



การจำลองการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง



โดย

นายพีระพงษ์ วงศ์วิศิษฐ์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร



การจำลองการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง



โดย
นายพีระพงษ์ วงศ์ศิษฏ์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

COMPUTATIONAL DESIGN AND MATERIAL SELECTION FOR SHIPPING
PACKAGING



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

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2019

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การจำลองการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์
เพื่อการขนส่ง
โดย พี่ระพงษ์ วงศ์วิศิษฐ์ชัย
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เขษะปะบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

59402207 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ, ความเร็วในการพิมพ์, โมเดลบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

นาย พิระพงษ์ วงศ์วิศิษฐ์ชัย: การจำลองการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองการออกแบบและศึกษาการเลือกใช้วัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง โดยการออกแบบจะทำโดยโปรแกรม SolidWorks แล้วทำการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบรวดเร็วด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ประเภทการพิมพ์แบบหัวฉีด เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานเป็นวัสดุป้องกันการกระแทกที่จะทำให้เกิดความเสียหายกับสินค้าที่บรรจุภายในกล่องกระดาษ การศึกษาการเลือกใช้วัสดุจะใช้เส้นฟิลาเมนต์พอลิเมอร์ที่มีขายเชิงการค้า 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics ประกอบด้วย ABS, PA, PC และ PETG กลุ่มที่ 2 คือ PLA และ PLA composites ประกอบด้วย Carbon PLA (CFPLA), Soft PLA (SPLA) และ Wood PLA (WPLA) กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers ประกอบด้วย TPE และ TPU ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการไหลของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์ในการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่า อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของเส้นฟิลาเมนต์ ทั้ง 3 กลุ่ม มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และแสดงพฤติกรรม การไหลแบบ Shear thinning แสดงว่าเส้นฟิลาเมนต์ดังกล่าวสามารถใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่มีการให้ความร้อนแล้วทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านหัวฉีดที่เคลื่อนที่ได้ลงมาบนฐานรองรับ แล้วจึงเกิดแข็งตัวทำให้เกิดโครงสร้างของการขึ้นรูปชิ้นงานที่ละชั้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการขึ้นรูปชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของวัสดุ ส่วนที่ 2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุแต่ละชนิดของความเร็วในการพิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่มุมขึ้นรูป 45°/45° เนื่องจากมีการรายงานว่าคาร์พูนเปิดภายในชิ้นงานน้อยกว่าการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้มุมขึ้นรูป เท่ากับ 0°/90° การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ เท่ากับ 30, 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ส่งผลให้ค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 โดยเฉพาะ CFPLA และ WPLA composites มีค่า Tensile strength และ Tensile modulus เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวของเส้นใยคาร์บอนและผงไม้ในเมทริกซ์ได้ดีขึ้นตามลำดับ ส่วนที่ 3 การศึกษาผลของการออกแบบและรูปแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบชิ้นงานต้นแบบที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จำนวน 5 รูปแบบ ได้แก่ 8Drill, Hex, Spin, Sweep และ Tri โดยเลือกใช้เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 มาใช้ในการขึ้นรูป เนื่องจากสามารถย่อยสลายทางธรรมชาติได้ จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด พบว่า ชิ้นงานต้นแบบที่ขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้รูปแบบ Hex มีค่าความต้านทานต่อแรงกดที่จุดแตกหักมากที่สุด เนื่องจากชิ้นงานต้นแบบมีโครงสร้างเป็นรูปหกเหลี่ยมที่สมมาตร จึงทำให้มีพื้นที่ในการรับแรงมากขึ้นและเกิดการถ่ายโอนแรงได้ดี

59402207 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : 3D-printing technology, printing speed, shipping packaging

MR. PHIRAPHONG WONGWISITCHAI : COMPUTATIONAL DESIGN AND MATERIAL SELECTION FOR SHIPPING PACKAGING THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. PAJEARA PATANATABUTR, Ph.D.

This research aims to computationally design and study polymeric material selection for shipping packaging. The computational design was drawn by the SolidWorks program. After that, the rapid prototypes were fabricated by Fused Deposition Modeling 3D-printing technology to produce protective cushions to protect packed products inside the paper box. Three commercial polymeric filaments; Group 1 as engineering plastics consisting of ABS, PA, PC and PETG, Group 2 as PLA and PLA composites consisting of Carbon fiber PLA (CFPLA), Soft PLA (SPLA) and Wood PLA (WPLA), Group 3 as elastomers consisting of TPE and TPU. Part 1, Investigation of thermal and rheological properties of polymeric filaments used in 3D-printing found that the onset temperature of thermal degradation of all three polymeric filament groups had higher than the nozzle temperature. Shear thinning behavior of all polymeric filaments was observed so they could be fabricated by 3D-printing technology. The thermoplastic filaments were melted then fed through a moving nozzle and solidified on temperature-controlled platform, to fabricate the layer by layer structure. Injection moulded specimens were prepared for comparison on material properties. Part 2, The study of the effect of printing speed on mechanical properties of 3D-printed prototypes using raster orientation as 45° - 45° because it was reported that the open porosity is lower for in comparison with raster orientation as 0° / 90° . Varying 3D-printing speeds of 30, 40 and 50 mm/s revealed that the increasing in the printing speed improve tensile strength and tensile modulus, especially those of CFPLA and WPLA composites due to the better arrangement of carbon fiber and wood powder in the matrix, respectively. Part 3, The study on packaging structure for shipping packaging by computationally designing 5 models including 8Drill, Hex, Spin, Sweep and Tri models. Only The 3D-printed prototypes of polymeric filaments of group 2 were fabricated because it could be biodegradable. The compressive test indicated the Hex model prototype had the highest compressive strength at break due to this prototype has a symmetric hexagonal shape, which had larger area to absorb load, providing better load transfer.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร และรองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ในการสละเวลาให้คำปรึกษาและคอยชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนอบรมสั่งสอน และช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เข้มชะปะบุตร รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย และศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช ที่สละเวลามาเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ตลอดจนให้คำแนะนำในการนำไปปรับใช้และแก้ไขให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผ่านลุล่วงไปได้ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ ในการอนุเคราะห์ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อบรมสั่งสอนและให้วิชาความรู้ที่ตีเสมอมา

ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัยและเครื่องมือทดสอบ ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก ในการให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการติดต่อขอยืมอุปกรณ์ ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งศุภรวิช ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณเพื่อนปอโททุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคอยเป็นกำลังใจให้กันเสมอ และขอบคุณพี่ๆ และน้องๆ ปอโททุกคนสำหรับมิตรภาพที่ดีที่มีให้กันมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ส่งเสียเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน และคอยเป็นกำลังใจที่สำคัญในเรื่องต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านการเรียน การดำเนินชีวิต ตลอดจนการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

พีระพงษ์ วงศ์วิศิษฐ์ชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 แนวคิดและสมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การออกแบบบรรจุภัณฑ์.....	8
2.1.1 แนวคิดในการออกแบบบรรจุภัณฑ์.....	8
2.1.2 วัสดุที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์.....	9
2.1.3 การออกแบบบรรจุภัณฑ์โดยใช้คอมพิวเตอร์.....	10
2.2 บรรจุภัณฑ์และวัสดุที่ใช้ในการขนส่ง.....	14
2.2.1 บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการขนส่ง.....	14
2.2.2 วัสดุป้องกันการแตกหัก.....	20

2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ	25
2.3.1 ความสำคัญของการพิมพ์ 3 มิติ.....	25
2.3.2 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในปัจจุบัน.....	25
2.3.3 ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นฟิลาเมนต์ในการพิมพ์ 3 มิติ	28
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย.....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	47
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	47
3.1.1 กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics	47
3.1.2 กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites	47
3.1.3 กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers.....	48
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	48
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	48
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	49
3.4.1 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding).....	49
3.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing).....	49
3.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR).....	52
3.4.4 การทดสอบหาค่าดัชนีการไหล (MFI).....	52
3.4.5 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DSC)	53
3.4.6 การทดสอบการสลายตัวทางความร้อน (TGA).....	54
3.4.7 การทดสอบสมบัติเชิงรีอโลยี (Parallel plate rheometer)	55
3.4.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกส์	56
3.4.9 การทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing).....	57
3.4.10 การทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural testing).....	57
3.4.11 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM).....	58

3.4.12 การออกแบบและขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	64
4.1 การศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์ในการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ..	65
4.2 การศึกษาผลของความเร็วในการพิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ต่อสมบัติเชิงกล	100
4.3 การศึกษาผลของการออกแบบและรูปแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง.....	136
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	169
5.1 สรุปผลการวิจัย	169
5.2 ข้อเสนอแนะ	172
ภาคผนวก	173
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบต่างๆ.....	174
ภาคผนวก ข การนำเสนอผลงานวิจัย	291
รายการอ้างอิง.....	300
ประวัติผู้เขียน	309



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงบทวิจารณ์จากแหล่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งกำหนดข้อมูลด้านวัสดุที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการเลือกใช้วัสดุ [51].....	31
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์.....	38
ตารางที่ 2.3 แสดงระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษา [57].....	38
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าอุณหภูมิในการอบไล่ความชื้นของเส้นฟิลาเมนต์ 3 กลุ่ม.....	50
ตารางที่ 3.2 แสดงสถานะในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) ของเส้นฟิลาเมนต์ 3 กลุ่ม.....	50
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ของเส้นฟิลาเมนต์ 3 กลุ่ม.....	51
ตารางที่ 3.4 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing).....	51
ตารางที่ 3.5 แสดงค่าอุณหภูมิในกระบอกหลอมและน้ำหนักรีดที่ใช้ในการทดสอบหาค่าดัชนีการไหล (MFI).....	53
ตารางที่ 3.6 แสดงค่าอุณหภูมิในการทดสอบสมบัติเชิงรีโอโลยี (Parallel plate rheometer).....	56
ตารางที่ 4.1 แสดง IR spectrum ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS).....	66
ตารางที่ 4.2 แสดง IR spectrum ของพอลิเอไมด์ (PA).....	67
ตารางที่ 4.3 แสดง IR spectrum ของพอลิคาร์บอเนต (PC).....	68
ตารางที่ 4.4 แสดง IR spectrum ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG).....	69
ตารางที่ 4.5 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA).....	70
ตารางที่ 4.6 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA).....	72
ตารางที่ 4.7 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA).....	73
ตารางที่ 4.8 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA).....	74
ตารางที่ 4.9 แสดง IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE).....	76

ตารางที่ 4.10 แสดง IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU).....	77
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow index, MFI) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics, กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites และกลุ่มที่ 3 คือ Elastomers	78
ตารางที่ 4.12 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ DSC ในขั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม.....	82
ตารางที่ 4.13 แสดงค่า Thermal conductivity ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด ที่อ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆ	84
ตารางที่ 4.14 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ TGA ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	88
ตารางที่ 4.15 แสดงค่า % Weight loss ที่เวลา 10, 20 และ 30 นาที ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน (O ₂) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ	90
ตารางที่ 4.16 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural specimen) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ	124
ตารางที่ 4.17 แสดงค่าส่วนต่างของปริมาตรชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เทียบกับปริมาตรชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด.....	126
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด	127
ตารางที่ 4.19 แสดงค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ	129
ตารางที่ 4.20 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ DSC ขั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่งของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด.....	133
ตารางที่ 4.21 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ DSC ขั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่งของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด ที่ได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	133

ตารางที่ 4.22 แสดงปริมาณผลึกที่คำนวณได้จากการทดสอบ DSC ในขั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง
ของเส้นฟิลาเมนต์และชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์
50 มิลลิเมตรต่อวินาที 135

ตารางที่ 4.23 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ 8Drill ที่ขึ้นรูปด้วย
เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s..... 142

ตารางที่ 4.24 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Hex ที่ขึ้นรูปด้วย
เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s..... 144

ตารางที่ 4.25 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin ที่ขึ้นรูปด้วย
เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s..... 146

ตารางที่ 4.26 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Sweep ที่ขึ้นรูป
ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s..... 148

ตารางที่ 4.27 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Tri ที่ขึ้นรูปด้วย
เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s..... 150

ตารางที่ 4.28 แสดงค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง
ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ..... 168



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 แสดงแผ่น Plate ที่มีรูตรงกลาง : (a) CAD solid mode และ (b) โมเดล Simulation ที่แสดง mesh และ stress fringe plot [5].....	11
รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลอง 3 มิติ รูปขวดน้ำที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks [7].....	11
รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลอง รูปกล่องที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks [8].....	12
รูปที่ 2.4 แสดงการออกแบบกระป๋องเครื่องดื่มด้วยโปรแกรม Autodesk MAYA [10].....	13
รูปที่ 2.5 แสดงการออกแบบบรรจุภัณฑ์ใส่มันฝรั่งทอดด้วยโปรแกรม Autodesk MAYA [11].....	13
รูปที่ 2.6 แสดงการออกแบบกระป๋องน้ำอัดลมด้วยโปรแกรม Blender [13].....	14
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของกล่องแบบ RSC [15]	15
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของกล่องแบบ FOL [16]	16
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของกล่องแบบ HSC [17]	16
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของกล่องแบบ PTHS [18].....	17
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของกล่องแบบ FPF [20].....	17
รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของกล่อง Big Box [22].....	17
รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของกระสอบตั้ง [24].....	18
รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างของกระสอบนอน [25].....	18
รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของถาดกระดาษ [27].....	19
รูปที่ 2.16 แสดงถาดพลาสติกสำหรับไวส์ไซ [28]	19
รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างของลังไม้ [30]	19
รูปที่ 2.18 แสดงรูปทรงของแผ่นพลาสติกอัดอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าอันเดียว [32]	21
รูปที่ 2.19 แสดงรูปทรงของแผ่นพลาสติกอัดอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองอัน [33].....	22
รูปที่ 2.20 แสดงรูปทรงของแผ่นพลาสติกอัดอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลายอัน [32].....	22
รูปที่ 2.21 แสดงรูปทรงของแผ่นพลาสติกอัดอากาศแบบแท่งยาว [34].....	22
รูปที่ 2.22 แสดงรูปทรงของโฟมสไตรีนแบบ Peanuts [36].....	23

รูปที่ 2.23 แสดงรูปทรงของโฟมสไตรีนแบบ Pellets [37]	24
รูปที่ 2.24 แสดงรูปทรงของโฟมสไตรีนแบบ Balls [38]	24
รูปที่ 2.25 แสดงรูปทรงของโฟมสไตรีนแบบ Popcorns [39]	24
รูปที่ 2.26 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด [42].....	26
รูปที่ 2.27 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบการซ้อนแผ่นวัสดุ [43]	26
รูปที่ 2.28 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบรังสีอัลตราไวโอเล็ต [45]	27
รูปที่ 2.29 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบแสงเลเซอร์ [47].....	27
รูปที่ 2.30 แสดงตัวอย่างของกระบวนการ FDM [49].....	28
รูปที่ 2.31 แสดงรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน NACM [52]	32
รูปที่ 2.32 แสดงภาพร่างโครงสร้างของ Honeycomb Paperboard [53].....	33
รูปที่ 2.33 แสดง Load และ Stack Configuration ของ Honeycomb Paperboard : (a) multilayer และ (b) monolayer [53].....	33
รูปที่ 2.34 แสดงทิศทางที่แรงกระทำกับ Honeycomb Paperboard [53]	34
รูปที่ 2.35 แสดง Stress distribution ของ (a) Intact และ (b) Ventilated corrugated Box [54].....	34
รูปที่ 2.36 แสดงภาพบรรจุภัณฑ์ที่ศึกษาในงานวิจัยของ Paul Singh และคณะ ; a) Package 1, b) Package 2, c) Package 3, d) Package 4 และ e) Package 5 [55].....	36
รูปที่ 2.37 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนครั้งในการกระแทกกับทิศทางในการกระแทก [55]	37
รูปที่ 2.38 แสดงขนาดและโครงสร้างชิ้นงานที่เหมาะสม [57].....	39
รูปที่ 2.39 แสดงแบบจำลองของโทรทัศน์ LCD กระแทกบนพื้น [58].....	41
รูปที่ 2.40 แสดงแบบจำลองของโทรทัศน์ LCD แบบตาข่าย (Meshing) [58].....	41
รูปที่ 2.41 แสดงแผนภาพ Mises stress ในขณะที่โทรทัศน์กระแทกพื้นดิน [58].....	42
รูปที่ 2.42 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นฟิลาเมนต์ (Layer orientation) ที่ผ่านหัวตาย (Nozzle) [59].....	42

รูปที่ 2.43 แสดงทิศทางของ raster orientation เทียบกับทิศทางการดึงยืด [60]	43
รูปที่ 2.44 แสดงภาพ Mesostructure ของช่องว่าง (Air-gaps) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย Layer thickness เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร (a) และ 0.4 มิลลิเมตร (b) [60].....	44
รูปที่ 2.45 แสดงไดอะแกรมของการทดสอบ 3-point bending [61].....	44
รูปที่ 2.46 แสดง FTIR spectra ของโคพอลิเมอร์ PLA-PEG400 [62].....	45
รูปที่ 2.47 แสดงแผนผังของ filling pattern และ material coordinate a) 0/90 (Ra), b) +45/-45 (Rb) และ c) Honeycomb (Hc) [63].....	46
รูปที่ 2.48 แสดงการเปรียบเทียบค่า specific compressive strength (σ_u^*) ของชิ้นงาน ABS ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ [63]	46
รูปที่ 3.1 แสดงเครื่อง Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR).....	52
รูปที่ 3.2 แสดงเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC).....	54
รูปที่ 3.3 แสดงเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA)	54
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่อง Parallel plate rheometer	55
รูปที่ 3.5 แสดงเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)	57
รูปที่ 3.6 แสดงเครื่อง Universal testing machine	58
รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM).....	58
รูปที่ 3.8 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 1	59
รูปที่ 3.9 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 2.....	60
รูปที่ 3.10 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 3.....	61
รูปที่ 3.11 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 4.....	61
รูปที่ 3.12 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 5.....	62

รูปที่ 4.1 แสดง IR spectrum ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR	65
รูปที่ 4.2 แสดง IR spectrum ของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR.....	67
รูปที่ 4.3 แสดง IR spectrum ของพอลิคาร์บอนเนต (PC) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR.....	68
รูปที่ 4.4 แสดง IR spectrum ของพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR	69
รูปที่ 4.5 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR.....	70
รูปที่ 4.6 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR	71
รูปที่ 4.7 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR	73
รูปที่ 4.8 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR.....	74
รูปที่ 4.9 แสดง IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR	75
รูปที่ 4.10 แสดง IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR	77
รูปที่ 4.11 แสดง DSC Thermogram second heating ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC), และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์	79
รูปที่ 4.12 แสดง DSC Thermogram second heating ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์.....	80
รูปที่ 4.13 แสดง DSC Thermogram second heating ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์.....	81

รูปที่ 4.14 แสดง TGA Thermogram ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N ₂).....	86
รูปที่ 4.15 แสดง TGA Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA), และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N ₂)...87	87
รูปที่ 4.16 แสดง TGA Thermogram ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N ₂)	88
รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) [76].....	89
รูปที่ 4.18 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่อุณหภูมิ 250 °C.....	91
รูปที่ 4.19 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA) และพอลิเอทิลีนเทรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่อุณหภูมิ 240 °C.....	91
รูปที่ 4.20 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่อุณหภูมิ 220 °C.....	92
รูปที่ 4.21 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่อุณหภูมิ 210 °C.....	92
รูปที่ 4.22 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่อุณหภูมิ 200 °C.....	93
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์.....	96
รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์	97

รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์.....	98
รูปที่ 4.26 แสดงค่ามอดูลัสการดึงยึด (Tensile modulus) ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG).....	100
รูปที่ 4.27 แสดงค่ามอดูลัสการดึงยึด (Tensile modulus) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA).....	100
รูปที่ 4.28 แสดงค่ามอดูลัสการดึงยึด (Tensile modulus) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU).....	101
รูปที่ 4.29 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG).....	102
รูปที่ 4.30 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA).....	102
รูปที่ 4.31 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด (% Elongation) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU).....	103
รูปที่ 4.32 แสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG).....	103
รูปที่ 4.33 แสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA).....	104
รูปที่ 4.34 แสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU).....	104

รูปที่ 4.35 แสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรตที่ถูกปรับปรุงด้วย ไกลคอล (PETG)..... 109

รูปที่ 4.36 แสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วย เส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุง เพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)..... 109

รูปที่ 4.37 แสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) 110

รูปที่ 4.38 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดแบบโค้งงอ (% Elongation) ของพอลิอะคริโลไนไตรส์- บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)..... 111

รูปที่ 4.39 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดแบบโค้งงอ (% Elongation) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรง ด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่ม ความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)..... 111

รูปที่ 4.40 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดแบบโค้งงอ (% Elongation) ของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) 112

รูปที่ 4.41 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของพอลิอะคริโลไนไตรส์- บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)..... 112

รูปที่ 4.42 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของพอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุง เพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)..... 113

รูปที่ 4.43 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) 113

รูปที่ 4.44 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิอะคริโลไนไตรส์- บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วใน การพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 118

- รูปที่ 4.45** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า 119
- รูปที่ 4.46** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า 119
- รูปที่ 4.47** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยโกลคอลล (PETG) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า... 120
- รูปที่ 4.48** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า 120
- รูปที่ 4.49** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า 121
- รูปที่ 4.50** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า... 121
- รูปที่ 4.51** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า 122
- รูปที่ 4.52** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 122
- รูปที่ 4.53** แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 123

รูปที่ 4.54 แสดง DSC Thermogram first heating ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC), และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ได้จาก a) เส้นฟิลาเมนต์และ b) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ	130
รูปที่ 4.55 แสดง DSC Thermogram first heating ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ได้จาก a) เส้นฟิลาเมนต์และ b) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ	131
รูปที่ 4.56 แสดง DSC Thermogram first heating ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จาก a) เส้นฟิลาเมนต์และ b) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ	132
รูปที่ 4.57 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน 8Drill	137
รูปที่ 4.58 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน Hex	138
รูปที่ 4.59 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน Spin	139
รูปที่ 4.60 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน Sweep	139
รูปที่ 4.61 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน Tri	140
รูปที่ 4.62 แสดงขนาดของชิ้นงาน 8Drill ในหน่วยมิลลิเมตร	141
รูปที่ 4.63 แสดงขนาดของชิ้นงาน Hex ในหน่วยมิลลิเมตร	143
รูปที่ 4.64 แสดงขนาดของชิ้นงาน Spin ในหน่วยมิลลิเมตร	145
รูปที่ 4.65 แสดงขนาดของชิ้นงาน Sweep ในหน่วยมิลลิเมตร	147
รูปที่ 4.66 แสดงขนาดของชิ้นงาน Tri ในหน่วยมิลลิเมตร	149
รูปที่ 4.67 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง	151
รูปที่ 4.68 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)ที่กำลังขยาย 50 เท่า	153

รูปที่ 4.69 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Hex ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า 154

รูปที่ 4.70 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Spin ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า 155

รูปที่ 4.71 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า 156

รูปที่ 4.72 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Tri ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า 157

รูปที่ 4.73 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Yield ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง 159

รูปที่ 4.74 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Break ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง 159

รูปที่ 4.75 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า 161

รูปที่ 4.76 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Hex ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 162

รูปที่ 4.77 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Spin ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 163

รูปที่ 4.78 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 164

รูปที่ 4.79 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Tri ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 165

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ช่วงหลายปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หรือที่รู้จักกันในชื่อ 3D Printing เป็นเทคโนโลยีเปลี่ยนโลกที่มีการกล่าวถึงเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งเทคโนโลยีนี้ถูกคิดค้นขึ้นตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1984 และต่อมาได้มีการพัฒนานำไปใช้งานในระดับครัวเรือนมากขึ้นตามราคาเครื่องมือที่ลดลง นอกจากนี้ยังมีผู้คนนำไปประยุกต์ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ตุ๊กตาคนจริงแบบย่อส่วน รองเท้า ของเล่นเด็ก ของตกแต่งบ้าน รวมไปถึงชิ้นส่วนประกอบรถยนต์ เป็นต้น สำหรับการสร้างชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ภาพ 3 มิติ (3D Printer) จะเริ่มจากการนำเอาวัสดุมาขึ้นรูปทีละชั้นไปเรื่อยๆ ตามแบบที่กำหนดไว้ในไฟล์คอมพิวเตอร์ โดยนี่คือรูปแบบสามารถเห็นโมเดล 3 มิติ ที่ตนเองเป็นคนออกแบบ และสามารถปรับเปลี่ยนแก้ไขข้อผิดพลาด รูปแบบ หรือปริมาณในการสั่งพิมพ์ตามที่ต้องการได้ทันที ซึ่งการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธี 3D printing ไม่ต้องสร้างแม่พิมพ์ (Mold) ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ และมีของเสียที่เกิดจากการขึ้นรูปน้อยลงอีกด้วย [1] โดยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในปัจจุบันก็มีอยู่หลายประเภท ได้แก่ การพิมพ์แบบหัวฉีด (FDM : Fused Deposition Modeling) การพิมพ์ด้วยการซ้อนแผ่นวัสดุ (LOM : Laminated Object Manufacturing) การพิมพ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (SLA : Stereolithography) การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (SLS : Selective Laser Sintering) ขึ้นอยู่กับการใช้งานและวัสดุที่ต้องการจะขึ้นรูป

ปัจจุบันการติดต่อซื้อขายทั้งในประเทศและต่างประเทศมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งการขนส่งเคลื่อนย้ายสินค้าสามารถทำได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งทางบก ทางน้ำ หรือทางอากาศ ซึ่งการขนส่งสินค้าต้องบรรจุลงในหีบห่อบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง โดยในบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งนั้นก็ต้องมีวัสดุป้องกันการแตกหักเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับสินค้า ไม่ว่าจะเป็นแผ่นกระดาษ ลูกฟูก ฝอยกระดาษ ฝอยไม้ แผ่นพลาสติกฟองอากาศ และโฟม เป็นต้น โดยในปัจจุบันรูปทรงของวัสดุป้องกันการแตกหักก็จะมีด้วยกันหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน รูปแบบในการขนส่งเคลื่อนย้าย รูปทรงของผลิตภัณฑ์ และความสามารถในการรับแรงกระแทก เป็นต้น จึงทำให้แนวคิดการออกแบบรูปทรงของวัสดุป้องกันการแตกหักเปิดกว้างมากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีกับนักวิจัยที่จะสามารถออกแบบรูปทรงต่างๆ ที่แตกต่างไปจากเดิม ประกอบกับการเข้ามามีบทบาทสำคัญของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในยุคปัจจุบัน จึงเป็นเรื่องง่ายมากเลยที่เราจะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ

เพื่อที่จะนำไปทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ ก่อนที่จะนำไปทำการผลิตชิ้นงานจริงๆ ในระดับอุตสาหกรรม

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่แพร่หลายที่สุดในโลก ณ ปัจจุบัน คือ การพิมพ์แบบหัวฉีด (FDM : Fused Deposition Modeling) หรือผู้ผลิตบางรายเรียกว่า FFF : Fused Filament Fabrication โดยหลักการทำงานของ FDM เริ่มจากการสร้างโมเดล 3 มิติ ในคอมพิวเตอร์ก่อน เมื่อได้ไฟล์ชิ้นงาน 3 มิติ มาแล้วให้นำเข้าโปรแกรม CAM เพื่อบอกเครื่อง 3D Printer ว่าต้องพิมพ์ชิ้นงานนี้ได้อย่างไร โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าการพิมพ์ต่างๆ ในซอฟต์แวร์ได้ โดยชนิดของวัสดุที่ใช้กับการพิมพ์แบบหัวฉีดจะมีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์ ซึ่งเส้นฟิลาเมนต์ที่นิยมใช้งานมีด้วยกันหลายชนิด อาทิเช่น พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) เป็นต้น

ในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการจำลองการออกแบบและเลือกวัสดุที่เหมาะสมเพื่อนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง โดยจะทำการจำลองการออกแบบโดยใช้โปรแกรมการออกแบบทางคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นโมเดล 3 มิติ ทั้งหมด 5 รูปแบบ จากนั้นทำการวิเคราะห์วัสดุที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งตามโมเดล 3 มิติ ได้แก่ สมบัติทางด้านการไหล สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และลักษณะโครงสร้างฐานวิทยา ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ประเภทการพิมพ์แบบหัวฉีด (FDM : Fused Deposition Modeling) ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) ด้วยเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 Engineering plastics กลุ่มที่ 2 PLA and PLA composites และกลุ่มที่ 3 Elastomers เมื่อได้ชิ้นงานต้นแบบแล้วนำไปศึกษาสมบัติเชิงกลและลักษณะโครงสร้างฐานวิทยา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งและศึกษาวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

1.2.2 ศึกษาผลของรูปแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งและความเร็วในการพิมพ์ต่อสมบัติเชิงกลของการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

1.3 แนวคิดและสมมติฐานของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการจำลองการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งและเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งตามที่ได้ออกแบบเอาไว้ โดยจะมีการนำเอาโปรแกรมการออกแบบทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง เพื่อที่จะสามารถเห็นโมเดล 3 มิติ ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปว่ามีความเหมาะสมสำหรับงานที่จะนำไปใช้หรือไม่ ถ้าเกิดความผิดพลาดกับโมเดล 3 มิติ ก็สามารถแก้ไขได้ทันที นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์เลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ขึ้นรูปตามโมเดล 3 มิติ พิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง ต้องสามารถรับแรงกระแทกและไม่ถ่ายโอนแรงไปยังสินค้าซึ่งอาจเป็นเหตุทำให้สินค้าเกิดความเสียหายระหว่างการขนส่ง เมื่อทำการออกแบบและเลือกวัสดุที่เหมาะสมแล้ว ทำการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบหัวฉีด (Fused Deposition Modeling) เนื่องจากเทคนิคนี้มีวิธีการใช้งานง่ายและมีต้นทุนในการใช้งานต่ำ หลังจากได้ชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) บรรจุภัณฑ์จะนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและลักษณะโครงสร้างฐานฐานวิทยา

1.4 ขอบเขตการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

1.4.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับออกแบบบรรจุภัณฑ์ 3 มิติ

1.4.2 การขึ้นรูปต้นแบบบรรจุภัณฑ์ในงานวิจัยนี้เป็นการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติที่ใช้เส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ของวัสดุชนิดต่างๆ ที่มีขายในเชิงการค้า 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics ประกอบด้วย พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG), กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites ประกอบด้วย พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA), กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers ประกอบด้วย เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกออลิยูรีเทน (TPU) โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 ± 0.05 มิลลิเมตร

1.4.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด (Fused Deposition Modeling) ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printer) รุ่น 557E1 ผลิตโดยบริษัท NTT Pro IIID Printer ประเทศไทย และ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printer) รุ่น 2.0 Plus Desktop ผลิตโดยบริษัท Colido ประเทศไทย

1.4.4 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะใช้มุมขึ้นรูปชิ้นงาน (Raster Orientation) เท่ากับ $\pm 45^\circ$ เพราะมุมในการขึ้นรูป $\pm 45^\circ$ ทำให้เกิดรูพรุนเปิด (Open Porosity) ภายในชิ้นงานน้อยกว่ามุมในการขึ้นรูป $0^\circ/90^\circ$

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและบทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการดำเนินงานวิจัย

วางแผนและออกแบบการทดลอง

จัดซื้อสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ

1.5.3 ดำเนินงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

1.5.3.1 ศึกษาบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งในปัจจุบัน

1.5.3.2 ศึกษาการจำลองการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

1.5.3.3 นำไฟล์ที่จำลองการออกแบบไปเข้าโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อแปลงไฟล์สำหรับการขึ้นรูปต้นแบบ (Prototype) ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing)

1.5.3.4 ศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยนำวัสดุที่มีลักษณะเป็นฟิลาเมนต์ (Filament) ทั้ง 3 กลุ่ม มาตัดเป็นเม็ด โดยใช้เครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้น

1.5.3.5 ศึกษาสมบัติทางความร้อน ภายภาพ และสมบัติเชิงกลของเส้นฟิลาเมนต์ และชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

- ศึกษาการวิเคราะห์ หมู่ฟังก์ชัน (Fourier transformation infrared spectroscopy) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม

- ศึกษาการหาค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ตามมาตรฐาน ASTM D1238

- ศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์ Differential Scanning Calorimetry (DSC) ในโหมด Heat-Cool-Heat ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

- ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์ โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ในโหมดการกวาดอุณหภูมิ (Temperature scan) และโหมดการกวาดเวลา (Time scan) ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

- ขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing) และการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural testing) ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก

- ศึกษาสมบัติการไหลด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบแผ่นคู่ขนาน (Parallel plate rheometer) โดยใช้สภาวะการทดสอบแบบปรับเปลี่ยนความถี่เชิงมุม โดยใช้ชิ้นงานในการทดสอบจากชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืด ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก

- ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกส์ (Dynamic mechanical thermal analysis) โดยใช้สภาวะการทดสอบแบบปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature sweep) ที่ความถี่ของการทดสอบและความเครียดคงที่ และให้แรงในโหมดดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending mode) โดยใช้ชิ้นงานในการทดสอบจากชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดัดโค้งที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก

- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก

- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural testing) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 แบบ Three point bending ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก

1.5.3.6 ศึกษาสมบัติทางความร้อน ภายภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing)

- ศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ Differential Scanning Calorimetry (DSC) ในโหมด Heat-Cool-Heat ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

- ขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing) และการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural testing) ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printer) โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 3 ค่า

- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile testing) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural testing) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 แบบ Three point bending ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

- ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานต้นแบบที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยึดที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

- ศึกษาการพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงาน โดยใช้ชิ้นงานในการทดสอบจากชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดัดโค้งที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติก

1.5.3.7 ศึกษาสมบัติเชิงกล และกายภาพของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing)

- นำเส้นฟิลาเมนต์ 4 ชนิด ได้แก่ Carbon fiber PLA, PLA, Soft PLA และ Wood PLA ไปขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง 5 แบบ

- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact testing) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256

- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกด (Compressive test) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D695

- ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกและผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกดที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

- ศึกษาการพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

1.5.5 นำเสนอส่วนหนึ่งของงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการงานวิจัย (Presentation) ในที่ประชุมวิชาการระดับชาติ/นานาชาติ ที่มีรายงานการประชุม (Proceeding)

1.5.6 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5.7 การสอบวิทยานิพนธ์

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 แบบจำลองบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ได้จากการออกแบบโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และสามารถวิเคราะห์เลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปต้นแบบ (Prototype) ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

1.6.2 ชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) บรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันการกระแทกระหว่างการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานที่เหมาะสม



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบบรรจุภัณฑ์

2.1.1 แนวคิดในการออกแบบบรรจุภัณฑ์

ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ นักออกแบบต้องคำนึงถึงศาสตร์และศิลป์ในการแก้ไขปัญหาการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อให้บรรจุภัณฑ์ที่เราออกแบบใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยบรรจุภัณฑ์เป็นการออกแบบงาน 3 มิติ นักออกแบบต้องเป็นคนช่างสังเกตและมีความรู้ทางด้านธุรกิจ เนื่องจากบรรจุภัณฑ์จะเป็นสื่อที่ใช้ในการดึงดูดลูกค้าให้มีความสนใจในผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ โดยการออกแบบบรรจุภัณฑ์ต้องมีความรู้และแนวคิดในด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ด้านการตลาด เนื่องจากบรรจุภัณฑ์เป็นองค์ประกอบหนึ่งของการตลาด จึงต้องคำนึงถึงหลักการและเทคนิคด้านการตลาด ได้แก่ การตั้งเป้าหมาย การสร้างแบรนด์ให้มีความน่าสนใจ การวางแผนการตลาด การจัดจำหน่าย เป็นต้น นอกจากนี้แนวทางในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ยังต้องพิจารณาถึงสถานที่หรือตำแหน่งที่จัดจำหน่ายเป็นสิ่งสำคัญ อาทิเช่น การจัดจำหน่ายในตลาดสด การจัดจำหน่ายในห้างสรรพสินค้า หรือการจัดจำหน่ายในร้านค้าทั่วไป

2) สินค้าที่จะบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ โดยการออกแบบบรรจุภัณฑ์จะประสบความสำเร็จ นักออกแบบต้องทราบถึงคุณลักษณะโดยละเอียดของสินค้า คุณสมบัติเด่นที่จะตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค มิเช่นนั้นการออกแบบบรรจุภัณฑ์จะไม่สามารถทำได้ตามจุดประสงค์ในการนำเสนอสินค้า

3) กลุ่มเป้าหมาย นักออกแบบบรรจุภัณฑ์ต้องเข้าใจถึงกลุ่มเป้าหมายที่ซื้อสินค้า ไม่ว่าจะเป็นผู้บริโภคสินค้าเองหรือไม่ได้เป็นผู้บริโภค (ซื้อสินค้าไปฝากผู้อื่น) โดยกลุ่มเป้าหมายอาจจะแยกแยะตาม สถานะทางสังคม เพศ อาชีพ สถานะทางเศรษฐกิจ เป็นต้น

4) กฎข้อบังคับ นักออกแบบบรรจุภัณฑ์จะต้องคำนึงถึงกฎข้อบังคับของสินค้านั้นๆ ตัวอย่างเช่น บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร ต้องมีกฎข้อบังคับขององค์การรัฐ คือ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

5) ช่องทางการจัดจำหน่าย เป็นหัวใจที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยนักออกแบบบรรจุภัณฑ์จะต้องออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่สามารถช่วยยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารให้สามารถเก็บไว้ได้นานขึ้น เหตุนี้การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มช่องทางการจัดจำหน่ายให้มี

มากขึ้น โดยจัดส่งให้แก่พ่อค้าแม่ค้าทั้งปลีกและส่ง จัดส่งให้แก่ร้านค้าหรือห้างสรรพสินค้า แม้กระทั่งการจัดส่งตรงแก่ศูนย์รวมกระจายสินค้า เป็นต้น

6) สถานะการแข่งขัน นักออกแบบบรรจุภัณฑ์จะต้องเก็บรวบรวมข้อมูลของคู่แข่ง เพื่อที่จะสามารถออกแบบบรรจุภัณฑ์ให้มีความแตกต่างและมีจุดเด่นที่เหนือกว่าคู่แข่ง เป็นการเพิ่มโอกาสในการสร้างยอดขายที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงจุดขายตามความเป็นจริง

7) สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันมีการรณรงค์เกี่ยวกับปัญหาเรื่องขยะ นักออกแบบบรรจุภัณฑ์จึงต้องคำนึงถึงการใช้วัสดุที่เป็นมิตรแก่สิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้รับความสนใจแก่ผู้บริโภคที่รักษ์สิ่งแวดล้อม [2]

2.1.2 วัสดุที่ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์

งานบรรจุภัณฑ์สามารถนำวัสดุหลากหลายชนิดมาทำได้ โดยสามารถแบ่งแยกวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตออกเป็น 4 ประเภท คือ

1) กระดาษ เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีการใช้งานแพร่หลายมาเป็นระยะเวลาที่ยาวนานและได้รับความนิยมใช้งานเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถรีไซเคิลนำกลับมาใช้งานได้ ซึ่งสอดคล้องกับการรณรงค์ให้เกิดการรักษ์สิ่งแวดล้อม กระดาษจึงเป็นบรรจุภัณฑ์เพียงชนิดเดียวที่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่จากการปลูกป่าทดแทน โดยคุณสมบัติของกระดาษนั้นก็ทั้งข้อดีและข้อเสีย ข้อดี อาทิเช่น มีคุณสมบัติหลายประการเหมาะสำหรับนำไปใช้งาน ส่วนข้อเสีย อาทิเช่น บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากกระดาษไม่สามารถป้องกันความชื้นและความสามารถในการรับแรงกระแทกต่ำ ดังนั้นก่อนที่เราจะนำเอากระดาษมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ต้องมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณา ได้แก่ น้ำหนักมาตรฐาน ความเรียบ ความเป็นรูปทรง ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการรับแรงกระแทก เป็นต้น ประเภทของกระดาษที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กระดาษอ่อนและกระดาษแข็ง

2) พลาสติก ปัจจุบันความนิยมในการนำพลาสติกมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มในการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติของพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของอากาศและน้ำ มีความแข็งแรง ระบายความร้อน และยังสามารถต่อต้านการทำลายของแบคทีเรียและเชื้อราอีกด้วย ในทางกลับกันพลาสติกก็มีข้อเสียเช่นกัน อาทิเช่น ไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติ การกำจัดทำได้ยากและก่อให้เกิดมลพิษ นอกจากนี้การนำพลาสติกมาใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ก็ต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของพลาสติก ตัวอย่างเช่น ความปลอดภัย เนื้อพลาสติก ความใส ความขุ่นมัว ความสามารถในการทนต่อสภาพอากาศ และความสามารถในการรับแรง เป็นต้น ซึ่งชนิดของพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 7 กลุ่ม

ได้แก่ พอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน สุกท้ายคือพลาสติกนอกเหนือจากที่กล่าวมา

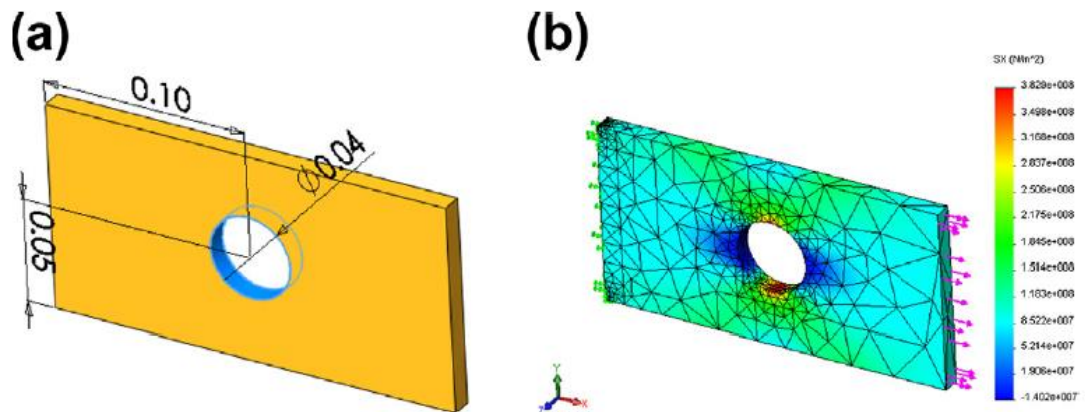
3) แก้ว เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ และสามารถรักษาคุณภาพสินค้าได้ดีมาก โดยคุณสมบัติของแก้วต่อการทำบรรจุภัณฑ์มีข้อดี คือ มีความใสสามารถเห็นสินค้าได้ชัดเจน สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ทนต่อสภาพอากาศ และทนความร้อนสูง แต่อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของแก้วก็มีข้อเสียเช่นกัน ตัวอย่างเช่น มีน้ำหนักมาก ราคาสูง และมีความเปราะแตกหักได้ง่าย ในส่วนของประเภทของแก้วสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ แก้วโบโรซิลิเกต แก้วโซดาไลน์ที่ผ่านกรรมวิธีทางผิว แก้วโซดาไลน์ที่ไม่ได้ใช้ทำภาชนะบรรจุยาสำหรับฉีด และ แก้วโซดาไลน์ที่ใช้ทำภาชนะบรรจุยาที่ใช้ภายในและภายนอกซึ่งไม่ใช่สำหรับฉีด

4) ไม้ เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กันมาอย่างยาวนาน ซึ่งมักใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง โดยไม้ที่นิยมนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ ไม้ไผ่ ไม้กระดานหรือไม้แผ่นอื่นๆ และหวาย ซึ่งลักษณะของไม้ที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ประกอบไปด้วย ไม้จริง Sawn Timber ไม้อัด Plywood แผ่นใยไม้อัด Fiber Board และแผ่นขึ้นไม้อัด Particle Board

5) โลหะ โดยข้อดีของโลหะเมื่อนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ คือ มีความแข็งแรงทนทานมาก สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี และสามารถนำไปหลอมแปรรูปนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ แต่ข้อเสียของโลหะก็มีเช่นกัน อาทิเช่น มีน้ำหนักมาก ราคาสูง และเมื่อผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์จะเกิดจุดที่เสี่ยงต่อการแตกหักตรงรอยเชื่อมต่อ ในส่วนของชนิดของโลหะที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ประกอบด้วย แผ่นเหล็กตีบุก แผ่นเหล็กไร้ตีบุก อลูมิเนียมและแผ่นเปลวอลูมิเนียม [3] [4]

2.1.3 การออกแบบบรรจุภัณฑ์โดยใช้คอมพิวเตอร์

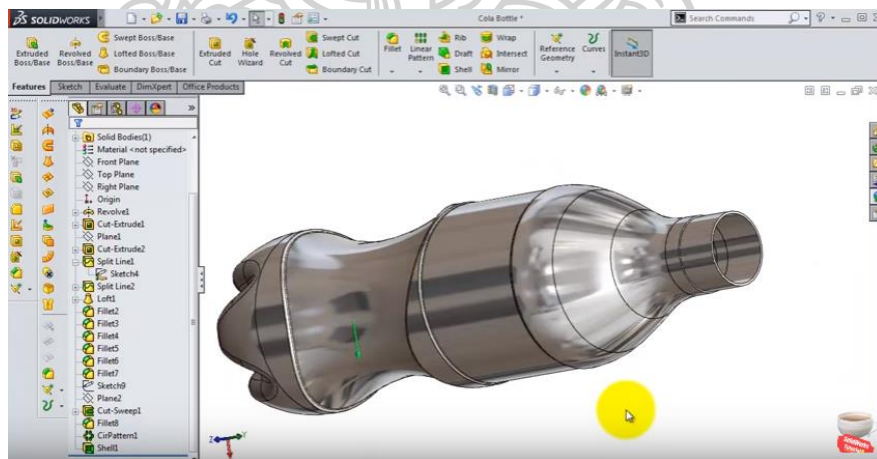
1) โปรแกรม SolidWorks เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งโปรแกรม SolidWorks ใช้งานง่ายและมีความสามารถที่ครอบคลุมการออกแบบชิ้นงานเกือบทุกชนิด นอกจากนี้โปรแกรม SolidWorks ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สำหรับการออกแบบในโปรแกรม SolidWorks จะมีด้วยกัน 2 โหมด คือ การประเมินผล (Evaluation) และการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization) ซึ่งการประเมินผลจะเป็นตัวช่วยให้ผู้ใช้งานในการระบุค่าที่ไม่ต่อเนื่องของตัวแปรแต่ละตัวและใช้เซนเซอร์ (Sensor) เป็นตัววัดข้อจำกัดในการดำเนินการซอฟต์แวร์เพื่อศึกษาการใช้ชุดคำสั่งผสมต่างๆ และรายงานผลลัพธ์ของชุดคำสั่งแต่ละอันออกมา โดยเซนเซอร์สามารถใช้ศึกษา mass properties, dimensions, interface detection, simulation data และ motion data ในรูปที่ 2.1 จะแสดงถึงชิ้นงานตัวอย่าง 3 มิติ และการใช้ simulation model ด้วย mesh และ stress fringe plot [5]



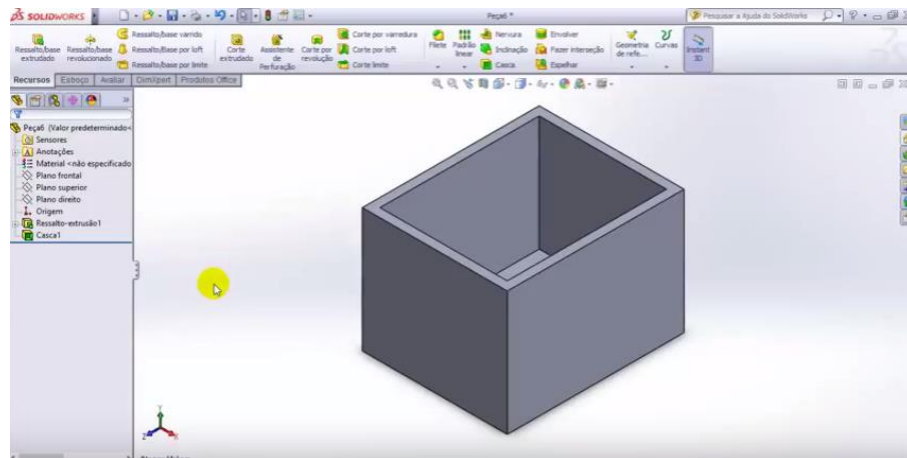
รูปที่ 2.1 แสดงแผ่น Plate ที่มีรูตรงกลาง : (a) CAD solid mode และ (b) โมเดล Simulation ที่แสดง mesh และ stress fringe plot [5]

โปรแกรม SolidWorks เมื่อใช้ออกแบบจำลอง 3 มิติ เสร็จแล้ว สามารถนำไฟล์ที่ออกแบบไว้ไปใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อพิมพ์ชิ้นงานต้นแบบ 3 มิติ ออกมาได้อีกด้วย โดยขั้นตอนหลักๆ ก็จะมีด้วยกัน 6 ขั้นตอน ดังนี้ [6]

1.1 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ หรือที่เรียกว่า CAD



รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลอง 3 มิติ รูปขวดน้ำที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks [7]



รูปที่ 2.3 แสดงแบบจำลอง รูปกล่องที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks [8]

1.2 แปลงไฟล์แบบจำลอง 3 มิติ ที่ทำเสร็จแล้วให้เป็นไฟล์ .stl จากนั้นนำไฟล์ .stl ใส่เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการพิมพ์ 3 มิติ

1.3 เตรียมความพร้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ไม่ว่าจะเป็วัสดุที่ใช้ขึ้นรูป วัสดุ support เทปกาวที่ทำให้พลาสติกติดกับฐาน เป็นต้น

1.4 ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการพิมพ์ 3 มิติ จนเสร็จ

1.5 เก็บรายละเอียดของชิ้นงาน

1.6 ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์พร้อมสำหรับการนำไปใช้งาน

2) โปรแกรม Autodesk MAYA เป็นโปรแกรมสร้างชิ้นงาน 3 มิติ และยังสามารถสร้าง Animation ได้อีกด้วย โดยตัวโปรแกรมถูกออกแบบออกมาให้ใช้งานได้อย่างครอบคลุมในงานด้านต่างๆ ตั้งแต่การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ไปจนถึงการทำภาพเคลื่อนไหว การควบคุมโปรแกรมโดยการอาศัยการเขียนโค้ดจะทำให้สามารถพัฒนาการทำงานได้เป็นอย่างดี ซึ่งข้อดีอย่างหนึ่งของโปรแกรม Autodesk MAYA คือ มีระบบที่รองรับการสั่งการโปรแกรมด้วยการเขียนโค้ด โดยภาษาที่สามารถใช้เขียนโค้ดในโปรแกรมนี้มีด้วยกัน 2 ภาษา คือ ภาษาไพธอน (Python) และภาษา MEL (Maya Embedded Language) นอกจากนี้ยังมีอีกโปรแกรมที่สามารถเขียนโค้ดได้ คือ โปรแกรมภาษา C++ แต่มีความแตกต่างจากภาษาไพธอนและ MEL ตรงที่ภาษา C++ จะไม่สามารถสั่งการโปรแกรมได้โดยตรง ต้องทำผ่านโปรแกรมอื่นอีกทีหนึ่ง จึงทำให้มีวิธีการใช้งานที่ยุ่งยากกว่า [9]

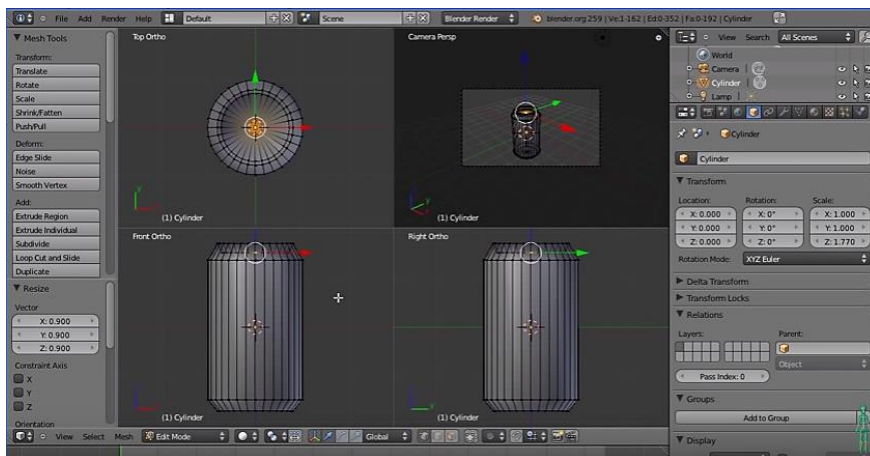


รูปที่ 2.4 แสดงการออกแบบกระป๋องเครื่องดื่มด้วยโปรแกรม Autodesk MAYA [10]



รูปที่ 2.5 แสดงการออกแบบบรรจุภัณฑ์ใส่มันฝรั่งทอดด้วยโปรแกรม Autodesk MAYA [11]

3) โปรแกรม Blender เป็นโปรแกรมสำหรับสร้างโมเดล 3 มิติ ที่มีความซับซ้อนให้มีความง่ายขึ้นและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังสามารถทำ Animation เป็นภาพเคลื่อนไหวได้ โดยเมื่อทำการออกแบบเสร็จ สามารถส่งออกผลงาน (Export) ได้ทั้งในรูปแบบของภาพ 2 มิติ และภาพ 3 มิติ อีกทั้งยังสามารถนำไฟล์งานที่ออกแบบไปใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้อีกด้วย [12]



รูปที่ 2.6 แสดงการออกแบบกระป๋องน้ำอัดลมด้วยโปรแกรม Blender [13]

2.2 บรรจุกฎเกณฑ์และวัสดุที่ใช้ในการขนส่ง

2.2.1 บรรจุกฎเกณฑ์ที่ใช้ในการขนส่ง

2.2.1.1 บทบาทและหน้าที่ของบรรจุกฎเกณฑ์ที่ใช้ทางด้านโลจิสติกส์

บทบาทที่สำคัญของงานด้านโลจิสติกส์จะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายขนส่ง จัดเก็บ และกระจายสินค้าจากแหล่งผลิตไปยังผู้บริโภค ภายใต้ข้อจำกัดของเวลาที่ต้องส่งมอบสินค้าให้ทันเวลา (Just in Time) และต้นทุนรวม ซึ่งมีความสอดคล้องกับบทบาทและหน้าที่ของบรรจุกฎเกณฑ์ อย่างไรก็ตามการค้าในปัจจุบันมีการแข่งขันอย่างรุนแรง บรรจุกฎเกณฑ์จึงมีบทบาทสำคัญต่อการตลาด โดยบรรจุกฎเกณฑ์ที่ใช้ต้องแสดงความโดดเด่นของตัวสินค้าให้ผู้บริโภคเห็นแล้วเกิดความสนใจในตัวสินค้านั้นๆ สำหรับหน้าที่ของบรรจุกฎเกณฑ์ด้านโลจิสติกส์จะเน้นด้านความสะดวกสบายต่อการจัดเก็บและขนส่ง รวมถึงต้นทุนด้วย

ดังนั้นจะสรุปได้ว่าบทบาทและหน้าที่ของบรรจุกฎเกณฑ์ด้านโลจิสติกส์มีด้วยกัน 3 ประการ กล่าวคือ

- 1) ทำหน้าที่ด้านการเก็บรักษา (Storage support) ป้องกันและเก็บรักษาไม่ให้สินค้าภายในเกิดความเสียหายและมีความสะดวกต่อการจัดเก็บ
- 2) ทำหน้าที่ด้านการขนส่ง (Transport support) เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและมีความสะดวกในการขนส่ง
- 3) ทำหน้าที่ลดต้นทุน (Cost reduction) การทำให้เกิดการประหยัดพื้นที่ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการจัดเก็บและการขนส่งสามารถเรียงทับซ้อนกันได้หลายชั้น

2.2.1.2 ประเภทของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในงานด้านโลจิสติกส์ สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1) บรรจุภัณฑ์เพื่อการขายปลีก (Retail package) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดความสะดวกสบายในการส่งต่อให้แก่ลูกค้าโดยตรง จึงถูกออกแบบมาให้มีความน่าสนใจสะดุดตาและสามารถเป็นสื่อโฆษณาให้แก่สินค้าที่บรรจุอยู่ภายใน อีกทั้งยังทำหน้าที่ปกป้องสินค้าและมีรูปร่างที่เหมาะสมแก่การใช้งาน

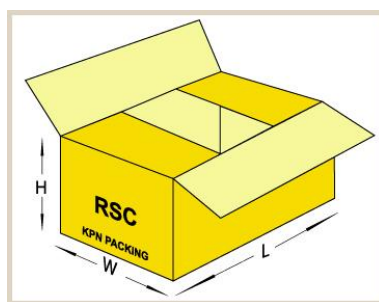
2) บรรจุภัณฑ์เพื่อการขายส่ง (Wholesale package) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แบ่งสินค้าอยู่เป็นชุดๆ อาจจะเป็นชุดละ 6 ชิ้น, 12 ชิ้น หรือ 24 ชิ้น เป็นต้น เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับสินค้าในระหว่างการเก็บรักษาไว้ในคลังสินค้าหรือจากการขนส่ง ซึ่งบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้มีความสำคัญต่อกระบวนการกระจายสินค้า ที่เรียกว่า ศูนย์กระจายสินค้า

3) บรรจุภัณฑ์ชั้นนอกหรือบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง (Out package / Transport package) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการจัดวางโดยใช้พื้นที่น้อยที่สุด เพื่อการขนส่ง รวมถึงเพื่อป้องกันการแตกหักและสามารถรับแรงกระแทกได้โดยที่สินค้าภายในไม่เกิดความเสียหายในระหว่างการขนส่ง [14]

2.2.1.3 ตัวอย่างของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในงานขนส่ง

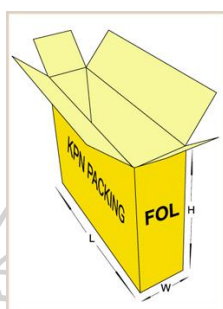
1) กล่องลูกฟูก สามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ดังนี้

1.1 กล่องแบบ RSC (Regular Slotted Container) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 นิยมใช้งานมากกว่ากล่องชนิดอื่นๆ เนื่องจากการผลิตทำได้ง่ายโดยผลิตจากกระดาษเพียงแผ่นเดียว ทำให้มีต้นทุนต่ำสิ้นเปลืองวัสดุน้อย ฝาเปิดปิดมีขนาดเท่ากัน โดยฝากล่องด้านบนบรรจุกับันที่กึ่งกลางของกล่องตามด้านยาวของฝากล่อง ส่วนฝากล่องด้านในจะเว้นช่องห่างตามความสัมพันธ์ของด้านยาวและด้านกว้างของกล่อง กล่อง RSC สามารถดัดแปลงขนาดเพื่อให้สามารถขนส่งสินค้าได้เกือบทุกชนิด และสามารถใช้แผ่นรองเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของกล่องได้อีกด้วย



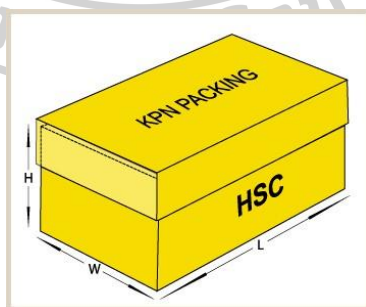
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของกล่องแบบ RSC [15]

1.2 กล่องแบบ FOL (Full Overlap Slotted Container หรือ Full Overlap Container) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เป็นกล่องที่มีฝาเปิดปิดกว้างเท่ากันทุกด้าน โดยฝากล่องด้านนอกจะมีความกว้างเท่ากับความกว้างของกล่อง ทำให้ทับกันสนิทพอดี การซ้อนทับกันของฝาเปิดแผ่นนอกทั้งด้านบนและด้านล่าง จะช่วยให้กล่องมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงเหมาะสำหรับบรรจุสิ่งของหรือสินค้าที่มีน้ำหนักมาก



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของกล่องแบบ FOL [16]

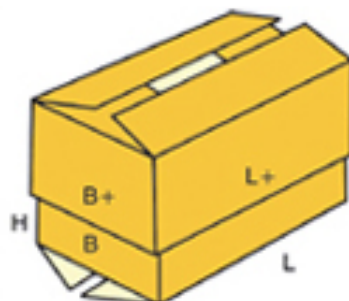
1.3 กล่องแบบ HSC (Half Slotted Container with Cover) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นกล่องที่ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ฝาด้านบนและตัวกล่อง ซึ่งเป็นกล่องสล็อตที่มีฝาเปิดปิดด้านเดียว โดยที่ไม่มีฝาเปิดปิดในตัว กล่องจะถูกเปิดปิดด้วยฝาด้านบน โดยทั่วไปฝาด้านบนจะยื่นครอบคลุมตัวกล่องน้อยกว่า 2 ใน 3 ของความสูงของตัวกล่อง สำหรับฝาด้านบนแบบ half slotted style จะนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมจำพวก แบตเตอรี่ ตู้เย็น เครื่องซักผ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของกล่องแบบ HSC [17]

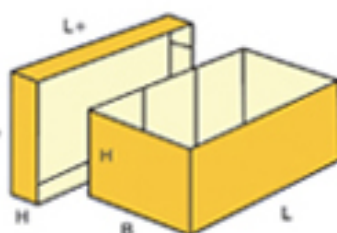
1.4 กล่องแบบ PTHS (Half Slotted Box with Half Slotted Partial Cover) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นกล่องที่ประกอบด้วยกล่อง 2 ชั้น คือ ฝาด้านบนและตัวกล่องซึ่งต่าง

ก็เป็นแบบ slotted style มีความทนทานต่อการโก่งตัวและบวมโค้งงอ กล่องชนิดนี้จึงสามารถได้รับน้ำหนักกดทับได้ดี



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะของกล่องแบบ PTHS [18]

1.5 กล่องแบบ FPF (Five Panel Folder) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เป็นกล่องที่มีลักษณะคล้ายกับกล่อง RSC แต่มีความสูงน้อยกว่า เหมาะสำหรับเป็นภาชนะขนส่งสิ่งของหรือสินค้าที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวๆ เช่น รม ลูกกลิ้ง และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น [19]



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของกล่องแบบ FPF [20]

2) กล่อง Big Box ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นกล่องขนาดใหญ่ที่ถูกรออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการขนส่งสินค้าให้สามารถปกป้องและรองรับน้ำหนักสินค้าได้ดี [21]



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของกล่อง Big Box [22]

3) กระจกอบ เป็นบรรจุภัณฑ์ที่สานจากต้นกระจูดและสานจากพลาสติก ซึ่งกระจกอบมี 2 ประเภท ได้แก่ กระจกอบตั้ง (ดังแสดงในรูปที่ 2.13) และกระจกอบนอน (ดังแสดงในรูปที่ 2.14) โดยทั้งสองประเภทจะแตกต่างกันตรงวิธีการสานทำกันกระจกอบ กล่าวคือ ถ้าสานกันกระจกอบเป็นวงกลม แล้วสานให้บรรจุกันและไม่มีริมหรือผูกให้ติดกันมี 2 มุม จะเรียกว่ากระจกอบนอน ซึ่งส่วนใหญ่จะให้บรรจุข้าวสาร ข้าวเปลือก หรือบรรจุสิ่งของจำนวนมากมีน้ำหนัก ส่วนกระจกอบตั้งจะสานกันกระจกอบให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมี 4 มุม ซึ่งส่วนมากจะให้บรรจุข้าว ถั่ว พริก เป็นต้น [23]



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของกระจกอบตั้ง [24]



รูปที่ 2.14 แสดงตัวอย่างของกระจกอบนอน [25]

4) ถาดกระดาษ (Paper tray) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เป็นถาดที่มีผนังกันรอบทั้ง 4 ด้าน นิยมใช้บรรจุสินค้าประเภทขวดหรือกระป๋องเครื่องดื่มโดยมี Plastic Shrink Wrap หุ้มโดยรอบอีกที อาทิเช่น เครื่องดื่มชูกำลัง เปียร์กระป๋อง น้ำดื่ม น้ำอัดลมกระป๋อง เป็นต้น [26]



รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของภาตกระดาษ [27]

5) ภาตใส่ไข่พลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ทำมาจากพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน ซึ่งมีความแข็งแรง และสามารถป้องกันการแตกของไข่ โดยที่ภาตจะมีลักษณะเป็นหลุมเอาไว้บรรจุไข่เพื่อการขนส่ง



รูปที่ 2.16 แสดงภาตพลาสติกสำหรับไว้ใส่ไข่ [28]

6) ลังไม้ (ดังแสดงในรูปที่ 2.17) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่เก่าแก่ที่สุด มีความแข็งแรงทนทาน โดยลังไม้จะทำเป็นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งขนาดของลังไม้ก็ขึ้นอยู่กับสินค้าที่บรรจุ ใช้ในการขนส่งสินค้าจากประเทศที่กำลังพัฒนาไปสู่ประเทศอุตสาหกรรม [29]



รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างของลังไม้ [30]

2.2.2 วัสดุป้องกันการแตกหัก

2.2.2.1 การออกแบบวัสดุป้องกันการแตกหัก

การออกแบบพัฒนาบรรจุภัณฑ์ป้องกันการแตกหักที่อาจเกิดอันตรายทางกายภาพที่ใช้ต้นทุนการผลิตน้อยแต่สามารถป้องกันการสั่นกระแทกได้ดี คือ การเลือกใช้วัสดุป้องกันการกระแทก (Cushioning Materials) โดยในทุกสภาวะการขนส่งนั้น ผลิตภัณฑ์จะได้รับการตกระแทกและการสั่นสะเทือนในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่มีผลิตภัณฑ์บรรจุอยู่ภายในอาจจะเกิดการตกลงชนกระแทกกับวัสดุอื่นระหว่างการขนส่ง อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ภายในเกิดความเสียหายได้ วัตถุประสงค์ของการใช้วัสดุป้องกันการแตกหัก คือ การป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายจากการตกระแทกและการสั่นสะเทือนระหว่างการขนส่ง ซึ่งวัสดุป้องกันการแตกหักต้องทำหน้าที่พื้นฐาน อาทิเช่น สามารถรับแรงกระแทกและป้องกันการถ่ายโอนแรงไปยังผลิตภัณฑ์ สามารถป้องกันการเคลื่อนย้ายของผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น ในปัจจุบันนี้มีวัสดุหลากหลายประเภทที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุป้องกันการแตกหัก โดยงานของผู้พัฒนาบรรจุภัณฑ์และหีบห่อ คือ การเลือกใช้วัสดุป้องกันการกระแทกที่สามารถป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ได้โดยมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยในการเลือกวัสดุป้องกันการกระแทก ได้แก่ รูปทรง ขนาด และน้ำหนักของผลิตภัณฑ์, ความเปราะแตกหักง่ายของผลิตภัณฑ์, รูปแบบในการขนส่งเคลื่อนย้าย, แรงกระแทกที่ได้รับระหว่างการขนส่งเคลื่อนย้าย สุดท้ายคือ คุณสมบัติ ราคา และการใช้ประโยชน์ของวัสดุป้องกันการกระแทกของแต่ละชนิด [31]

2.2.2.2 ชนิดของวัสดุป้องกันการแตกหัก

ในปัจจุบันวัสดุป้องกันการแตกหักสามารถผลิตจากวัสดุได้หลากหลายชนิด โดยวัสดุป้องกันการแตกหักที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม มีดังนี้

- 1) แผ่นกระดาษลูกฟูก ทำหน้าที่เป็นแผ่นรอง ตัวกันหรือแผ่นกัน เพื่อเก็บสินค้าไว้ภายในบรรจุภัณฑ์หรือห่อหุ้มสินค้าเอาไว้ ป้องกันแรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือน โดยแผ่นกระดาษลูกฟูกจะมีทั้งแบบ 2 ชั้น และ 3 ชั้น ซึ่งแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบ 3 ชั้น จะนิยมใช้เป็นแผ่นรองหรือแผ่นแยกเพื่อยึดสินค้าให้อยู่กับที่ไม่เกิดการเคลื่อนย้ายภายในบรรจุภัณฑ์ ส่วนแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบ 2 ชั้น จะนิยมใช้เป็นกระดาษห่อ อย่างที่ทราบกันดีว่าแผ่นกระดาษลูกฟูกสามารถรับแรงกระแทกได้ค่อนข้างจำกัด และเมื่อได้รับแรงกระแทกที่รุนแรงจะไม่สามารถกลับคืนเป็นรูปแบบเดิมได้ มีการวัดความชื้นสูงทำให้เกิดการอ่อนตัวเมื่อ

อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง แต่เนื่องจากแผ่นกระดาษลูกฟูกสามารถเข้าสู่กระบวนการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้จึงไม่เกิดปัญหาเรื่องขยะหลังการใช้งาน

2) กระดาษที่เย็บเป็นเศษ (ฝอยกระดาษ) มีความสามารถในการรับแรงกระแทกแย่น เนื่องจากมีความสามารถดูดความชื้นสูง มีการปนเปื้อนและไม่สะอาด โดยกระดาษที่เย็บเป็นเศษส่วนมากมักจะเป็กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ไม่ได้ใช้แล้ว

3) ฝอยไม้ เป็นวัสดุป้องกันการแตกหักที่ใช้กันมาอย่างยาวนาน โดยใช้ใส่ลงไปในช่องว่างระหว่างกล่องหรือลัง ซึ่งความสามารถในการป้องกันการแตกหักจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นที่ใช้บรรจุและปริมาณความชื้นที่อยู่ในช่วง 12 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมไม่นิยมใช้ฝอยไม้ เนื่องจากมีโอกาสเสี่ยงต่อการปนเปื้อนเมื่อใช้กับสินค้าจำพวกผักและผลไม้ นอกจากนี้ความชื้นของฝอยไม้ยังส่งผลต่อการเกิดการฟุ้งร่อนกับสินค้าอุตสาหกรรม

4) แผ่นพลาสติกฟองอากาศ ทำจากฟิล์มพอลิเอทิลีน 2 ชั้น นำมาประกบกันเพื่อให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ระหว่างชั้นฟิล์ม นิยมใช้ในการห่อหุ้มสินค้าขนาดเล็กๆ อาทิเช่น งานจำพวกเซรามิก งานหัตถกรรม นอกจากนี้ยังใช้ห่อหุ้มภายนอกของอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน เช่น โทรทัศน์ ตู้เย็น เป็นต้น แผ่นพลาสติกฟองอากาศมีความเหนียว ไม่ดูดความชื้น สะอาด และทนต่อแรงกระแทก จึงเหมาะสำหรับนำมาทำวัสดุป้องกันการแตกหัก ซึ่งใช้กับสินค้าที่ต้องการป้องกันการแตกหักมากกว่าที่ต้องการป้องกันการสั่นสะเทือน

ตัวอย่างรูปทรงของแผ่นพลาสติกฟองอากาศ

4.1 รูปทรงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าอันเดียว



รูปที่ 2.18 แสดงรูปทรงของแผ่นพลาสติกอัดอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าอันเดียว [32]

4.2 รูปทรงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองอัน



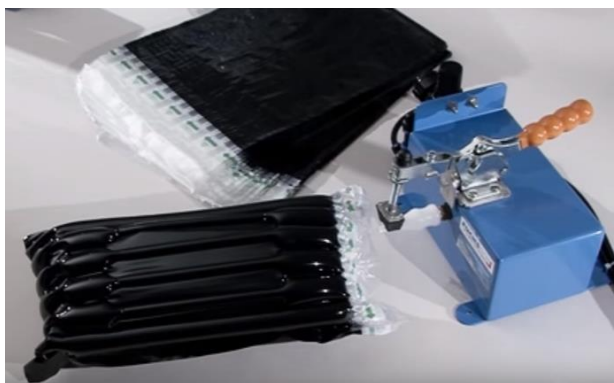
รูปที่ 2.19 แสดงรูปทรงของแผ่นพลาสติกอัดอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองอัน [33]

4.3 รูปทรงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลายอัน



รูปที่ 2.20 แสดงรูปทรงของแผ่นพลาสติกอัดอากาศแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลายอัน [32]

4.4 รูปทรงแบบแท่งยาว



รูปที่ 2.21 แสดงรูปทรงของแผ่นพลาสติกอัดอากาศแบบแท่งยาว [34]

5) โฟมพอลิเอทิลีน มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ closed cell ซึ่งมีการคืนตัวได้ดี หลังจากรับแรงกระแทก มีน้ำหนักเบา ไม่ดูดซับความชื้น ทนทานต่อสารเคมี โฟมพอลิเอทิลีนมีการใช้งานด้วยกัน 2 ชนิด คือ แบบ crosslink และ non-crosslink โดยโฟมพอลิเอทิลีนชนิด crosslink จะมีน้ำหนักมากกว่าและราคาแพงกว่าชนิด non-crosslink นอกจากนี้ยังสามารถรับแรงกระแทกได้ดีกว่า โดยทั่วไปมักนิยมนำโฟมพอลิเอทิลีนใช้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน เครื่องมือต่างๆ นอกจากนี้ยังนำไปห่อหุ้มสินค้าจำพวกหัตถกรรม อุปกรณ์และเครื่องมือ

6) โฟมพอลิสไตรีน มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ closed cell จึงทำให้มีน้ำหนักเบา มีคุณสมบัติในการป้องกันการแตกหักได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการคืนตัวกลับเป็นรูปแบบเดิม จึงไม่เหมาะกับงานที่ต้องรับแรงกระแทกรุนแรงหลายๆ ครั้ง โดยโฟมพอลิสไตรีนสามารถขึ้นรูปทรงได้หลากหลายและยังสามารถเติมสีเพื่อเพิ่มความสวยงามได้อีกด้วย ตัวอย่างการใช้งานของโฟมพอลิสไตรีน ได้แก่ การนำโฟมพอลิสไตรีนที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ไปใช้งานกับพวกเครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องมือเครื่องใช้ที่มีความปราณีต เครื่องแก้ว ในขณะที่โฟมพอลิสไตรีนชิ้นเล็กๆ ก็จะนำไปเติมในช่องว่างของลังเพื่อการขนส่งสินค้า [35]

ตัวอย่างรูปทรงของโฟมพอลิสไตรีน

6.1 รูปทรง Peanuts



รูปที่ 2.22 แสดงรูปทรงของโฟมสไตรีนแบบ Peanuts [36]

6.2 รูปทรง Pellets



รูปที่ 2.23 แสดงรูปทรงของโพลีสไตรีนแบบ Pellets [37]

6.3 รูปทรง Balls



รูปที่ 2.24 แสดงรูปทรงของโพลีสไตรีนแบบ Balls [38]

6.4 รูปทรง Popcorns



รูปที่ 2.25 แสดงรูปทรงของโพลีสไตรีนแบบ Popcorns [39]

2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

2.3.1 ความสำคัญของการพิมพ์ 3 มิติ

สมัยก่อนการที่เราจะสร้างชิ้นงานขึ้นมาหนึ่งชิ้นต้องสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาก่อน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในกรณีที่ชิ้นงานที่เราจะทำการขึ้นรูปมีความซับซ้อน ถ้าชิ้นงานมีหลายรูปแบบก็ต้องใช้จำนวนแม่พิมพ์ในรูปแบบต่าง ๆ มากขึ้น ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สิ้นเปลือง นอกจากนี้ปริมาณของเสียที่เกิดจากการขึ้นรูปก็ยังมีปริมาณมากอีกด้วย ด้วยเหตุผลจึงมีการนำเอาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มาใช้ในการผลิตชิ้นงาน ซึ่งเป็นนวัตกรรมคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ของโลก โดยสามารถสร้างชิ้นงานต้นแบบ 3 มิติใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานที่ออกแบบหรือนำไปเสนอผลงานการออกแบบให้กับลูกค้า จากการสร้างโมเดล 3 มิติ ด้วยโปรแกรมออกแบบทางคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการส่งพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ออกมาเป็นชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทำให้การออกแบบมีคุณภาพมากขึ้น มีความแม่นยำและรวดเร็ว และยังช่วยลดปัญหาในเรื่องค่าใช้จ่ายการสร้างแม่พิมพ์และของเสียที่เกิดจากการขึ้นรูป ส่งผลให้ใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่าเดิม [40]

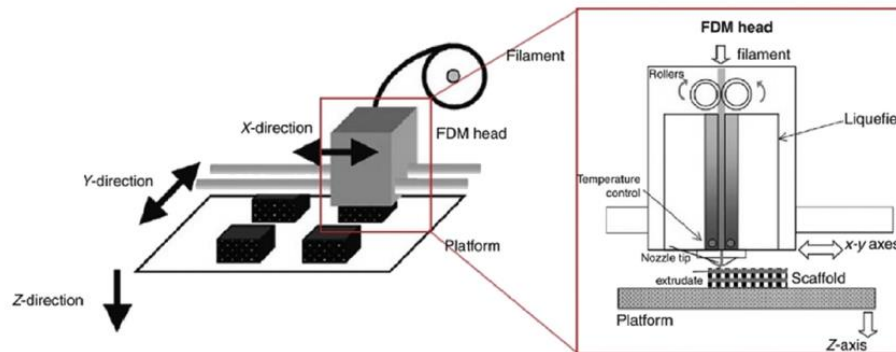
2.3.2 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในปัจจุบัน

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่รุดหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ๆ ขึ้นมามากมาย โดยเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบันก็คือ เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หรือที่รู้จักกันในชื่อ 3D Printing ที่สามารถสร้างชิ้นงานต้นแบบด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ไม่ใช่เรื่องแปลกใหม่แต่อย่างใด เนื่องจากมีประวัติการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เป็นระยะเวลากว่า 30 ปี ซึ่งการที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ กลับมาได้รับความสนใจอีกครั้งก็เนื่องมาจากได้มีการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ให้สามารถใช้งานในระดับครัวเรือนได้มากขึ้นและในงานวิจัยระดับเล็กลงแต่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นตั้งแต่ช่วงปลายคริสต์ทศวรรษที่ 19 โดย Charles W. (Chuck) Hull ซึ่งออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ให้แก่บริษัท 3D Systems Corporation ที่มีชื่อว่า Stereolithographic 3-D printer [41]

เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ภาพ 3 มิติ หรือ 3D Printer มีอยู่หลายประเภท ได้แก่

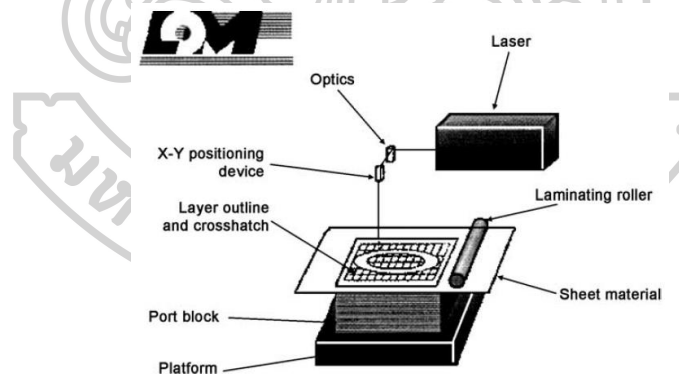
- 1) การพิมพ์แบบหัวฉีด (FDM : Fused Deposition Modeling) เป็นการทำงานโดยใช้กลไกหัวฉีด (Nozzle) โดยจะทำความร้อนเพื่อให้วัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้น (Filament) เกิดการอ่อนตัว จากนั้นจึงเริ่มสร้างชิ้นงาน โดยเริ่มจากฐานก่อนแล้วฉีดเพิ่มขึ้นทีละชั้นจนเสร็จ ซึ่งการพิมพ์แบบหัวฉีดเหมาะสำหรับการสร้างต้นแบบ (Rapid prototype) ด้วยพลาสติก พื้นผิวของชิ้นงานที่ได้จะไม่เรียบ ต้องทำการขัดผิวก่อนนำไปใช้งานจริง จากกลไกข้างต้นจะแสดงดังรูปที่ 2.26 แต่อย่างไรก็ตาม

เทคนิคการพิมพ์แบบหัวฉีดเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถดัดแปลงใช้กับวัสดุได้หลายประเภท และมีต้นทุนในการใช้งานต่ำกว่าการพิมพ์แบบอื่นๆ [1]



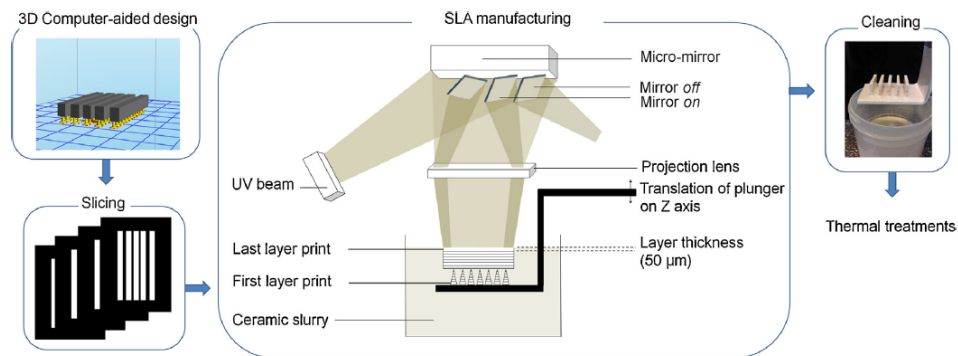
รูปที่ 2.26 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด [42]

2) การพิมพ์ด้วยการซ้อนแผ่นวัสดุ (LOM : Laminated Object Manufacturing) เป็นการสร้างชิ้นงานต้นแบบโดยใช้เลเซอร์ตัดวัสดุออกเป็นแผ่นที่ละชั้น แล้วทำการเชื่อมแต่ละชั้นเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งเทคนิคการพิมพ์ด้วยการซ้อนแผ่นวัสดุมีจุดเด่นในด้านความเร็ว โดยเทคนิคนี้จะเหมาะกับวัสดุจำพวกแผ่นกระดาษ ไม้ และโลหะ [43]



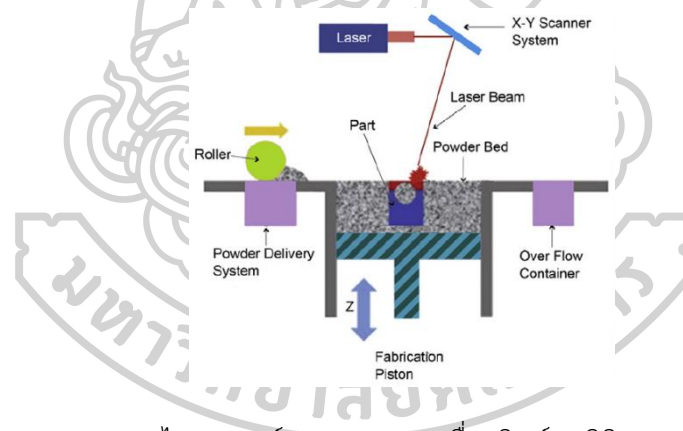
รูปที่ 2.27 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบการซ้อนแผ่นวัสดุ [43]

3) การพิมพ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (SLA : Stereolithography) เป็นการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิก โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตยิงไปที่ผิวน้ำเรซิน เพื่อทำให้ผิวน้ำเรซินเกิดการแข็งตัวทีละชั้นอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างวัตถุ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งเทคนิคนี้จะเหมาะกับวัสดุประเภทเรซิน โดยชิ้นงานที่ได้จะมีผิวที่เรียบและมีความละเอียดสูง [44]



รูปที่ 2.28 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบรังสีอัลตราไวโอเล็ต [45]

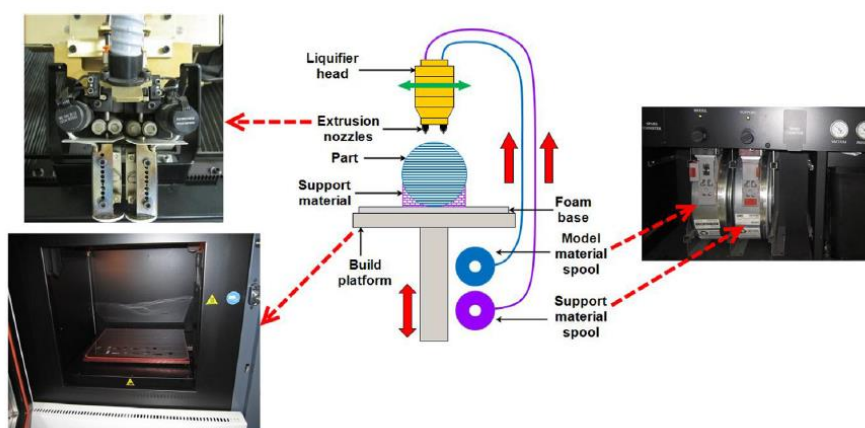
4) การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (SLS : Selective Laser Sintering) เป็นหนึ่งในเทคนิค Additive Manufacturing ซึ่งขึ้นรูปชิ้นงานโดยการยิงแสงเลเซอร์ลงบนผงวัสดุให้เกิดการหลอมละลายเฉพาะจุด และเกิดการเชื่อมตอดัดกันทีละชั้น เพื่อสร้างวัตถุ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ซึ่งเทคนิคนี้จะเหมาะกับวัสดุจำพวกผงโลหะ แก้ว เซรามิก เป็นต้น โดยชิ้นงานที่ได้จะมีความคงทน [46]



รูปที่ 2.29 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบแสงเลเซอร์ [47]

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่แพร่หลายที่สุดในโลก ณ ปัจจุบัน คือ การพิมพ์แบบหัวฉีด (FDM : Fused Deposition Modeling) หรือผู้ผลิตบางรายเรียกว่า FFF : Fused Filament Fabrication โดยหลักการทำงานของ FDM เริ่มจากการสร้างโมเดล 3 มิติ ในคอมพิวเตอร์ก่อน เมื่อได้ไฟล์ชิ้นงาน 3 มิติ มาแล้วให้นำเข้าโปรแกรม CAM เพื่อบอกเครื่อง 3D Printer ว่าต้องพิมพ์ชิ้นงานนี้อย่างไร โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าการพิมพ์ต่างๆ ในซอฟต์แวร์ได้ เช่น วัสดุที่ใช้ ความเร็วในการพิมพ์ อุณหภูมิที่หัวฉีด ความละเอียดในการพิมพ์ เป็นต้น เมื่อผู้ใช้งานส่งคำสั่งไปยังเครื่อง 3D Printer เครื่องพิมพ์จะเริ่มทำการหลอมเหลวเส้นพลาสติก (Filament) ที่ป้อน (Feed) เข้าไปใน

เครื่อง และทำการฉีดพลาสติกที่หลอมแล้วลงบนฐานพิมพ์ โดยหัวฉีด (Nozzle) จะเคลื่อนที่ทั้งในแนวนอนและแนวตั้งตามโมเดล 3 มิติที่สร้างขึ้นมาทีละชั้น ซึ่งกระบวนการนี้จะทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนได้วัตถุตามที่ต้องการ [48] โดยในรูปที่ 2.30 จะแสดงตัวอย่างกระบวนการของ FDM โดยทั่วไปเส้นพลาสติก (Filament) จะใช้เป็นพวกเทอร์โมพลาสติก ตัวอย่างเช่น ABS, Nylon 12, polycarbonate (PC) เป็นต้น



รูปที่ 2.30 แสดงตัวอย่างของกระบวนการ FDM [49]

2.3.3 ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นฟิลาเมนต์ในการพิมพ์ 3 มิติ

1) ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) เป็นอีกหนึ่งวัสดุเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่นิยมใช้งานกันทั่วไป เหมาะสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความทนทานและสามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง ABS กับ PLA filament พบว่า ABS จะมีความเปราะน้อยกว่าแต่มีความเหนียวมากกว่า นอกจากนี้ ABS ยังสามารถผ่านกระบวนการที่ใช้อะซิโตนเพื่อทำให้ผิวมีความเงางามได้อีกด้วย เมื่อทำการพิมพ์ 3 มิติ ด้วย ABS filament แนะนำให้ใช้ printing surface ที่มีความร้อนสูง โดย ABS จะเกิดการหดตัวเมื่อถูกทำให้เย็นตัว ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอเสียรูป

2) Polylactic acid (PLA) เป็นหนึ่งในสองฟิลาเมนต์ที่มีการใช้งานด้านการพิมพ์ 3 มิติ มากที่สุด เหตุผลที่ PLA ถูกใช้งานอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีในเรื่องการไม่มีกลิ่นและเกิดการบิดงอได้ยาก อีกทั้งไม่ต้องใช้ Heated bed โดย PLA filament เป็นวัสดุสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะสามารถผลิตได้จากแหล่งพลังงานทดแทน อาทิเช่น อ้อย ข้าวโพด เป็นต้น

3) Soft PLA หรือที่เรียกว่า Flexible PLA ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะคล้ายยาง ซึ่งสามารถบิดงอหรือยืดหยุ่นได้

4) Polyamide (Nylon) เป็นวัสดุสำหรับการใช้งานในเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีความแข็งแรงทนทาน และมีความอ่อนกประสงค์ใช้งานได้หลากหลาย จะเกิดความยืดหยุ่นเมื่อไ่นล้อนมีความบาง แต่มีการยึดเกาะระหว่างชั้นที่แข็งแรง โดย Nylon filament มีสีขาวสว่างและมีพื้นผิวที่โปร่งแสง สามารถดูดซับสีที่เติมลงไปในการบวนการ ซึ่ง Nylon filament มีความสามารถในการดูดซับความชื้นสูง ดังนั้นก่อนการใช้งานควรทำการอบแห้งก่อน

5) Poly(ethylene terephthalate) (PET) ส่วนใหญ่ PET filament จะเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง PET กับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ ที่พบส่วนมากจะเป็น PETG filament ซึ่งเป็นฟิลาเมนต์ที่มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นหลายประการ ซึ่งเป็นการนำเอาข้อดีของ PLA และ ABS มารวมกัน กล่าวคือ มีจุดเด่นในการใช้งานง่าย ขึ้นรูปขึ้นงานได้ง่ายของ PLA และมีความแข็งแรง ความทนทานของ ABS โดยคุณสมบัติที่เด่นของ PETG filament คือ มีความแข็งแรงมากกว่า PLA และยังได้รับอนุมัติจาก FDA ให้สามารถใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารและใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการบริโภคอาหารได้ และมีจุดเด่นที่ดีกว่า ABS ตรงที่ไม่เกิดการบิดงอและไม่เกิดกลิ่นระหว่างกระบวนการการพิมพ์ 3 มิติ

6) Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทน ABS ด้วยคุณสมบัติที่เพิ่มเติมมากมาย อาทิเช่น ความสามารถในการทนทานต่อสภาพอากาศและความทนทานต่อการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อได้รับแสงยูวี จึงเป็นตัวเลือกที่ยืดหยุ่นในการใช้งานขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่ใช้งานกลางแจ้ง กรณีของ ABS จะเกิดการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาานาน แต่ ASA จะมีความขาวที่ยาวนานกว่า ABS

7) Polypropylene (PP) มีการใช้งานเป็นวัสดุในการพิมพ์ 3 มิติ มากที่สุดในด้านบรรจุภัณฑ์ ภาชนะใส่อาหารและบานพับ โดย PP filament มีความสามารถในการยึดโดยไม่เกิดการขาดได้มากกว่า PLA filament อีกทั้งยังรับแรงกระแทกได้ดีกว่า PLA อีกด้วย กรณีของ PLA มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกเป็นชิ้นๆ แต่ PP สามารถเกิดการบิดงอได้

8) TPE เป็นวัสดุแบบยืดหยุ่นสำหรับพิมพ์ 3 มิติ ที่ให้ความรู้สึกและทำหน้าที่คล้ายยางแบบยืดหยุ่น โดย TPE filament ใช้ขึ้นรูปขึ้นงานที่มีความยืดหยุ่นสามารถบิดงอและทำให้โค้งงอตามสภาพแวดล้อมการใช้งาน เช่น สายพาน สปริง กรอบโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ซึ่งวัสดุแบบยืดหยุ่นสำหรับพิมพ์ 3 มิติ จะทำให้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีลักษณะคล้ายยางอ่อน ยืดหยุ่นได้ดีกว่า Soft PLA filament

9) TPU เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ทนทานต่อน้ำมัน/จาระบี และทนทานต่อการขีดถู โดย TPU สามารถใช้งานได้หลากหลาย ตัวอย่างเช่น แผงควบคุมยานยนต์ ล้อเลื่อนที่ติดกับฐานเก้าอี้หรือเฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ทางการแพทย์ และรองเท้า เป็นต้น โดยส่วนใหญ่มักใช้ทำกรอบโทรศัพท์มือถือ

10) Wood Filaments เป็นวัสดุสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ที่ทำจากไม้ โดยจะขึ้นรูปชิ้นงานแล้วให้ความรู้สึกเหมือนทำด้วยแผ่นใยไม้อัด มีความสามารถในการตัด ขัด และทาสีได้ ซึ่ง Wood filaments จะใช้ PLA เป็น matrix แล้วเติมผงไม้ชนิดต่างๆ ลงไป การใช้ PLA เป็น matrix ทำให้สามารถใช้งานกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ง่ายและขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ง่ายอีกด้วย

11) Conductive Filaments คือ PLA ที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว ซึ่งถูกออกแบบมาให้สามารถใช้งานกับวงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำและกระแสไฟฟ้า โดย Conductive PLA filament เมื่อทำการพิมพ์ชิ้นรูปชิ้นงานออกมาจะมีความยืดหยุ่นมากกว่า PLA ธรรมดา แต่จะมีความสามารถในการยึดติดกับพื้นผิวลดลง

12) Carbon Fiber Reinforced PLA เป็นวัสดุที่ให้ความแข็งแรงทางโครงสร้างที่ดีเยี่ยมและความสามารถในการยึดติดดีมีการบิดเพียงเล็กน้อย การมี Carbon fiber อยู่ในฟิลาเมนต์ ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น จึงเป็นการเพิ่มโครงสร้างสนับสนุนภายในชิ้นงาน ซึ่ง Carbon fiber ที่อยู่ในเส้นฟิลาเมนต์จะถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะไหลออกจากหัวตาย (Nozzle) ได้ แต่ต้องมีความยาวเพียงพอที่จะทำให้ความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปจะใช้ Carbon fiber reinforced PLA ในการพิมพ์ชิ้นรูปชิ้นงานที่ไม่ต้องการให้เกิดการโค้งงอ

13) Polycarbonate (PC) เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงกระแทกสูง นอกจากนี้ยังมีความเหนียวและมีความทนทานต่ออุณหภูมิ เมื่อเกิดการเย็นตัว พอลิคาร์บอเนตสามารถอ่อนตัวและบิดงอได้โดยไม่เกิดการแตกหัก [50]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

จากงานวิจัยของ Elvin Karan และคณะ [51] ได้ทำการศึกษาการพิจารณาวัสดุที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ : การสำรวจความสำคัญด้านวัสดุที่ถูกใช้โดยนักออกแบบผลิตภัณฑ์ พบว่าการเลือกใช้วัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่เฉพาะเจาะจงนั้นมีความละเอียดอ่อน ใช้เวลานาน และกระบวนการมีราคาแพง ซึ่งมีวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดที่มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน และการเลือกวัสดุในขั้นสุดท้ายเป็นการนำมาซึ่งทั้งข้อดีและข้อเสีย

การเลือกวัสดุมีหลายปัจจัยหรือข้อจำกัดในการพิจารณาเลือกวัสดุ ซึ่งมีบางสถานการณ์ที่มีเกณฑ์บางอย่างในการเลือกใช้วัสดุแล้วนำไปสู่จุดเริ่มต้นของการออกแบบโครงการ ถึงแม้ว่าในบางสถานการณ์ เกณฑ์ในการเลือกจะมีอิทธิพลมากกว่ากระบวนการเลือกวัสดุ แต่ข้อมูลส่วนใหญ่สำหรับการเลือกวัสดุหนึ่งชนิดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย โดยปัจจัยด้านต่างๆ ที่มีผลต่อการเลือกใช้วัสดุจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยๆ ดังข้อมูลในตารางที่ 2.1 โดยแหล่งข้อมูลส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่ด้านเทคนิค ซึ่งมีอิทธิพลมากกว่าแหล่งข้อมูลในด้านวิศวกรรม [51]

ตารางที่ 2.1 แสดงบทวิจารณ์จากแหล่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งกำหนดข้อมูลด้านวัสดุที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการเลือกใช้วัสดุ [51]

Materials (1967)	Patton (1968)	Esin (1980)	Ashby (1992)	Lindbeck (1995)	Budinski (1996)	Mangonon (1999)	Ashby & Johnson (2002)	Ashby (2005)
<ul style="list-style-type: none"> - Mechanical properties - Cost 	<ul style="list-style-type: none"> - Service requirements - Fabrication requirements - Economic requirements 	<ul style="list-style-type: none"> - Production requirements - Economic requirements - Maintenance requirements 	<ul style="list-style-type: none"> - General properties - Mechanical properties - Thermal properties - Wear - Corrosion/oxidation 	<ul style="list-style-type: none"> - Mechanical properties - Physical properties - Chemical properties - Electrical properties - Acoustical properties - Optical properties 	<ul style="list-style-type: none"> - Chemical properties - Physical properties - Mechanical properties - Dimensional properties - Business issues 	<ul style="list-style-type: none"> - Physical factors - Mechanical factors - Processing and fabricability - Life of component factors - Cost and availability - Codes, statutory and other - Property profile - Processing profile - Environmental profile 	<ul style="list-style-type: none"> - General attributes - Technical attributes - Eco-attributes - Aesthetic attributes 	<ul style="list-style-type: none"> - General properties - Mechanical properties - Thermal properties - Electrical properties - Optical properties - Eco-properties - Environmental resistance

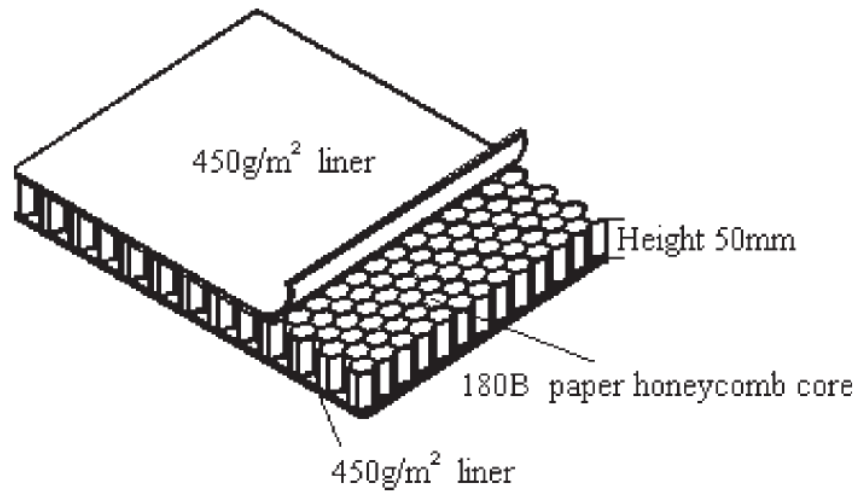
จากงานวิจัยของ Haruo Sasaki และคณะ [52] ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุสำหรับ Air Cushioning ที่เป็นแนวคิดซึ่งยังไม่เคยมีมาก่อน โดยวัสดุสำหรับ Air Cushioning ที่ไม่เคยมีมาก่อนหรือที่เรียกย่อๆ ว่า “NACM” ซึ่งรูปร่างชิ้นงาน NACM ดังแสดงดังรูปที่ 2.31 เมื่อทำการทดสอบการตกหล่นกระแทกซ้ำๆ (Repeated drop test) พบว่า ค่าความเร่งในการตกหล่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างการตกหล่นครั้งแรกกับครั้งที่สามสิบ แสดงว่า NACM มีสมบัติการดูดซับแรงกระแทกค่อนข้างเสถียร



รูปที่ 2.31 แสดงรูปร่างลักษณะของชิ้นงาน NACM [52]

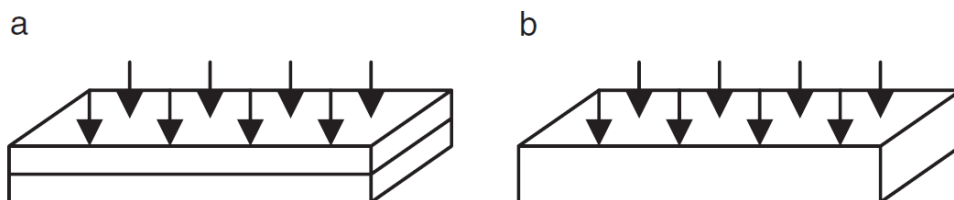
ถัดมาเป็นการทดสอบการกดอัดแบบไดนามิก (Dynamic compression test) พบว่า โดยทั่วไป NACM จะแสดงสมบัติการกันกระแทกที่ดีเยี่ยมที่ความสูงในการตกหล่น เท่ากับ 60 เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตามค่าความเร่งของ NACM ที่มีความหนาเริ่มต้น 40 มิลลิเมตร มีค่าประมาณ 400 m/s^2 ซึ่งไม่เพียงพอต่อการดูดซับแรงกระแทก (Shock absorption) สุดท้ายเป็นการทดสอบการกดอัดแบบสถิต (Static compression test) พบว่า ค่าเฉลี่ย compressive strength ของตัวอย่าง NACM ที่มีความหนา 40 และ 70 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า 48 กิโลนิวตัน สำหรับตัวอย่าง NACM ที่มีความหนา 100 มิลลิเมตร การทดสอบในครั้งที่ 3 ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการแตก แต่ค่า compressive strength ของความหนา 100 มิลลิเมตร จะมีค่าอยู่ในช่วง 45 ถึง 46 กิโลนิวตัน อาจสรุปได้ว่าความหนาเริ่มต้นของ NACM มีค่าอยู่ในช่วง 40 ถึง 100 มิลลิเมตร [52]

จากงานวิจัยของ Dong-Mei Wang และคณะ [53] ได้ทำการทดลองศึกษาสมบัติการกันกระแทกของ Honeycomb Paperboard โดยเริ่มจากสมบัติการกันกระแทกของ paper honeycomb ที่ขึ้นอยู่กับการมีและไม่มี liner ซึ่งรูปที่ 2.32 จะแสดงถึงภาพร่างโครงสร้างของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง พบว่า กราฟ Stress-Strain ของ paper honeycomb core ทั้งที่มีและไม่มี liner มีลักษณะกราฟเหมือนกัน แต่ค่า Strength ของ paper honeycomb core ที่มี liner จะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มี liner แสดงว่า liner มีบทบาทสำคัญต่อการพังทลายของ paper honeycomb



รูปที่ 2.32 แสดงภาพร่างโครงสร้างของ Honeycomb Paperboard [53]

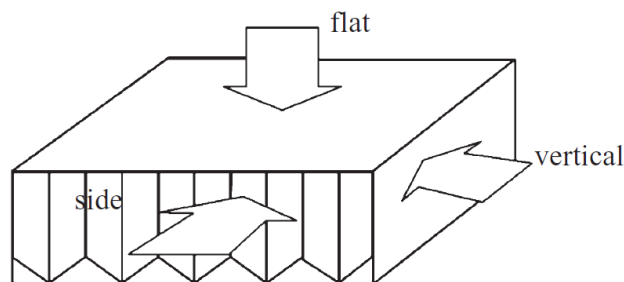
ถัดมาเป็นสมบัตการกันกระแทกของปัจจัยด้าน relative density ของ paper honeycomb core พบว่า เมื่อค่า relative density มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า compressive strength เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อต้องการออกแบบโครงสร้างของ honeycomb paperboard ให้มีความเหมาะสม ต้องเพิ่มค่า relative density ของ paper honeycomb core แต่จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายด้วย สมบัตการกันกระแทกที่ขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นระหว่าง monolayer และ multilayer ดังแสดงในรูปที่ 2.33 พบว่า ค่า Strength ของ multilayer 10 + 10 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า monolayer 20 มิลลิเมตร แต่อย่างไรก็ตาม ค่า Strength ของ multilayer 20 + 10 มิลลิเมตร กลับมีค่าน้อยกว่า monolayer 30 มิลลิเมตร แสดงว่าสมบัตการกันกระแทกและสมบัตการดูดซับพลังงานของ multilayer ไม่ได้ดีกว่า monolayer เสมอไป ที่ความหนาทั้งหมดเท่ากัน



รูปที่ 2.33 แสดง Load และ Stack Configuration ของ Honeycomb Paperboard : (a) multilayer และ (b) monolayer [53]

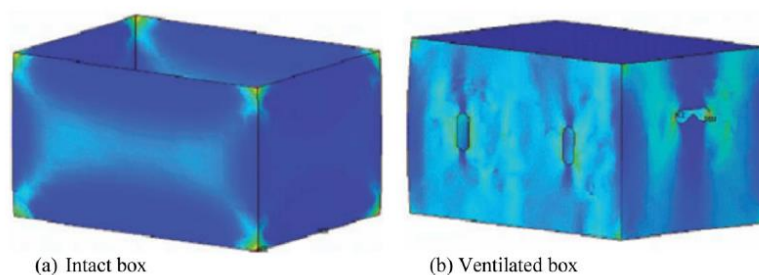
สมบัตการกันกระแทกของ honeycomb paperboard ที่ขึ้นอยู่กับความสูง พบว่า สัดส่วนความสูงของ honeycomb paperboard ต่อความยาวของ honeycomb cell-wall เมื่อมีค่าน้อย

กว่า 4 จะมีสมบัติการกันกระแทกที่ดีที่สุดท้ายเป็นสมบัติการกันกระแทกของ honeycomb paperboard ที่ขึ้นอยู่กับทิศทางที่ได้รับแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.34 พบว่า เมื่อแรงเข้ากระทำกับด้านราบ (Flat) honeycomb paperboard จะสามารถรับแรงได้มากที่สุด ส่วนด้านตั้งฉาก (Vertical) และด้านข้าง (Side) จะสามารถรับแรงได้ใกล้เคียงกัน [53]



รูปที่ 2.34 แสดงทิศทางที่แรงกระทำกับ Honeycomb Paperboard [53]

จากบทวิจารณ์ของ Pankaj B. Pathare และคณะ [54] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยในเรื่อง การออกแบบโครงสร้างของ Corrugated Boxes สำหรับผลิตภัณฑ์พืชสวน ในหัวข้อการใช้ Finite Element Modeling สำหรับการทำนายค่า Strength ของ Corrugated Boxes พบว่า ในรูปที่ 2.35 แสดงผลการวิเคราะห์ FEA simulation ในเทอมของ Top-to-bottom box compression strength (BCT), damaged area และ failure mode โดยค่า Stress สูงสุด จะเกิดที่มุมและเส้นทแยงมุมที่เชื่อมต่อกับมุมของ Intact Box อีกทั้งยังทดสอบ Stress concentration ของ Ventilated Box



รูปที่ 2.35 แสดง Stress distribution ของ (a) Intact และ (b) Ventilated corrugated Box [54]

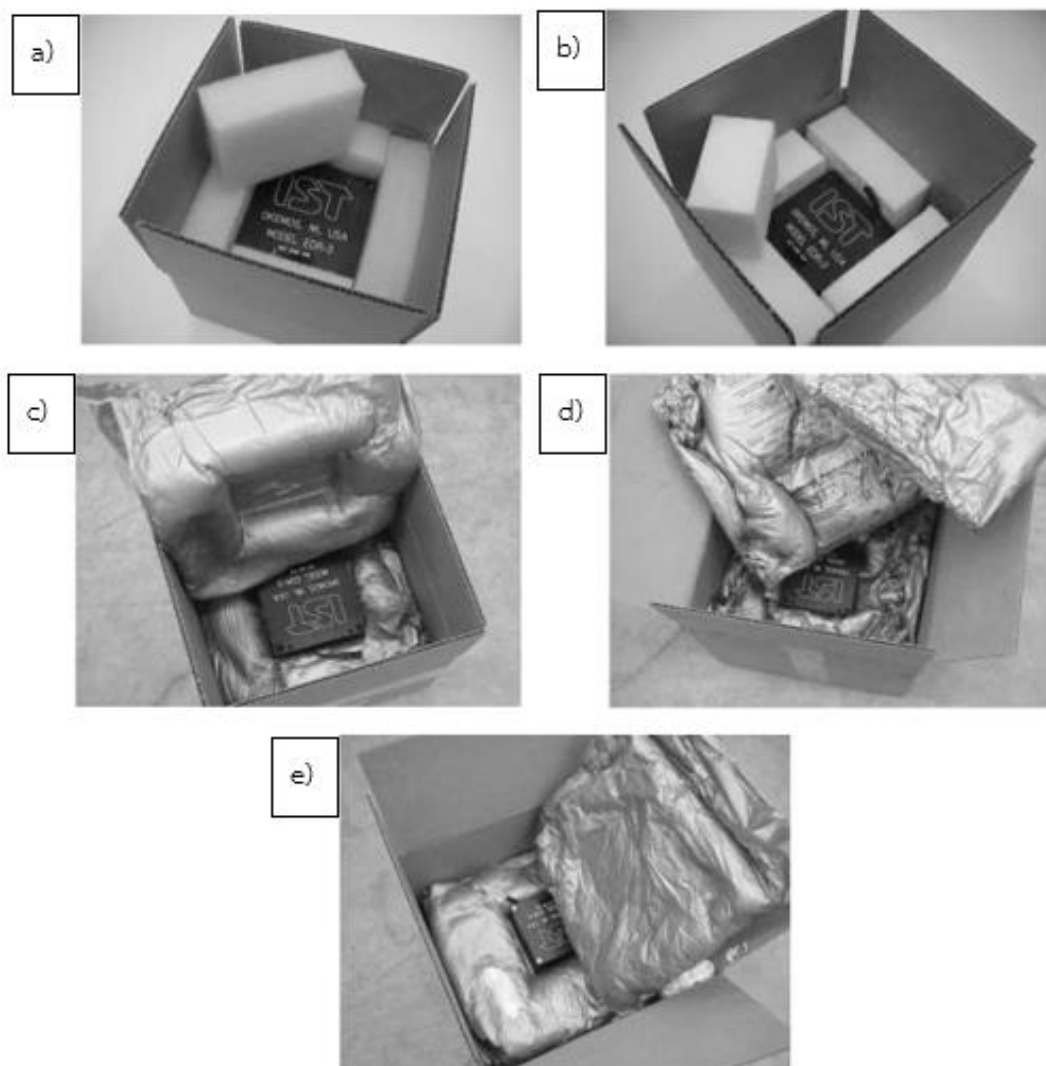
โดย FEA เป็น Computer simulation technique ที่ใช้อย่างมากโดยวิศวกร นักวิทยาศาสตร์ และนักคณิตศาสตร์ หลักการพื้นฐานของ FEA คือ FEA สามารถแยกโมเดล

โครงสร้างที่มีความซับซ้อนให้เป็นส่วนประกอบเล็กๆ ที่เรียกว่า “Element” โดยใช้ Sub-dividing system นอกจากนี้ FEA สามารถใช้วิเคราะห์สมบัติเชิงกลได้อีกด้วย ซึ่งในทางการค้า FEA software มีหลายโปรแกรม อาทิเช่น ABAQUS, MSC และ ANSYS เป็นต้น [54]

จากงานวิจัยของ Paul Singh และคณะ [55] ได้ศึกษาการวัดและการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมการจัดส่งพัสดุภัณฑ์แบบ Second-day Air Small และ Light-weight ของบริษัท Federal Express โดยทำการศึกษาบรรจุภัณฑ์ 5 ขนาด ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 0.18 x 0.19 x 0.13 เมตร ถึง 0.36 x 0.37 x 0.31 เมตร และมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 1.9 – 2.5 กิโลกรัม มีการติดและไม่ติดป้ายเตือนที่เขียนว่า “Fragile-Handle With Care” โดย Package 1 และ 2 ใช้ polystyrene foam เป็นวัสดุกันกระแทก ส่วน Package 3, 4 และ 5 ใช้ polyurethane foam เป็นวัสดุกันกระแทก

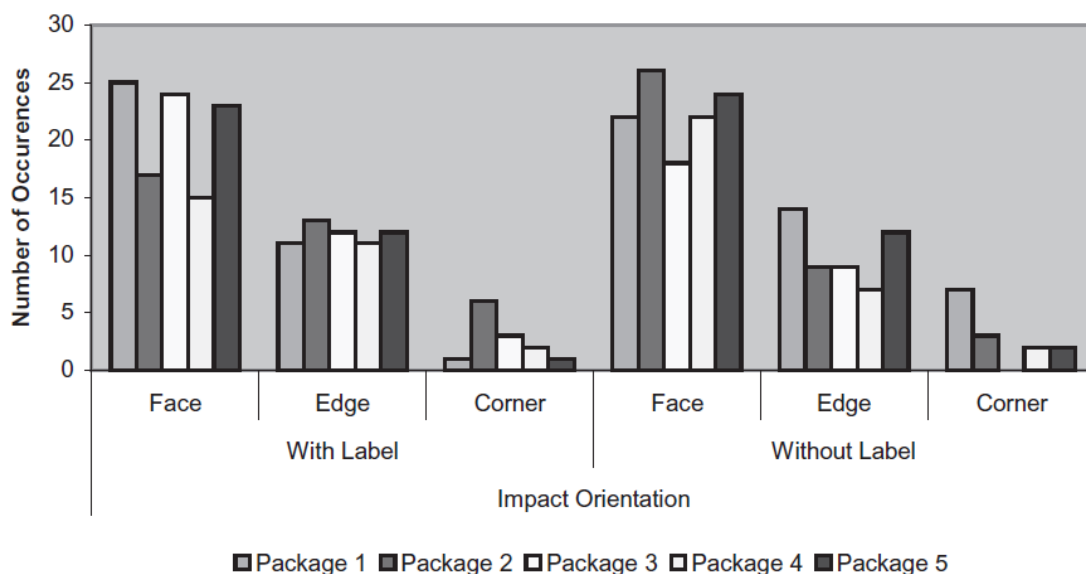
บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดและน้ำหนักดังนี้

- Package 1: ขนาด 0.18 x 0.19 x 0.13 เมตร (7.25 x 7.44 x 5.13 นิ้ว), น้ำหนัก 0.86 กิโลกรัม (1.9 ปอนด์)
- Package 2: ขนาด 0.21 x 0.21 x 0.16 เมตร (8.25 x 8.44 x 6.13 นิ้ว), น้ำหนัก 1.011 กิโลกรัม (2.2 ปอนด์)
- Package 3: ขนาด 0.26 x 0.27 x 0.21 เมตร (10.25 x 10.44 x 8.13 นิ้ว), น้ำหนัก 1.68 กิโลกรัม (3.7 ปอนด์)
- Package 4: ขนาด 0.31 x 0.32 x 0.26 เมตร (12.25 x 12.44 x 10.13 นิ้ว), น้ำหนัก 2.17 กิโลกรัม (4.8 ปอนด์)
- Package 5: ขนาด 0.36 x 0.37 x 0.31 เมตร (14.25 x 14.44 x 12.13 นิ้ว), น้ำหนัก 2.49 กิโลกรัม (5.5 ปอนด์)



รูปที่ 2.36 แสดงภาพบรรจุภัณฑ์ที่ศึกษาในงานวิจัยของ Paul Singh และคณะ ; a) Package 1, b) Package 2, c) Package 3, d) Package 4 และ e) Package 5 [55]

โดยจากการทดสอบ พบว่า ค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งในการกระแทกเทียบกับทิศทางในการกระแทกของบรรจุภัณฑ์ทั้ง 5 ขนาด ที่มีการติดและไม่ติดป้ายเตือน จะมีการกระแทกบริเวณด้านหน้าบรรจุภัณฑ์ประมาณ 15 – 25 ครั้ง มีการกระแทกบริเวณขอบของบรรจุภัณฑ์ประมาณ 10 ครั้ง และมีการกระแทกบริเวณมุมที่จำนวนครั้งสูงสุด 5 ครั้ง ซึ่งสามารถดูข้อมูลได้ในรูปที่ 2.37 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนครั้งในการกระแทกกับทิศทางในการกระแทกของบรรจุภัณฑ์ทั้ง 5 ขนาด [55]



รูปที่ 2.37 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนครั้งในการกระทบกับทิศทางในการกระทบ [55]

จากบทวิจารณ์ของ Jian-Yuan Lee และคณะ [56] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยเรื่อง ข้อมูลพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานการพิมพ์ 3 มิติ ของวัสดุสมัยใหม่ โดยในหัวข้อการอัดรีดวัสดุ (Material extrusion) นั้น เป็นที่ทราบกันดีว่าการอัดรีดวัสดุเป็นเทคนิคหนึ่งของกระบวนการ Additive manufacturing ซึ่งเป็นกระบวนการผลักวัสดุออกผ่านทางหัวตาย (Nozzle) ด้วยความดันคงที่ ซึ่งวัสดุอัดรีดจะถูกฉีดลงไปในแผ่นรอง (Substrate) ด้วยความเร็วคงที่และจะเกิดการแข็งตัวหลังจากออกจากหัวตาย สำหรับวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการนี้ ประกอบด้วย acrylonitrile butadiene styrene (ABS), acrylonitrile styrene acrylate (ASA), nylon 12, polycarbonate (PC), polyphenylsulfone (PPSF/PPSU), polyetherimide (PEI or ULTEM), polylactic acid (PLA) และ thermoplastic polyurethane (TPU) เป็นต้น โดยในตารางที่ 2.2 จะแสดงสมบัติของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการการพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด (FDM) อีกทั้งยังแสดงการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ [56]

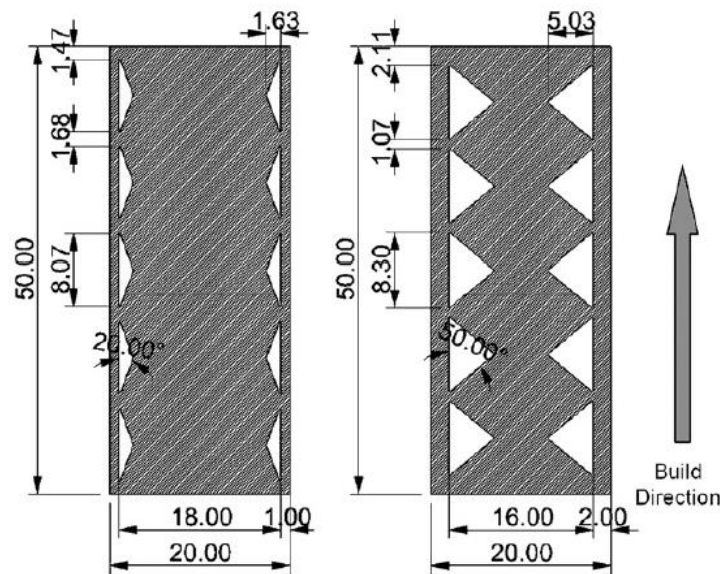
ตารางที่ 2.2 แสดงสมบัติและการประยุกต์ใช้งานของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด [56]

Material	Properties	Applications/industries
ABS ASA	Tough and strong Mechanical Strength and UV stability	Automotive, aerospace, medical-device Functional prototyping from brackets and electrical housings to automotive prototypes and practical production parts for outdoor use under the sun
Nylon 12	Good chemical resistance, high fatigue resistance and high impact strength	Ideal material for applications that demand impact-protective components and high fatigue endurance, including antenna covers, custom production tooling, friction-fit inserts and snap fits in automotive and aerospace industries
PC	High tensile and flexural strength	Functional prototypes, tooling and fixtures, blow-molding master in automotive and aerospace industries
PPSF/PPSU	Excellent chemical and heat resistance and mechanical strength	PPSF/PPSU can withstand various sterilization methods including ethylene oxide, autoclaving, and radiation. Sterilizable medical devices, automotive prototypes, and tooling for demanding applications in a variety of industries
PEI or ULTEM	Biocompatible, excellent mechanical, chemical and thermal stability	Due to its high strength-to-weight ratio and existing certification, ULTEM is ideal for rapid prototyping and advanced tooling applications in aerospace, automotive, medical and food-production industries
PLA	Good tensile strength and surface quality	Ideal for model and prototypes that require aesthetic detail and environmentally-friendly for both home and office
TPU	Excellent tear and wear resistance, high impact strength and hardness	Exceptional flexibility (i.e. elongation at break) and corrosion resistance to many common industrial chemicals and oils. Highly versatile material with the both rubber and plastics properties for a variety of industrial application

จากงานวิจัยของ Luigi Maria Galantucci และคณะ [57] ได้ศึกษาสมบัติการกัดกัดของชิ้นส่วนโครงสร้าง topology ที่เหมาะสมด้วยการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ FDM ซึ่งจะศึกษาระดับของปัจจัยที่สำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ angle, raster width และ shell width โดยจะแสดงระดับของปัจจัยอย่างละเอียดดังตารางที่ 2.3 และในรูปที่ 2.38 จะแสดงขนาดและโครงสร้าง topology ที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.3 แสดงระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษา [57]

Factors	Levels	
Angle	High	50°
	Low	20°
Raster Width	High	0.98 mm
	Low	0.41 mm
Shell width	High	2 mm
	Low	1 mm



รูปที่ 2.38 แสดงขนาดและโครงสร้างชิ้นงานที่เหมาะสม [57]

พบว่า กรณีของปริมาณวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปของชิ้นงานที่มี internal angle เท่ากับ 50° และมี shell width เท่ากับ 1 มิลลิเมตร สามารถลดปริมาณวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปลงถึง 35% เมื่อเทียบกับการขึ้นรูปเต็มชิ้นงาน ถัดมาเป็นกรณีการทดสอบการกดอัด พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อค่า stress ที่สามารถรับได้สูงสุด คือ internal angle ในขณะที่ shell width จะส่งผลเพียงเล็กน้อย และปัจจัยของ raster width ไม่ส่งผลต่อค่า stress ที่สามารถรับได้สูงสุดเลย ซึ่งชิ้นงานที่มี internal angle เท่ากับ 50° และมี shell width เท่ากับ 1 มิลลิเมตร จะมีค่า stress น้อยที่สุด เท่ากับ 20 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าลดลงถึง 63% เมื่อเทียบกับการขึ้นรูปเต็มชิ้นงาน ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากรอยบากสุดท้ายเป็นกรณีของเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป พบว่า การขึ้นรูปของชิ้นงานที่มี internal angle เท่ากับ 50° และมี shell width เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ใช้เวลาน้อยที่สุด เพียง 1.5 ชั่วโมง [57]

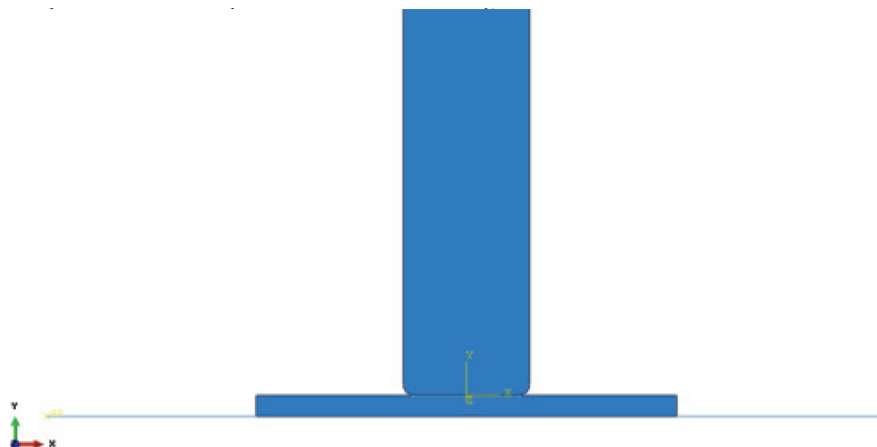
จากงานวิจัยของ Gui Kun และ Wang Xi [58] ได้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์บรรจุภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน โดยบรรจุภัณฑ์ที่ออกแบบเป็นบรรจุภัณฑ์ป้องกันการแตกหักของโทรทัศน์ LCD ซึ่งใช้โปรแกรม Finite element software ABAQUS ในการวิเคราะห์ค่า Stress เพื่อใช้เลือกวัสดุกันกระแทกที่มีความเหมาะสม ในระหว่างการขนส่งโทรทัศน์ LCD จะเกิดการกระแทกทั้งในแนวตั้งและแนวนอน งานวิจัยนี้ได้สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับมาตรฐานทางทหารของสหรัฐอเมริกา คู่มือการป้องกันที่ครอบคลุมของสหราชอาณาจักรและมาตรฐานของหน่วยงานป้องกันประเทศญี่ปุ่น ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์ที่ครอบคลุม พบว่า การคำนวณขั้นสุดท้ายของความเปราะบางของโทรทัศน์ LCD คือ G เท่ากับ 70 หลังจากการตรวจสอบ พบว่า น้ำหนักเฉลี่ย

ของโทรทัศน์ขนาด 42 นิ้ว จะมีค่าประมาณ 15 กิโลกรัม โดยคำนึงถึงคุณภาพของอุปกรณ์ที่จัดจำหน่ายและความปลอดภัยโดยรวม ซึ่งน้ำหนักโดยเฉลี่ยของโทรทัศน์ LCD คือ 20 กิโลกรัม โดยความเปราะบางของโทรทัศน์ LCD มีค่า G เท่ากับ 70 และความสูงในการตกลงกระแทกเท่ากับ 250 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวด้านล่างของโทรทัศน์มีค่าประมาณ 0.6 ตารางเมตร ดังนั้น ค่า Stress สูงสุด เท่ากับ

$$\sigma_m = \frac{GW}{A} = \frac{70 \times 20 \times 9.8}{0.6} = 225(\text{MPa})$$

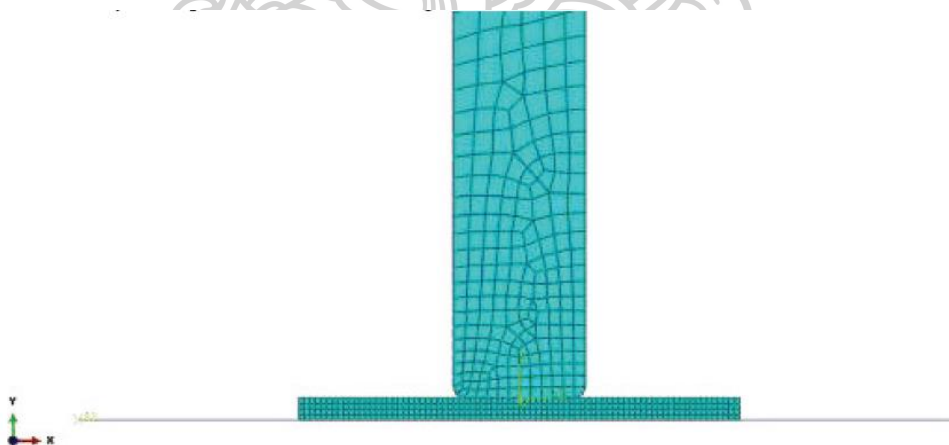
เมื่อ	σ_m	คือ ค่า Stress สูงสุดที่ได้จากการคำนวณ
	G	คือ ค่าความเปราะบางของโทรทัศน์
	W	คือ น้ำหนักของโทรทัศน์โดยแรงโน้มถ่วงโลก
	A	คือ พื้นที่ผิวที่น้อยที่สุดที่รับแรงกระแทก

ส่วนใหญ่พื้นผิวด้านล่างของโทรทัศน์ LCD จะสัมผัสกับพื้นดิน ดังนั้นแรงกระแทกของแผ่นรองโทรทัศน์ LCD เมื่อตกลงกระแทกพื้นจึงถือว่าเป็นเรื่องใหญ่ในการพิจารณา ซึ่งพื้นดินถือว่าเป็นของแข็งที่อืดและโทรทัศน์ LCD ถือว่าเป็นตัวยืดหยุ่น หลังจากการตรวจสอบข้อมูลที่เกี่ยวข้อง พบว่าค่า Young's modulus ของโพลีเอทิลีนมีค่า เท่ากับ 3,000 เมกะปาสคาล อัตราส่วน Poisson ของโพลีเอทิลีนมีค่า เท่ากับ 0.3 โดยเราจะเลือกส่วนของทิวและแผ่นกันกระแทก เพื่อใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะเพิ่มความกว้างของแผ่นกันกระแทกเพื่อลดข้อผิดพลาดในการคำนวณและใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อสร้างแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.39



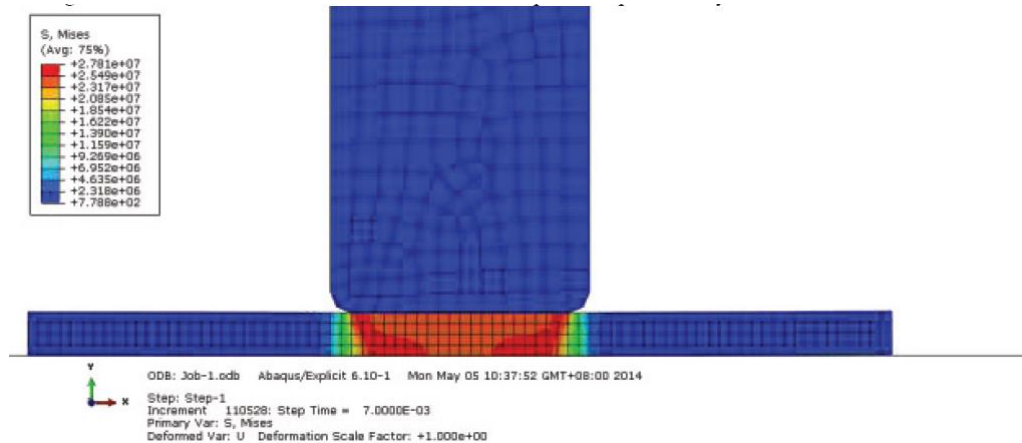
รูปที่ 2.39 แสดงแบบจำลองของโทรทัศน์ LCD กระแทกบนพื้น [58]

ความต้องการด้านความปลอดภัยของบรรจุภัณฑ์ เราเลือกที่จะทำการวิเคราะห์แบบไดนามิกของแผ่นรองกันกระแทก โดย Grid unit ที่ใช้เป็นองค์ประกอบระนาบ CPE4R ซึ่งเป็นฟังก์ชันของนาฬิกาทรายที่ทำงานเพื่อลด Integration unit การวิเคราะห์แบบไดนามิก พบว่า ความเร็วในการคำนวณและความถูกต้องสามารถปรับปรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Grid unit ถูกแสดงในรูปที่ 2.40



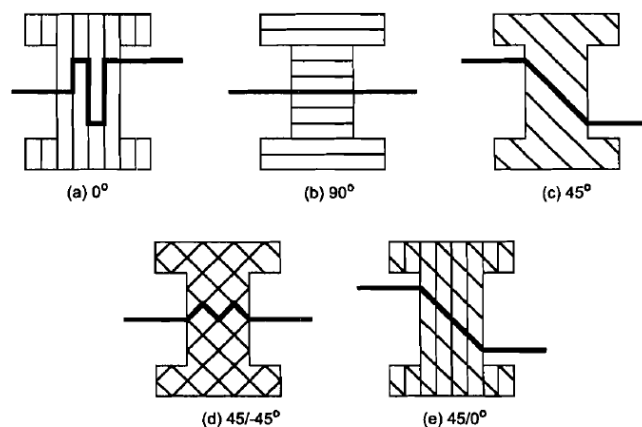
รูปที่ 2.40 แสดงแบบจำลองของโทรทัศน์ LCD แบบตาข่าย (Meshing) [58]

การวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ABAQUS พบว่า แผนภาพ Mises stress ในขณะ that โทรทัศน์กระแทกพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 2.41 โดยสามารถคำนวณค่า Stress สูงสุด ได้ค่าเท่ากับ 27 MPa ซึ่งค่า Stress สูงสุดที่วิเคราะห์จากโปรแกรมมีค่าน้อยกว่าค่า Stress ที่โทรทัศน์ได้รับจริง 225 MPa ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ป้องกันการแตกหักนี้จึงมีความปลอดภัยสูง [58]



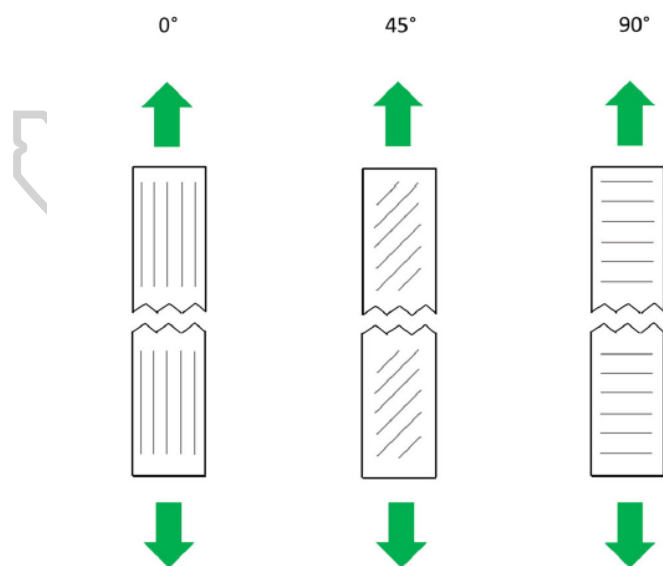
รูปที่ 2.41 แสดงแผนภาพ Mises stress ในขณะที่ยัดชิ้นกระแทกพื้นดิน [58]

จากงานวิจัยของ Omar S. Es-Said และคณะ [59] ได้ศึกษาผลของ Layer orientation ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานต้นแบบ (Rapid prototyped samples) ซึ่ง Layer orientation ดังแสดงในรูปที่ 2.42 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการดึงยึด พบว่า 0° layer orientation จะมีค่า Ultimate strength และ Yield (0.2% offset) strength มากที่สุด รองลงมาคือ $45^\circ/-45^\circ$ layer orientation โดยที่ 90° layer orientation จะมีค่า Ultimate strength และ Yield (0.2% offset) strength น้อยที่สุด ส่วนการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการตัดโค้ง พบว่ามีผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการดึงยึด เนื่องจากการยึดติดกันระหว่างเส้น filament extruded ไม่แข็งแรงและเกิดช่องว่างระหว่างเส้น filament extruded [59]

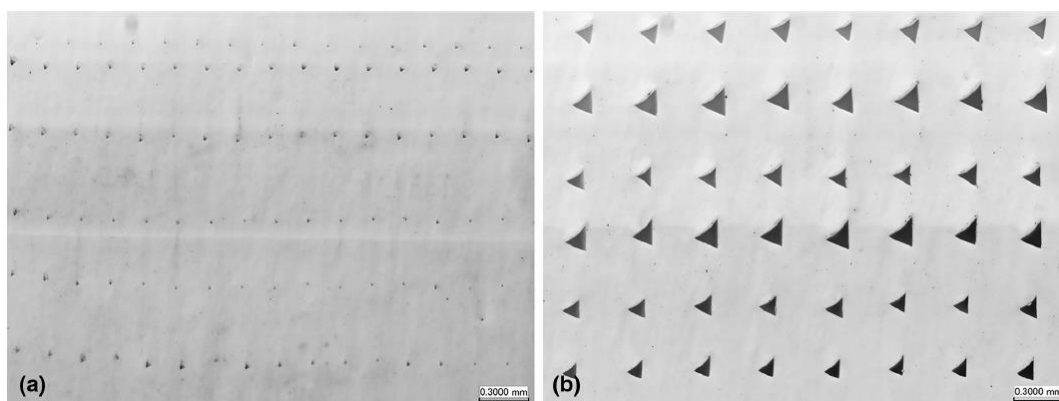


รูปที่ 2.42 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นฟิลาเมนต์ (Layer orientation) ที่ผ่านหัวด้าย (Nozzle) [59]

จากงานวิจัยของ Behzad Rankouhi และคณะ [60] ได้ศึกษาความล้าและสมบัติเชิงกลของ ชิ้นงาน ABS ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ 2 ค่า ได้แก่ Layer thickness และ Raster orientation ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะใช้ Layer thickness เท่ากับ 0.2 และ 0.4 มิลลิเมตร แล้วขึ้นรูปโดยใช้ Raster orientation ต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0° , 45° และ 90° พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ 0° raster orientation มีค่า Ultimate strength และ Elastic modulus มากที่สุด ขณะที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ 90° raster orientation มีค่าน้อยที่สุด ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ 45° raster orientation จะมีค่า Ultimate strength และ Elastic modulus อยู่ระหว่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 0° และ 90° raster orientation เนื่องจาก 0° raster orientation จัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับทิศทางการดึงของการทดสอบความต้านทานต่อการดึง ดังแสดงในรูปที่ 2.43 ส่วนผลของ Layer thickness พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ Layer thickness เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร มีค่า Ultimate strength และ Elastic modulus มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ Layer thickness เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ Layer thickness เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร มีพื้นที่ทั้งหมดของช่องว่าง (Air gaps) น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.44 [60]

