบเมื่อความถี่ในการเฉือนเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนืดเชิงซ้อนของคอมพอสิต LDPE/TP9 จะที่มีค่าลดต่ำลง ดังแสดงในตารางที่ 13 โดยความหนืดของ LDPE/TP9 มีค่าต่ำกว่า LDPE/TP6 และต่ำกว่า LDPE/TP3 ในช่วงอัตราการเฉือน 2 ถึง 100 เรเดียนต่อวินาที เนื่องจากความเข้มข้นผงไม้ที่เพิ่มขึ้นเมื่อให้แรงเฉือนจะไม่สามารถเกิดการ packing แบบสุ่มที่ระดับความเข้มข้นวิกฤตของอนุภาคผงไม้ได้และจะเพิ่มโอกาสเหนียวนำไปเกิดการรวมกลุ่มกัน (Agglomerate) จนมีโครงสร้างแบบ Anisotropic มากขึ้น ทำให้บางบริเวณมีความหนาแน่นของผงไม้น้อยลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์บริเวณนี้สามารถไหลได้ง่ายขึ้น [35]



ภาพที่ 50 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) และค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (1st Derivative) ของพอลิเมอร์ LDPE และวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 50 ในส่วนของค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (1st Derivative) ของพอลิเมอร์ LDPE และวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP และตารางที่ 12 จะแสดงค่าความชันที่เปลี่ยนแปลงไปของค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ซึ่งแสดงว่าการไหลของของเหลวผสมนี้ไม่เป็นนิวโตเนียน (Newtonian fluid) การลดลงของความหนืดเมื่อความถี่ในการไหลเพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic โดยจะพบลักษณะการเพิ่มขึ้นของกราฟในช่วง 0.1 ถึง 10 rad/s

จากตารางที่ 13 จะพบว่า Complex viscosity ที่ความถี่ 1 rad/s มีค่าเพิ่มขึ้นไปตามปริมาณของผงไม้ที่ผสมยกเว้นการเติมผงไม้ที่ 6 wt% ซึ่งพบว่าการลดลงของความหนืดเนื่องจากความถี่เกิดขึ้นอย่างเด่นชัดมากที่สุด โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากค่า 1st Derivative ที่ 10 rad/s ที่มีค่าติดลบมากที่สุด

ตารางที่ 12 แสดงข้อมูลของค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (1^{st} Derivative) กับความถี่ (Frequency) ของ LDPE และวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP

frequency	1^{st} Derivative			
	LDPE	TP3	TP6	TP9
63.1	-8.8	-10.4	-12.2	-10.0
39.8	-13.1	-15.4	-18.3	-14.9
25.1	-25.7	-29.9	-36.3	-29.3
15.8	-49.1	-57.0	-70.1	-56.2
10.0	-93.4	-106.2	-126.7	-107.8
6.3	-174.8	-195.6	-208.5	-202.3
4.0	-315.5	-349.5	-376.7	-366.4
2.5	-563.2	-614.9	-671.1	-659.5
1.6	-987.6	-1056.4	-1149.0	-1165.9
1.0	-1695.2	-1777.3	-2093.8	-2019.9
0.6	-2846.3	-2921.7	-3430.6	-3410.4
0.4	-4536.3	-4630.9	-4768.7	-5588.5
0.3	-7012.7	-7162.8	-8219.2	-8837.0
0.2	-10395.6	-10736.4	-9946.0	-13662.5
0.1	-14045.8	-14519.1	-20356.7	-19168.2
0.1	-17474.4	-18791.1	-26240.6	-26157.9
0.0	-19140.6	-21335.6	-20631.3	-30543.3

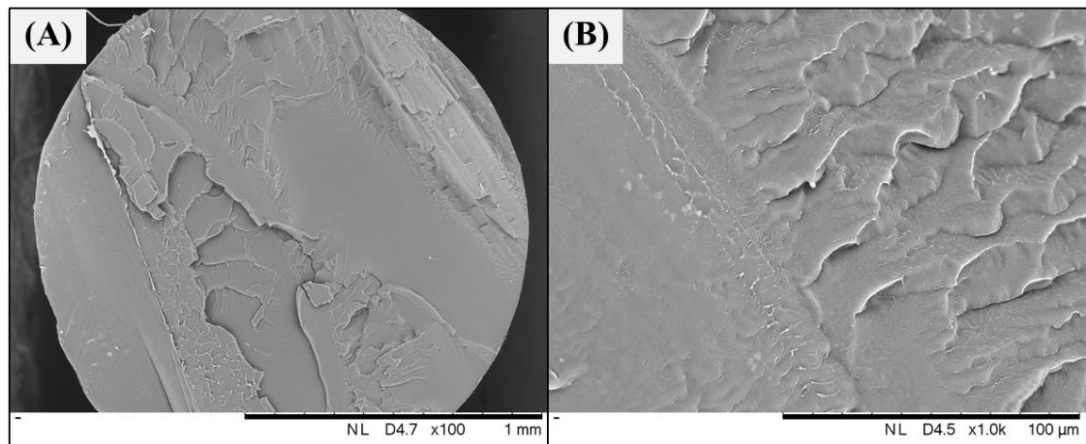
ตารางที่ 13 แสดงค่า Complex viscosity ของพอลิเมอร์ neat LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP ที่ความถี่ 1 rad/s

Sample	Complex viscosity (Pa.s)
Neat LDPE	4831.35
LDPE/TP3	5454.15
LDPE/TP6	6122.16
LDPE/TP9	5574.07

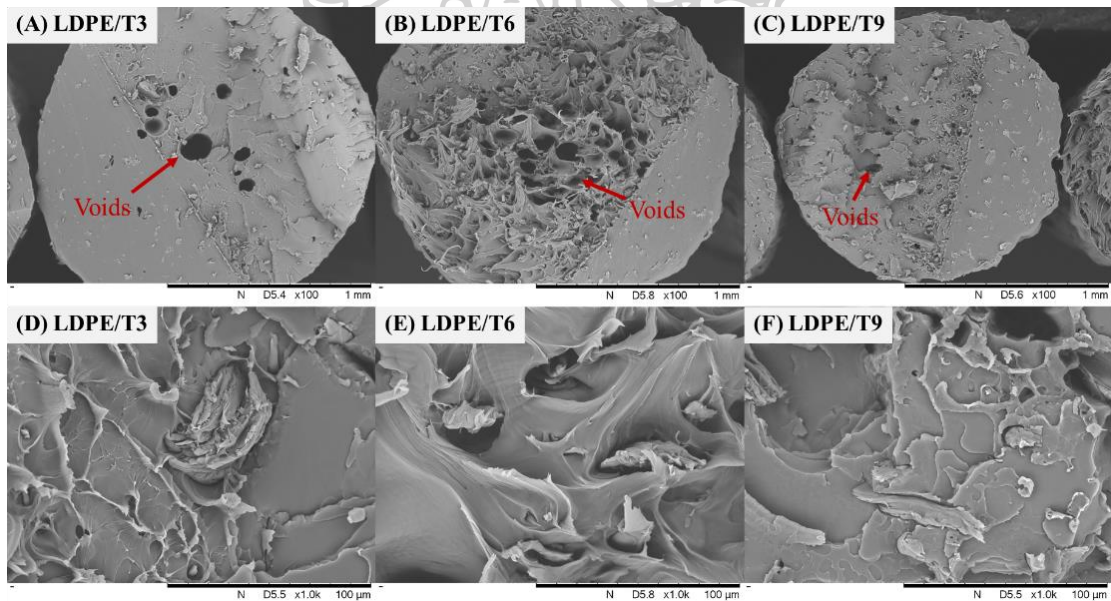
4.1.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นฟิลาเมนต์คอมพอสิต LDPE/TP ที่ปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt% ที่ได้จากการหักในไนโตรเจนเหลวถูกแสดงในภาพที่ 51 และภาพที่ 52 ที่กำลังขยาย 100 เท่า จะพบว่า neat-LDPE มีพื้นผิวการแตกหักแบบเหนียว (Ductile) เนื่องจากลักษณะการแตกหักมีริ้วที่แสดงถึงการยืดออกของพอลิเมอร์ สำหรับเส้นฟิลาเมนต์คอมพอสิต LDPE/TP3, LDPE/TP6 และ LDPE/TP9 เห็นพื้นผิวการแตกหักแบบเหนียว (Ductile) มีการยืดออกของพอลิเมอร์ที่ชัดเจนและจะเห็นผงซีลี้อยไม้สักกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกสัดส่วน นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นช่องว่าง (Voids) ขนาดใหญ่ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP3 และ LDPE/TP6 ในภาพที่ 52 เนื่องจากเกิดการหดตัวของพอลิเมอร์เมทริกซ์ในบริเวณตรงกลางของเส้นฟิลาเมนต์ในระหว่างทำการหล่อเย็นเส้นฟิลาเมนต์ (ทำการหล่อเย็นด้วยอ่างน้ำแล้วนำไปผ่านชุดอุปกรณ์หล่อเย็นที่ cooling ด้วยน้ำแข็ง) โดยที่บริเวณจุดศูนย์กลางของเส้นฟิลาเมนต์จะเย็นตัวช้ากว่าบริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์ เมื่อมีความเค้นตกค้างอยู่จะเกิดการหดตัวของพอลิเมอร์ LDPE ที่บริเวณดังกล่าวและก่อให้เกิดช่องว่างเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้แสดงให้เห็นว่าการเติม APTMS ที่ 2 wt% เพื่อเป็นสารเชื่อมประสานนั้นไม่เพียงพอต่อการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ชอบน้ำและผงซีลี้อยไม้สักที่มีความชอบน้ำ โดยจะเกิดขึ้นคล้ายกับงานวิจัยของ Yerong Huang และคณะ [45] ที่ทำการเติม MA 1 wt% เป็นสารเชื่อมประสานในวัสดุคอมพอสิต ABS/WPCs

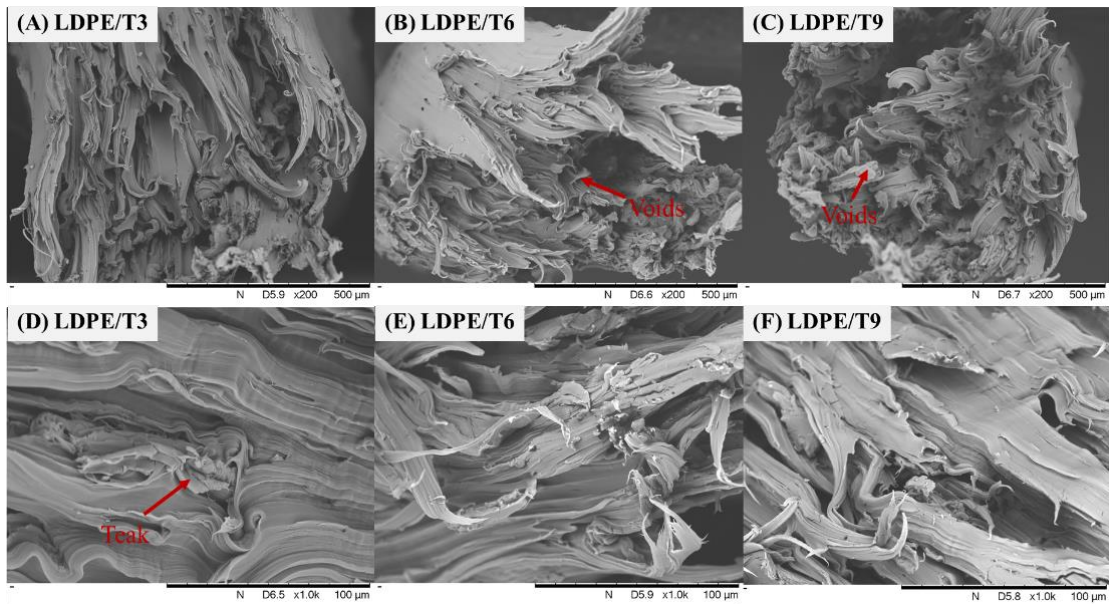
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นฟิลาเมนต์คอมพอสิต LDPE/TP ที่ปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt% ที่ได้หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile testing) โดยจะถูกแสดงในภาพที่ 53 พบว่าคอมพอสิต LDPE/TP ทั้ง 3 สัดส่วนแสดงการแตกหักแบบเหนียว (Ductile) อย่างชัดเจนโดยจะเห็นการยืดของพอลิเมอร์ตามแนวของแรงดึงและเห็นช่องว่าง (Voids) ที่เกิดจากการหลุดออกของซีลี้อยไม้สักที่บริเวณขาด



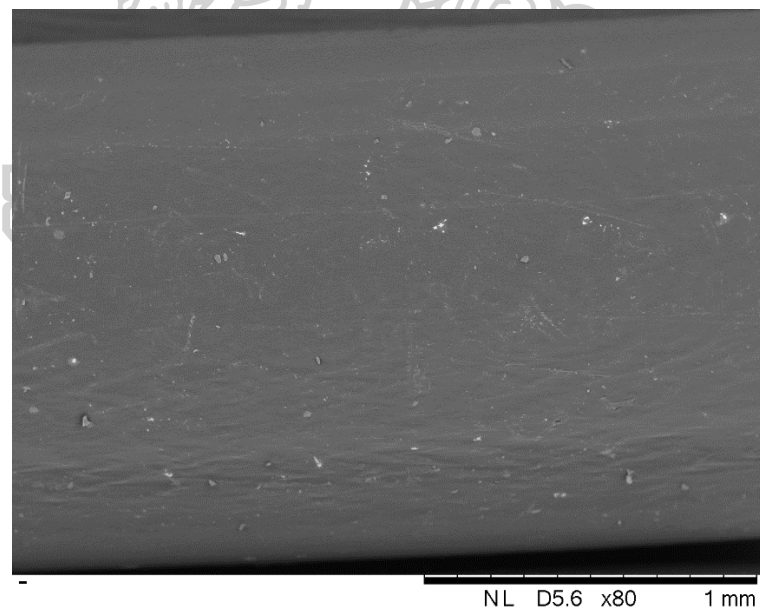
ภาพที่ 51 แสดงภาพ SEM แบบตัดขวางของเส้นฟิลาเมนต์ neat-LDPE ที่หักในไนโตรเจนเหลว



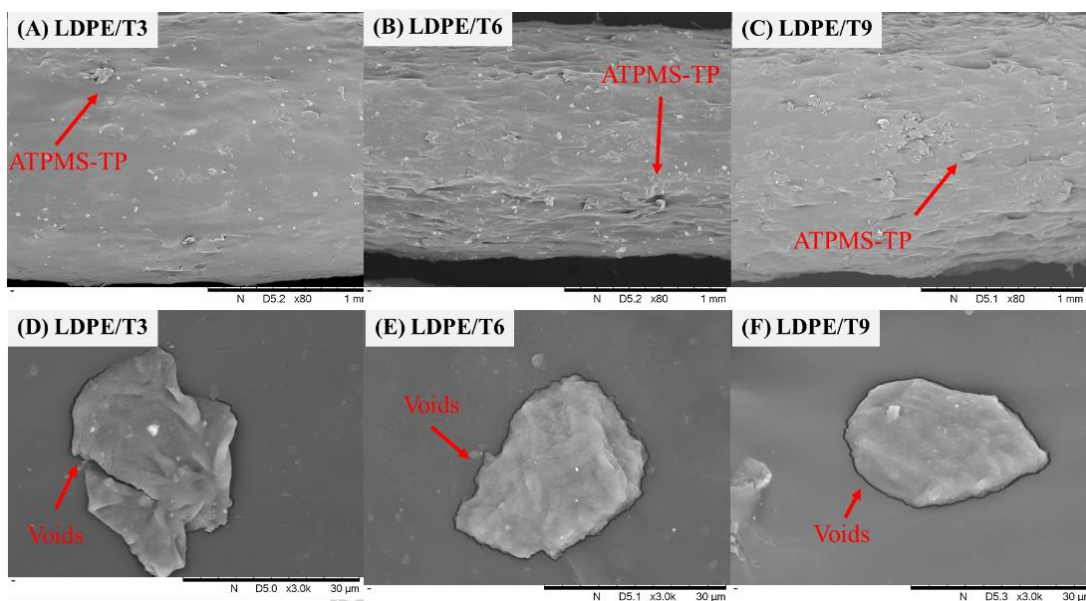
ภาพที่ 52 แสดงภาพ SEM แบบตัดขวางของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP ที่หักในไนโตรเจนเหลว
ที่กำลังขยาย 100 เท่า (A-C) และที่กำลังขยาย 1000 เท่า (D-F)



ภาพที่ 53 แสดงภาพ SEM แบบตัดขวางของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP หลังจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงหักที่กำลังขยาย 200 เท่า (A-C) และที่กำลังขยาย 1000 เท่า (D-F)



ภาพที่ 54 แสดงภาพ SEM ที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์ของ neat-LDPE ที่กำลังขยาย 80 เท่า

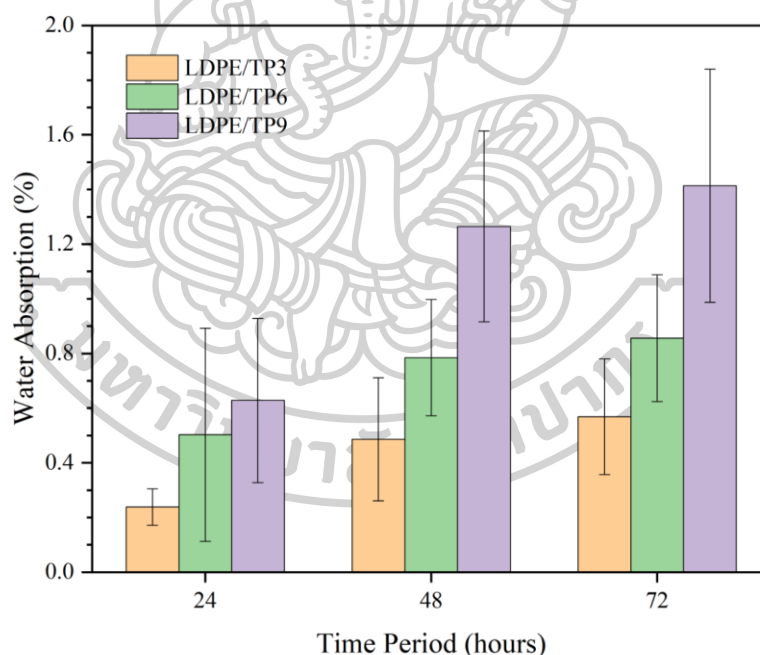


ภาพที่ 55 แสดงภาพ SEM ที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP ที่กำลังขยาย 80 เท่า (A-C) และที่กำลังขยาย 3000 เท่า (D-F)

สำหรับการศึกษาสัณฐานวิทยาที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์ neat-LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP ที่ปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt% โดยจะแสดงในภาพที่ 54 และภาพที่ 55 จะพบว่าเส้นฟิลาเมนต์มีผิวที่ขรุขระและมีผงซีลี้อยไม้สักที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์ โดยจะพบเห็นความขรุขระที่ผิวและผงซีลี้อยไม้สักมากขึ้นตามปริมาณผงไม้ที่เติมที่กำลังขยาย 80 เท่า และเมื่อทำการขยายภาพไปที่ 3000 เท่า จะพบเห็นช่องว่างระหว่างพอลิเมอร์และผงซีลี้อยไม้สัก แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเชื่อมประสานไซเลนที่ 2 wt% ไม่เพียงพอต่อการเชื่อมประสานระหว่างพอลิเมอร์ LDPE กับผงซีลี้อยไม้สัก

4.1.6 การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption)

การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ตามมาตรฐาน ASTM D570 [46] โดยทำการศึกษาผลของการเติมปริมาณผงซีลี้อยู่ไม้สักที่ระยะเวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ดังที่แสดงในภาพที่ 56 และตารางที่ 14 จากการทดลองพบว่าเส้นฟิลาเมนต์คอมพอลิเมอร์ LDPE/TP สามารถดูดซับน้ำได้เนื่องจากการเติมผงซีลี้อยู่ไม้สักที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติที่มีเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนประกอบหลัก เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสประกอบไปด้วยหมู่ hydroxyl group เป็นจำนวนมากยึดกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุล (dispersion force) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) จึงทำให้มีความชอบน้ำสูง (Hydrophilic) โดยเมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยู่ไม้สักเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้คอมพอลิเมอร์มีความสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากผงซีลี้อยู่ไม้สักบางส่วนจะอยู่ที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์ และบริเวณหัว-ท้ายของเส้นฟิลาเมนต์ที่น้ำจะสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่วงว่างที่เกิดจากการหดตัวขณะหล่อเย็นได้



ภาพที่ 56 แสดง Water Absorption ของวัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP

ตารางที่ 14 แสดงค่า Water Absorption ของวัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP

Sample	Water Absorption (%)		
	24 hr.	48 hr.	72 hr.
LDPE/TP3	0.238 ± 0.066 ^a	0.486 ± 0.225 ^{a, b, e}	0.569 ± 0.211 ^{b, c, e, h}
LDPE/TP6	0.503 ± 0.389 ^{a, e, h}	0.785 ± 0.213 ^{c, i}	0.856 ± 0.232 ^{d, i}
LDPE/TP9	0.628 ± 0.300 ^{e, i}	1.265 ± 0.349 ^{f, j}	1.414 ± 0.427 ^{g, j}

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในแนวสทมภ์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$)










4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE และผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/TP) ที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ

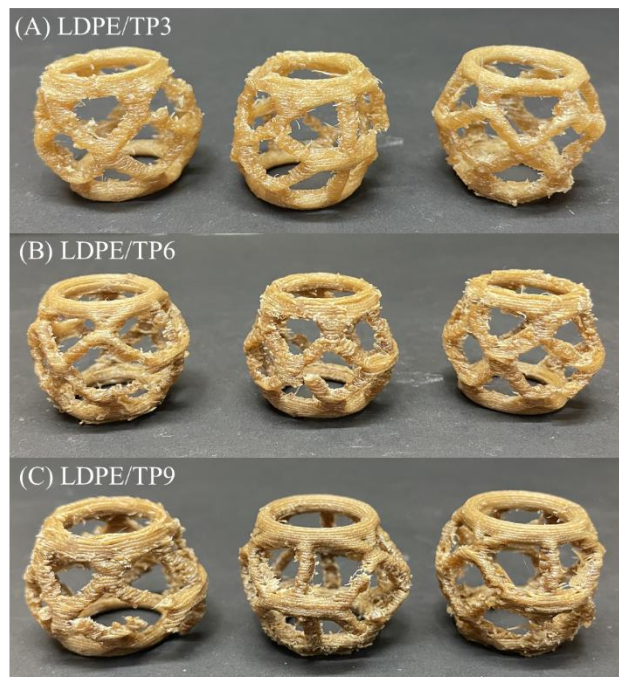
จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการพิมพ์ 3 มิติ จากเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE และ LDPE/TP ที่เติมผงซีลี้อยไม้สักที่ 3, 6 และ 9 wt% จะถูกแสดงในตารางที่ 15 ซึ่งในระหว่างขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ ให้มีความสมบูรณ์ตามโมเดลที่ออกแบบได้ในทุกโมเดล เนื่องจากการหล่อเย็นของชิ้นงาน 3 มิติจะเป็นการพาความร้อนออกจากชิ้นงานด้วยอากาศเย็น ซึ่งจะมีอัตราเร็วในการหล่อเย็นไม่เพียงพอต่อการคงตัวของชิ้นงาน 3 มิติ LDPE ณ อุณหภูมิห้อง (Ambient temperature) ที่กำหนด ดังนั้นในการพิสูจน์เอกลักษณ์ในตอนที 2 จึงไม่มีผลการทดสอบของ neat LDPE

เมื่อพิจารณาชิ้นงาน 3 มิติ หลังจากพิมพ์และแกะชิ้นส่วนซัพพอร์ตออก จะได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ดังแสดงในตารางที่ 15 จะเห็นว่าโมเดล Semi-spherical และ Cubic ในส่วนของชิ้นงานที่คล้ายกับตาข่ายจะมีความสมบูรณ์และดูแข็งแรงมากกว่าโมเดล Cylindrical ซึ่งในโมเดล Cylindrical โดยส่วนใหญ่ชิ้นส่วนที่เป็นตาข่ายมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ มีบางจุดที่เชื่อมติดกันด้วยเส้นฟิลาเมนต์เพียงเดียว เนื่องจากในระหว่างขั้นตอนการพิมพ์ ออกแบบซัพพอร์ตให้มีระยะห่างจากชิ้นงานที่มากไป จึงทำให้หัวฉีด (Nozzle) ขณะที่ย้ายตำแหน่งพิมพ์เกิดการยึดออกของเส้นฟิลาเมนต์หลอมเหลว จึงเป็นไปได้ว่าอาจจะเกิดการรั้งกันเกิดขึ้น จึงทำให้ส่วนที่เป็นชิ้นงานเลื่อนออกจากตำแหน่งพิมพ์ ส่งผลให้ส่วนที่เป็นตาข่ายของชิ้นงานมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

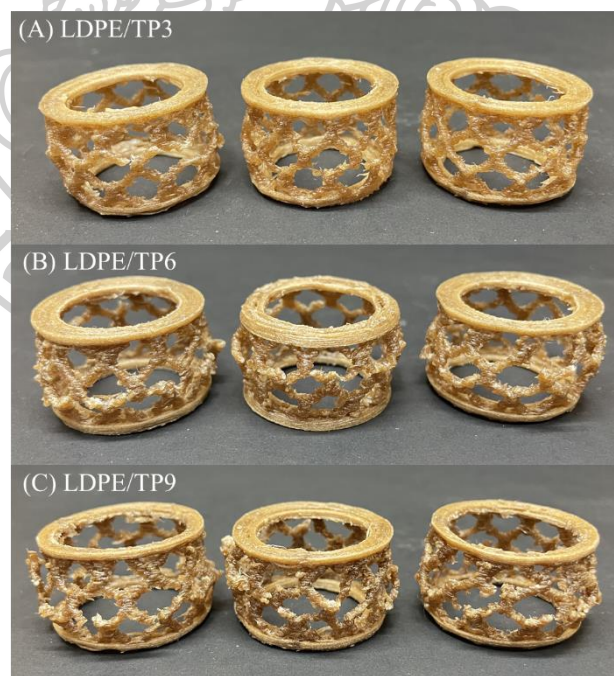
จากภาพที่ 57, 58 และภาพที่ 59 เป็นภาพของชิ้นงาน 3 มิติ หลังจากการทดสอบการกด (static compression test) ที่ระยะการกดที่ strain 80% ชิ้นงานทุกชิ้นงานจะเกิดเสียรูปหลังจากให้แรงกด โดยจะมีส่วนที่แตกหักบริเวณที่เป็นตาข่ายซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเชื่อมติดกันได้ไม่ค่อยดีในขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติ และมีการโค้งงอเนื่องจากแรงกดของบริเวณตาข่าย จากการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก ชิ้นงาน 3 มิติในทุกโมเดลของ LDPE/TP9 จะมีจุดแตกหักที่บริเวณตาข่ายและความเสียหายของชิ้นงานมากกว่าชิ้นงาน LDPE/TP3 และ LDPE/TP6 เนื่องจากปริมาณผงไม้ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความเหนียวของวัสดุลดลง เมื่อชิ้นงานได้รับแรงจึงแตกหักได้ง่าย โดยทั้ง 3 โมเดลเมื่อถูกกดที่ระยะ strain 80% ชิ้นงานจะเสียรูปโดยจะแบนออกทางด้านข้าง