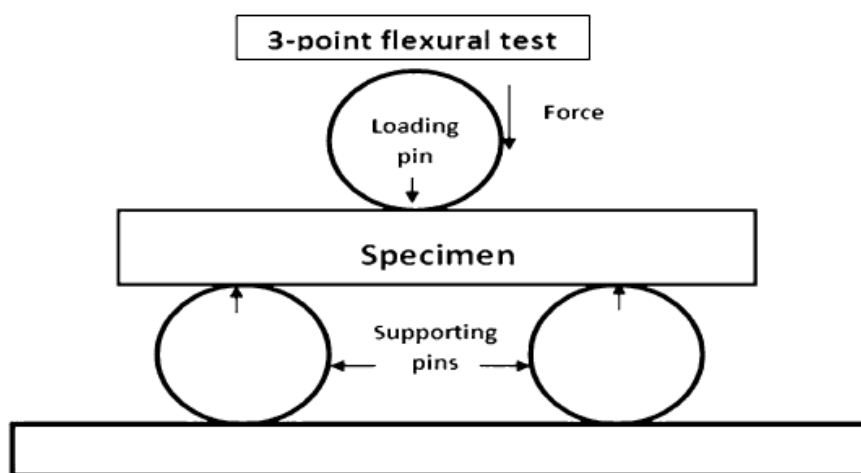


รูปที่ 2.43 แสดงทิศทางของ raster orientation เทียบกับทิศทางการดึงยึด [60]



รูปที่ 2.44 แสดงภาพ Mesostructure ของช่องว่าง (Air-gaps) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย Layer thickness เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร (a) และ 0.4 มิลลิเมตร (b) [60]

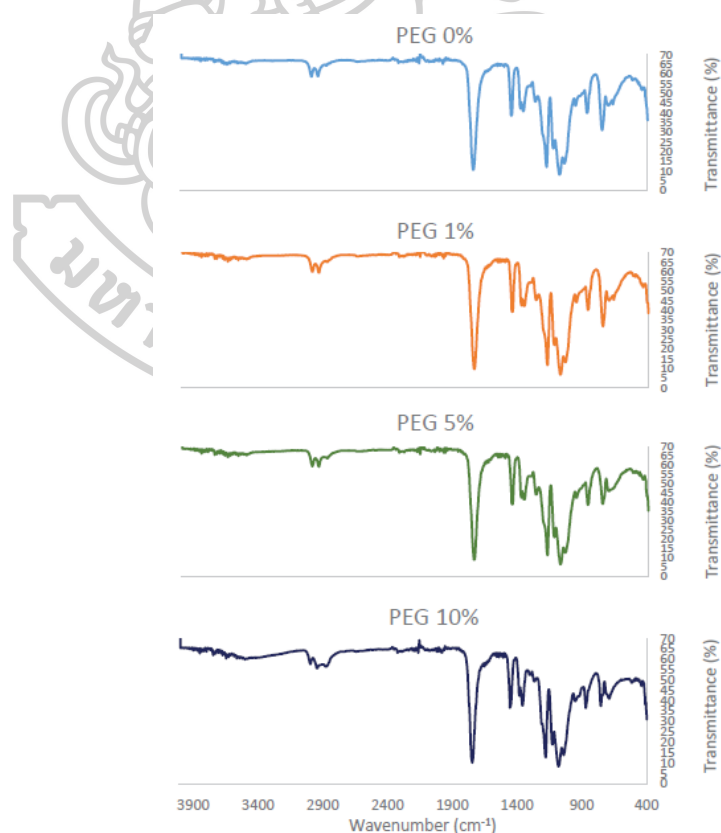
จากงานวิจัยของ Jaya K.G. Christiyan และคณะ [61] ได้ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการตัดโค้งของ PLA ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่แตกต่างกัน จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งจะขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการตัดโค้ง โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตาย 0.4 มิลลิเมตร และใช้ Raster orientation เท่ากับ 0° และ 90° จากนั้นทำการเปลี่ยนค่า Printing speed 2 ค่า ได้แก่ 38 และ 52 มิลลิเมตรต่อวินาที และ Layer thickness 3 ค่า ได้แก่ 0.20, 0.25 และ 0.30 มิลลิเมตร ในการทดลองได้ตั้งอุปกรณ์การทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.45 ซึ่งจะพบว่า ค่า Flexural strength จะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มค่า Layer thickness มากขึ้น อีกทั้งเมื่อเพิ่มค่า Printing speed จะทำให้ค่า Flexural strength ลดลงอีกด้วย



รูปที่ 2.45 แสดงไดอะแกรมของการทดสอบ 3-point bending [61]

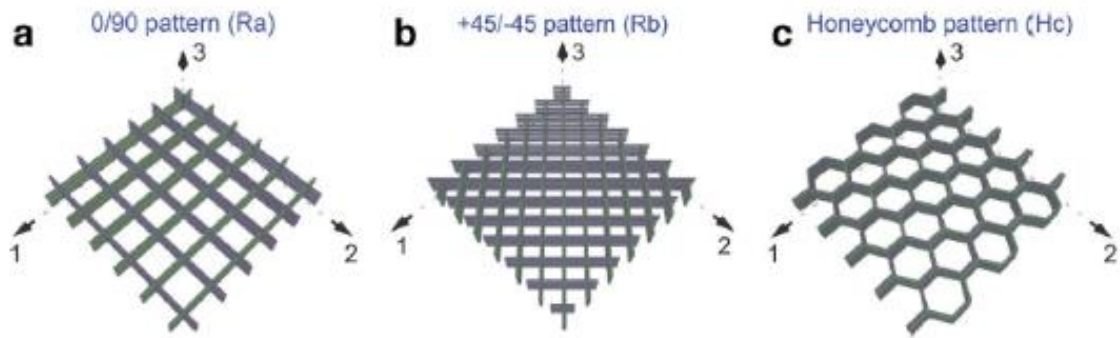
โดย Flexural strength properties จะขึ้นอยู่กับ 2 เหตุผล ได้แก่ 1. การใช้ Printing speed คำน้อย จะทำให้การยึดเหนี่ยว (Bonding) ระหว่างชั้นเส้นฟิลาเมนต์ เกิดการยึดเหนี่ยวกันได้ดี 2. การจัดเรียงตัว (Orientation) ของชั้นเส้นฟิลาเมนต์ตามทิศทางของแกนการทดสอบ [61]

จากงานวิจัยของ Kurniawan Yuniarto และคณะ [62] ได้ศึกษา Infrared และ Raman ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Polylactic acid และ Polyethylene glycol-400 โดยผลจากการทดสอบการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เทคนิค FTIR จะพบพีคเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEG-400 ดังแสดงในรูปที่ 2.46 โดยพีคเอกลักษณ์ของ PLA คือ C=O group และพีคเอกลักษณ์ของ PEG-400 คือ C-O-C bonding ซึ่งหมู่ฟังก์ชันหลักของ PLA จะปรากฏที่ wavenumber $695-760\text{ cm}^{-1}$ และ $1740-1750\text{ cm}^{-1}$ ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันหลักของ PEG จะปรากฏที่ wavenumber 1090 cm^{-1} นอกจากนี้ผลการทดสอบ FTIR ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PEG จะปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่คล้ายกับพีคเอกลักษณ์ของ pure PLA เนื่องจากโครงสร้างตามธรรมชาติของ PLA และ PEG มีความคล้ายกัน ซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจน [62]



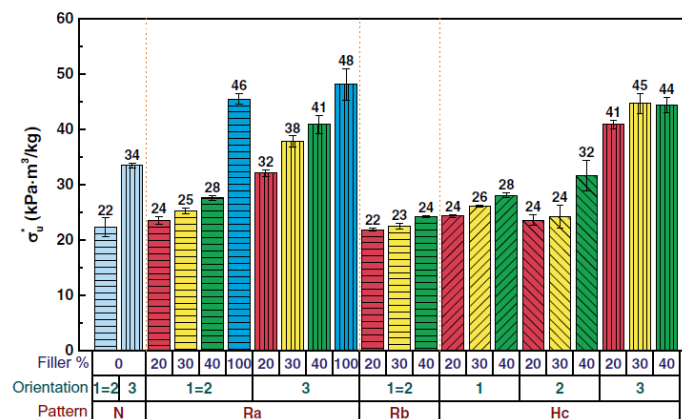
รูปที่ 2.46 แสดง FTIR spectra ของโคพอลิเมอร์ PLA-PEG400 [62]

จากงานวิจัยของ Gustavo Domínguez-Rodríguez และคณะ [63] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ printing orientation, density และ filler pattern ต่อสมบัติต่อแรงกดอัดของชิ้นงาน ABS ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Filler pattern 3 รูปแบบ ได้แก่ 0/90, +45/-45 และ Honeycomb ดังแสดงในรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 แสดงแผนผังของ filling pattern และ material coordinate a) 0/90 (Ra), b) +45/-45 (Rb) และ c) Honeycomb (Hc) [63]

จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงกดอัด ตามมาตรฐาน ASTM D695 โดยใช้ Filling pattern ทั้ง 3 รูปแบบ ตามรูปที่ 2.48 ซึ่งในการทดสอบความต้านทานต่อแรงกดอัด จะได้ค่าตามแสดงในรูปที่ 2.48 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า Filler percent จะทำให้ค่า Specific compressive strength มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเนื้อพอลิเมอร์ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถรับแรงกดอัดได้มากขึ้น นอกจากนี้ทิศทางของการขึ้นรูปชิ้นงานก็ส่งผลต่อค่า Specific compressive strength ด้วย [63]



รูปที่ 2.48 แสดงการเปรียบเทียบค่า specific compressive strength (σ_u^*) ของชิ้นงาน ABS ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ [63]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เส้นฟิลาเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

3.1.1 กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics

- พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท TORWELL Technologies Co., Limited ประเทศจีน มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีขาว โดยใช้ อุณหภูมิในการพิมพ์ 210-250 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-50 มิลลิเมตรต่อวินาที

- พอลิเอไมด์ (PA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท Shenzhen ESUN Industrial Co., Limited ประเทศจีน มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีใส โดยใช้อุณหภูมิในการพิมพ์ 240-260 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-50 มิลลิเมตรต่อวินาที

- พอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท Polymaker Co., Limited ประเทศสหรัฐอเมริกา มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีขาว โดยใช้อุณหภูมิในการพิมพ์ 240-260 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-50 มิลลิเมตรต่อวินาที

- พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท TORWELL Technologies Co., Limited ประเทศจีน มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีขาว โดยใช้ อุณหภูมิในการพิมพ์ 220-260 องศาเซลเซียส ความเร็วในการพิมพ์ 30-45 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.1.2 กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites

- พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สั่งซื้อมาจาก บริษัท ISARA Dimension ประเทศไทย มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีดำ โดยใช้อุณหภูมิในการพิมพ์ 200-220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-50 มิลลิเมตรต่อวินาที

- พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท TORWELL Technologies Co., Limited ประเทศจีน มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีขาว โดยใช้อุณหภูมิในการพิมพ์ 190-220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-50 มิลลิเมตรต่อวินาที

- พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สั่งซื้อมาจาก บริษัท ISARA Dimension ประเทศไทย มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีขาว โดยใช้อุณหภูมิในการพิมพ์ 200-220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-50 มิลลิเมตรต่อวินาที

- พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท Shenzhen ESUN Industrial Co., Limited ประเทศจีน มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีน้ำตาล โดยใช้อุณหภูมิในการพิมพ์ 190-220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-50 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.1.3 กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers

- เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตโดยบริษัท Shenzhen ESUN Industrial Co., Limited ประเทศจีน มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีขาว อุณหภูมิในการพิมพ์ 210-230 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-40 มิลลิเมตรต่อวินาที

- เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) อุณหภูมิในการพิมพ์ 190-210 องศาเซลเซียส ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้สั่งซื้อมาจากบริษัท พลวัต ออโตเมชัน จำกัด ประเทศไทย มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์สีขาว อุณหภูมิในการพิมพ์ 200-220 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 30-40 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

3.2.1 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine) รุ่น BA 250 CDC ผลิตโดยบริษัท Battenfeld ประเทศออสเตรีย

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

3.2.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printer) รุ่น 2.0 Plus Desktop ผลิตโดยบริษัท Colido ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 เครื่อง Fourier transformation infrared spectroscopy รุ่น VERTEX70 ผลิตโดย บริษัท BRUKER ประเทศเยอรมัน

3.3.2 เครื่อง Melt flow indexer รุ่น D7053 ผลิตโดยบริษัท Kayeness inc.

3.3.3 เครื่อง Differential scanning calorimeter รุ่น DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.4 เครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TGA 1 Auto sample Robot ผลิตโดย บริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.5 เครื่อง Scanning electron microscope รุ่น Tabletop Microscope TM3030
ผลิตโดยบริษัท HITACHI ประเทศญี่ปุ่น

3.3.6 เครื่อง Parallel plate rheometer รุ่น ARES-G2 ผลิตโดยบริษัท TA Instruments
ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.7 เครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis รุ่น EPLEXOR 100 N ผลิตโดย
บริษัท GABO Instrument ประเทศเยอรมนี

3.3.8 เครื่อง Universal testing machine รุ่น 5969 ผลิตโดยบริษัท Instron Engineering
Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.9 เครื่อง Impact tester รุ่น B5102.202 ผลิตโดยบริษัท Zwick ประเทศเยอรมนี

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ทำการตัดเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ให้เป็นเม็ดเล็กๆ จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิดัง
แสดงในตารางที่ 3.1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบการดึงยึดและการ
โค้งงอตามมาตรฐาน ASTM D638 และ ASTM D790 ตามลำดับ โดยใช้สภาวะในการฉีดขึ้นรูป
ชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 3.2

3.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing)

ทำการเขียนแบบ 3 มิติ เป็นรูปชิ้นงานทดสอบการดึงยึดและการโค้งงอตามมาตรฐาน ASTM
D638 และ ASTM D790 ตามลำดับ ด้วยโปรแกรมการเขียนแบบด้านวิศวกรรม จากนั้นทำการบันทึก
ไฟล์เป็นนามสกุล sterolithography (.STL) ซึ่งนามสกุลนี้จะทำการแบ่งชิ้นส่วนของชิ้นงานเป็นรูป
สามเหลี่ยม แล้วนำไฟล์ .STL ไปแปลงเป็นไฟล์นามสกุล GCODE ด้วยโปรแกรม Matter Control ซึ่ง
เป็นการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชั้นๆ เพื่อนำไปพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printer)
โดยใช้ข้อมูลภูมิในการขึ้นรูปชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 3.3 และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปแสดงใน
ตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าอุณหภูมิในการอบไล่ความชื้นของเส้นฟิลาเมนต์ 3 กลุ่ม

พอลิเมอร์	อุณหภูมิ (°C)
ABS	80
PA	80
PC	100
PETG	110
CFPLA	60
PLA	60
SPLA	60
WPLA	60
TPE	80
TPU	80

ตารางที่ 3.2 แสดงสถานะในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) ของเส้นฟิลาเมนต์ 3 กลุ่ม

พอลิเมอร์	อุณหภูมิในกระบอกหลอม (°C)			อุณหภูมิหัวฉีด (°C)	แรงดันฉีด (bar)	เวลาในการเย็นตัว (sec)
	Zone 1	Zone 2	Zone 3 (Hopper)	Zone 1 (Nozzle)		
ABS	240	235	200	260	120	30
PA	235	230	225	240	140	20
PC	260	250	240	260	140	30
PETG	250	245	220	260	140	30
CFPLA	198	195	190	200	110	20
PLA	210	200	180	230	140	30
SPLA	189	185	180	190	190	20
WPLA	195	192	190	195	110	20
TPE	178	175	172	180	110	20
TPU	210	200	180	230	95	60

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ของเส้นฟิลาเมนต์ 3 กลุ่ม

พอลิเมอร์	อุณหภูมิหัวพิมพ์ (°C)	อุณหภูมิฐานพิมพ์ (°C)
ABS	240	120
PA	240	120
PC	250	120
PETG	240	120
CFPLA	220	-
PLA	220	-
SPLA	200	-
WPLA	220	-
TPE	210	40
TPU	210	40

ตารางที่ 3.4 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing)

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้งาน
Infill density (%)	100
Infill type	Line
Layer thickness (mm)	0.2
Nozzle diameter (mm)	0.4
Printing speed (mm/s)	30, 40, 50
Raster orientation (°)	±45°

3.4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน หรือที่เรียกว่า FTIR เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นฟิลาเมนต์ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 Engineering plastics กลุ่มที่ 2 PLA and PLA composites และกลุ่มที่ 3 Elastomers โดยการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy ซึ่งนำตัวอย่างของเส้นฟิลาเมนต์มาบดรวมกับ KBr ที่บดไล่ความชื้นแล้วในอัตราส่วนประมาณ 1:9 จากนั้นอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกจนได้แผ่นกลมบางที่แสงสามารถส่องผ่านได้ จากนั้นนำไปทดสอบในช่วงความยาวคลื่น $2200-400\text{ cm}^{-1}$ จำนวนสแกนทั้งหมด 32 ครั้ง



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่อง Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR)

3.4.4 การทดสอบหาค่าดัชนีการไหล (MFI)

การทดสอบหาค่าดัชนีการไหล หรือที่เรียกว่า MFI เป็นการศึกษาความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1238 ซึ่งก่อนการทดสอบจะทำการตัดเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเม็ดพลาสติกมาทดสอบสมบัติการไหล โดยใช้อุณหภูมิและน้ำหนักกดตั้งแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งการทดสอบของแต่ละพอลิเมอร์จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าอุณหภูมิในกระบอกหลอมและน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบหาค่าดัชนีการไหล (MFI)

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในกระบอกหลอม (°C)	น้ำหนักกด (kg)
ABS	220	5
PA	230	2.16
PC	300	1.2
PETG	200	5
CFPLA	190	2.16
PLA	190	2.16
SPLA	190	2.16
WPLA	190	2.16
TPE	210	5
TPU	190	5

3.4.5 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DSC)

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน หรือที่เรียกว่า DSC เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เพื่อดูค่าอุณหภูมิลายแก้ว (T_g) อุณหภูมิในการหลอมผลึก (T_m) และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ โดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน จะนำเม็ดพลาสติกที่ได้จากการตัดจากเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ทั้ง 3 กลุ่ม โดยใช้น้ำหนักของเม็ดพลาสติกประมาณ 8-12 มิลลิกรัม ใส่ลงในเบ้าหลอมอลูมิเนียม (Aluminium crucible) ซึ่งจะทำให้การศึกษาในโหมดให้ความร้อน-ทำให้เย็นตัว-ให้ความร้อน (Heat-Cool-Heat) ในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ไปถึง 260 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัวที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)

3.4.6 การทดสอบการสลายตัวทางความร้อน (TGA)

การทดสอบการสลายตัวทางความร้อน หรือที่เรียกว่า TGA เป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์เพื่อหาค่าอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) และปริมาณการสลายตัว (% Weight loss) โดยการทดสอบการสลายตัวทางความร้อน จะนำเม็ดพลาสติกที่ได้จากการตัดจากเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ของทั้ง 3 กลุ่ม โดยใช้น้ำหนักของเม็ดพลาสติกประมาณ 10 มิลลิกรัม ใส่ลงในถ้วยเซรามิก (Crucible) ซึ่งจะทำการศึกษาในโหมดเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไปถึง 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน และศึกษาในโหมดเปลี่ยนแปลงเวลา ในช่วงเวลา 0 นาที ไปถึง 30 นาที ภายใต้สภาวะบรรยากาศออกซิเจน



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA)

3.4.7 การทดสอบสมบัติเชิงรีอโลยี (Parallel plate rheometer)

การทดสอบสมบัติเชิงรีอโลยี เป็นการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์เมื่อมีแรงเฉือนมากระทำต่อชิ้นงาน ซึ่งทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหล Rotational rheometer รุ่น ARES G2 ผลิตโดยบริษัท TA Instrument แผ่นคู่ขนาน (Parallel plate) ที่ใช้ทำจากเหล็กกล้าปลอดสนิม (Stainless steel) ใช้ระบบ Forced convection oven (FCO) ในการให้ความร้อน ซึ่งสภาวะอุณหภูมิคงที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังในตารางที่ 3.6 โดยปรับเปลี่ยนความถี่เชิงมุม (Angular frequency sweep) จาก 1 ถึง 100 เรเดียน/วินาที ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบได้จากชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile specimen) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด โดยตัดจากบริเวณ Grip ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ให้มีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร ซึ่งในการทดลองจะใช้ระยะของการตัดขอบ (Trim gap) ที่ความสูง 1.05 มิลลิเมตร ซึ่งความสูงดังกล่าวนี้สามารถทำให้ชิ้นงานไหลได้เต็มแผ่นคู่ขนานที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร แล้วจึงทำการทดสอบที่ระยะ Gap ที่ความสูง 1.00 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่อง Parallel plate rheometer

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าอุณหภูมิในการทดสอบสมบัติเชิงรีออลยี (Parallel plate rheometer)

พอลิเมอร์	อุณหภูมิตดสอบ (°C)
ABS	240
PA	240
PC	250
PETG	240
CFPLA	220
PLA	220
SPLA	200
WPLA	220
TPE	210
TPU	210

3.4.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกส์

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกส์ หรือที่เรียกว่า DMTA เป็นการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์เมื่อมีแรงที่มีลักษณะเป็นคาบมากระทำต่อชิ้นงานด้วยความถี่คงที่ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งทดสอบด้วยเครื่องสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกส์ รุ่น EPLEXOR 100 N ผลิตโดยบริษัท GABO Instrument ทดสอบภายใต้สภาวะให้แรงในโหมดดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending mode) โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิตดสอบจาก -50 องศาเซลเซียส ไปถึง 130 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ความถี่ของการทดสอบ 1 เฮิรตซ์ ซึ่งชิ้นงานสำหรับการทดสอบเตรียมได้จากชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural specimen) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด จากนั้นตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ให้มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้าง 1 เซนติเมตร และความยาว 4-4.5 เซนติเมตร



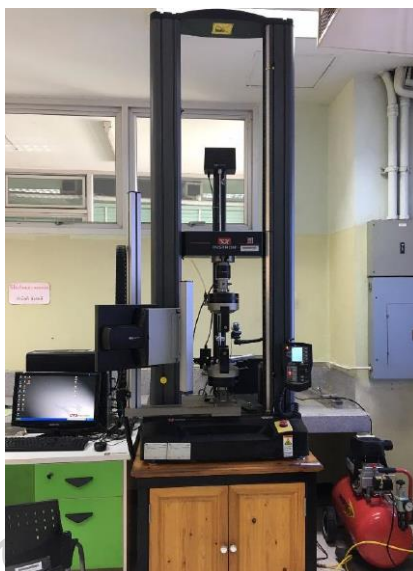
รูปที่ 3.5 แสดงเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)

3.4.9 การทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing)

การทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืดจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดสอบจะทำด้วยอัตราการดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยโหลด 5 กิโลนิวตัน โดยจะทำการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืดเพื่อหาค่า Tensile strength ค่า % Elongation at break และค่า Young's modulus ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะถูกทดสอบชิ้นงานชนิดละ 10 และ 5 ชิ้นงานตามลำดับ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Tensile strength ค่า Young's modulus และค่า % Elongation at break

3.4.10 การทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural testing)

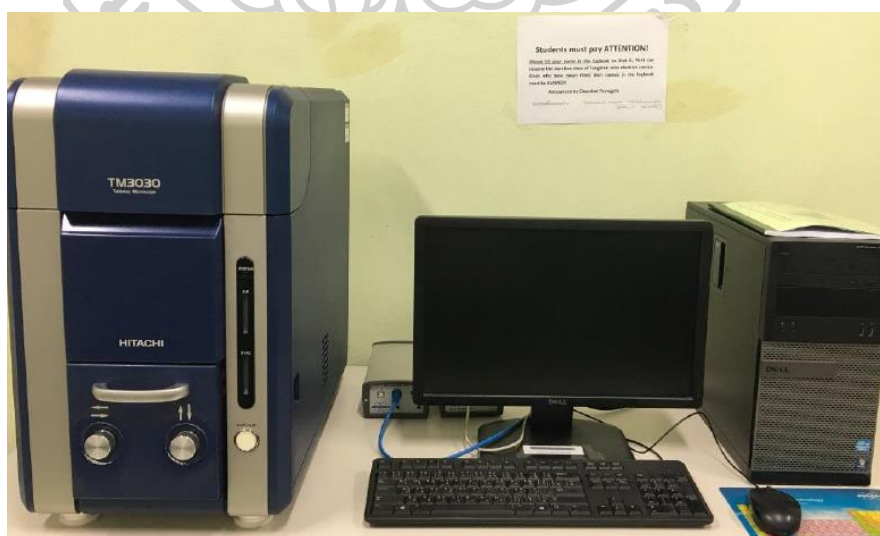
การทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 แบบ Three point bending ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดสอบจะทำด้วยความเร็วของหัวกดชิ้นงานเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ระยะของ Support span เท่ากับ 80 มิลลิเมตร ซึ่งทำการกดจนกระทั่งถึง 5 % Strain ด้วยโหลด 5 กิโลนิวตัน โดยจะทำการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอเพื่อหาค่า Flexural strength ค่า % Elongation at break และค่า Flexural modulus ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะถูกทดสอบชิ้นงานชนิดละ 10 และ 5 ชิ้นงานตามลำดับ เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Flexural strength ค่า Flexural modulus และค่า % Elongation at break



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่อง Universal testing machine

3.4.11 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM)

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา หรือที่เรียกว่า SEM เป็นการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นฟิลาเมนต์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) โดยสามารถเตรียมชิ้นงานได้จากการนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึดมาตัดส่วนที่เกิดการขาดออกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ หลังจากนั้นนำไปเคลือบผิวรอยแตกด้วยทองและแพลตทินัมด้วยเทคนิค Sputtering เพื่อป้องกันการสะสมของประจุขณะทำการทดสอบ SEM



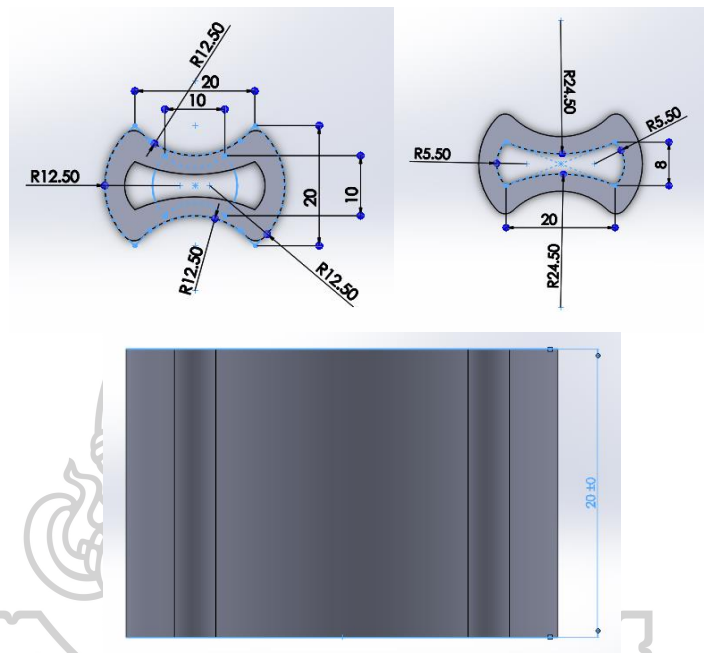
รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

3.4.12 การออกแบบและขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

3.4.12.1 การออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

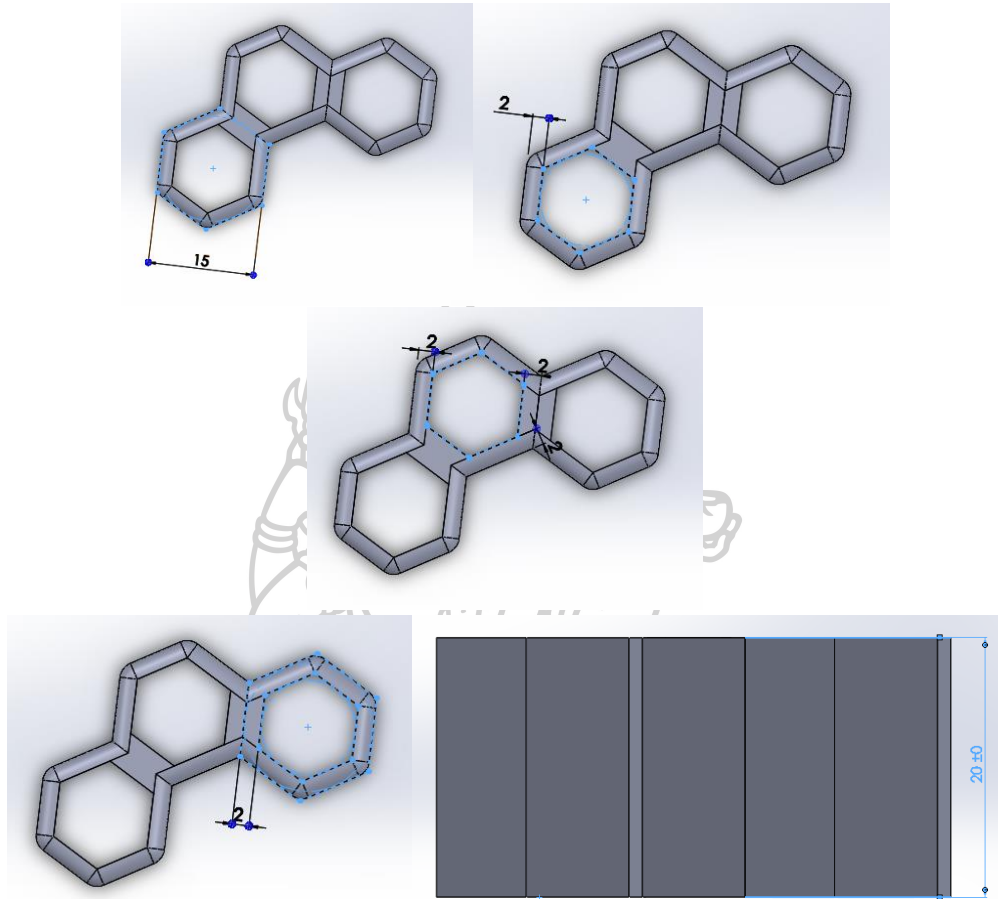
เริ่มต้นการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งด้วยโปรแกรมการเขียนแบบด้านวิศวกรรม จำนวน 5 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

- รูปแบบที่ 1 ใช้ชื่อว่า 8Drill ซึ่งจะมีขนาดและรูปร่าง เน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตคล้ายเลข 8 มีส่วนเว้าส่วนโค้งที่สามารถเข้าคู่กันได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



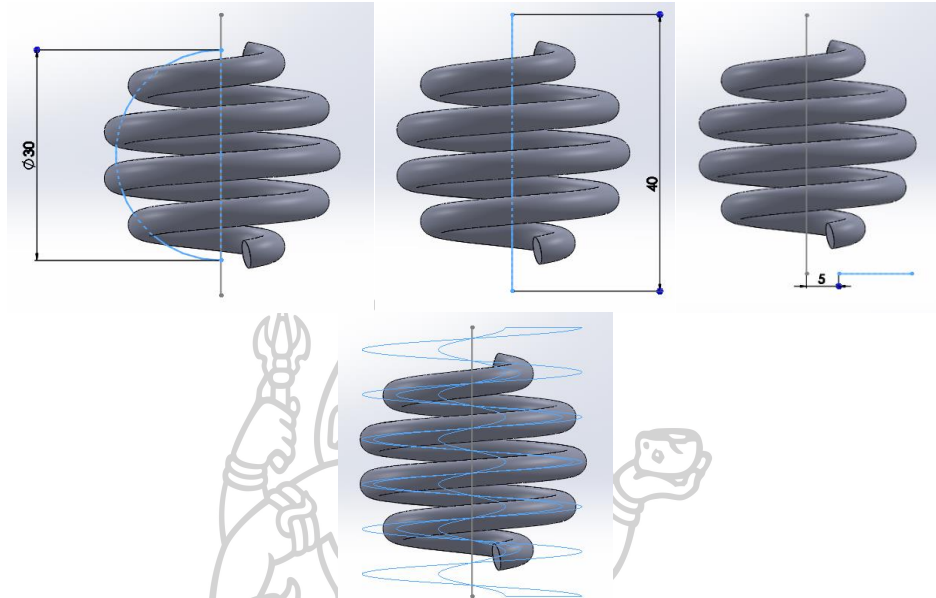
รูปที่ 3.8 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 1

- รูปแบบที่ 2 ใช้ชื่อว่า Hex ซึ่งจะมีขนาดและรูปร่าง เน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นวงหกเหลี่ยมเรียงติดกัน 3 วง คล้ายรังผึ้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



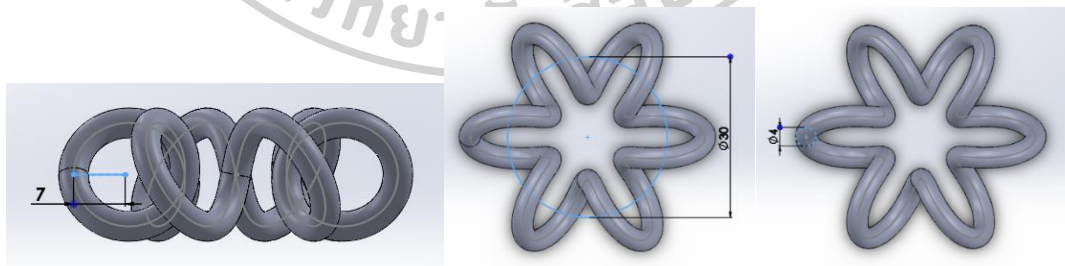
รูปที่ 3.9 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 2

- รูปแบบที่ 3 ใช้ชื่อว่า Spin ซึ่งจะมีความหนาและรูปร่าง เน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นสปริงสามารถยืดหดได้ มีความสามารถในการคืนตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.10



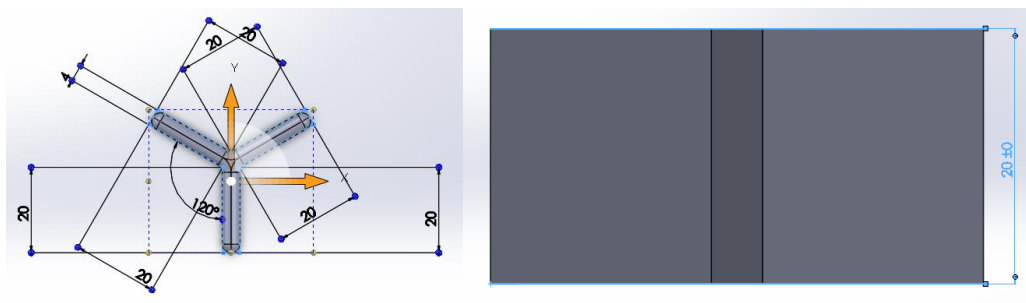
รูปที่ 3.10 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุกัมภ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 3

- รูปแบบที่ 4 ใช้ชื่อว่า Sweep ซึ่งจะมีความหนาและรูปร่าง เน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะคล้ายยางมัดผม ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุกัมภ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 4

- รูปแบบที่ 5 ใช้ชื่อว่า Tri ซึ่งจะมีขนาดและรูปร่าง เน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นสามแฉก ที่ทำมุมเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงรูปร่างและขนาด (ในหน่วยมิลลิเมตร) ของชิ้นงานส่วนต่างๆ ของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 5

หลังจากออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งทั้ง 5 รูปแบบ ด้วยโปรแกรมการเขียนแบบด้านวิศวกรรมเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล stereolithography (.STL) ซึ่งนามสกุลนี้จะทำการแบ่งชิ้นส่วนของชิ้นงานเป็นรูปสามเหลี่ยม แล้วนำไฟล์ .STL ไปแปลงเป็นไฟล์นามสกุล GCODE ด้วยโปรแกรม Matter Control ซึ่งเป็นการแบ่งชิ้นงานออกเป็นชั้นๆ เพื่อนำไปพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printer)

3.4.12.2 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact testing) ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดสอบจะดัดแปลงประยุกต์มาจากวิธี Charpy impact test โดยค้อนจะกระทบชิ้นงานต้นแบบในแนวตั้งฉาก โดยใช้ค้อนแบบ Pendulum ขนาด 4.0 จูล ในการทดสอบ ซึ่งจะทำการทดสอบชิ้นงานรูปแบบละ 3 ชิ้น เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Impact strength

3.4.12.3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (Compressive test) ของชิ้นงาน ต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

การทดสอบความต้านทานต่อแรงกดของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D695 ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดสอบจะทำด้วยอัตราการกดเท่ากับ 1.3 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยโหลด 50 กิโลนิวตัน โดยจะทำการทดสอบแรงกดเพื่อหาค่า Compressive strength และค่า Compressive Young's modulus ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะถูกทดสอบชิ้นงานรูปแบบละ 3 ชิ้นงาน ตามลำดับ เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Compressive strength at Yield และค่า Compressive strength at break

3.4.13 การทดสอบหาค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยตัดชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบจากชิ้นงานการทดสอบความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural specimen) ให้มีขนาดกว้าง 10.57 ± 0.22 มิลลิเมตร ยาว 12.48 ± 0.10 มิลลิเมตร และหนา 3.48 ± 0.20 มิลลิเมตร เมื่อตัดชิ้นงานได้ขนาดตามที่ต้องการแล้ว นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนัก เมื่อชั่งน้ำหนักเสร็จให้นำชิ้นงานไปแช่ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 23 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ครบเวลาที่กำหนดให้แช่ชิ้นงานให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) โดยใช้ชิ้นงานทดสอบอย่างน้อย 3 ชิ้นงาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งและวัสดุที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ซึ่งในปัจจุบันเศรษฐกิจการค้าออนไลน์เป็นที่นิยมมาก ทำให้บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับสินค้า โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) บรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันการกระแทก เนื่องจากว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่สะดวก รวดเร็ว ใช้งานง่าย ค่าซ่อมบำรุงถูก อีกทั้งยังสามารถใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบได้ด้วยตนเอง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ที่มีขายในเชิงการค้า 10 ชนิด ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites และกลุ่มที่ 3 คือ Elastomers โดยในแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยเส้นฟิลาเมนต์ ดังต่อไปนี้ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG), กลุ่มที่ 2 ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) สุดท้ายกลุ่มที่ 3 ได้แก่ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการพิมพ์ (Printing speed) ต่อการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง 5 รูปแบบ ซึ่งชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งจะถูกขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จากนั้นจะทำการศึกษาสมบัติของบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง ได้แก่ ลักษณะสัญญาณวิทยา และสมบัติเชิงกล โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์ในการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ส่วนที่ 2 การศึกษาผลของความเร็วในการพิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ต่อสมบัติเชิงกล

ส่วนที่ 3 การศึกษาผลของการออกแบบและรูปแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

4.1 การศึกษาสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์ในการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

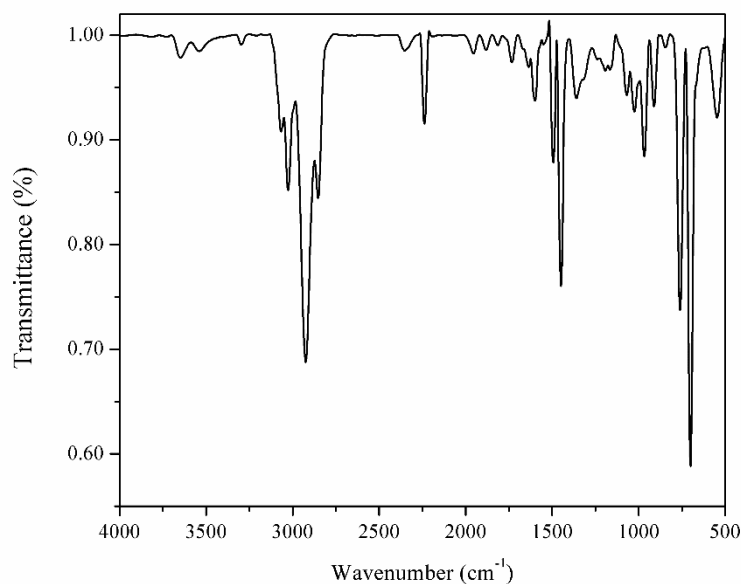
4.1.1 ผลการศึกษาด้วยเทคนิค Fourier Transformation Infrared Spectroscopy (FTIR)

เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของเส้นฟิลาเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.1.1.1 เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 Engineering plastics

(ก) พอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS)

จากรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 แสดงกราฟ IR spectrum ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) พบพีกเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น $3026-3067\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Aromatic C-H stretching ที่เลขคลื่น 2238 cm^{-1} เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Axial deformation C≡N ที่เลขคลื่น 1635 cm^{-1} เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Axial strain C=N and angular deflection of C-C of the aromatic ring ที่เลขคลื่น 967 cm^{-1} เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Angular deformation C=C และที่เลขคลื่น 760 cm^{-1} เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Angular deformation, ArCH (mono-substituted)



รูปที่ 4.1 แสดง IR spectrum ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS)

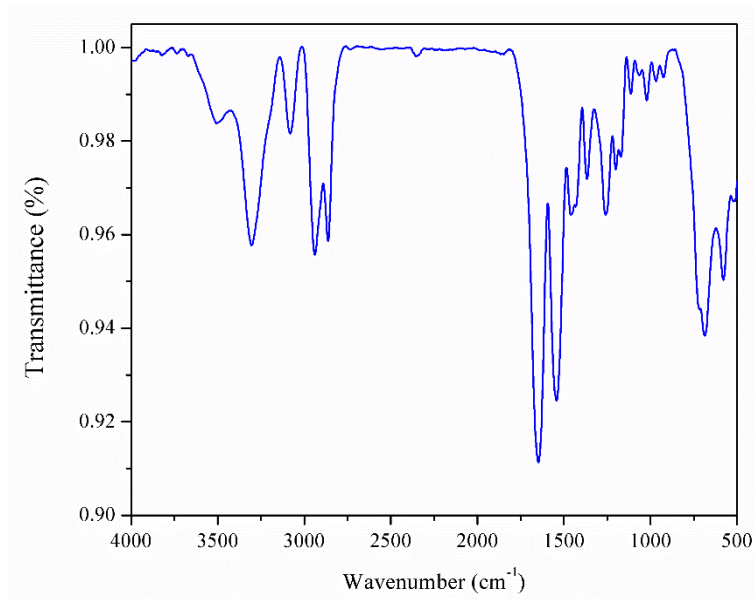
ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

ตารางที่ 4.1 แสดง IR spectrum ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
Aromatic C-H stretching	3026-3067
Axial deformation C≡N	2238
Axial strain C=N and angular deflection of C-C of the aromatic ring	1635
Angular deformation ArCH	1493
Asymmetric angular deformation CH ₃	1448
Symmetrical angular deformation CH ₃	1360
Angular deformation C=C	967
Angular deformation, ArCH (mono-substituted)	760
Aromatic C-H out of plan angular deformation	700

(ข) พอลิเอไมด์ (PA)

จากรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 แสดงกราฟ IR spectrum ของพอลิเอไมด์ (PA) พบพีกเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 3304 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Hydrogen bonded N-H stretching ที่เลขคลื่น 1647 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Amide I (C=O amidic carbonyl) stretching ที่เลขคลื่น 1543 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Amide II (-NH-C(O)- group with a stretching of C-N central amide bond and C=O in-plane bending) และที่เลขคลื่น 1258 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ C-N stretching



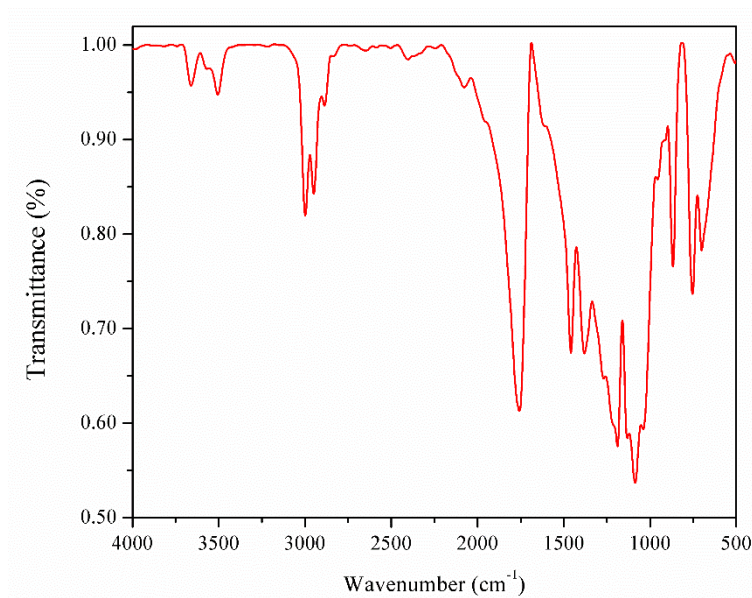
รูปที่ 4.2 แสดง IR spectrum ของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

ตารางที่ 4.2 แสดง IR spectrum ของพอลิเอไมด์ (PA)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
Hydrogen bonded N-H stretching	3304
Asymmetric stretching C-H vibrations of methylene groups	2939
Symmetric stretching C-H vibrations of methylene groups	2862
Amide I (C=O amidic carbonyl) stretching	1647
Amide II (-NH-C(O)- group with a stretching of C-N central amide bond and C=O in-plane bending	1543
C-H bending	1366, 1459
C-N stretching	1258

(ค) พอลิคาร์บอเนต (PC)

จากรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3 แสดงกราฟ IR spectrum ของพอลิคาร์บอเนต (PC) พบพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 1756 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Axial deformation C=O ที่เลขคลื่น 1086-1268 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Axial deformation in C-O-C ที่เลขคลื่น 867 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Angular deformation aromatic C-H (para replacement) และที่เลขคลื่น 754 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Angular deformation, ArCH (mono-substituted)



รูปที่ 4.3 แสดง IR spectrum ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

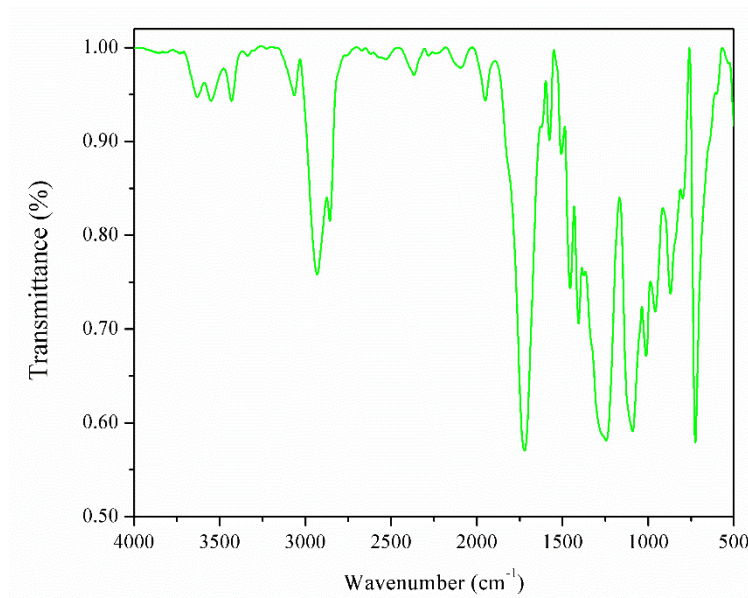
ตารางที่ 4.3 แสดง IR spectrum ของพอลิคาร์บอเนต (PC)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
Axial deformation C=O	1756
Asymmetric angular deformation CH ₃	1458
Symmetrical angular deformation CH ₃	1380
Axial deformation in C-O-C	1086, 1131, 1188, 1268
Angular deformation aromatic C-H (para replacement)	867
Angular deformation, ArCH (mono-substituted)	754
Aromatic C-H out of plan angular deformation	700

(ง) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)

จากรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.4 แสดงกราฟ IR spectrum ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) พบพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 2931 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Asymmetric aliphatic C-H stretching ที่เลขคลื่น 2857 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Symmetric aliphatic C-H stretching ที่เลขคลื่น 1721 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของหมู่คาร์บอนิล C=O stretching ที่เลขคลื่น 1245 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของหมู่คาร์

บอณิล C(O)–O stretching และที่เลขคลื่น 959 เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C–H stretching of cyclohexylene ring



รูปที่ 4.4 แสดง IR spectrum ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

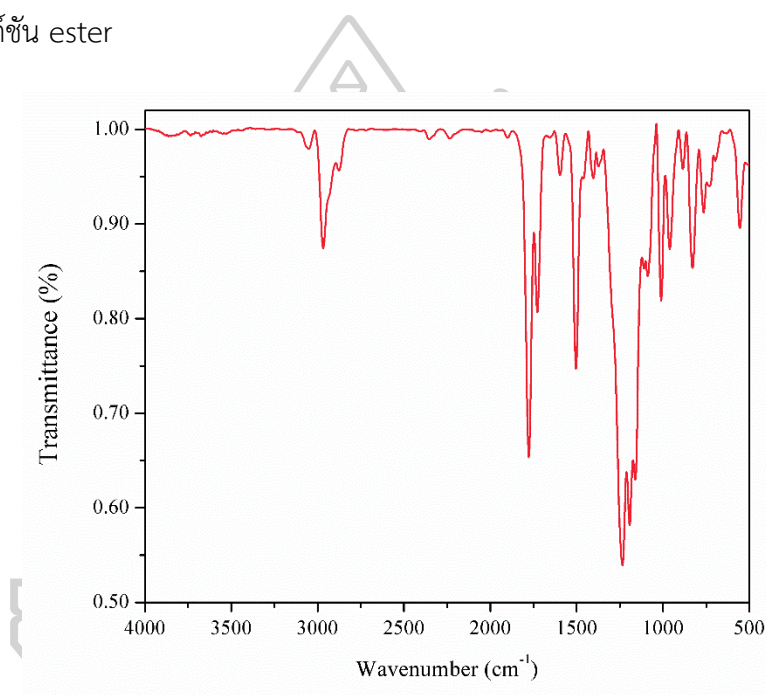
ตารางที่ 4.4 แสดง IR spectrum ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
Asymmetric aliphatic C–H stretching vibrations	2931
Symmetric aliphatic C–H stretching vibrations	2857
C=O of ester groups	1721
–CH ₂ – deformation band	1406
C(O)–O stretching of ester groups	1245
C–H stretching peak of cyclohexylene ring	959
C–H out-of-plane deformation of two carbonyl substituents on the aromatic ring	725

4.1.1.2 เส้นพลาเมนต์กลุ่มที่ 2 PLA and PLA composites

(ก) โพลีแลคติกแอซิด (PLA)

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.5 แสดงกราฟ IR spectrum ของโพลีแลคติกแอซิด (PLA) พบพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 2967 cm^{-1} เป็นพีคเอกลักษณ์ของ CH_3 stretching ที่เลขคลื่น 2877 cm^{-1} เป็นพีคเอกลักษณ์ของ CH stretching ที่เลขคลื่น 1777 cm^{-1} เป็นพีคเอกลักษณ์ของหมู่คาร์บอนิล C=O stretching ที่เลขคลื่น 1503 cm^{-1} เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C-H bending (methyl group) และที่เลขคลื่น 1234 cm^{-1} เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C-O stretching ที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชัน ester



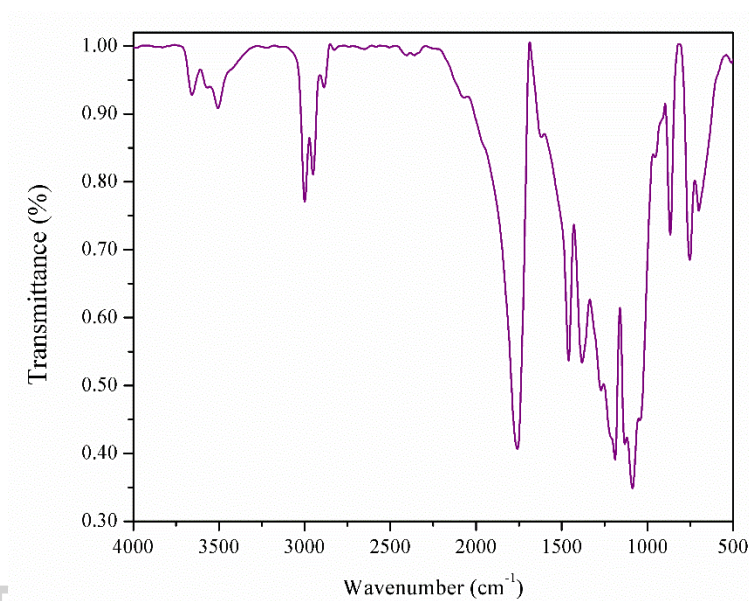
รูปที่ 4.5 แสดง IR spectrum ของโพลีแลคติกแอซิด (PLA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

ตารางที่ 4.5 แสดง IR spectrum ของโพลีแลคติกแอซิด (PLA)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
CH ₃ stretching	2967
CH stretching	2877
C=O stretching	1777
C-H bending (methyl group)	1503
C-O stretching	1234

(ข) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA)

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.6 แสดงกราฟ IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) พบพิกัดเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 2887-2999 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ CH stretching ที่เลขคลื่น 1758 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของหมู่คาร์บอนิล C=O stretching ที่เลขคลื่น 1087 และ 1459 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ C-H deformation of methyl and methylene และที่เลขคลื่น 1188 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ C–O–C stretching



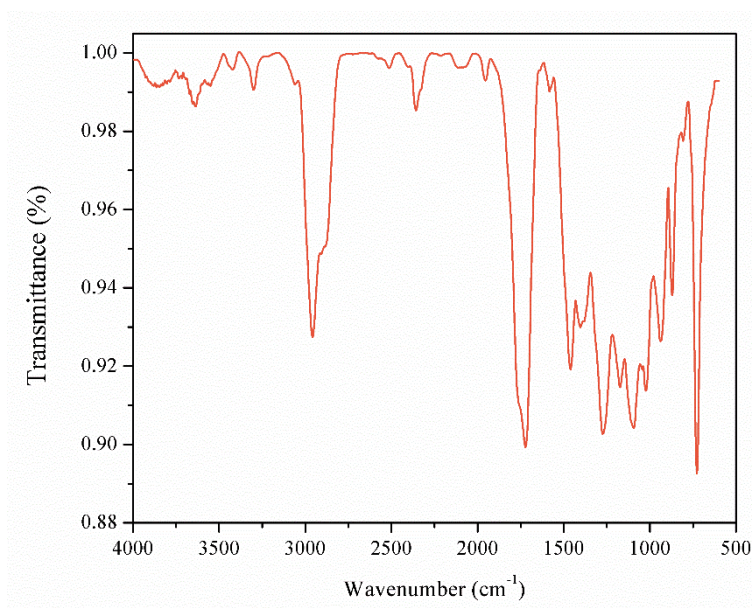
รูปที่ 4.6 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

ตารางที่ 4.6 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
C-H stretching	2887, 2951, 2999
C=O of ester groups of PLA	1758
C-H deformation of methyl and methylene and C-H stretching absorption of S ring	1459
C-O stretching of S ring	1381
C-O stretching of G ring	1270
C–O–C stretching vibration	1188
C-H deformation of methyl and methylene and C-H stretching absorption of G ring	1087
C=O stretching	752

(ค) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA)

จากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.7 แสดงกราฟ IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) พบพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 3420 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ hydroxyl bonding ที่เลขคลื่น 2957 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ asymmetric และ symmetric C-H stretching ที่เลขคลื่น 1721 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของหมู่คาร์บอนิล C=O stretching ที่เลขคลื่น 1460 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C-H bending (methyl group) ที่เลขคลื่น 1272 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C-O stretching ที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชัน ester ที่เลขคลื่น 1093 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C-O-C stretching และที่เลขคลื่น 726 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C=O stretching ซึ่งปรากฏพีค IR spectrum สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kurniawan Yuniarto และคณะ [62] พบว่า พีคเอกลักษณ์ของ IR spectrum ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ปรากฏที่ตำแหน่งเดียวกันกับพีคเอกลักษณ์ของ IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) จึงคาดว่า SPLA เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PEG



รูปที่ 4.7 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

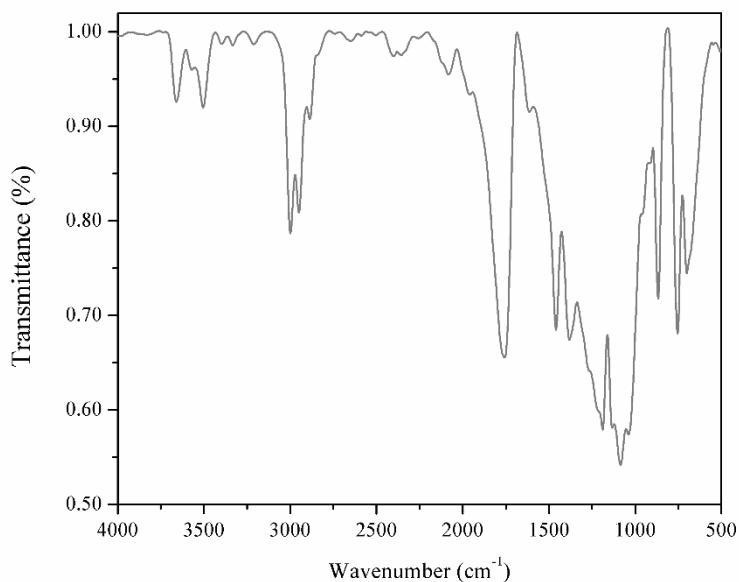
ตารางที่ 4.7 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
OH	3420
C-H stretching	2957
C=O stretching	1721
C-H bending (methyl group)	1460
C-O stretching	1272
C-O-C stretching	1093
C=O stretching	726

(ง) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)

จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.8 แสดงกราฟ IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) พบพีคเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 2998 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Asymmetric modes of stretching of C-H bonds ที่เลขคลื่น 2949 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ Symmetric modes of stretching of C-H bonds ที่เลขคลื่น 1756 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของหมู่คาร์บอนิล C=O stretching ที่เลขคลื่น 1459 cm⁻¹ เป็นพีคเอกลักษณ์ของ

C-H bending (methyl group) ที่เลขคลื่น 1188 cm^{-1} เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C-O stretching ที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชัน ester และที่เลขคลื่น 754 cm^{-1} เป็นพีคเอกลักษณ์ของ C=O stretching



รูปที่ 4.8 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

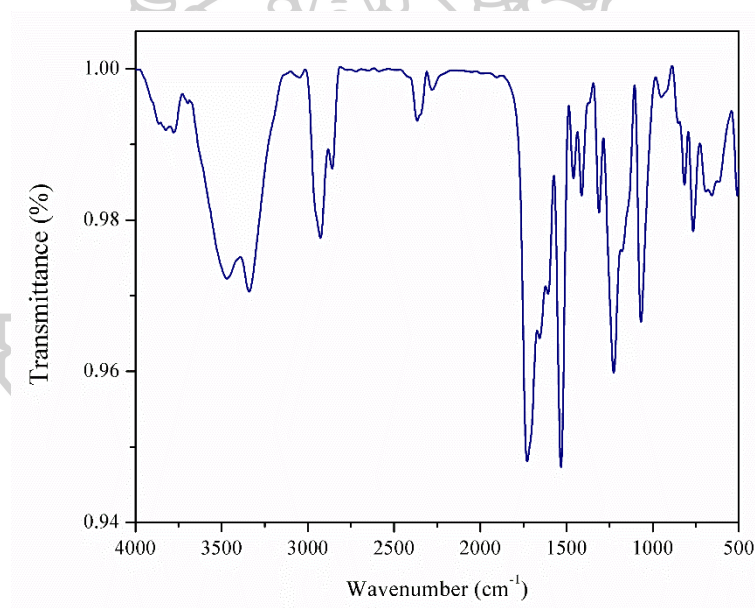
ตารางที่ 4.8 แสดง IR spectrum ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)

Functional group	Wavenumber (cm^{-1})
Asymmetric modes of stretching of C-H bonds	2998
Symmetric modes of stretching of C-H bonds	2949
C=O stretching	1756
C-H bending (methyl group)	1459
C-H deformation	1380
C-O stretching	1188
C=O stretching	754

4.1.1.3 เส้นพลาเมตกลุ่มที่ 3 Elastomers

(ก) เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE)

จากรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.9 แสดงกราฟ IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) พบพิกัดเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 3340 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ N-H stretching ที่เลขคลื่น 2926 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ Asymmetric modes of stretching of C-H bonds ที่เลขคลื่น 2859 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ Symmetric modes of stretching of C-H bonds ที่เลขคลื่น 1728 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ C=O stretching ที่เลขคลื่น 1531 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ (-NH-CO-) group with a stretching of C-N central amide bond and C=O in-plane bending ที่เลขคลื่น 1225 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ Axial deformation in C-O-C ที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชัน ester และที่เลขคลื่น 1067 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของ C-O stretching



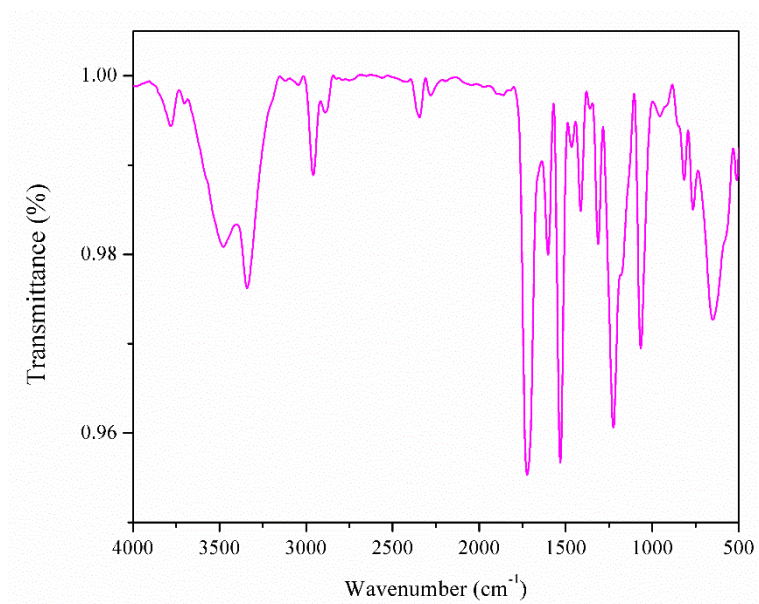
รูปที่ 4.9 แสดง IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

ตารางที่ 4.9 แสดง IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
N-H stretching	3340
Asymmetric aliphatic C-H stretching vibrations	2926
Symmetric aliphatic C-H stretching vibrations	2859
C=O stretching	1728
(-NH-CO-) group with a stretching of C-N central amide bond and C=O in-plane bending	1531
Axial deformation in C-O-C	1225
C-O stretching	1067

(ข) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

จากรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.10 แสดงกราฟ IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) พบพีกเอกลักษณ์ที่สำคัญดังตำแหน่งเลขคลื่นต่อไปนี้ ที่เลขคลื่น 3340 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ N-H stretching ที่เลขคลื่น 1722 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ C=O stretching ที่เลขคลื่น 1601 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ N-H bending ที่เลขคลื่น 1531 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ (-NH-CO-) group stretching ที่เลขคลื่น 1224 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ Axial deformation in C-O-C ที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชัน ester และที่เลขคลื่น 1066 cm⁻¹ เป็นพีกเอกลักษณ์ของ C-O stretching



รูปที่ 4.10 แสดง IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จากการทดสอบ FTIR

ตารางที่ 4.10 แสดง IR spectrum ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
N-H stretching	3340
C=O stretching	1722
N-H bending	1601
(-NH-CO-) group with a stretching of C-N central amide bond and C=O in-plane bending	1531
Axial deformation in C-O-C	1224
C-O stretching	1066

4.1.2 ผลการทดสอบหาค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index)

เทคนิค Melt flow index เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับหาค่าดัชนีการไหล ซึ่งแสดงถึงความต้านทานการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow index, MFI) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics, กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites และกลุ่มที่ 3 คือ Elastomers

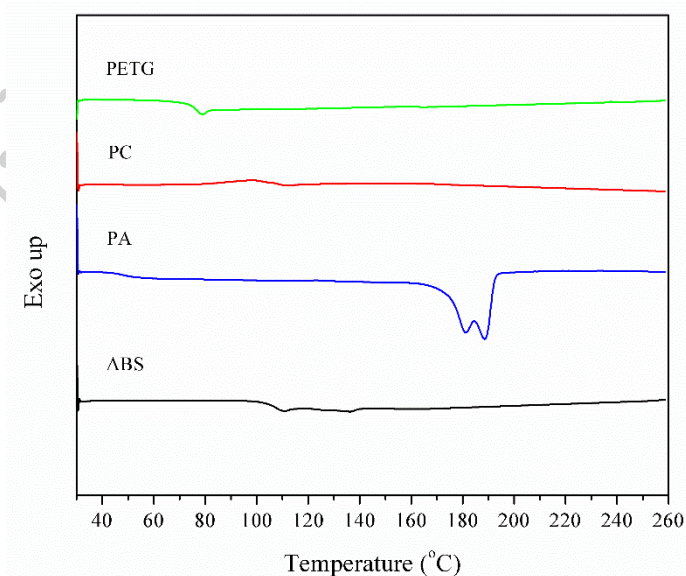
กลุ่ม	ตัวอย่าง	อุณหภูมิใน กระบอก หลอม (°C)	น้ำหนักกด (kg)	ค่า MFI (g/10min) จากบริษัท	MFI (g/10min)	SD
Engineering Plastics	ABS	220	5	1.8	5.86	0.06
	PA	230	2.16	5	2.15	0.05
	PC	300	1.2	23 - 26	34.96	1.07
	PETG	200	5	20	9.42	0.10
PLA and PLA Composites	PLA	190	2.16	6	6.32	0.03
	CFPLA	190	2.16	N/A	5.44	0.04
	SPLA	190	2.16	N/A	74.89	0.42
	WPLA	190	2.16	15	15.58	0.14
Elasto- mers	TPE	210	5	N/A	12.83	1.09
	TPU	190	5	N/A	14.76	0.12

จากตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่า Melt flow index ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Melt flow indexer ของเส้นฟิลาเมนต์ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่า พอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) มีค่า MFI เท่ากับ 5.86 กรัม/10 นาที, พอลิเอไมด์ (PA) มีค่า (MFI) เท่ากับ 2.15 กรัม/10 นาที, พอลิคาร์บอเนต (PC) มีค่า MFI เท่ากับ 34.96 กรัม/10 นาที และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) มีค่า MFI เท่ากับ 9.42 กรัม/10 นาที ถัดมาเป็นกลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่า พอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่า MFI เท่ากับ 6.32 กรัม/10 นาที, พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) มีค่า MFI เท่ากับ 5.44 กรัม/10 นาที, พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) มีค่า

MFI เท่ากับ 74.89 กรัม/10 นาที และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) มีค่า MFI เท่ากับ 15.58 กรัม/10 นาที ซึ่งการที่ CFPLA มีค่า MFI ที่น้อยกว่า PLA แสดงว่า CFPLA มีความหนืดที่มากกว่า PLA เนื่องจากการเติมเส้นใยคาร์บอนลงไป เกิดการขัดขวางการไหลของ PLA หลอมเหลว ทำให้ PLA หลอมเหลวไหลได้ยากขึ้น ส่วน SPLA และ WPLA มีค่า MFI ที่มากกว่า PLA เนื่องจากการเติมผงไม้ลงไป ทำให้มีหมู่ -OH บนสายโซ่ PLA มากขึ้น ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้สายโซ่สั้นลง ทำให้ PLA หลอมเหลวไหลได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ SPLA ซึ่งมีค่า MFI มากที่สุด เนื่องจากเติมสารเพิ่มความเหนียวทำให้สารโซ่ขยายตัว ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลได้ง่ายขึ้น สุดท้ายกลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) มีค่า MFI เท่ากับ 12.83 กรัม/10 นาที และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่า MFI เท่ากับ 14.76 กรัม/10 นาที

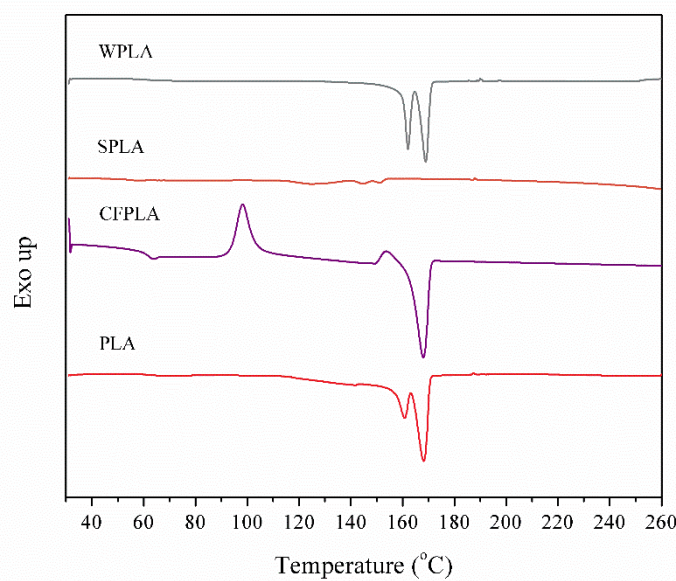
4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์

ในการทดสอบสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์ ซึ่งแสดงข้อมูลในส่วนของการให้ความร้อนครั้งที่ 2 เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และปริมาณผลึกที่เป็นของเส้นฟิลาเมนต์ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.11 แสดง DSC Thermogram second heating ของพอลิอะครีโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC), และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วย ไกลคอล (PETG) ที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์

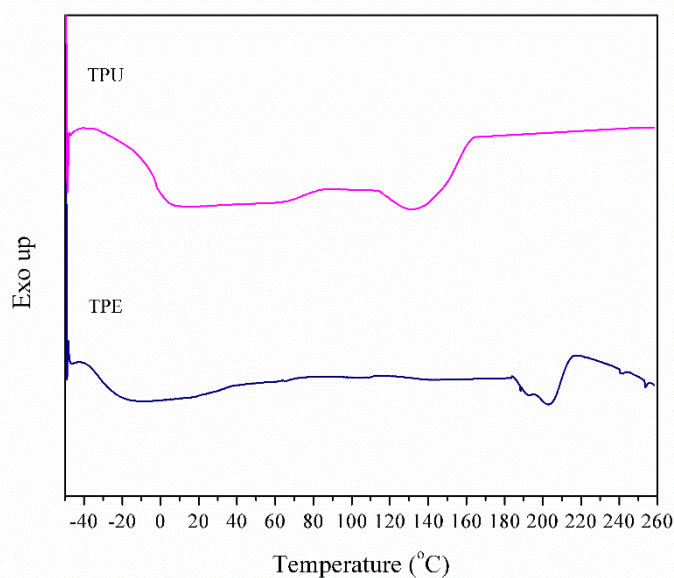
จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน พบว่า พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) จะปรากฏพิก 2 พิก โดยพิกแรกคือ อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่อุณหภูมิ 107 °C และพิกที่สองคือ อุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ที่อุณหภูมิ 136 °C ถัดมาเป็นพอลิเอไมด์ (PA) มีอุณหภูมิ T_g เท่ากับ 47 °C และมีอุณหภูมิ T_m ปรากฏ 2 พิก ที่อุณหภูมิเท่ากับ 181 และ 188 °C ส่วนพอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) จะปรากฏเพียงแคंपิก T_g เท่านั้น ที่อุณหภูมิ 109 และ 76 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 แสดง DSC Thermogram second heating ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน พบว่า พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ปรากฏพิกอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่อุณหภูมิ 61 °C และปรากฏ

พิกัดอุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) 2 พิกัด ที่อุณหภูมิ 160 และ 168 °C ถัดมาเป็นพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ปรากฏพิกัด T_g ที่อุณหภูมิ 60 °C นอกจากนี้ยังปรากฏพิกัดอุณหภูมิการตกผลึกเมื่อให้ความร้อน (Cold-crystallization, T_{cc}) 2 พิกัด ที่อุณหภูมิ 97 และ 152 °C ปรากฏพิกัด T_m เพียงพิกัดเดียวที่อุณหภูมิ 166 °C พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ปรากฏพิกัด T_g ที่อุณหภูมิ 55 °C และปรากฏพิกัด T_m 2 พิกัด ที่อุณหภูมิ 144 และ 151 °C สุดท้ายพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ปรากฏพิกัด T_g ที่อุณหภูมิ 61 °C และปรากฏพิกัด T_m 2 พิกัด ที่อุณหภูมิ 161 และ 168 °C



รูปที่ 4.13 แสดง DSC Thermogram second heating ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน พบว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) จะปรากฏพิกัดอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่อุณหภูมิ -29 °C และปรากฏพิกัดอุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ที่อุณหภูมิ 203 °C ส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีอุณหภูมิ T_g เท่ากับ -2 °C และปรากฏพิกัดอุณหภูมิ T_m ที่อุณหภูมิเท่ากับ 138 °C

ตารางที่ 4.12 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ DSC ในขั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม

กลุ่ม	ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc1} (°C)	T_{cc2} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_{cc1} (J/g)	ΔH_{cc2} (J/g)	ΔH_{m1} (J/g)	ΔH_{m2} (J/g)	X_c (%)
Engineering Plastics	ABS	107.32	-	-	136.04	-	-	-	1.07	-	N/A
	PA	47.18	-	-	181.04	188.36	-	-	21.77	12.71	18.24
	PC	109.02	-	-	-	-	-	-	-	-	N/A
	PETG	76.20	-	-	-	-	-	-	-	-	N/A
PLA and PLA Composites	PLA	60.95	-	-	160.56	167.88	-	-	30.43	23.46	57.51
	CFPLA	60.20	97.11	152.44	166.63	-	22.42	3.75	31.36	-	5.89
	SPLA	55.43	-	-	144.71	151.05	-	-	1.19	0.83	2.34
	WPLA	61.03	-	-	161.64	168.44	-	-	19.85	20.68	44.41
Elasto- mers	TPE	-29.09	-	-	203.29	-	-	-	3.24	-	N/A
	TPU	-2.37	-	-	137.99	-	-	-	5.73	-	N/A

สมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC 1 Auto Robot ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียส/นาที ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.11-4.13 และตารางที่ 4.12 พบว่าอุณหภูมิกลายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics ได้แก่ พอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) มีค่า T_g เท่ากับ 107 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิกลายแก้วของวัฏภาคสไตรีน-อะคริโลไนไตรส์ (SAN) โดยพีคที่ปรากฏบริเวณ 107 °C เป็นอุณหภูมิกลายแก้วของสไตรีน (S) ส่วนวัฏภาคบิวทาไดอีนจะไม่ปรากฏพีค T_g ใน DSC Thermogram เนื่องจากอุณหภูมิกลายแก้วของบิวทาไดอีน (B) จะปรากฏพีคที่อุณหภูมิต่ำกว่า -80 °C แต่ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DSC) ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ในช่วงอุณหภูมิ 30 °C ถึง 260 °C เท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Piotr Rytlewski และคณะ [64] , พอลิเอไมด์ (PA) มีค่า T_g เท่ากับ 47 °C, พอลิคาร์บอนเนต (PC) มีค่า T_g เท่ากับ 109 °C และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) มีค่า T_g เท่ากับ 76 °C ส่วนอุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของพอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ไม่ปรากฏ

พิกอุณหภูมิในการหลอมผลึก แต่พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) มีค่า T_m เท่ากับ 136 °C เป็นอุณหภูมิในการหลอมผลึกของอะคริโลไนไตรล์ (AN) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Piotr Rytlewski และคณะ [64] และพอลิเอไมด์ (PA) ปรากฏพิก T_m 2 พิก ที่อุณหภูมิ 181 และ 188 °C ซึ่งเป็นการหลอมผลึก 2 รูปแบบ ของพอลิเอไมด์ โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าเป็นการหลอมผลึกวัฏภาคแกมมา (γ) และที่อุณหภูมิสูงกว่าเป็นการหลอมผลึกวัฏภาคแอลฟา (α) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J.P. Cosas Fernandes และคณะ [65] เมื่อพิจารณาปริมาณผลึก (X_c) ที่คำนวณได้จากการให้ความร้อนครั้งที่สองจากเส้นฟิลาเมนต์พบว่าเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics มีเพียงพอลิเอไมด์ (PA) ที่สามารถคำนวณหาปริมาณผลึกได้เท่ากับ 18.24%

กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าอุณหภูมิล้าแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่าเท่า 61 °C, พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) มีค่า T_g เท่ากับ 60 °C, พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) มีค่า T_g เท่ากับ 55 °C, และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) มีค่า T_g เท่ากับ 61 °C โดยที่ CFPLA จะปรากฏพิกอุณหภูมิการตกผลึกเมื่อให้ความร้อน (Cold-crystallization, T_c) 2 พิก ที่อุณหภูมิเท่ากับ 97 และ 152 °C ทั้งนี้การเกิดพิก Cold-crystallization แสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ไม่สามารถตกผลึกได้อย่างสมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเส้นฟิลาเมนต์ ส่วนอุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) จะปรากฏพิกอุณหภูมิในการหลอมผลึก 2 พิก เนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์ในขั้นตอนการเกิดผลึก (Crystallization kinetic) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammadreza Nofar และคณะ [66] โดยอุณหภูมิในการหลอมผลึกที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เกิดจากการหลอมผลึกที่เกิดในขั้นตอนการตกผลึกไม่สมบูรณ์ (Cold crystallization) ในขณะที่อุณหภูมิการหลอมผลึกที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่านั้น เกิดจากการหลอมผลึกของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เอง เมื่อพิจารณาปริมาณผลึก (X_c) ที่คำนวณได้จากการให้ความร้อนครั้งที่สองจากเส้นฟิลาเมนต์พบว่าเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 PLA and PLA composites สามารถคำนวณหาปริมาณผลึกได้ทั้ง 4 ชนิด โดยพบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีปริมาณผลึกมากที่สุด รองลงมาคือ พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความ

เหนียว (SPLA) ตามลำดับ แต่เราไม่สามารถเปรียบเทียบปริมาณผลึกกันได้ เนื่องจากพอลิแลติกแอซิดที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นฟิลาเมนต์แต่ละบริษัทอาจจะใช้คนละเกรดกัน

กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) มีค่า T_g เท่ากับ $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีอุณหภูมิ T_m เท่ากับ $203\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่า T_g เท่ากับ $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีอุณหภูมิ T_m เท่ากับ $138\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) จะปรากฏอุณหภูมิคล้ายแก้วที่อุณหภูมิประมาณ $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิคล้ายแก้วของส่วน Soft segment และปรากฏอุณหภูมิในการหลอมผลึกที่อุณหภูมิประมาณ $138\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการหลอมผลึกของส่วน Hard segment เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) เป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) ที่ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ Hard segment และ Soft segment ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Achim Frick และคณะ [67]

ตารางที่ 4.13 แสดงค่า Thermal conductivity ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด ที่อ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆ

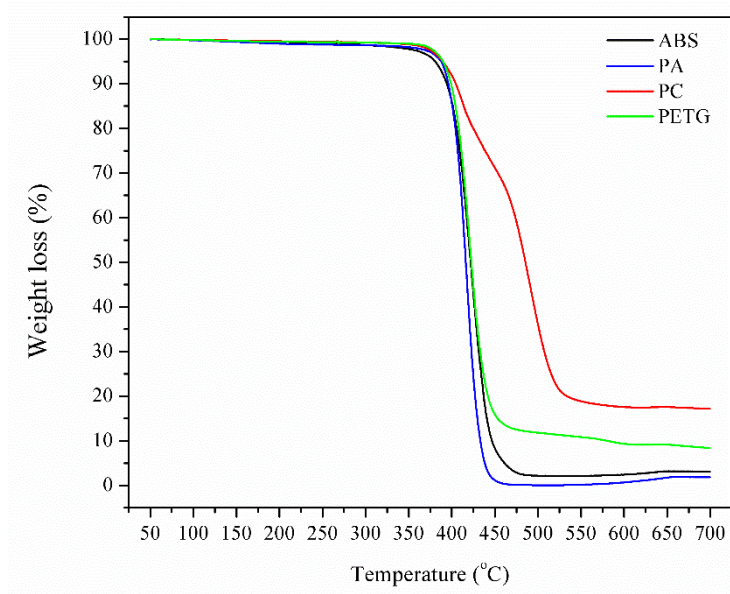
กลุ่ม	ตัวอย่าง	Thermal conductivity (W/m.K)	งานวิจัยอ้างอิง
Engineering Plastics	ABS	0.240	Tyler Sonsalla <i>et al.</i> [68]
	PA	0.270	Minghui Li <i>et al.</i> [69]
	PC	0.217	Can Yang <i>et al.</i> [70]
	PETG	N/A	N/A
PLA and PLA Composites	PLA	0.193	S.M. Lebedev <i>et al.</i> [71]
	CFPLA	0.600	Hitoshi Takagi <i>et al.</i> [72] Dawon Jang <i>et al.</i> [73]
	SPLA	N/A	N/A
	WPLA	0.260	Kanotha Kamau-Devers <i>et al.</i> [74]
Elasto- mers	TPE	N/A	N/A
	TPU	0.240	Junchao Liu <i>et al.</i> [75]

จากตารางที่ 4.13 แสดงค่า Thermal conductivity ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด พบว่ากลุ่ม Engineering plastics มีค่า Thermal conductivity อยู่ในช่วง 0.217-0.270 W/m.K ซึ่งค่าการนำความร้อนสูง แสดงว่าสามารถถ่ายเทความร้อนออกไปจากตัวได้ดี ซึ่งเส้นฟิลาเมนต์กลุ่ม Engineering plastics เมื่อคายความร้อนออกจากตัวจะทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นงาน ส่งผลให้เวลาขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จึงต้องใช้ความร้อนที่ฐานพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเพื่อป้องกันการหดตัวของชิ้นงาน ซึ่งการหดตัวของชิ้นงานจะทำให้ฐานของชิ้นงานหลุดออกไม่ติดกับฐานพิมพ์ ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ ส่วนกลุ่ม PLA and PLA composites พบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่า Thermal conductivity เท่ากับ 0.193 W/m.K ซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่ากลุ่ม Engineering plastics จึงเกิดการหดตัวน้อยกว่า จึงไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนที่ฐานพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ นอกจากนี้เมื่อเป็น PLA composites ที่มีการเติมผงไม้และเส้นใยคาร์บอน จะทำให้ค่า Thermal conductivity เพิ่มขึ้นเป็น 0.260 และ 0.600 W/m.K ตามลำดับ การที่ค่าการนำความร้อนของ PLA composites เพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่ทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นงาน เนื่องจากผงไม้และเส้นใยคาร์บอนช่วยขัดขวางการหดตัวของชิ้นงาน

4.1.3 ผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

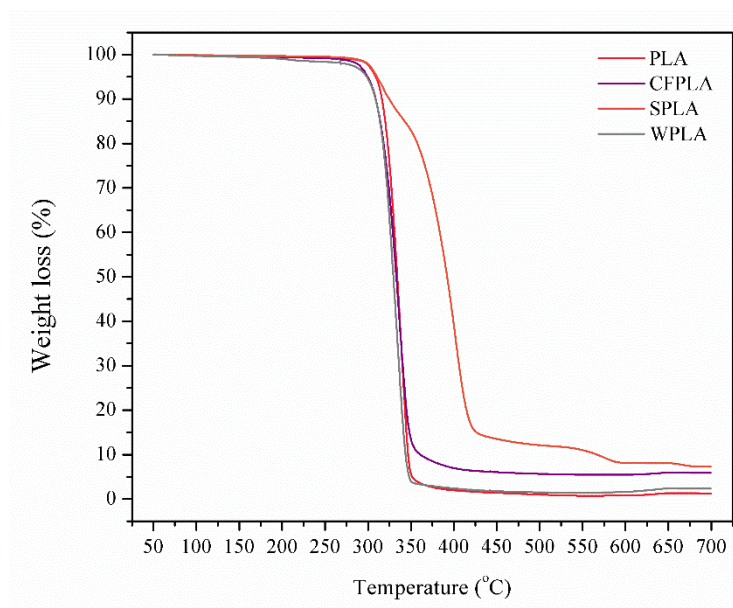
สมบัติเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer รุ่น TGA 1 Auto Robot ในโหมดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature scan) ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และในโหมดการเปลี่ยนแปลงเวลา (Isothermal หรือ Time scan) ที่ช่วงเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่า พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และพอลิเอไมด์ (PA) มีการสลายตัวทางความร้อนเพียงขั้นเดียวที่อุณหภูมิ 425 และ 420 °C ตามลำดับ ถัดมาเป็นพอลิคาร์บอนเนต (PC) มีการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้น โดยขั้นที่หนึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัว เท่ากับ 416 °C และขั้นที่สองจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 495 °C ส่วนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) มีการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้น เช่นเดียวกับ PC โดยขั้นที่หนึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัว เท่ากับ 424 °C และขั้นที่สองจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 557 °C



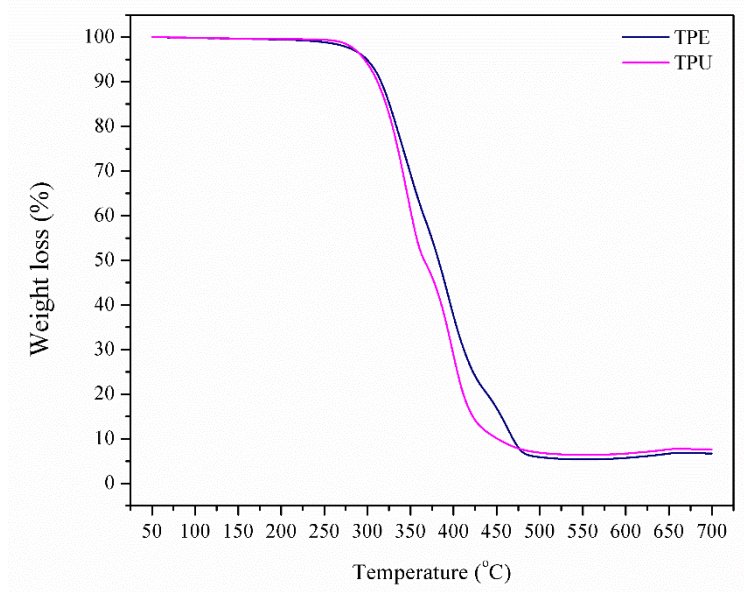
รูปที่ 4.14 แสดง TGA Thermogram ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2)

จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่า พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) มีการสลายตัวทางความร้อนเพียงชั้นเดียว ที่อุณหภูมิ 342, 339 และ 335 °C ตามลำดับ ส่วนพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนทั้งหมด 3 ชั้น โดยชั้นที่หนึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัว เท่ากับ 321 °C ชั้นที่สองจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 405 °C และชั้นที่สามจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 578 °C



รูปที่ 4.15 แสดง TGA Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA), และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2)

จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นพลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) มีการสลายตัวทางความร้อน 3 ชั้น โดยชั้นที่หนึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัว เท่ากับ $344\text{ }^{\circ}\text{C}$ ชั้นที่สองจะสลายตัวที่อุณหภูมิ $397\text{ }^{\circ}\text{C}$ และชั้นที่สามจะสลายตัวที่อุณหภูมิ $467\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) จะเกิดการสลายตัวทางความร้อน 2 ชั้น โดยชั้นที่หนึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัว เท่ากับ $349\text{ }^{\circ}\text{C}$ และชั้นที่สองจะสลายตัวที่อุณหภูมิ $402\text{ }^{\circ}\text{C}$

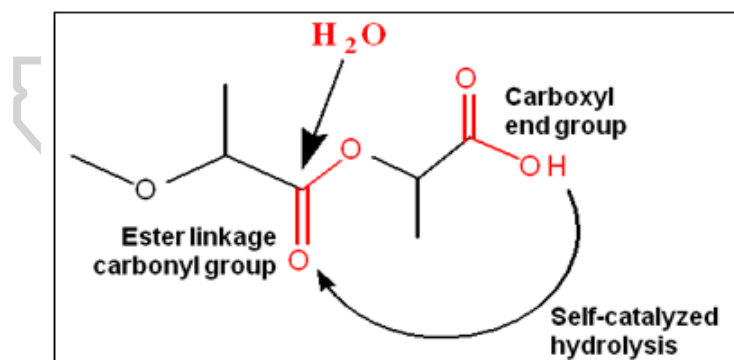


รูปที่ 4.16 แสดง TGA Thermogram ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2)

ตารางที่ 4.14 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ TGA ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2)

กลุ่ม	ตัวอย่าง	T_{onset} (°C)	T_{max1} (°C)	T_{max2} (°C)	T_{max3} (°C)	%Weight loss
Engineering Plastics	ABS	403.88	425.11	-	-	97.82
	PA	403.65	419.70	-	-	99.89
	PC	395.11	416.47	494.90	-	82.49
	PETG	404.63	424.07	557.48	-	90.85
PLA and PLA Composites	PLA	321.76	342.47	-	-	97.90
	CFPLA	317.16	338.89	-	-	94.06
	SPLA	304.57	321.47	405.03	578.41	91.91
	WPLA	315.95	335.24	-	-	98.16
Elasto- mers	TPE	309.83	344.08	396.93	466.91	94.16
	TPU	313.82	349.26	402.15	-	93.58

จากการพิจารณารูปที่ 4.14-4.16 และตารางที่ 4.14 พบว่าเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics จะมีพอลิเมอร์ที่มีการสลายตัวทางความร้อนเพียงขั้นเดียว และการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้น โดยที่พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และพอลิเอไมด์ (PA) จะเกิดการสลายตัวทางความร้อน 1 ขั้น และพอลิคาร์บอนเนต (PC) กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) จะเกิดการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้น ส่วนเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) เกิดการสลายตัวทางความร้อนเพียงขั้นเดียว ส่วนพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนสองขั้น เมื่อพิจารณาการสลายตัวทางความร้อนที่เกิดเพียงขั้นเดียวของ PLA, CFPLA, SPLA และ WPLA พบว่า CFPLA, SPLA และ WPLA มีค่าอุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ลดลงเมื่อเทียบกับ PLA เนื่องจากเกิดหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ปริมาณมากขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมสารเติมแต่งผ่านกระบวนการอัดรีด ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) กลายเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนได้เร็วขึ้น ดังแสดงในรูป 4.17 สุดท้ายเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) เกิดการสลายตัวทางความร้อนสองขั้น และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนสามขั้น



รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) [76]

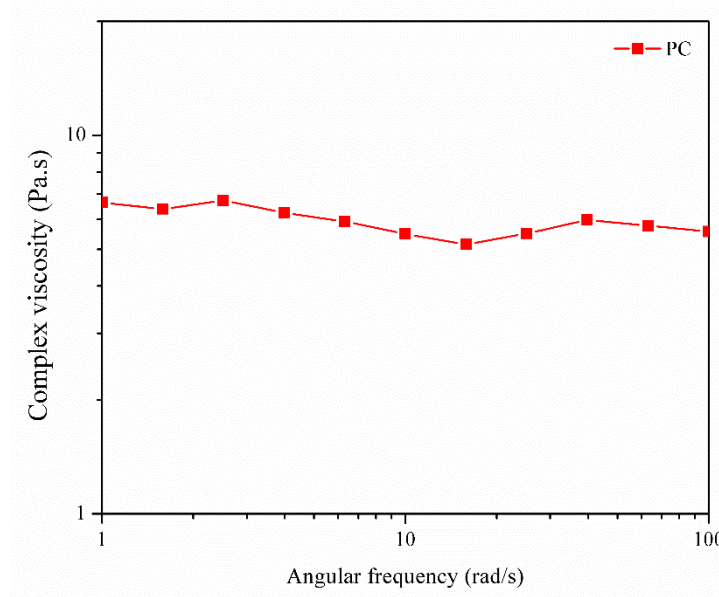
เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัว (T_{onset}) ของเส้นฟิลาเมนต์ พบว่า อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัว (T_{onset}) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด จะเริ่มสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้อุณหภูมิหัวตาย (Nozzle) อยู่ในช่วง 200 ถึง 250 °C แสดงให้เห็นว่าในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต้นแบบจะไม่ทำให้เส้นฟิลาเมนต์เกิดการสลายตัวทางความร้อน

ตารางที่ 4.15 แสดงค่า % Weight loss ที่เวลา 10, 20 และ 30 นาที ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน (O₂) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ

กลุ่ม	พอลิเมอร์	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	ค่า % Weight loss ที่เวลา 10 นาที	ค่า % Weight loss ที่เวลา 20 นาที	ค่า % Weight loss ที่เวลา 30 นาที
Engineering Plastics	ABS	240	0.60	0.78	0.93
	PA	240	1.09	1.16	1.27
	PC	250	0.04	0.07	0.10
	PETG	240	0.16	0.22	0.28
PLA and PLA Composites	PLA	220	1.17	1.49	1.82
	CFPLA	220	1.78	2.19	2.55
	SPLA	200	0.22	0.26	0.29
	WPLA	220	3.55	4.33	5.22
Elastomers	TPE	210	0.74	1.05	1.29
	TPU	210	0.28	0.32	0.34

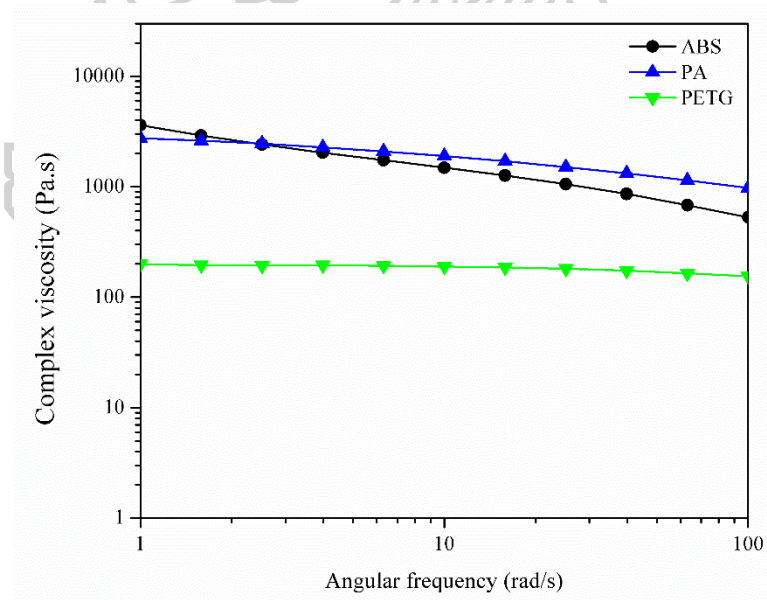
จากตารางที่ 4.15 แสดงค่า % Weight loss ที่เวลา 10, 20 และ 30 นาที ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด ที่ทดสอบภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน (O₂) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิหัวตาย (Nozzle) ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printer) ที่ใช้ในการขึ้นรูปของเส้นฟิลาเมนต์ชนิดนั้นๆ พบว่า ระยะเวลา 30 นาที ที่พอลิเมอร์ได้รับความร้อนไม่ได้ทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวหรือเกิดการสลายตัวเพียงเล็กน้อย ซึ่งอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 % แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่หัวตายนั้นๆ สามารถใช้ในการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ ถึงแม้ว่าเส้นฟิลาเมนต์จะอยู่ในกระบอกลอมเป็นระยะเวลานานถึง 30 นาที นอกจากนี้ อุณหภูมิหัวตายที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ยังมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด อีกด้วย

4.1.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงรีอโลยีด้วยเครื่อง Parallel plate rheometer



รูปที่ 4.18 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิคาร์บอนเนต (PC)

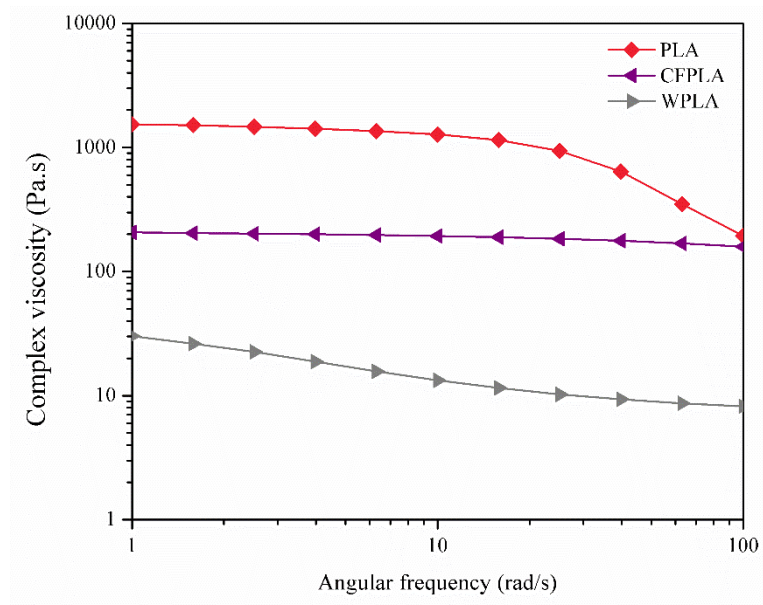
ที่อุณหภูมิ 250 °C



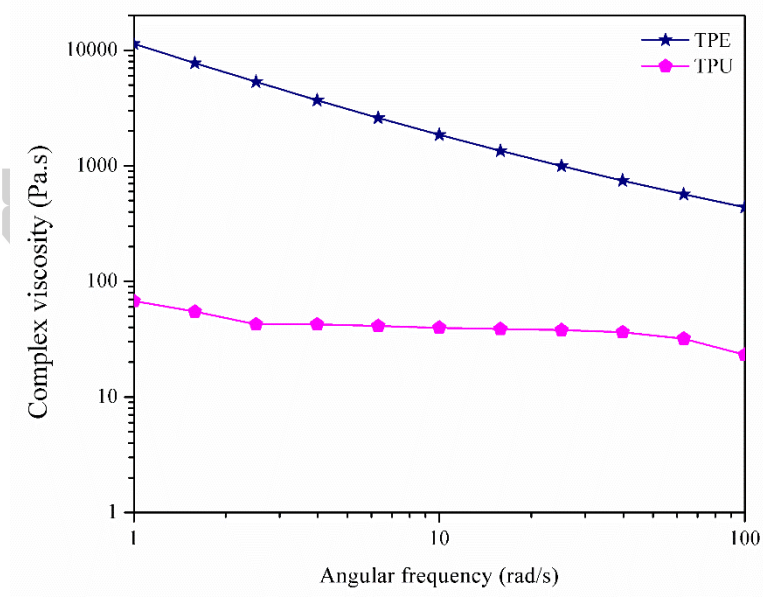
รูปที่ 4.19 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-

สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)

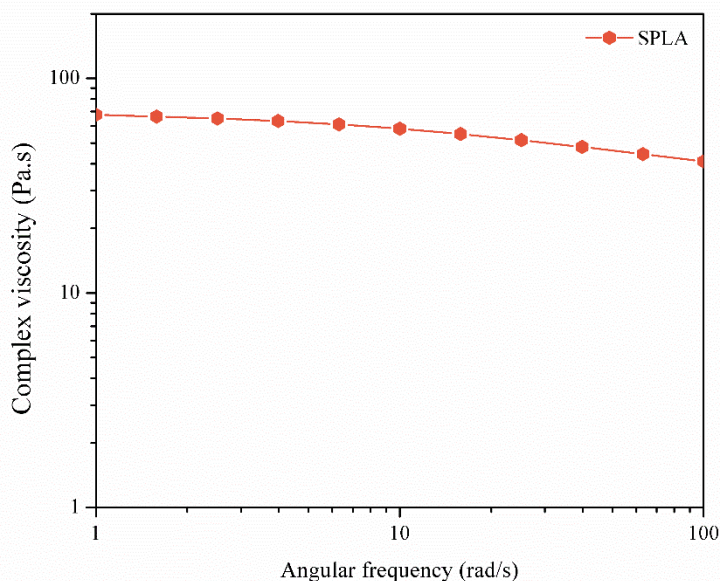
ที่อุณหภูมิ 240 °C



รูปที่ 4.20 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่อุณหภูมิ 220 °C



รูปที่ 4.21 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปที่ 4.22 แสดงค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุง เพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่อุณหภูมิ 200 °C

การศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเครื่อง Rotational rheometer แบบใช้แผ่นคู่ขนาน (Parallel plate) ซึ่งทำการทดสอบในช่วงความถี่ (Frequency) $1 < \omega < 100$ Hz และทำการศึกษาในช่วงของ Linear viscoelasticity เมื่อพิจารณาค่าความหนืดเชิงซ้อนของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม เริ่มจากเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่าพอลิอะคริไลโนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ขณะเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ส่วนพอลิเอไมด์ (PA) ขณะเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian ที่ความถี่การทดสอบน้อยกว่า 10 เรเดียนต่อวินาที และเมื่อความถี่ที่ทดสอบมากกว่า 10 เรเดียนต่อวินาที จะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ขณะที่พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ขณะเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19

เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ขณะเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian ที่ความถี่การทดสอบน้อยกว่า 10 เรเดียนต่อวินาที และเมื่อความถี่ที่ทดสอบมากกว่า 10 เรเดียนต่อวินาที พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด จะแสดงพฤติกรรมการไหล

แบบ Shear thinning ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.22 ส่วนพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ขณะที่เป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ขณะที่พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ขณะเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.20

เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ขณะเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

จากการพิจารณารูปที่ 4.18-4.22 พบว่าในช่วงความถี่ที่ทดสอบสมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเครื่อง Rotational rheometer แบบใช้แผ่นคู่ขนาน (Parallel plate) นั้น เส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม จะแสดงพฤติกรรมการไหลทั้งแบบ Newtonian และแบบ Shear thinning โดยพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian เป็นการไหลที่เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นก็ไม่ทำให้ค่าความหนืดเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning เป็นการไหลที่เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดลดลง ซึ่งเส้นฟิลาเมนต์ที่มีค่า Complex viscosity สูง เมื่อถูกทำให้ไหลผ่านหัวตาย (Nozzle) ก็อาจจะออกมาในลักษณะที่เป็นเส้นที่คงรูป จึงอาจทำให้การยึดติดกันระหว่างเส้นฟิลาเมนต์ในแต่ละชั้นทำได้ไม่ดีเท่าเส้นฟิลาเมนต์ที่มีค่า Complex viscosity น้อยกว่า

ในงานวิจัยนี้ การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ได้ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของหัวตาย (Nozzle) เท่ากับ 0.40 มิลลิเมตร และ 0.80 มิลลิเมตร ตามลำดับ และใช้ความเร็วในการพิมพ์ (Printing speed) 3 ค่า ได้แก่ 30, 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถหาค่าอัตราการไหล (Volumetric flow rate, \dot{Q}) และค่าอัตราเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$) จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kotiba Hamad และคณะ [77]

$$\dot{Q} = \pi R^2 v \quad (1)$$

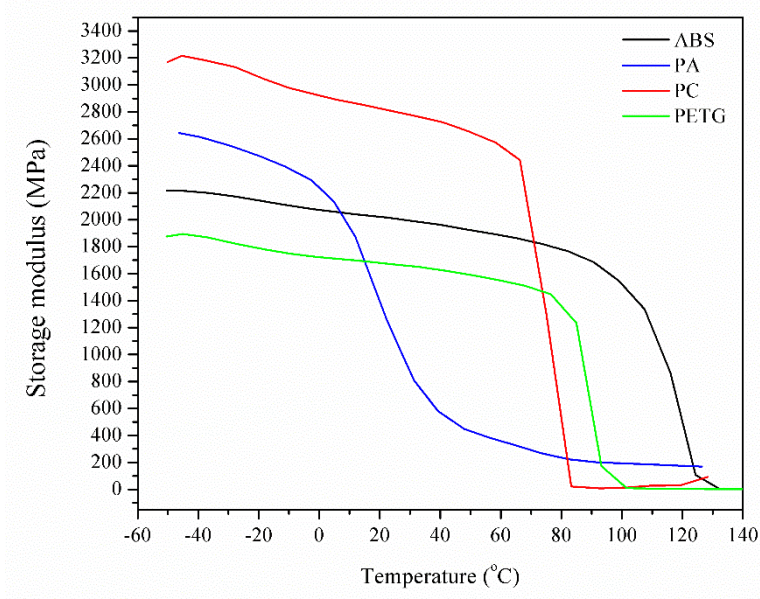
$$\dot{\gamma} = \frac{4\dot{Q}}{\pi R^3} \quad (2)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของหัวตาย และ v คือ ความเร็วในการพิมพ์

จากค่าความเร็วในการพิมพ์ (Printing speed) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ 30, 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที สามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลตามสมการที่ (1) ได้ค่าเท่ากับ 3.77, 5.03 และ 6.28 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ จากนั้นนำค่าอัตราการไหลไปคำนวณหาค่าอัตราเฉือนตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2) ได้ค่าอัตราเฉือนเท่ากับ 600, 800 และ 1000 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราเฉือนที่ได้จากการคำนวณเทียบกับผลการทดสอบจากรูปที่ 4.18-4.22 พบว่าเส้นพลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ทั้ง 10 ชนิด จะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning ทั้งหมด แสดงว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ (Printing speed) จะทำให้ค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิเมอร์ลดลง ทำให้พอลิเมอร์ไหลผ่านหัวตาย (Nozzle) ได้ง่าย นอกจากนี้การศึกษาสมบัติเชิงรีอโลยีด้วยเครื่อง Parallel plate rheometer ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเส้นพลาเมนต์ชนิดใหม่ โดยดูจากค่า Complex viscosity และลักษณะการไหล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เพื่อนำพอลิเมอร์มาผสมกัน

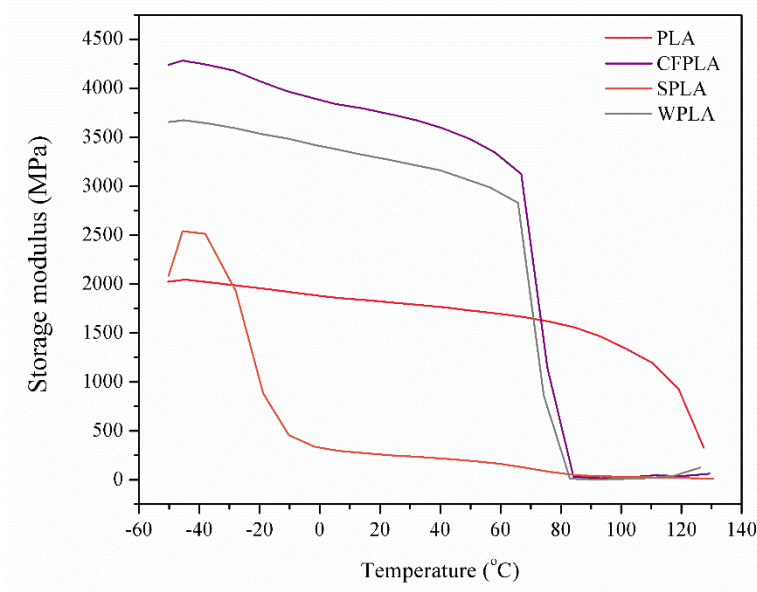
4.1.5 ผลการศึกษาการวิเคราะห์ความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA)

การศึกษาความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) สามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิต่างๆ โดยการใช้เทคนิค DMTA ในโหมดการดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending) ที่ความถี่ (Frequency) ในการทดสอบ 1 เฮิร์ตซ์ และทำการศึกษาในช่วงของ Linear viscoelasticity โดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 130 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งจากการทดสอบจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่า Storage modulus



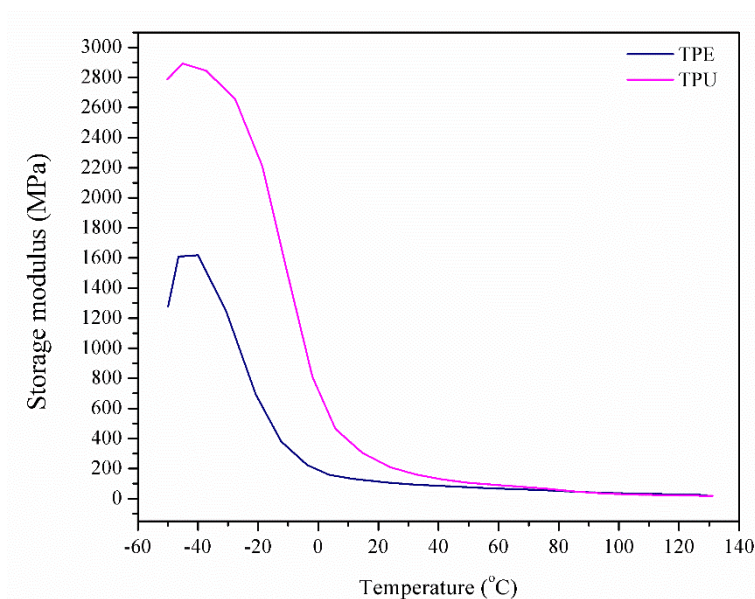
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของ พอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์

จากการศึกษาความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) พบว่าช่วงแรกของการทดสอบที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส จะเห็นว่า พอลิคาร์บอนเนต (PC) มีค่า Storage modulus มากที่สุด ประมาณ 3,200 MPa รองลงมา ได้แก่ พอลิเอไมด์ (PA), พอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) มีค่า Storage modulus ประมาณ 1,900 MPa



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์

จากการศึกษาความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ของเส้นพลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) พบว่าช่วงแรกของการทดสอบที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) มีค่า Storage modulus มากที่สุด ประมาณ 4,250 MPa รองลงมา ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่า Storage modulus ประมาณ 2,000 MPa แต่จะเห็นว่า SPLA จะมีค่า Storage modulus ลดลงที่อุณหภูมิประมาณ -40 °C ซึ่งจะทำให้มีค่า Storage modulus น้อยกว่า PLA

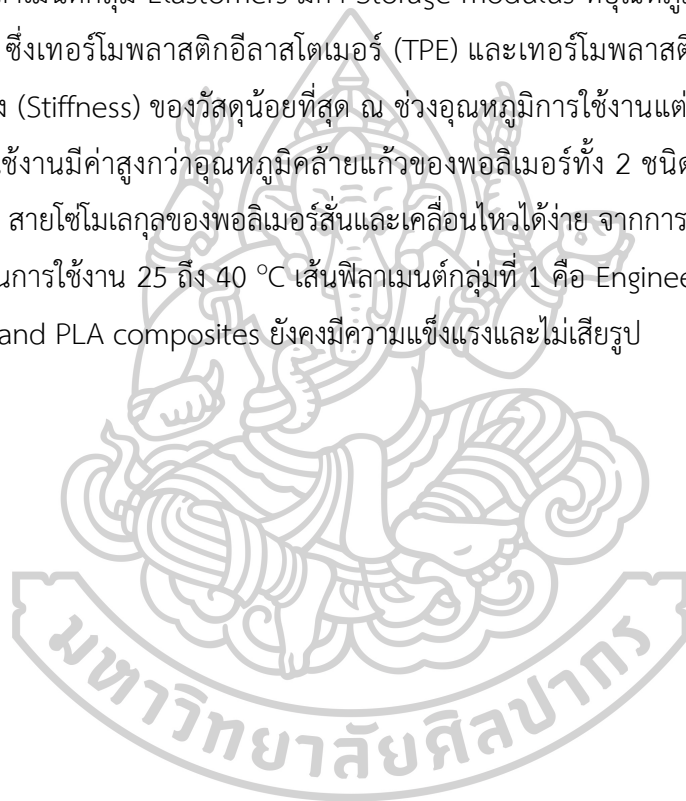


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์

จากการศึกษาความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA) พบว่าช่วงแรกของการทดสอบที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่า Storage modulus มากกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE)

จากรูปที่ 4.23-4.25 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ทั้ง 10 ชนิด โดยค่า Storage modulus เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานเอาไว้ และคืนพลังงานกลับมาอย่างสมบูรณ์เมื่อเอาแรงกระทำออกจากระบบ ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงของส่วนที่ยืดหยุ่น (Elastic) หรือค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของวัสดุ เมื่อพิจารณาในช่วงแรกของการทดสอบที่ -50 องศาเซลเซียส พบว่าค่า Storage modulus ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด จะมีค่าสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียสมีค่าห่างจากอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ ทำให้โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ส่งผลให้ค่า Free volume มีค่าต่ำ สายโซ่โมเลกุลจึงสั่นไหวได้ยาก ทำให้พอลิเมอร์สามารถเก็บพลังงานเอาไว้ได้มาก ค่า Storage modulus จึงสูง เมื่อทำการเพิ่มค่าอุณหภูมิ พบว่าค่า Storage modulus จะมีค่าลดลง โดยค่า Storage modulus ของพอลิเมอร์จะมีค่าค่อยๆ เริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิทดสอบใกล้เคียงกับอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิทดสอบสูงกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้มีพลังงานจลน์มากเพียงพอที่จะทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการสั่นและเคลื่อนไหวได้ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ

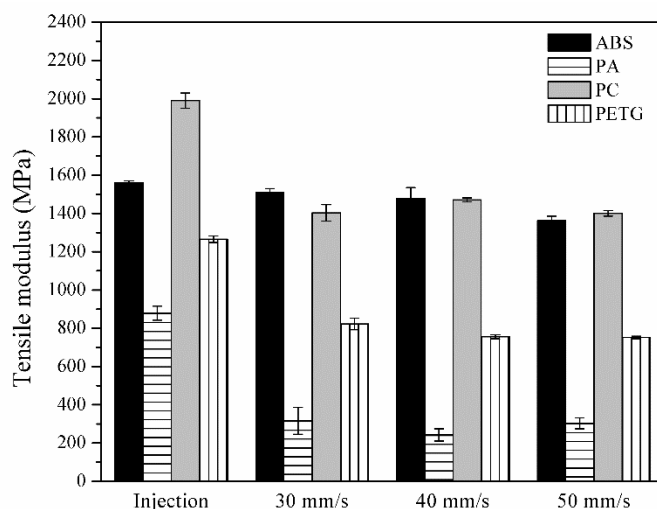
25 ถึง 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการใช้งาน พบว่าเส้นพลาเมตต์กลุ่ม Engineering plastics มีค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ในช่วง 1,600 ถึง 2,800 MPa โดยเส้นพลาเมตต์ชนิดพอลิคาร์บอเนต (PC) มีค่า Storage modulus มากที่สุด เท่ากับ 2,800 MPa ถัดมาเป็นเส้นพลาเมตต์กลุ่ม PLA and PLA composites มีค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ในช่วง 1,800 ถึง 3,700 MPa โดยเส้นพลาเมตต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) มีค่า Storage modulus มากที่สุด เท่ากับ 3,700 MPa ยกเว้นเส้นพลาเมตต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) จะมีค่า Storage modulus เพียง 240 MPa สุดท้ายเส้นพลาเมตต์กลุ่ม Elastomers มีค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ในช่วง 100 ถึง 200 MPa ซึ่งเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุที่น้อยที่สุด ณ ช่วงอุณหภูมิการใช้งานแต่ก็ยังไม่เสียรูป เนื่องจากอุณหภูมิการใช้งานมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกว้างตัวของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้มาก ทำให้เกิด Free volume มาก สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สั้นและเคลื่อนไหวได้ง่าย จากการพิจารณาจะได้ข้อสรุปว่า ช่วงอุณหภูมิในการใช้งาน 25 ถึง 40 °C เส้นพลาเมตต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics และกลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites ยังคงมีความแข็งแรงและไม่เสียรูป



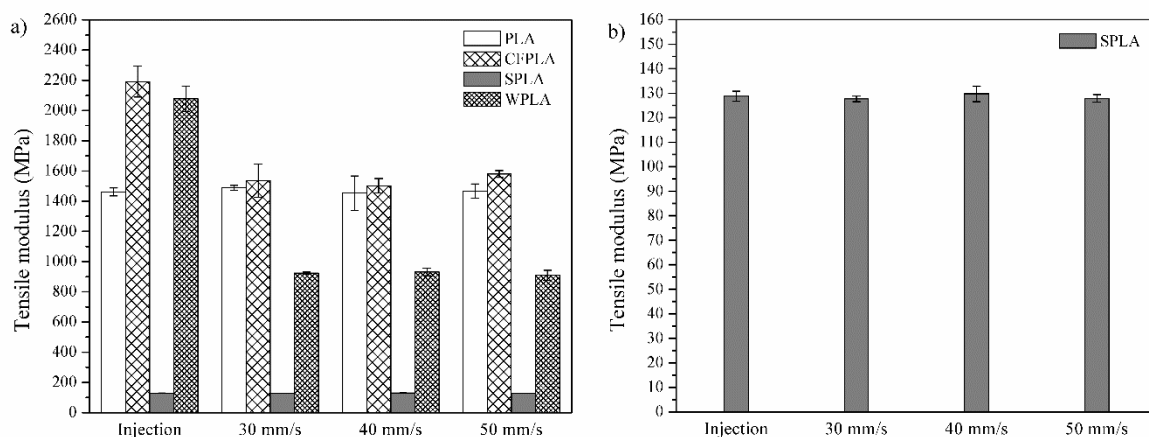
4.2 การศึกษาผลของความเร็วในการพิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ต่อสมบัติเชิงกล

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

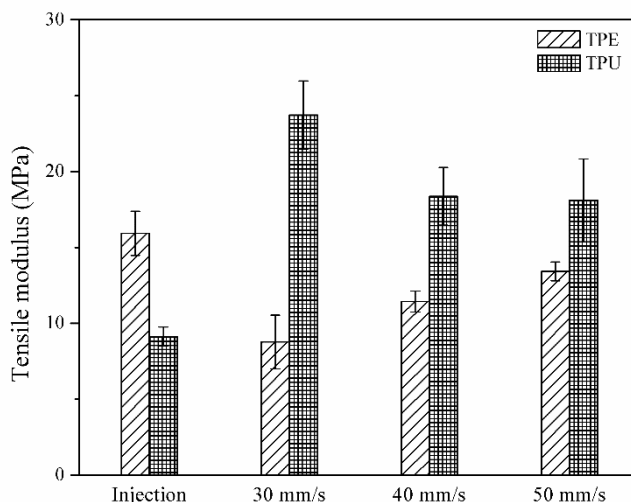
4.2.1.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing)



รูปที่ 4.26 แสดงค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของพอลิอะครีโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)



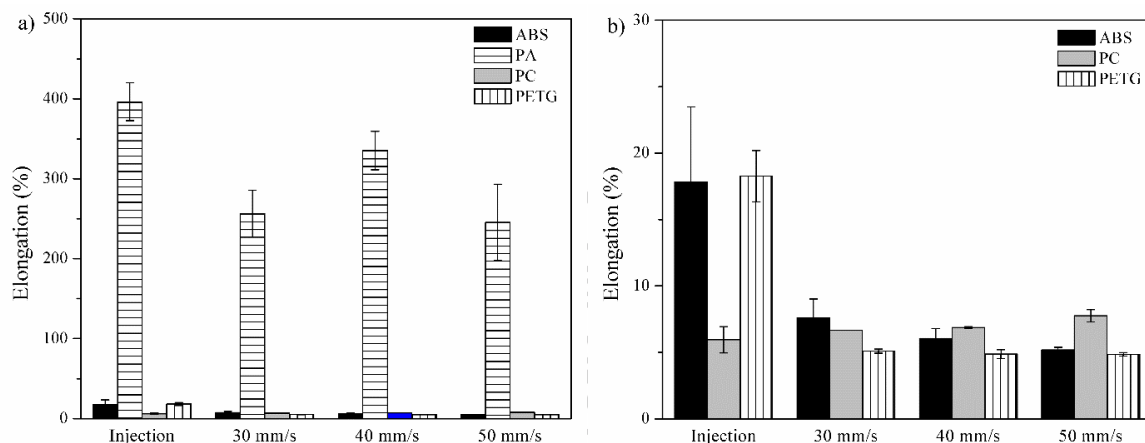
รูปที่ 4.27 แสดงค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)



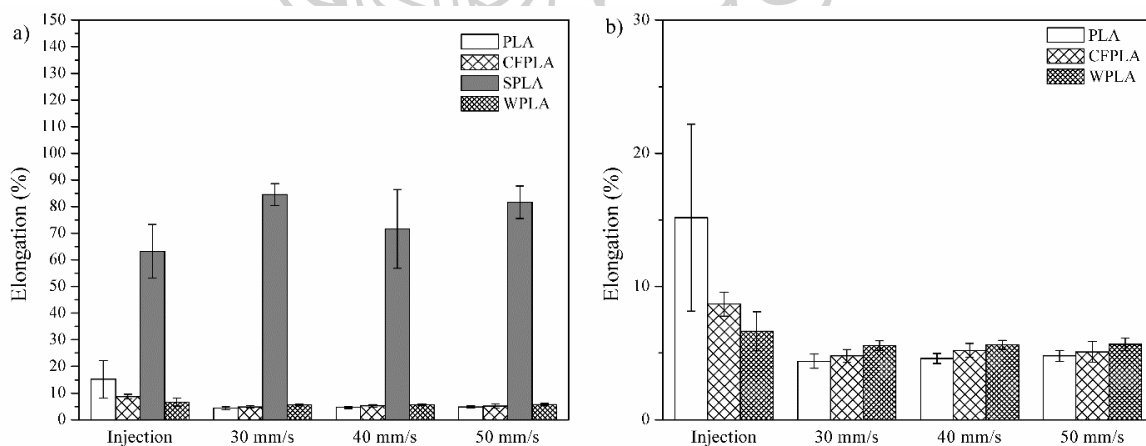
รูปที่ 4.28 แสดงค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

จากรูปที่ 4.26-4.28 เป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-printing) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.26 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่า พอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด มีค่า Tensile modulus มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดที่ใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิคาร์บอเนต (PC) มีค่า Tensile modulus มากที่สุด ประมาณ 2,000 MPa เมื่อพิจารณารูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่า พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Tensile modulus ลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ส่วนพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Tensile modulus ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดที่ใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) มีค่า Tensile modulus มากที่สุด ประมาณ 2,200 MPa เมื่อพิจารณารูปที่ 4.28 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ

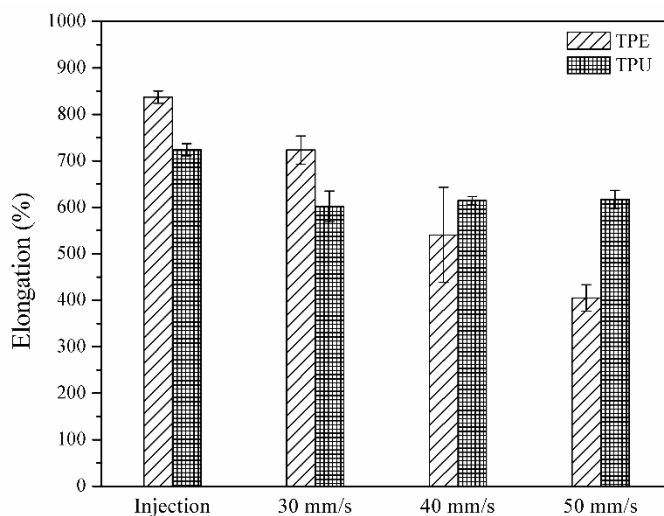
Elastomers พบว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) จะพบว่าเมื่อความเร็วในการพิมพ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Tensile modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีแนวโน้มของค่า Tensile modulus ลดลง



รูปที่ 4.29 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) ของพอลิอะคริลาไมด์-ไตรส-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)

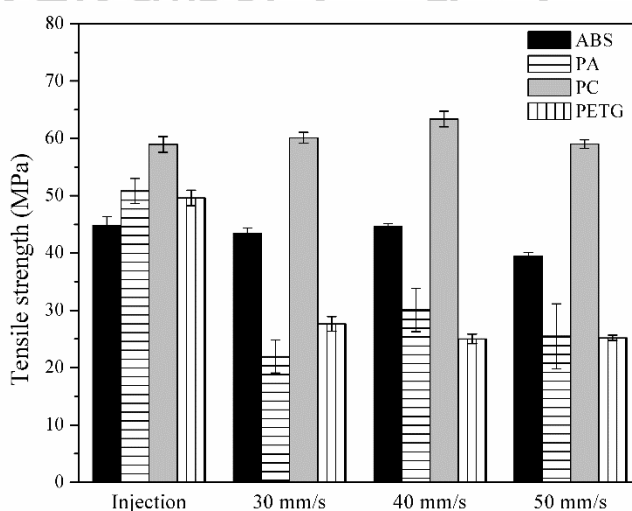


รูปที่ 4.30 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)

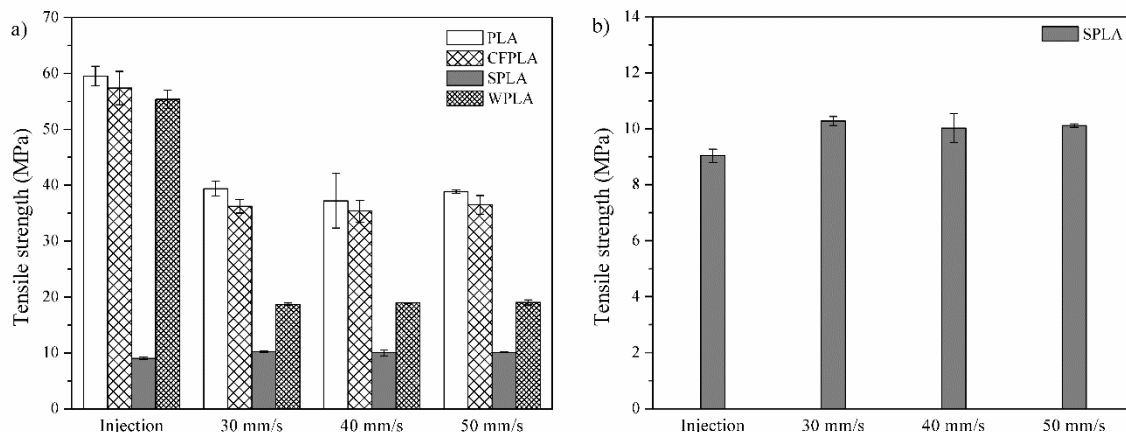


รูปที่ 4.31 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongation) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

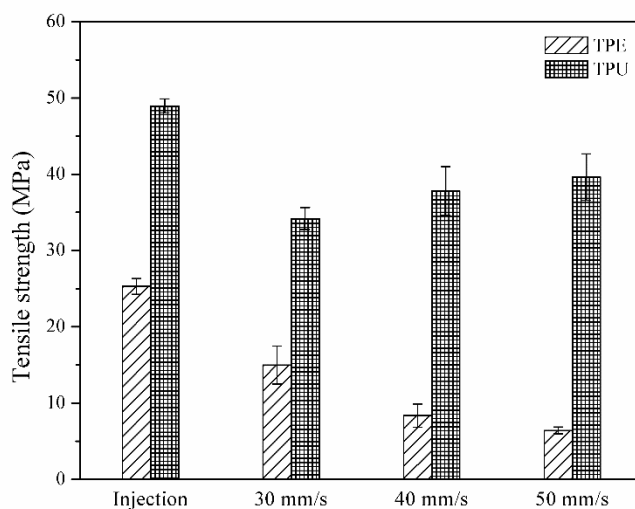
จากรูปที่ 4.29-4.31 เป็นกราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (% Elongation) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-printing) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด



รูปที่ 4.32 แสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile strength) ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)



รูปที่ 4.33 แสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)



รูปที่ 4.34 แสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

จากรูปที่ 4.32-4.34 เป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-printing) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.32 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่าพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และพอลิคาร์บอนเนต (PC) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Tensile strength มีค่าใกล้เคียงกับ

ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ส่วนพอลิเอไมด์ (PA) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Tensile strength ลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด เมื่อพิจารณารูปที่ 4.33 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Tensile strength ลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ส่วนพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Tensile strength ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 4.34 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Tensile strength ลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

เมื่อพิจารณาภาพรวมจากรูปที่ 4.26-4.28 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการยึด (Tensile modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher เริ่มพิจารณาที่เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่าค่า Tensile modulus ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Tensile modulus พบว่าการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Tensile modulus ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ของพอลิเอไมด์ (PA) มีค่า Tensile modulus แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ยังมีค่า Tensile modulus มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วในการพิมพ์เท่ากับ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) มาก ซึ่งรูพรุนเปิดนี้จะเสมือนเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ในขณะที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้พอลิคาร์บอนเนต (PC) ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า Tensile modulus มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้น

รูปโดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ถัดมาเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าค่า Tensile modulus ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยค่า Tensile modulus ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) มีค่ามากที่สุด เนื่องจากจัดเป็นพลาสติกแข็ง (Rigid plastic) อีกทั้งยังเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงและมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Tensile modulus พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) เมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Tensile modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้เส้นใยคาร์บอน และผงไม้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้ดีขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น สุดท้ายเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าค่า Tensile modulus ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Tensile modulus พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Tensile modulus ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) มีเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Tensile modulus ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่าลดลง การที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย Injection molding มีค่า Tensile modulus มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM จะพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะปรากฏช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างชั้นที่เส้นฟิลาเมนต์ซ้อนทับกันภายในชิ้นงาน ซึ่งช่องว่างเหล่านั้นที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของเส้นฟิลาเมนต์ในแต่ละชั้นนั้น ซึ่งจะใช้แรงเค้น (Stress) ในการทำให้ชิ้นงานเสียรูปน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด อีกทั้งชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด มีความเป็นชิ้นงานแข็งที่มีปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ที่แน่นกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่มีช่องว่างภายในชิ้นงาน

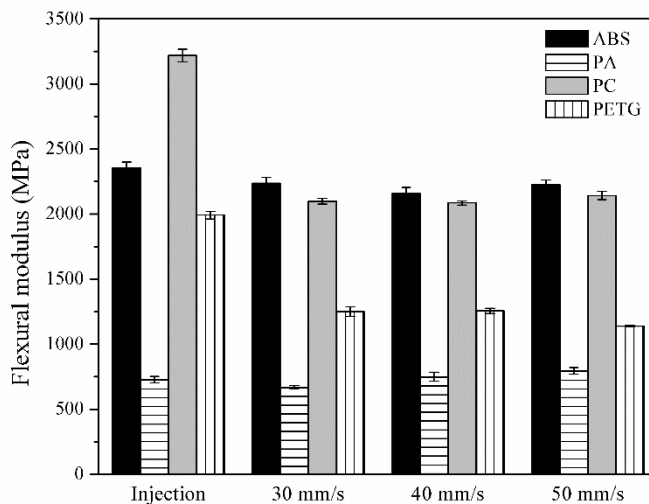
เมื่อพิจารณาภาพรวมจากรูปที่ 4.29-4.31 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด (% Elongation) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher เริ่มพิจารณาที่เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่าค่า % Elongation ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA) และพอลิเอ

ฟิล์มเทอร์พเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า % Elongation พบว่าการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า % Elongation ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที ของพอลิเอไมด์ (PA) มีค่า % Elongation มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ในขณะที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้พอลิคาร์บอเนต (PC) ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า % Elongation แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า % Elongation มากที่สุด ถัดมาเป็นเส้นพลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าค่า % Elongation ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า % Elongation พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้เส้นพลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) เมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ จะทำให้ค่า % Elongation มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สุดท้ายเป็นเส้นพลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าค่า % Elongation ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing แต่เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า % Elongation พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า % Elongation ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) มีค่าลดลง ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า % Elongation ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่าเพิ่มขึ้น

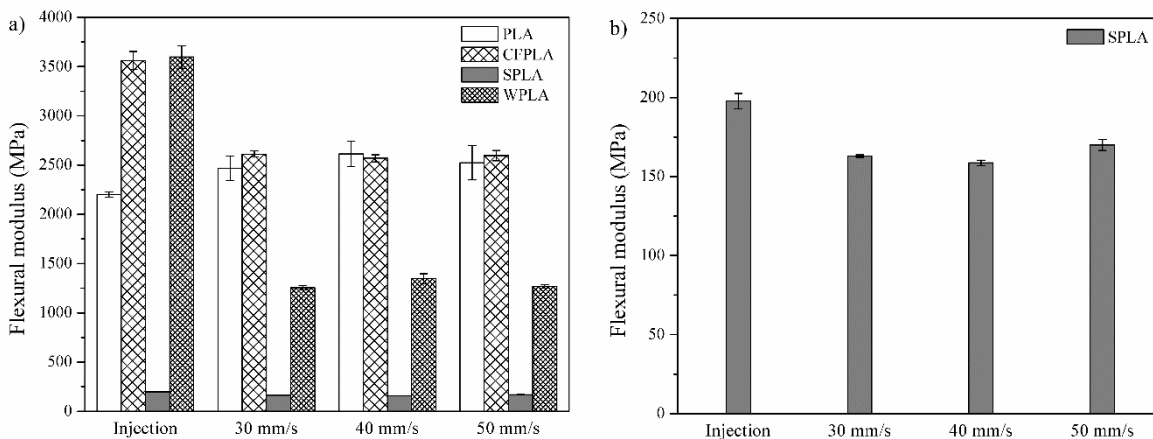
เมื่อพิจารณาภาพรวมจากรูปที่ 4.32-4.34 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของเส้นพลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher เริ่มพิจารณาที่เส้นพลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่าค่า Tensile strength ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA) และพอลิเอทิลีนเทอร์พเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Tensile strength พบว่าการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Tensile strength ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย

3D-Printing มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ของพอลิเอไมด์ (PA) มีค่า Tensile strength แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาทียังมีค่า Tensile strength มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วในการพิมพ์เท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) มากที่สุด ซึ่งรูพรุนเปิดนี้จะเสมือนเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ถัดมาเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าค่า Tensile strength ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Tensile strength พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) เมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Tensile strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30, 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) มีค่า Tensile strength แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์แต่ละความเร็ว พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า Tensile strength มากที่สุด เนื่องจากมีค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานน้อยที่สุด สุดท้ายเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าค่า Tensile strength ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing แต่เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Tensile strength พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Tensile strength ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) มีค่าลดลง ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Tensile strength ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่าเพิ่มขึ้น การที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย Injection molding มีค่า Tensile strength มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM จะพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะปรากฏช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างชั้นที่เส้นฟิลาเมนต์ซ้อนทับกัน ซึ่งช่องว่างเหล่านั้นเปรียบเสมือนเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sung-Hoon Ahn และคณะ [78]

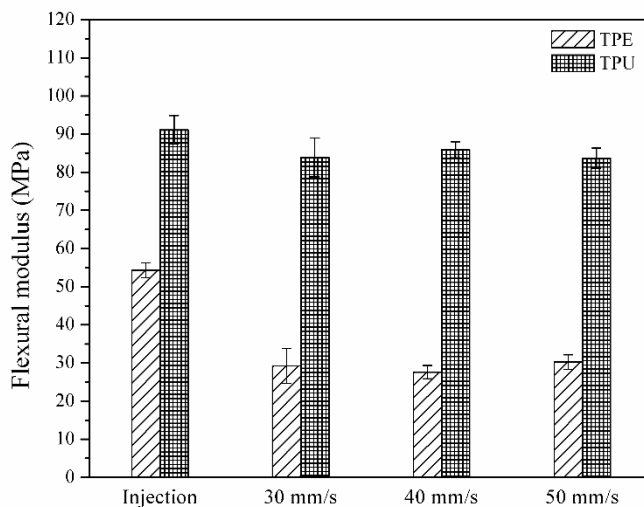
4.2.1.2 ผลการทดสอบความต้านทานการโค้งงอ (Flexural testing)



รูปที่ 4.35 แสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนेट (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วย ไกลคอล (PETG)



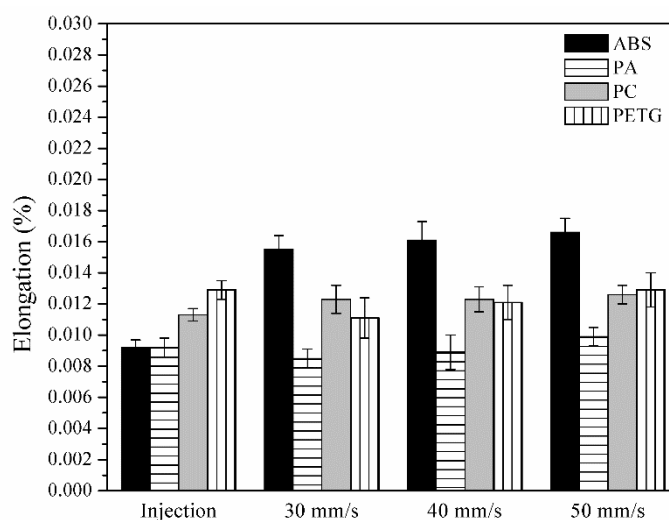
รูปที่ 4.36 แสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วย เส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุง เพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)



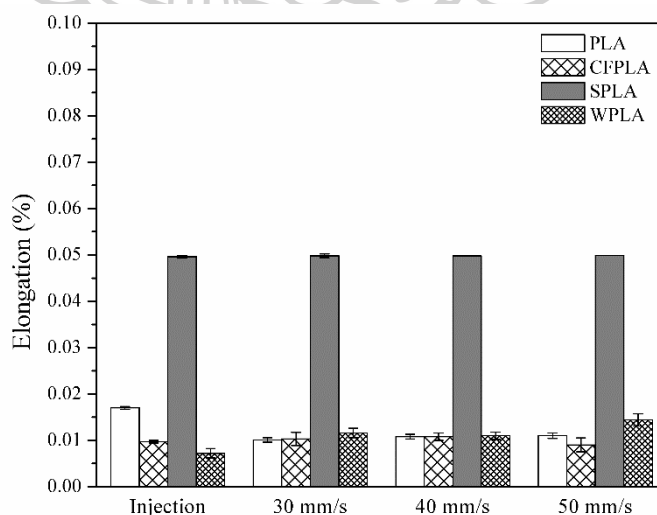
รูปที่ 4.37 แสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

จากรูปที่ 4.35-4.37 เป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-printing) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.35 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่า พอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด มีค่า Tensile modulus มากกว่าขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ โดยขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดโดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิคาร์บอเนต (PC) มีค่า Flexural modulus มากที่สุด ประมาณ 3,200 MPa เมื่อพิจารณารูปที่ 4.36 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่า พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ของขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดมีค่า Flexural modulus มากกว่าขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดโดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) มีค่า Flexural modulus มากที่สุด ประมาณ 3,600 MPa เมื่อพิจารณารูปที่ 4.37 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการดัดโค้ง (Flexural modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ของขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดมีค่า Flexural modulus มากกว่าขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และ

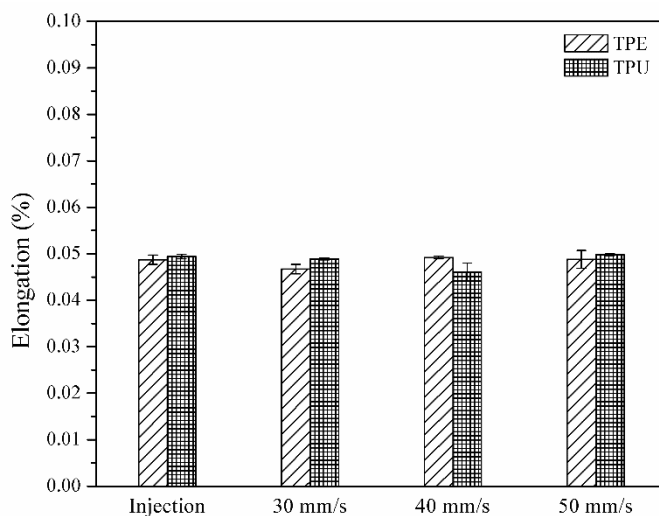
เมื่อพิจารณาเฉพาะชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) จะพบว่าเมื่อความเร็วในการพิมพ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Flexural modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.38 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดแบบโค้งงอ (% Elongation) ของพอลิอะครีโลไนไตรส์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)

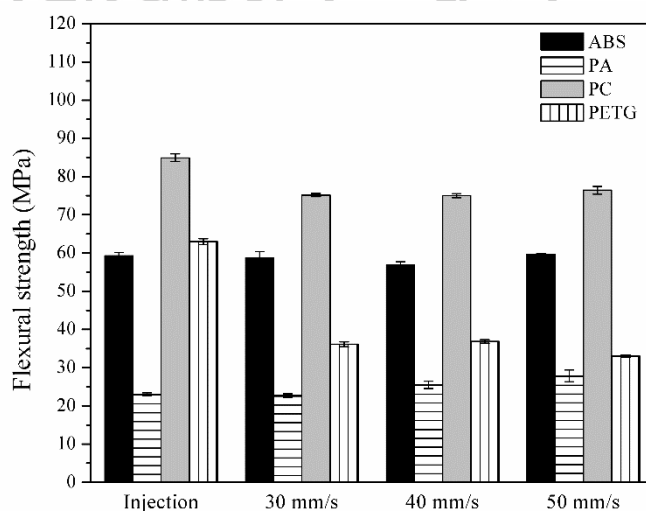


รูปที่ 4.39 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดแบบโค้งงอ (% Elongation) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)

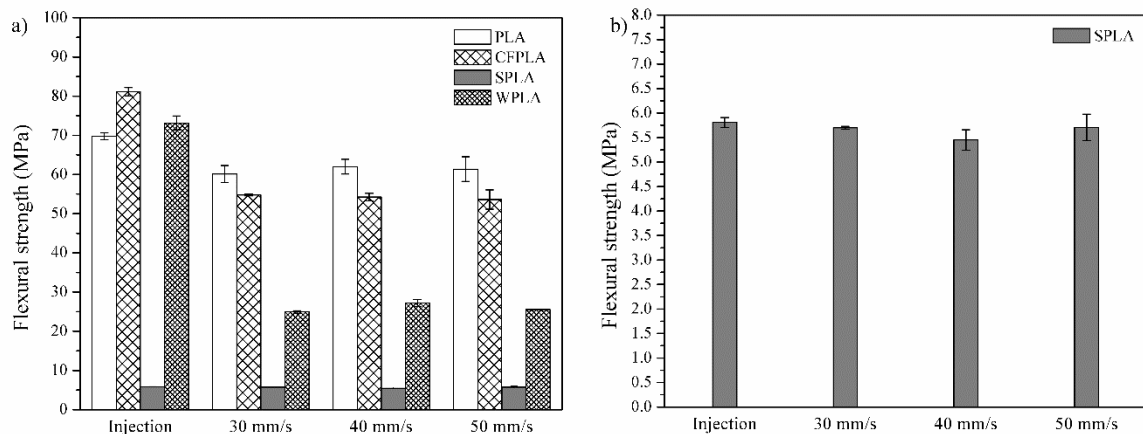


รูปที่ 4.40 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดแบบโค้งงอ (% Elongation) ของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

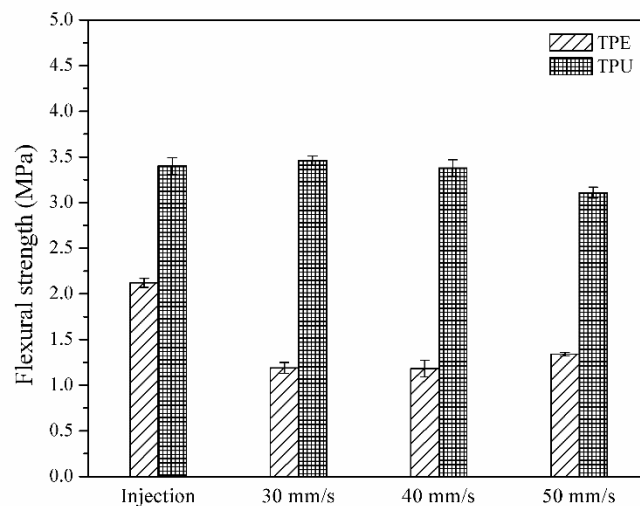
จากรูปที่ 4.38-4.40 เป็นกราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดแบบโค้งงอ (% Elongation) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-printing) พบว่าค่า % Elongation ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 4.41 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)



รูปที่ 4.42 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)



รูปที่ 4.43 แสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

จากรูปที่ 4.41-4.43 เป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-printing) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.41 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่า พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และพอลิเอไมด์ (PA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Flexural strength ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่

ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ส่วนพอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วย ไกลคอล (PETG) พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Flexural strength ลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด เมื่อพิจารณารูปที่ 4.42 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใย คาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ มีค่า Flexural strength ลดลงเมื่อเทียบกับ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ส่วนพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีแนวโน้มของค่า Flexural strength เพิ่มขึ้นเมื่อ เพิ่มความเร็วในการพิมพ์ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.43 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าแนวโน้มค่า Flexural strength ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ แต่เทอร์ โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่า Flexural strength ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์เพื่อขึ้นรูป ชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

เมื่อพิจารณาภาพรวมจากรูปที่ 4.35-4.37 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่ามอดูลัสการโค้ง (Flexural modulus) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความ แปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher เริ่มพิจารณาที่เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่าค่า Flexural modulus ของพอลิอะครีโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิคาร์บอเนต (PC) และ พอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Flexural modulus พบว่าการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Flexural modulus ของชิ้นงาน ที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็ว การพิมพ์เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ของพอลิเอไมด์ (PA) มีค่า Flexural modulus มากกว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30 และ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้น รูปโดยใช้ความเร็วในการพิมพ์เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีช่องว่างภายในชิ้นงานน้อยที่สุด ในขณะที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้พอลิคาร์บอเนต (PC) ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 30,

40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า Flexural modulus แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า Flexural modulus มากที่สุด ถัดมาเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าค่า Flexural modulus ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Flexural modulus พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) เมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Flexural modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ เส้นใยคาร์บอนและผงไม้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้ดีขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น สุดท้ายเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าค่า Flexural modulus ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วย 3D-Printing เมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ก็จะทำให้ค่า Flexural modulus เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า Flexural modulus มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนเทอร์โมพลาสติกพลียูรีเทน (TPU) พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ก็จะทำให้ค่า Flexural modulus มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ลดลง การที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดมีค่า Flexural modulus มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด มีความเป็นชิ้นงานแข็งที่มีปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ที่แน่นกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่มีช่องว่างภายในชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาภาพรวมจากรูปที่ 4.38-4.40 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดแบบโค้งงอ (% Elongation) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher เริ่มพิจารณาที่เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่าค่า % Elongation ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า % Elongation พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า % Elongation มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อ

วินาที ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC), และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) มีค่า % Elongation มากที่สุด ซึ่งมีค่า % Elongation มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วในการพิมพ์เท่ากับ 30 และ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) น้อยที่สุด ถัดมาเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าค่า % Elongation ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า % Elongation พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) เมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า % Elongation มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สูดท้ายเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า % Elongation ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาภาพรวมจากรูปที่ 4.41-4.43 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher เริ่มพิจารณาที่เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics พบว่าค่า Flexural strength ของพอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Flexural strength พบว่าการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Flexural strength ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และพอลิเอไมด์ (PA) มีค่า Flexural strength มากที่สุด ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์ 30 และ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) น้อยที่สุด ถัดมาเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites พบว่าค่า Flexural strength ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน

(CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing โดยเมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Flexural strength พบว่าการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Flexural strength ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D-Printing โดยใช้ความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30, 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ของพอลิแลคติก แอซิด (PLA) มีค่า Flexural strength แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า Flexural strength มากที่สุด ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่า Flexural strength มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์ 30 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่โพลิเมอร์และผงไม้ได้ดีขึ้น สุดท้ายเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers พบว่าค่า Flexural strength ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป Injection molding มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing แต่เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ต่อค่า Flexural strength พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Flexural strength ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Flexural strength ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีค่าลดลง การที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย Injection molding มีค่า Flexural strength มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย 3D-Printing เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM จะพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะปรากฏช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างชั้นที่เส้นฟิลาเมนต์ซ้อนทับกัน ซึ่งช่องว่างเหล่านั้นเปรียบเสมือนเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sung-Hoon Ahn และคณะ [78] และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของความเร็วการพิมพ์ (Printing speed) ที่ส่งผลต่อความต้านทานต่อการตัดโค้ง พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปความเร็วในการพิมพ์ 30 mm/s มีค่า Flexural strength มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์ 40 mm/s และ 50 mm/s และค่า Flexural strength ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์ 40 mm/s มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K. G. Jaya Christiyana และคณะ [61] จากงานวิจัย พบว่าความเร็วในการพิมพ์ต่ำ จะทำให้การยึดติด (Bonding) ระหว่างชั้นของเส้นฟิลาเมนต์ยึดติดกันได้ดี

อีกทั้งยังทำให้การจัดเรียงตัวตามทิศทางการขึ้นรูปทำได้ดีกว่าความเร็วในการพิมพ์สูง ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

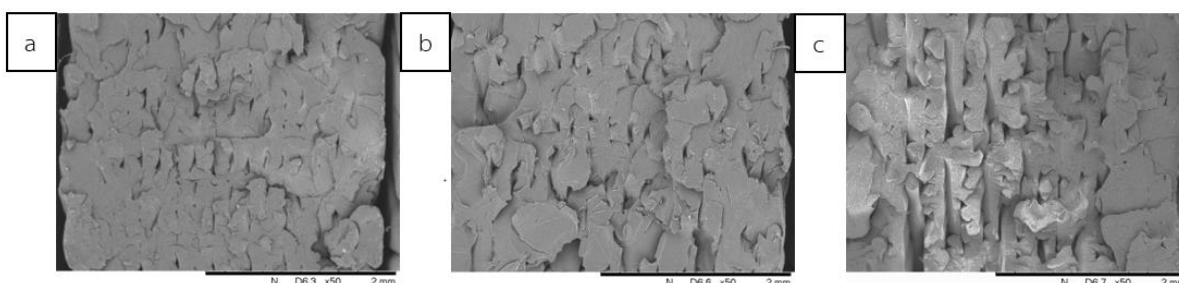
4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

การศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเทคนิคที่สามารถบ่งบอกลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นฟิลาเมนต์ และการยึดติดกันของเส้นฟิลาเมนต์ โดยชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาได้จากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile specimen) และมีการใช้กำลังขยาย 50 เท่า

4.2.2.1 เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 Engineering plastics

(ก) พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS)

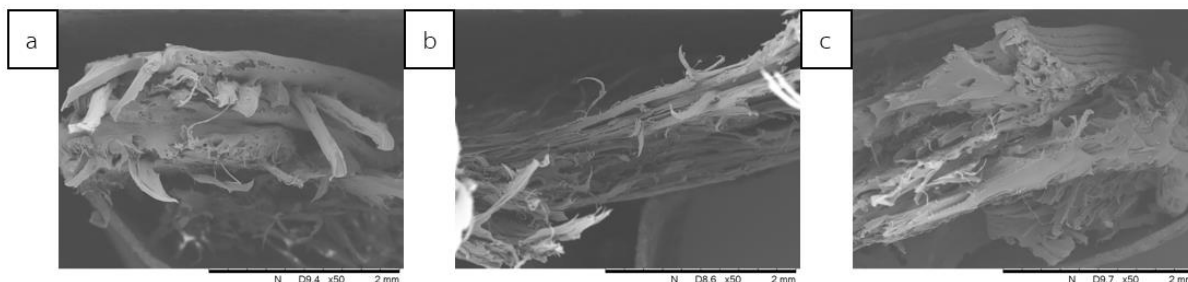
จากการพิจารณารูปที่ 4.44 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ ABS ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานแบบเปราะ (Brittle fracture) นอกจากนี้ยังพบช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างเส้นฟิลาเมนต์



รูปที่ 4.44 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(ข) พอลิเอไมด์ (PA)

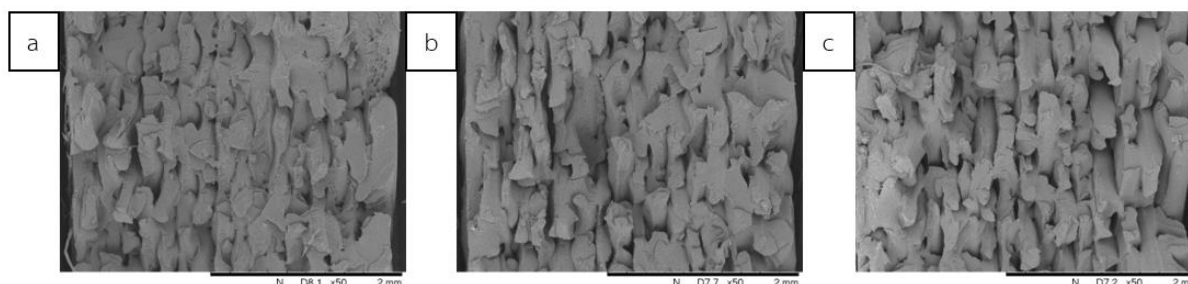
จากการพิจารณารูปที่ 4.45 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ PA ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานแบบเหนียว (Ductile fracture)



รูปที่ 4.45 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(ข) พอลิคาร์บอเนต (PC)

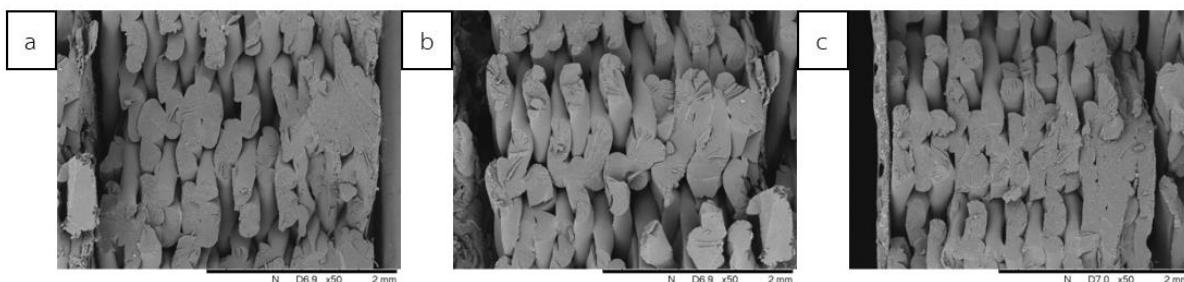
จากการพิจารณารูปที่ 4.46 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ PC ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานแบบเปราะ (Brittle fracture) นอกจากนี้ยังพบช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างเส้นฟิลาเมนต์



รูปที่ 4.46 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(ง) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)

จากการพิจารณารูปที่ 4.47 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ PETG ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานแบบเปราะ (Brittle fracture) นอกจากนี้ยังพบช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างเส้นฟิลาเมนต์

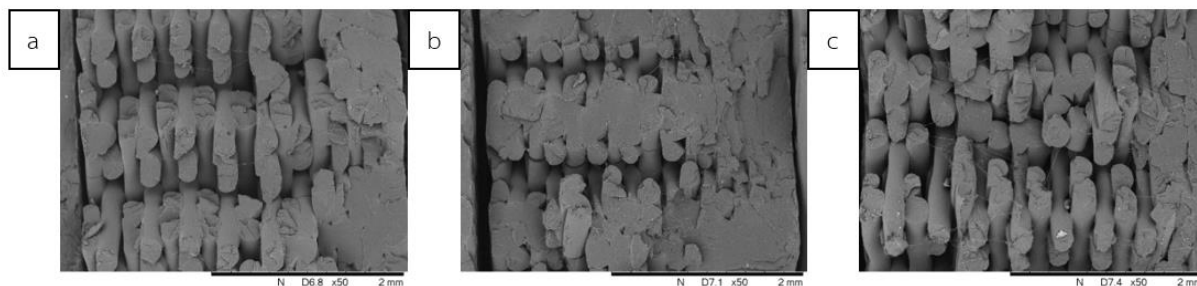


รูปที่ 4.47 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ ถูกปรับปรุงด้วยโกลคอลล (PETG) ที่ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วย ความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

4.2.2.2 เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 PLA and PLA composites

(ก) พอลิแลคติกแอซิด (PLA)

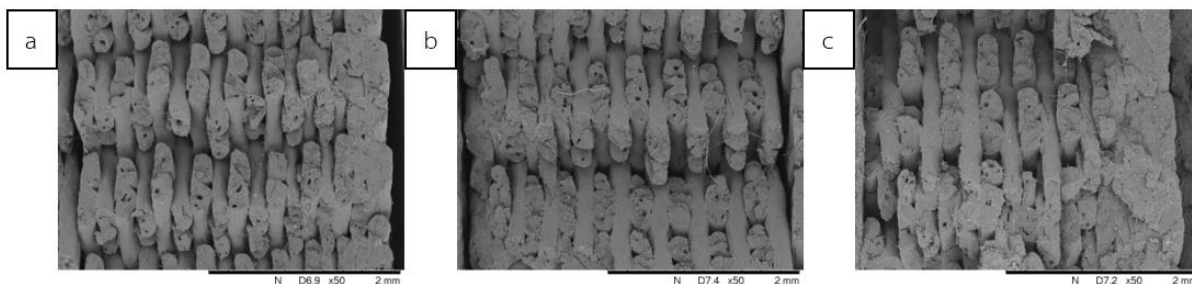
จากการพิจารณารูปที่ 4.48 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ PLA ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของ ขึ้นงานแบบเปราะ (Brittle fracture) นอกจากนี้ยังพบช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างเส้นฟิลาเมนต์



รูปที่ 4.48 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(ข) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA)

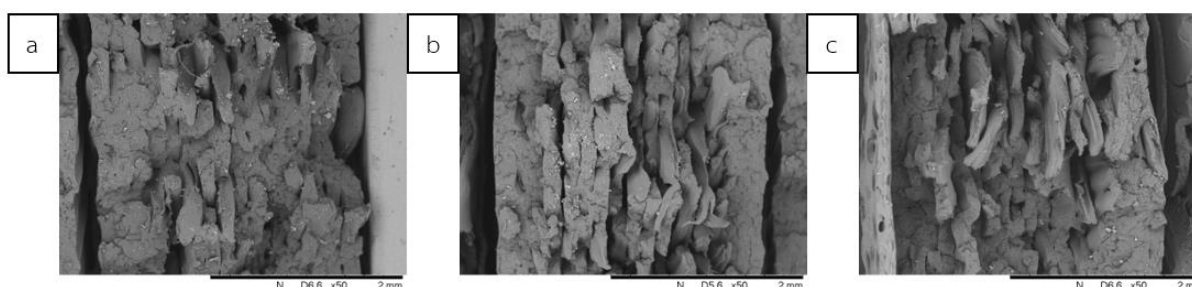
จากการพิจารณารูปที่ 4.49 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ CFPLA ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของ ขึ้นงานแบบเปราะ (Brittle fracture) นอกจากนี้ยังพบหลุม (Voids) บนพื้นผิวขึ้นงาน



รูปที่ 4.49 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(ค) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA)

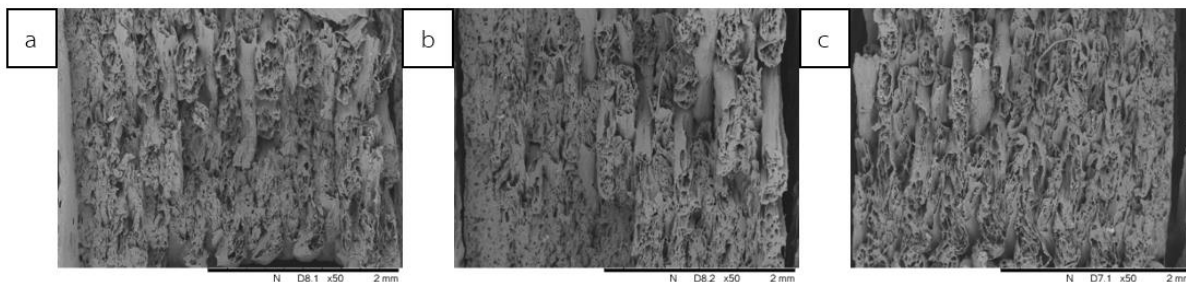
จากการพิจารณารูปที่ 4.50 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ SPLA ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของขึ้นงานแบบเหนียว (Ductile fracture) นอกจากนี้ยังพบช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างเส้นฟิลาเมนต์



รูปที่ 4.50 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(ง) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)

จากการพิจารณารูปที่ 4.51 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ WPLA ได้จากการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของขึ้นงานแบบเปราะ (Brittle fracture) นอกจากนี้ยังพบหลุม (Voids) บนพื้นผิวขึ้นงาน

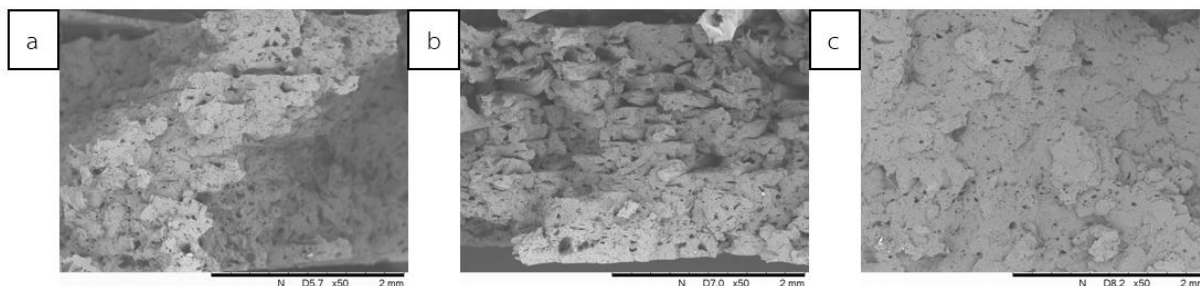


รูปที่ 4.51 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

4.2.2.3 เส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 Elastomers

(ก) เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE)

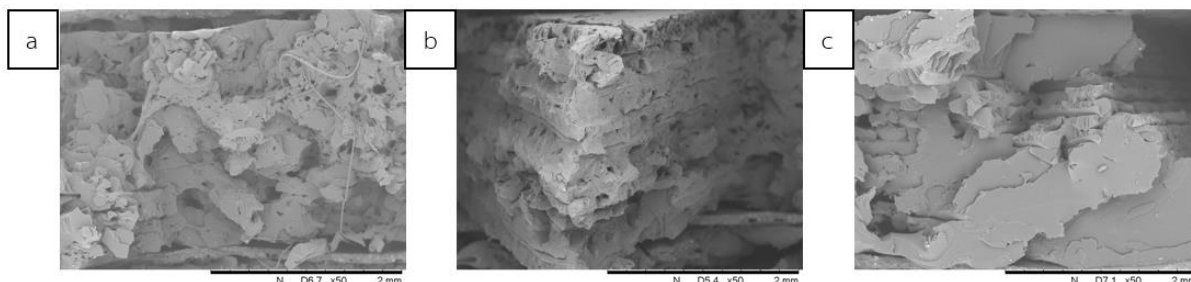
จากการพิจารณารูปที่ 4.52 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ TPE ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานแบบเหนียว (Ductile fracture) นอกจากนี้ยังพบช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างเส้นฟิลาเมนต์



รูปที่ 4.52 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

(ข) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU)

จากการพิจารณารูปที่ 4.53 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของ TPU ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานแบบเหนียว (Ductile fracture) นอกจากนี้ยังพบช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างเส้นฟิลาเมนต์



รูปที่ 4.53 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์; (a) 30 mm/s, (b) 40 mm/s และ (c) 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า

เมื่อพิจารณาภาพรวมจากการพิจารณารูปที่ 4.44-4.53 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 Engineering plastics ได้แก่ พอลิอะคริไลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ถัดมาเป็นเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 PLA and PLA composites ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) สุดท้ายเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 Elastomers ได้แก่ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์เท่ากับ 30 mm/s, 40 mm/s และ 50 mm/s ที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่าพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบการดึงยึด (Fracture surface of tensile specimen) ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่ม Engineering plastics จะมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) ซึ่งเส้นฟิลาเมนต์จะเกิดการยืดออกก่อนเกิดการแตกหักของชิ้นงาน ถัดมาเป็นพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบการดึงยึดของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่ม PLA and PLA composites จะมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) ซึ่งพื้นผิวของชิ้นงานจะเรียบ ยกเว้นเนฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ซึ่งจะมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) และเห็นการฉีกออกของเนื้อพอลิเมอร์ เนื่องจากถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียวด้วย PEG สุดท้ายเป็นพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบการดึงยึดของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่ม Elastomers จะมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) เมื่อพิจารณาผลของความเร็วในการพิมพ์ทั้ง 3 ความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน พบว่าเมื่อสังเกตพื้นผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะพบช่องว่าง (Air-gaps) ระหว่างชั้น โดยที่ช่องว่างระหว่างชั้น

ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วการพิมพ์เท่ากับ 30 mm/s, 40 mm/s และ 50 mm/s มีปริมาณใกล้เคียงกัน จึงต้องคำนวณหาปริมาตรของช่องว่าง (Air-gaps) ในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งปริมาตรของช่องว่างในชิ้นงานจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบ Tensile testing และ Flexural testing ในรูป 4.49 เมื่อพิจารณาพื้นผิวการแตกหักของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) จะพบหลุม (Voids) และเส้นใยในแต่ละชั้น โดยหลุมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหลุดออกของเส้นใยคาร์บอนในระหว่างการทดสอบการดึงยึด ส่วนพื้นผิวการแตกหักจากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ดังแสดงในรูปที่ 4.51 พบว่าเกิดหลุมทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่จำนวนมากกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน เนื่องจากเกิดหลุดออกของผงไม้ซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่เติมลงไปผสมกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยการที่เกิดหลุมจำนวนมากเนื่องมาจากการยึดติดกันระหว่างพอลิเมอร์และผงไม้ เกิดการยึดติดกันไม่ได้

ตารางที่ 4.16 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural specimen) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย		ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ					
		กระบวนการฉีด		30 mm/s		40 mm/s		50 mm/s	
		น้ำหนักเฉลี่ย (g)	SD	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	SD	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	SD	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	SD
Engineering Plastics	ABS	5.9748	0.0112	5.5185	0.0177	5.7773	0.0252	5.9375	0.0316
	PA	5.7126	0.0256	5.1123	0.1162	5.4120	0.0883	5.6264	0.1155
	PC	6.8346	0.0145	6.7678	0.0635	6.7048	0.0543	6.6383	0.0955
	PETG	6.4399	0.0098	5.4959	0.0199	5.4125	0.0399	5.0185	0.0553
PLA and PLA Composites	PLA	6.0747	0.0095	5.7926	0.0109	5.7466	0.0604	5.7526	0.0622
	CFPLA	6.0995	0.0212	5.5330	0.1158	5.4360	0.1754	5.4333	0.0467
	SPLA	6.4925	0.0144	6.4210	0.0364	6.4023	0.0441	6.4125	0.0487
	WPLA	6.2748	0.0088	3.7823	0.0092	3.7674	0.0136	3.7604	0.0134
Elasto- mers	TPE	6.0719	0.0284	5.4550	0.1378	5.6567	0.2438	5.9162	0.0413
	TPU	6.7046	0.0137	6.3486	0.0774	6.3686	0.0660	6.3401	0.0665

จากการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งจะเห็นช่องว่างภายในชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงได้นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการขึ้นรูป 30, 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ไปชั่งน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.16 ซึ่งพบว่าความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานที่ต่างกัน ไม่ได้ทำให้น้ำหนักของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลง เป็นการยืนยันว่าอัตราการป้อน (Feed rate) ของเส้นฟิลาเมนต์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความเร็วการพิมพ์ทั้ง 3 ค่า มีค่าอัตราการป้อนเท่ากัน โดยในตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงค่าส่วนต่างของปริมาตรชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เทียบกับปริมาตรชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะมีปริมาตรที่มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด อยู่ในช่วง 6 – 15 % แต่ก็เห็นว่าถึงแม้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะมีปริมาตรที่มากกว่า แต่กลับมีน้ำหนักชิ้นงานที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด แสดงว่าภายในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีช่องว่าง จึงทำให้มีน้ำหนักที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ดังแสดงในตารางที่ 4.18 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานจาก 30 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็น 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที จะส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานมีความแตกต่างจากน้ำหนักชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดลดลง แสดงว่าการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ทำให้ช่องว่างภายในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่าลดลง เนื่องจากความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นความเร็วที่มากที่สุด เมื่อเส้นฟิลาเมนต์หลอมเหลวถูกผลักออกมาจากหัวตาย (Nozzle) แล้วพิมพ์ลงบนฐานพิมพ์ยังคงมีความร้อนอยู่จึงเกิดการเชื่อมติดกันระหว่างเส้นฟิลาเมนต์ได้ดี จึงทำให้ช่องว่างลดลงเมื่อเทียบกับความเร็วในการพิมพ์ 40 และ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งผลของช่องว่างภายในชิ้นงานที่ลดลงเมื่อความเร็วในการพิมพ์เพิ่มขึ้น ยังสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลที่ว่าเมื่อความเร็วในการพิมพ์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Tensile strength ค่า Tensile modulus ค่า Flexural strength และค่า Flexural modulus มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าส่วนต่างของปริมาตรชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เทียบกับ ปริมาตรชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย	ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ						
		กระบวนการฉีด	30 mm/s			40 mm/s		50 mm/s	
			ปริมาตร (cm ³)	ปริมาตร (cm ³)	ส่วนต่าง ปริมาตร (%)	ปริมาตร (cm ³)	ส่วนต่าง ปริมาตร (%)	ปริมาตร (cm ³)	ส่วนต่าง ปริมาตร (%)
Engineering Plastics	ABS	5.16	5.70	10.47	5.89	14.15	5.98	15.89	
	PA	4.97	5.58	12.27	5.70	14.69	5.75	15.69	
	PC	5.30	5.99	13.02	5.97	12.64	5.86	10.57	
	PETG	5.15	5.17	0.39	5.11	-0.78	5.00	-2.91	
PLA and PLA Composites	PLA	5.19	5.20	0.19	5.18	-0.19	5.13	-1.16	
	CFPLA	5.06	5.06	0.00	4.99	-1.38	4.96	-1.98	
	SPLA	5.01	5.55	10.78	5.58	11.38	5.52	10.18	
	WPLA	4.91	5.30	7.94	5.32	8.35	5.42	10.39	
Elastomers	TPE	4.82	5.28	9.54	5.36	11.20	5.46	13.28	
	TPU	5.02	5.34	6.37	5.37	6.97	5.40	7.57	

หมายเหตุ : ค่าบวก คือ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีปริมาตรมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด
 ค่าลบ คือ ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีปริมาตรน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ชิ้นงานที่ ขึ้นรูปด้วย กระบวนการ การฉีด	ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ					
			30 mm/s		40 mm/s		50 mm/s	
		น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก ที่ลดลง เทียบกับ กระบวนการ การฉีด (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก ที่ลดลง เทียบกับ กระบวนการ การฉีด (%)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก ที่ลดลง เทียบกับ กระบวนการ การฉีด (%)
Engineering Plastics	ABS	5.9748	5.5185	7.64	5.7773	3.31	5.9375	0.62
	PA	5.7126	5.1123	10.51	5.4120	5.26	5.6264	1.51
	PC	6.8346	6.7678	0.98	6.7048	1.90	6.6383	2.87
	PETG	6.4399	5.4959	14.66	5.4125	15.95	5.0185	22.07
PLA and PLA Composites	PLA	6.0747	5.7926	4.64	5.7466	5.40	5.7526	5.30
	CFPLA	6.0995	5.5330	9.29	5.4360	10.88	5.4333	10.92
	SPLA	6.4925	6.4210	1.10	6.4023	1.39	6.4125	1.23
	WPLA	6.2748	3.7823	39.72	3.7674	39.96	3.7604	40.07
Elasto- mers	TPE	6.0719	5.4550	10.16	5.6567	6.84	5.9162	2.56
	TPU	6.7046	6.3486	5.31	6.3686	5.01	6.3401	5.44

การทดสอบหารูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยตัดชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบจากชิ้นงานการทดสอบความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural specimen) ให้มีขนาดกว้าง 10.57 ± 0.22 มิลลิเมตร ยาว 12.48 ± 0.10 มิลลิเมตร และหนา 3.48 ± 0.20 มิลลิเมตร เมื่อตัดชิ้นงานได้ขนาดตามที่ต้องการแล้ว นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนัก เมื่อชั่งน้ำหนักเสร็จให้นำชิ้นงาน

ไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ครบเวลาที่กำหนดให้เซ็ดชิ้นงานให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ตามสมการที่ (3)

$$OP (\%) = \frac{(m_{sat} - m_{dry}) / \rho_{water}}{V} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ m_{sat} คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำกลั่น

m_{dry} คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการอบ

ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำ

V คือ ปริมาตรของชิ้นงานทดสอบ

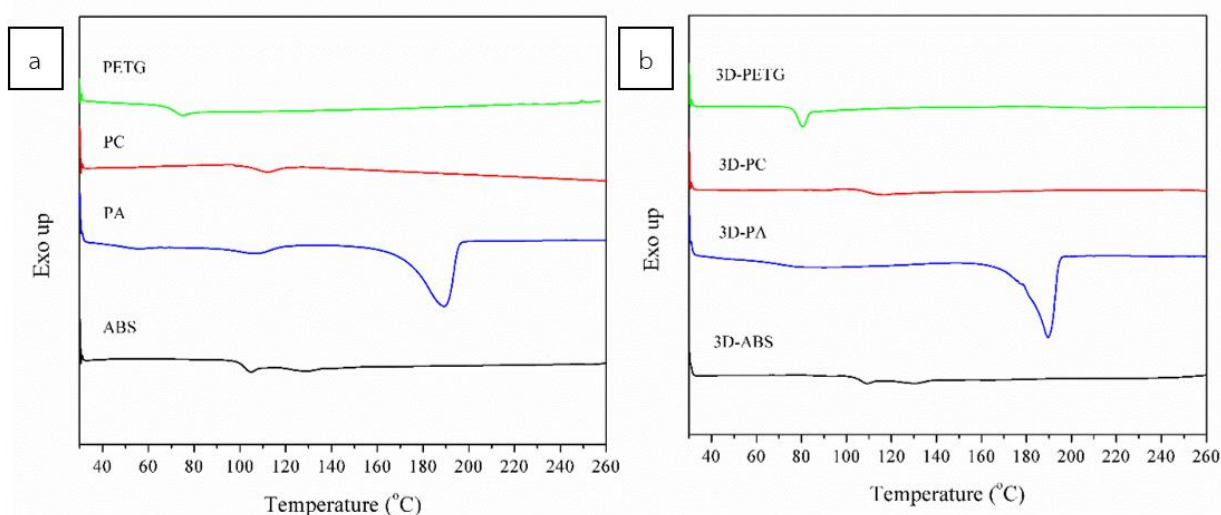
จากการทดสอบจะได้ค่า Open porosity ดังแสดงในตารางที่ 4.19 ซึ่งพบว่าการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์จะทำให้ค่า Open porosity ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่าลดลง โดยในงานวิจัยนี้ใช้มุมในการขึ้นรูป (Raster orientation) เท่ากับ $\pm 45^\circ$ เนื่องจากมีค่า Open porosity ที่น้อยกว่าการขึ้นรูปโดยใช้มุมในการขึ้นรูป (Raster orientation) เท่ากับ $0^\circ/90^\circ$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marco Leite และคณะ [79] โดยการมี Open porosity ภายในชิ้นงานน้อย แสดงให้เห็นว่าจะเกิดจุดรวมความเค้น (Stress concentration) น้อย ซึ่งการเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ส่งผลให้ค่า Open porosity ลดลง สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล ที่พบว่าเมื่อความเร็วในการพิมพ์มากขึ้น ส่งผลให้ค่า Tensile strength ค่า Tensile modulus ค่า Flexural strength และค่า Flexural modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.19 แสดงค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ค่า Open Porosity (%) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ		
		30 mm/s	40 mm/s	50 mm/s
Engineering Plastics	ABS	0.69 ± 0.06	0.51 ± 0.14	0.44 ± 0.10
	PA	10.08 ± 1.85	5.85 ± 0.63	5.23 ± 0.12
	PC	0.48 ± 0.00	0.65 ± 0.24	0.59 ± 0.11
	PETG	1.55 ± 0.61	2.11 ± 0.47	1.39 ± 0.47
PLA and PLA composites	PLA	1.88 ± 0.57	1.68 ± 0.37	1.60 ± 0.15
	CFPLA	1.64 ± 0.39	1.88 ± 0.37	1.95 ± 0.24
	SPLA	1.39 ± 0.19	1.33 ± 0.11	1.30 ± 0.08
	WPLA	2.88 ± 0.47	3.22 ± 1.36	2.81 ± 0.85
Elasto- mers	TPE	1.69 ± 0.35	1.74 ± 0.45	1.34 ± 0.11
	TPU	1.80 ± 0.44	2.36 ± 0.71	1.98 ± 0.70

4.2.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ที่ได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

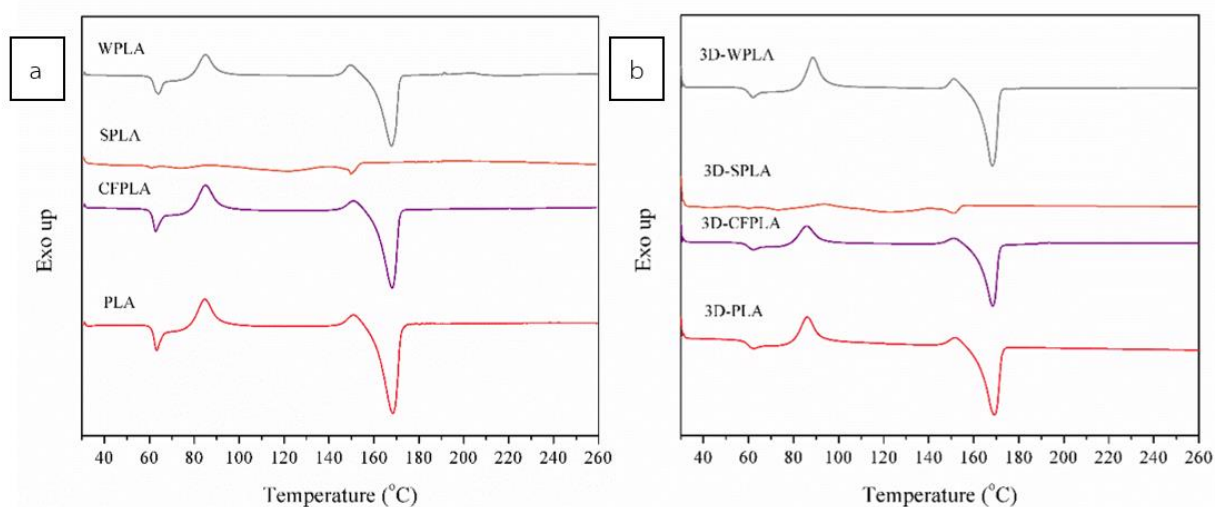
ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ซึ่งชิ้นงานสำหรับการทดสอบเตรียมได้จากการตัดชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile specimen) ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile testing) ในส่วนของค่ามอดูลัสการยึด (Tensile modulus) พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ จะส่งผลให้ค่า Tensile modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงตัดชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วการพิมพ์ 50 mm/s มีทดสอบด้วยเทคนิค DSC เพราะคาดว่าจะมีปริมาณผลึกมาก



รูปที่ 4.54 แสดง DSC Thermogram first heating ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC), และพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรทที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ได้จาก a) เส้นฟิลาเมนต์และ b) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics ที่ได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัวให้ความร้อน ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.54 ซึ่งเป็นขั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง พบว่า พอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอิน-

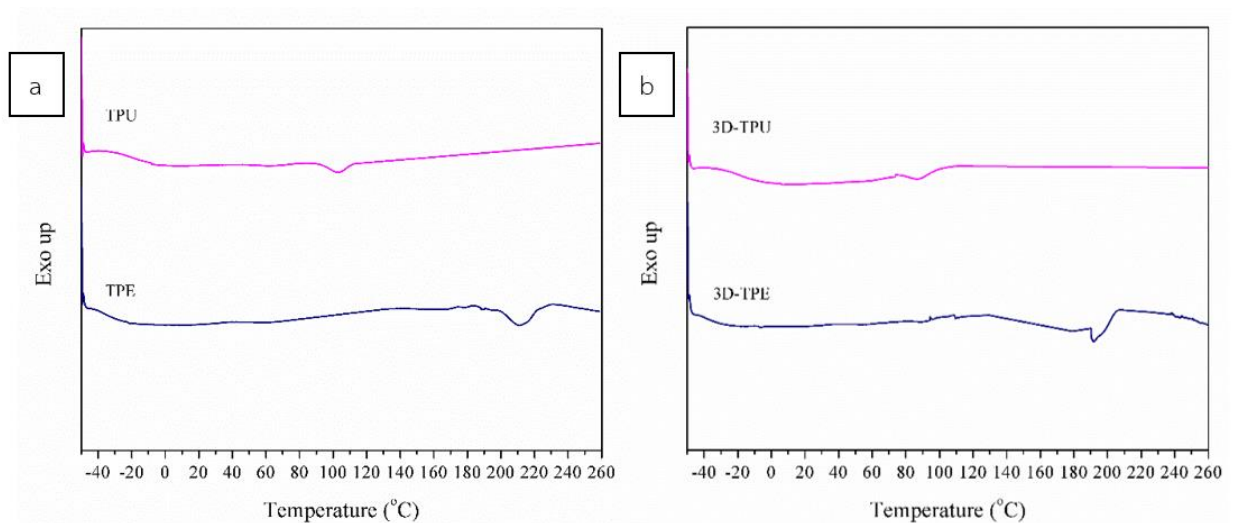
สไตรีน (ABS) จะปรากฏพีค 2 พีค โดยพีคแรกคือ อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่อุณหภูมิ 105 °C และพีคที่สองคือ อุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ที่อุณหภูมิ 130 °C ถัดมาเป็นพอลิเอไมด์ (PA) มีอุณหภูมิ T_g เท่ากับ 79 °C และมีอุณหภูมิ T_m เท่ากับ 189 °C ส่วนพอลิคาร์บอนเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) จะปรากฏเพียงแคพีค T_g เท่านั้น ที่อุณหภูมิ 113 และ 76 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.55 แสดง DSC Thermogram first heating ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ได้จาก a) เส้นฟิลาเมนต์และ b) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites ที่ได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ซึ่งเป็นขั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง พบว่า พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ปรากฏพีคอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่อุณหภูมิ 59 °C นอกจากนี้ยังปรากฏพีคอุณหภูมิการตกผลึกเมื่อให้ความร้อน (Cold-crystallization, T_{cc}) 2 พีค ที่อุณหภูมิ 86 และ 151 °C แต่จะปรากฏพีค T_m เพียงพีคเดียวที่อุณหภูมิ 168 °C ถัดมาเป็นพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ปรากฏพีค T_g ที่อุณหภูมิ 59 °C นอกจากนี้ยังปรากฏพีคอุณหภูมิการตกผลึกเมื่อให้ความร้อน (Cold-crystallization, T_{cc}) 2 พีค ที่อุณหภูมิ 85 และ 150 °C แต่จะปรากฏ

พีก T_m เพียงพีกเดียวที่อุณหภูมิ 168 °C พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ปรากฏพีก T_g ที่อุณหภูมิ 57 °C และปรากฏพีก T_m ที่อุณหภูมิ 151 °C สูดท้ายพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ปรากฏพีก T_g ที่อุณหภูมิ 59 °C นอกจากนี้ยังปรากฏพีกอุณหภูมิการตกผลึกเมื่อให้ความร้อน (Cold-crystallization, T_{cc}) 2 พีก ที่อุณหภูมิ 88 และ 151 °C แต่จะปรากฏพีก T_m เพียงพีกเดียวที่อุณหภูมิ 168 °C



รูปที่ 4.56 แสดง DSC Thermogram first heating ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ได้จาก a) เส้นฟิลาเมนต์และ b) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers ที่ได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.56 ซึ่งเป็นขั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง พบว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) จะปรากฏพีกอุณหภูมิล้าแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่อุณหภูมิ -35 °C และปรากฏพีกอุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ที่อุณหภูมิ 192 °C ส่วนเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) มีอุณหภูมิ T_g เท่ากับ -21 °C และมีอุณหภูมิ T_m เท่ากับ 87 °C

ตารางที่ 4.20 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ DSC ชั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่งของเส้นพลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด

กลุ่ม	ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc1} (°C)	T_{cc2} (°C)	T_{m1} (°C)	ΔH_{cc1} (J/g)	ΔH_{cc2} (J/g)	ΔH_{m1} (J/g)	X_c (%)
Engineering Plastics	ABS	101.24	-	-	129.20	-	-	1.24	N/A
	PA	50.61	-	-	189.12	-	-	38.70	20.48
	PC	106.31	-	-	-	-	-	-	N/A
	PETG	70.76	-	-	-	-	-	-	N/A
PLA and PLA Composites	PLA	61.04	84.72	150.82	168.12	14.46	3.72	39.04	22.26
	CFPLA	60.63	84.90	150.86	167.85	13.35	3.25	32.49	18.04
	SPLA	60.03	-	-	150.11	-	-	3.26	3.78
	WPLA	60.86	84.99	149.55	167.64	13.68	4.32	37.45	21.18
Elasto- mers	TPE	-31.93	-	-	211.19	-	-	3.12	N/A
	TPU	-13.75	-	-	102.59	-	-	1.41	N/A

ตารางที่ 4.21 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ DSC ชั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่งของเส้นพลาเมนต์ทั้ง 10 ชนิด ที่ได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

กลุ่ม	ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc1} (°C)	T_{cc2} (°C)	T_{m1} (°C)	ΔH_{cc1} (J/g)	ΔH_{cc2} (J/g)	ΔH_{m1} (J/g)	X_c (%)
Engineering Plastics	3D-ABS	105.19	-	-	130.45	-	-	1.02	N/A
	3D-PA	79.77	-	-	189.46	-	-	34.06	18.02
	3D-PC	113.10	-	-	-	-	-	-	N/A
	3D-PETG	76.34	-	-	-	-	-	-	N/A
PLA and PLA Composites	3D-PLA	59.59	86.09	151.70	168.96	15.11	3.40	35.96	18.62
	3D-CFPLA	58.92	85.66	150.95	168.16	12.72	2.93	33.25	19.98
	3D-SPLA	57.50	-	-	151.11	-	-	2.89	3.35
	3D-WPLA	59.17	88.60	151.11	167.92	18.62	3.84	39.30	18.34
Elasto- mers	3D-TPE	-34.81	-	-	192.29	-	-	1.77	N/A
	3D-TPU	-20.97	-	-	87.35	-	-	1.31	N/A

สมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) และชิ้นส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC 1 Auto Robot ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.54-4.56 และตารางที่ 4.20 และ 4.21 พบว่า ลักษณะกราฟ DSC Thermogram ของเส้นฟิลาเมนต์กลุ่ม Engineering plastics มีลักษณะที่เหมือนกันทั้งกราฟที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์ตั้งต้นและกราฟที่ได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วและอุณหภูมิในการหลอมผลึกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในส่วนของกลุ่ม PLA and PLA composites พบว่า ลักษณะกราฟ DSC Thermogram มีลักษณะที่เหมือนกันทั้งกราฟที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์ตั้งต้นและกราฟที่ได้จากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยที่ PLA และ PLA composites ที่มีการเติมเส้นใยคาร์บอนและผงไม้ จะปรากฏพีคอุณหภูมิการตกผลึกเมื่อให้ความร้อน (Cold-crystallization, T_{cc}) 2 พีค แสดงให้เห็นว่า PLA และ PLA composites มีการตกผลึกที่ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ก็ไม่ช่วยให้ PLA และ PLA composites ตกผลึกได้ดีขึ้น สุดท้ายเป็นกลุ่ม Elastomer พบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเส้นฟิลาเมนต์ตั้งต้น เป็นการยืนยันได้ว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของเส้นฟิลาเมนต์

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกจากการทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ในขั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง ซึ่งจะแสดงถึงปริมาณผลึกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ บ่งบอกถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน จากการพิจารณาตารางที่ 4.22 ซึ่งแสดงปริมาณผลึกที่ได้จากเส้นฟิลาเมนต์ตั้งต้นและปริมาณผลึกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า กลุ่ม Engineering plastics จะมีเพียงพอลิเอไมด์ (PA) ที่สามารถหาปริมาณผลึกได้ และกลุ่ม PLA and PLA composites สามารถหาปริมาณผลึกได้ทั้งหมด แต่จะเปรียบเทียบปริมาณผลึกภายในกลุ่มเดียวกันไม่ได้ เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปเป็นเส้นฟิลาเมนต์ของแต่ละบริษัทอาจจะเป็นคนละเกรดกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณผลึกของเส้นฟิลาเมนต์ตั้งต้นกับปริมาณผลึกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี

การพิมพ์ 3 มิติ พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ไม่ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการตกผลึกได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.22 แสดงปริมาณผลึกที่คำนวณได้จากการทดสอบ DSC ในชั้นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่งของเส้นฟิลาเมนต์และชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)	
		เส้นฟิลาเมนต์	ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ
Engineering Plastics	ABS	N/A	N/A
	PA	20.48	18.02
	PC	N/A	N/A
	PETG	N/A	N/A
PLA / PLA Composites	PLA	22.26	18.62
	CFPLA	18.04	19.98
	SPLA	3.78	3.35
	WPLA	21.18	18.34
Elasto- mers	TPE	N/A	N/A
	TPU	N/A	N/A

4.3 การศึกษาผลของการออกแบบและรูปแบบโครงสร้างบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

4.3.1 การศึกษาและการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง (Shipping packaging)

4.3.1.1 แนวคิดในการเลือกใช้วัสดุและแนวคิดในการออกแบบชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่มีใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะผลิตด้วยวิธี Film extrusion หรือ Injection molding ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่ต้องใช้แม่พิมพ์ (Mold) ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการที่ต่างออกไป โดยเลือกใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในการขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ อีกทั้งเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ยังเป็นวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน ด้วยความง่ายและสะดวกในการใช้งาน และยังเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบชิ้นงานต้นแบบก่อนที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งนั้นผู้ใช้งานมักจะใช้เพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง โดยหลังการใช้งานมักจะมีวิธีการกำจัดด้วยการกลบฝังหรือเผาทำลาย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งส่วนใหญ่จะไม่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วัสดุกลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites มาใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) เนื่องจากวัสดุกลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites เป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพราะ PLA ใช้งานง่าย ขึ้นรูปชิ้นงานได้ง่ายและใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ทั้งแบบที่มีความร้อนที่ฐานพิมพ์และแบบไม่มีความร้อนที่ฐานพิมพ์ ไม่มีกลิ่นเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน และสามารถย่อยสลายทางธรรมชาติได้ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics และกลุ่มที่ 3 คือ Elastomer พบว่า วัสดุกลุ่ม PLA and PLA composites ใช้ต้นทุนในการขึ้นรูปชิ้นงานต่ำกว่าวัสดุกลุ่ม Engineering plastics นอกจากนี้เมื่อคำนวณราคาเฉลี่ยค่าวัสดุในการขึ้นรูปชิ้นงาน 1 ชิ้น พบว่า วัสดุกลุ่ม PLA and PLA composites มีราคาเฉลี่ยต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกล พบว่า วัสดุกลุ่ม PLA and PLA composites มีสมบัติเชิงกลดีกว่าวัสดุกลุ่ม Elastomers และมีสมบัติเชิงกลดีกว่าหรือใกล้เคียงกับวัสดุกลุ่ม Engineering plastics

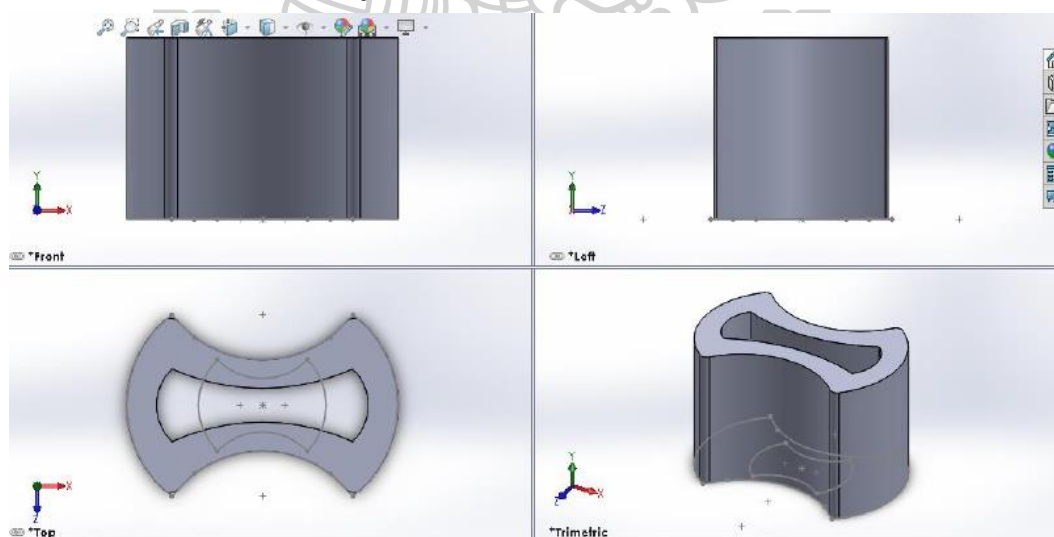
แนวคิดในการออกแบบชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งในงานวิจัยนี้ ต้องคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ที่เราจะนำไปใช้คู่กับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทไหน ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาใส่คู่กับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งจะเป็นของแข็ง อาทิเช่น แก้วน้ำ ขวดแก้ว โหลแก้ว แก้วเซรามิค เป็นต้น ดังนั้นชิ้นงานต้นแบบที่ถูกออกแบบต้องออกแบบให้มีขนาด

เล็กระทัดรัด สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ได้ในขนาดและรูปทรงต่างๆ ได้ นอกจากนี้ในการออกแบบชิ้นงานต้นแบบต้องคำนึงถึงรูปทรงที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงาน ความสามารถในการส่งผ่านแรง การคืนตัวกลับของชิ้นงาน ส่วนความซับซ้อนของชิ้นงานต้นแบบก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง โดยต้องออกแบบให้มีความซับซ้อนที่เหมาะสม เพื่อที่จะได้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีอยู่ได้ว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ นั้นๆ มีขีดความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้มากน้อยเพียงใด อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงขั้นตอนการแกะ Support ออกจากชิ้นงานด้วย

4.3.1.2 การออกแบบชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จากการศึกษาบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่มีใช้ในปัจจุบัน ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ อาทิเช่น Air bubble, Balls, Peanuts และ Popcorns เป็นต้น แต่ยังไม่ค่อยมีบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตหรือรูปทรงแปลกๆ งานวิจัยนี้จึงออกแบบชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งให้มีรูปทรงเป็นทรงเรขาคณิต เพื่อที่เวลาใส่ชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์ลงไปในกลุ่ม จะได้สามารถเข้าคู่กันได้ ซึ่งจะเป็นการช่วยให้บรรจุภัณฑ์มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยจะทำการออกแบบชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งทั้งหมด 5 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรง โดยรูปแบบของชิ้นงานต้นแบบ ประกอบด้วย รูปแบบที่ 1 คือ 8Drill, รูปแบบที่ 2 คือ Hex, รูปแบบที่ 3 คือ Spin, รูปแบบที่ 4 คือ Sweep และรูปแบบที่ 5 คือ Tri

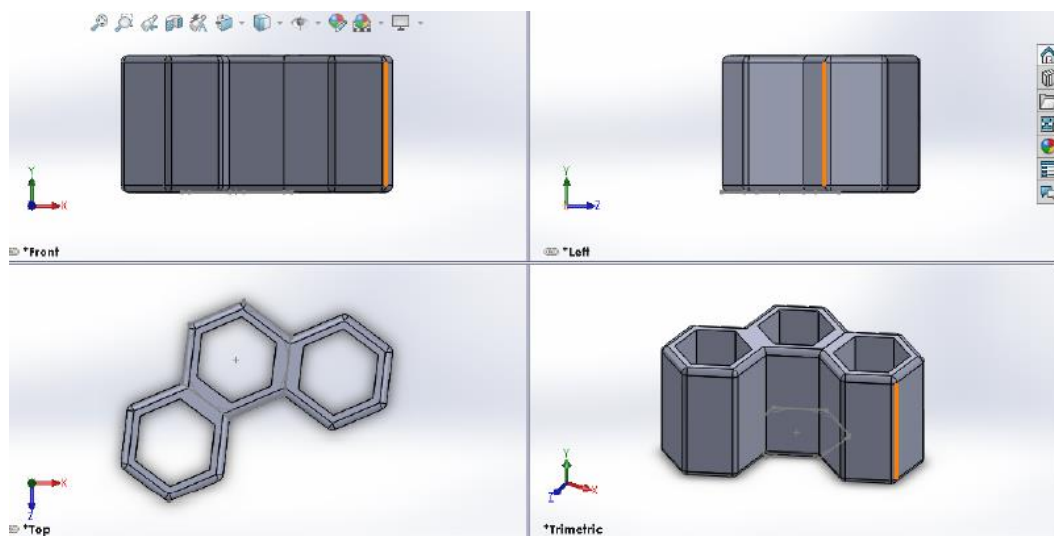
บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 1 คือ ชิ้นงาน 8Drill



รูปที่ 4.57 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน 8Drill

ชิ้นงาน 8Drill ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยการออกแบบเน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตคล้ายเลข 8 มีส่วนเว้าส่วนโค้งที่สามารถเข้าคู่กันได้ ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ อีกทั้งยังเป็นรูปทรงที่ง่ายต่อการเขียนแบบบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และง่ายต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน

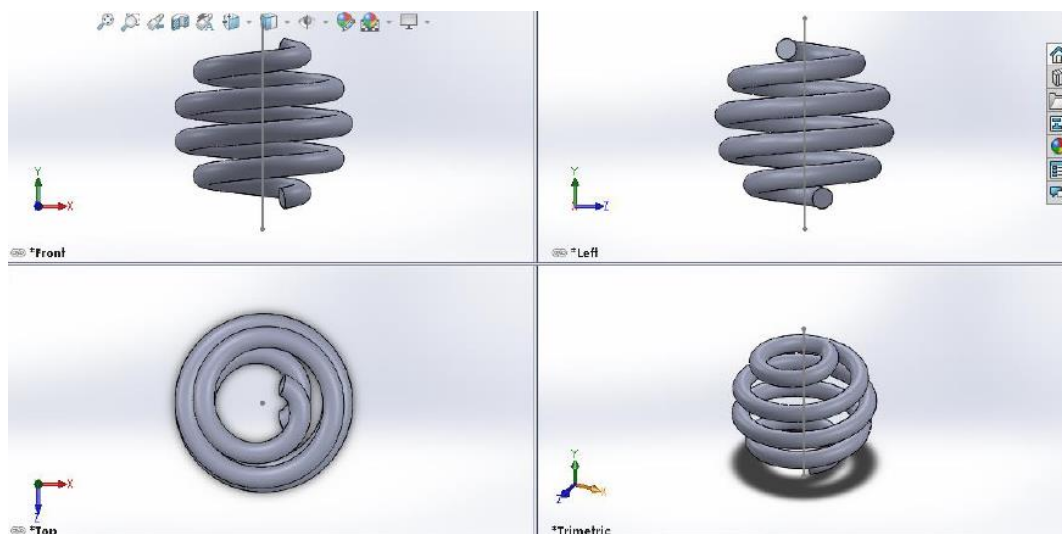
บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 2 คือ ชิ้นงาน Hex



รูปที่ 4.58 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน Hex

ชิ้นงาน Hex ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยการออกแบบเน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นวงหกเหลี่ยมเรียงติดกัน 3 วง คล้ายรังผึ้งเลียนแบบรังผึ้งตามธรรมชาติ ซึ่งมีความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้มาก นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการส่งผ่านแรงได้ดี อีกทั้งยังเป็นรูปทรงที่ง่ายต่อการเขียนแบบบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และง่ายต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน

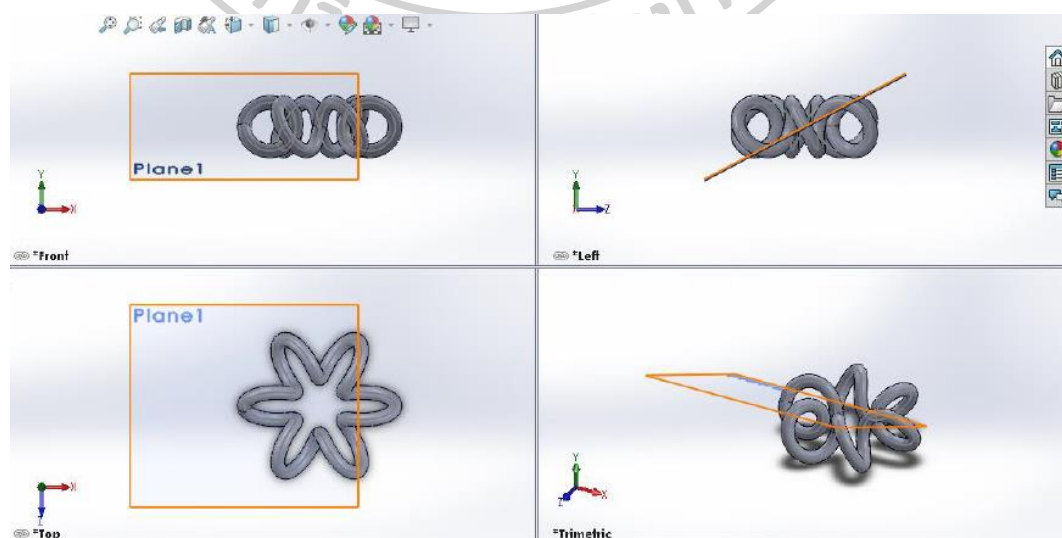
บรรจุก้อนต์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 3 คือ ชิ้นงาน Spin



รูปที่ 4.59 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน Spin

ชิ้นงาน Spin ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยการออกแบบเน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นสปริงสามารถยืดหดได้ มีความสามารถในการคืนตัว ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงต่างๆ ได้ดี ยิ่งชิ้นงานต้นแบบ Spin ถูกทำให้หดตัวจะสามารถรับแรงได้มากขึ้น อีกทั้งยังเป็นรูปทรงที่ง่ายต่อการเขียนแบบบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และง่ายต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน

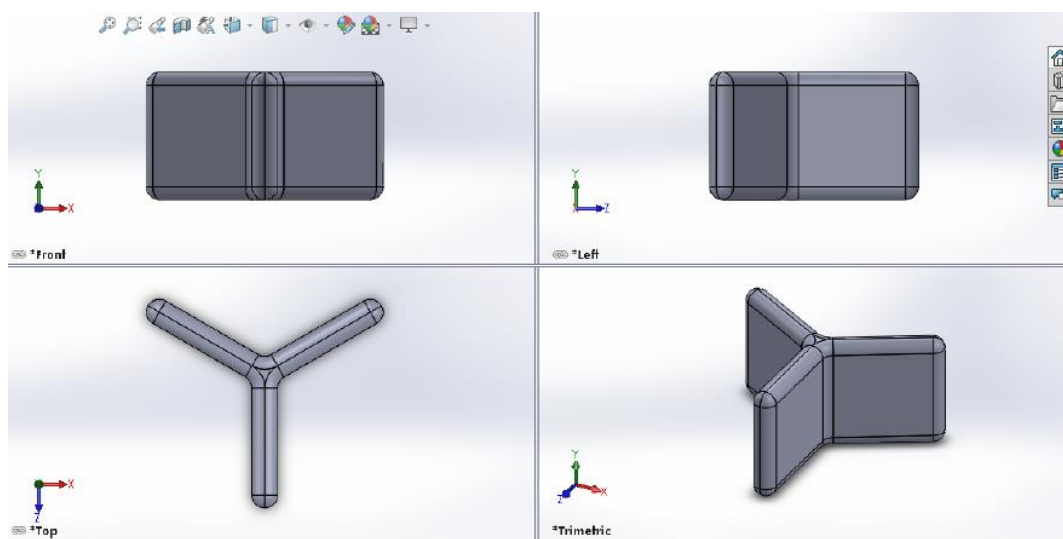
บรรจุก้อนต์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 4 คือ ชิ้นงาน Sweep