ตารางที่ 15 แสดงตัวอย่างชิ้นงาน 3 มิติ ของวัสดุคอมพอสิตที่ขึ้นรูปในโมเดลต่าง ๆ

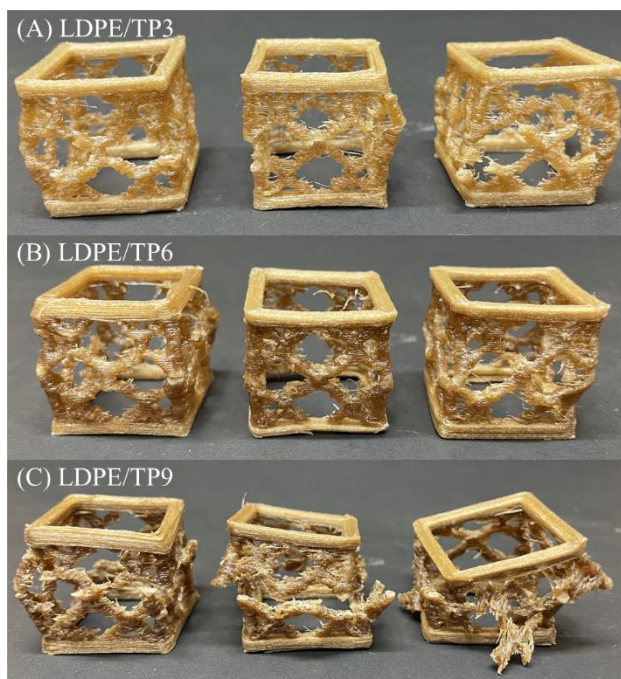
Sample	Semi-spherical	Cylindrical	Cubic
n-LDPE	N/A	N/A	N/A
LDPE/TP3			
LDPE/TP6			
LDPE/TP9			



ภาพที่ 57 ชิ้นงาน 3 มิติ โมเดล Semi-spherical ที่ผ่านการกด (static compression test)



ภาพที่ 58 ชิ้นงาน 3 มิติ โมเดล Cylindrical ที่ผ่านการกด (static compression test)



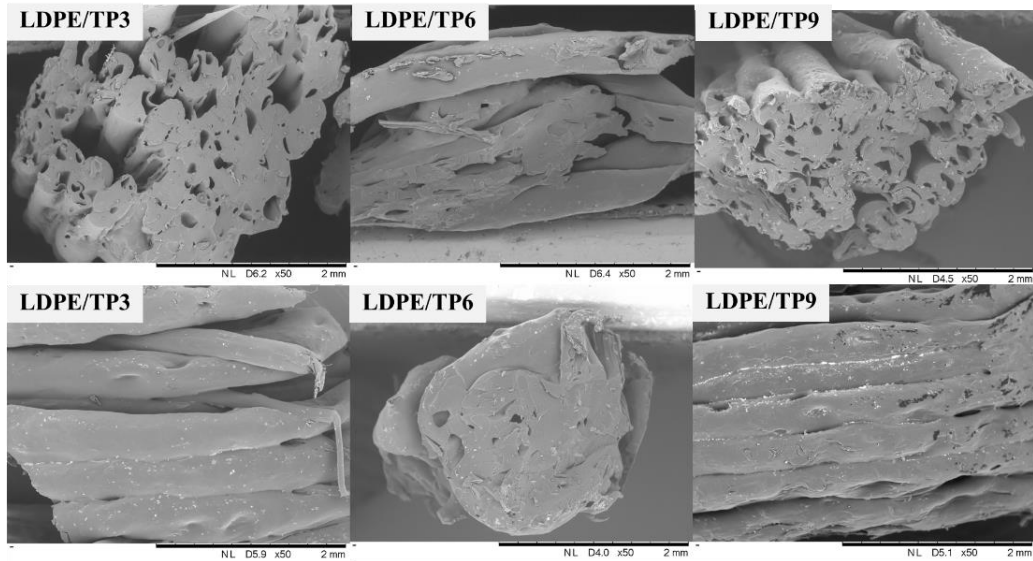
ภาพที่ 59 ชิ้นงาน 3 มิติ โมเดล Cubic ที่ผ่านการกด (static compression test)

4.2.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)

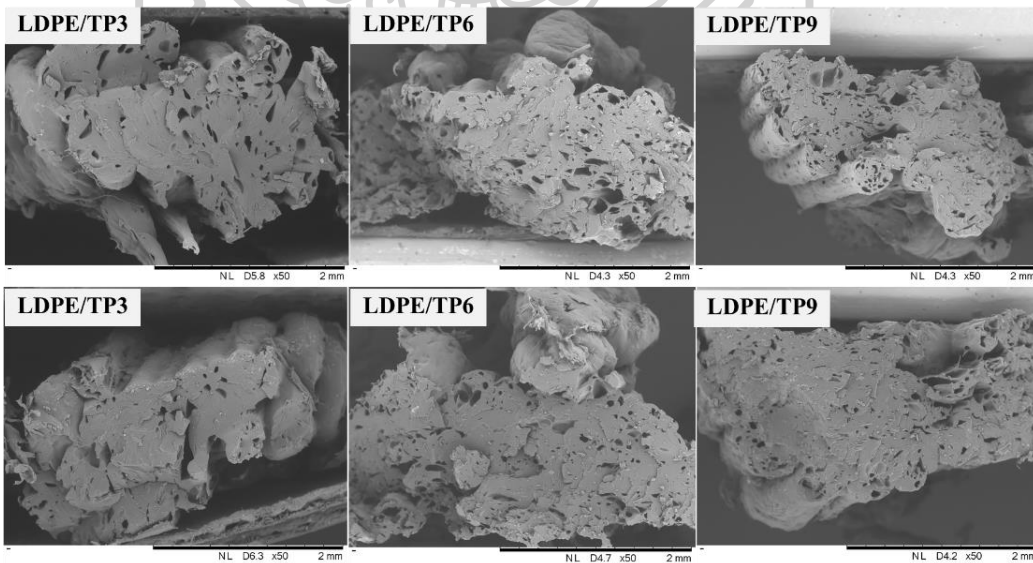
จากการทดสอบเพื่อศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) โดยนำชิ้นงาน 3 มิติ ไปหักอย่างฉับพลันในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และชิ้นงาน 3 มิติที่ผ่านการกด (static compression test) จากนั้นนำชิ้นส่วนในแนวตัดขวาง (Cross-section) มาติดบนคาร์บอนเทปแล้วทำการเคลือบทองและแพลตทินัมก่อนทำการทดสอบ

จากภาพที่ 60, 61 และ 62 เป็นภาพ SEM แบบตัดขวางของชิ้นงาน 3 มิติ ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่มีการเติมผงซีลีออยไม้สัก 3, 6 และ 9 wt% โมเดลที่ 1 Semi-spherical, โมเดลที่ 2 Cylindrical และ โมเดลที่ 3 Cubic ตามลำดับ พบว่าเส้นฟิลาเมนต์ที่ถูก extrudate ออกมาจากหัวฉีด (Nozzle) ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีการเชื่อมติดกันที่ติชณะที่ยังหลอม จากภาพตัดขวางจะสังเกตเห็นร่องรอยการหดตัวของคอมพอสิตเมื่อชิ้นงานเย็นตัวลง โดยจะเห็นเป็นช่องว่างระหว่างเส้นฟิลาเมนต์ และช่องว่างที่บริเวณจุดศูนย์กลางของแต่ละเส้น ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากความชื้นที่ยังคงเหลืออยู่ในผงซีลีออยไม้สัก เมื่อเส้นฟิลาเมนต์ถูกทำให้หลอม ความชื้นที่เหลืออาจจะเป็นไอและทำให้เกิดช่องว่างดังที่เห็นในภาพ เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 3 โมเดล จะพบว่า โมเดลที่ 1 จะมีขนาดของช่องว่างที่ใหญ่กว่าขนาดช่องว่างของโมเดลที่ 2 และ 3 ที่มีช่องว่างระหว่างเส้นฟิลาเมนต์

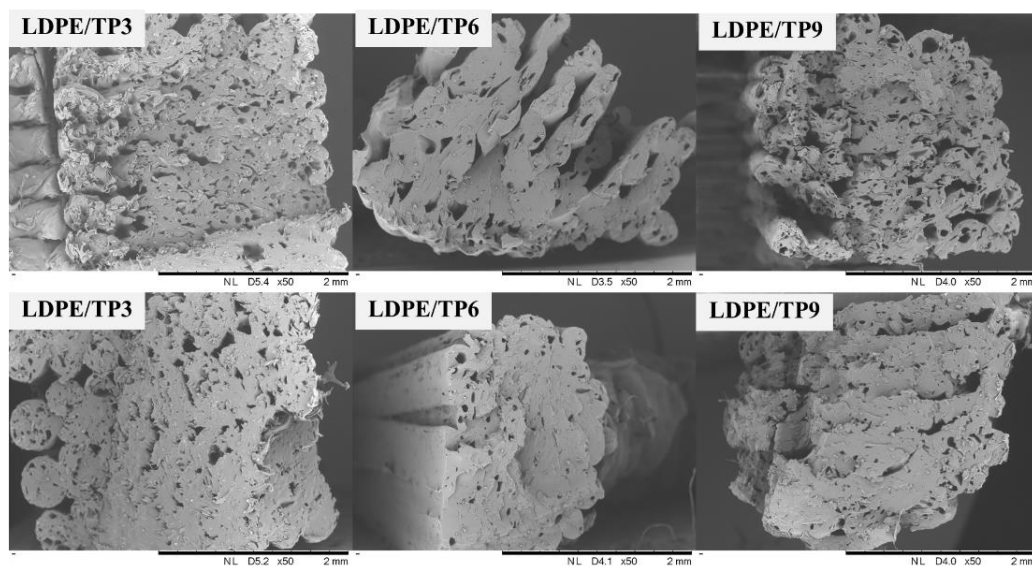
และช่องว่างที่บริเวณจุดศูนย์กลางของแต่ละเส้นมีขนาดเล็กกว่า แสดงให้เห็นได้อย่างคร่าว ๆ ถึงความหนาแน่นของเนื้อวัสดุ ซึ่งอาจจะเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกลของชิ้นงานได้ โดยจากภาพที่ 51 เป็นภาพ SEM แบบตัดขวางของ โมเดลที่ 3 Cubic จะเห็นเส้นฟิลาเมนต์เรียงชิดติดกันอย่างหนาแน่นกว่าโมเดลอื่น ๆ



ภาพที่ 60 ภาพ SEM แบบตัดขวางของชิ้นงาน 3 มิติ โมเดลที่ 1 Semi-spherical

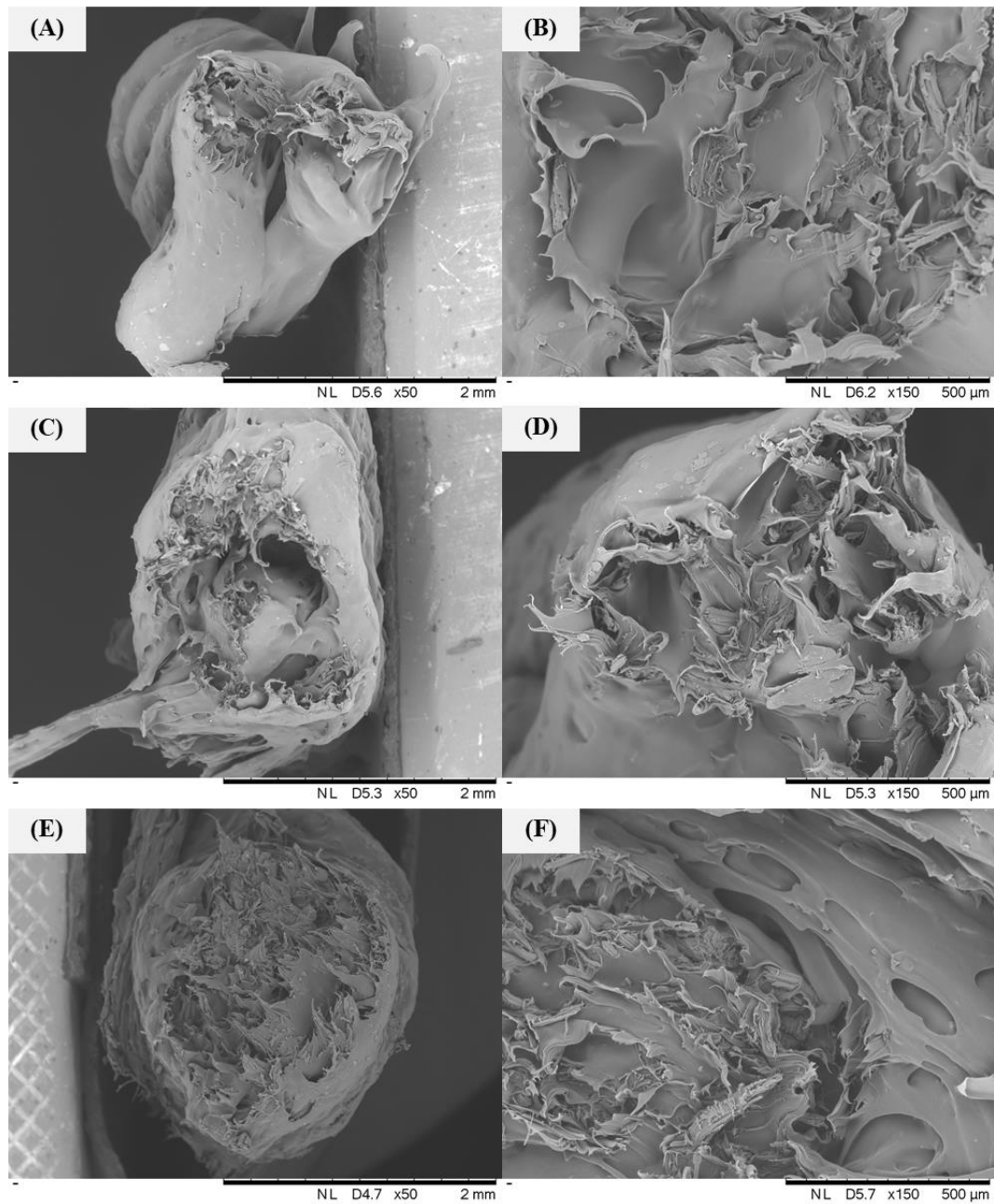


ภาพที่ 61 ภาพ SEM แบบตัดขวางของชิ้นงาน 3 มิติ โมเดลที่ 2 Cylindrical

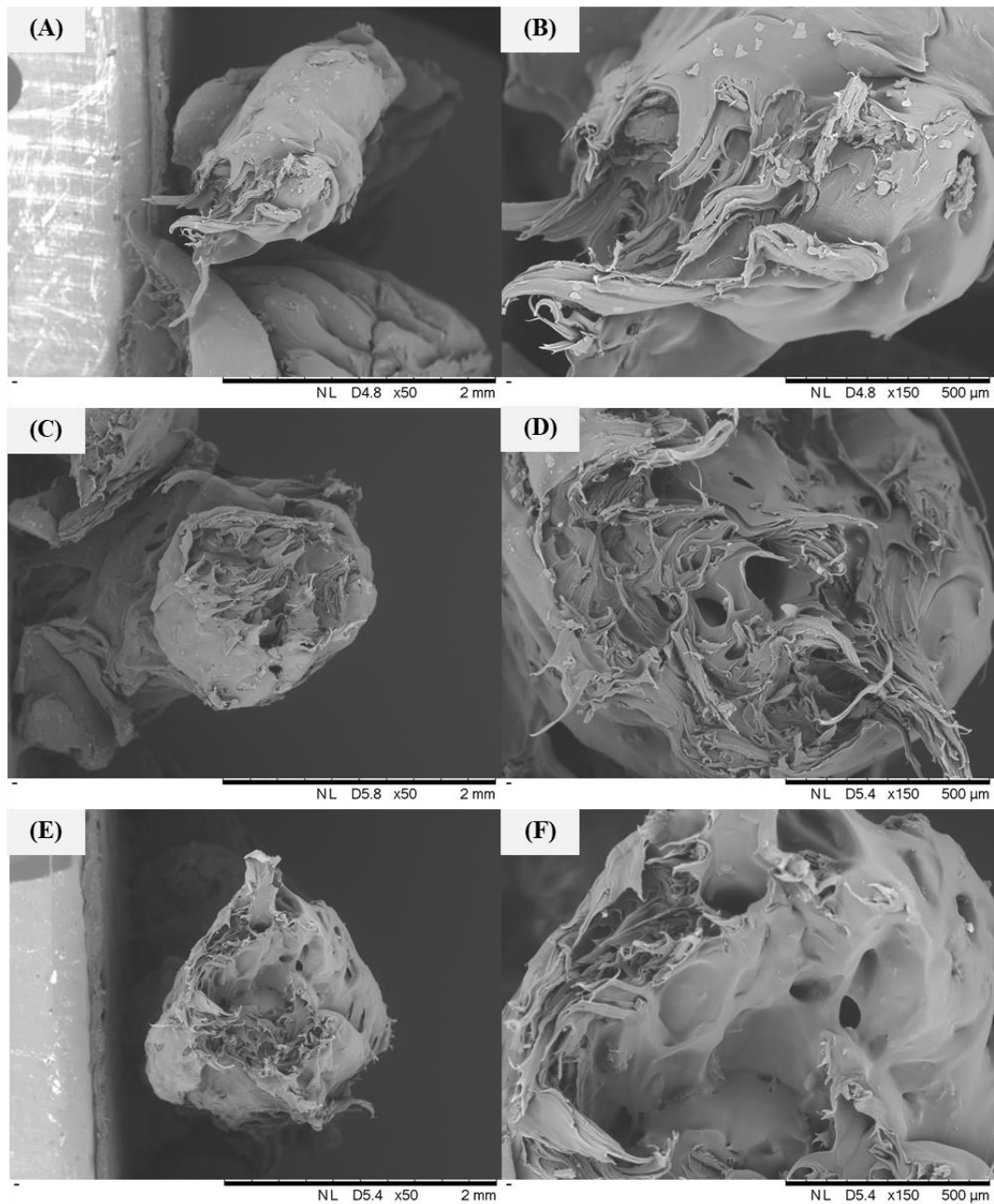


ภาพที่ 62 ภาพ SEM แบบตัดขวางของชิ้นงาน 3 มิติ โมเดลที่ 3 Cubic

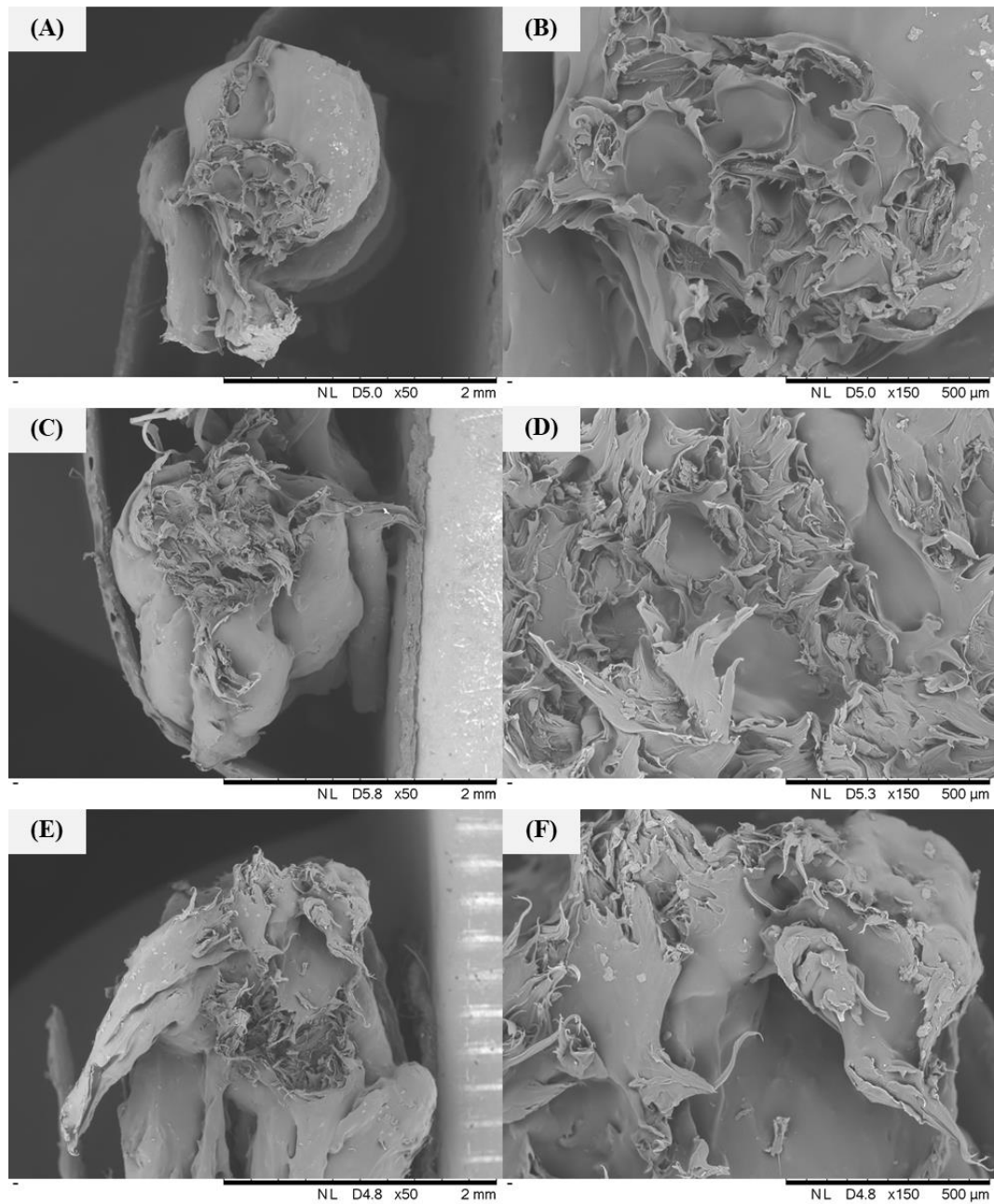
จากทดสอบ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติที่ผ่านการกด (static compression test) จะถูกแสดงในภาพที่ 63, 64 และภาพที่ 65 ซึ่งเป็นภาพตัดขวางบริเวณที่เกิดการแตกหักของชิ้นงาน 3 มิติ ในแต่ละโมเดลโดยจากภาพ SEM ของทั้ง 3 โมเดลที่กำลังขยาย 50 เท่าจะพบว่าบริเวณที่เกิดการแตกหักส่วนใหญ่จะมีพื้นที่เชื่อมติดกันของพอลิเมอร์หลอมเหลวในบางส่วน ทำให้มีพื้นที่หน้าตัดในการถ่ายโอนแรงน้อยลงในขณะที่ทำการทดสอบการกด เมื่อทำการขยายไปที่กำลังขยาย 150 เท่า จะพบเห็นช่องอากาศที่เกิดจากการหดตัวของพอลิเมอร์ขณะหล่อเย็นและบริเวณที่ไม่มี การเชื่อมติดกันของพอลิเมอร์หลอมเหลว จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นจุดสะสมความเค้นจากแรงกด และเกิดการแตกหักหรือเสียรูปของชิ้นงาน 3 มิติได้



ภาพที่ 63 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังจากทดสอบ static cimpresion test โมเดลที่ 1 Semi-spherical จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 (A-B), LDPE/TP6 (C-D) และ LDPE/TP9 (E-F) ที่กำลังขยาย 50 และ 150 เท่า



ภาพที่ 64 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังจากทดสอบ static cimpression test โมเดลที่ 2 Cylindrical จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 (A-B), LDPE/TP6 (C-D) และ LDPE/TP9 (E-F) ที่กำลังขยาย 50 และ 150 เท่า



ภาพที่ 65 ภาพ SEM ของชิ้นงาน 3 มิติหลังจากทดสอบ static cimpresion test โมเดลที่ 3 Cubic จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 (A-B), LDPE/TP6 (C-D) และ LDPE/TP9 (E-F) ที่กำลังขยาย 50 และ 150 เท่า

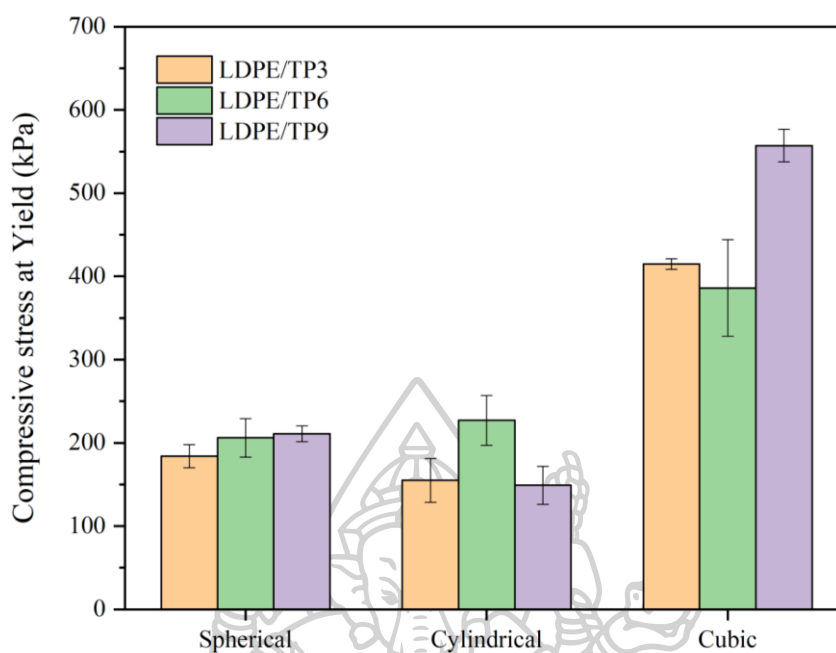
4.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลวิสโคอีลาสติก

จากการศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกของชิ้นงาน 3 มิติ จะถูกทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ในโหมดการทดสอบ Compression ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบ 2 แบบ คือ การทดสอบ Compression แบบคงที่ด้วยอัตราการกด (Static Testing) เพื่อศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่แตกต่างกัน และหาค่า Strain ในช่วงการเสียรูปแบบ elastic deformation สำหรับนำไปทดสอบในโหมด Compression แบบพลวัต (Dynamic Testing)

4.2.2.1 การทดสอบ Compression แบบอัตราการกดคงที่ (Static Testing)

การทดสอบ Compression แบบอัตราการกดคงที่ (Static Testing) ทดสอบเพื่อศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่แตกต่างกัน และหาระยะการกดที่ %strain ในช่วง Elastic deformation สำหรับทดสอบ Compression แบบพลวัต (Dynamic Testing) โดยในการทดสอบทำการกดชิ้นงานไปที่ระยะ 80 เปอร์เซ็นต์ของความสูงชิ้นงาน ด้วยอัตราการกด 1.3 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยโหลด 50 kN

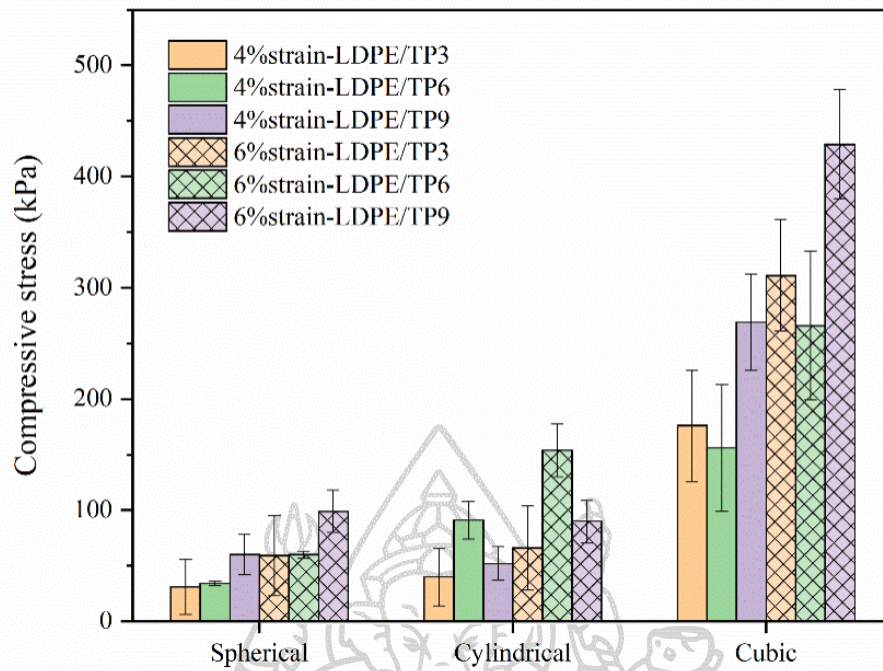
จากภาพที่ 66 แสดงค่าเฉลี่ย Compressive stress at Yield ของคอมพอสิต LDPE ที่โมเดลต่าง ๆ จะพบว่าชิ้นงาน 3 มิติ จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ย Compressive stress ที่จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเติมปริมาณของผงไม้ โดยโมเดลที่ 1 Semi-spherical จะพบว่าเมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักเพิ่มขึ้นที่ 3, 6 และ 9 wt% จะมีค่าเฉลี่ย Compressive stress at Yield เท่ากับ 184, 206 และ 211 kPa ตามลำดับ จะเห็นว่าในโมเดลนี้มีค่าเฉลี่ย Compressive stress เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก โดยค่าเฉลี่ย Compressive stress ไม่ต่างกันมาก เนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอและสมบูรณ์ ส่วนค่าเฉลี่ย Compressive stress ของโมเดลที่ 2 Cylindrical เมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักเพิ่มขึ้นที่ 3, 6 และ 9 wt% จะมีค่าเฉลี่ย Compressive stress at Yield เท่ากับ 155, 227 และ 149 kPa ตามลำดับ พบว่าการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ 3 และ 6 wt% มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก 9 wt% มีค่าเฉลี่ย Compressive stress ลดต่ำลง เนื่องจากความสมบูรณ์ของชิ้นงานบริเวณที่เป็นตาข่ายมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ และด้วยการมีปริมาณผงไม้ที่มากขึ้นจะส่งผลให้วัสดุมีความแข็ง (Stiffness) เพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อให้แรงกดแก่ชิ้นงาน ความเค้นจะสะสมบริเวณจุดของตาข่ายที่มีขนาดเล็กที่สุดส่งผลให้ชิ้นงานในบริเวณนี้เกิดการแตกหักขึ้นได้ จึงทำให้ได้ค่าเฉลี่ย Compressive stress ลดลง สำหรับโมเดลสุดท้ายคือโมเดลที่ 3 Cubic เป็นโมเดลที่มีค่าเฉลี่ย Compressive stress สูงที่สุด



ภาพที่ 66 ค่า Compressive stress at Yield ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

ตารางที่ 16 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Compressive stress at Yield ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

Models	Compressive stress at Yield (kPa)		
	LDPE/TP3	LDPE/TP6	LDPE/TP9
Semi-spherical	184±14	206±23	211±10
Cylindrical	155±26	227±30	149±23
Cubic	415±6	386±58	557±20

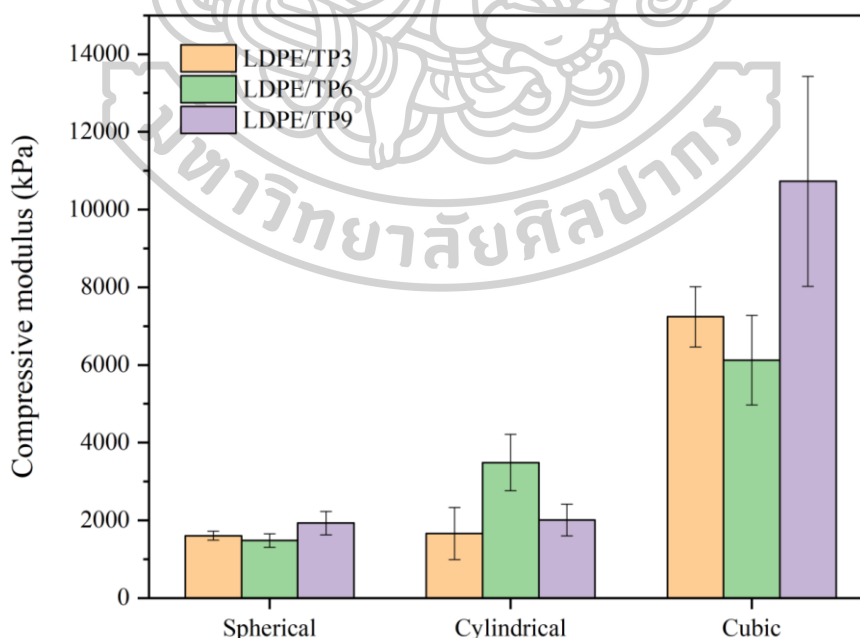


ภาพที่ 67 ค่า Compressive stress at Yield ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

ตารางที่ 17 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Compressive stress ที่ระยะ 4 และ 6%strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

Models	Compressive stress at strain (kPa)					
	4%			6%		
	LDPE/TP3	LDPE/TP6	LDPE/TP9	LDPE/TP3	LDPE/TP6	LDPE/TP9
Semi-spherical	31±25	34±2	60±18	59±36	60±3	99±19
Cylindrical	40±26	91±17	52±15	66±38	154±24	90±19
Cubic	176±50	156±57	269±43	311±50	266±67	429±49

เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ย Compressive modulus ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 68 และตารางที่ 18 จะเห็นว่าผงซีลี้อยไม้สั๊กจะไปเสริมความแข็งแรงและความต้านทานต่อการเสียรูป แต่เมื่อพิจารณารูปร่างของชิ้นงาน 3 มิติ จะพบว่าโมเดลที่ 1 Semi-spherical มีค่าเฉลี่ย Compressive modulus ที่ปริมาณผงซีลี้อยไม้สั๊ก 3, 6 และ 9 wt% เท่ากับ 1604, 1479 และ 1929 kPa ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกัน โมเดลที่ 2 Cylindrical ค่าเฉลี่ย Compressive modulus ที่ปริมาณผงซีลี้อยไม้สั๊ก 3, 6 และ 9 wt% เท่ากับ 1662, 3487 และ 2009 kPa ตามลำดับ และโมเดลที่ 3 Cubic มีค่าเฉลี่ย Compressive modulus ที่ปริมาณผงซีลี้อยไม้สั๊ก 3, 6 และ 9 wt% เท่ากับ 7240, 6125 และ 10728 kPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโมเดลที่ 1 จะมีความแข็งแรงน้อยที่สุด เนื่องด้วยโครงสร้างมีความโค้งงอ (bending) จากทรงกลมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีความสามารถในการรับโหลดได้ต่ำกว่าทรงกระบอกและลูกบาศก์ ดังนั้นเมื่อทำการให้แรงกดต่อชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปได้ง่าย โมเดลที่ 1 จึงมีค่า Compressive modulus ที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโมเดลอื่น สำหรับโมเดลที่ 2 ที่มีโครงสร้างคล้ายทรงกระบอก เมื่อให้แรงกดที่ชิ้นงานจะถ่ายโอนแรงในแนวตั้งและกระจายออกตามแนวทแยงของชิ้นงาน ซึ่งจากรูปทรงจะมีความแข็งแรงมากกว่าโมเดลที่ 1 ที่มีการเสียรูปแบบโค้งงอ ในขณะที่โมเดลที่ 3 เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีมุมทั้ง 4 มุมเป็นส่วนหลักที่รับแรงกด จึงทำให้สามารถรับโหลดได้มากกว่าโมเดลที่ 1 และ 2



ภาพที่ 68 ค่า Compressive modulus ของคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

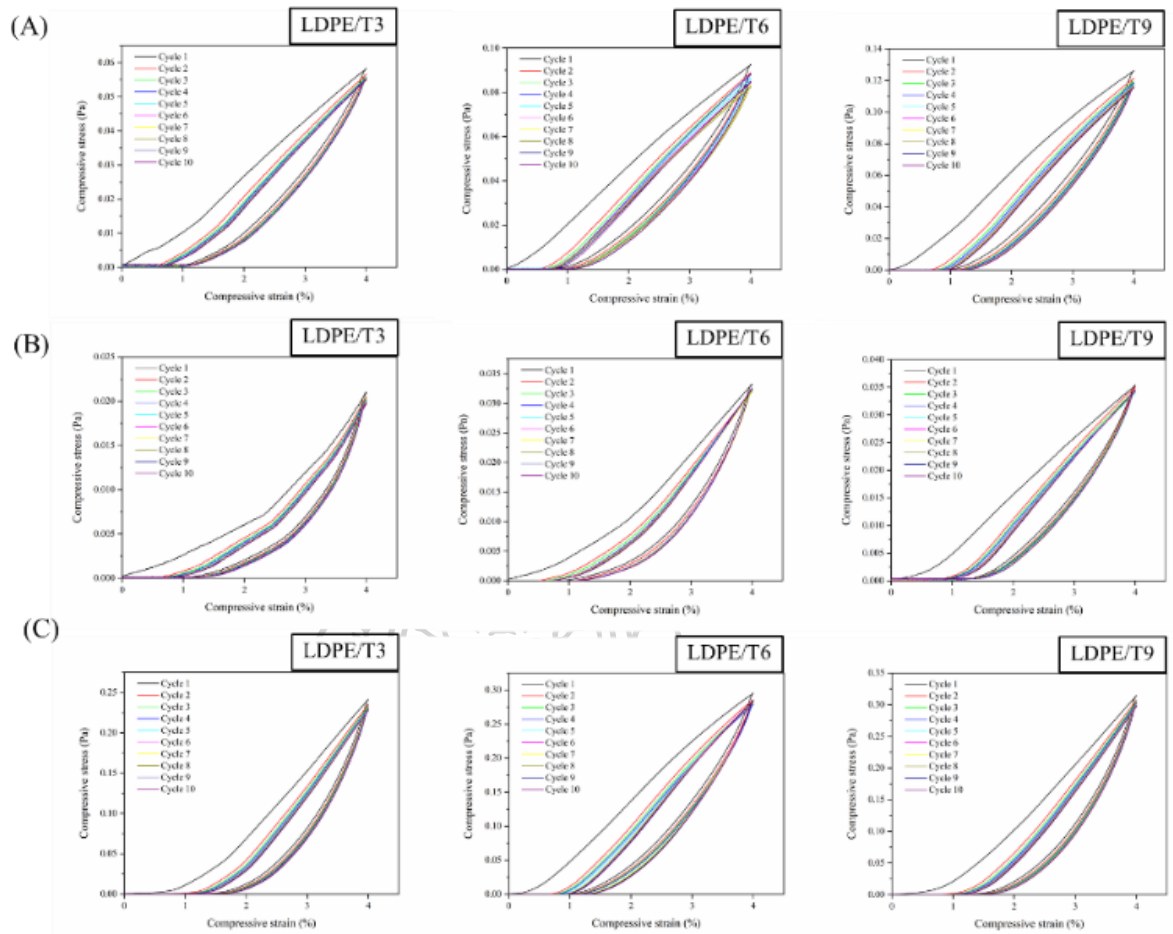
ตารางที่ 18 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Compressive modulus ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

Models	Compressive modulus (kPa)		
	LDPE/TP3	LDPE/TP6	LDPE/TP9
Semi-spherical	1604±113	1479±177	1929±303
Cylindrical	1662±669	3487±726	2009±407
Cubic	7240±774	6125±1155	10728±2700

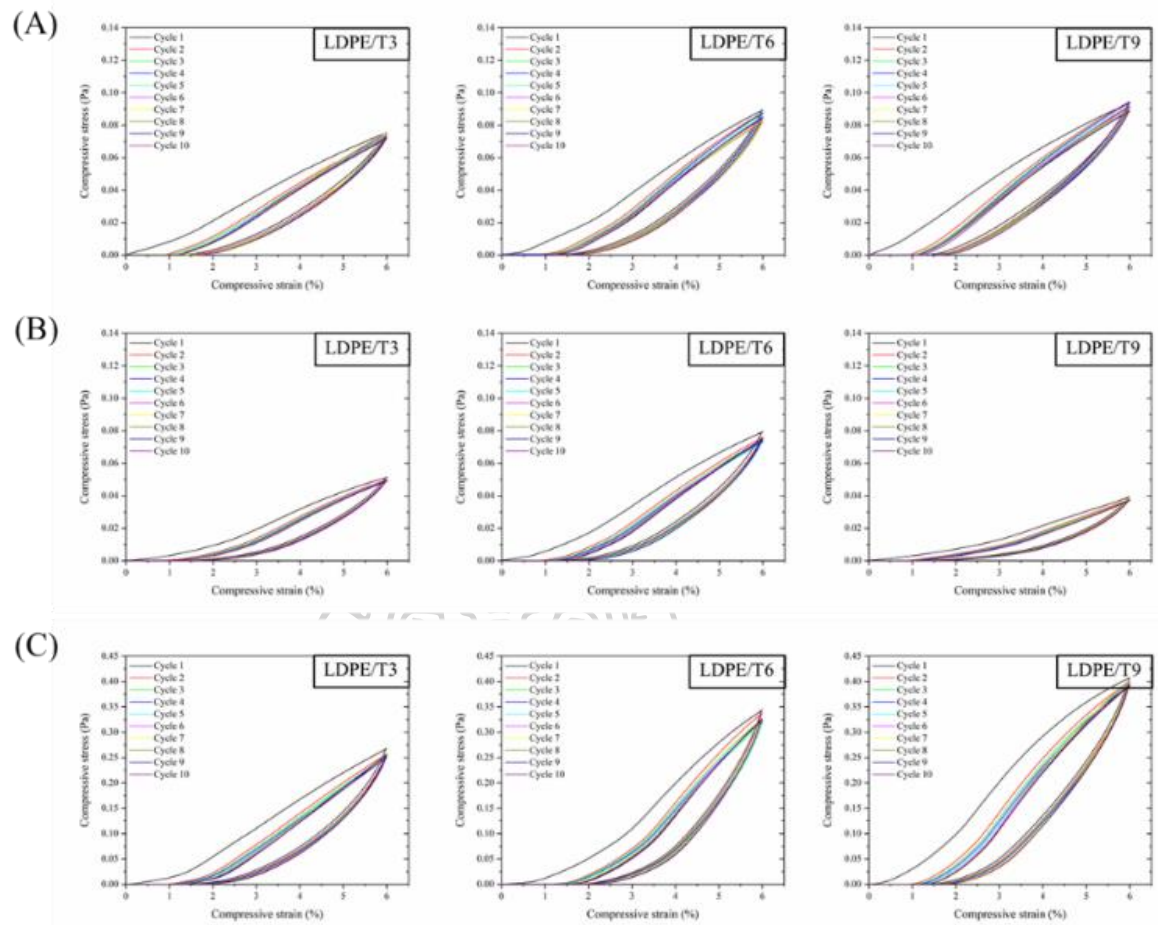
4.2.2.2 การทดสอบ Compression แบบพลวัต (Dynamic Testing)

การทดสอบ Compression แบบพลวัต (Dynamic Testing) ของชิ้นงาน 3 มิติ จะทดสอบด้วยเครื่อง Shimadzu Universal Testing Machine โดยการให้แรงกดเป็นรอบ (Cycle) ก็คือให้แรง-ปลดแรง (loading-unloading) ไปที่ค่า %Strain เท่ากับ 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่า Strain ในช่วง Elastic deformation ที่ได้จากการทดสอบการทดสอบ Compression แบบอัตราการการกดคงที่ (Static Testing) โดยจะทดสอบประมาณ 10 รอบต่อชิ้นงานด้วยโหลด (Load cell) ขนาด 5 kN ด้วยอัตราการกดเท่ากับ 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งจะได้ผลการทดลองเป็นกราฟความสัมพันธ์ Compressive stress-strain ดังแสดงในภาพที่ 69 และภาพที่ 70

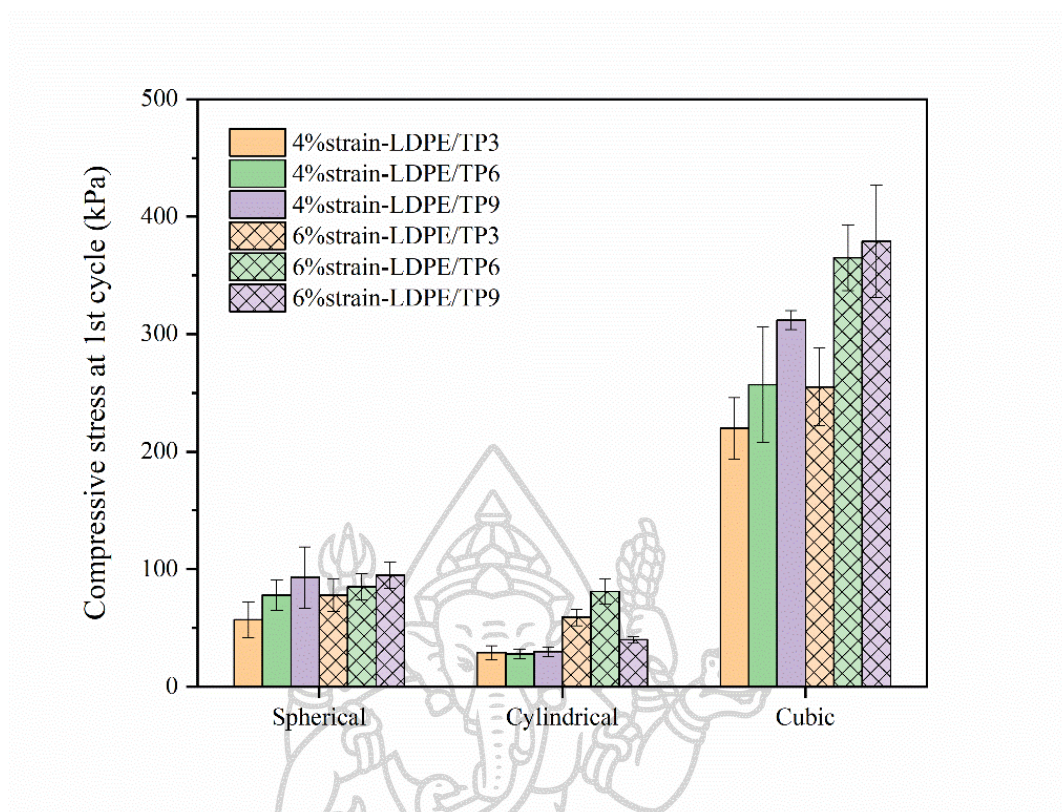
สำหรับผลการทดลองค่า Dynamic compressive stress ที่การทดสอบรอบที่ 1 จะแสดงในภาพที่ 71 และตารางที่ 19 เพื่อศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงาน 3 มิติ ขณะทำการทดสอบแบบพลวัต (Dynamic Testing) พบว่าที่ระยะกด 4%strain ค่า Dynamic compressive stress เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงซีลี้อยไม้สักในโมเดลที่ 1 Semi-spherical และ 3 Cubic สำหรับโมเดลที่ 2 Cylindrical จะมีค่า Dynamic compressive stress ไม่แตกต่างกัน สำหรับที่ระยะกด 6%strain โมเดลที่ 2 จะมีค่า Dynamic compressive stress เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงซีลี้อยไม้สัก เนื่องจากเป็นระยะกดที่มากพอจะเกิดการกดอัดของชิ้นงาน 3 มิติ แต่สำหรับวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP9 ที่แสดงค่า Dynamic compressive stress ลดลง เป็นผลมาจากชิ้นงานมีความบางที่ตำแหน่งของตาข่าย



ภาพที่ 69 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 4 % (A) โมเดล Semi-spherical, (B) โมเดล Cylindrical และ (C) โมเดล Cubic



ภาพที่ 70 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 6 % (A) โมเดล Semi-spherical, (B) โมเดล Cylindrical และ (C) โมเดล Cubic



ภาพที่ 71 ค่า Dynamic compressive stress at 1st cycle ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

ตารางที่ 19 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Dynamic compressive stress ที่ระยะ 4 และ 6%strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

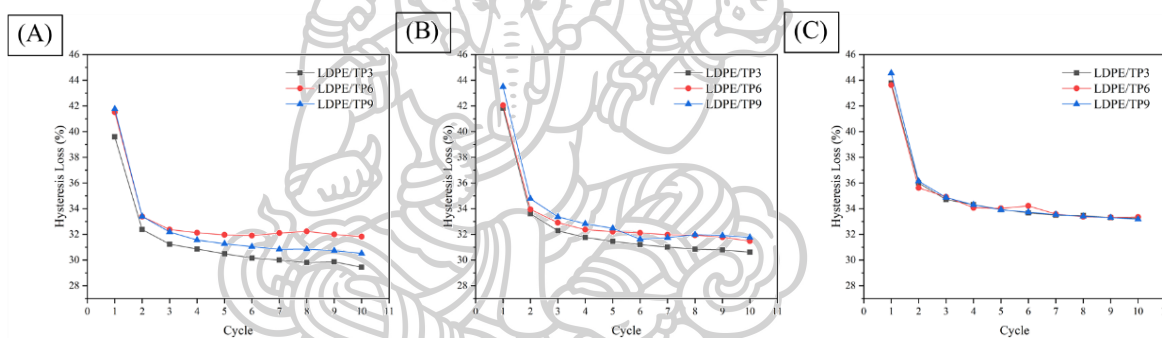
Models	Dynamic compressive stress at strain (kPa)					
	4%			6%		
	LDPE/TP3	LDPE/TP6	LDPE/TP9	LDPE/TP3	LDPE/TP6	LDPE/TP9
Semi-spherical	57±15	78±13	93±26	78±14	85±11	95±11
Cylindrical	29±6	28±4	30±4	59±7	81±11	40±3
Cubic	220±26	257±49	312±8	255±33	365±28	379±48

จากผลการทดสอบชิ้นงาน 3 มิติ จะถูกแสดงในรูปของการสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) (พิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างเส้นกราฟที่ให้แรง-ปลดแรง) เมื่อทดสอบชิ้นงาน 3 มิติ ทั้ง 3 โมเดล ได้แก่ โมเดลที่ 1 Semi-spherical, โมเดลที่ 2 Cylindrical และ โมเดลที่ 3 Cubic ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละโมเดลจะเติมปริมาณผงซีลีอ์ไมล์ที่ 3, 6 และ 9 wt% โดยผลการทดลองจะถูกแสดงในภาพที่ 72, ภาพที่ 73, ตารางที่ 20 และตารางที่ 21 จะเห็นได้ว่า Hysteresis loss ของชิ้นงานทั้ง 3 โมเดล ในทุกสัดส่วนของปริมาณผงซีลีอ์ไมล์ที่เติมไปมีค่าลดลงอย่างมากในการทดสอบในรอบที่ 1 เนื่องจากเป็นการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่น (viscous deformation) ของคอมพอสิตที่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลีอ์ไมล์ จากค่า Hysteresis loss ที่ลดลงนี้เป็นตัวบ่งชี้ว่าชิ้นงาน 3 มิติ เมื่อได้รับโหลดและหลังจากเอาโหลดออกจะไม่สามารถ Recovery คืนตัวกลับมาได้ โดยจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากการยึดเกาะกันได้น้อยระหว่างเฟสของ LDPE และผงซีลีอ์ไมล์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานอะมิโนไซเลน หลังจากการให้แรงกดชิ้นงานในรอบที่ 1 ผ่านไป ค่า Hysteresis loss จะยังคงอยู่ ๆ ลดลงและจะคงที่เมื่อมีการให้โหลดในรอบที่มากขึ้นไปเรื่อย ๆ ซึ่งในการทดลองจะเห็นว่าค่า Hysteresis loss จะเริ่มคงที่เมื่อให้โหลดในรอบที่ 5 เป็นต้นไป จากงานวิจัยของ A.D Drozdov [29] ที่ได้ทดสอบในโหมดเดียวกันแล้วพบว่าค่า Hysteresis loss มีลักษณะที่ลดลงและคงที่เมื่อให้โหลดที่จำนวนรอบมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยในการศึกษาครั้งนี้จะไม่สามารถคำนวณค่า specific dynamic strength ได้ เนื่องจากชิ้นงาน 3 มิติ ในแต่ละโมเดลมีน้ำหนักที่ไม่เท่ากัน

สำหรับการพิจารณาปริมาณการเติมผงซีลีอ์ไมล์ที่ส่งผลต่อค่า Hysteresis loss จากค่า Hysteresis loss ที่กุดด้วยระยะ Strain 4% เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 63 จะพบว่าโมเดลที่ 1 Semi-spherical และโมเดลที่ 2 Cylindrical มีค่า Dynamic compressive stress ลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณผงซีลีอ์ไมล์ที่แตกต่างกัน โดยวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 จะมีค่า Hysteresis loss ที่น้อยที่สุดเนื่องจากชิ้นงานยังมีความยืดหยุ่นในส่วนของพอลิเมอร์ LDPE แต่เมื่อเติมผงซีลีอ์ไมล์เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทำให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นน้อยลงดังนั้นเมื่อวัสดุได้รับแรงจึงมีพลังงานไม่มากพอที่จะคืนกลับรูปเดิมได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงในค่า Hysteresis loss ที่เพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุสูญเสียพลังงานหลังจากได้รับแรงกระทำ โดยค่า Hysteresis loss ของวัสดุคอมพอสิตโมเดลที่ 1 จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละสูตร เนื่องจากเป็นโมเดลที่มีรูปทรงโค้งงอในแนวแรงดังนั้นเมื่อให้แรงกระทำต่อชิ้นงานจะเกิดการเสียรูปได้ง่ายกว่า เมื่อเติมผงซีลีอ์ไมล์ที่เพิ่มขึ้นจึงเห็นค่า Hysteresis loss ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนในโมเดลที่ 2 จะเห็นค่า Hysteresis loss แตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องมาจากโมเดลที่ 2 มีความแข็งแรงมากกว่าโมเดลที่ 1

สำหรับโมเดลที่ 3 Cubic เมื่อเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ปริมาณแตกต่างกันพบว่าค่า Hysteresis loss ไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าผลของปริมาณผงซีลี้อยไม้สักไม่มีผลต่อการลดลงของ Dynamic compressive stress ในโมเดล Cubic เนื่องจากระยะกอดที่ 4% strain ยังไม่ส่งผลให้ชิ้นงานเสียรูปได้ เพราะ compressive stress มีค่าต่ำ

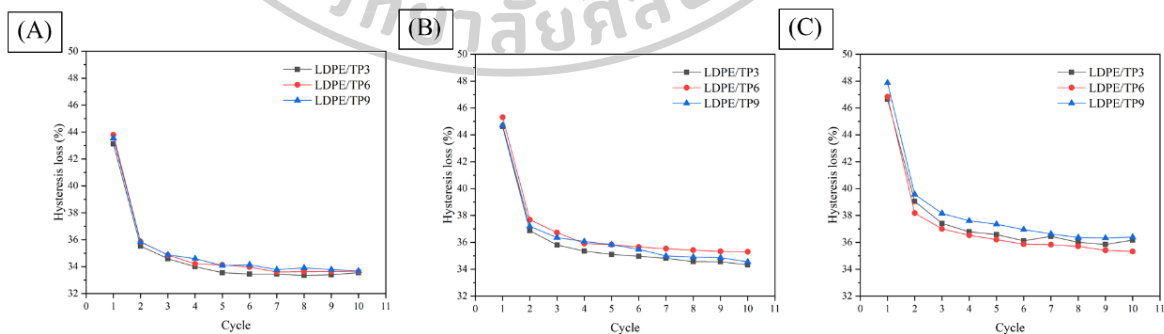
จากภาพที่ 73 ที่แสดงค่า Hysteresis loss ที่กอดด้วยระยะ Strain 6% พบว่าปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่เพิ่มขึ้น ค่า Hysteresis loss ของชิ้นงานมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในทุกโมเดล โดยปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ 3, 6 และ 9 wt% ไม่มีอิทธิพลต่อการสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากระยะกอดที่มากขึ้นจะส่งผลต่อค่า Dynamic compressive stress ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นชิ้นงาน 3 มิติจะได้รับแรงกระทำที่มากพอทำให้วัสดุสูญเสียค่า Hysteresis loss ได้ไม่แตกต่างกัน ถึงแม้จะเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 72 แสดงค่า Hysteresis loss ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP ที่กอดด้วยระยะ Strain 4% (A) โมเดล Semi-spherical, (B) โมเดล Cylindrical และ (C) โมเดล Cubic

ตารางที่ 20 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย Hysteresis loss ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP ที่กัดด้วยระยะ Strain 4%

Cycle	Semi-spherical			Cylindrical			Cubic		
	Teak 3wt%	Teak 6wt%	Teak 9wt%	Teak 3wt%	Teak 6wt%	Teak 9wt%	Teak 3wt%	Teak 6wt%	Teak 9wt%
1	39.61	41.52	41.77	41.82	42.05	43.499	43.787	43.63	44.56
2	32.38	33.39	33.40	33.61	33.95	34.775	36.000	35.62	36.14
3	31.24	32.37	32.18	32.28	32.91	33.369	34.714	34.92	34.87
4	30.86	32.13	31.56	31.76	32.37	32.831	34.319	34.08	34.31
5	30.49	31.96	31.27	31.46	32.21	32.473	33.934	34.03	33.91
6	30.17	31.91	31.04	31.21	32.12	31.622	33.678	34.22	33.73
7	30.00	32.10	30.84	31.02	31.98	31.749	33.498	33.58	33.54
8	29.81	32.23	30.85	30.85	31.93	31.976	33.464	33.37	33.41
9	29.86	31.99	30.73	30.79	31.78	31.912	33.305	33.33	33.30
10	29.45	31.83	30.52	30.61	31.48	31.766	33.263	33.35	33.18



ภาพที่ 73 แสดงค่า Hysteresis loss ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP ที่กัดด้วยระยะ Strain 6% (A) โมเดล Semi-spherical, (B) โมเดล Cylindrical และ (C) โมเดล Cubic

ตารางที่ 21 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย Hysteresis loss ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP ที่กดด้วยระยะ Strain 6%

Cycle	Semi-spherical			Cylindrical			Cubic		
	Teak	Teak	Teak	Teak	Teak	Teak	Teak	Teak	Teak
	3wt%	6wt%	9wt%	3wt%	6wt%	9wt%	3wt%	6wt%	9wt%
1	43.11	43.80	43.55	42.94	44.92	44.98	46.53	47.62	46.92
2	35.53	35.85	35.84	36.20	37.70	37.31	38.98	38.75	38.57
3	34.59	34.86	34.88	35.32	36.91	36.47	37.32	37.58	37.11
4	34.00	34.21	34.61	34.94	36.04	36.18	36.63	37.13	36.65
5	33.56	34.13	34.08	34.86	35.95	35.92	36.45	36.81	36.38
6	33.44	33.97	34.14	34.63	35.61	35.46	35.93	36.45	36.00
7	33.45	33.60	33.78	34.55	35.73	35.08	36.17	36.45	35.89
8	33.35	33.63	33.91	34.33	35.27	34.95	35.86	36.33	35.31
9	33.40	33.64	33.78	34.18	35.39	34.91	35.64	35.99	35.31
10	33.55	33.65	33.67	34.02	35.68	34.62	36.05	35.91	35.62

4.2.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน 3 มิติ

สำหรับการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP จะทดสอบด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) โดยทำการชั่งน้ำหนักประมาณ 8 มิลลิกรัม ทดสอบในโหมด Heat-Cool-Heat ที่ช่วงอุณหภูมิ 30-250 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการทดสอบจะถูกแสดงในตารางที่ 22

จากผลการทดสอบจะพบว่าในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 อุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) ของวัสดุคอมพอลิเมอร์ในทุกสัดส่วนของการเติมปริมาณผงไม้สักมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าประมาณ 116 องศาเซลเซียส และมีปริมาณผลึกในช่วง 30-33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่สามารถสรุปแนวโน้มได้ เนื่องจากสภาวะโดยรอบในขณะการพิมพ์ไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ ขณะที่การเติมผงไม้สักที่ปริมาณแตกต่างกันจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของวัสดุคอมพอลิเมอร์ โดยมีค่า T_c อยู่ในช่วง

96-97 องศาเซลเซียส และในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ซึ่งวัสดุคอมพอสิตจะถูกล้างประวัติทางความร้อนแล้วในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 โดยจะมีค่า T_m ประมาณ 111-112 องศาเซลเซียส และมีปริมาณผลึกของทุกสัดส่วนที่ประมาณ 32-33 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในชิ้นงาน 3 มิติ ปริมาณการเติมผงซีลีเนียมจะไม่ส่งผลกระทบต่อการตกผลึกของพอลิเมอร์ในวัสดุคอมพอสิต

ตารางที่ 22 แสดงข้อมูล DSC ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP ที่โมเดลต่าง ๆ

Models		1 st Heat		Cool	2 nd Heat	
		T_m (°C)	X_c (%)	T_c (°C)	T_m (°C)	X_c (%)
Semi-spherical	LDPE/TP3	115.72±0.63	30.14±2.04	96.55±0.63	112.44±0.77	32.74±1.00
	LDPE/TP6	116.17±0.17	30.68±0.36	97.11±0.10	111.89±0.10	32.56±0.77
	LDPE/TP9	116.11±0.35	33.54±2.89	97.11±0.10	112.06±0.20	33.97±1.85
Cylindrical	LDPE/TP3	116.67±0.00	31.52±1.82	96.89±0.26	112.06±0.10	32.17±2.14
	LDPE/TP6	116.29±0.29	34.11±6.41	97.29±0.16	111.54±0.25	32.96±3.55
	LDPE/TP9	116.38±0.57	33.70±2.36	97.25±0.16	111.63±0.16	33.45±1.69
Cubic	LDPE/TP3	116.44±0.10	33.43±0.54	96.67±0.44	112.05±0.25	33.66±0.68
	LDPE/TP6	116.21±0.08	32.73±6.87	97.09±0.10	111.88±0.21	32.46±0.79
	LDPE/TP9	116.46±0.39	33.75±2.30	97.17±0.24	111.71±0.25	32.59±2.91

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/TP) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไฮเลน (APTMS-Teak powder)

งานวิจัยในตอนต้นที่ 1 เป็นการเตรียมเส้นฟิลาเมนต์จากวัสดุคอมพอสิตที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารประกอบไฮเลน (APTMS-Teak powder) และการพิสูจน์เอกลักษณ์

จากการศึกษาความเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์คอมพอสิต LDPE/TP ด้วยเทคนิค TGA แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมผงซีลี้อยไม้สักที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไฮเลน (APTMS-Teak powder) จะไปชะลอการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ จึงทำให้วัสดุคอมพอสิต LDPE/TP มีความเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่า การเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไฮเลน (APTMS-Teak powder) จะไปทำหน้าที่เป็นสารช่วยก่อผลึก (Nucleating agent) ทำให้มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นและตกผลึกได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันจะส่งผลให้ T_m ค่อย ๆ ลดลงเมื่อเติม APTMS-Teak powder เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลต่อความสมบูรณ์ของผลึกพอลิเมอร์ จากสมบัติเชิงกลของความต้านทานต่อแรงดึงพบว่าการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักจะไปเสริมแรงให้กับเส้นฟิลาเมนต์คอมพอสิต LDPE/TP แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยไม้ในวัสดุคอมพอสิตมากขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตลดลง สำหรับการทดสอบสมบัติการไหลของวัสดุคอมพอสิต พบว่า LDPE และคอมพอสิต LDPE/TP จะแสดงพฤติกรรมแบบ Shear-thinning และปริมาณผงซีลี้อยไม้สักมีอิทธิพลต่อค่าความหนืดเชิงซ้อนของวัสดุคอมพอสิต โดยจะส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดเชิงซ้อนลดลง จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นฟิลาเมนต์คอมพอสิต LDPE/TP จะพบผงซีลี้อยไม้สักที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์และพบช่องว่าง (Voids) หรือรูพรุนที่บริเวณตรงกลางของเส้นฟิลาเมนต์ โดยช่องว่างดังกล่าวจะส่งผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำที่เพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้เส้นฟิลาเมนต์มีความต้านทานต่อแรงดึงลดลง จากการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำของเส้นฟิลาเมนต์

คอมพอสิต LDPE/TP พบว่าการดูดซึมน้ำของวัสดุคอมพอสิตจะเพิ่มมากขึ้นตาม ปริมาณการเติมของ ผงซีลี้อยไม้สัก เนื่องจากปริมาณผงซีลี้อยไม้สักบางส่วนจะกระจายอยู่ที่บริเวณผิวของเส้นฟิลาเมนต์

5.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ชิ้นงาน 3 มิติจากวัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/TP) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (APTMS-Teak powder)

ในตอนที 2 การเตรียมชิ้นงานด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ และพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุคอมพอสิต LDPE และผงซีลี้อยไม้สัก (LDPE/TP) สามารถสรุปได้ดังนี้

การขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ ตามโมเดลที่ได้ออกแบบไว้ พบว่าเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE ไม่สามารถขึ้นรูป 3 มิติ ให้มีความสมบูรณ์ได้ เนื่องจากอุณหภูมิการเย็นตัวที่อุณหภูมิโดยรอบ (Ambient temperature) ไม่เหมาะสม ดังนั้นในการพิสูจน์เอกลักษณ์จึงจะไม่มีผลการทดลองของ neat LDPE จากการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน 3 มิติ พบว่ามีช่องว่างกระจายตัวในเส้นฟิลาเมนต์ของชิ้นงาน 3 มิติ ทั้ง 3 โมเดล โดยโมเดล Cubic จะมีขนาดช่องว่างที่เล็กและน้อยกว่าโมเดล Semi-spherical และ Cylindrical ส่งผลต่อให้โมเดล Cubic มีความแข็งแรงต่อการกดมากที่สุด รองลงมาคือโมเดล Semi-spherical และ Cylindrical ตามลำดับ สำหรับปริมาณผงซีลี้อยไม้สักที่เติมลงไปวัสดุคอมพอสิตจะไปเสริมความแข็งแรงเชิงกลให้กับวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP จากการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกของชิ้นงาน 3 มิติ โดยทำการทดสอบ Compression แบบพลวัต (Dynamic Testing) ในช่วงการเสียรูปแบบ elastic deformation พบว่าชิ้นงานทั้งหมดจะมีค่า Hysteresis loss ลดลงอย่างมากหลังจากให้โหลดในรอบแรก และจะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าคงที่หลังจากให้โหลด 4-5 รอบเป็นต้นไป สำหรับการทดสอบที่ระยะยกด 4%strain จะเห็นว่าการเติมผงไม้ที่ปริมาณแตกต่างกันจะส่งผลต่อการลดลงของค่า Dynamic compressive stress ในโมเดลของ Semi-spherical และ Cylindrical แต่โมเดล Cubic ผลของการเติมปริมาณผงซีลี้อยไม้สักไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า Dynamic compressive stress เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดในการต้านทานแรงอัดแบบไดนามิก จากระยะการกดชิ้นงานแบบพลวัตที่เพิ่มมากขึ้นด้วยการเพิ่ม strain ทำให้เกิดความแตกต่างของ compressive stress จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยเทคนิค DSC พบว่าการเติมผงซีลี้อยไม้สักจะทำหน้าที่เป็น nucleating agent ดีขึ้นซึ่งทำให้สามารถขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผงซีลี้อยไม้สักที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับวัสดุคอมพอลสิตที่จะมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กมาก 200-400 mesh size ดังนั้นจึงมีความไวต่อการดูดความชื้นอย่างมาก ในการเตรียมผสมผงซีลี้อยกับพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) จึงควรทำการอบผงซีลี้อยไม้สักด้วยเครื่องอบสุญญากาศเพื่อไล่ความชื้นออกก่อนทุกครั้ง และควรมีการจัดเก็บชิ้นงานในพื้นที่ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการดูดความชื้นของวัสดุที่มีผงซีลี้อยไม้สักเป็นองค์ประกอบ

5.2.2 ในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) เพื่อเตรียมเส้นฟิลาเมนต์สำหรับกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งต้องทำการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นฟิลาเมนต์ให้มีขนาดที่คงที่อยู่เสมอ ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมขนาดของเส้นฟิลาเมนต์ต้องสามารถควบคุมได้และกำหนดให้มีค่าคงที่ อย่างเช่น ค่าความเร็วรอบของสกรู อัตราการป้อนสารเติมแต่งและพอลิเมอร์ เครื่องดึงเส้น extrudate (Puller) และต้องทำการวัดขนาดของเส้นฟิลาเมนต์ตลอดเวลาด้วยเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่แม่นยำ

5.2.3 ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ แนะนำให้ควบคุมอุณหภูมิรอบ ๆ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ให้คงที่ เนื่องจากจะส่งผลต่อการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนได้

5.2.4 สำหรับการออกแบบซัพพอร์ตเพื่อช่วยพยุงชิ้นงาน 3 มิติ ในขณะที่ทำการพิมพ์ชิ้นงาน ควรออกแบบให้ง่ายต่อการนำชิ้นส่วนที่ซัพพอร์ตออกจากชิ้นงาน โดยไม่ทำให้ชิ้นงาน 3 มิติ เสียหายเพื่อลดการสิ้นเปลืองของเส้นฟิลาเมนต์



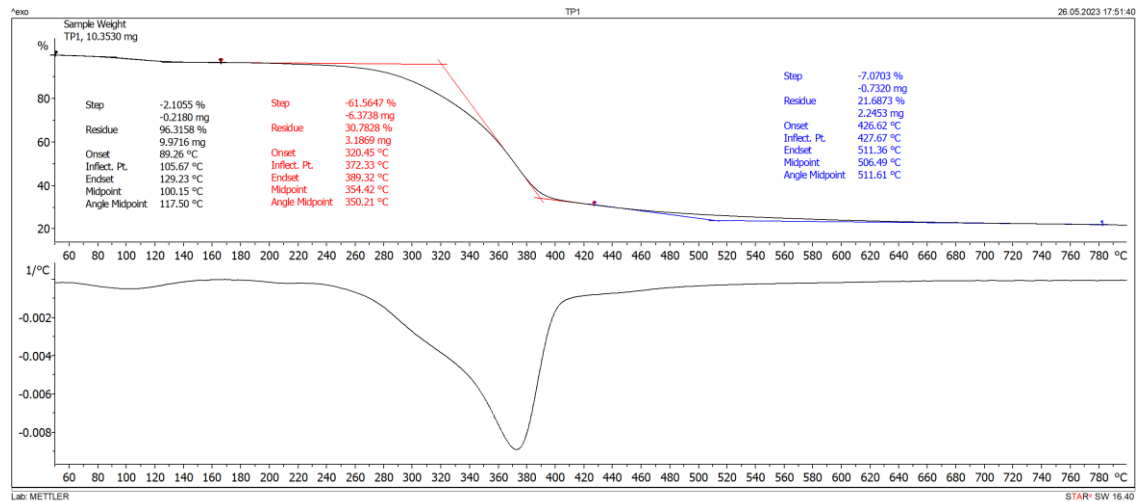
ภาคผนวก



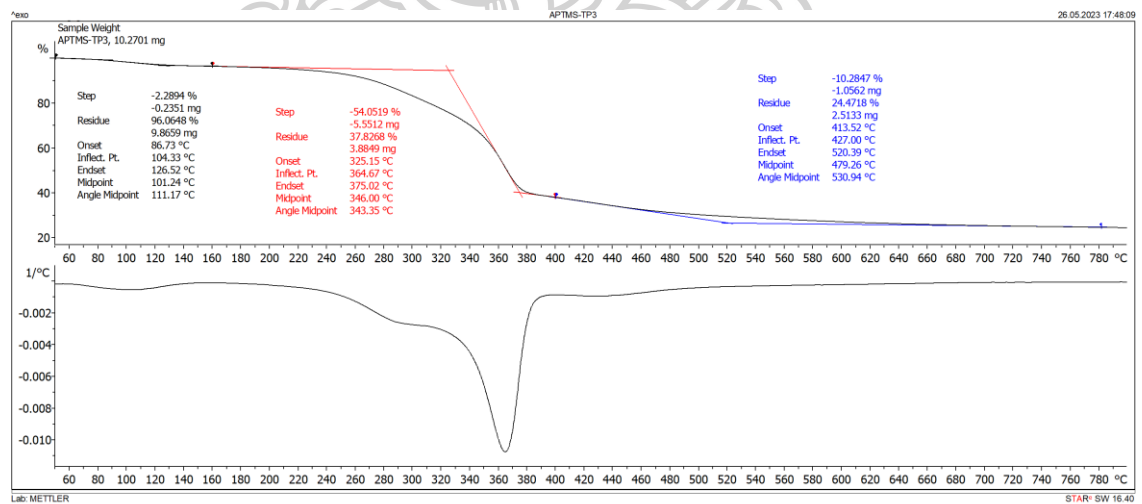
ภาคผนวก ก

ข้อมูลและการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

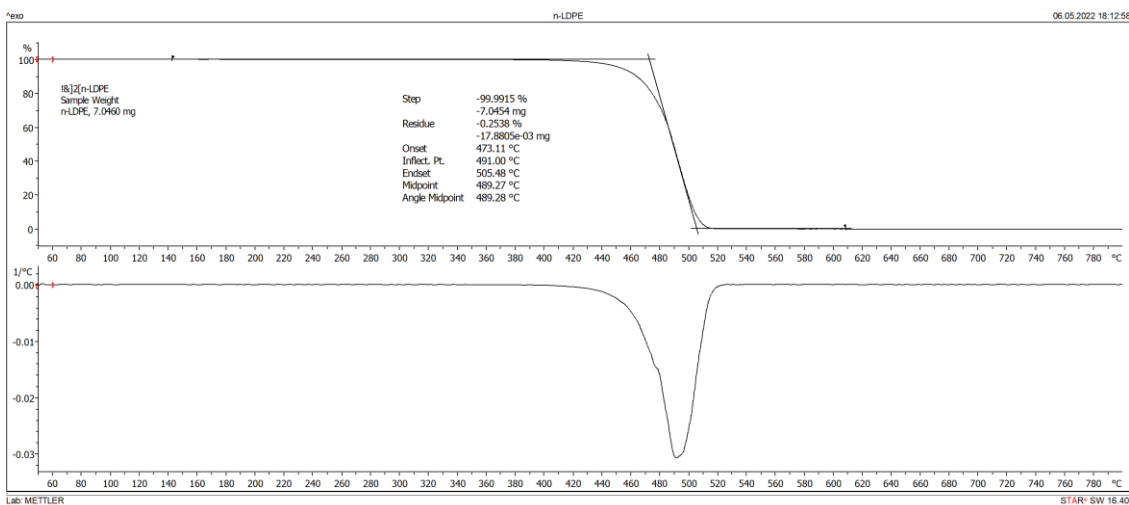
ภาคผนวก ก.1 ผลการศึกษาความเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



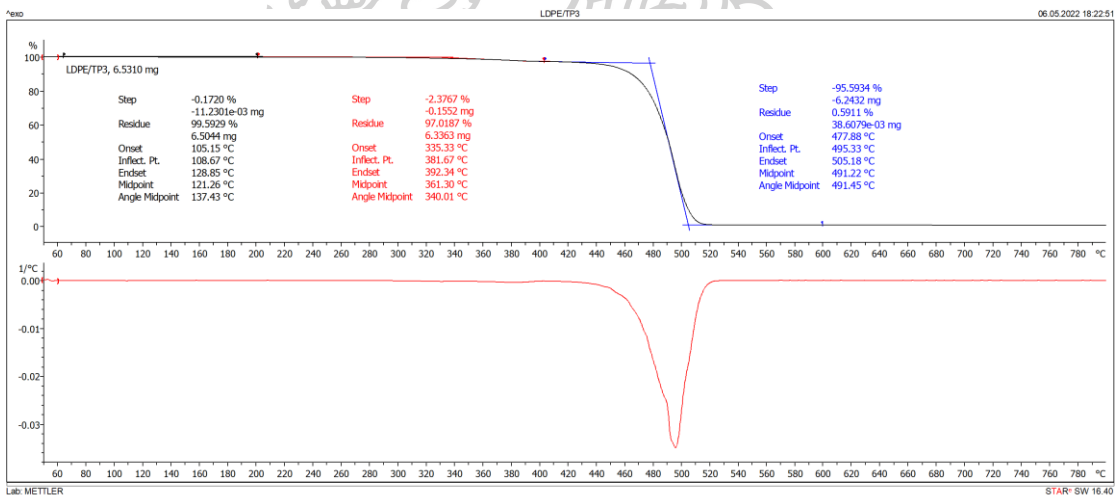
ภาพ ก.1 TGA Thermogram ของผงขี้เลื่อยไม้สัก (TP)