รูปที่ 4.60 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน Sweep

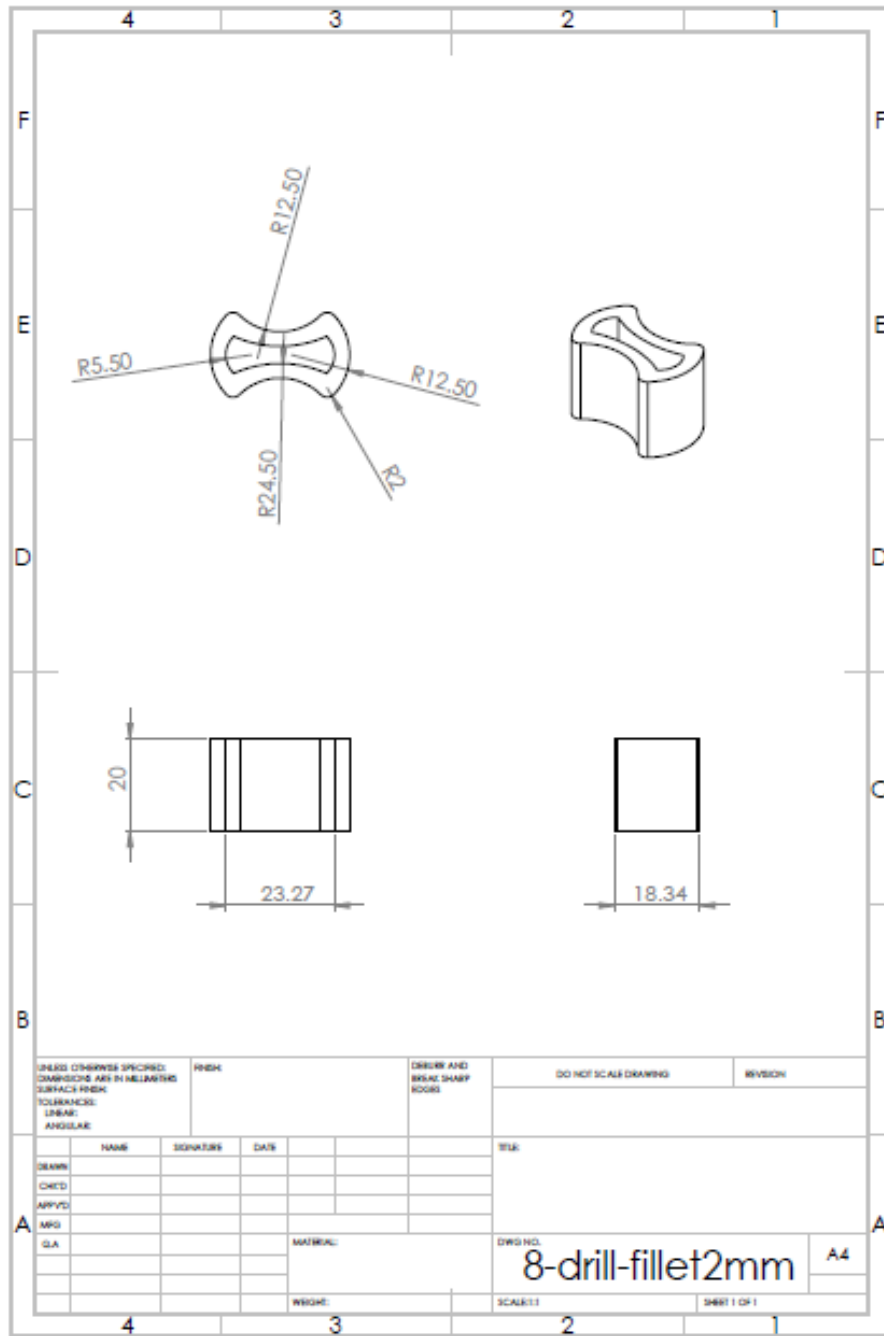
ชิ้นงาน Sweep ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยการออกแบบเน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะคล้ายยางมัดผม ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษารูปทรงแบบนี้ จึงได้ทำการศึกษาว่ารูปทรงที่มีลักษณะเป็นเกลียวจะสามารถรับแรงได้มากน้อยเพียงใด อีกทั้งยังเป็นรูปทรงที่ง่ายต่อการเขียนแบบบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และง่ายต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน

บรรจุกัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบที่ 5 คือ ชิ้นงาน Tri



รูปที่ 4.61 แสดงลักษณะรูปทรงของชิ้นงาน Tri

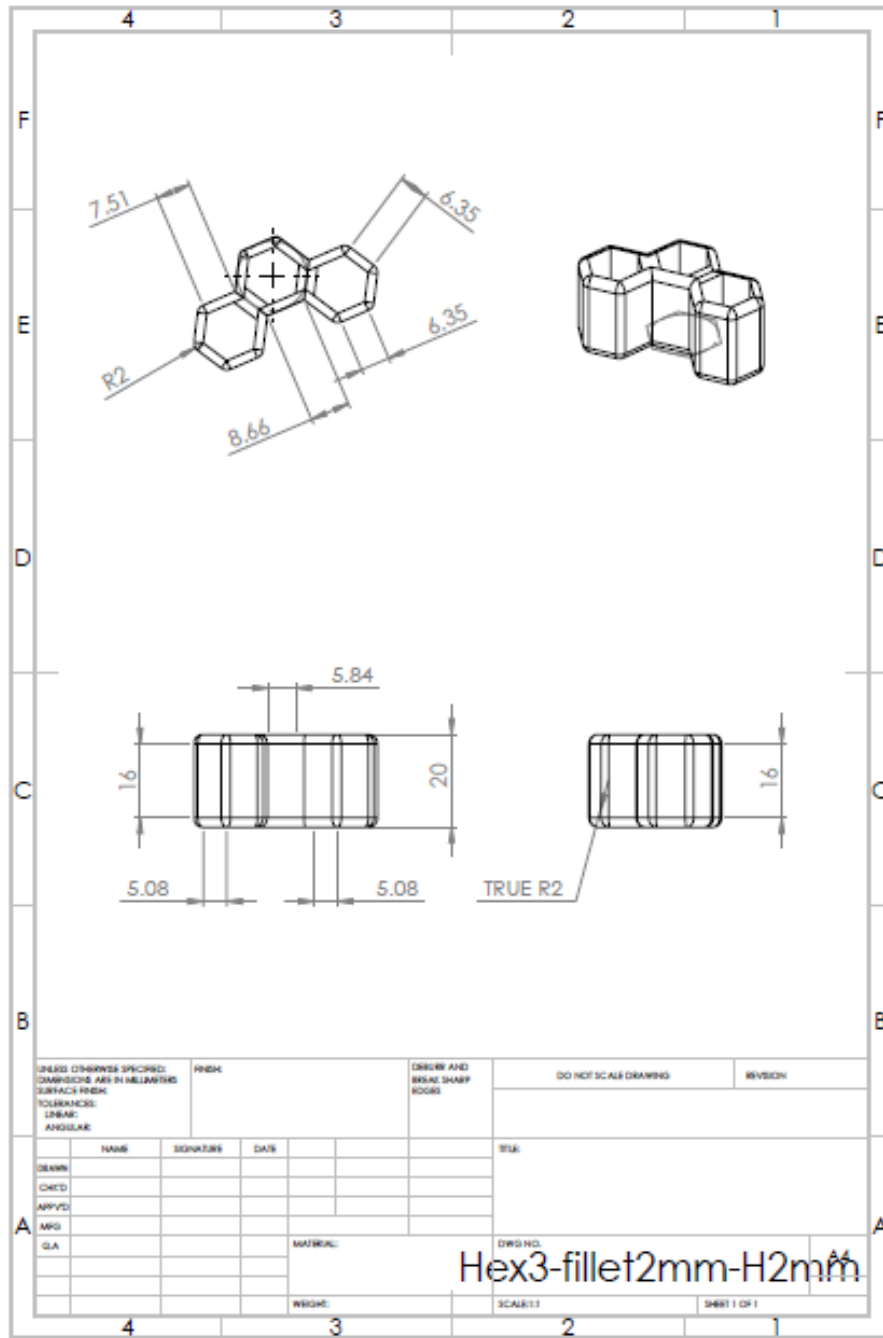
ชิ้นงาน Tri ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยการออกแบบเน้นให้มีรูปทรงเรขาคณิตมีลักษณะเป็นสามแฉก ที่ทำมุมเท่ากัน ส่งผลให้เวลาใส่บรรจุกัณฑ์ลงไปในกลุ่มจึงสามารถคำนวณกันได้มีส่วนเว้าส่วนโค้งที่สามารถเข้าคู่กันได้ ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ อีกทั้งยังเป็นรูปทรงที่ง่ายต่อการเขียนแบบบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์และง่ายต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ 4.62 แสดงขนาดของชิ้นงาน 8Drill ในหน่วยมิลลิเมตร

ตารางที่ 4.23 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ 8Drill ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s

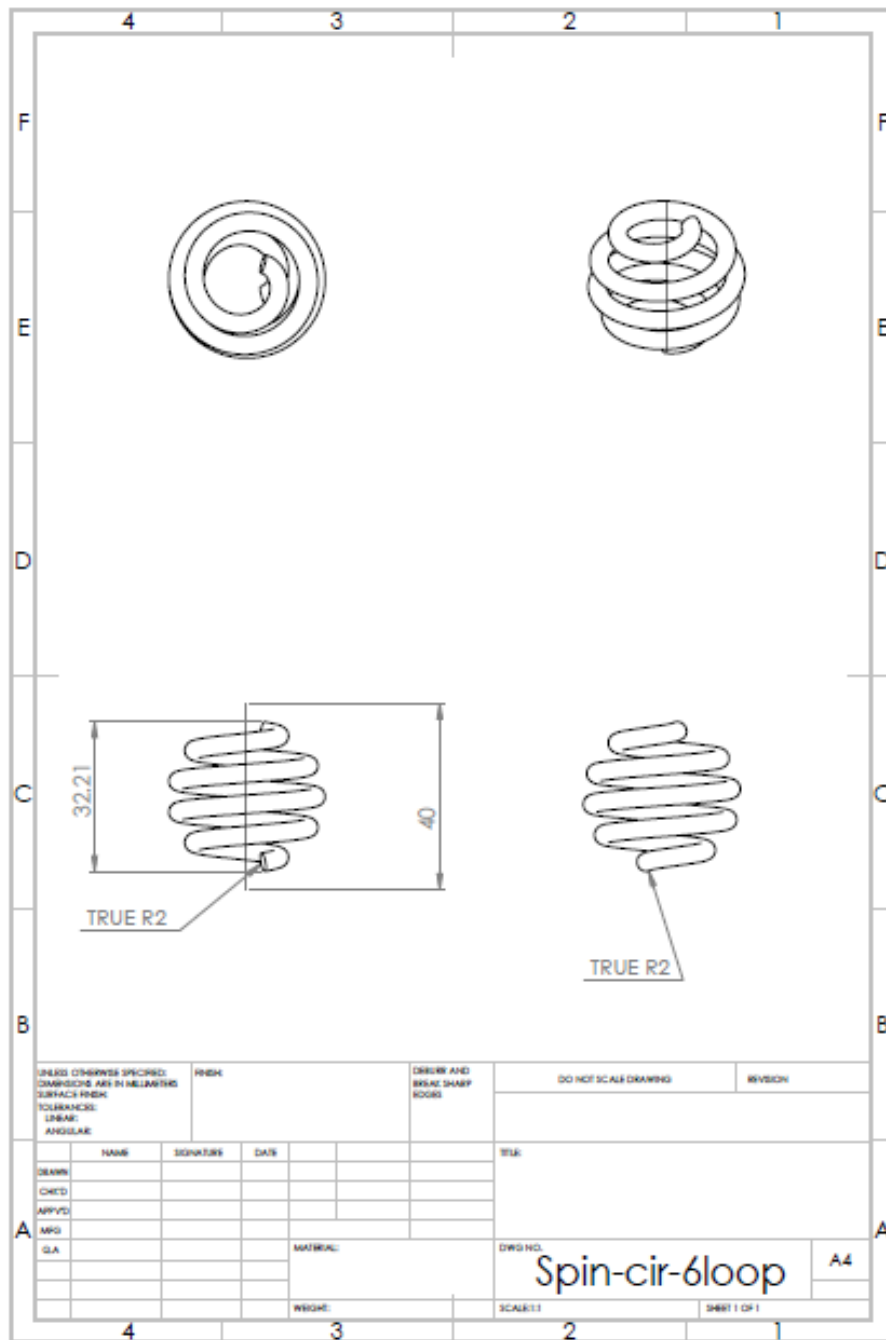
รูปแบบ	เส้นฟิลาเมนต์	การทดสอบ	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	ค่าเฉลี่ย	SD
8Drill	PLA	Impact testing	1	5.6334	5.6095	0.0208
			2	5.5995		
			3	5.5956		
		Compressive test	1	5.4457	5.5392	0.0886
			2	5.6219		
			3	5.5499		
	CFPLA	Impact testing	1	5.5071	5.5060	0.0113
			2	5.4942		
			3	5.5167		
		Compressive test	1	5.5461	5.5436	0.0118
			2	5.5308		
			3	5.5540		
	SPLA	Impact testing	1	4.9422	4.8874	0.0497
			2	4.8749		
			3	4.8451		
		Compressive test	1	5.0073	4.9774	0.0505
			2	4.9191		
			3	5.0058		
WPLA	Impact testing	1	3.5770	3.5872	0.0094	
		2	3.5956			
		3	3.5889			
	Compressive test	1	3.6207	3.6087	0.0160	
		2	3.6149			
		3	3.5906			



รูปที่ 4.63 แสดงขนาดของชิ้นงาน Hex ในหน่วยมิลลิเมตร

ตารางที่ 4.24 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Hex ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s

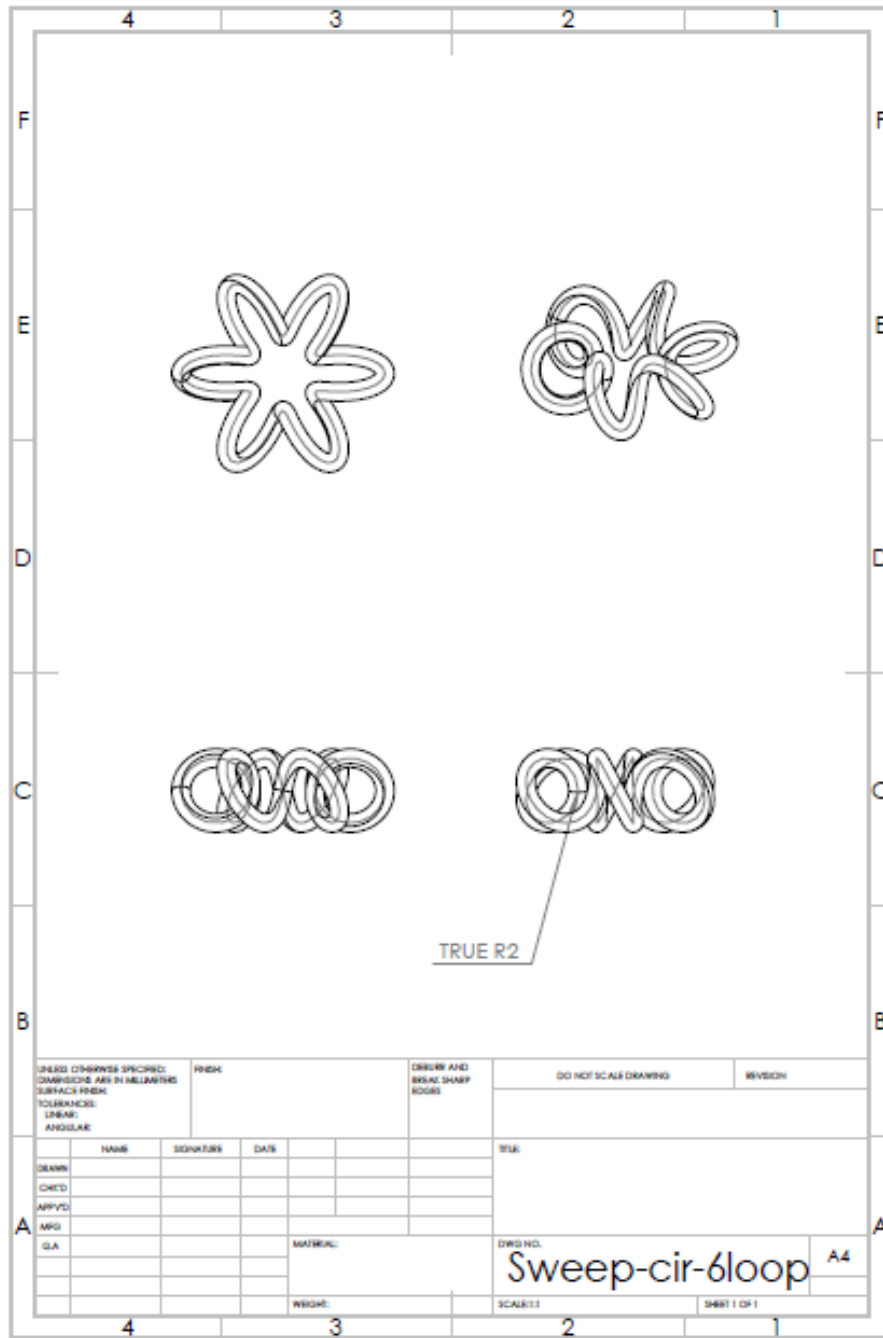
รูปแบบ	เส้นฟิลาเมนต์	การทดสอบ	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	ค่าเฉลี่ย	SD
Hex	PLA	Impact testing	1	5.3932	5.4295	0.0326
			2	5.4390		
			3	5.4562		
		Compressive test	1	5.4603	5.4709	0.0103
			2	5.4717		
			3	5.4808		
	CFPLA	Impact testing	1	5.4120	5.4189	0.0077
			2	5.4272		
			3	5.4175		
		Compressive test	1	5.4299	5.4158	0.0122
			2	5.4078		
			3	5.4097		
	SPLA	Impact testing	1	4.5692	4.6739	0.0943
			2	4.7521		
			3	4.7004		
		Compressive test	1	4.7154	4.8145	0.0890
			2	4.8877		
			3	4.8403		
WPLA	Impact testing	1	3.4818	3.4768	0.0255	
		2	3.4995			
		3	3.4492			
	Compressive test	1	3.5320	3.5142	0.0223	
		2	3.4892			
		3	3.5215			



รูปที่ 4.64 แสดงขนาดของชิ้นงาน Spin ในหน่วยมิลลิเมตร

ตารางที่ 4.25 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s

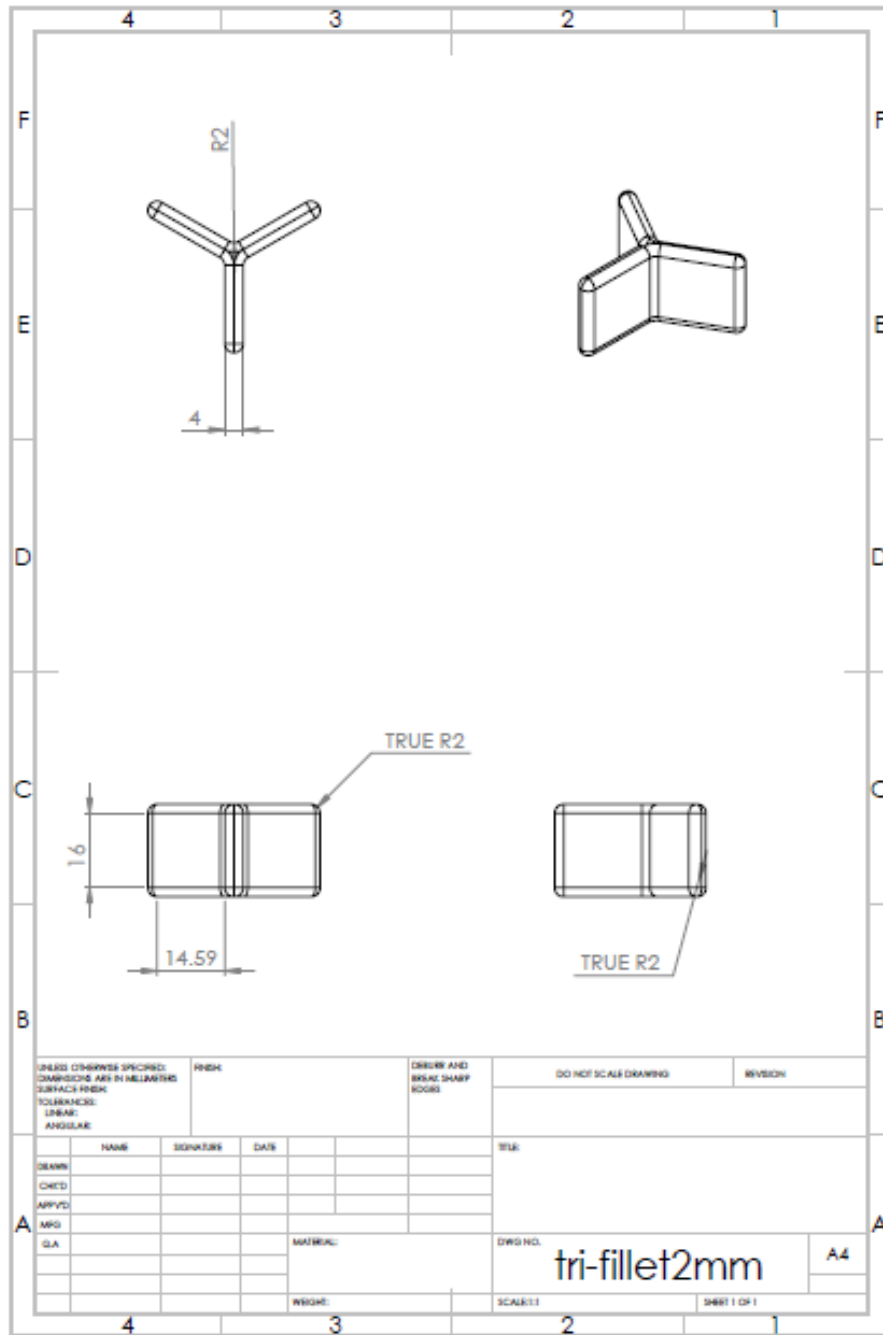
รูปแบบ	เส้นฟิลาเมนต์	การทดสอบ	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	ค่าเฉลี่ย	SD
Spin	PLA	Impact testing	1	4.2972	4.2515	0.0415
			2	4.2163		
			3	4.2409		
		Compressive test	1	4.1910	4.2452	0.0476
			2	4.2639		
			3	4.2806		
	CFPLA	Impact testing	1	4.0141	4.0619	0.0425
			2	4.0956		
			3	4.0759		
		Compressive test	1	4.0008	4.0390	0.0452
			2	4.0274		
			3	4.0889		
	SPLA	Impact testing	1	N/A	N/A	N/A
			2	N/A		
			3	N/A		
		Compressive test	1	N/A	N/A	N/A
			2	N/A		
			3	N/A		
WPLA	Impact testing	1	2.7566	2.7598	0.0084	
		2	2.7534			
		3	2.7693			
	Compressive test	1	2.7689	2.7706	0.0100	
		2	2.7616			
		3	2.7814			



รูปที่ 4.65 แสดงขนาดของชิ้นงาน Sweep ในหน่วยมิลลิเมตร

ตารางที่ 4.26 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Sweep ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s

รูปแบบ	เส้นฟิลาเมนต์	การทดสอบ	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	ค่าเฉลี่ย	SD
Sweep	PLA	Impact testing	1	3.5156	3.6417	0.1096
			2	3.7142		
			3	3.6952		
		Compressive test	1	3.7363	3.7092	0.0392
			2	3.6643		
			3	3.7270		
	CFPLA	Impact testing	1	3.3435	3.4022	0.0509
			2	3.4345		
			3	3.4287		
		Compressive test	1	3.4137	3.4161	0.0098
			2	3.4078		
			3	3.4269		
	SPLA	Impact testing	1	N/A	N/A	N/A
			2	N/A		
			3	N/A		
		Compressive test	1	N/A	N/A	N/A
			2	N/A		
			3	N/A		
WPLA	Impact testing	1	2.2924	2.2958	0.0051	
		2	2.2933			
		3	2.3016			
	Compressive test	1	2.2830	2.2975	0.0140	
		2	2.2986			
		3	2.3110			



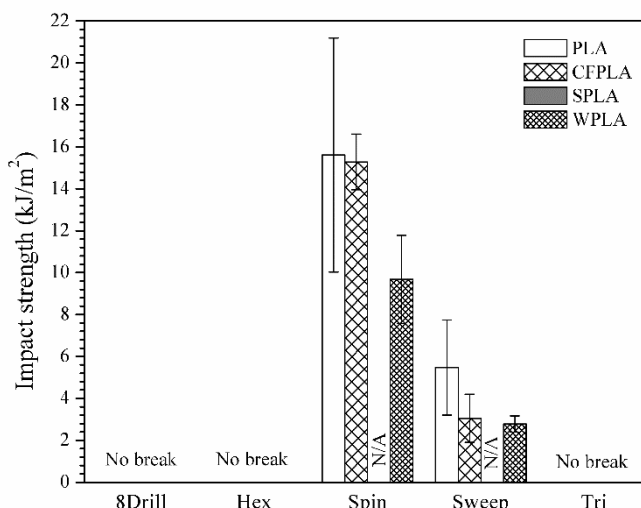
รูปที่ 4.66 แสดงขนาดของชิ้นงาน Tri ในหน่วยมิลลิเมตร

ตารางที่ 4.27 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Tri ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s

รูปแบบ	เส้นฟิลาเมนต์	การทดสอบ	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	ค่าเฉลี่ย	SD
Tri	PLA	Impact testing	1	4.7919	4.7320	0.0655
			2	4.7421		
			3	4.6621		
		Compressive test	1	4.7581	4.7646	0.0187
			2	4.7857		
			3	4.7500		
	CFPLA	Impact testing	1	4.5977	4.6818	0.0729
			2	4.7269		
			3	4.7208		
		Compressive test	1	4.3103	4.4352	0.2557
			2	4.2660		
			3	4.7293		
	SPLA	Impact testing	1	4.2092	4.1784	0.0268
			2	4.1605		
			3	4.1654		
		Compressive test	1	4.3541	4.3043	0.0562
			2	4.2434		
			3	4.3155		
WPLA	Impact testing	1	3.0758	3.0669	0.0135	
		2	3.0735			
		3	3.0513			
	Compressive test	1	3.0511	3.0597	0.0074	
		2	3.0639			
		3	3.0640			

4.3.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact testing)

การศึกษาศสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ (Filament) 4 ชนิด ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ด้วยเครื่อง Impact tester ซึ่งการทดสอบจะดัดแปลงประยุกต์มาจากวิธี Charpy impact test โดยค้อนจะกระทบชิ้นงานต้นแบบในแนวตั้งฉาก ด้วยค้อนขนาด 4 จูล พบว่ารูปแบบชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง 3 ใน 5 รูปแบบ ได้แก่ 8Drill, Hex และ Tri ไม่เกิดการแตกหัก (No break) นั่นคือ ชิ้นงานต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถแตกหักออกเป็น 2 ชิ้น จึงไม่สามารถวัดพลังงานในการทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้



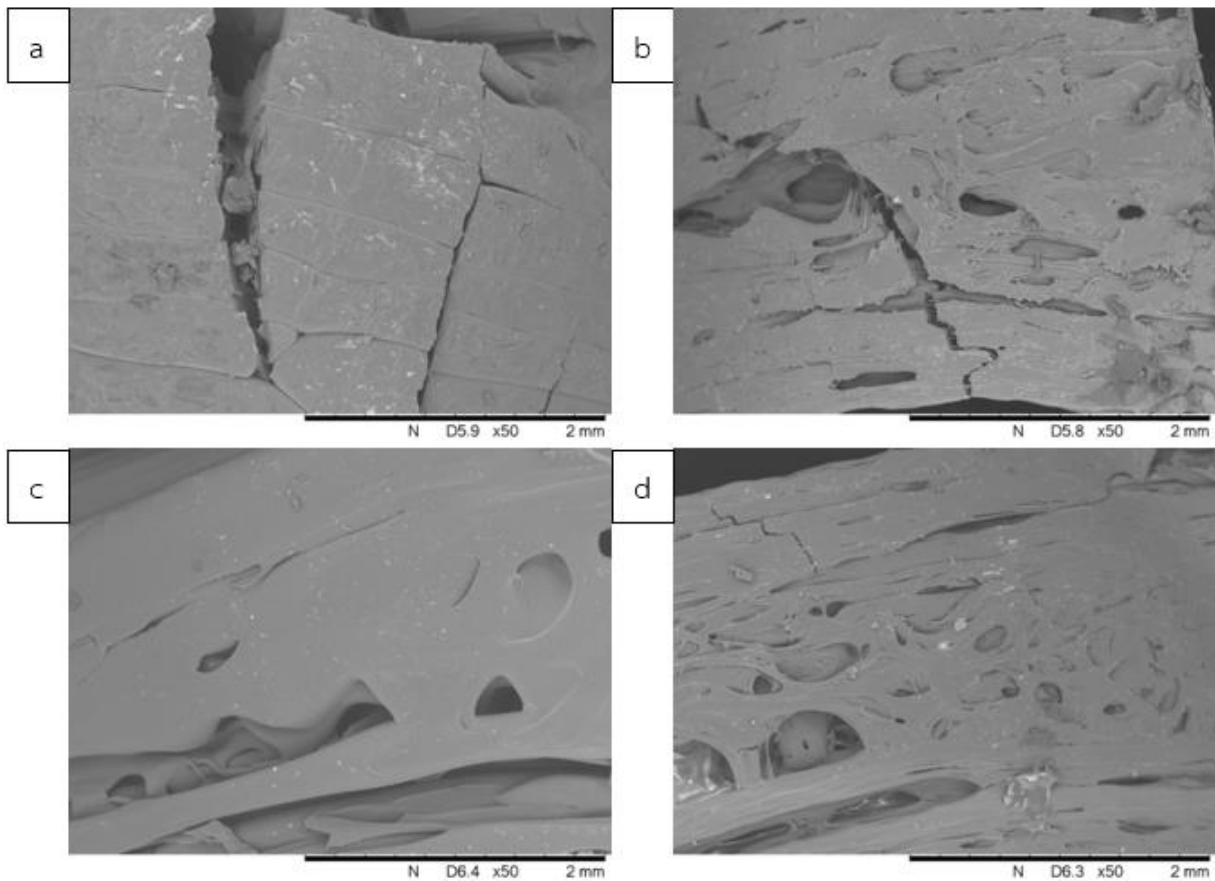
รูปที่ 4.67 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกจะได้ผลการทดสอบเป็นค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ดังแสดงในรูปที่ 4.67 พบว่าชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ 8Drill, Hex และ Tri ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเส้นฟิลาเมนต์ PLA, CFPLA, SPLA และ WPLA ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ เพราะชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก เนื่องจากรูปทรงมีความแข็งแรงและมีความหนา 20 มิลลิเมตร อีกทั้งยังมีพื้นที่ในการรับแรงที่มากกว่าชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin และ Sweep นอกจากนี้ชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin และ Sweep ยังมีโครงสร้างที่โปร่งทำให้เมื่อ

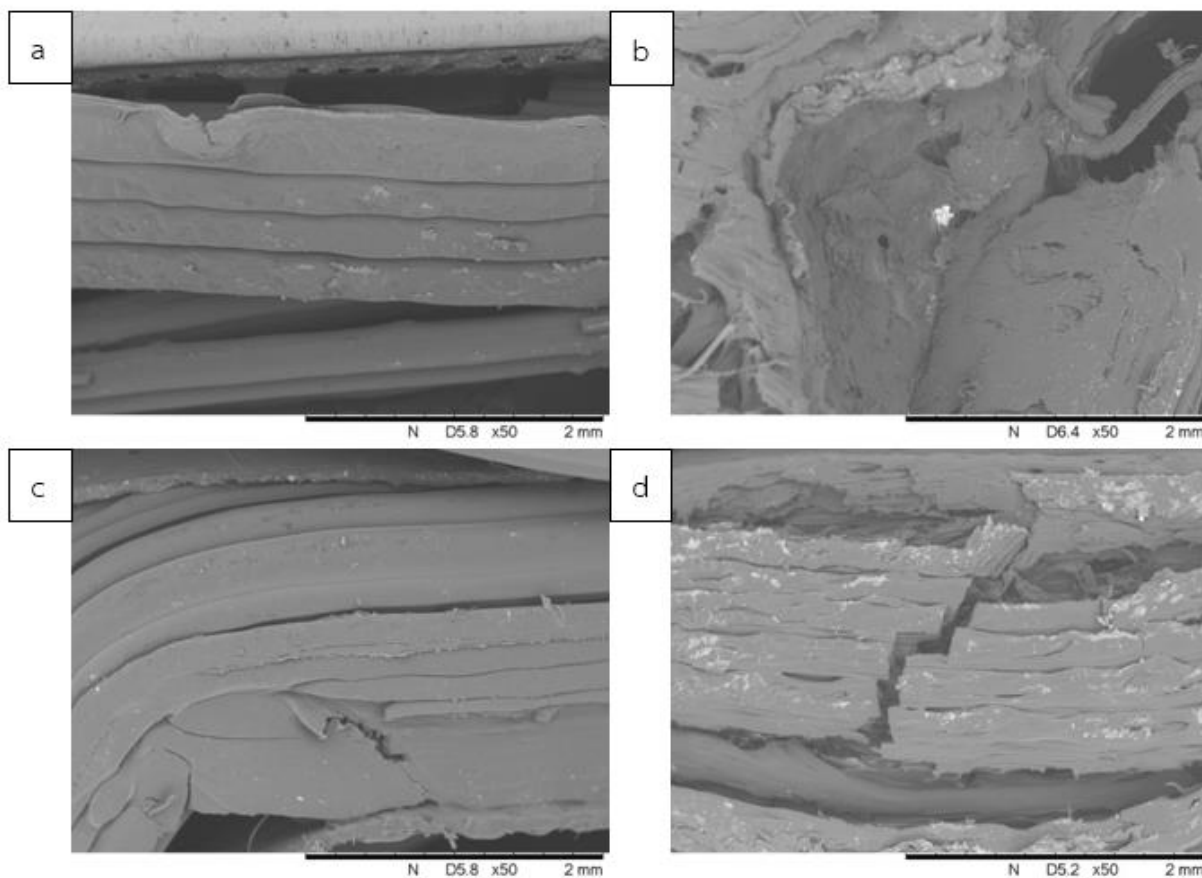
ได้รับแรงกระแทกจะเกิดการส่งผ่านแรงได้น้อย ประกอบกับภาพจากการทดสอบ SEM จะพบว่า รอยแตก (Crack) ที่พื้นผิวหน้าบนชิ้นงาน ปรากฏการหลุดออกของเส้นใยคาร์บอนและผงไม้ โดยชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin และ Sweep ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วย เส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เนื่องจากเส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่มีความนิ่มมากกว่า ชนิดอื่นๆ และประกอบกับโครงสร้างรูปแบบ Spin และ Sweep เป็นโครงสร้างโปร่งและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นของชิ้นงานเล็ก ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เกิดรอยขาด ก่อนที่จะพิมพ์ชิ้นงานได้สมบูรณ์ อีกทั้งเวลาแกะ Support ออกจากชิ้นงานต้นแบบ ยังส่งผลให้เกิด ความเสียหายด้วยเช่นกัน เนื่องจากเส้นฟิลาเมนต์มีความนิ่ม เวลาแกะ Support ออกจากชิ้นงาน ต้นแบบจะดึงเอาเนื้อของชิ้นงานต้นแบบออกมาด้วย



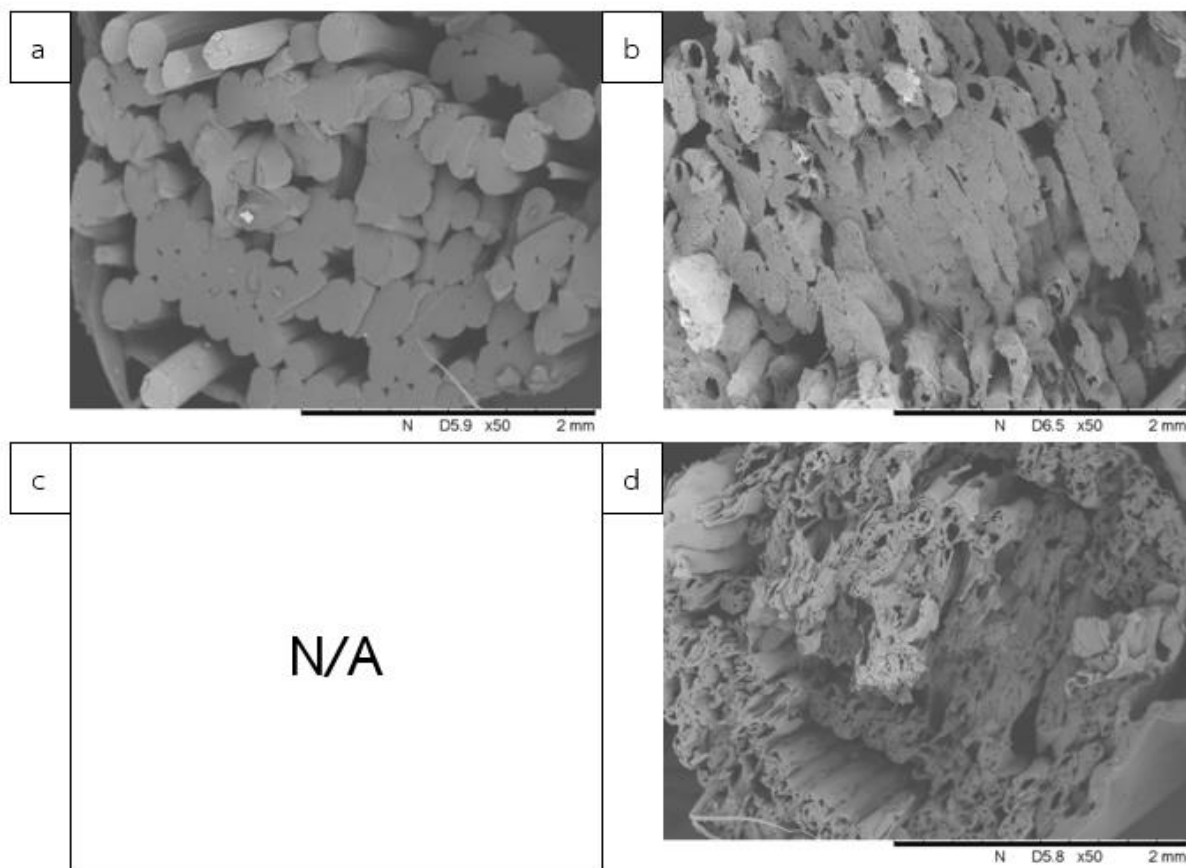
4.3.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก



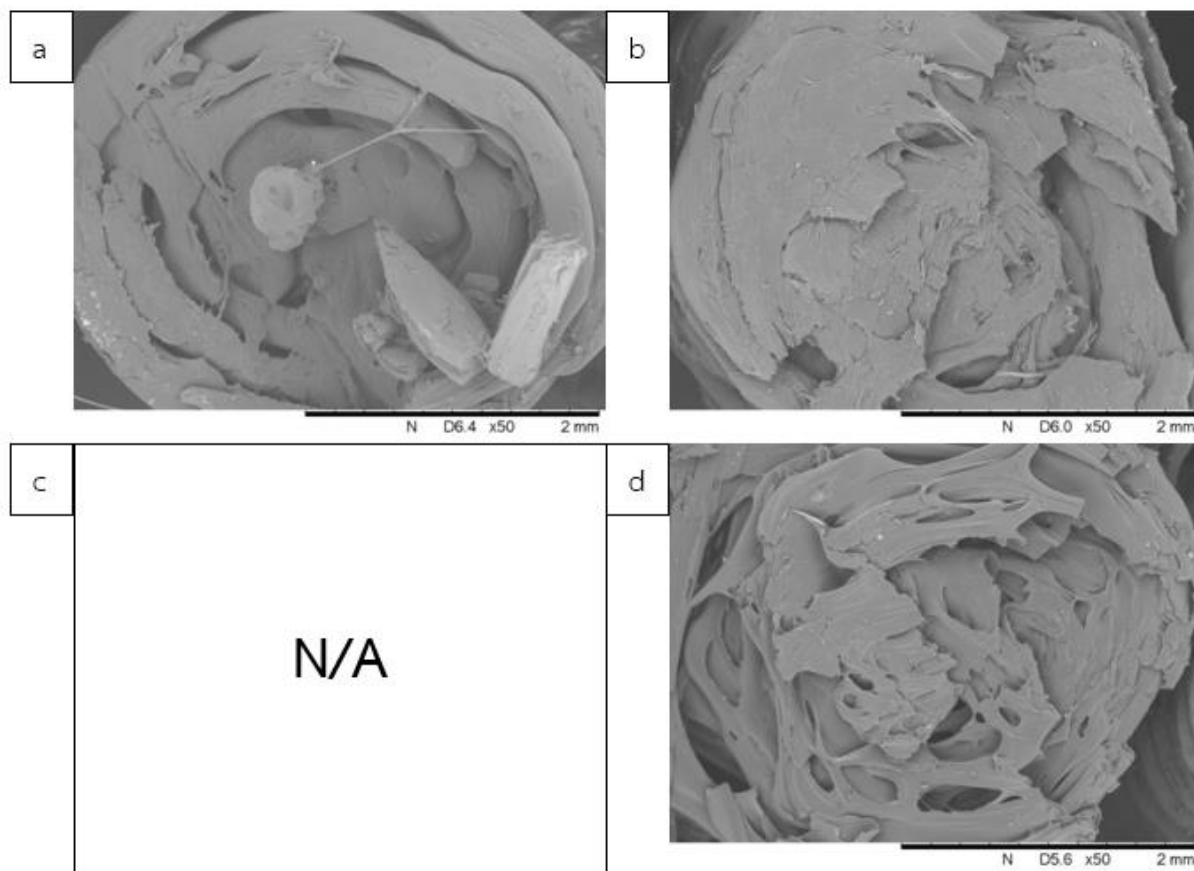
รูปที่ 4.68 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



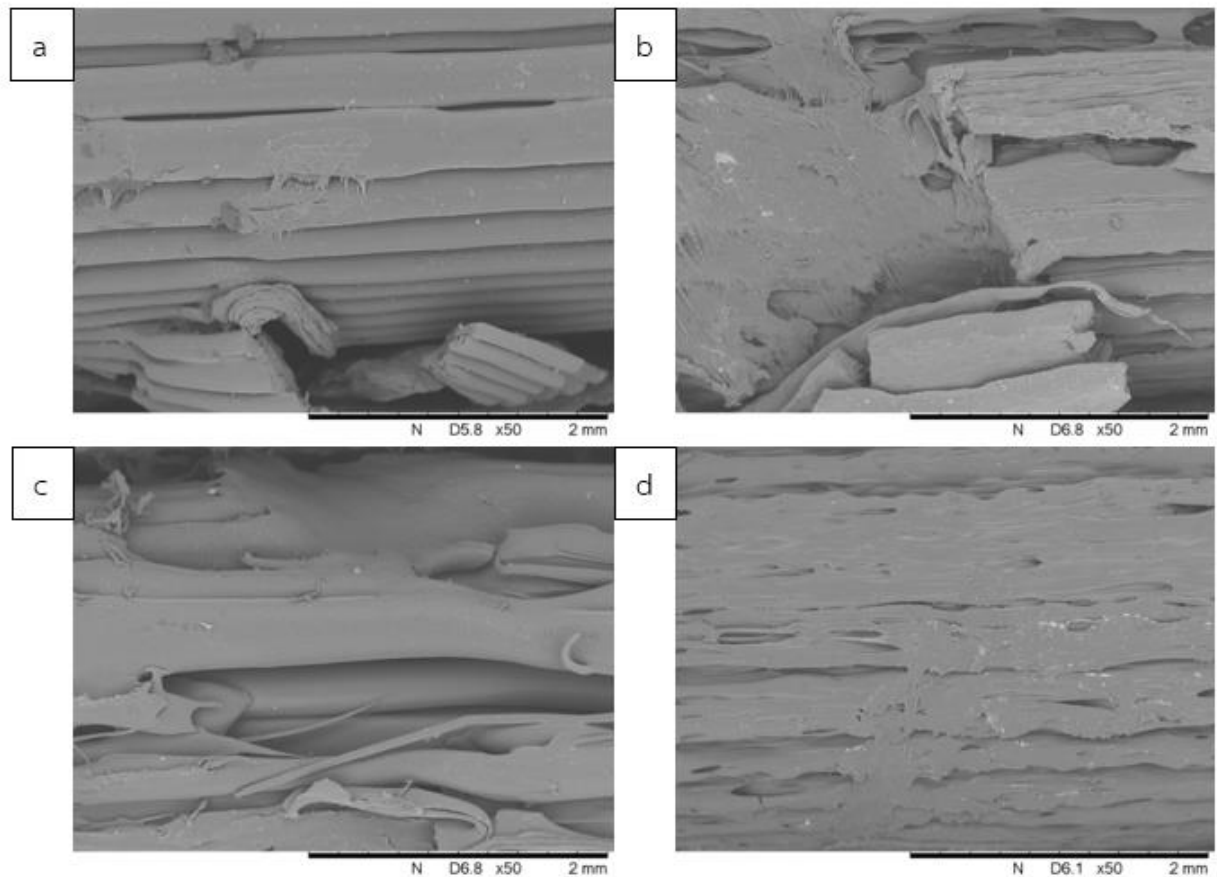
รูปที่ 4.69 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Hex ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) โพลีแลคติกแอซิด (PLA), (b) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) โพลีแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 4.70 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Spin ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) โพลีแลคติกแอซิด (PLA), (b) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) โพลีแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 4.71 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 4.72 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Tri ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก; (a) โพลีแลคติกแอซิด (PLA), (b) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) โพลีแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จากการพิจารณารูปที่ 4.68 ซึ่งแสดงภาพภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิดโพลีแลคติกแอซิด (PLA), โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และโพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) จะเกิดรอยแตก (Crack) บนพื้นผิวหน้าชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด CFPLA จะปรากฏเส้นใยคาร์บอนบริเวณรอยแตก ขณะที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA ไม่เกิดรอยแตกบนพื้นผิวหน้าของชิ้นงาน เนื่องจากเป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียวจึงมีความยืดหยุ่นสูง

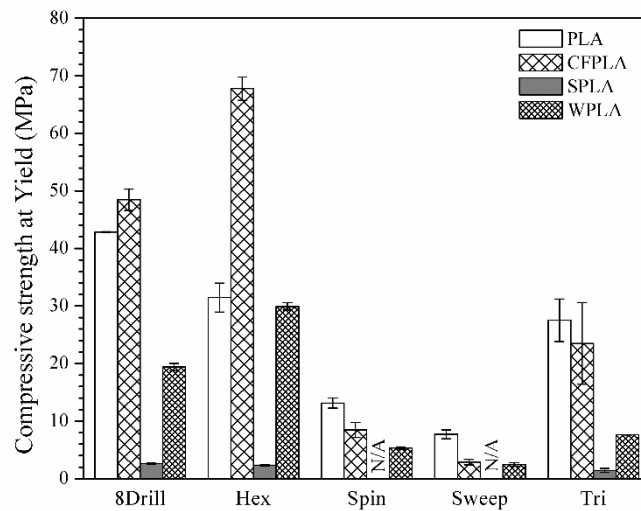
จากการพิจารณารูปที่ 4.69 ซึ่งแสดงภาพภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Hex ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 4 ชนิด จะปรากฏรอยแตกบนพื้นผิวหน้าของชิ้นงานทั้งหมด โดยที่ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด CFPLA จะเกิดการยุบตัวของชิ้นงานมากที่สุด

จากการพิจารณารูปที่ 4.70 ซึ่งแสดงภาพภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Spin ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด PLA, CFPLA และ WPLA จะปรากฏรอยแตกหักที่มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด CFPLA และ WPLA จะเกิดการหลุดออกของเส้นใยคาร์บอนและผงไม้ ซึ่งจะเห็นว่าผงไม้เกิดการหลุดออกมากกว่า สอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก ทั้งนี้ไม่สามารถทดสอบชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบได้

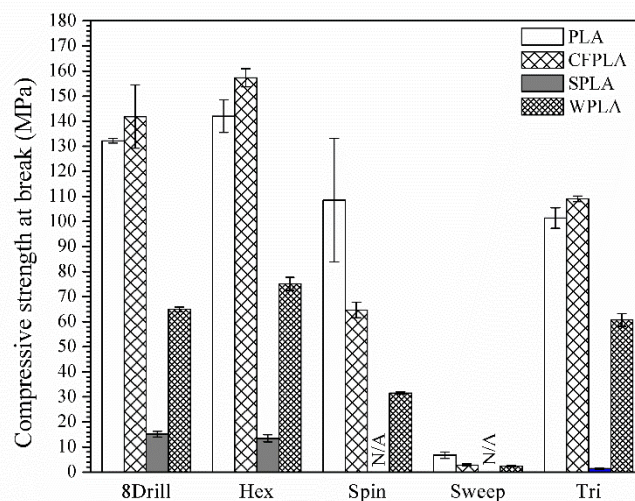
จากการพิจารณารูปที่ 4.71 และ 4.72 ซึ่งแสดงภาพภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep และ Tri ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด PLA, CFPLA, SPLA และ WPLA จะปรากฏรอยแตกหักที่มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติความเปราะของ PLA

4.3.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (Compressive test)

การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกดของชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ (Filament) 4 ชนิด ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ด้วยเครื่อง Universal testing machine ซึ่งทำการทดสอบด้วยอัตราการกด 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่าที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ ค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Yield และค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Break



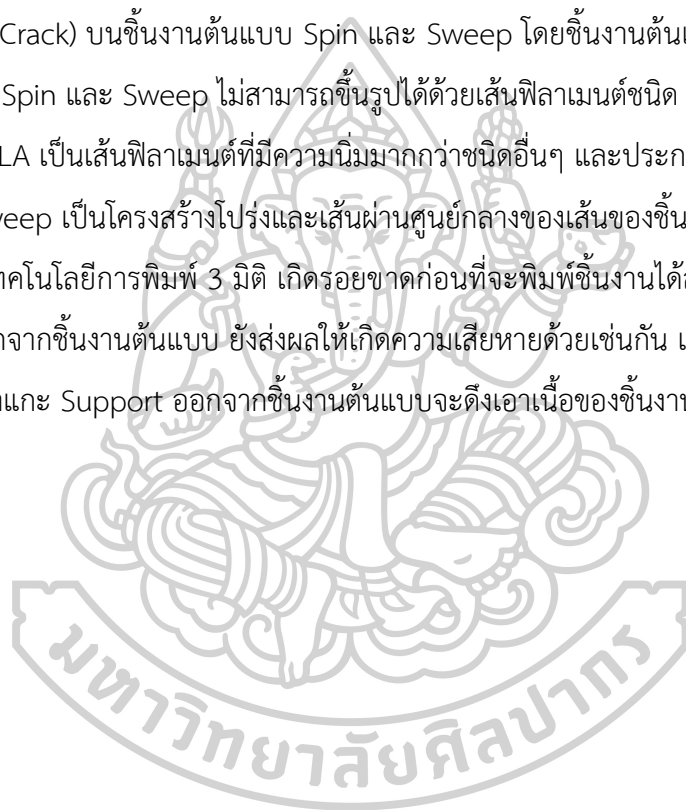
รูปที่ 4.73 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Yield ของชิ้นงาน
ต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง



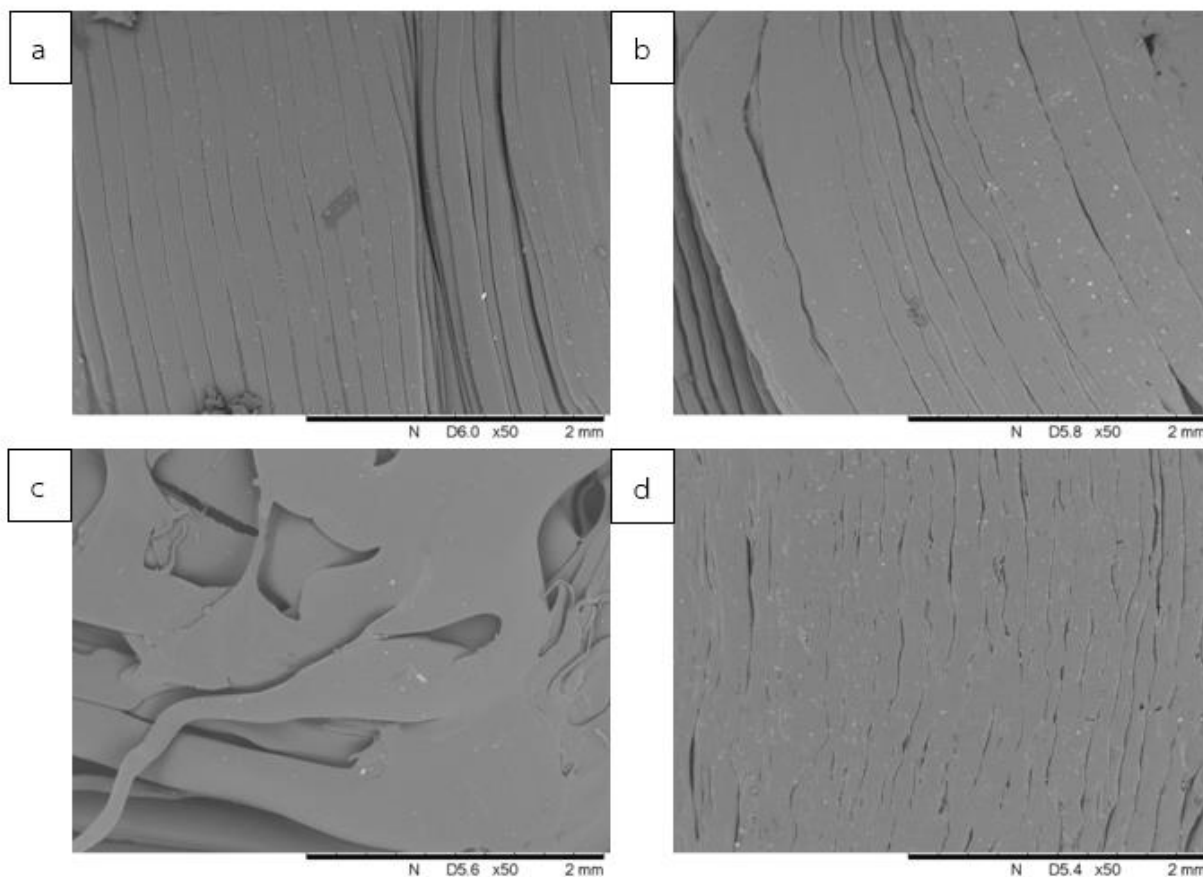
รูปที่ 4.74 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Break ของชิ้นงาน
ต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

จากรูปที่ 4.73 เป็นกราฟแสดงค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Yield ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง พบว่า ชิ้นงานต้นแบบ 8Drill, Hex และ Tri สามารถรับแรงกดได้มากกว่าก่อนเกิดก่อนแตกหัก ซึ่งชิ้นงานต้นแบบ 8Drill และ Hex มีค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Yield มากที่สุด หลังจากเกิดรอยแตกหรือชิ้นงานเกิดการแตกหักแล้วค่า load ยังลดต่ำลงไม่ถึง 100 นิวตัน การทดสอบจะยังดำเนินต่อไปจนถึงระยะกด 75% ของความสูงของชิ้นงาน ซึ่งจะพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive

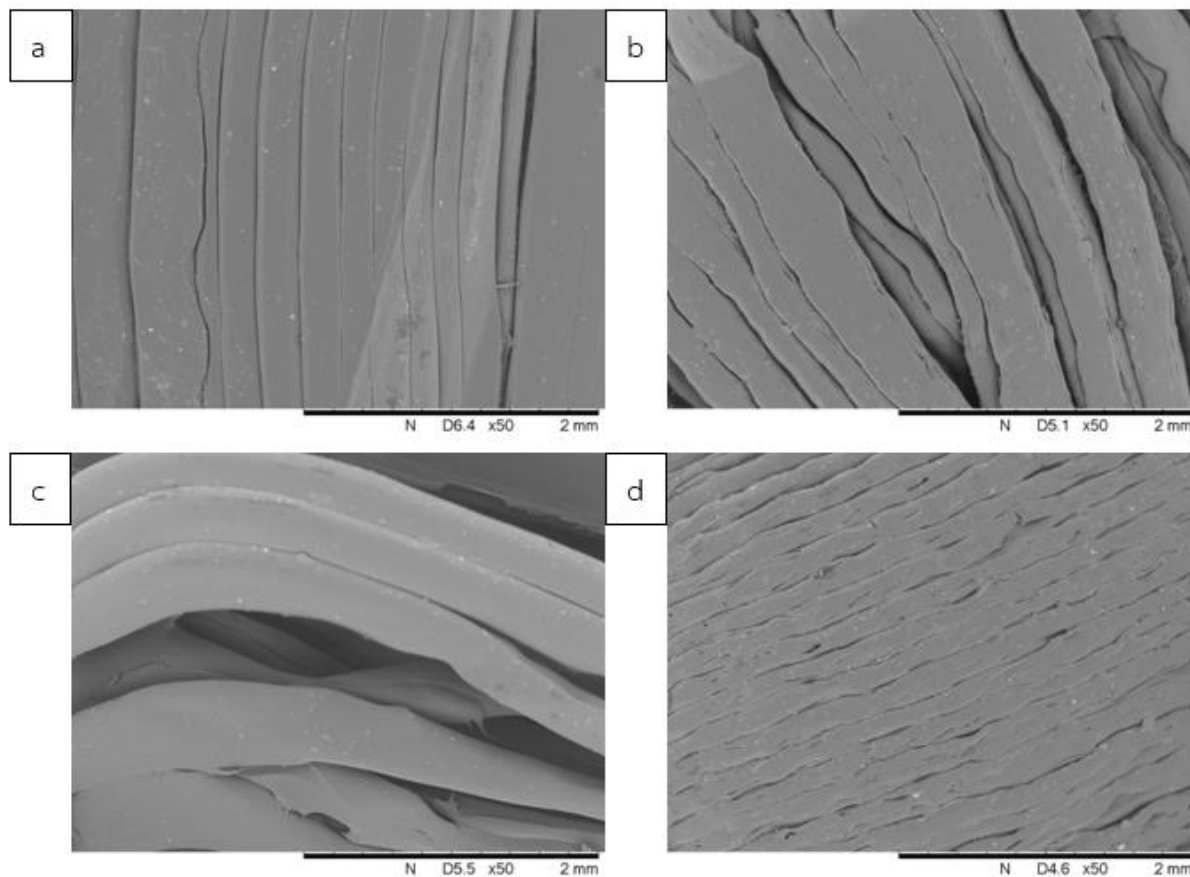
strength) ที่จุด Break ดังแสดงในรูปที่ 4.74 ของชิ้นงานต้นแบบที่ขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้รูปแบบ Hex มีค่ามากที่สุดในทุกเส้นฟิลาเมนต์ที่ใช้ขึ้นรูป เนื่องจากชิ้นงานเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า 3 รูปติดกัน จึงทำให้พื้นที่ในการรับแรงมากขึ้น อีกทั้งยังมีการส่งผ่านแรงซึ่งกันและกันคล้ายรังผึ้ง รองลงมาคือ ชิ้นงานต้นแบบ 8Drill และ Tri โดยที่ชิ้นงานต้นแบบ Sweep จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกดที่จุด Break น้อยที่สุด เนื่องจากพื้นที่ในการรับแรงและพื้นที่ของชิ้นงานที่สัมผัสกับแผ่น plate มีค่าน้อยที่สุด อีกทั้งด้วยรูปทรงของชิ้นงานที่มีความโปร่งระหว่างชิ้นงานมาก จึงมิให้ประสิทธิภาพในการรับแรงต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดสอบ SEM จะพบว่าพื้นผิวหน้าของชิ้นงานมีความราบเรียบและจะพบรอยแตก (Crack) บนชิ้นงานต้นแบบ Spin และ Sweep โดยชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin และ Sweep ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เนื่องจากเส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่มีความนิ่มมากกว่าชนิดอื่นๆ และประกอบกับโครงสร้างรูปแบบ Spin และ Sweep เป็นโครงสร้างโปร่งและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นของชิ้นงานเล็ก ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เกิดรอยขาดก่อนที่จะพิมพ์ชิ้นงานได้สมบูรณ์ อีกทั้งเวลาแกะ Support ออกจากชิ้นงานต้นแบบ ยังส่งผลให้เกิดความเสียหายด้วยเช่นกัน เนื่องจากเส้นฟิลาเมนต์มีความนิ่ม เวลาแกะ Support ออกจากชิ้นงานต้นแบบจะดึงเอาเนื้อของชิ้นงานต้นแบบออกมาด้วย



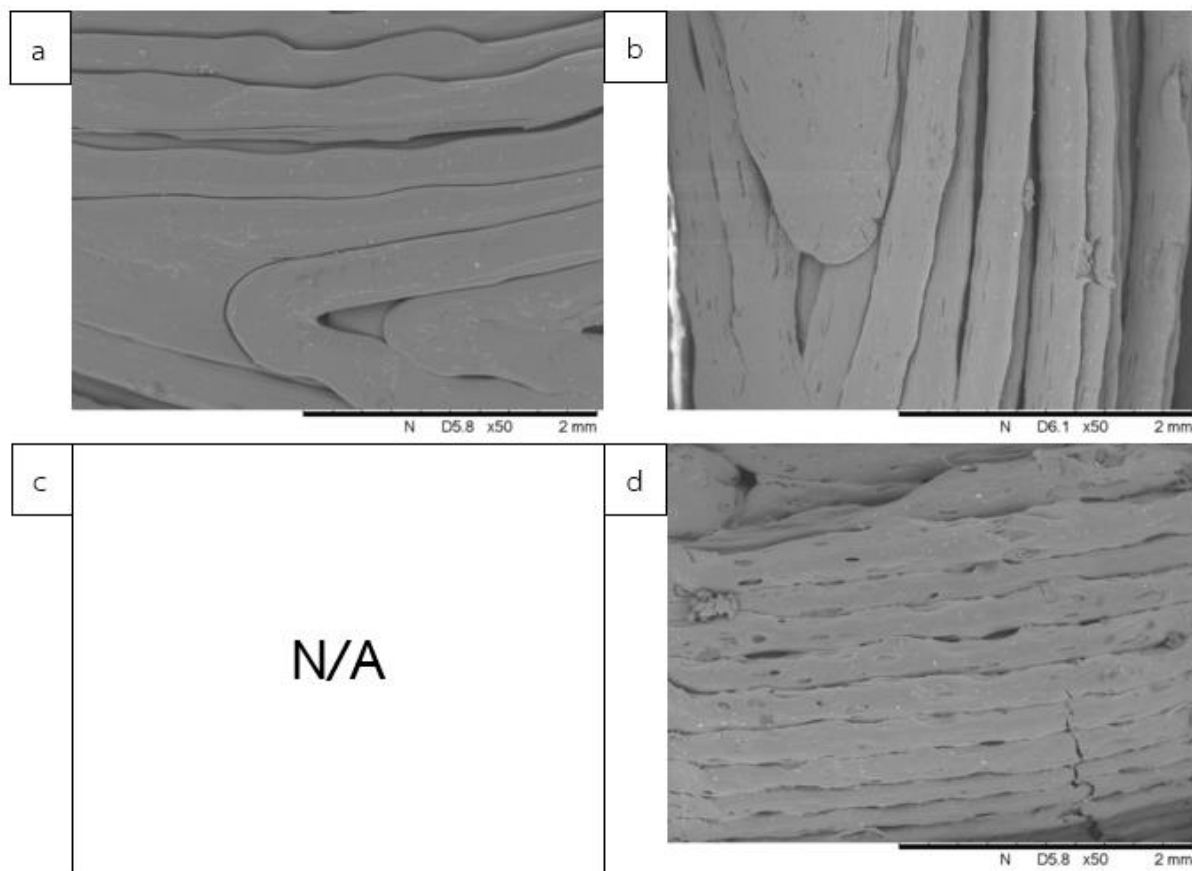
4.3.4 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงกด



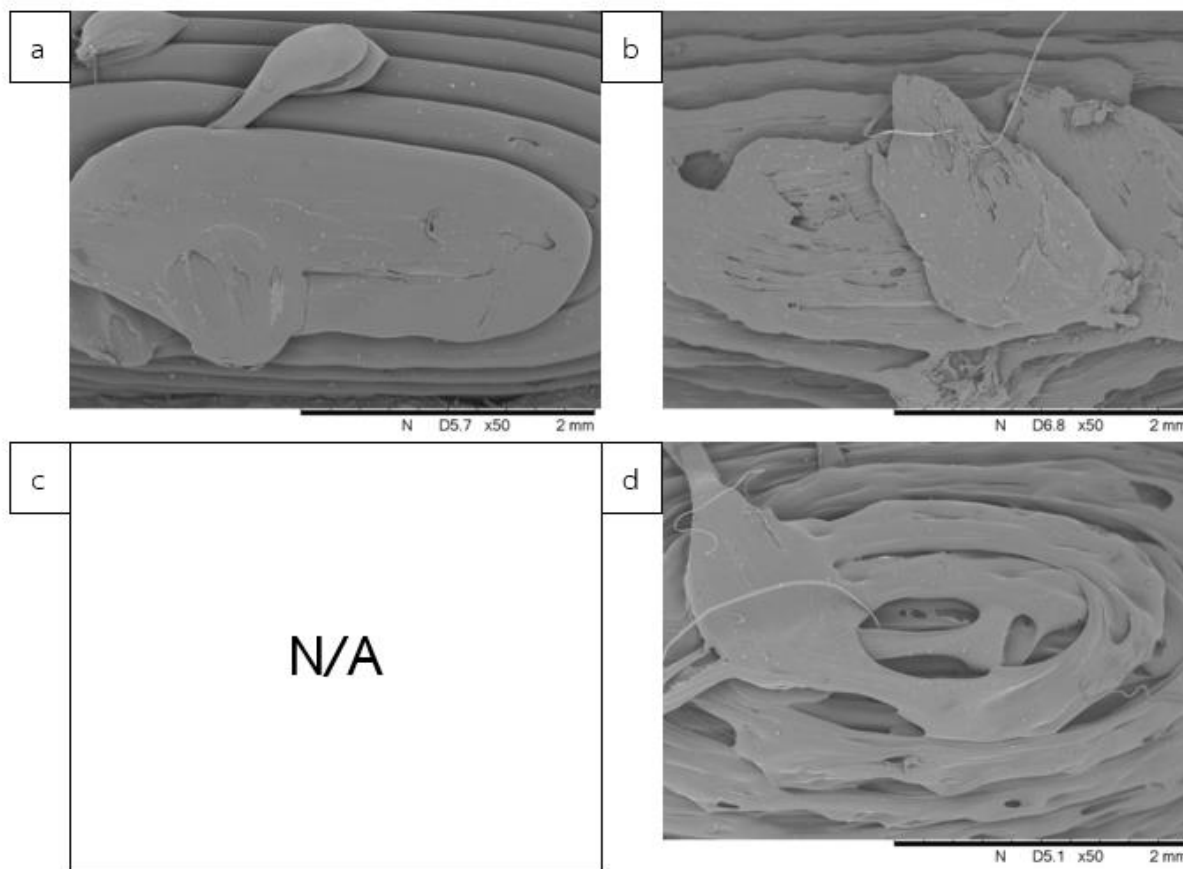
รูปที่ 4.75 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) โพลีแลคติกแอซิด (PLA), (b) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) โพลีแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



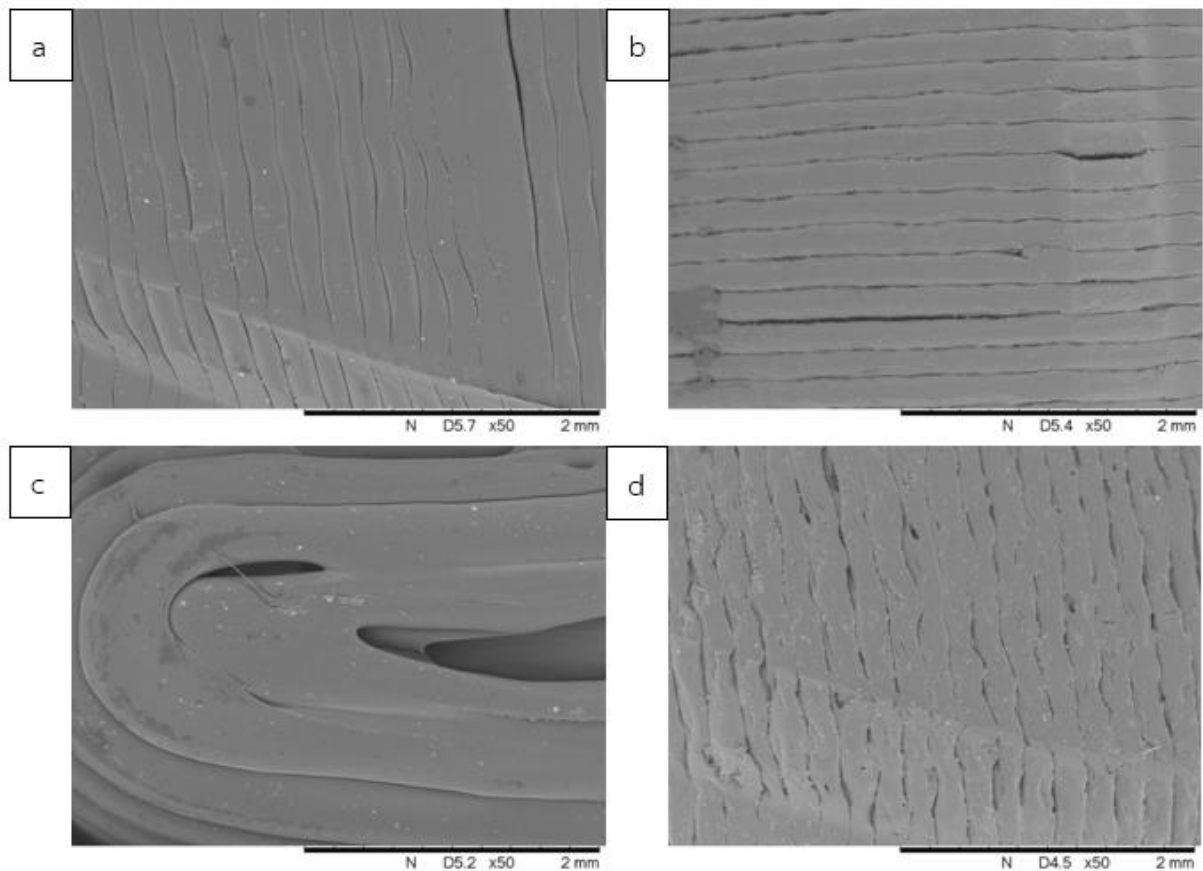
รูปที่ 4.76 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Hex ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 4.77 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Spin ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 4.78 แสดงภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) โพลีแลคติกแอซิด (PLA), (b) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) โพลีแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า