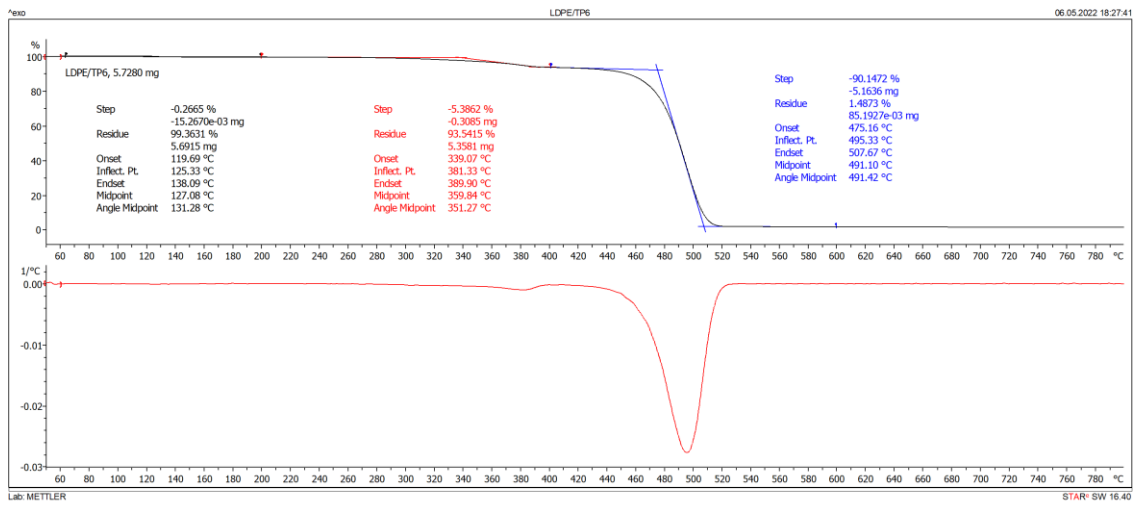
ภาพ ก.2 TGA Thermogram ของผงขี้เลื่อยไม้สักที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน (APTMS-TP)



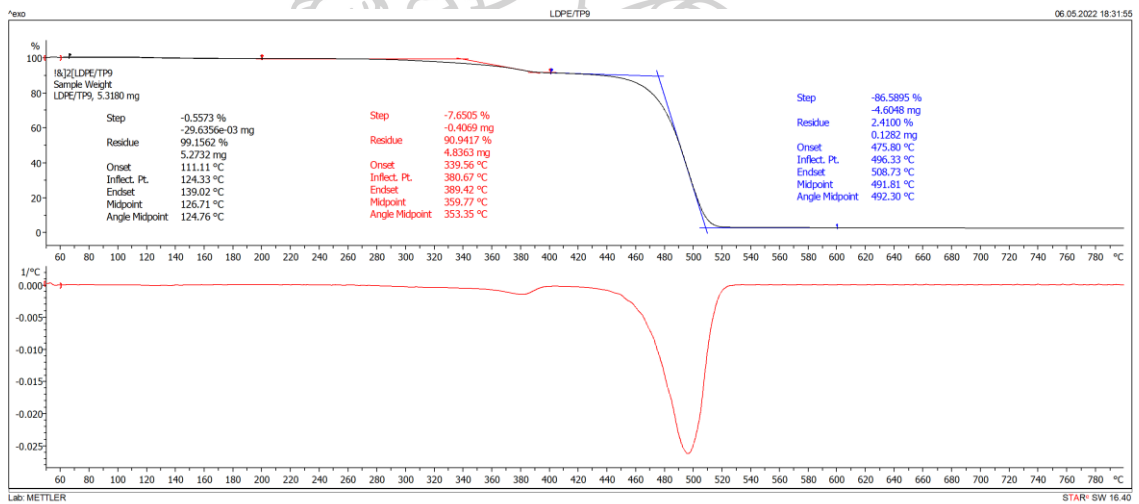
ภาพ ก.3 TGA Thermogram ของ neat-LDPE



ภาพ ก.4 TGA Thermogram ของ LDPE/TP3

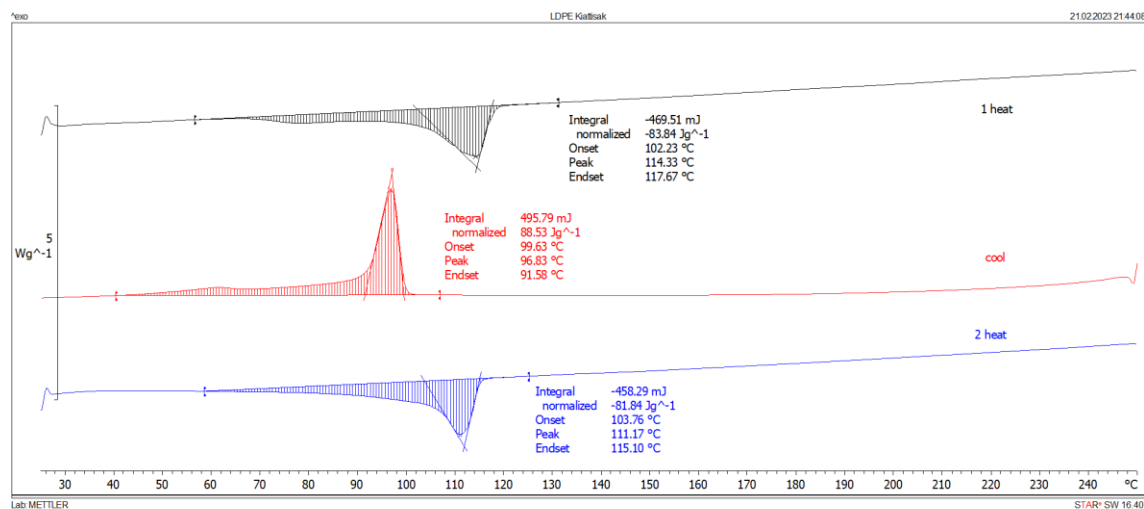


ภาพ ก.5 TGA Thermogram ของ LDPE/TP6

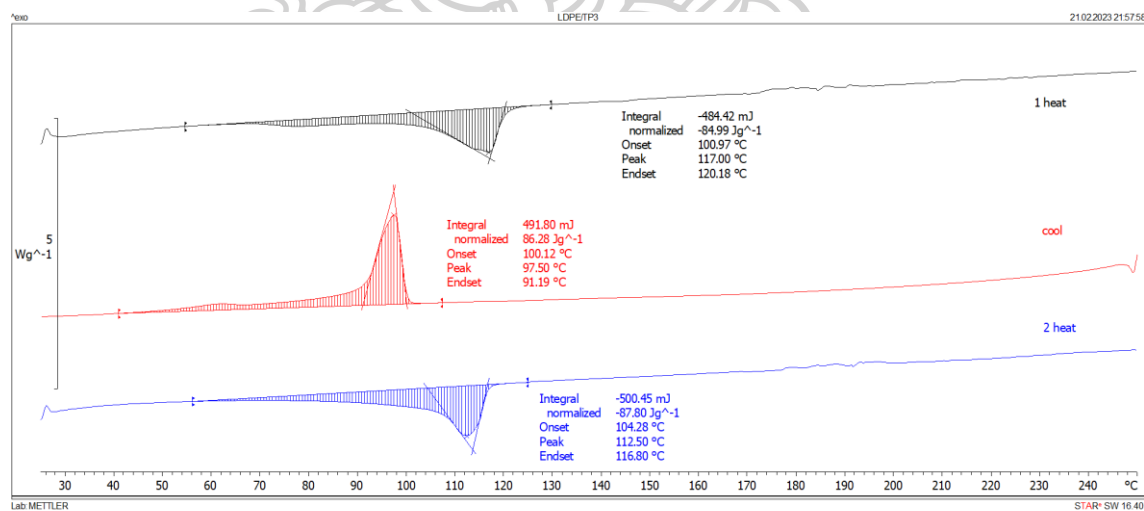


ภาพ ก.6 TGA Thermogram ของ LDPE/TP9

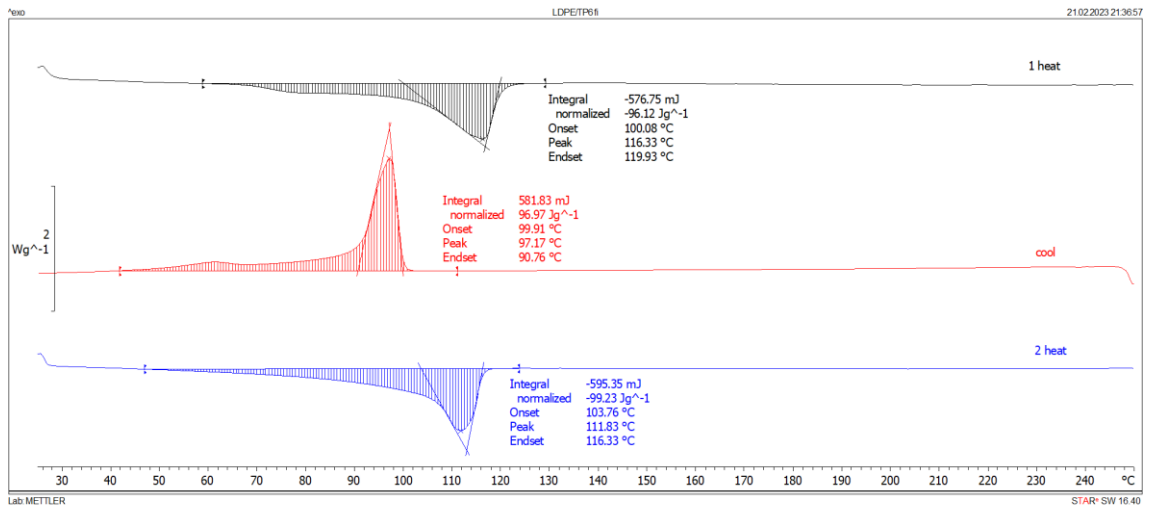
ภาคผนวก ก.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์ด้วยเทคนิค DSC



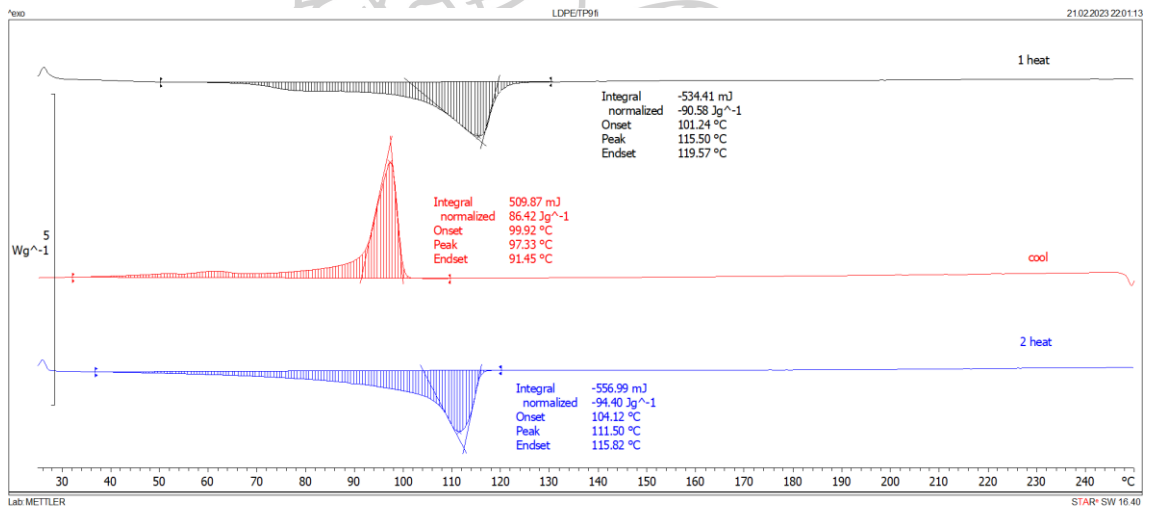
ภาพ ก.7 DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE



ภาพ ก.8 DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP3

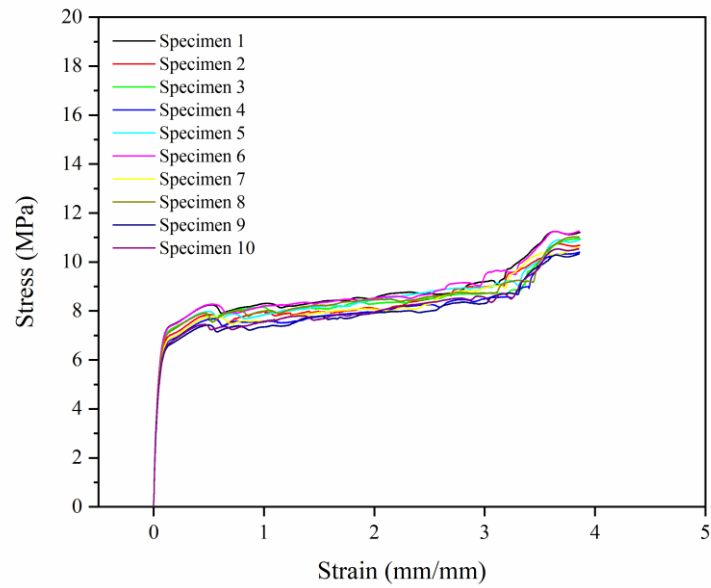


ภาพ ก.9 DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP6

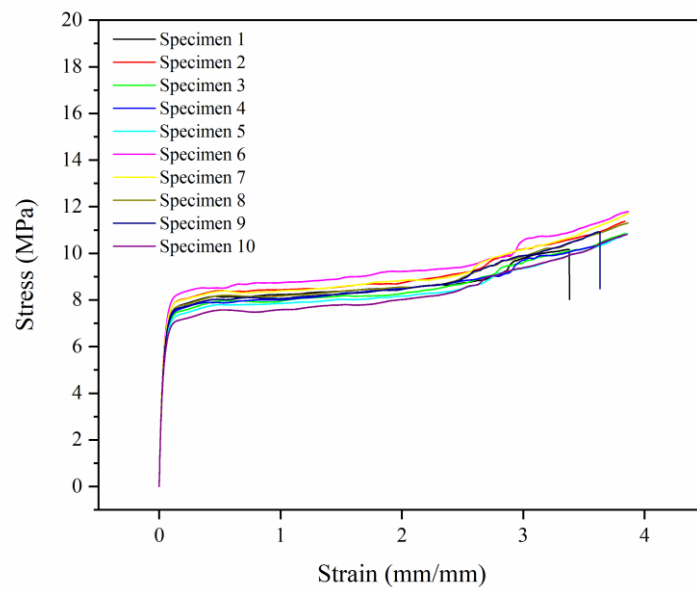


ภาพ ก.10 DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP9

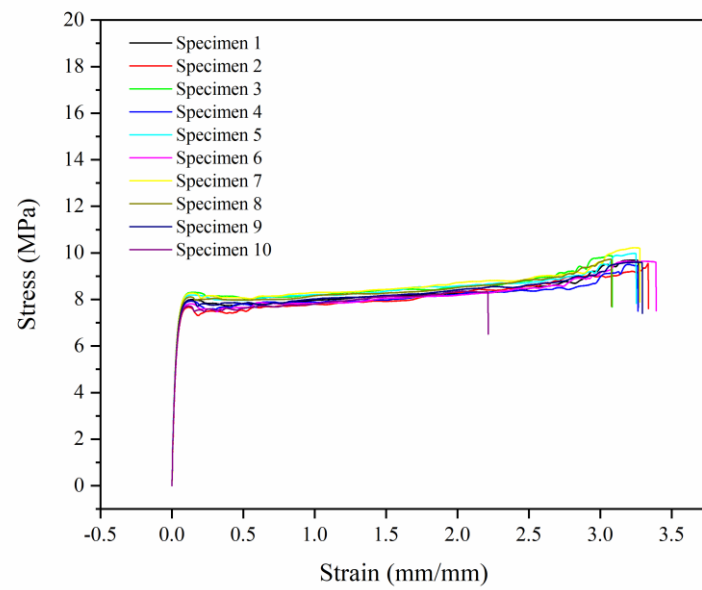
ภาคผนวก ก.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile testing)



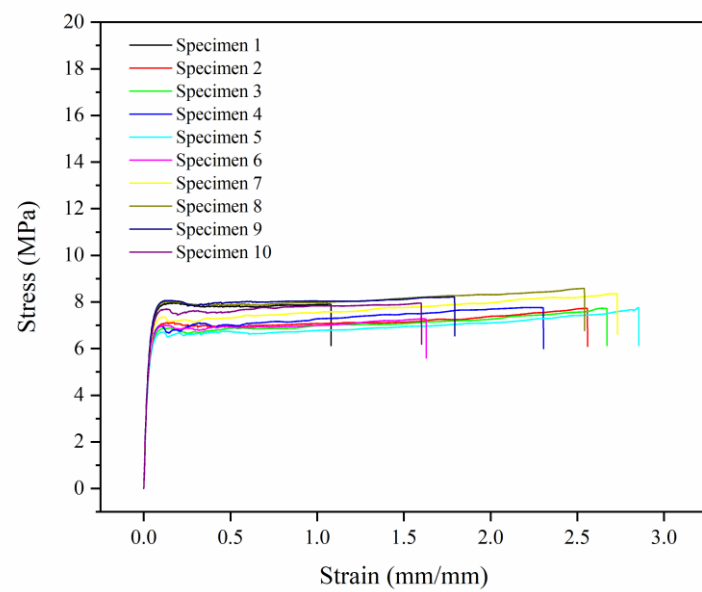
ภาพ ก.11 กราฟ stress-strain ของเส้นฟิลาเมนต์ neat LDPE



ภาพ ก.12 กราฟ stress-strain ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP3



ภาพ ก.13 กราฟ stress-strain ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP6



ภาพ ก.14 กราฟ stress-strain ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP9

ตาราง ก.1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ Tensile ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE

Specimen	Diameter [mm]	Elongation [%]	Maximum Load [N]	Tensile stress at Tensile strength [MPa]
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	1.52	386.08	20.37	11.26
4	1.54	386.01	19.94	10.74
5	-	-	-	-
6	1.59	386.35	21.70	10.95
7	1.55	385.80	19.63	10.40
8	1.56	386.10	20.80	10.91
9	1.54	385.53	20.96	11.26
10	1.51	385.45	19.07	10.62
11	1.55	385.45	20.84	11.02
12	1.57	385.42	19.93	10.33
13	1.57	385.28	20.49	10.53
14	1.52	385.10	19.73	10.89
15	1.55	385.53	20.99	11.11
16	1.54	384.98	19.48	10.41
Mean	1.55	385.62	20.30	10.80
S.D.	0.02	0.42	0.75	0.32

ตาราง ก.2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ Tensile ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP3

Specimen	Diameter [mm]	Modulus (Automatic Young's) [MPa]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Elongation [%]	Maximum Load [N]
1	-	-	-	-	-
2	1.60	212.97	11.37	383.66	22.87
3	1.61	211.05	10.86	383.70	22.05
4	1.65	214.18	10.79	383.46	22.92
5	1.59	201.58	10.85	385.89	21.54
6	1.60	220.87	11.79	386.35	23.80
7	1.57	234.37	11.71	386.35	22.61
8	1.66	218.00	11.31	386.21	24.35
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-
11	1.62	223.69	10.82	385.57	22.41
Mean	1.61	217.09	11.19	385.15	22.82
S.D.	0.03	9.71	0.42	1.31	0.91

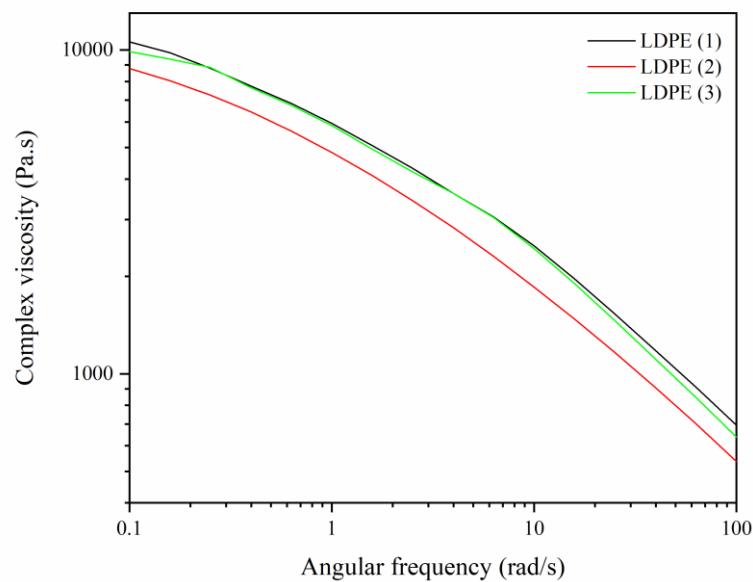
ตาราง ก.3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ Tensile ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP6

Specimen	Diameter [mm]	Modulus (Automatic Young's) [MPa]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Elongation [%]	Maximum Load [N]
1	1.60	283.67	9.69	326.38	19.46
2	1.63	270.93	9.55	333.58	19.83
3	1.57	297.70	9.89	308.30	19.07
4	1.65	285.84	9.51	326.17	20.29
5	1.62	294.81	9.98	324.98	20.55
6	1.59	279.92	9.65	338.94	19.06
7	1.58	290.88	10.23	327.60	20.10
8	1.56	285.36	9.73	307.63	18.53
9	1.60	283.75	9.60	329.40	19.19
10	1.59	283.85	8.36	221.30	16.56
11	1.61	277.91	9.02	305.56	18.36
12	1.64	284.90	9.70	345.31	20.47
13	1.56	298.47	9.98	327.93	18.98
Mean	1.60	286.00	9.61	317.16	19.27
S.D.	0.03	7.85	0.47	31.13	1.08

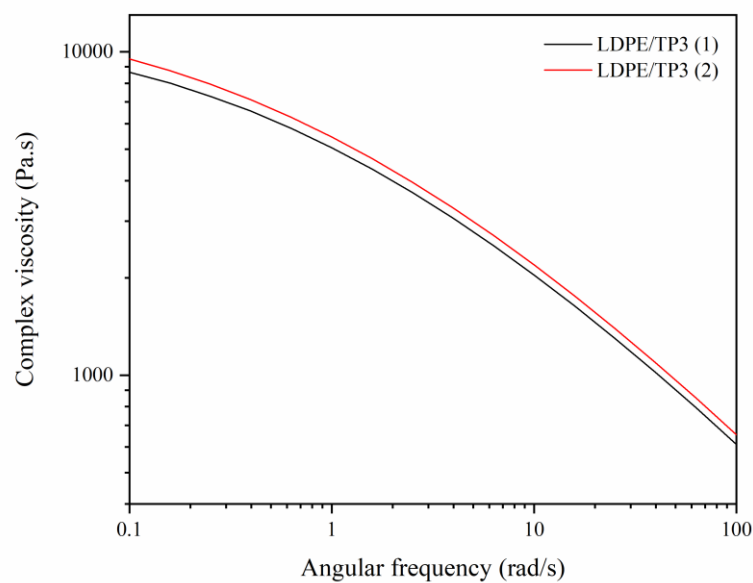
ตาราง ก.4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ Tensile ของเส้นฟิลาเมนต์ LDPE/TP9

Specimen	Diameter [mm]	Modulus (Automatic Young's) [MPa]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]	Elongation [%]	Maximum Load [N]
1	1.54	283.34	7.96	107.83	14.85
2	1.57	277.57	7.73	255.82	14.98
3	1.59	279.86	7.73	266.92	15.34
5	1.60	284.45	7.77	230.28	15.70
6	1.58	277.51	7.76	285.32	15.18
7	1.53	287.88	7.28	162.72	13.37
8	1.58	276.81	8.36	272.91	16.37
9	1.57	292.39	8.59	253.97	16.69
10	1.58	299.80	8.22	179.21	16.12
11	1.61	287.92	7.95	159.96	16.19
12	1.53	302.83	8.14	78.21	15.04
Mean	1.57	286.40	7.95	204.83	15.44
S.D.	0.03	8.91	0.36	71.07	0.93

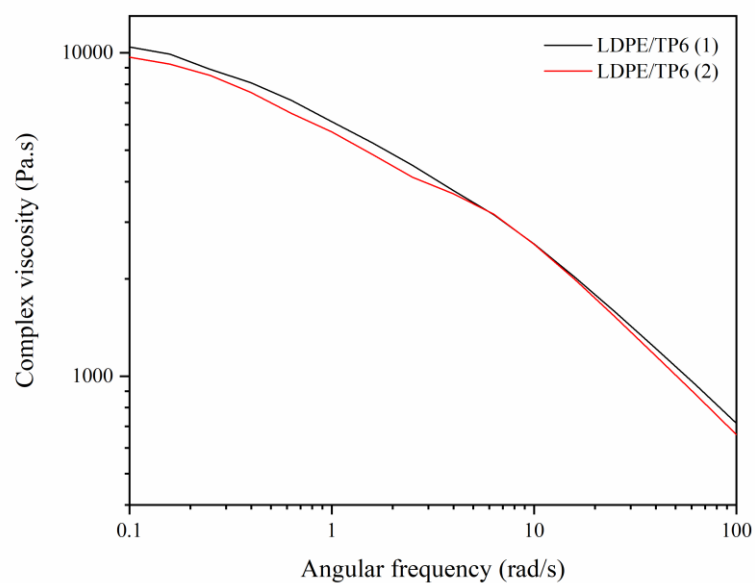
ภาคผนวก ก.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิค Rheometer



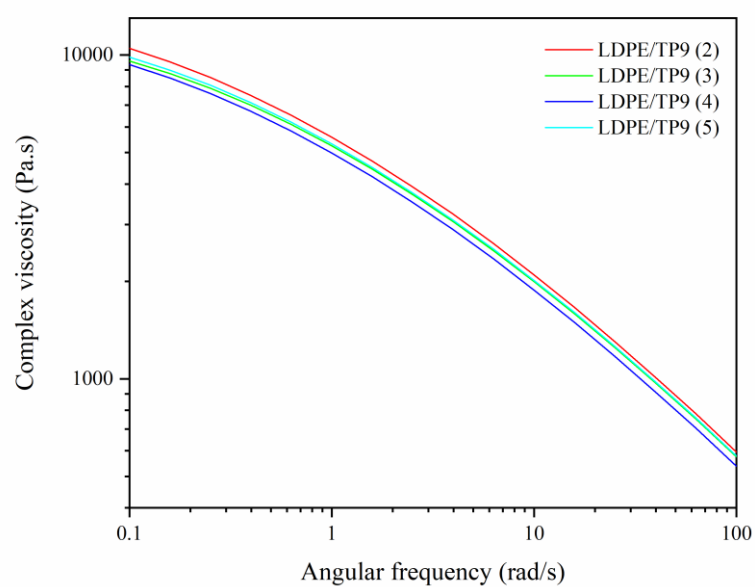
ภาพ ก.15 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส



ภาพ ก.16 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส



ภาพ ก.17 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP6 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส



ภาพ ก.18 กราฟแสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP9 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ก.5 ผลการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption)

ตาราง ก.5 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Water absorption ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3

LDPE/TP3	weight sample (mg)				Water Absorption (%)			
	ลำดับ	W ₀	24hr	48hr	72hr	24hr	48hr	72hr
	1	794.4	796.2	797.2	798.7	0.227	0.352	0.541
	2	831.9	834.6	834.7	835.7	0.325	0.337	0.457
	3	775.5	777.4	780.2	783.6	0.245	0.606	1.044
	4	820.7	821.9	824.5	825.0	0.146	0.463	0.524
	5	783.3	785.5	786.2	788.9	0.281	0.370	0.715
	6	800.5	802.2	804.5	803.7	0.212	0.500	0.400
	7	832.6	835.2	835.7	836.4	0.312	0.372	0.456
	8	805.9	807.4	809.4	810.4	0.186	0.434	0.558
	9	773.1	775.1	775.7	776.8	0.259	0.336	0.479
	10	769.1	770.4	771.9	775.3	0.169	0.364	0.806
	11	813.2	814.9	817.3	816.4	0.209	0.504	0.394
	12	783.7	786.8	785.8	786.5	0.396	0.268	0.357
	13	823.5	825.5	825.5	826.7	0.243	0.243	0.389
	14	799.8	801.0	804.7	804.7	0.150	0.613	0.613
	15	792.6	793.9	794.8	797.4	0.164	0.278	0.606
	16	812.3	814.3	817.0	818.4	0.246	0.579	0.751
	17	762.8	765.3	772.3	771.4	0.328	1.245	1.127
	18	808.3	810.0	811.1	812.4	0.210	0.346	0.507
	19	765.7	767.0	770.4	770.2	0.170	0.614	0.588
	20	787.8	789.8	793.0	790.0	0.254	0.660	0.279
	21	823.4	826.0	830.2	827.0	0.316	0.826	0.437
	22	813.1	814.7	816.2	817.0	0.197	0.381	0.480
Average						0.238	0.486	0.569
SD						0.066	0.225	0.211

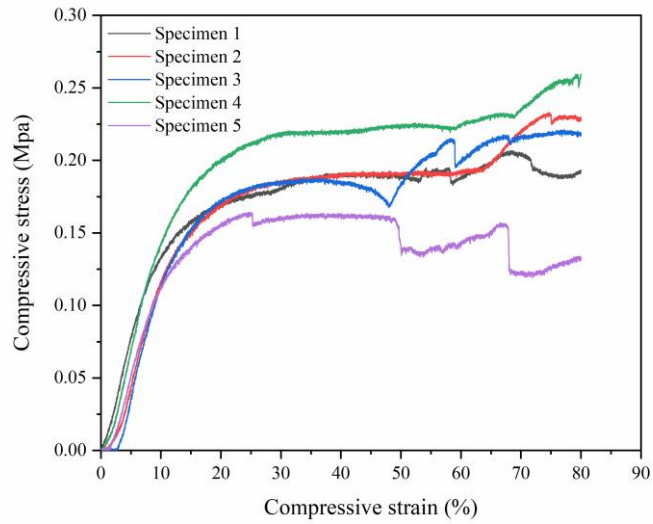
ตาราง ก.6 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Water absorption ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP6

LDPE/TP6	weight sample (mg)				Water Absorption (%)		
ลำดับ	W0	24hr	48hr	72hr	24hr	48hr	72hr
1	838.8	843.2	845.4	844.8	0.525	0.787	0.715
2	864.9	867.2	873.1	870.4	0.266	0.948	0.636
3	914.9	918.6	919.1	919.3	0.404	0.459	0.481
4	840.2	842.9	845.7	849.8	0.321	0.655	1.143
5	878.6	893.8	883.0	885.4	1.730	0.501	0.774
6	865.3	868.1	869.6	873.3	0.324	0.497	0.925
7	838.9	841.5	844.6	846.9	0.310	0.679	0.954
8	817.7	821.1	825.7	824.2	0.416	0.978	0.795
9	854.6	857.6	863.1	861.7	0.351	0.995	0.831
10	848.9	851.7	857.1	858.7	0.330	0.966	1.154
11	846.1	848.8	850.5	854.0	0.319	0.520	0.934
12	875.0	877.5	883.1	881.4	0.286	0.926	0.731
13	860.4	865.8	866.4	871.2	0.628	0.697	1.255
14	878.7	881.1	884.0	885.9	0.273	0.603	0.819
15	823.7	826.9	831.0	828.7	0.388	0.886	0.607
16	844.1	853.8	849.7	848.8	1.149	0.663	0.557
17	846.2	848.3	854.7	856.2	0.248	1.004	1.182
18	859.8	864.1	869.5	868.9	0.500	1.128	1.058
19	841.8	844.3	848.1	851.8	0.297	0.748	1.188
20	865.2	867.5	875.1	872.2	0.266	1.144	0.809
21	831.2	842.3	836.0	835.4	1.335	0.577	0.505
22	866.6	870.0	874.5	873.4	0.392	0.912	0.785
Average					0.503	0.785	0.856
SD					0.389	0.213	0.232

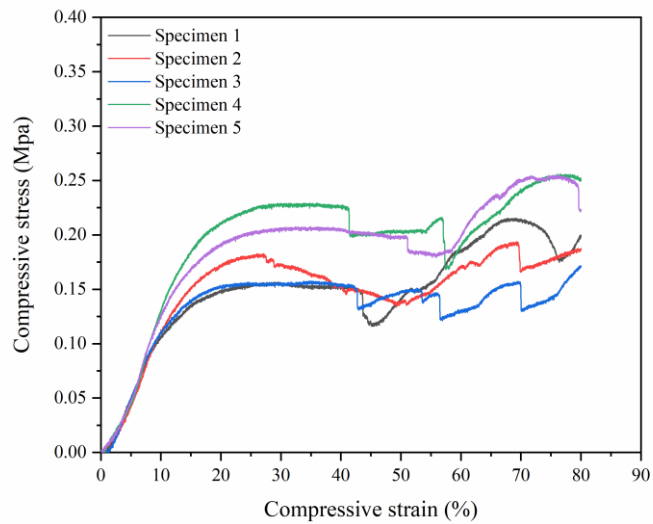
ตาราง ก.7 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Water absorption ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP9

LDPE/TP9	weight sample (mg)				Water Absorption (%)		
	ลำดับ	W0	24hr	48hr	72hr	24hr	48hr
1	851.2	854.2	865.4	866.1	0.352	1.668	1.750
2	841.7	851.8	848.5	849.5	1.200	0.808	0.927
3	882.2	887.1	891.7	894.3	0.555	1.077	1.372
4	878.4	886.5	897.8	887.8	0.922	2.209	1.070
5	850.0	853.2	860.8	859.4	0.376	1.271	1.106
6	805.7	810.2	813.8	820.0	0.559	1.005	1.775
7	855.8	859.9	867.4	869.2	0.479	1.355	1.566
8	835.5	843.9	842.5	844.8	1.005	0.838	1.113
9	834.4	837.9	842.4	842.4	0.419	0.959	0.959
10	852.7	858.6	864.3	869.3	0.692	1.360	1.947
11	853.2	857.2	862.5	866.8	0.469	1.090	1.594
12	846.4	857.6	860.5	864.5	1.323	1.666	2.138
13	818.9	822.6	825.2	829.4	0.452	0.769	1.282
14	875.4	879.0	882.2	887.0	0.411	0.777	1.325
15	838.9	846.0	850.6	849.6	0.846	1.395	1.275
16	842.9	845.5	853.9	853.0	0.308	1.305	1.198
17	832.2	836.0	842.6	840.7	0.457	1.250	1.021
18	853.1	857.4	865.4	859.9	0.504	1.442	0.797
19	879.2	888.5	893.5	889.6	1.058	1.626	1.183
20	789.4	792.2	801.0	800.3	0.355	1.469	1.381
21	799.3	805.0	809.4	818.9	0.713	1.264	2.452
22	823.6	826.6	833.7	839.0	0.364	1.226	1.870
Average					0.628	1.265	1.414
SD					0.300	0.349	0.427

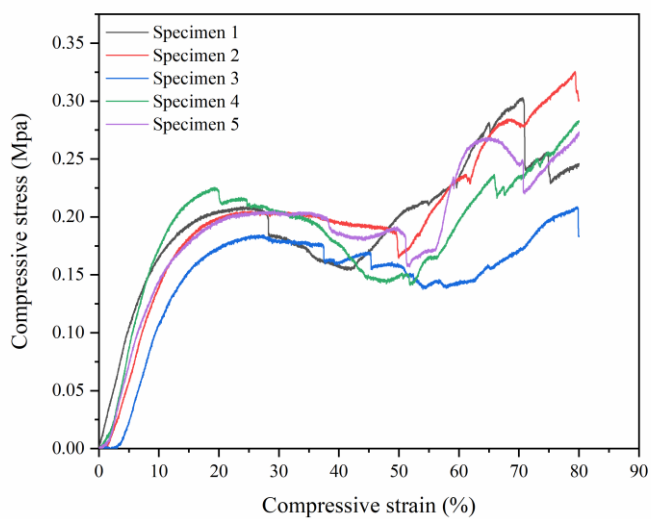
ภาคผนวก ก.6 ผลการศึกษา Compression แบบคงที่ (Static Testing)



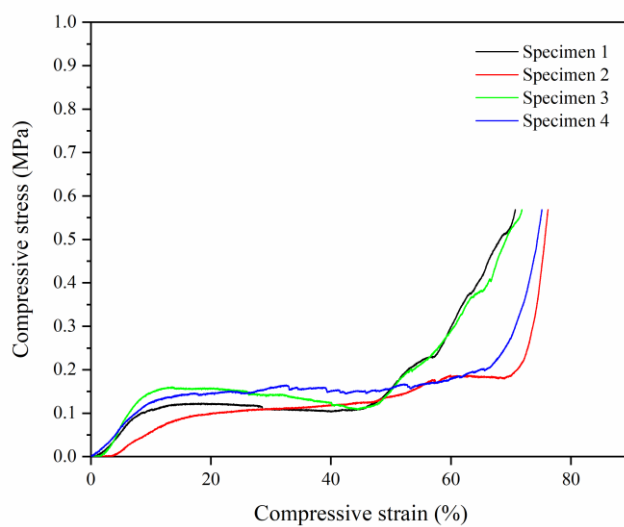
ภาพ ก.19 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดลที่ 1 Semi-spherical



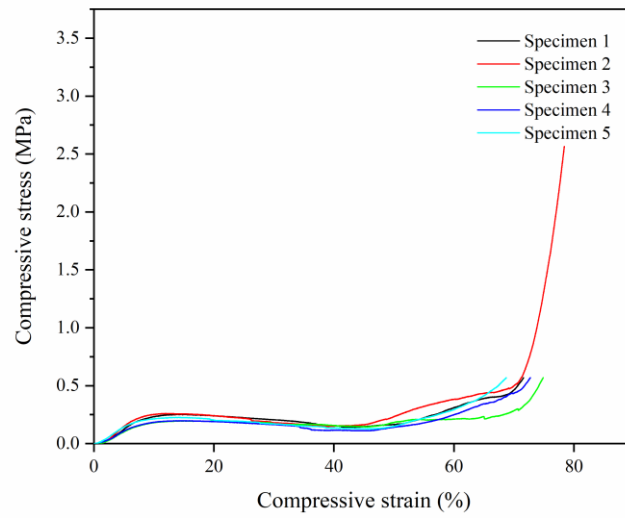
ภาพ ก.20 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดลที่ 1 Semi-spherical



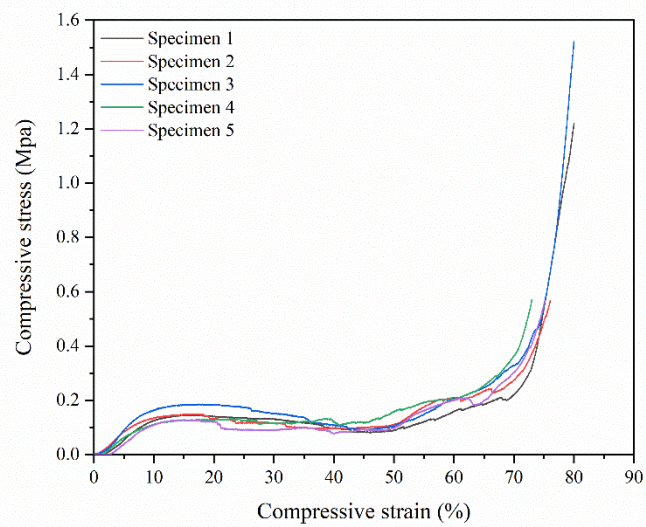
ภาพ ก.21 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดลที่ 1 Semi-spherical



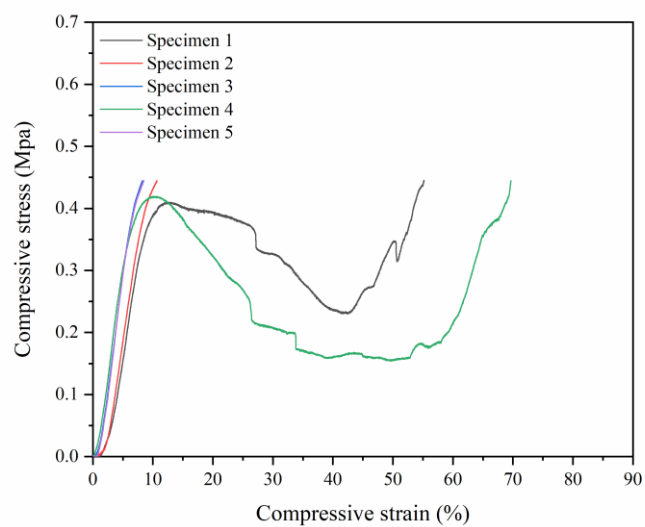
ภาพ ก.22 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดลที่ 2 Cylindrical



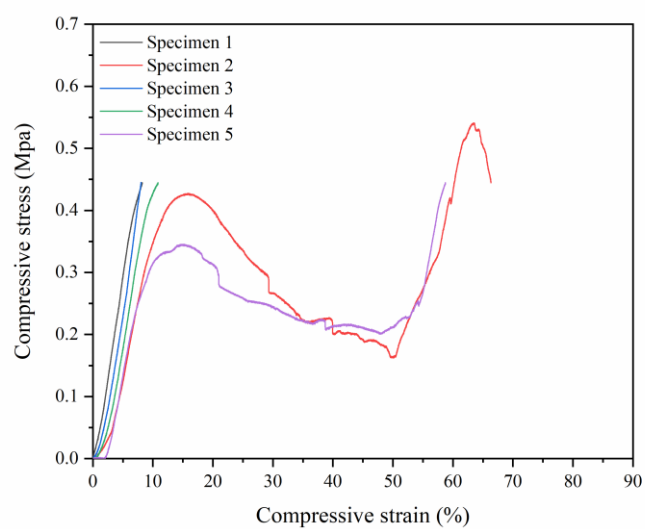
ภาพ ก.23 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ
จากคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดลที่ 2 Cylindrical



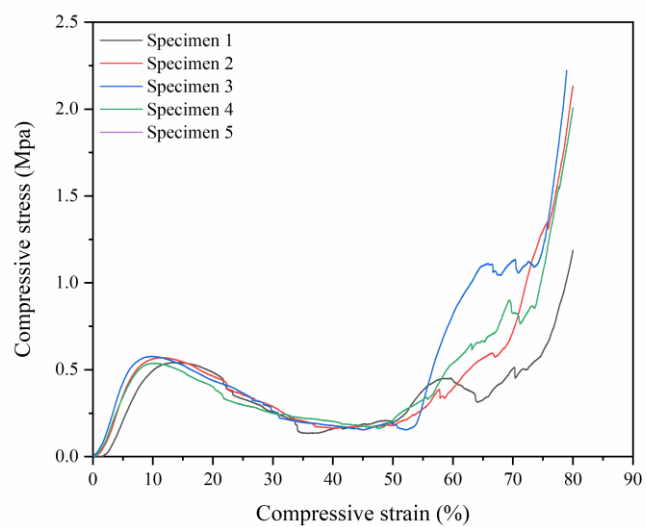
ภาพ ก.24 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ
จากคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดลที่ 2 Cylindrical



ภาพ ก.25 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ
จากคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดลที่ 3 Cubic



ภาพ ก.26 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ
จากคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดลที่ 3 Cubic



ภาพ ก.27 กราฟ Compressive stress-strain ของชิ้นงาน 3 มิติ จากคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดลที่ 3 Cubic



ตาราง ก.8 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดล Cylindrical

Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
X 1	----	----	----	----
2	1.97751	14.24029	0.71201	0.5684
X 3	----	----	----	----
4	1.56601	14.14654	0.70733	0.5686
5	0.77650	15.23338	0.76167	0.5684
6	2.57518	14.36531	0.71827	0.5685
7	1.41509	15.03163	0.75158	0.5684
Mean	1.66206	14.60343	0.73017	0.5684
S.D.	0.66853	0.49435	0.02472	0.00008

ตาราง ก.9 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดล Cylindrical

Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
1	3.89666	14.31568	0.71578	0.5685
2	4.53372	16.00002	0.80000	3.3759
3	2.71016	14.97426	0.74871	0.5687
4	3.07553	14.54470	0.72723	0.5694
5	3.21867	13.74564	0.68728	0.5684
Mean	3.48695	14.71606	0.73580	1.1302
S.D.	0.72599	0.84359	0.04218	1.25540

ตาราง ก.10 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดล Cylindrical

Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
X 1	----	----	----	----
2	1.86737	16.00002	0.80000	1.2188
3	1.91742	15.21081	0.76054	0.5684
X 4	4.82415	-0.03435	-0.00172	0.0031
5	2.72674	16.00002	0.80000	1.5226
6	1.73034	14.59599	0.72980	0.5710
7	1.80315	15.03191	0.75160	0.5684
Mean	2.00900	15.36775	0.76839	0.8898
S.D.	0.40731	0.61898	0.03095	0.45190

ตาราง ก.11 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดล Semi-spherical

Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
1	1.62841	16.00002	0.80000	0.1925
2	1.49238	15.99851	0.79993	0.2290
3	1.73159	15.99935	0.79997	0.2181
4	1.68472	16.00002	0.80000	0.2591
5	1.48152	16.00002	0.80000	0.1333
Mean	1.60372	15.99958	0.79998	0.2064
S.D.	0.11275	0.00067	0.00003	0.04731

ตาราง ก.12 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดล Semi-spherical

Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
1	1.30829	15.99890	0.79995	0.1993
2	1.47228	15.99812	0.79991	0.1869
3	1.39339	16.00002	0.80000	0.1713
4	1.77578	15.99929	0.79996	0.2514
5	1.44553	16.00002	0.80000	0.2233
Mean	1.47905	15.99927	0.79996	0.2064
S.D.	0.17728	0.00080	0.00004	0.03152

ตาราง ก.13 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดล Semi-spherical

Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
1	2.11324	16.00002	0.80000	0.2460
2	1.65542	15.99776	0.79989	0.3010
3	1.59282	15.99957	0.79998	0.1836
4	2.30618	15.99851	0.79993	0.2825
5	1.97766	15.99959	0.79998	0.2723
Mean	1.92906	15.99909	0.79995	0.2571
S.D.	0.30267	0.00093	0.00005	0.04564

ตาราง ก.14 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดล Cubic

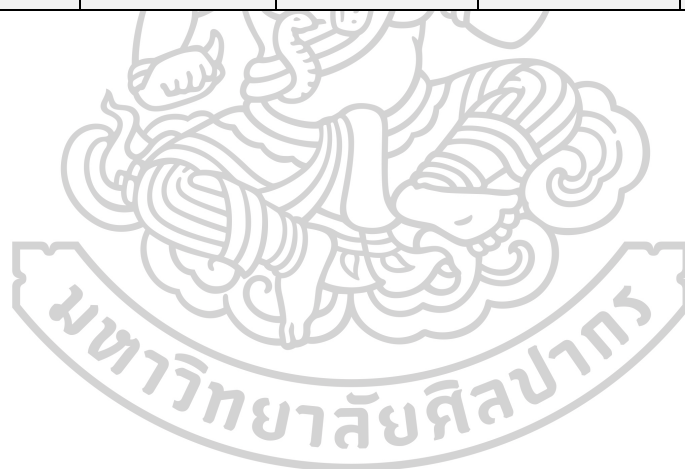
Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
1	6.47185	13.79129	0.55165	0.4448
X 2	----	----	----	----
X 3	----	----	----	----
X 4	----	----	----	----
X 5	----	----	----	----
X 6	----	----	----	----
7	7.87406	17.41311	0.69652	0.4444
X 8	----	----	----	----
Mean	7.24013	8.99740	0.35990	0.4446
S.D.	0.77355	7.77184	0.31087	0.00019

ตาราง ก.15 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดล Cubic

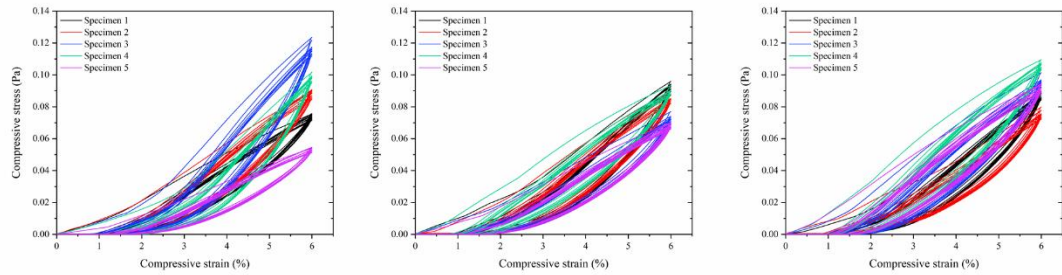
Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
1	6.95761	2.05691	0.08228	0.4444
2	4.78995	16.58371	0.66335	0.4449
3	7.53680	2.00632	0.08025	0.4451
4	6.14903	2.71045	0.10842	0.4444
5	5.19207	14.68928	0.58757	0.4444
Mean	6.12509	7.60933	0.30437	0.4446
S.D.	1.15539	7.36355	0.29454	0.00030

ตาราง ก.16 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบ compressive test ของชิ้นงาน 3 มิติ จากวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP9 โม่เดล Cubic

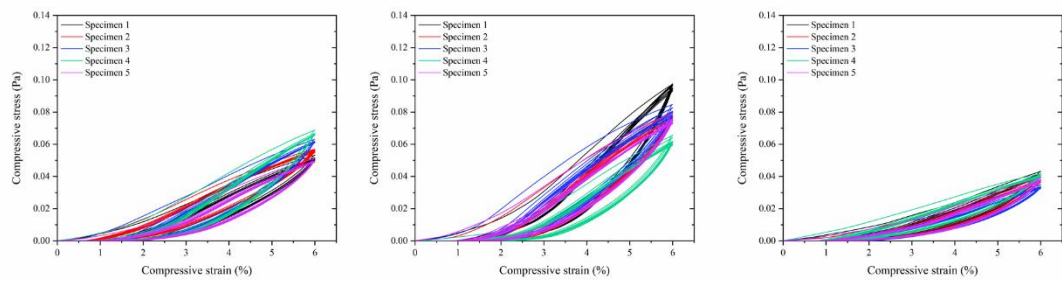
Specimen	Modulus (Automatic) [MPa]	Compressive extension at Break [mm]	Compressive strain at Break [mm/mm]	Compressive stress at Break [MPa]
1	10.45153	1.67294	0.06692	0.4446
2	8.29762	1.87861	0.07514	0.4446
3	9.05691	5.54015	0.22161	0.4466
4	8.96880	1.59405	0.06376	0.4444
5	10.51033	1.72673	0.06907	0.4450
Mean	9.45704	2.48250	0.09930	0.4450
S.D.	0.97995	1.71244	0.06850	0.00092



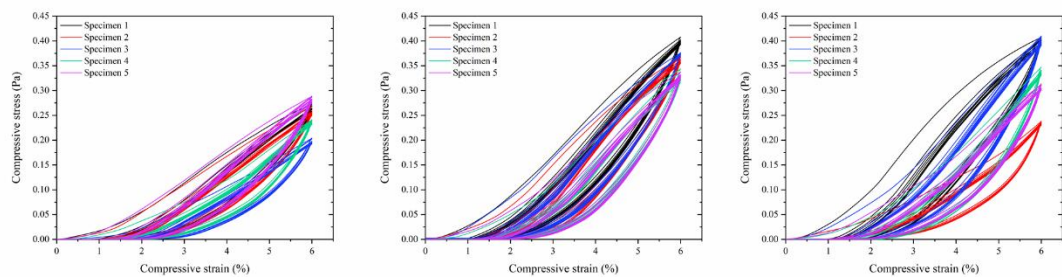
ภาคผนวก ก.7 ผลการศึกษา Compression แบบพลวัต (Dynamic Testing)



ภาพ ก.28 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 6 % โมเดล Semi-spherical

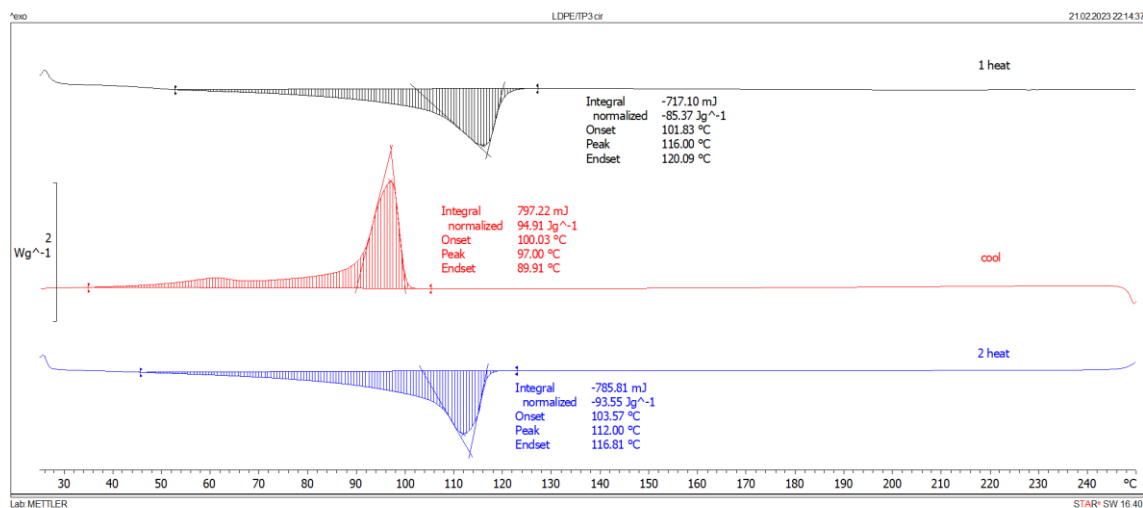


ภาพ ก.29 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 6 % โมเดล Cylindrical

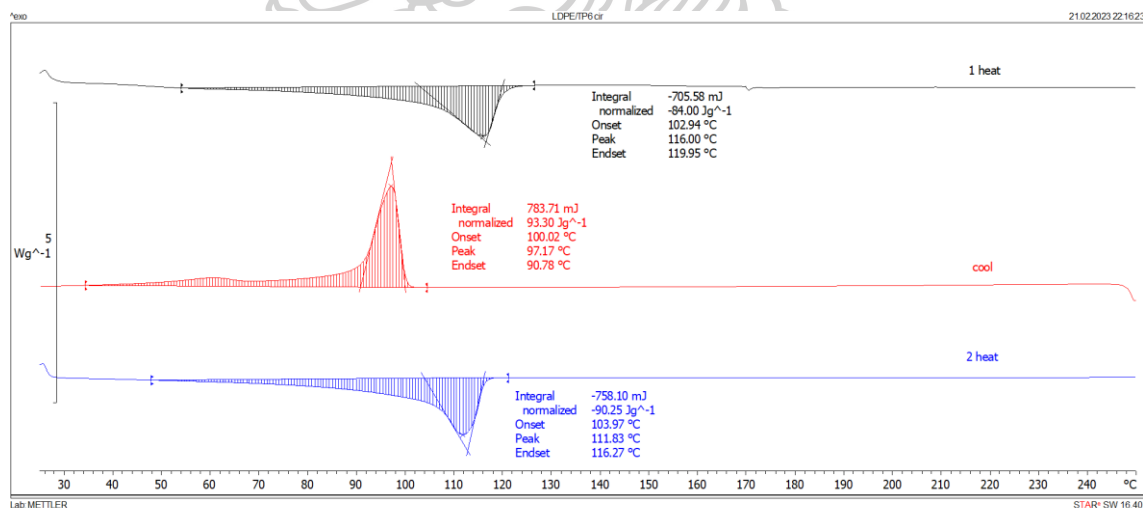


ภาพ ก.30 แสดงความสัมพันธ์ของ Compressive stress กับ Compressive strain ของคอมพอสิต LDPE/TP ที่ระยะ strain เท่ากับ 6 % โมเดล Cubic

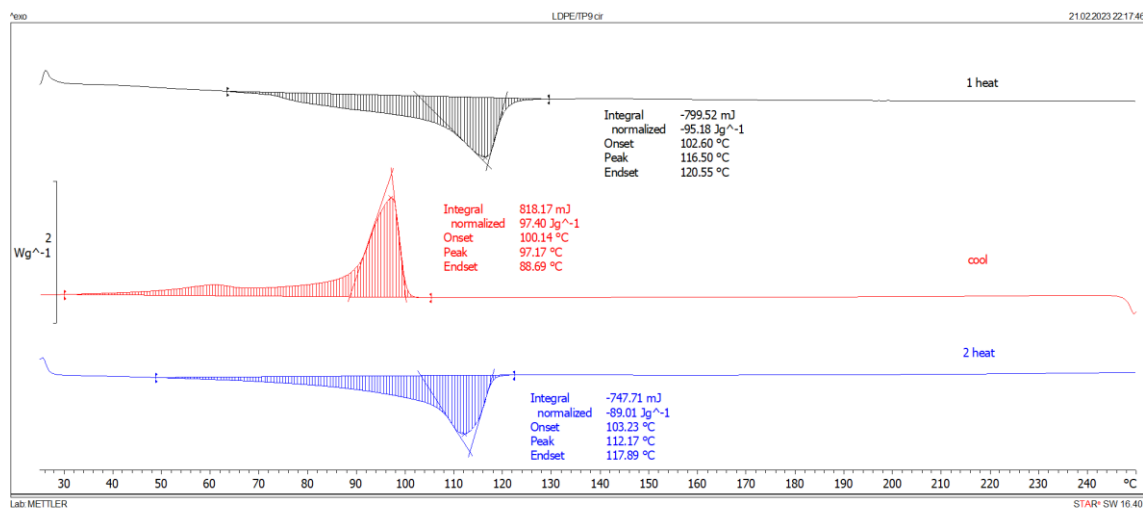
ภาคผนวก ก.8 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน 3 มิติด้วยเทคนิค DSC



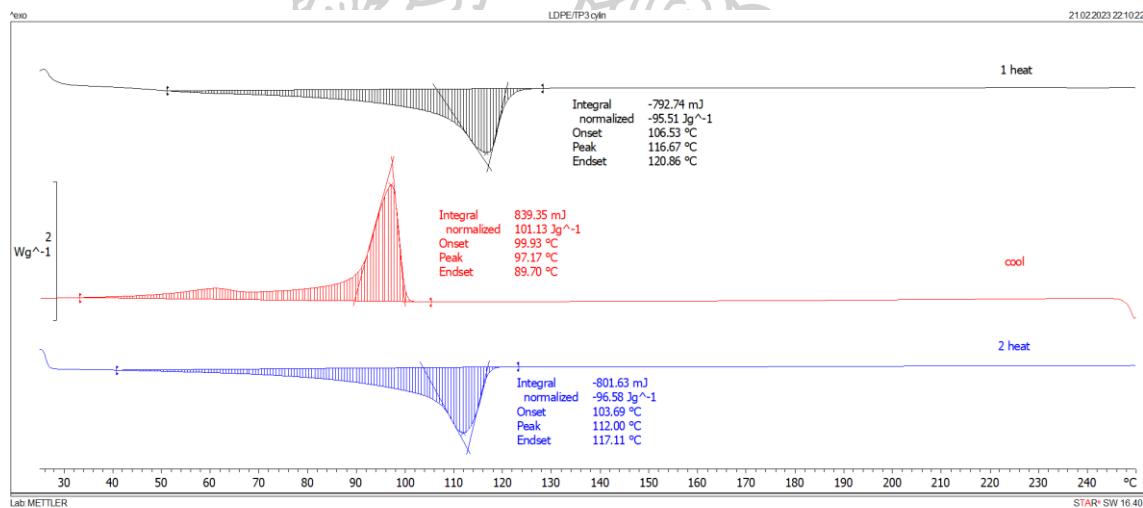
ภาพ ก.31 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP3 โมเดล Semi-spherical



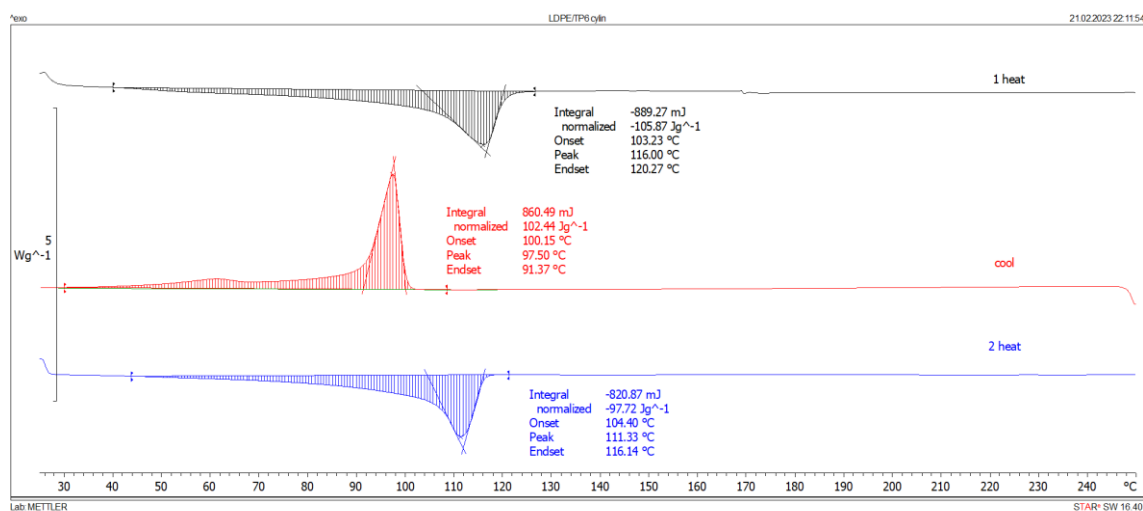
ภาพ ก.32 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP6 โมเดล Semi-spherical



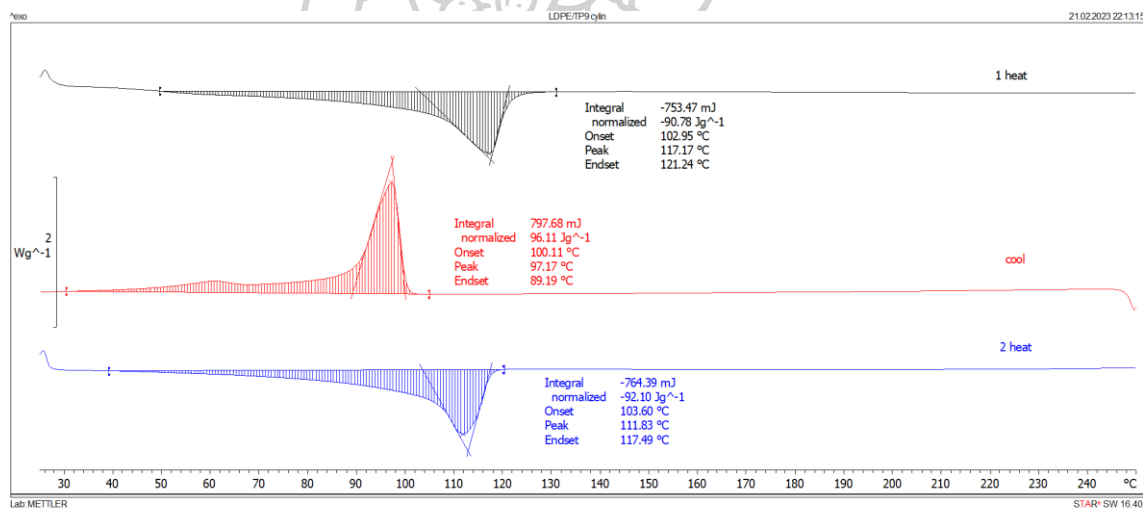
ภาพ ก.33 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอลสิต LDPE/TP9 โมเดล Semi-spherical



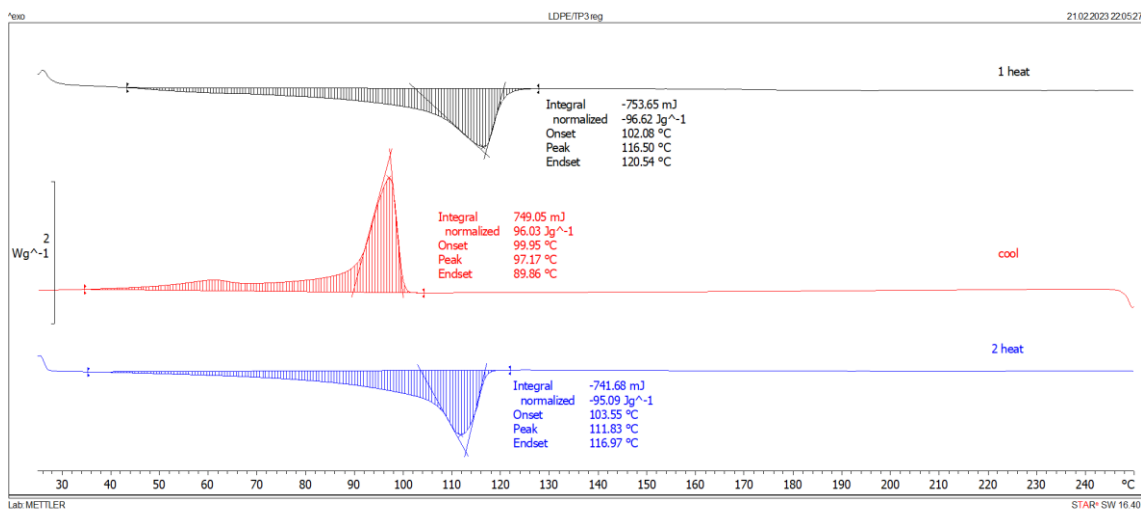
ภาพ ก. 34 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอลสิต LDPE/TP3 โมเดล Cylindrical



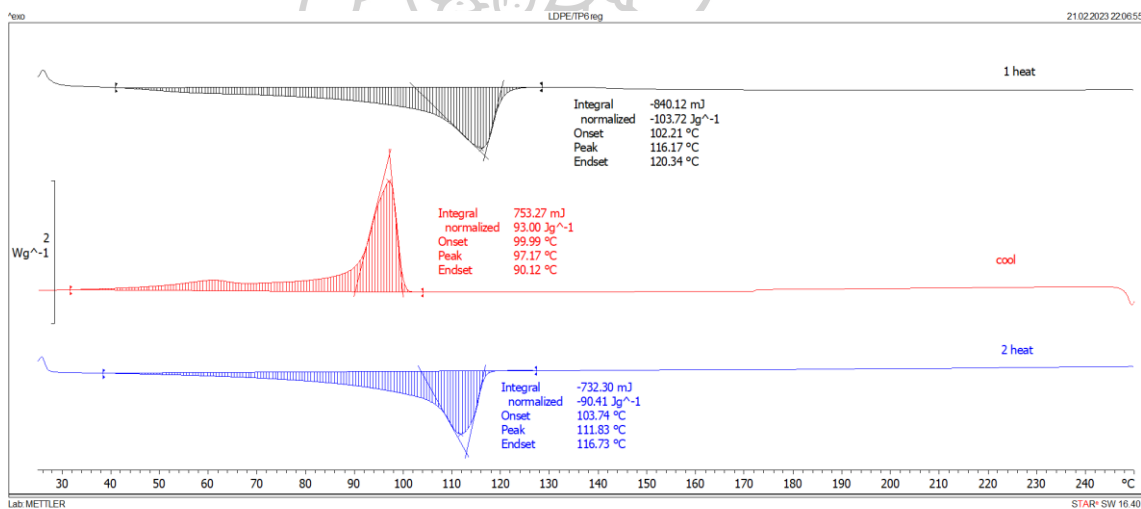
ภาพ ก.35 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดล Cylindrical



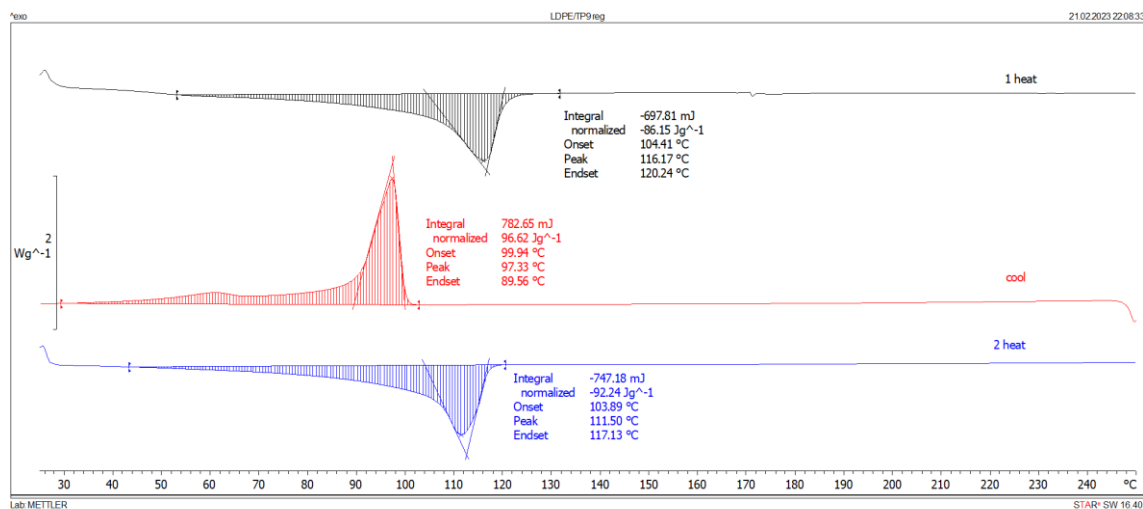
ภาพ ก.36 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดล Cylindrical



ภาพ ก.37 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP3 โมเดล Cubic



ภาพ ก.38 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP6 โมเดล Cubic



ภาพ ก.39 DSC Thermogram ของชิ้นงาน 3 มิติคอมพอสิต LDPE/TP9 โมเดล Cubic





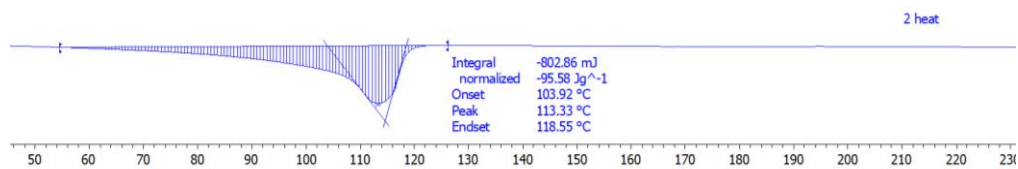
ภาคผนวก ข.1 แสดงวิธีการคำนวณหาปริมาณผลึก (Degree of Crystallinity, X_c) ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC

จากสมการ

$$X_c = \frac{1}{1 - W_t} \left(\frac{\Delta H_{\text{experimental}}}{\Delta H_{\text{theoretical}}} \right) \times 100$$

เมื่อ X_c	คือ ปริมาณผลึกของ LDPE
$\Delta H_{\text{experimental}}$	คือ ค่า Heat of fusion ของอนุกรมผลึก
$\Delta H_{\text{theoretical}}$	คือ ค่า Heat of fusion ที่หลอมผลึก 100% ของ LDPE คือ 293 J/g
$1 - W_t$	คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ LDPE ใน LDPE/TP

ตัวอย่างการคำนวณ



โดยจะพิจารณาจากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (2nd Heating) ของวัสดุคอมพอสิต LDPE/TP3 ซึ่งจากภาพภาคผนวก ข.1 แสดงค่า normalized -95.58 J/g หมายความว่าค่า $\Delta H_{\text{experimental}} = 95.58$ J/g และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ LDPE : TP เป็น 97 : 3 โดยน้ำหนัก จะสามารถคำนวณหาปริมาณผลึกได้ดังนี้

$$X_c = \frac{1}{1 - 0.03} \left(\frac{95.58}{293} \right) \times 100$$

$$X_c = 33.63\%$$

ภาคผนวก ข.2 แสดงวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP

จากสมการ

$$\% \text{ Water absorption} = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100$$

เมื่อ W_{wet} คือ น้ำหนักที่ผ่านการแช่น้ำกลั่น (Wet weight)

W_{dry} คือ น้ำหนักแห้ง (Dry weight)

ตัวอย่างการคำนวณ

ตาราง ข.1 แสดงตัวอย่างผลการดูดซับน้ำของวัสดุคอมพอลิเมอร์ LDPE/TP3

LDPE/TP	weight sample (mg)				Water Absorption (%)		
	W_0	24hr	48hr	72hr	24hr	48hr	72hr
3	794.4	796.2	797.2	798.7	0.227	0.352	0.541

โดยจากตารางภาคผนวก ข.1 เลือกพิจารณาที่น้ำหนักของชิ้นงานที่แช่น้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดย W_{wet} เท่ากับ 796.2 มิลลิกรัม และ W_{dry} เท่ากับ 794.4 มิลลิกรัม แทนค่าในสมการจะได้

$$\% \text{ Water absorption} = \left(\frac{796.2 - 794.4}{794.4} \times 100 \right)$$

$$\% \text{ Water absorption} = 0.227\%$$



ภาคผนวก ค-1 การประชุมวิชาการ The Pure and Applied Chemistry International Conference 2023 (PACCON 2023) “CHEMICAL DIVERSITY TOWARDS SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

- บันทึกรายงานการประชุม (Proceeding)



A Celebration of MFU 25th Anniversary

PACCON

PURE AND APPLIED CHEMISTRY
INTERNATIONAL CONFERENCE
20 - 21 January

PROCEEDING

**CHEMICAL DIVERSITY TOWARDS
SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS**

January 20th - 21st, 2023
E4 Building, Mae Fah Luang University, Chiang Rai



**Chemical Diversity Towards
Sustainable Development Goals**
20 - 21 January 2023

A Celebration of Mae Fah Luang University 25th Anniversary



PC-P-020

Hysteresis measurement of various engineering-shape 3D-models printed from house-made LDPE-Teak composite filament

Kiattisak Sophon, Nattakam Hongsriphan*, Pajaera Patanathabutr

Department of Materials: Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand

*E-mail: HONGSRIPHAN_N@su.ac.th

Abstract:

The 3D-printing technology has been popular because it can fabricate products with various and complex forms. When the printed structure is made of polymeric material and consists of hollow space, it combines elasticity and flexibility that can provide good dynamic properties. This research aims to develop 3D-filaments from recycled low-density polyethylene (LDPE) mixed with Teak-wood sawdust (Teak) 200-400 mesh size to produce such a filament to meet the requirements. In this report, the neat LDPE was compounded with (3-aminopropyl) trimethoxy treated Teak-wood sawdust in a weight ratio of 100/0, 97/3, 94/6, and 91/9 wt% using a twin-screw extruder to form filaments with a diameter of 1.50-1.65 mm. The filaments were then 3D-printed in spherical, cylindrical and cubic shapes for dynamic compression tests. It was found that LDPE/Teak 3wt% filament had a slight increase in tensile strength and elongation was relatively unchanged. When Teak content was higher, the tensile strength and elongation at break were decreased as a result of the absence of cold drawing. From thermogravimetric analysis, it was found that higher Teak content slightly increased the thermal stability. Three 3D-printed shapes were tested for the dynamic compression in the elastic region, of which the test results show that all specimens had the hysteresis loss significantly reduced after the first cycle and gradually decreased to be stable after the fourth-fifth cycles. The Teak content did not influence the hysteresis loss significantly. The printed composite of cubic shape had the highest dynamic strength and was the most stable structural form to withstand the dynamic compression.

1. Introduction

3D printing is a relatively new innovation in printing technology and has grown in popularity now.¹ Because it can produce parts with complex structures depending on the demands of 3D drawing programs and can print parts with a variety of materials.^{2,3} Therefore, enabling it to be applied in commercial applications and in various fields in the industry, whether in the medical industry,⁴ automotive,⁵ electronics and aerospace industry,⁶ etc. In addition, 3D printing can reduce the cost of production in a variety of ways.

Wood is a popular additive that is mixed with thermoplastic to increase the strength of the material and reduce production costs because wood is cheap, easy to find, and environmentally friendly. It may also add degradability to the plastic.^{7, 8} These wood-filled thermoplastics, commonly called wood-plastic composites (WPCs), have many property advantages over those of composites with wood or plastics alone.⁹ In this study, Teak-wood sawdust was selected as an additive, which is the leftover sawdust left over from making furniture.

The thermoplastics which are used as matrices for fiber reinforced composites are high-density polyethylene (HDPE), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), crystal polystyrene

(PS), impact-modified PS, and poly(vinyl chloride) (PVC), etc.¹⁰, which LDPE resins are popular and widely known for their benefits. LDPE is used extensively because it has excellent chemical and environmental resistance, good flexibility, and easy to moldability.¹¹

LDPE/wood fiber composite has higher strength and less deformation than LDPE, so it can be used in a wide range of applications.¹² However, LDPE is highly hydrophobic while wood fibers are highly hydrophilic in nature, resulting in poor dispersion and adhesion between the polymer matrix surface with the wood fibers.¹³ Therefore, there must be a link between these two phases. The basis of a compatibilizer function is to form an interface between wood and plastic. Therefore, the compatibilizer should have functions that are compatible with both.¹⁴ The most popular and commonly used compatibilizer for polyethylene is a polymer grafted with a chemically reactive functional group, such as maleic anhydride grafted polyethylene (PE-g-MA).^{15, 16} There is also vinyl-trimethoxy silane coupling agent,¹⁷ and 1-(2-hydroxyethyl)-3-methylimidazolium chloride.¹⁸

The main objective of this study was to develop 3D composite filaments from LDPE mixed with Teak sawdust. (3-Aminopropyl) trimethoxy silane was used to enhance the compatibility between the



**Chemical Diversity Towards
Sustainable Development Goals
20 - 21 January 2023**

A Celebration of Mae Fah Luang University 25th Anniversary

A Celebration of MFU 25th Anniversary
PACCON
PURE AND APPLIED CHEMISTRY
INTERNATIONAL CONFERENCE 2023



LDPE matrix and Teak sawdust. The house-made filaments were characterized for their mechanical, thermal, and morphological properties. The house-made filaments were then 3D printed into three different shapes which were subjected to the dynamic compression test.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

Low-density polyethylene grade LD2420K was purchased from GC Marketing Solutions Co., Ltd., Thailand. It has a density of 0.924 g/cm³ and a melt flow index (190°C, 2.16 kg) of 4 g/10 min. The Teak sawdust was purchased from a local supplier at Phrae, Thailand. (3-Aminopropyl) trimethoxy silane or amino-silane was purchased from Sigma Aldrich, Singapore.

2.2 Filament extrusion and 3D-printing

In the first step, the Teak sawdust was dried in a vacuum oven at 80°C for 12 hours, then sieved to obtain particles of 200-400 mesh size. The sieved Teak particles were then treated with amino-silane solution. A 95/5% ethanol/water solution was used for preparing aqueous alcohol solutions, and amino-silane was dropped while stirring to yield a 2 wt% final concentration. The percentage of silane was based on the Teak sawdust mass. Ten minutes was allowed for hydrolysis and silanol formation. Teak sawdust was then mixed with the amino-silane solution, and let them be chemical interacted for 10 minutes and solvent evaporated for 5- 10 minutes at 110°C.