รูปที่ 4.79 แสดงภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Tri ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด; (a) พอลิแลคติกแอซิด (PLA), (b) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), (c) พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และ (d) พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จากการพิจารณารูปที่ 4.75, 4.76 และ 4.79 ซึ่งแสดงภาพภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill, Hex และ Tri ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) มีพื้นผิวหน้าชิ้นงานหลังการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด มีลักษณะราบเรียบ นอกจากนี้ยังปรากฏรอยแยกของเส้นฟิลาเมนต์ระหว่างชั้น แต่ไม่พบรอยแตกของเส้นฟิลาเมนต์ เนื่องจากชิ้นงานเพียงแค่ออกไปจนถึงระยะที่กำหนด

ไม่ได้ถูกแรงกระทำอย่างฉับพลัน อีกทั้งชิ้นงานต้นแบบทั้ง 3 รูปแบบ ยังเป็นโครงสร้างตัน จึงมีความแข็งแรงและทนทานต่อแรงกด ส่งผลให้ไม่เกิดการแตกหัก

จากการพิจารณารูปที่ 4.77 และ 4.78 ซึ่งแสดงภาพภาพโครงสร้างพื้นฐานวิทยาจากการส่องกล้อง SEM ของชิ้นงานต้นแบบ Spin และ Sweep ที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยความเร็วในการพิมพ์ 50 mm/s ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกดพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) หลังผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด จะมีพื้นผิวหน้าชิ้นงานเป็นลักษณะราบเรียบ และเกิดรอยแยกของเส้นฟิลาเมนต์ระหว่างชั้น โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด CFPLA และ WPLA จะเกิดรอยแยกระหว่างเส้นฟิลาเมนต์มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด PLA อีกทั้งจากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด ที่จุด Break ของชิ้นงานต้นแบบ Spin และ Sweep มีค่าความต้านทานต่อแรงกดที่จุด Break น้อยกว่า PLA และ CFPLA เนื่องจากเกิดรอยแตก (Crack) และเกิดช่องว่างของเส้นฟิลาเมนต์ระหว่างชั้นมากกว่า ทั้งนี้ไม่สามารถทดสอบชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เนื่องจากไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบได้

การทดสอบหารูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยเริ่มจากนำเอาชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่น้ำหนัก เมื่อชิ้นงานน้ำหนักเสถียรให้นำชิ้นงานไปแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ครบเวลาที่กำหนดให้แช่ชิ้นงานให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหารูพรุนเปิด (Open porosity) ตามสมการที่ (3)

$$OP (\%) = \frac{(m_{sat} - m_{dry}) / \rho_{water}}{V} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ m_{sat} คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำกลั่น

m_{dry} คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการอบ

ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำ

V คือ ปริมาตรของชิ้นงานทดสอบ

จากการทดสอบจะได้ค่า Open porosity ดังแสดงในตารางที่ 4.28 พบว่าชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในรูปแบบ 8Drill, Hex และ Tri โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) มีค่า Open porosity น้อยที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ตามลำดับ โดยชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) มีค่า Open porosity มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด โดยชิ้นงานที่มีค่า Open porosity มาก จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกดน้อย ในส่วนของชิ้นงานบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในรูปแบบ Spin และ Sweep พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่า Open porosity น้อยที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ตามลำดับ โดยไม่สามารถคำนวณหาค่า Open porosity ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) เนื่องจากชิ้นงานไม่มีความสมบูรณ์ เกิดการฉีกออกของเนื้อชิ้นงานขณะแกะ Support ออก สรุปว่าผลจากการหาค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อแรงกด



ตารางที่ 4.28 แสดงค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

รูปแบบ	ตัวอย่าง	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ส่วนต่าง น้ำหนัก (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)
8Drill	PLA	5.5959	5.6962	0.1003	5.60	1.80
	CFPLA	5.4205	5.4919	0.0714	5.60	1.28
	SPLA	4.8957	5.1411	0.2454	5.60	4.39
	WPLA	3.6211	4.1476	0.5265	5.60	9.43
Hex	PLA	5.4505	5.5806	0.1301	5.21	2.50
	CFPLA	5.2957	5.3785	0.0828	5.21	1.59
	SPLA	4.8414	5.5616	0.7202	5.21	13.86
	WPLA	3.5494	3.7108	0.1614	5.21	3.11
Spin	PLA	4.2324	4.3522	0.1198	4.21	2.85
	CFPLA	3.9976	4.2393	0.2417	4.21	5.76
	SPLA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	WPLA	2.7804	3.2129	0.4325	4.21	10.30
Sweep	PLA	3.7349	3.7839	0.049	3.62	1.36
	CFPLA	3.6099	3.6670	0.0571	3.62	1.58
	SPLA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	WPLA	2.2511	2.5458	0.2947	3.62	8.16
Tri	PLA	4.8127	4.8577	0.045	4.75	0.95
	CFPLA	4.6446	4.6836	0.039	4.75	0.82
	SPLA	4.1476	4.5630	0.4154	4.75	8.77
	WPLA	3.0495	3.1805	0.131	4.75	2.77

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งและการเลือกใช้วัสดุที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งด้วยการขึ้นรูปโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) จึงได้ศึกษาสมบัติของเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ที่มีขายในเชิงการค้า ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางด้านการไหล ลักษณะสัญญาณวิทยา และสมบัติเชิงกล อีกทั้งยังศึกษา ลักษณะสัญญาณวิทยาและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ที่มีขายในเชิงการค้า 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือ Engineering plastics ประกอบด้วย โพลีอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), โพลีเอไมด์ (PA), โพลีคาร์บอเนต (PC) และโพลีเอทิลีนเทเรพเทอเรตที่ถูกรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG), กลุ่มที่ 2 คือ PLA and PLA composites ประกอบด้วย โพลีแลคติกแอซิด (PLA), โพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), โพลีแลคติกแอซิดที่ถูกรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และโพลีแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA), กลุ่มที่ 3 คือ Elastomers ประกอบด้วย เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิในการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของเส้นฟิลาเมนต์ มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ อีกทั้งการนำชิ้นส่วนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีปริมาณผลึกใกล้เคียงกับปริมาณผลึกของเส้นฟิลาเมนต์ที่ยังไม่ได้ขึ้นรูป

5.1.2 จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม มีค่าที่สูงกว่าอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle) ที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยไม่เกิดการสลายตัวทางความร้อน นอกจากนี้ระยะเวลาที่เส้นฟิลาเมนต์อยู่ในกระบอกหลอมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด (Fused Deposition Modeling) 10 ถึง 30 นาที ก็ไม่ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน

5.1.3 จากการศึกษาการวิเคราะห์ความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ (DMTA) พบว่าที่อุณหภูมิ 25 ถึง 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการใช้งาน ค่า Storage modulus ของเส้นฟิลาเมนต์ 6 ชนิด ได้แก่ พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิคาร์บอนเนต (PC), พอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG), พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ยังมีความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุสูง ในขณะที่พอลิเอไมด์ (PA) และพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) มีความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุลดลงอย่างมาก ส่วนเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (TPU) มีความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุลดลงมากที่สุด แต่ก็ยังไม่เสียรูป จึงทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานโดยการฉีดพลาสติกออกจากหัวตายมาที่ฐานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด (Fused Deposition Modeling) ได้ ซึ่งมีการให้ความร้อนที่ฐานพิมพ์ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 120 องศาเซลเซียส

5.1.4 จากการศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเครื่อง Parallel plate rheometer ในช่วงความถี่ 1 ถึง 100 เรเดียนต่อวินาที พบว่า เส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม จะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning ซึ่งแสดงว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ (Printing speed) จะทำให้ค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้พอลิเมอร์ไหลผ่านหัวตาย (Nozzle) ได้ง่าย

5.1.5 จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile testing) ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า ความเร็วในการพิมพ์ (Printing speed) ไม่ส่งผลต่อลักษณะภาพ SEM ที่ถ่ายได้ เนื่องจากจะเห็นว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วในการพิมพ์ต่างกัน 3 ค่า มีปริมาณช่องว่างระหว่างชั้นของชิ้นงานใกล้เคียงกัน แต่ความเร็วในการพิมพ์จะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของวัสดุเสริมองค์ประกอบ

5.1.6 จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile strength) และความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural strength) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความเร็วในการพิมพ์ (Printing speed) พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการพิมพ์ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วย

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ไปเป็น 50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีแนวโน้มทำให้ค่า Tensile strength และค่า Flexural strength มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.7 จากการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง พบว่า ชิ้นงานต้นแบบรูปแบบ 8Drill, Hex และ Tri ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเส้นฟิลาเมนต์ PLA, CFPLA, SPLA และ WPLA ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกได้ เพราะชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก ส่วนชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin มีค่า Impact strength มากกว่าชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Sweep เนื่องจากชิ้นงานต้นแบบรูปแบบ Spin มีพื้นที่ในการรับแรงมากกว่า ทั้งนี้ชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin และ Sweep ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่มีความนิ่มมากกว่าชนิดอื่นๆ และประกอบกับโครงสร้างรูปแบบ Spin และ Sweep เป็นโครงสร้างโปร่งและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นของชิ้นงานเล็ก ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เกิดรอยขาดก่อนที่จะพิมพ์ชิ้นงานได้สมบูรณ์ อีกทั้งเวลาเกาะ Support ออกจากชิ้นงานต้นแบบ ยังส่งผลให้เกิดความเสียหายด้วยเช่นกัน เนื่องจากเส้นฟิลาเมนต์มีความนิ่ม เวลาเกาะ Support ออกจากชิ้นงานต้นแบบจะดึงเอาเนื้อของชิ้นงานต้นแบบออกมาด้วย

5.1.8 จากการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength) ที่จุด Break ของชิ้นงานต้นแบบที่ขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้รูปแบบ Hex มีค่ามากที่สุดในทุกเส้นฟิลาเมนต์ของกลุ่มที่ 2 ที่ใช้ขึ้นรูป เนื่องจากชิ้นงานเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า 3 รูปติดกัน จึงทำให้พื้นที่ในการรับแรงมากขึ้น อีกทั้งยังมีการส่งผ่านแรงซึ่งกันและกันคล้ายรังผึ้ง รองลงมาคือ ชิ้นงานต้นแบบ 8Drill, Tri และ Spin โดยที่ชิ้นงานต้นแบบ Sweep จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกดที่จุด Break น้อยที่สุด เนื่องจากพื้นที่ในการรับแรงและพื้นที่ของชิ้นงานที่สัมผัสกับแผ่น plate มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้ชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งรูปแบบ Spin และ Sweep ไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA เป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่มีความนิ่มมากกว่าชนิดอื่นๆ และประกอบกับโครงสร้างรูปแบบ Spin และ Sweep เป็นโครงสร้างโปร่งและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นของชิ้นงานเล็ก ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เกิดรอยขาดก่อนที่จะพิมพ์ชิ้นงานได้สมบูรณ์ อีกทั้งเวลาเกาะ Support ออกจากชิ้นงานต้นแบบ ยังส่งผลให้เกิดความเสียหายด้วยเช่นกัน เนื่องจากเส้นฟิลาเมนต์มีความนิ่ม เวลาเกาะ Support ออกจากชิ้นงานต้นแบบจะดึงเอาเนื้อของชิ้นงานต้นแบบออกมาด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printing) เกิดช่องว่างในชิ้นงาน ดังนั้นจึงควรศึกษาปัจจัยในการขึ้นรูป เช่น ค่า Outer Surface – Perimeters และค่า Retraction – Length on Move ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด (Fused Deposition Modeling)







ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบต่างๆ

ภาคผนวก ก.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหล (MFI)

ตารางผนวก ก.1-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS)

ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	30.61	0.2983	5.8471	5.8641	0.0575
2	30.49	0.2956	5.8170		
3	30.04	0.2968	5.9281		

ตารางผนวก ก.1-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเอไมด์ (PA)

ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	60.00	0.2098	2.0980	2.1543	0.0492
2	60.00	0.2189	2.1890		
3	60.00	0.2176	2.1760		

ตารางผนวก ก.1-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิคาร์บอเนต (PC)

ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	29.95	1.7877	35.8137	34.9592	1.0709
2	30.32	1.7059	33.7579		
3	20.40	1.2004	35.3059		

ตารางผนวก ก.1- 4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG)

ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	29.99	0.4653	9.3091	9.4184	0.0961
2	30.17	0.4755	9.4564		
3	29.95	0.4737	9.4898		

ตารางผนวก ก.1-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	30.00	0.3156	6.3120	6.3177	0.0310
2	30.07	0.3183	6.3512		
3	30.22	0.3168	6.2899		

ตารางผนวก ก.1-6 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรง ด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA)

ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	29.86	0.2698	5.4213	5.4428	0.0366
2	30.00	0.2711	5.4220		
3	29.60	0.2706	5.4851		

ตารางผนวก ก.1-7 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA)

ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	13.70	1.7096	74.8730	74.8876	0.4248
2	13.82	1.7153	74.4703		
3	13.61	1.7085	75.3196		

ตารางผนวก ก.1-8 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA)

ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	20.79	0.5346	15.4286	15.5775	0.1351
2	20.85	0.5425	15.6115		
3	20.67	0.5406	15.6923		

ตารางผนวก ก.1-9 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE)

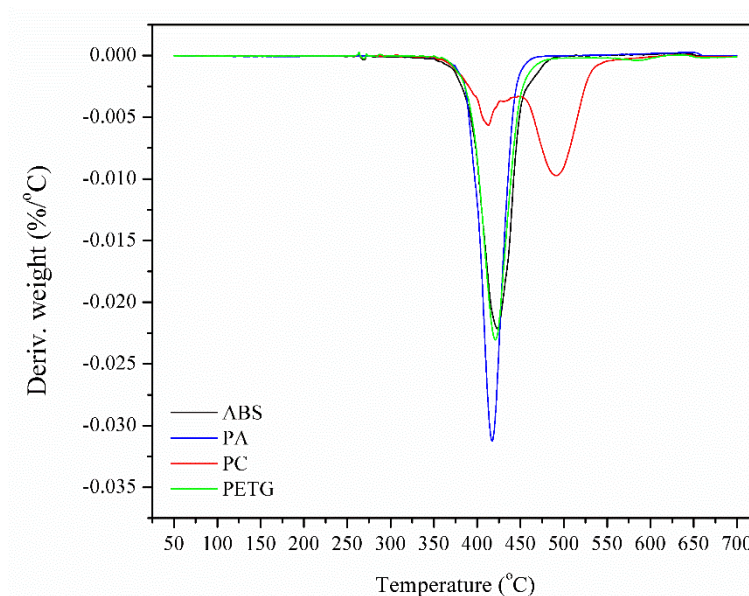
ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	14.52	0.3179	13.1364	12.8284	1.0939
2	15.68	0.3035	11.6135		
3	15.56	0.3562	13.7352		

ตารางผนวก ก.1-10 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติก
พอลิยูรีเทน (TPU)

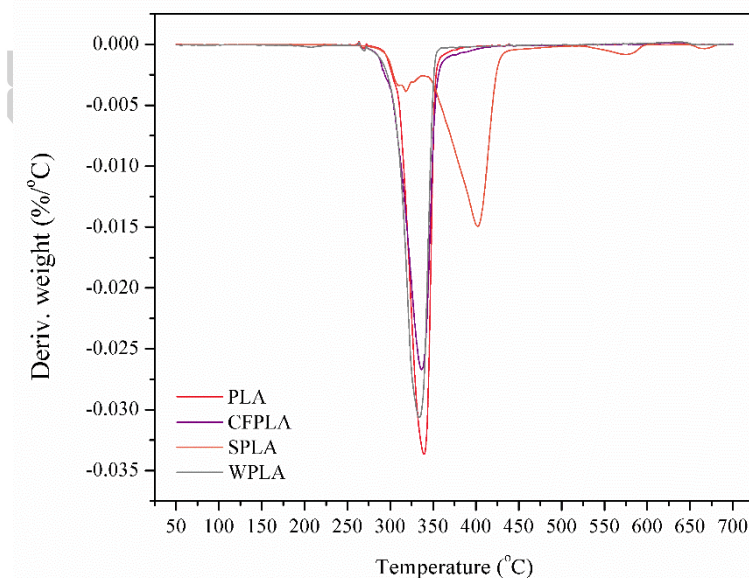
ครั้งที่	เวลา	น้ำหนัก	MFI	ค่าเฉลี่ย	SD
	(s)	(g)	(g/10min)		
1	29.34	0.7173	14.6687	14.7592	0.1170
2	30.40	0.7545	14.8914		
3	30.38	0.7452	14.7176		



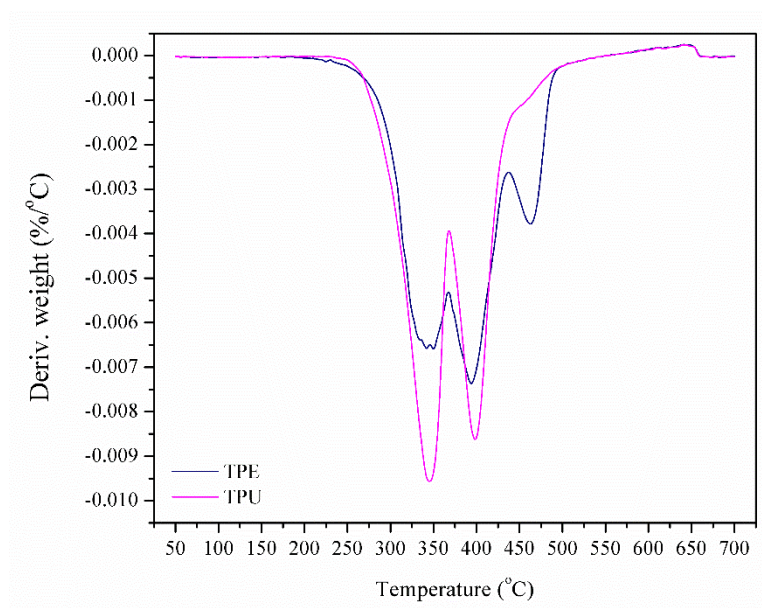
ภาคผนวก ก.2 แสดง DTG Thermogram ของพอลิเมอร์ทั้ง 10 ชนิด ภายใต้สภาวะการทดสอบ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิที่ใช้ที่หัวตาย (Nozzle temperature)



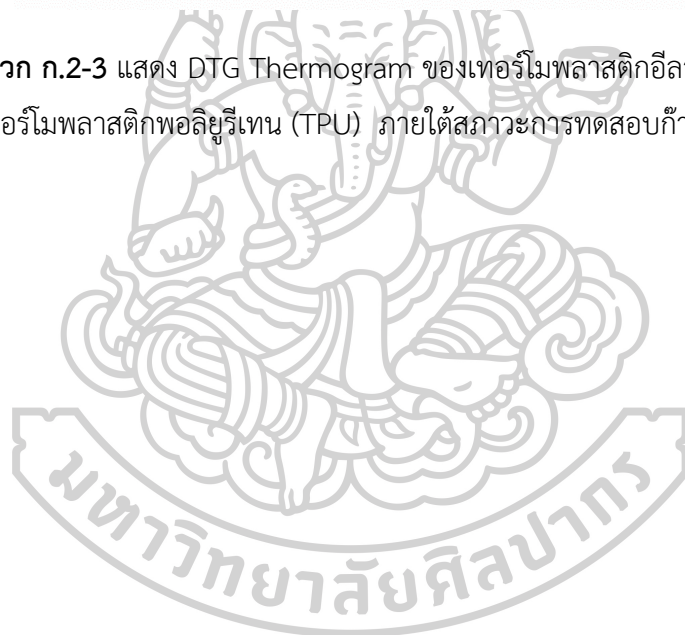
รูปผนวก ก.2-1 แสดง DTG Thermogram ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA), พอลิคาร์บอเนต (PC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2)



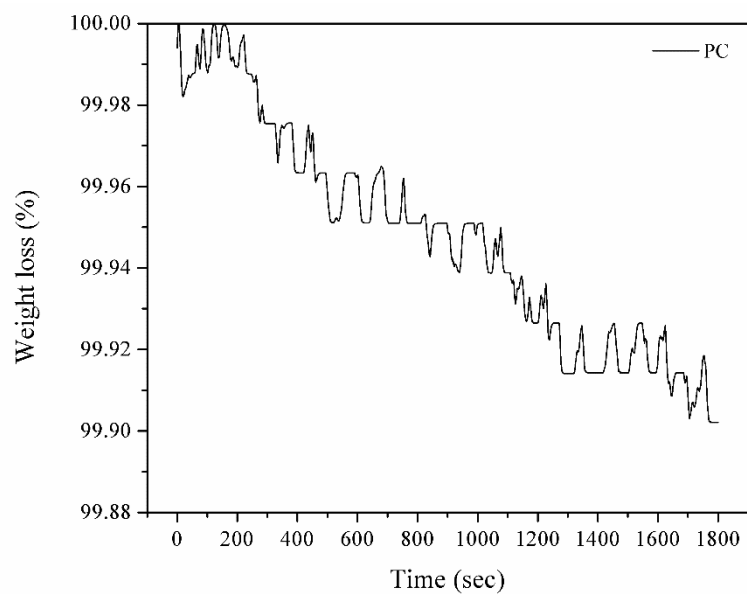
รูปผนวก ก.2-2 แสดง DTG Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA), พอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2)



รูปผนวก ก.2-3 แสดง DTG Thermogram ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N₂)

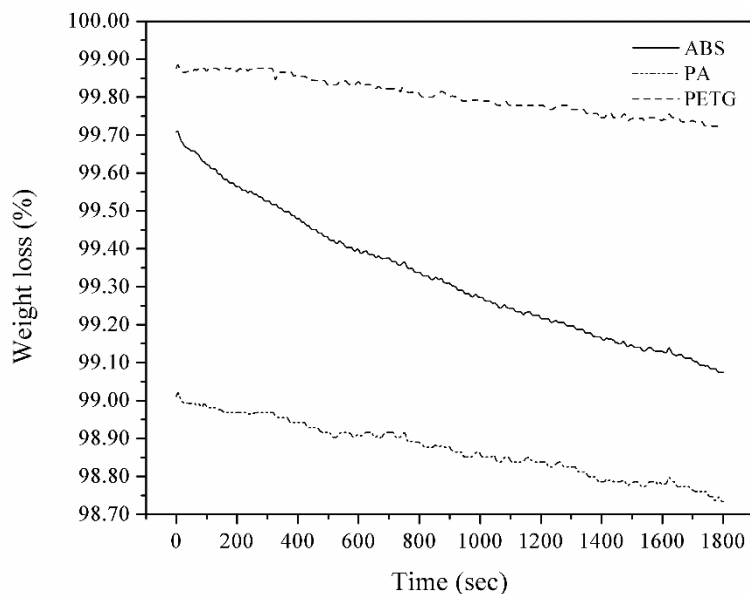


ภาคผนวก ก.3 แสดง TGA Thermogram ของพอลิเมอร์ทั้ง 10 ชนิด ภายใต้สภาวะการทดสอบ
ก๊าซออกซิเจน (O_2) และภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2) แบบ Isothermal
ที่อุณหภูมิที่ใช้ที่หัวตาย (Nozzle temperature)

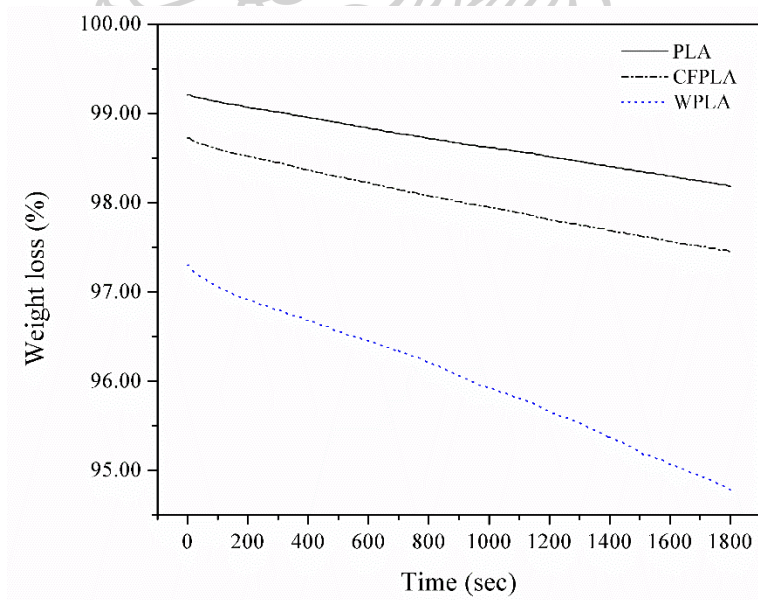


รูปผนวก ก.3-1 แสดง TGA Thermogram ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ภายใต้สภาวะการทดสอบ
ก๊าซออกซิเจน (O_2) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 250 °C

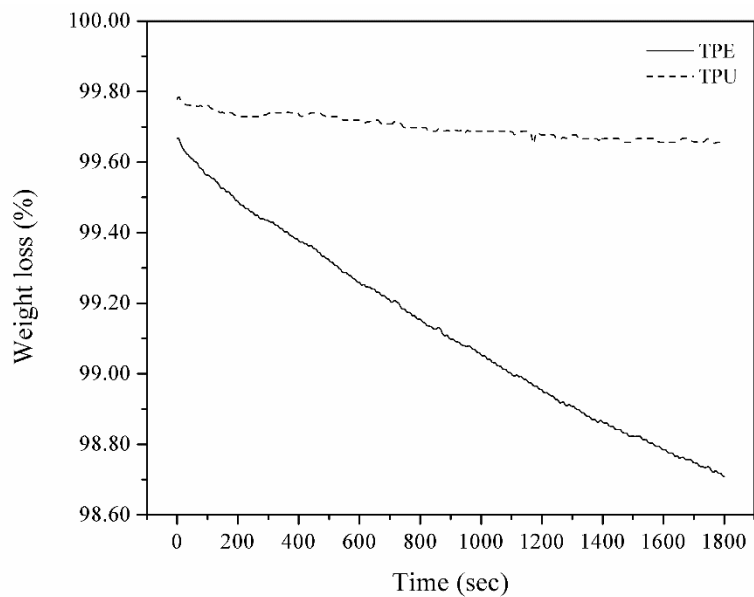




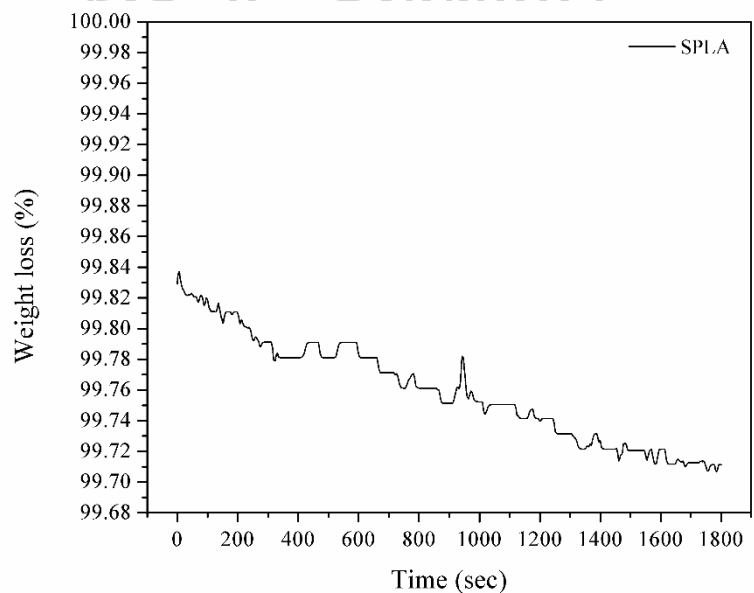
รูปผนวก ก.3-2 แสดง TGA Thermogram ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน (O₂) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 240 °C



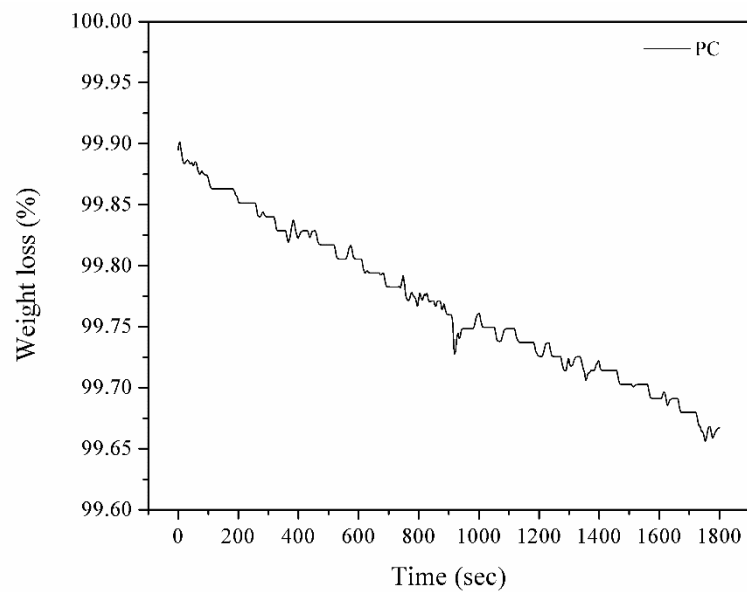
รูปผนวก ก.3-3 แสดง TGA Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน (O₂) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 220 °C



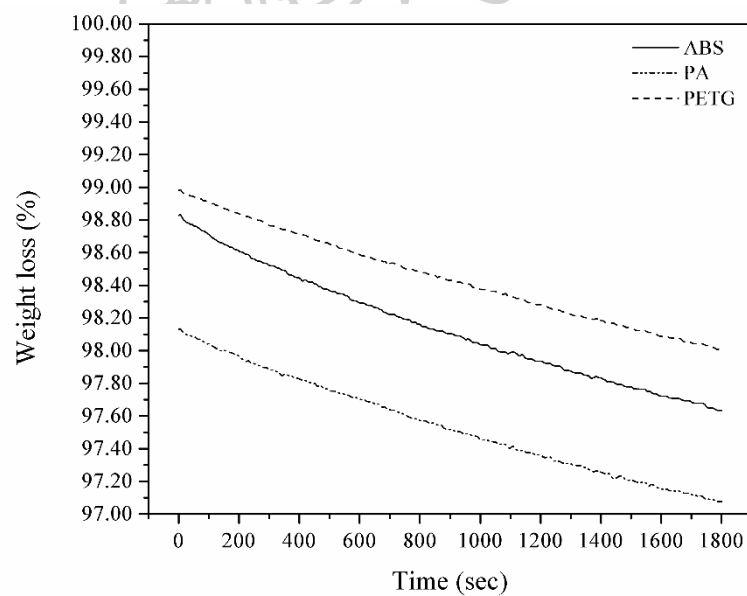
รูปผนวก ก.3-4 แสดง TGA Thermogram ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน (O_2) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 210 °C



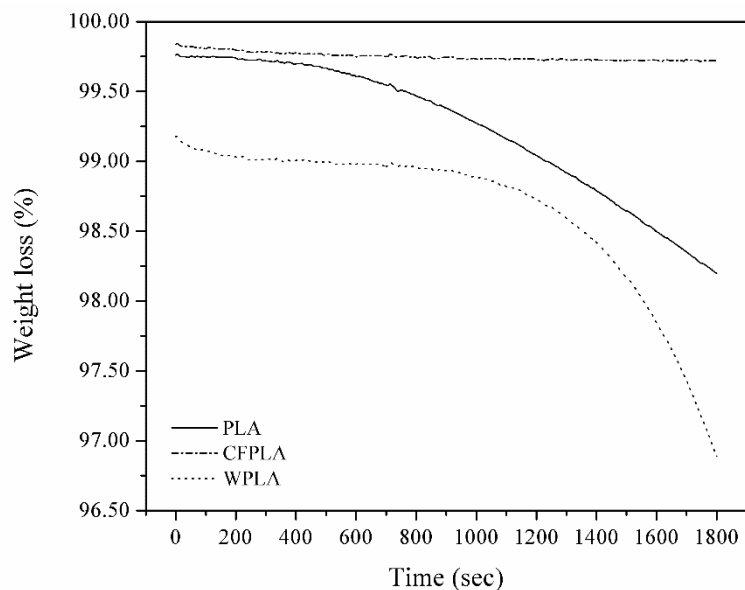
รูปผนวก ก.3-5 แสดง TGA Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน (O_2) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 200 °C



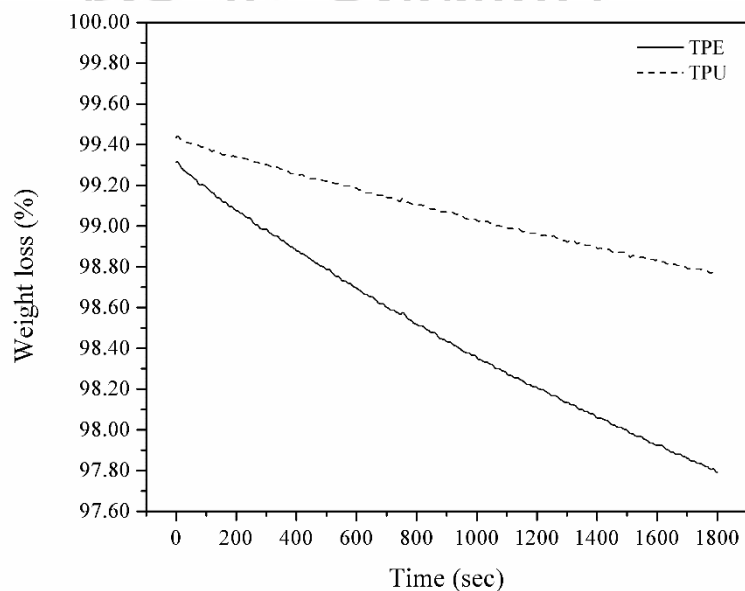
รูปผนวก ก.3-6 แสดง TGA Thermogram ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ภายใต้สภาวะการทดสอบ ก๊าซไนโตรเจน (N_2) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 250 °C



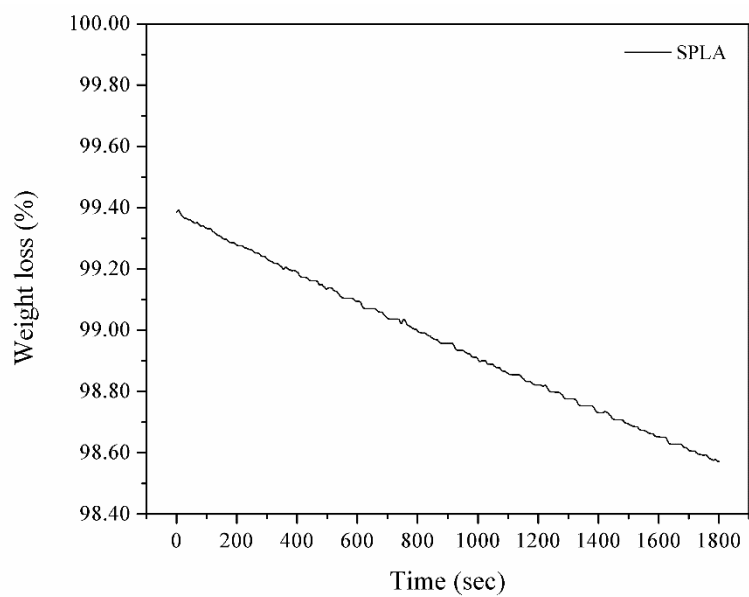
รูปผนวก ก.3-7 แสดง TGA Thermogram ของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), พอลิเอไมด์ (PA) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ภายใต้สภาวะ การทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 240 °C



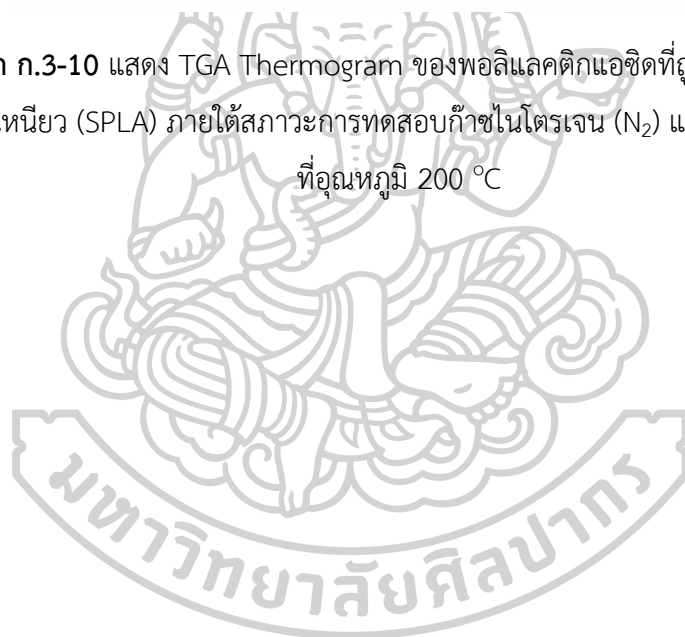
รูปผนวก ก.3-8 แสดง TGA Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) และพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 220 °C



รูปผนวก ก.3-9 แสดง TGA Thermogram ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N_2) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 210 °C



รูปผนวก ก.3-10 แสดง TGA Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน (N₂) แบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 200 °C



ภาคผนวก ก.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงรีอโลยีด้วยเครื่อง Parallel plate rheometer

ตารางผนวก ก.4-1 แสดงค่า Complex viscosity ที่ความถี่ 1, 10 และ 100 เรเดียนต่อวินาที ของพอลิเมอร์ทั้ง 10 ชนิด

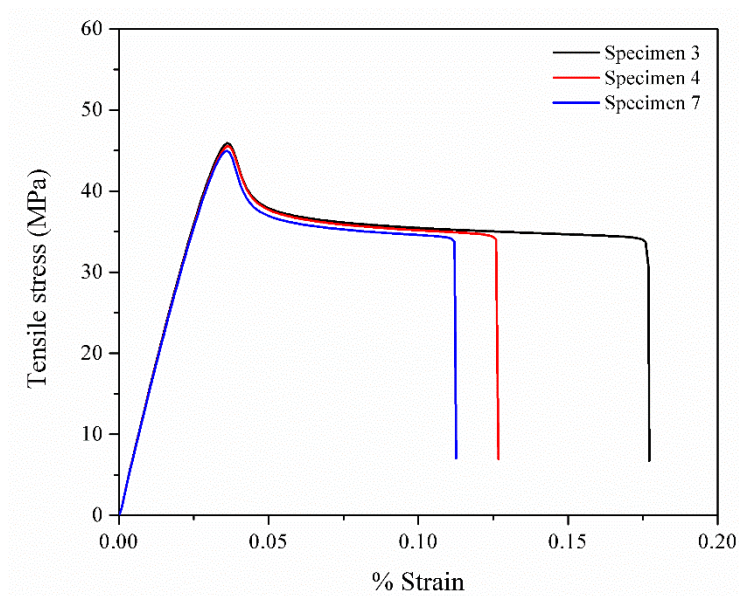
ตัวอย่าง	ค่า Complex viscosity (Pa.s)		
	Frequency 1 rad/sec	Frequency 10 rad/sec	Frequency 100 rad/sec
ABS	3609.73	1485.44	528.62
PA	2744.65	1896.20	974.06
PC	6.65	5.48	5.57
PETG	199.80	189.76	154.85
PLA	1531.55	1272.74	194.08
CFPLA	207.25	193.47	158.49
SPLA	67.62	58.25	41.05
WPLA	30.22	13.30	8.21
TPE	11382.50	1853.52	438.15
TPU	67.69	39.74	23.17

ภาคผนวก ก.5 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ด้วยเครื่อง
Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA)

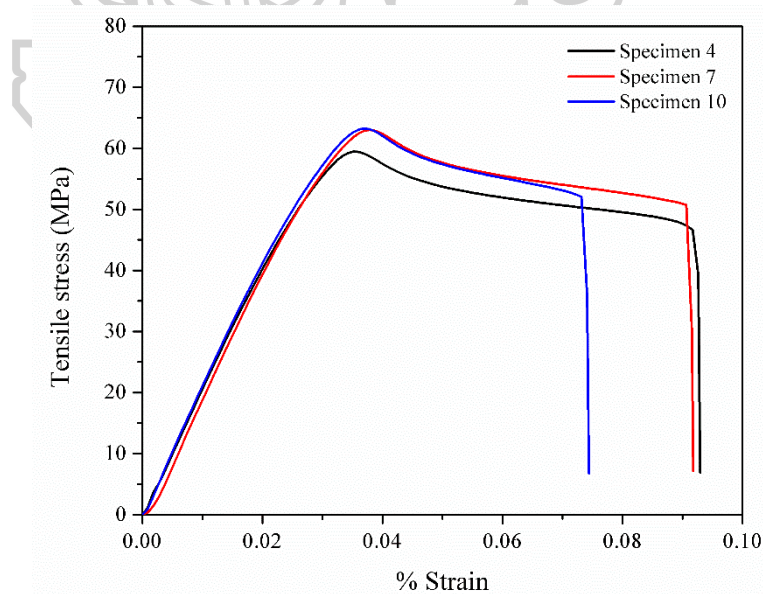
ตารางผนวก ก.5-1 แสดงค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส
ของพอลิเมอร์ทั้ง 10 ชนิด

ตัวอย่าง	ค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 25 °C (MPa)	ค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 30 °C (MPa)	ค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 40 °C (MPa)
ABS	2014.9	1990.6	1963.0
PA	1251.8	810.0	580.5
PC	2800.4	2766.9	2723.5
PETG	1669.2	1650.3	1623.4
PLA	1803.4	1785.0	1759.6
CFPLA	3724.0	3670.8	3590.7
SPLA	248.8	232.5	214.9
WPLA	3265.4	3214.2	3161.8
TPE	108.2	94.5	85.5
TPU	208.0	160.7	128.3

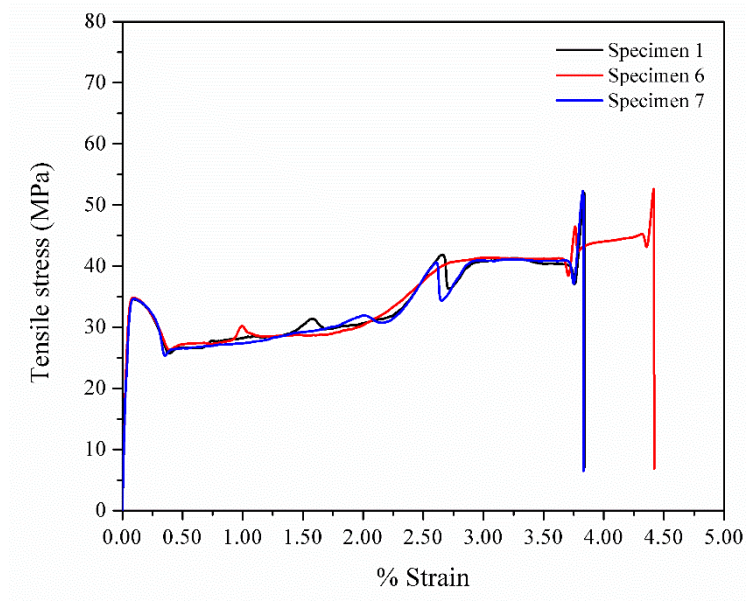
ภาคผนวก ก.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด



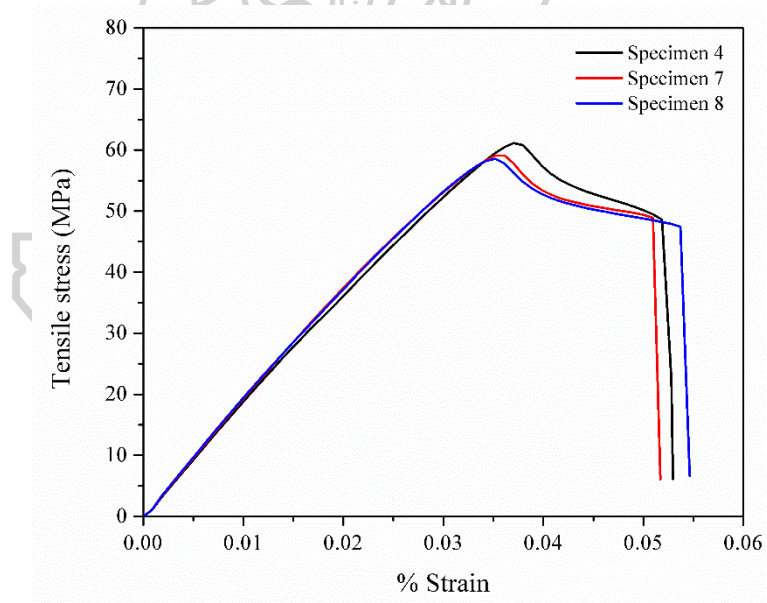
รูปผนวก ก.6-1 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



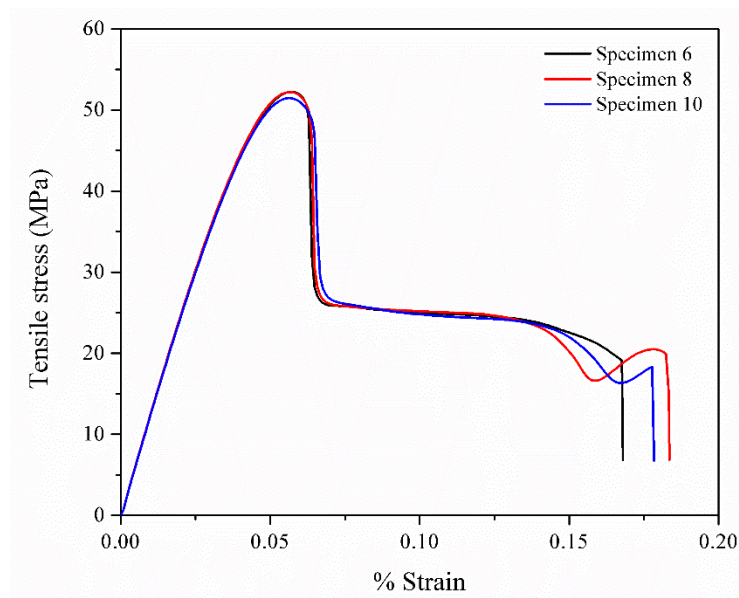
รูปผนวก ก.6-2 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



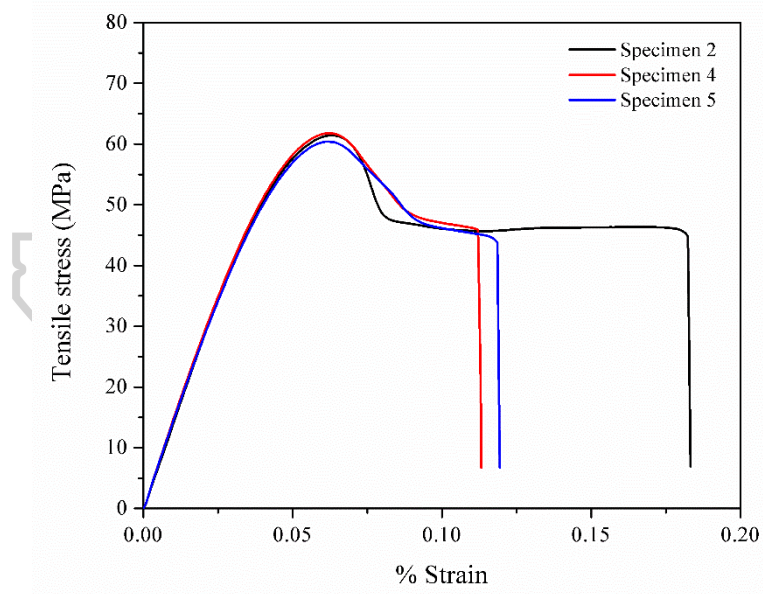
รูปผนวก ก.6-3 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วย กระบวนการฉีด



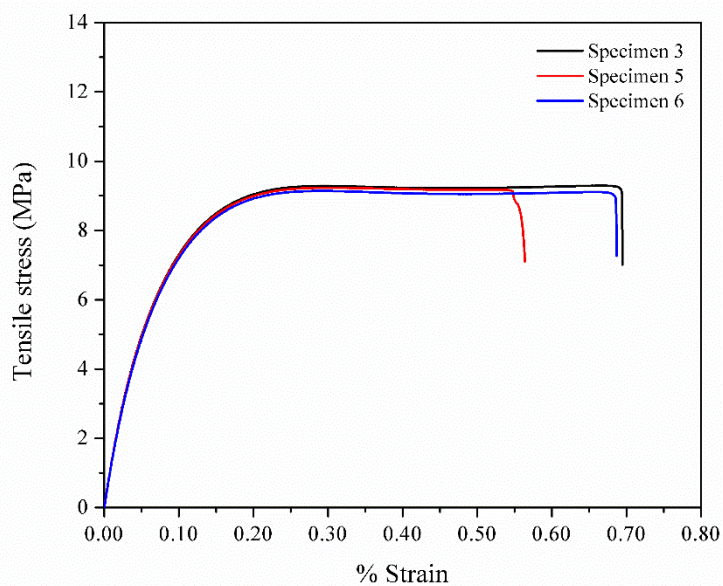
รูปผนวก ก.6-4 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วย กระบวนการฉีด



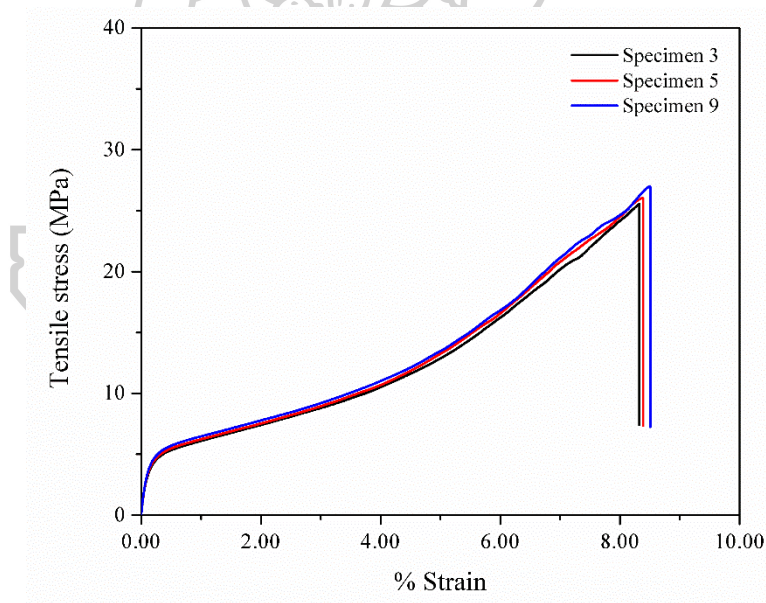
รูปผนวก ก.6-5 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วย ไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



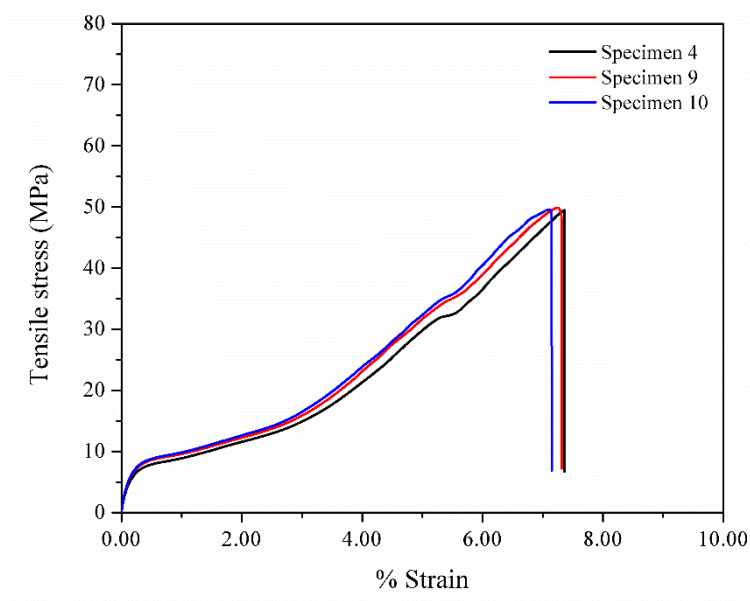
รูปผนวก ก.6-6 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงาน ด้วยกระบวนการฉีด



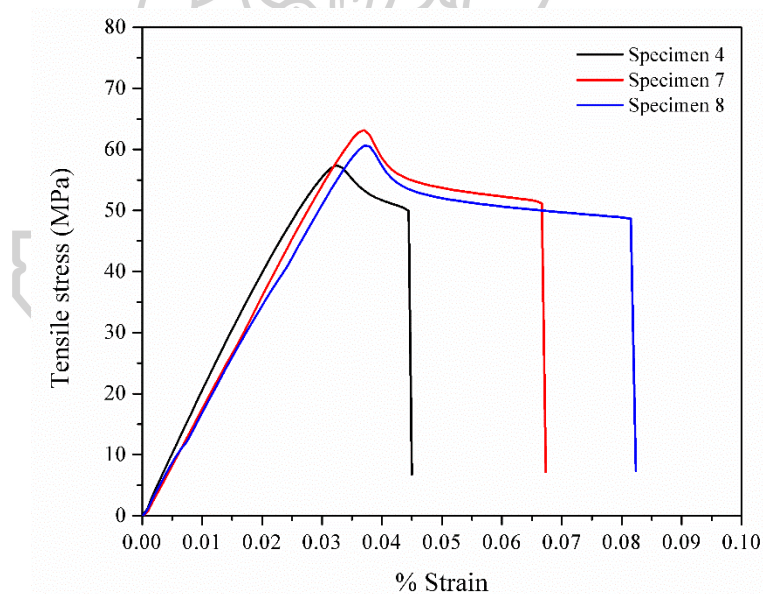
รูปผนวก ก.6-7 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



รูปผนวก ก.6-8 แสดง Tensile stress-strain curve ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



รูปผนวก ก.6-9 แสดง Tensile stress-strain curve ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



รูปผนวก ก.6-10 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตารางผนวก ก.6-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	12.83	3.26	41.81	46.26	30.00	1,577.49
2*	12.68	3.28	41.56	47.70	9.72	1,596.52
3	12.86	3.26	41.91	45.23	17.69	1,573.56
4	12.84	3.27	42.03	44.10	12.59	1,559.06
5	12.82	3.27	41.87	43.53	21.30	1,566.90
6	12.81	3.26	41.80	47.31	25.37	1,555.33
7	12.85	3.29	42.33	43.94	12.20	1,547.27
8*	12.98	3.30	42.89	44.85	15.00	1,523.25
9*	12.89	3.29	42.38	41.72	18.80	1,590.37
10*	12.84	3.28	42.12	43.16	6.02	1,558.36
ค่าเฉลี่ย	12.84	3.27	41.99	44.82	17.83	1,560.42
SD	0.07	0.01	0.21	1.53	5.66	10.19

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.08	3.04	39.81	55.52	8.06	2,331.57
2*	13.08	3.04	39.80	56.24	10.93	2,369.59
3*	13.07	3.23	42.18	57.72	8.33	1,974.66
4	13.14	3.05	40.03	57.04	9.26	2,123.67
5*	13.07	3.16	41.29	62.39	8.15	2,116.14
6*	13.04	3.20	41.76	60.45	7.04	2,348.67
7	13.12	3.17	41.62	60.83	9.15	2,155.48
8	13.06	3.21	41.92	56.60	8.34	2,189.34
9	13.07	3.05	39.90	53.48	9.82	2,062.21
10	13.06	3.21	41.96	60.94	7.41	2,290.45
ค่าเฉลี่ย	13.09	3.12	40.87	57.40	8.67	2,192.12
SD	0.03	0.08	1.06	2.97	0.89	102.01

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.02	3.09	40.26	52.03	384.02	874.72
2*	13.03	3.10	40.38	52.01	451.42	887.52
3*	12.97	3.12	40.47	53.48	455.03	764.24
4*	13.05	3.15	41.11	50.14	457.90	915.34
5	13.07	3.17	41.46	51.04	386.79	842.75
6	13.03	3.16	41.12	52.63	441.82	879.44
7	13.04	3.14	40.94	52.30	383.00	875.09
8	13.03	3.18	41.44	46.71	401.13	855.49
9*	13.04	3.18	41.42	39.87	342.37	850.77
10	13.03	3.16	41.23	50.41	380.05	947.48
ค่าเฉลี่ย	13.04	3.15	41.08	50.85	396.14	879.16
SD	0.02	0.03	0.44	2.19	23.57	36.30

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงาน ด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.87	3.32	42.69	58.30	7.32	2,049.94
2	12.91	3.32	42.89	57.57	6.67	1,979.46
3*	12.92	3.35	43.27	52.90	10.74	1,986.55
4	12.93	3.52	45.46	61.16	5.28	1,941.03
5*	12.94	3.48	45.09	58.30	7.04	1,848.08
6*	12.92	3.43	44.36	65.19	6.11	1,943.56
7	12.84	3.50	44.95	59.10	5.09	1,977.69
8	12.94	3.31	42.83	58.55	5.37	2,001.71
9*	13.02	3.27	42.58	49.10	6.58	2,058.64
10*	12.86	3.44	44.21	53.75	4.08	2,001.94
ค่าเฉลี่ย	12.90	3.39	43.76	58.94	5.95	1,989.97
SD	0.04	0.11	1.33	1.36	0.99	39.97

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.94	3.27	42.30	47.42	21.85	1,254.43
2*	12.98	3.27	42.50	47.01	16.57	1,235.42
3*	12.91	3.28	42.39	51.85	18.89	1,204.93
4	12.96	3.31	42.87	50.09	19.44	1,256.41
5	12.85	3.32	42.62	48.02	16.02	1,238.05
6	12.86	3.28	42.14	50.62	16.76	1,282.19
7*	12.97	3.27	42.42	49.54	44.54	1,251.20
8	12.82	3.27	41.91	50.82	18.33	1,284.40
9	12.87	3.29	42.37	49.70	17.69	1,270.09
10	12.83	3.28	42.07	50.53	17.78	1,272.19
ค่าเฉลี่ย	12.88	3.29	42.33	49.60	18.27	1,265.39
SD	0.05	0.02	0.33	1.35	1.92	16.63

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-6 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.87	3.28	42.25	59.92	17.59	1,460.21
2	12.85	3.28	42.11	61.21	18.24	1,426.37
3*	12.82	3.25	41.61	62.03	7.96	1,482.08
4	12.80	3.29	42.07	61.75	11.30	1,492.89
5	12.88	3.25	41.87	60.39	11.85	1,469.32
6	12.95	3.29	42.59	57.08	8.80	1,423.48
7*	12.83	3.28	42.03	55.15	32.41	1,472.17
8*	12.84	3.30	42.36	54.24	27.13	1,476.60
9	12.84	3.29	42.25	58.40	9.72	1,473.52
10	12.88	3.30	42.47	58.06	28.70	1,479.47
ค่าเฉลี่ย	12.87	3.28	42.23	59.54	15.17	1,460.75
SD	0.05	0.02	0.24	1.74	7.01	26.43

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-7 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุง เพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.01	3.23	42.02	8.72	47.20	128.55
2*	13.01	3.10	40.38	7.64	45.17	118.44
3	12.98	3.22	41.80	9.29	69.42	129.46
4	13.05	3.23	42.14	9.08	74.88	126.07
5	12.98	3.25	42.13	9.23	56.37	129.99
6	13.00	3.10	40.30	9.14	68.68	127.13
7*	12.98	3.17	41.19	8.94	76.73	128.46
8	13.00	3.15	40.98	8.77	62.85	131.68
9*	12.99	3.09	40.15	8.98	37.40	129.05
10*	13.01	3.01	39.16	7.65	28.48	124.94
ค่าเฉลี่ย	13.00	3.20	41.56	9.04	63.23	128.81
SD	0.03	0.06	0.76	0.24	10.08	2.02

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-8 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.91	3.05	39.34	25.42	851.11	16.44
2*	12.92	3.13	40.47	20.11	814.01	26.15
3	12.91	3.00	38.72	25.46	832.16	13.52
4	12.94	3.05	39.51	23.85	814.41	16.97
5	12.93	3.06	39.62	26.02	838.43	14.66
6	12.91	3.05	39.41	25.10	843.33	17.86
7	12.93	3.08	39.82	24.29	829.61	16.37
8*	12.91	3.05	39.39	16.02	613.56	29.76
9	12.93	3.05	39.44	26.97	850.47	15.70
10*	12.93	3.04	39.36	26.75	841.50	11.91
ค่าเฉลี่ย	12.92	3.05	39.41	25.30	837.07	15.93
SD	0.01	0.02	0.34	1.04	12.98	1.46

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-9 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	12.69	3.22	40.83	47.13	734.52	8.27
2*	12.73	3.23	41.12	47.08	750.64	8.42
3	12.63	3.23	40.79	47.81	738.20	8.30
4	12.61	3.22	40.66	49.36	736.02	9.91
5*	12.61	3.23	40.73	45.02	688.64	10.07
6*	12.75	3.21	40.94	47.31	695.95	9.45
7	12.77	3.23	41.29	49.33	714.85	9.75
8	12.74	3.23	41.20	47.79	706.89	9.30
9	12.67	3.24	41.02	49.87	731.51	8.72
10	12.51	3.24	40.53	49.57	714.74	8.78
ค่าเฉลี่ย	12.66	3.23	40.92	48.96	723.70	9.13
SD	0.09	0.01	0.30	0.92	13.15	0.63

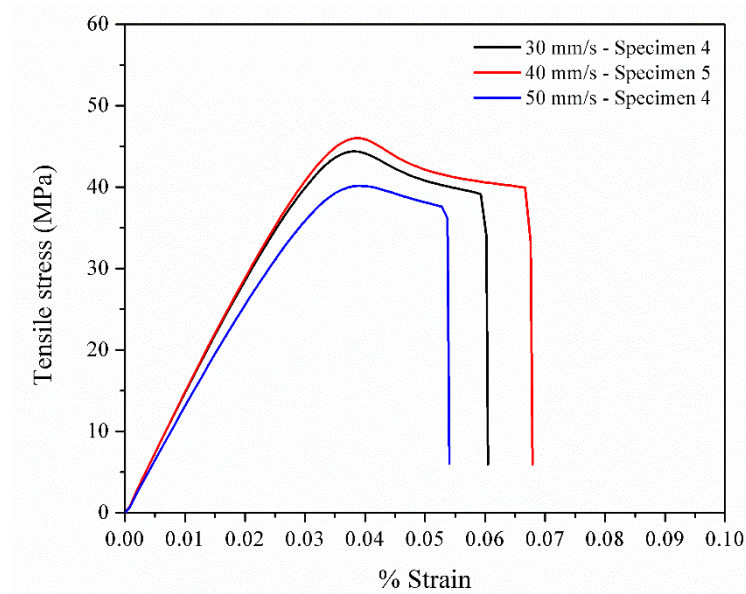
หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.6-10 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

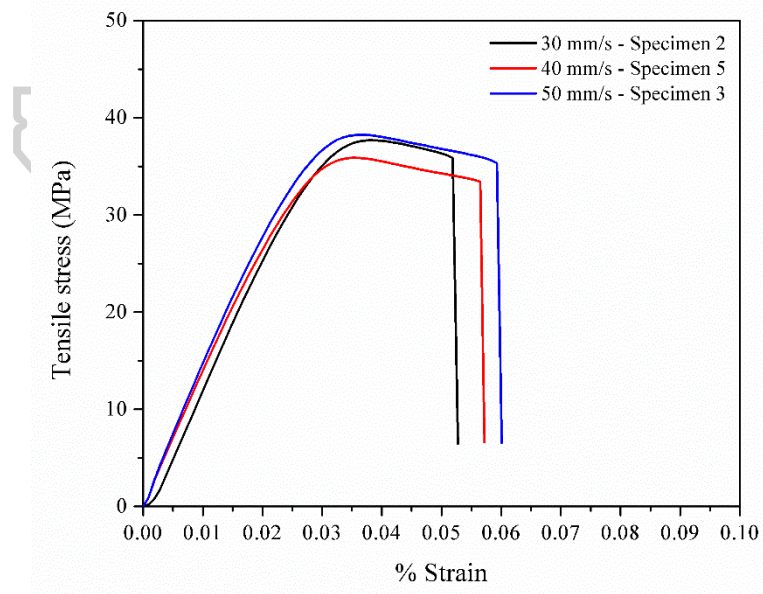
ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	13.15	3.13	41.21	44.89	6.67	2,232.23
2*	13.06	3.10	40.45	57.61	6.67	1,894.48
3*	13.06	3.12	40.78	55.21	8.15	1,844.07
4	13.06	3.07	40.07	56.33	6.58	2,043.14
5	13.07	3.10	40.55	54.86	6.48	2,135.36
6	13.08	3.02	39.54	52.45	7.41	1,946.45
7	13.12	3.16	41.51	56.04	8.89	2,034.04
8	13.12	3.05	40.06	57.37	4.45	2,159.07
9*	13.18	3.12	41.08	57.03	10.46	2,115.83
10	13.16	3.03	39.84	55.21	6.02	2,148.71
ค่าเฉลี่ย	13.15	3.07	40.26	55.38	6.64	2,077.80
SD	0.04	0.05	0.70	1.68	1.47	84.04

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

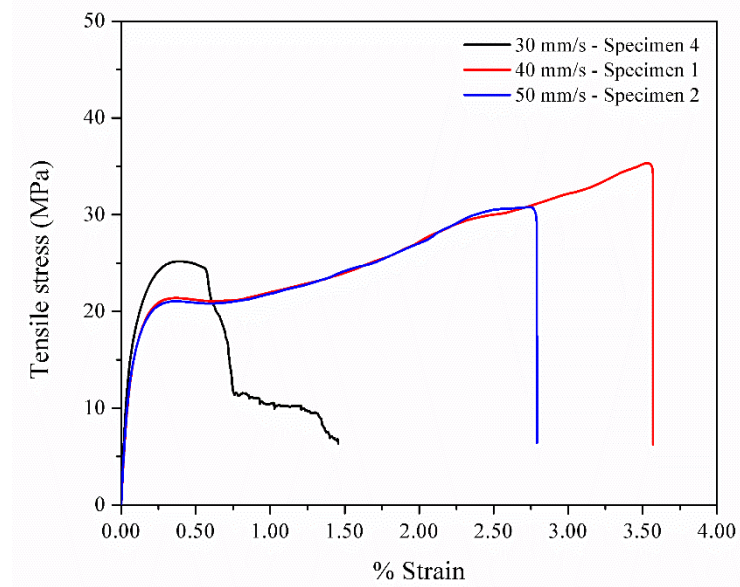
ภาคผนวก ก.7 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองจากการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (Tensile testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



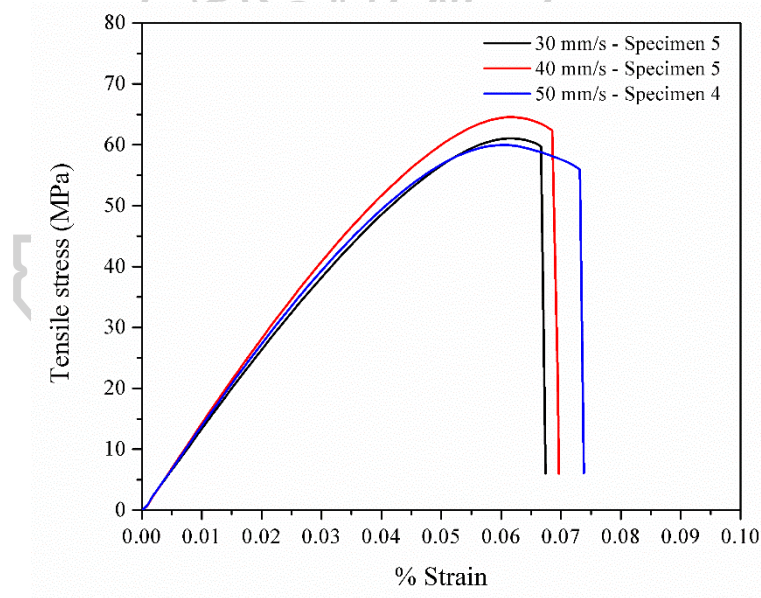
รูปผนวก ก.7-1 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



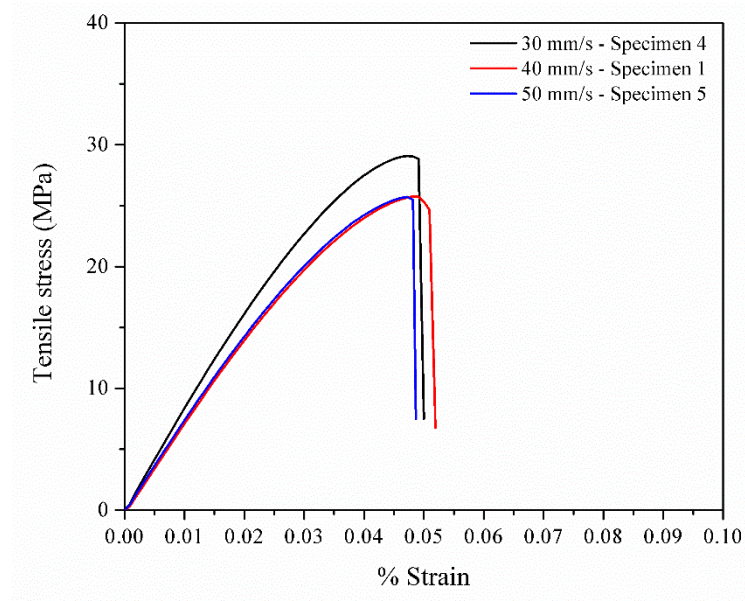
รูปผนวก ก.7-2 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



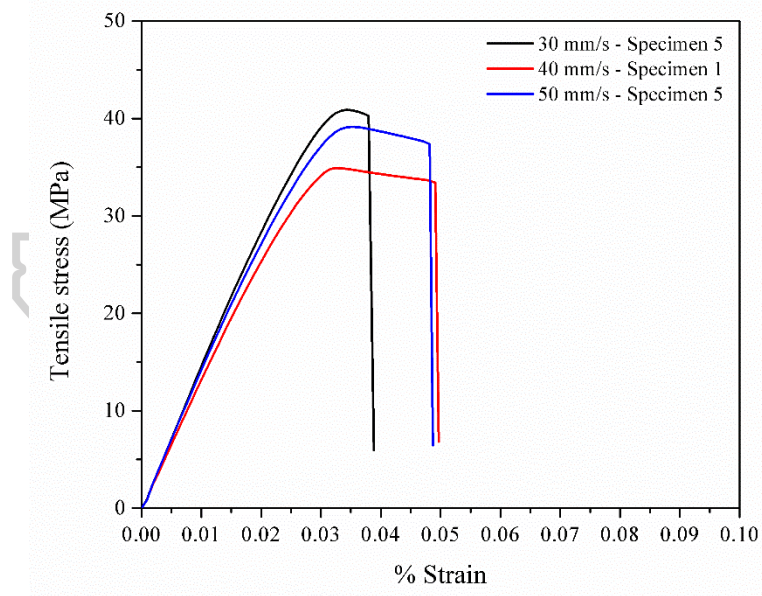
รูปผนวก ก.7-3 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิเอไทม์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



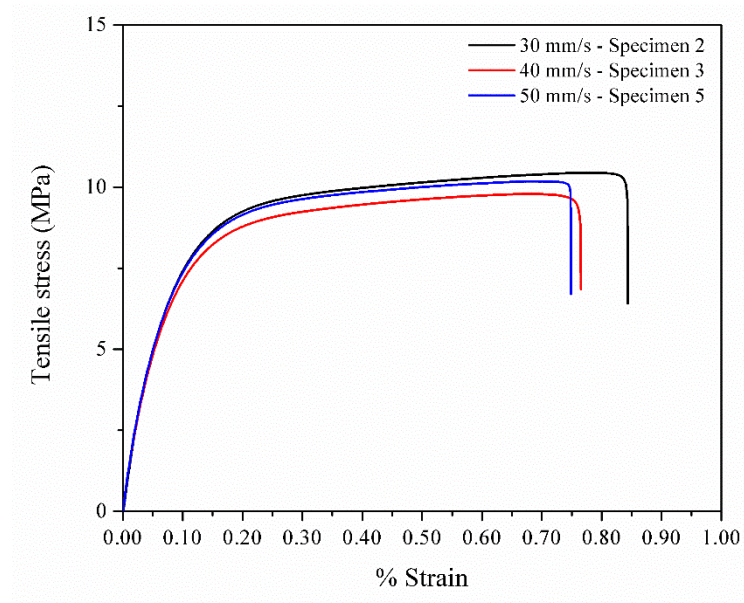
รูปผนวก ก.7-4 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิคาร์บอนเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



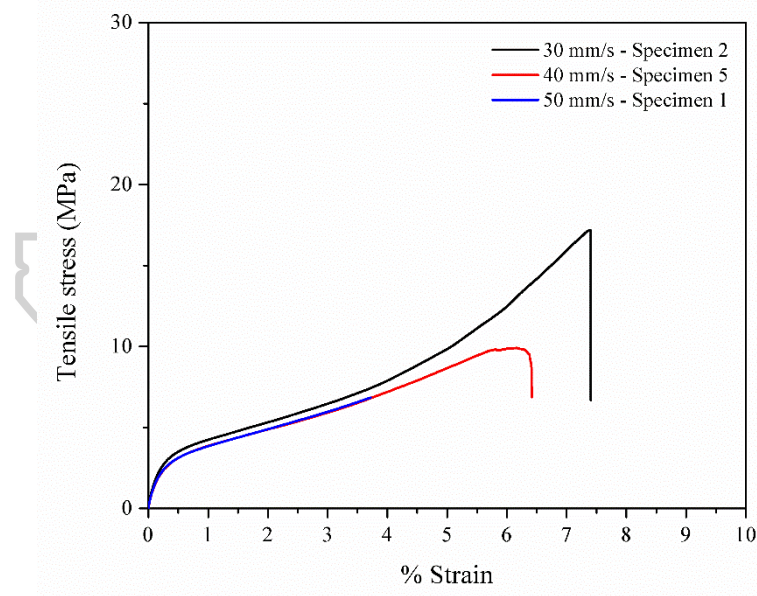
รูปผนวก ก.7-5 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วย ไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



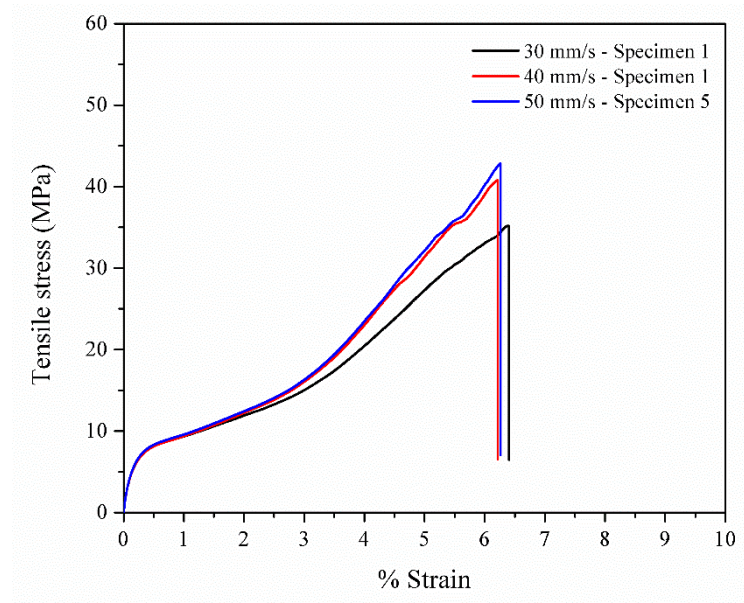
รูปผนวก ก.7-6 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



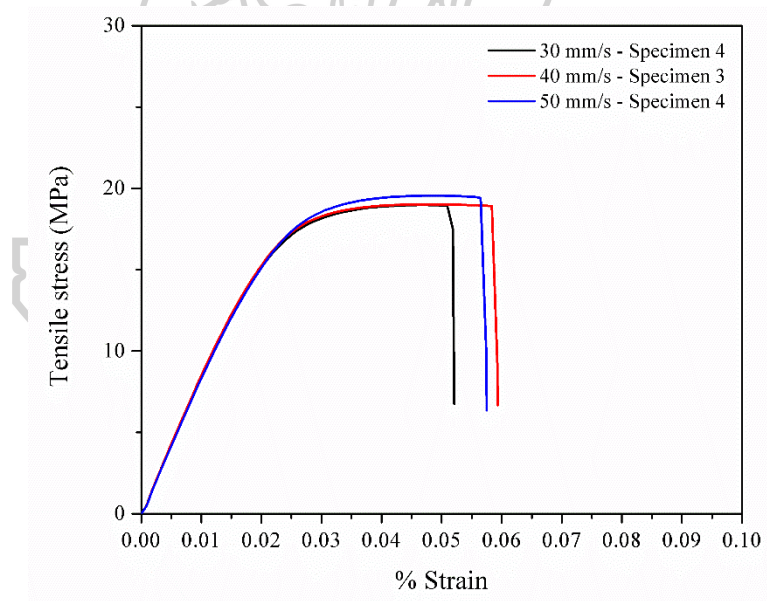
รูปผนวก ก.7-7 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปผนวก ก.7-8 แสดง Tensile stress-strain curve ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปผนวก ก.7-9 แสดง Tensile stress-strain curve ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปผนวก ก.7-10 แสดง Tensile stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตารางผนวก ก.7-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตร ต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.96	3.69	47.79	42.42	8.80	1,493.86
2*	12.98	3.67	47.58	44.85	5.47	1,502.18
3*	12.94	3.71	48.01	40.55	7.32	1,456.49
4	13.02	3.64	47.34	44.39	6.02	1,514.18
5	13.01	3.60	46.87	43.38	7.96	1,528.91
ค่าเฉลี่ย	13.00	3.64	47.33	43.40 ^a	7.59 ^b	1,512.32 ^b
SD	0.03	0.05	0.46	0.99	1.43	17.60

ตารางผนวก ก.7-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตร ต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	12.98	3.82	49.60	36.61	6.02	1,384.87
2	12.98	3.74	48.53	43.98	6.11	1,414.99
3*	12.98	3.75	48.72	42.11	7.59	1,481.91
4	12.96	3.66	47.38	44.90	5.28	1,499.21
5	12.99	3.60	46.81	44.91	6.76	1,522.56
ค่าเฉลี่ย	12.98	3.67	47.57	44.60 ^a	6.05 ^b	1,478.92 ^b
SD	0.02	0.07	0.88	0.53	0.74	56.58

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	12.95	3.79	49.04	36.27	5.28	1,361.42
2	12.93	3.73	48.28	38.89	5.19	1,349.30
3	12.92	3.76	48.57	39.30	5.00	1,389.41
4	12.89	3.76	48.52	40.15	5.37	1,348.56
5*	12.96	3.79	49.17	42.16	5.47	1,451.78
ค่าเฉลี่ย	12.91	3.75	48.46	39.45 ^b	5.19 ^b	1,362.42 ^c
SD	0.02	0.02	0.16	0.64	0.19	23.37

ตารางผนวก ก.7-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.22	3.35	44.32	35.67	4.26	1,639.95
2	13.25	3.38	44.75	37.69	5.19	1,420.54
3*	13.27	3.30	43.78	39.41	4.82	1,637.81
4	13.21	3.31	43.67	35.46	4.91	1,546.01
5*	13.24	3.36	44.52	36.29	6.30	1,515.53
ค่าเฉลี่ย	13.23	3.35	44.25	36.27 ^b	4.79 ^b	1,535.50 ^b
SD	0.02	0.04	0.54	1.23	0.48	110.08

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.23	3.37	44.55	34.03	4.82	1,563.99
2*	13.34	3.21	42.86	39.56	4.63	1,682.49
3	13.22	3.39	44.76	33.68	4.72	1,446.46
4	13.27	3.36	44.64	37.93	5.65	1,501.83
5	13.30	3.23	43.00	35.89	5.65	1,495.19
ค่าเฉลี่ย	13.26	3.34	44.24	35.38 ^b	5.21 ^a	1,501.87 ^b
SD	0.04	0.07	0.83	1.96	0.51	48.21

ตารางผนวก ก.7-6 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.21	3.27	43.24	36.35	4.35	1,573.62
2*	13.21	3.29	43.46	39.00	5.46	1,303.42
3	13.25	3.26	43.16	38.24	5.93	1,604.95
4	13.23	3.25	43.05	34.90	5.00	1,560.66
5*	13.27	3.32	44.05	33.96	5.65	1,497.39
ค่าเฉลี่ย	13.23	3.26	43.15	36.50 ^b	5.09 ^b	1,579.74 ^b
SD	0.02	0.01	0.10	1.67	0.79	22.77

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-7 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.04	3.50	45.58	21.18	235.54	314.65
2	13.12	3.44	45.14	19.57	276.81	245.96
3*	13.02	3.47	45.23	29.50	318.28	231.03
4	13.03	3.63	47.33	25.17	145.54	387.05
5*	13.04	3.59	46.76	24.36	105.73	324.49
ค่าเฉลี่ย	13.06	3.52	46.02	21.97 ^c	256.18 ^b	315.89 ^b
SD	0.05	0.10	1.16	2.88	29.18	70.55

ตารางผนวก ก.7-8 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.05	3.56	46.47	35.01	356.89	287.78
2	13.01	3.44	44.75	26.87	343.66	213.98
3	12.96	3.42	44.33	31.00	338.94	238.51
4	13.01	3.44	44.79	27.40	300.89	230.75
5*	13.16	3.50	46.00	27.21	210.72	295.26
ค่าเฉลี่ย	13.01	3.47	45.09	30.07 ^b	335.10 ^a	242.76 ^c
SD	0.04	0.06	0.95	3.77	24.04	31.71

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b, ^c คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-9 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	13.24	3.55	47.05	21.90	41.11	376.28
2	13.06	3.51	45.87	30.75	278.94	307.72
3	12.98	3.46	44.94	26.17	211.82	273.10
4*	13.11	3.43	44.96	36.51	321.82	372.92
5	13.17	3.57	47.07	19.52	60.92	329.33
ค่าเฉลี่ย	13.07	3.51	45.96	25.48 ^{b,c}	245.38 ^b	303.38 ^{b,c}
SD	0.10	0.06	1.07	5.65	47.46	28.36

ตารางผนวก ก.7-10 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิคาร์บอนเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	13.08	3.74	48.88	59.83	7.22	1,374.47
2*	13.15	3.67	48.20	62.84	6.76	1,375.06
3	13.10	3.61	47.29	60.06	6.67	1,426.85
4	13.11	3.79	49.63	59.18	6.67	1,428.35
5	13.15	3.74	49.24	61.06	6.67	1,353.14
ค่าเฉลี่ย	13.12	3.71	48.72	60.10 ^b	6.67 ^b	1,402.78 ^c
SD	0.03	0.09	1.25	0.94	0.00	43.00

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-11 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.05	3.64	47.47	63.71	6.85	1,478.97
2*	13.03	3.64	47.42	57.49	6.48	1,457.34
3*	13.05	3.68	48.02	62.63	7.04	1,446.27
4	13.02	3.75	48.77	61.86	6.85	1,475.99
5	13.07	3.64	47.56	64.54	6.95	1,459.27
ค่าเฉลี่ย	13.05	3.68	47.93	63.37 ^a	6.88 ^{a,b}	1,471.41 ^b
SD	0.03	0.06	0.73	1.37	0.06	10.62

ตารางผนวก ก.7-12 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.06	3.77	49.24	59.01	8.06	1,381.98
2*	12.95	3.67	47.58	60.42	6.39	1,376.33
3	13.04	3.84	50.13	58.89	8.24	1,406.56
4	13.06	3.71	48.50	59.97	7.32	1,415.78
5	13.07	3.79	49.57	58.14	7.41	1,397.75
ค่าเฉลี่ย	13.06	3.78	49.36	59.00 ^b	7.76 ^a	1,400.52 ^c
SD	0.01	0.05	0.68	0.75	0.46	14.38

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-13 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	13.12	3.18	41.77	26.35	5.00	744.41
2	13.17	3.02	39.83	26.99	5.19	802.69
3	13.13	3.01	39.58	26.78	5.19	808.16
4	13.19	3.01	39.65	29.08	4.91	857.47
5*	13.22	2.92	38.55	29.32	4.54	920.02
ค่าเฉลี่ย	13.16	3.01	39.69	27.62 ^b	5.10 ^b	822.77 ^b
SD	0.03	0.01	0.13	1.27	0.16	30.17

ตารางผนวก ก.7-14 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.12	3.21	42.10	25.76	5.19	746.80
2	13.19	2.88	38.02	24.11	4.54	751.97
3*	13.28	2.87	38.06	27.67	5.00	831.50
4*	13.20	2.86	37.71	22.58	4.08	743.32
5	13.18	2.80	36.96	25.15	4.91	767.06
ค่าเฉลี่ย	13.16	2.96	39.03	25.01 ^c	4.88 ^b	755.28 ^c
SD	0.04	0.22	2.71	0.83	0.33	10.53

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-15 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิเอทิลีนเทเรฟเทเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.16	3.15	41.42	24.81	5.00	744.49
2	13.19	3.00	39.62	25.10	4.72	752.25
3*	13.14	2.83	37.22	24.34	4.54	735.86
4*	13.10	2.83	37.07	25.46	4.82	783.03
5	13.17	2.86	37.72	25.71	4.82	758.67
ค่าเฉลี่ย	13.17	3.00	39.59	25.21 ^c	4.85 ^b	751.80 ^c
SD	0.02	0.15	1.85	0.46	0.14	7.10

ตารางผนวก ก.7-16 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	13.09	3.39	44.36	28.14	3.71	1,494.83
2*	13.05	3.46	45.15	37.73	5.00	1,432.19
3	13.14	3.44	45.23	38.32	4.82	1,488.99
4	13.08	3.41	44.64	38.94	4.54	1,471.79
5	13.45	3.43	46.1	40.89	3.80	1,504.41
ค่าเฉลี่ย	13.22	3.43	45.32	39.38 ^b	4.39 ^b	1,488.40 ^a
SD	0.20	0.02	0.73	1.34	0.53	16.32

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b, ^c คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-17 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.22	3.26	43.09	34.90	4.91	1,376.01
2*	13.11	3.27	42.83	46.41	6.02	1,557.39
3*	13.21	3.38	44.64	32.76	3.15	1,545.68
4	13.08	3.62	47.34	33.96	4.17	1,401.30
5	13.19	3.31	43.65	42.82	4.72	1,583.68
ค่าเฉลี่ย	13.16	3.40	44.69	37.23 ^b	4.60 ^b	1,453.66 ^a
SD	0.07	0.20	2.31	4.87	0.38	113.31

ตารางผนวก ก.7-18 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.16	3.43	45.08	38.90	4.35	1,472.09
2*	13.21	3.48	45.97	38.84	5.56	1,459.42
3	13.15	3.47	45.58	38.48	5.19	1,416.26
4*	13.12	3.46	45.38	37.85	4.82	1,461.11
5	13.14	3.37	44.23	39.14	4.82	1,511.57
ค่าเฉลี่ย	13.15	3.42	44.96	38.84 ^b	4.79 ^b	1,466.64 ^a
SD	0.01	0.05	0.68	0.33	0.42	47.89

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-19 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.10	3.48	45.62	10.05	85.72	126.40
2	13.02	3.48	45.31	10.44	84.29	128.86
3	13.06	3.48	45.39	10.31	88.86	128.41
4*	13.06	3.48	45.50	9.86	67.28	123.77
5	13.07	3.46	45.17	10.31	79.04	127.09
ค่าเฉลี่ย	13.06	3.48	45.37	10.28 ^a	84.48 ^a	127.69 ^a
SD	0.03	0.01	0.19	0.16	4.10	1.14

ตารางผนวก ก.7-20 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.99	3.32	43.14	10.81	90.34	134.50
2*	12.91	3.30	42.55	10.74	104.32	132.78
3	12.99	3.30	42.86	9.80	76.46	127.80
4	12.97	3.32	43.02	9.72	61.37	128.84
5	12.95	3.36	43.48	9.78	58.32	127.98
ค่าเฉลี่ย	12.98	3.33	43.13	10.03 ^a	71.62 ^a	129.78 ^a
SD	0.02	0.03	0.26	0.52	14.79	3.18

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-21 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยืดของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	13.09	3.48	45.51	8.95	86.18	114.75
2	13.01	3.46	44.98	10.06	86.81	126.77
3	13.03	3.48	45.31	10.11	83.03	127.28
4*	13.04	3.47	45.29	9.40	66.64	122.81
5	13.04	3.43	44.70	10.18	74.89	129.66
ค่าเฉลี่ย	13.03	3.46	45.00	10.12 ^a	81.58 ^a	127.90 ^a
SD	0.02	0.03	0.31	0.06	6.09	1.54

ตารางผนวก ก.7-22 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยืดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	12.95	3.36	43.51	6.89	330.80	17.02
2	13.11	3.42	44.88	17.18	740.35	7.21
3	13.09	3.44	44.99	17.11	754.47	7.90
4	13.14	3.33	43.75	12.85	686.22	8.68
5	13.03	3.42	44.52	12.80	712.19	11.27
ค่าเฉลี่ย	13.09	3.40	44.54	14.99 ^b	723.31 ^b	8.77 ^c
SD	0.05	0.05	0.56	2.49	30.33	1.77

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b, ^c คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-23 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.01	3.35	43.57	6.88	436.77	11.75
2*	13.05	3.46	45.10	6.64	330.72	18.05
3	12.96	3.39	43.88	8.33	543.62	11.92
4*	12.95	3.31	42.91	11.21	673.33	9.66
5	12.86	3.38	43.46	9.91	641.43	10.64
ค่าเฉลี่ย	12.94	3.37	43.64	8.37 ^c	540.61 ^c	11.44 ^b
SD	0.08	0.02	0.22	1.52	102.36	0.70

ตารางผนวก ก.7-24 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.12	3.34	43.81	6.85	372.19	14.09
2	13.04	3.56	46.48	6.46	422.01	13.34
3*	13.02	3.45	44.97	9.12	608.21	13.33
4*	13.01	3.36	43.70	6.86	382.46	15.50
5	13.11	3.76	49.32	5.95	420.83	12.87
ค่าเฉลี่ย	13.09	3.55	46.54	6.42 ^c	405.01 ^d	13.43 ^b
SD	0.04	0.21	2.76	0.45	28.43	0.62

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{b, c, d} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-25 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.15	3.37	44.35	35.18	640.34	23.41
2*	12.95	3.38	43.72	40.20	623.91	17.39
3	13.14	3.38	44.37	32.08	571.13	26.96
4	12.97	3.43	44.48	35.03	577.28	22.68
5	13.05	3.38	44.12	34.46	617.71	21.87
ค่าเฉลี่ย	13.08	3.39	44.33	34.19 ^c	601.62 ^b	23.73 ^a
SD	0.08	0.03	0.15	1.44	33.07	2.24

ตารางผนวก ก.7-26 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.97	3.27	42.44	40.69	621.76	16.84
2	13.02	3.27	42.56	39.29	622.10	16.64
3	13.02	3.25	42.27	37.88	606.79	19.78
4*	12.99	3.25	42.21	28.71	586.53	23.94
5	13.15	3.27	43.06	33.32	607.79	20.23
ค่าเฉลี่ย	13.04	3.27	42.58	37.80 ^b	614.61 ^b	18.37 ^b
SD	0.08	0.01	0.34	3.20	8.46	1.90

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b, ^c คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-27 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.94	3.32	42.93	41.74	640.11	15.68
2*	13.09	3.29	43.12	34.23	606.43	24.51
3	13.01	3.24	42.14	37.67	605.08	19.98
4	12.99	3.27	42.51	36.45	597.82	20.92
5	12.98	3.24	42.07	42.69	626.15	15.87
ค่าเฉลี่ย	12.98	3.27	42.41	39.64 ^b	617.29 ^b	18.11 ^b
SD	0.03	0.04	0.40	3.04	19.39	2.73

ตารางผนวก ก.7-28 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	13.08	3.35	43.82	17.81	6.48	919.89
2	13.13	3.35	43.95	18.54	5.56	922.78
3	13.14	3.31	43.53	18.67	5.93	931.94
4	13.20	3.35	44.18	18.98	5.19	917.99
5*	13.19	3.24	42.70	19.67	3.33	990.48
ค่าเฉลี่ย	13.16	3.34	43.89	18.73 ^b	5.56 ^a	924.24 ^b
SD	0.04	0.02	0.33	0.23	0.37	7.09

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.7-29 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1*	13.16	3.36	44.26	16.12	3.43	924.91
2*	13.13	3.38	44.41	17.11	3.33	914.66
3	13.22	3.36	44.43	19.02	5.93	917.38
4	13.23	3.27	43.21	18.89	5.65	959.56
5	13.16	3.35	44.12	18.89	5.28	917.34
ค่าเฉลี่ย	13.20	3.33	43.92	18.93 ^b	5.62 ^a	931.43 ^b
SD	0.04	0.05	0.63	0.08	0.33	24.36

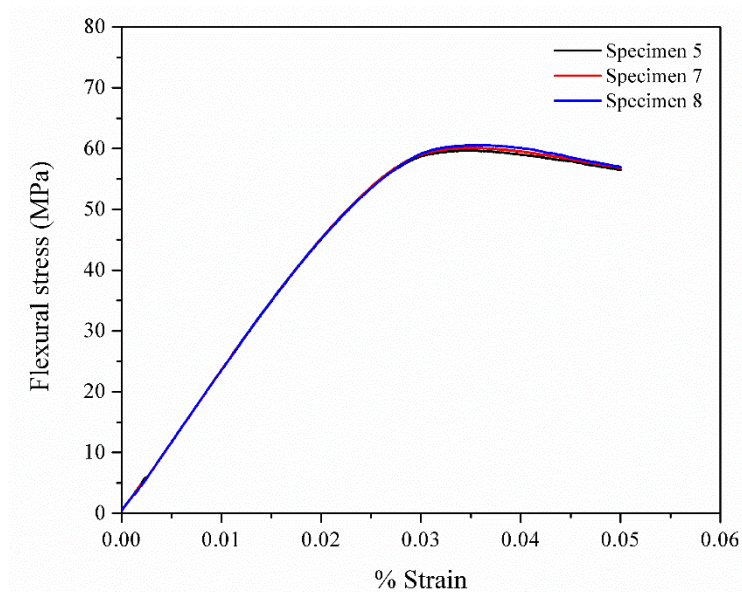
ตารางผนวก ก.7-30 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยึดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.18	3.28	43.26	18.96	5.93	948.21
2	13.17	3.31	43.58	19.26	6.02	924.01
3	13.25	3.42	45.30	18.48	5.00	872.63
4	13.21	3.38	44.65	19.55	5.74	891.96
5*	13.12	3.40	44.58	17.92	4.82	902.81
ค่าเฉลี่ย	13.20	3.35	44.20	19.06 ^b	5.67 ^a	909.20 ^b
SD	0.04	0.06	0.95	0.46	0.46	33.54

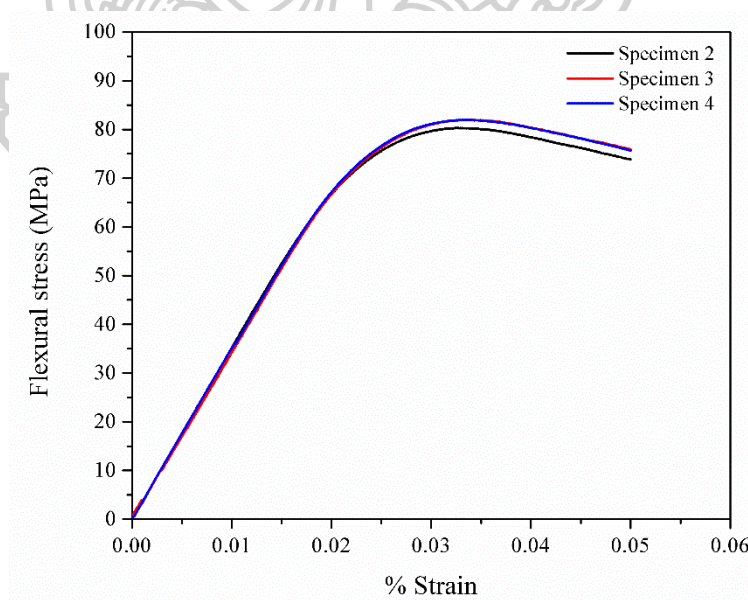
หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

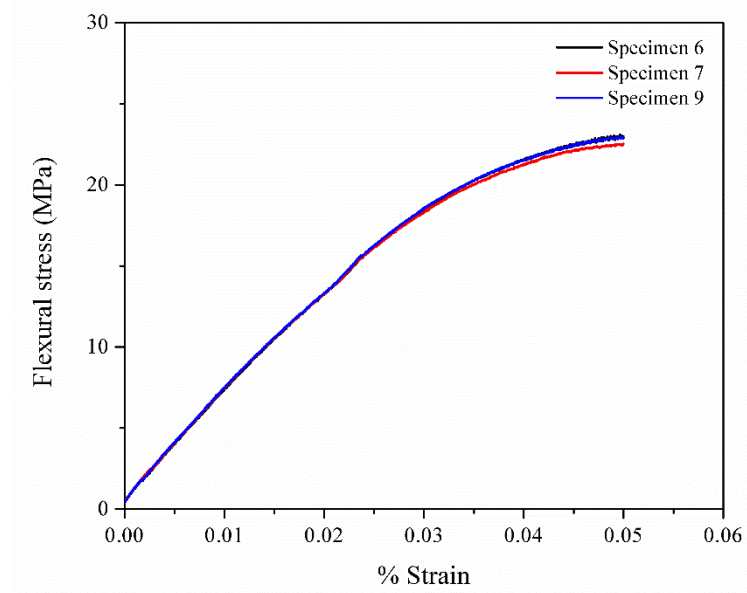
ภาคผนวก ก.8 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจากการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด



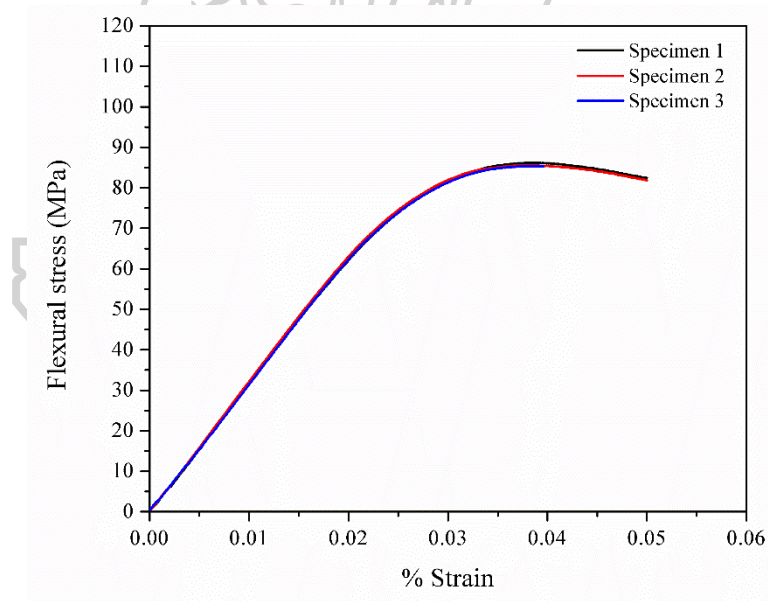
รูปผนวก ก.8-1 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิอะครีโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



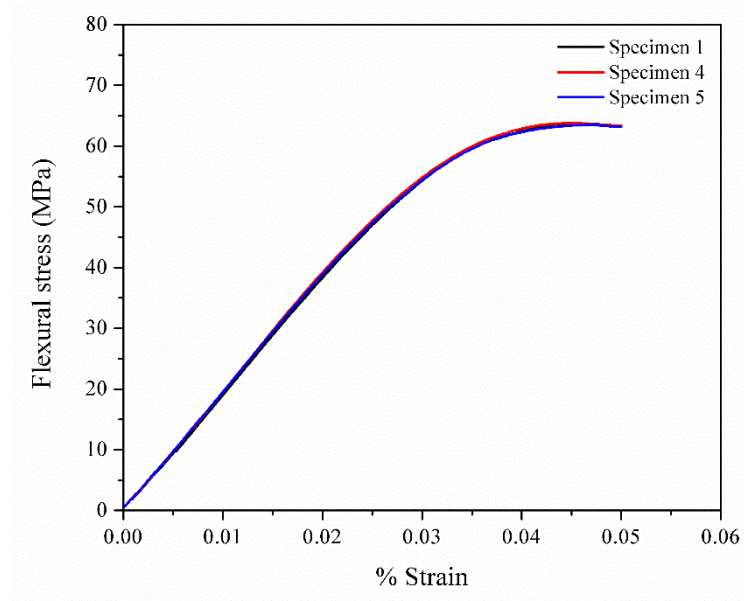
รูปผนวก ก.8-2 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



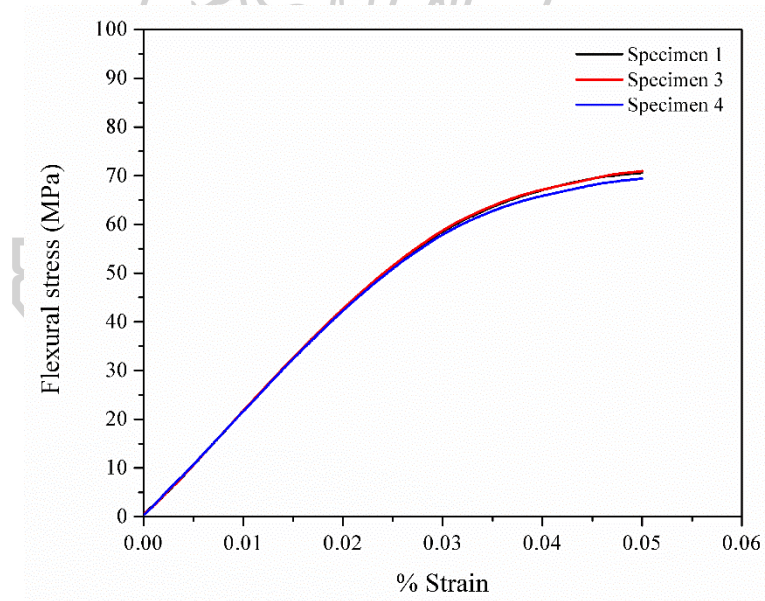
รูปผนวก ก.8-3 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



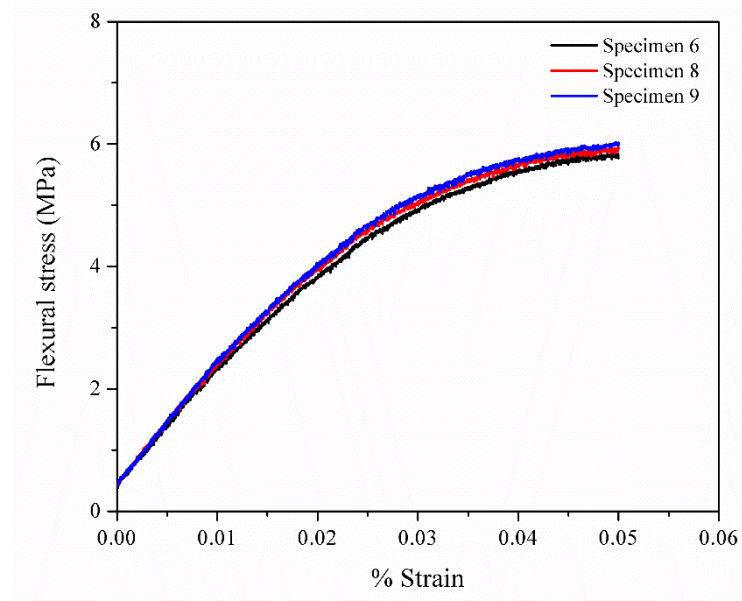
รูปผนวก ก.8-4 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



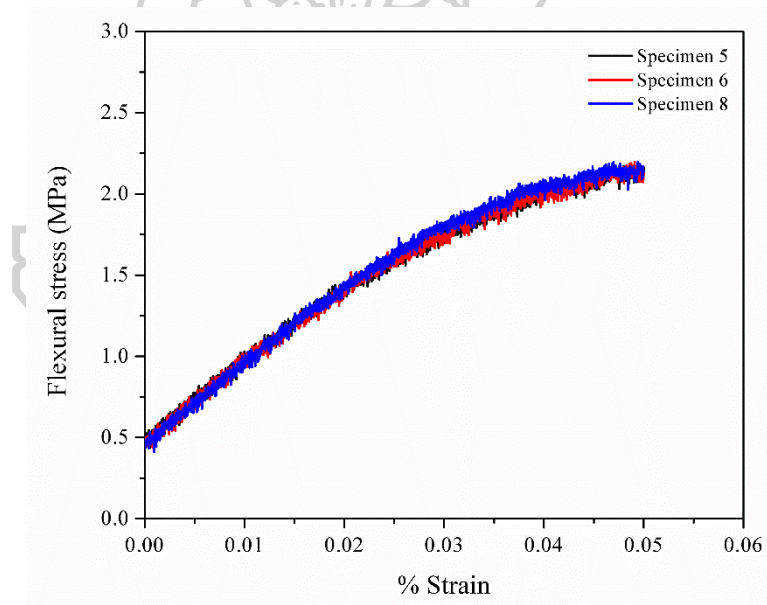
รูปผนวก ก.8-5 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



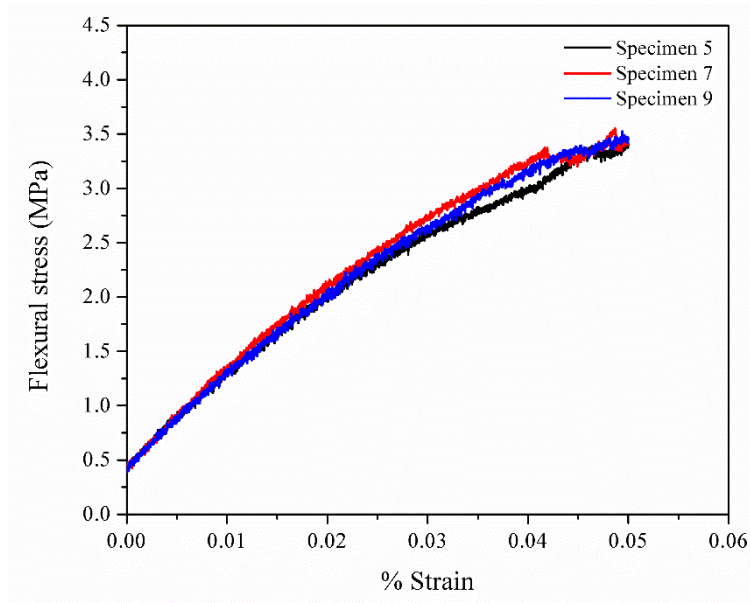
รูปผนวก ก.8-6 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



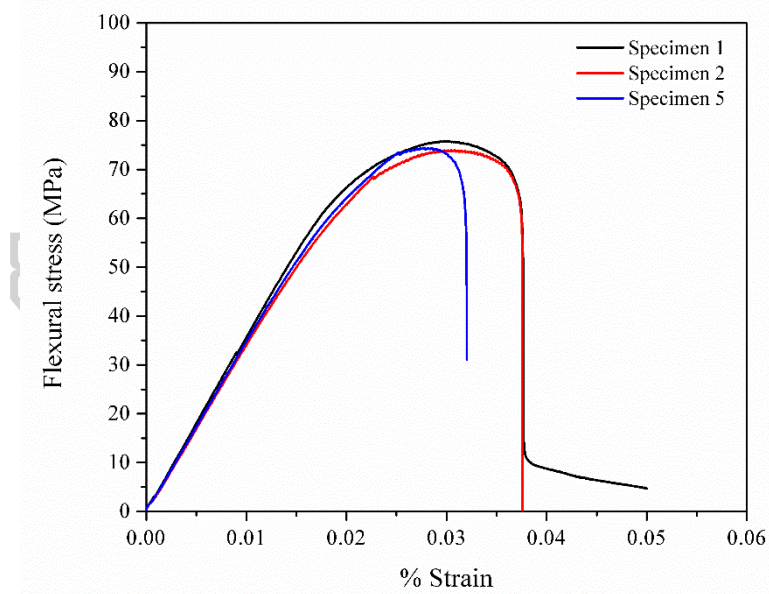
รูปผนวก ก.8-7 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกรับปรุง
เพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



รูปผนวก ก.8-8 แสดง Flexural stress-strain curve ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE)
ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



รูปผนวก ก.8-9 แสดง Flexural stress-strain curve ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด



รูปผนวก ก.8-10 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตารางผนวก ก.8-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.35	3.33	41.11	58.83	0.0098	2,263.02
2*	12.47	3.25	40.58	60.84	0.0080	2,434.58
3	12.44	3.29	40.88	58.58	0.0099	2,326.98
4*	12.47	3.30	41.11	58.03	0.0095	2,286.11
5	12.42	3.28	40.71	59.70	0.0087	2,382.17
6	12.44	3.27	40.73	58.62	0.0094	2,362.50
7	12.44	3.27	40.69	60.10	0.0086	2,390.88
8	12.45	3.25	40.41	60.56	0.0091	2,371.35
9	12.43	3.27	40.60	58.54	0.0087	2,383.14
10*	12.42	3.25	40.42	61.04	0.0087	2,403.96
ค่าเฉลี่ย	12.42	3.28	40.73	59.28	0.0092	2,354.29
SD	0.03	0.03	0.22	0.83	0.0005	45.43

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.54	3.24	40.68	82.25	0.0099	3,485.51
2	12.54	3.24	40.62	80.31	0.0096	3,545.10
3	12.56	3.05	38.36	81.93	0.0103	3,464.01
4	12.54	3.31	41.47	81.95	0.0098	3,569.27
5	12.56	3.23	40.58	80.17	0.0094	3,582.04
6*	12.54	3.15	39.50	83.38	0.0092	3,815.10
7	12.57	3.04	38.25	80.13	0.0094	3,721.76
8*	12.54	3.24	40.62	81.93	0.0088	3,704.65
9*	12.58	3.19	40.08	80.56	0.0105	3,688.73
10*	12.57	3.25	40.91	80.12	0.0105	3,804.06
ค่าเฉลี่ย	12.55	3.19	39.99	81.12	0.0097	3,561.28
SD	0.01	0.11	1.35	1.02	0.0003	91.34

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.54	3.09	38.78	23.56	0.0101	765.26
2	12.54	3.18	39.92	23.24	-----	728.65
3*	12.51	3.11	38.96	21.51	-----	696.58
4	12.51	3.12	39.08	23.38	0.0087	731.34
5*	12.50	3.15	39.42	24.01	0.0112	761.45
6	12.48	3.15	39.36	22.90	0.0087	697.79
7	12.51	3.13	39.21	22.35	0.0095	699.19
8	12.45	3.12	38.83	22.64	-----	745.79
9	12.50	3.19	39.84	22.88	0.0091	724.00
10*	12.52	3.11	38.95	21.38	0.0117	715.16
ค่าเฉลี่ย	12.50	3.14	39.29	22.99	0.0092	727.43
SD	0.03	0.04	0.45	0.43	0.0006	24.06

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8- 4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.47	3.28	40.86	86.19	0.0108	3,224.66
2	12.54	3.26	40.87	85.53	0.0112	3,273.90
3	12.50	3.28	41.05	85.37	0.0117	3,202.92
4*	12.48	3.26	40.64	86.85	0.0103	3,369.72
5*	12.50	3.42	42.79	87.06	0.0113	3,403.54
6	12.46	3.30	41.17	83.35	0.0108	3,182.83
7	12.50	3.48	43.51	84.83	0.0117	3,276.06
8*	12.50	3.34	41.72	82.41	0.0119	3,063.39
9*	12.47	3.43	42.76	82.60	0.0113	3,085.48
10	12.52	3.48	43.54	84.20	0.0117	3,155.34
ค่าเฉลี่ย	12.50	3.35	41.83	84.91	0.0113	3,219.29
SD	0.03	0.10	1.32	1.02	0.0004	48.83

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.48	3.28	40.97	63.64	0.0122	1,977.79
2	12.50	3.26	40.80	63.44	0.0128	1,988.37
3	12.44	3.24	40.26	61.69	0.0137	1,943.40
4	12.45	3.26	40.55	63.78	0.0122	2,025.63
5	12.49	3.26	40.71	63.46	0.0134	1,976.71
6	12.47	3.25	40.52	62.53	0.0128	2,002.79
7*	12.50	3.27	40.82	57.97	0.0159	1,853.90
8	12.41	3.27	40.63	62.12	0.0136	1,985.45
9	12.44	3.27	40.69	63.22	0.0128	2,038.38
10*	12.44	3.30	41.09	60.56	0.0134	1,910.07
ค่าเฉลี่ย	12.46	3.26	40.64	62.99	0.0129	1,992.32
SD	0.03	0.01	0.21	0.77	0.0006	29.88

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8-6 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.47	3.27	40.77	70.59	0.0168	2,215.78
2*	12.55	3.26	40.95	71.78	-----	2,242.30
3	12.49	3.29	41.05	70.96	0.0167	2,227.95
4	12.49	3.29	41.13	69.43	0.0171	2,179.22
5	12.45	3.29	40.95	69.00	0.0169	2,159.32
6*	12.58	3.28	41.21	68.21	0.0174	2,194.33
7	12.41	3.27	40.63	69.34	0.0167	2,191.54
8*	12.53	3.25	40.76	70.78	-----	2,275.45
9*	12.57	3.29	41.41	67.36	0.0172	2,154.83
10	12.46	3.26	40.67	68.99	0.0176	2,228.36
ค่าเฉลี่ย	12.46	3.28	40.87	69.72	0.0170	2,200.36
SD	0.03	0.01	0.21	0.85	0.0003	28.26

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8-7 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุง เพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.50	3.25	40.67	6.11	0.0500	199.67
2*	12.51	3.19	39.90	6.12	0.0498	199.28
3*	12.53	3.09	38.67	5.68	0.0488	181.14
4	12.49	3.26	40.77	5.79	0.0490	191.75
5*	12.52	3.17	39.72	6.13	-----	218.93
6	12.48	3.27	40.78	5.83	0.0495	194.9
7	12.49	3.11	38.83	5.73	0.0495	194.31
8	12.52	3.24	40.55	5.88	0.0500	204.02
9	12.50	3.09	38.67	5.97	0.0497	200.74
10	12.47	3.04	37.87	5.68	0.0498	201.09
ค่าเฉลี่ย	12.49	3.17	39.58	5.81	0.0496	197.80
SD	0.02	0.10	1.27	0.10	0.0003	4.80

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8-8 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.44	3.08	38.37	1.94	0.0486	55.80
2	12.43	3.05	37.87	2.06	0.0492	53.79
3	12.45	3.07	38.18	2.14	0.0491	54.37
4*	12.43	3.08	38.23	2.15	0.0494	58.69
5	12.45	3.06	38.15	2.15	0.0480	54.39
6	12.47	3.02	37.63	2.17	0.0491	53.52
7	12.44	3.07	38.14	2.06	0.0498	57.80
8	12.46	3.10	38.68	2.15	0.0470	51.93
9*	12.44	3.04	37.78	2.11	0.0497	46.08
10*	12.44	3.01	37.43	1.99	0.0458	54.94
ค่าเฉลี่ย	12.45	3.06	38.11	2.12	0.0487	54.30
SD	0.01	0.03	0.35	0.05	0.0010	1.94

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8-9 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.26	3.24	39.67	3.57	0.0499	88.17
2	12.29	3.20	39.36	3.33	0.0497	93.71
3	12.30	3.21	39.53	3.35	0.0497	86.29
4*	12.38	3.20	39.62	3.59	0.0498	94.77
5	12.33	3.23	39.80	3.36	0.0500	93.92
6*	12.30	3.22	39.57	3.04	0.0496	93.31
7	12.41	3.21	39.84	3.52	0.0487	94.09
8	12.29	3.23	39.66	3.33	0.0489	86.42
9	12.31	3.21	39.53	3.49	0.0494	92.34
10*	12.36	3.21	39.69	3.21	0.0486	84.04
ค่าเฉลี่ย	12.32	3.22	39.62	3.40	0.0494	91.13
SD	0.05	0.01	0.18	0.09	0.0005	3.75

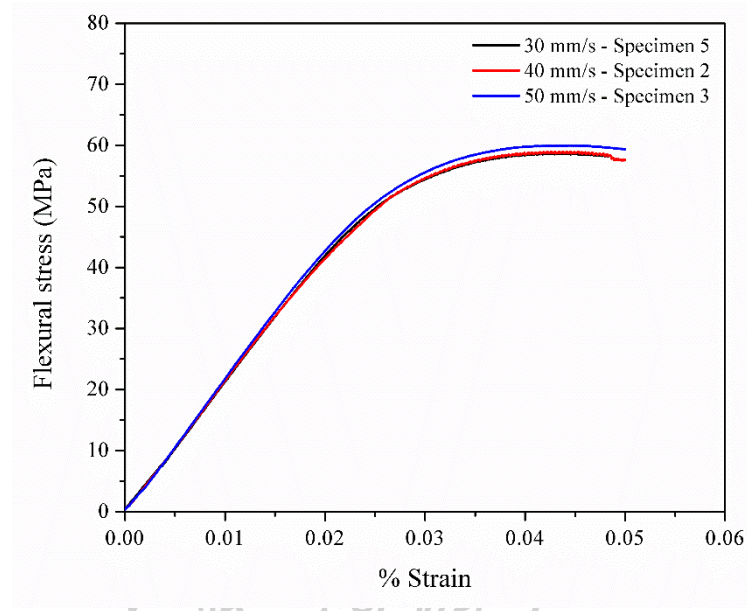
หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.8-10 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการฉีด

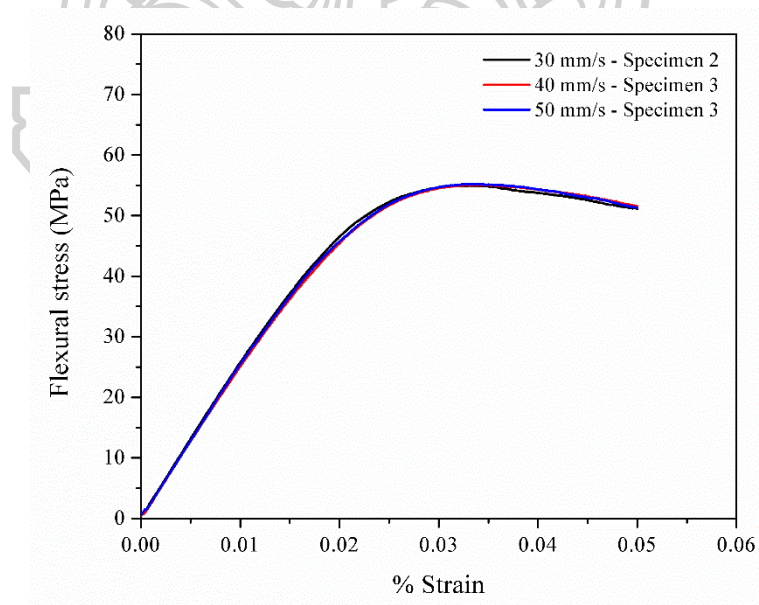
ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.64	3.05	38.55	75.68	0.0086	3,662.74
2	12.58	3.02	37.99	73.97	0.0082	3,489.66
3*	12.61	3.01	37.96	72.95	0.0098	3,425.88
4*	12.67	3.13	39.66	66.86	0.0072	3,713.66
5	12.61	3.14	39.60	74.41	0.0060	3,518.79
6	12.60	3.12	39.31	71.54	0.0063	3,685.93
7	12.56	3.07	38.56	72.06	0.0075	3,484.50
8	12.56	3.12	39.19	71.36	0.0063	3,745.59
9*	12.68	3.13	39.69	72.22	0.0065	3,966.82
10*	12.61	3.01	37.96	70.13	0.0118	3,438.78
ค่าเฉลี่ย	12.59	3.09	38.87	73.17	0.0072	3,597.87
SD	0.03	0.05	0.60	1.77	0.0011	113.67

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

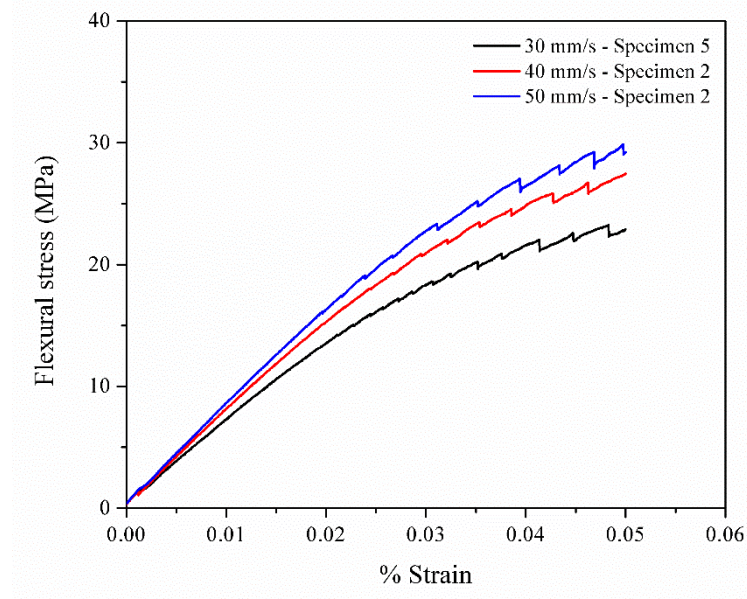
ภาคผนวก ก.9 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการโค้ง (Flexural testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



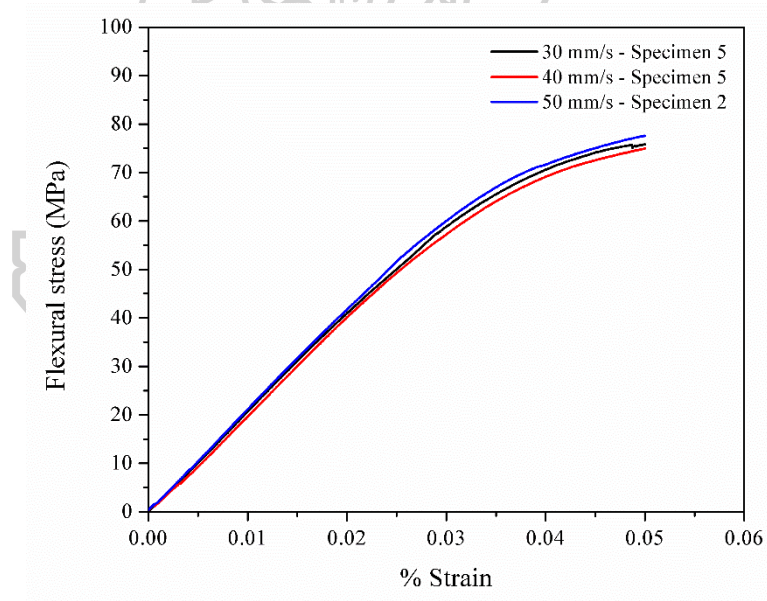
รูปผนวก ก.9-1 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



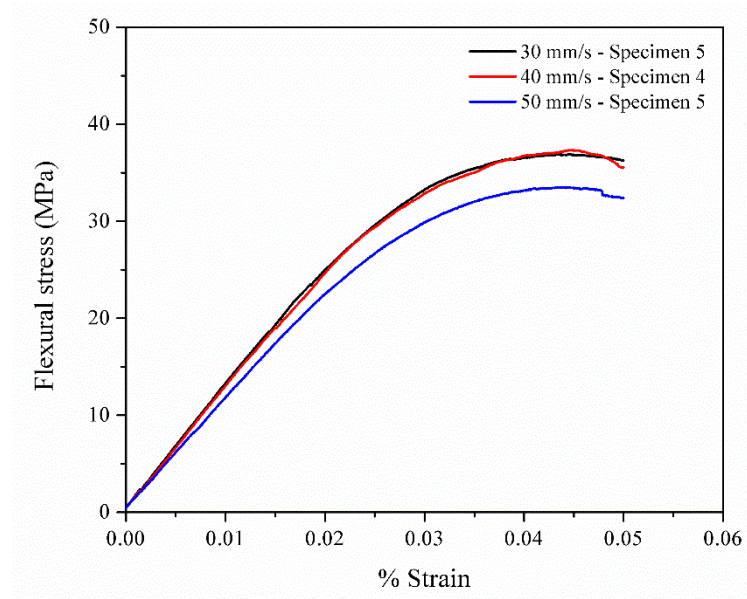
รูปผนวก ก.9-2 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



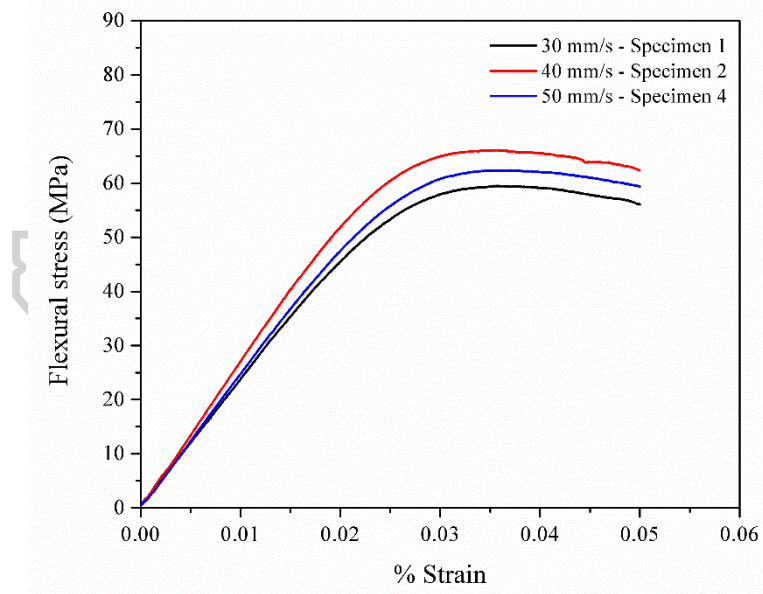
รูปผนวก ก.9-3 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิเอไนด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



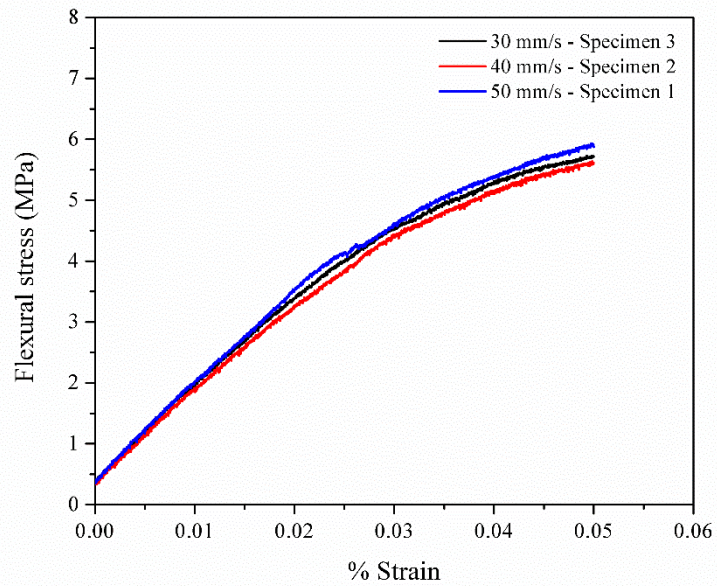
รูปผนวก ก.9-4 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



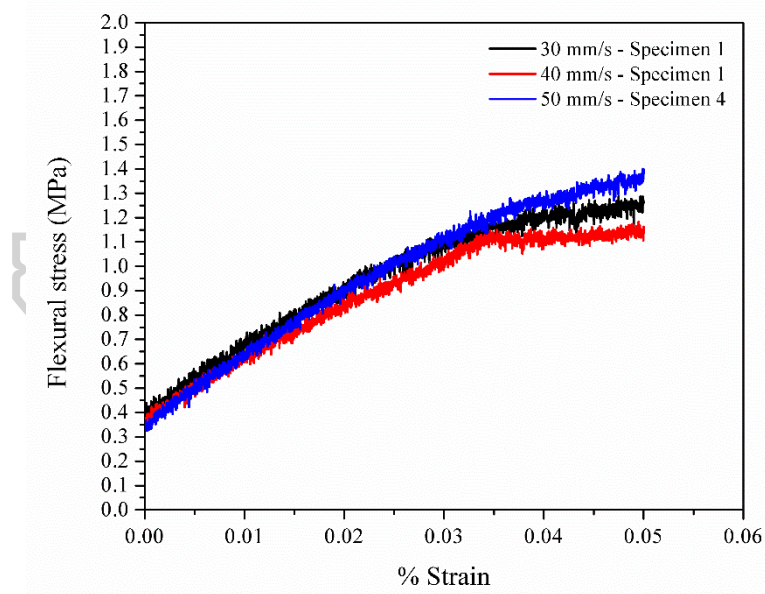
รูปผนวก ก.9-5 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



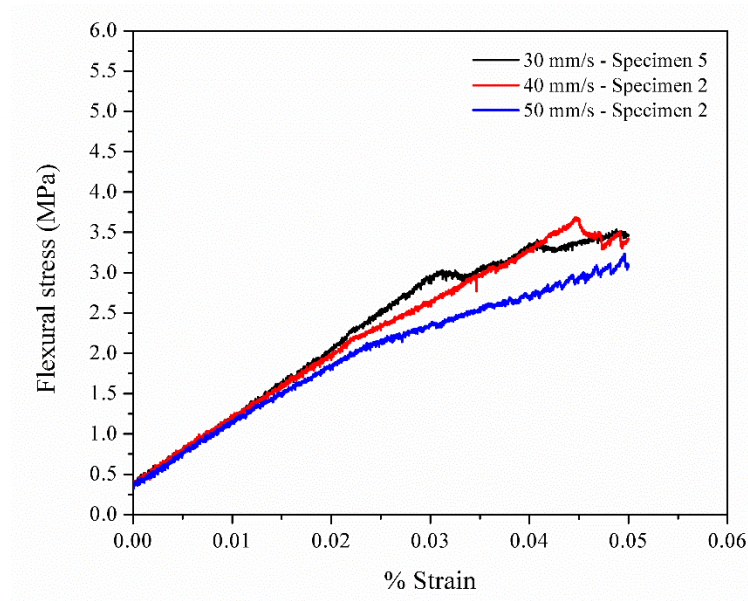
รูปผนวก ก.9-6 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



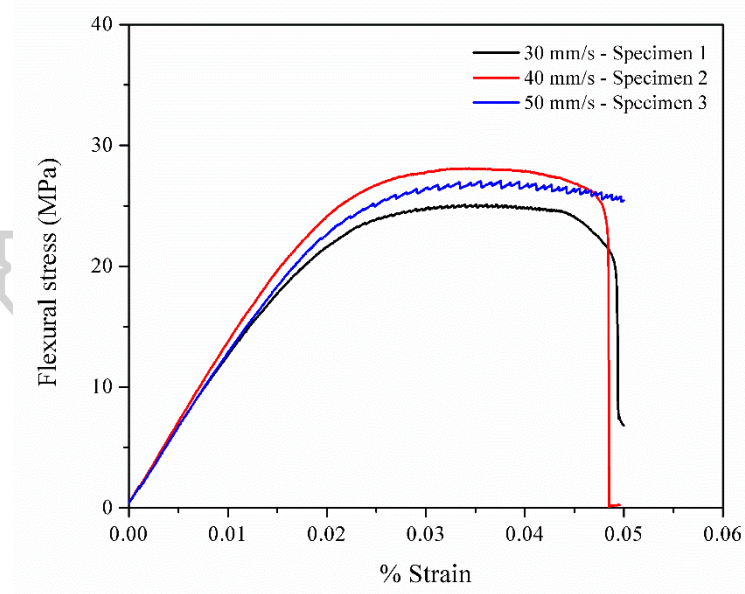
รูปผนวก ก.9-7 แสดง Flexural stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปผนวก ก.9-8 แสดง Flexural stress-strain curve ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปผนวก ก.9-9 แสดง Flexural stress-strain curve ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปผนวก ก.9-10 แสดง Flexural stress-strain curve ของของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตารางผนวก ก.9-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิอะครีโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.27	3.65	44.79	57.14	0.0146	2,220.08
2	12.23	3.63	44.39	60.48	0.0155	2,288.53
3*	12.22	3.63	44.36	59.98	0.0137	2,245.04
4*	12.25	3.81	46.70	51.32	0.0167	1,980.22
5	12.26	3.69	45.21	58.56	0.0164	2,201.59
ค่าเฉลี่ย	12.25	3.66	44.80	58.73 ^a	0.0155 ^a	2,236.73 ^b
SD	0.02	0.03	0.41	1.68	0.0009	45.80

ตารางผนวก ก.9-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิอะครีโลไนไตรส์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.27	3.69	45.33	57.96	0.0158	2,268.46
2	12.26	3.73	45.72	57.84	0.0172	2,208.29
3	12.27	3.85	47.21	56.20	0.0161	2,119.53
4	12.3	3.85	47.34	56.56	0.0149	2,149.22
5*	12.3	3.81	46.86	56.37	0.0143	2,068.59
ค่าเฉลี่ย	12.28	3.81	46.76	56.87 ^b	0.0161 ^a	2,159.01 ^b
SD	0.02	0.07	0.90	0.86	0.0012	45.18

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.34	3.85	47.55	59.47	0.0172	2,237.04
2	12.32	3.87	47.72	59.63	0.0156	2,183.86
3	12.32	3.84	47.34	59.97	0.0171	2,254.93
4*	12.32	3.87	47.73	57.87	0.0147	2,171.67
5*	12.30	3.77	46.40	58.83	0.0135	2,247.43
ค่าเฉลี่ย	12.33	3.85	47.54	59.69 ^a	0.0166 ^a	2,225.28 ^b
SD	0.01	0.02	0.19	0.26	0.0009	36.97

ตารางผนวก ก.9-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.39	3.28	40.68	54.54	0.0114	2,648.36
2	12.42	3.26	40.49	54.94	0.0088	2,599.92
3	12.44	3.16	39.30	54.76	0.0108	2,588.15
4*	12.42	3.30	40.96	56.34	0.0074	2,741.40
5*	12.50	3.08	38.45	53.32	0.0125	2,420.90
ค่าเฉลี่ย	12.42	3.23	40.16	54.75 ^b	0.0103 ^{a,b}	2,612.14 ^{a,b}
SD	0.03	0.06	0.75	0.20	0.0014	31.91

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.40	3.16	39.15	54.54	0.0103	2,565.23
2	12.45	3.14	39.12	53.22	0.0117	2,535.39
3	12.40	3.32	41.20	55.00	0.0105	2,606.69
4*	12.44	3.04	37.79	51.51	0.0009	2,393.62
5*	12.49	3.18	39.76	60.59	0.0104	2,743.85
ค่าเฉลี่ย	12.42	3.21	39.82	54.25 ^b	0.0108 ^a	2,569.10 ^a
SD	0.03	0.10	1.19	0.92	0.0008	35.81

ตารางผนวก ก.9-6 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.41	3.29	40.87	54.87	0.0081	2,566.30
2	12.44	3.12	38.86	50.77	0.0081	2,657.45
3	12.47	3.12	38.95	55.13	0.0107	2,564.88
4*	12.44	3.10	38.51	53.64	0.0126	2,529.30
5*	12.49	3.11	38.89	61.65	0.0090	2,908.55
ค่าเฉลี่ย	12.44	3.18	39.56	53.59 ^b	0.0090 ^b	2,596.21 ^b
SD	0.03	0.10	1.14	2.45	0.0015	53.04

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-7 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.40	3.51	43.54	16.96	----	502.55
2*	12.49	3.48	43.51	17.03	0.0016	498.29
3	12.57	3.58	44.95	22.75	0.0079	664.10
4	12.45	3.56	44.31	22.16	0.0091	664.04
5	12.45	3.55	44.24	23.15	0.0085	682.42
ค่าเฉลี่ย	12.49	3.56	44.50	22.69 ^c	0.0085 ^a	670.19 ^c
SD	0.07	0.02	0.39	0.50	0.0006	10.59

ตารางผนวก ก.9-8 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.42	3.58	44.49	24.72	0.0090	784.63
2	12.60	3.67	46.28	26.57	0.0099	750.59
3*	12.36	3.54	43.80	23.13	0.0094	706.57
4	12.57	3.56	