The LDPE was compounded with amino-silane treated Teak sawdust in a weight ratio of 100/0, 97/3, 94/6, and 91/9%wt as shown in Table 1.

Table 1. Composition of composite filament.

Code	LDPE (%wt)	Teak (%wt)	Silane (%wt/wt)
n-LDPE	100	0	-
LDPE/T3	97	3	2
LDPE/T6	94	6	2
LDPE/T9	91	9	2

The compounding process was done using a twin-screw extruder (SHJ-25, Nanjing Youngteng Chemical Equipment, China) at barrel temperature ranged 110-180°C and a rotation speed was 30 rpm. The composite extrudate was cooled in a water bath and stretched to control the diameter of 1.50-1.65 mm.

3D models were designed to be hollow having internal space within the part similar to wicker. When the printed structure is made of polymeric

material and consists of hollow space, it combines elasticity and flexibility that can provide good dynamic properties. There were three designed 3D models compared in this research work: spherical (outer diameter of 23 mm, height of 25 mm, wicker thickness of 3 mm), cylindrical (outer diameter of 30 mm, inner diameter of 20 mm, height of 20 mm, and wicker thickness of 2 mm) and cubic shapes (25 mm x 25 mm x 25 mm, wicker thickness of 2 mm) as shown in Figure 1. Then, the extruded composite filament was 3D printed using NTT Pro 3D Printer-557E1, Thailand. All specimens were printed using the same parameters under ambient temperature and humidity in an air-conditioning room (25°C). The controlled printing parameters are tabulated in Table 2.

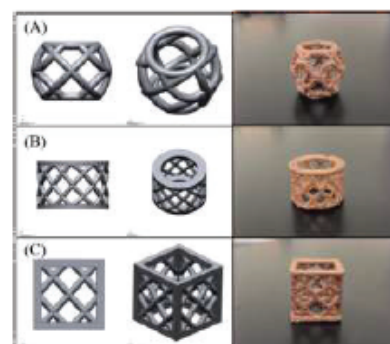


Figure 1. Computer 3D models (left) and 3D-printed composite parts (right) (A) spherical, (B) cylindrical and (C) cubic

Table 2. Parameter for 3D-printing specimens.

Parameters	Filament 3D (n-LDPE, LDPE/T3, LDPE/T6, LDPE/T9)
Infill density (%)	20
Printing speed (mm/s)	25
Nozzle temperature (°C)	250
Bed temperature (°C)	ambient
Layer thickness (mm)	0.4
Raster orientation (°)	± 45

2.3 Characterization and testing

2.3.1 Mechanical testing

Universal testing machine (model 5969, USA) was used to measure tensile properties of the filament specimens according to ASTM-D885 Yarn and Cord test standards. The gauge length of 25.40 cm. (10 inch) and a speed of 400 mm/min



Chemical Diversity Towards
Sustainable Development Goals
20 - 21 January 2023

A Celebration of Mae Fah Luang University 25th Anniversary



was used for testing the specimens. At least 10 measurements of each formula were tested to determine the tensile properties of filament. The specimens were conditioned under temperature and relative humidity controlled at $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $50\% \pm 10\%$, respectively.

2.3.2 Thermal characterization

Thermal stability, decomposition temperature and weight loss, were analyzed in a ramp heating scan mode using a Thermogravimetric analyzer (TGA/DSC1, Mettler Toledo, USA). The temperature in a range of $25\text{-}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a constant heating rate of $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ under nitrogen atmosphere.

3D filament sample was tested by a Differential Scanning Calorimetry (Pyris1, Perkin Elmer, USA). Each sample was cut to weigh in a range of $4\text{-}6\text{ mg}$. Then, it was sealed in an aluminum pan and then tested in a ramp temperature scan mode (heat-cool-reheat) under nitrogen atmosphere, in a temperature range of $30\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the heating rate of $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Thermal properties such as the crystal melting temperature (T_m), the crystallization temperature (T_c) and the degree of crystallization, were determined.

2.3.3 Morphological characterization

Morphological analysis was carried out by Scanning electron microscopy (SEM, Tabletop Microscopy TM3030, HITACHI Co., Ltd., Japan) on cryogenic fractured (from liquid nitrogen) and tensile fractured composite filaments. All specimens were coated with a thin layer of gold/platinum on the aluminum stub using a vacuum sputter coater prior to analysis.

2.3.4 Dynamic compression

Prior to dynamic testing, a conventional compressive testing was performed according to ASTM D695 using a universal testing machine (Instron 5969, Instron Engineering Corporation, USA) with a load cell 50 kN under compression mode testing. A constant ramp rate of $1.3\text{ mm}/\text{min}$ was used to determine the elastic region in order to select a suitable strain for setting the dynamic testing. It was found that the appropriate strain was 6% . For the dynamic compressive testing, a universal testing machine (Shimazu AGX-V 5 kN , Japan) was tested with a load cell of 5 kN , a maximum strain of 6% , and a compression rate of $1.3\text{ mm}/\text{min}$. Ten cycles of loading-unloading were applied to each 3D specimen.

3. Results & Discussion

3.1 Mechanical Properties

The effect of Teak sawdust content on the mechanical properties of the composite filament is shown in Figure 2. The tensile strength and elongation of n-LDPE filament was 10.80 MPa and 385.62% , respectively, which were compared with that of composite filaments. An incorporation $3\text{ wt}\%$ of Teak sawdust content slightly increased the tensile strength to 11.80 MPa , but did not affect the elongation. For Teak sawdust content of 6 and $9\text{ wt}\%$, a significant decrease in tensile strength and elongation was observed. Observed in the stress-strain curves, the tensile strength and elongation at break of the composite filaments were decreased as a result of the absence of cold drawing. This was due to the filler obstructed the orientation of LDPE molecules and inhibited the stress propagation, causing the tensile strength and elongation to decrease as the filler loading increased.¹⁹ Also, increasing Teak sawdust content caused the filler agglomerate which reduced the interfacial bonding between LDPE matrix and silane-treated Teak.

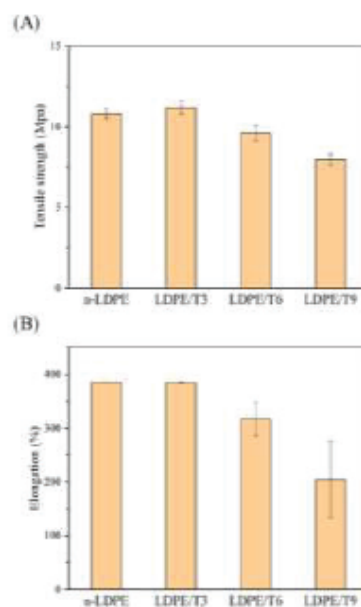


Figure 2. Tensile strength (A) and Elongation (B) of composite filament.



Chemical Diversity Towards
Sustainable Development Goals
20 - 21 January 2023

A Celebration of Mae Fah Luang University 25th Anniversary



Table 3. TGA data of neat LDPE and LDPE/Teak composite filaments.

Composite	T _{onset} (°C)		T _{midpoint} (°C)		T _{inflect} (°C)		T _{midpoint} (°C)		Residue (%)	
	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd	1 st	2 nd
n-LDPE	473.31	-	505.12	-	490.73	-	489.06	-	0	-
LDPE/T3	333.97	478.18	391.03	504.89	382.45	495.09	356.17	491.04	97.15	0.58
LDPE/T6	344.49	475.45	390.55	507.65	382.12	495.22	356.27	491.06	93.60	1.45
LDPE/T9	338.42	476.56	389.49	508.41	381.47	496.22	355.51	491.75	91.10	2.28

DSC results of all neat matrix and composites are summarized in Table 4. T_c and T_m are peak temperatures of crystallization and crystal melting, respectively. The normalized crystallization degree, X_c, was determined as follows⁹

$$X_c = \frac{1}{W_{LDPE}} \left(\frac{\Delta H_{\text{experimental}}}{\Delta H_{\text{theoretical}}} \right) \times 100$$

The experimental results of DSC, T_m, and T_c of n-LDPE and composite were in the range of 111-112 °C and 95-96 °C, respectively, which indicated that Teak sawdust content had no effect on T_m and T_c in DSC analysis.⁷ As for the enthalpy of fusion (ΔH_m) values and the degree of crystallinity (X_c), it was found that the increased amount of Teak sawdust resulted in a decrease of both ΔH_m and X_c. This implied that the addition of wood filler led to the inhibition of crystallization of LDPE.¹⁰ The reduction of crystallinity caused the negative effect on the mechanical properties of the composite filaments.

Table 4. DSC data.

Code	T _m (°C)	T _c (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
n-LDPE	111.38	95.44	75.20	25.66
LDPE/T3	112.33	95.95	64.87	22.83
LDPE/T6	111.89	96.29	62.94	22.85
LDPE/T9	112.22	96.11	54.62	20.48

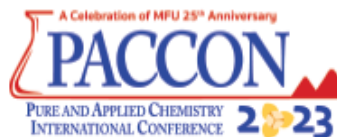
Table 5. Hysteresis loss (%) of 3D models.

Cycle	spherical			cylindrical			cubic		
	Teak 3wt%	Teak 6wt%	Teak 9wt%	Teak 3wt%	Teak 6wt%	Teak 9wt%	Teak 3wt%	Teak 6wt%	Teak 9wt%
1	43.11	43.80	43.55	42.94	44.92	44.98	46.53	47.62	46.92
2	35.53	35.85	35.84	36.20	37.70	37.31	38.98	38.75	38.57
3	34.59	34.86	34.88	35.32	36.91	36.47	37.32	37.58	37.11
4	34.00	34.21	34.61	34.94	36.04	36.18	36.63	37.13	36.65
5	33.56	34.13	34.08	34.86	35.95	35.92	36.45	36.81	36.38
6	33.44	33.97	34.14	34.63	35.61	35.46	35.93	36.45	36.00
7	33.45	33.60	33.78	34.55	35.73	35.08	36.17	36.45	35.89
8	33.35	33.63	33.91	34.33	35.27	34.95	35.86	36.33	35.31
9	33.40	33.64	33.78	34.18	35.39	34.91	35.64	35.99	35.31
10	33.55	33.65	33.67	34.02	35.68	34.62	36.05	35.91	35.62



**Chemical Diversity Towards
Sustainable Development Goals
20 - 21 January 2023**

A Celebration of Mae Fah Luang University 25th Anniversary



All specimens had the hysteresis loss significantly reduced after the first cycle and gradually decreased to be stable after the fourth-fifth cycles. Although the 3D models contained different Teak content, there was a decrease in hysteresis loss in the same way. This indicates that Teak content up to 9 wt% did not influence the hysteresis loss of the 3D models printed from LDPE-based composites significantly. Compared among these models, the cubic shape exhibited the highest hysteresis loss. This indicates the cubic model had the highest dynamic strength than cylindrical and spherical models. Considering from the engineering point of view, the printed 3D model of cubic shape was the most stable structural form to withstand the dynamic compression. However, the fatigue endurance of these structural models is not yet conducted in the research. The idea of this research might be applied to produce the 3D printed packaging material for fragile products such as ceramic pottery.

4. Conclusion

In this work, composite filaments were extruded from the melt compounding between neat LDPE and amino-silane treated Teak sawdust. It was found that the reinforced Teak of 3 wt% resulted in increased tensile strength and elongation. However, the addition of Teak of 6-9 wt% resulted in a decrease in tensile strength and elongation due to the agglomeration of fillers. From TGA, it shows that the addition of Teak sawdust slightly increased thermal decomposition temperature of LDPE phase. As was studied by DSC, it was found that Teak sawdust blocked the crystallization of LDPE when the Teak sawdust content increased. Finally, hysteresis loss was obtained from the dynamic compression test at the maximum strain of 6%. Although the 3D models contained different Teak content, there was a decrease in hysteresis loss in the same way. Finally, the printed composite of cubic shape had the highest dynamic strength and was the most stable structural form to withstand the dynamic compression.

Acknowledgements

This work was financially supported by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University.

References

1. Brenken, B.; Barocio, E.; Favalaro, A.; Kunc, V.; Pipes, R. B. *Addit. Manuf.* **2018**, *21*, 1-16.
2. Yu, S.; Hwang, Y. H.; Hwang, J. Y.; Hong, S. H. *Compos. Sci. Technol.* **2019**, *175*, 18-27.
3. Bhagia, S.; Lowden, R. R.; Erdman, D.; Rodriguez, M.; Haga, B. A.; Solano, I. R. M.; Gallego, N. C.; Pu, Y.; Muchero, W.; Kunc, V.; et al. *Appl. Mater. Today.* **2020**, *21*, 100832.
4. Abaci, A.; Gedeon, C.; Kuma, A.; Guvendiren, M. Additive Manufacturing of Oral Tablets: Technologies, Materials and Printed Tablets. *Pharmaceutics* **2021**, *13*(2)
5. Quan, Z.; Larimore, Z.; Wu, A.; Yu, J.; Qin, X.; Mirotznik, M.; Stuhr, J.; Byun, J.-H.; Oh, Y.; Chou, T.-W. *Compos. Sci. Technol.* **2016**, *126*, 139-148.
6. Kumar, L. J.; Krishnadas Nair, C. G. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. In *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*; Wimpenny, D. I., Pandey, P. M., Kumar, L. J., Eds.; Springer Singapore, 2017; pp 39-54.
7. Taşdemir, M.; Biltekin, H.; Caneba, G. T. *J. Appl. Polym. Sci.* **2009**, *112*, 3095-3102.
8. Sewda, K.; Maiti, S. N. *J. Appl. Polym. Sci.* **2009**, *112*, 1826-1834.
9. Wolcott, M. P.; Englund, K. *J. Appl. Polym. Sci.* **1999**.
10. Youssef, A. M.; El-Gendy, A.; Kamel, S. *Mater. Chem. Phys.* **2015**, *152*, 26-33.
11. Yang, H.-S.; Wolcott, M. P.; Kim, H.-S.; Kim, S.; Kim, H.-J. *Compos. Struct.* **2007**, *79*, 369-375.
12. Moreno, D. D. P.; Saron, C. *Compos. Struct.* **2017**, *176*, 1152-1157.
13. Ofem, M. I.; Ene, E. B.; Ubi, P. A.; Odey, S. O.; Fakorede, D. O. *Niger. J. Technol.* **2020**, *39*, 386-402.
14. Zhang, C.; Li, K.; Simonsen, J. *Polym. Eng. Sci.* **2006**, *46*, 108-113.
15. Thakur, M. K.; Gupta, R. K.; Thakur, V. K. *Carbohydr. Polym.* **2014**, *111*, 849-855.
16. Yao, F.; Wu, Q.; Liu, H.; Lei, Y.; Zhou, D. *J. Appl. Polym. Sci.* **2011**, *119*, 2214-2222.
17. Li, T. Q.; Wolcott, M. P. *Compos. Part A Appl. Sci.* **2004**, *35*, 303-311.
18. Ou, R.; Xie, Y.; Wang, Q.; Sui, S.; Wolcott, M. P. *Compos. Part A Appl. Sci.* **2014**, *61*, 134-140.



**Chemical Diversity Towards
Sustainable Development Goals
20 - 21 January 2023**

A Celebration of Mae Fah Luang University 25th Anniversary



19. Yang, H.-S.; Kim, H.-J.; Son, J.; Park, H.-J.; Lee, B.-J.; Hwang, T.-S. *Compos. Struct.* **2004**, *63*, 305-312.
20. Marcovich, N. E.; Villar, M. A. *J. Appl. Polym. Sci.* **2003**, *90*, 2775-2784.
21. Drozdov, A. D. *Comput. Mater. Sci.* **2011**, *50*, 1991-2000.

รายการอ้างอิง

1. sanomaru. สมบัติของพอลิเมอร์. 2562 [cited 2564 25 May]; Available from: <https://www.truelookpanya.com/knowledge/content/71495/-blo-sciche-sci->
2. Minchillo, J. ขยะแพ็กเกจจิ้ง มหันตภัยใหม่ยุคซ็อบปิ้งออนไลน์ครองโลก. 2561 [cited 2564 25 May]; Available from: <https://www.prachachat.net/world-news/news-208577>.
3. Ismail, A.B., H.B.A. Bakar, and S.B. Shafei, *Comparison of LDPE/corn stalk with eco degradant and LDPE/corn stalk with MAPE: Influence of coupling agent and compatibiliser on mechanical properties*. Materials Today: Proceedings, 2020. 31: p. 360-365.
4. Rojanaburanon, R. ไม้ (Wood). [cited 2564 25 May]; Available from: <https://sites.google.com/a/pku.ac.th/xachiph-ni-xaseiyn/4-2-mi-wood>.
5. สารานุกรมเสรี, ว. ไม้. 2563 15 september 2010; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89>.
6. Sivadee. 3 วัสดุพอลิเมอร์ใหม่สำหรับการพิมพ์ 3 มิติประสิทธิภาพสูง. 2021 [cited 2564 26 May]; Available from: <https://www.toolmakers.co/3->
7. แววนอรี่, ก.ท. เทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์สามมิติ. [cited 2564 26 May]; Available from: <https://sites.google.com/a/bumail.net/3-dprintingdimension/thekhnoyoi-khxng-kheruxngphimph-sam-miti>.
8. พอลิเอทิลีน, *Low-density Polyethylene*. [cited 2564 26 May]; Available from: http://www.rmutphysics.com/chemistry-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=1289&Itemid=85.
9. เราพิพัฒน์พงษ์, ณ. การลดต้นทุนและคงคุณภาพพลาสติกด้วยการเติม *filler* ใน *MDPE*. 2556 [cited 2564 26 May]; Available from: <https://sites.google.com/site/ramcomehang/home>.
10. system, W.B.P. โพลีเอทิลีน (*PE*) คืออะไร. [cited 2564 26 May]; Available from: <https://www.watanabhand.co.th/99/>.
11. วารสารปริทัศน์. พอลิเอทิลีน (*Polyethylene, PE*). 2562 [cited 2564 26 May]; Available from: https://cuir.car.chula.ac.th/dspace/bitstream/123456789/41647/5/Jureeporn_na_

- ch2.pdf.
12. เราสร้างอนาคต. เม็ดพลาสติก LDPE. [cited 25 64 26 May]; Available from: <https://www.tpipolene.co.th/th/plastic-th/ldpe-th>.
 13. มหาวิทยาลัยศิลปากร. การพอลิเมอร์โรเซชันของ LDPE. 2562 [cited 2564 26 May]; Available from: http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Woranat_Roengkosum/Chapter2.pdf.
 14. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. บทที่ 10 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภทพลาสติกชีวภาพพอลิเอทิลีน (*Bio-Polyethylene*). [cited 2564 26 May]; Available from: http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624234746u.pdf.
 15. Wikipedia. *compatibilizer*. [cited 2 5 6 4 2 6 May]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Compatibilization>.
 16. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์เบื้องต้น บทที่ 10 สารเติมแต่งพอลิเมอร์ (*Polymer additives*). [cited 2 5 6 4 2 6 May]; Available from: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/s_.pdf.
 17. *Silane coupling agent guide*.
 18. อธิคม สุรินทร์ธนาสาร, จ.เ., นิยม ชำรงค้อนันต์สกุล, ผลการเคลือบสารซิลิกาเมโซพอร์ด้วยไฮเลนต่อสมบัติการดูดกลับฟลูออไรด์ และความสามารถในการปรับสภาพกรดแลคติกให้เป็นกลางของวัสดุเรซิน. *Songklanakarint Dent. J*, 2019. 7(2).
 19. โตเย็น, ด., สารคู่ควบไฮเลนต่อการกระจายตัวของสารตัวเติมและการศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบด้วยกลี้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.
 20. SILICONES, S. *Silane Coupling Agents*. Available from: <https://www.sinosil.com/silane-coupling-agents.html>.
 21. อุตตรา, ผ.ด.ท., วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์.
 22. Chand, N. and M. Fahim, 7 - *Wood-reinforced polymer composites*, in *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites (Second Edition)*, N. Chand and M. Fahim, Editors. 2021, Woodhead Publishing. p. 177-191.
 23. สารานุกรมเสรี, ว. การพิมพ์ 3 มิติ. [cited 25 64 26 May]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%>.
 24. โอตรวรรณะ, ด.ส. การนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมาใช้ในอุตสาหกรรม. [cited 2564 26

- may]; Available from: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/303_24.pdf.
25. SCB. เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) กับจุดเปลี่ยนห่วงโซ่อุปทานในอนาคต. 2019 [cited 2 5 6 4 2 6 May]; Available from: https://www.scbeic.com/th/detail/file/product/5731/f8zgszk4oe/EIC-Article_3D-Printing_20190117.pdf.
 26. Kusumastuti, Y., et al., *Effect of chitosan addition on the properties of low-density polyethylene blend as potential bioplastic*. Heliyon, 2020. 6(11): p. e05280.
 27. Reesha, K.V., et al., *Development and characterization of an LDPE/chitosan composite antimicrobial film for chilled fish storage*. International Journal of Biological Macromolecules, 2015. 79: p. 934-942.
 28. Lorenzo, A.T., et al., *Nucleation and Isothermal Crystallization of the Polyethylene Block within Diblock Copolymers Containing Polystyrene and Poly(ethylene-alt-propylene)*. Macromolecules, 2007. 40(14): p. 5023-5037.
 29. Drozdov, A.D., *Multi-cycle viscoplastic deformation of polypropylene*. Computational Materials Science, 2011. 50(7): p. 1991-2000.
 30. Sari, N.H., et al., *Characterisation of swellability and compressive and impact strength properties of corn husk fibre composites*. Composites Communications, 2020. 18: p. 49-54.
 31. Scholten, P.B.V., et al., *Rheological and mechanical properties of cellulose/LDPE composites using sustainable and fully renewable compatibilisers*. Journal of Applied Polymer Science, 2020. 137(22): p. 48744.
 32. Sewda, K. and S.N. Maiti, *Mechanical properties of teak wood flour-reinforced HDPE composites*. J. Appl. Polym. Sci., 2009. 112(3): p. 1826-1834.
 33. Zaharescu, T., et al., *Durability of LDPE/UHMWPE Composites under Accelerated Degradation*. Polymers (Basel), 2020. 12(6).
 34. Dhakal, H.N., Z.Y. Zhang, and M.O.W. Richardson, *Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites*. Composites Science and Technology, 2007. 67(7): p. 1674-1683.
 35. Ahmad, M.N., et al., *Rheological and Morphological Properties of Oil Palm*

- Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites for Fused Deposition Modeling (FDM)*. *Polymers*, 2021. 13(21): p. 3739.
36. Marcovich, N.E. and M.A. Villar, *Thermal and mechanical characterization of linear low-density polyethylene/wood flour composites*. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2003. 90(10): p. 2775-2784.
 37. Yihua, C., et al., *DSC Analysis and Mechanical Properties of Wood--Plastic Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites - J REINF PLAST COMPOSITE*, 2010. 29: p. 278-289.
 38. Taşdemir, M., H. Biltekin, and G.T. Caneba, *Preparation and characterization of LDPE and PP—Wood fiber composites*. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2009. 112(5): p. 3095-3102.
 39. Youssef, A.M., A. El-Gendy, and S. Kamel, *Evaluation of corn husk fibers reinforced recycled low density polyethylene composites*. *Mater. Chem. Phys.*, 2015. 152: p. 26-33.
 40. Ahmad, M.N., et al., *Mechanical, thermal and physical characteristics of oil palm (*Elaeis Guineensis*) fiber reinforced thermoplastic composites for FDM – Type 3D printer*. *Polymer Testing*, 2023. 120: p. 107972.
 41. Li, Y., *Effect of Coupling Agent Concentration, Fiber Content, and Size on Mechanical Properties of Wood/HDPE Composites*. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 2012. 61(11): p. 882-890.
 42. Yang, H.-S., et al., *Rice-husk flour filled polypropylene composites; mechanical and morphological study*. *Compos. Struct.*, 2004. 63(3): p. 305-312.
 43. Biswas, K., V. Khandelwal, and S. Nath Maiti, *Rheological properties of teak wood flour reinforced HDPE and maize starch composites*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021. 138(8): p. 49874.
 44. Chen, H.C., T.Y. Chen, and C.H. Hsu, *Effects of Wood Particle Size and Mixing Ratios of HDPE on the Properties of the Composites*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2006. 64: p. 172-177.
 45. Huang, Y., S. Löschke, and G. Proust, *In the mix: The effect of wood composition on the 3 D printability and mechanical performance of wood-plastic composites*. *Composites Part C: Open Access*, 2021. 5: p. 100140.

46. plc, I.G. *Water Absorption ASTM D5 7 0* . Available from:
<https://www.intertek.com/polymers/testlopedia/water-absorption-astm-d570/>.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เกียรติศักดิ์ โสผล
วัน เดือน ปี เกิด	10 พฤศจิกายน 2540
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลน้ำเกลี้ยง จังหวัดศรีสะเกษ
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2555 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเขาชะเมาวิทยา จังหวัดระยอง พ.ศ.2558 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา พ.ศ.2562 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	89 ม.3 ต.ละเอาะ อ.น้ำเกลี้ยง จ.ศรีสะเกษ 33130
ผลงานตีพิมพ์	April 2023, Kiattisak Sophon, Nattakarn Hongsriphan and Pajaera Patanathabutr “Hysteresis measurement of various engineering-shape 3D-models printed from house-made LDPE-Teak composite filament”, The Pure and Applied Chemistry International Conference 2023 (PACCON 2023), January 20-21, 2023, pp 900-906, Chiang Rai, Thailand.
รางวัลที่ได้รับ	เมษายน พ.ศ. 2562 ได้รับรางวัลเข็มพระจันทร์เพชร กิจกรรมดีเยี่ยม ปีการศึกษา 2561 จากมหาวิทยาลัยศิลปากร พฤษภาคม-กรกฎาคม พ.ศ. 2562 ได้เข้าร่วมโครงการฝึกงาน Excellent Internship Program 2019 จากบริษัท จีซี มาร์เก็ตติ้ง โซลูชั่นส์ จำกัด ในฝ่ายสนับสนุนเทคนิค ที่ศูนย์เอนเนอร์ยีคอมเพล็กซ์ อาคารเอ ชั้น 9 เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2563-2565 (6 ภาคการศึกษา) ได้รับทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอนในเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermogravimetric Analysis (TGA) และเครื่อง Blown film extrusion จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร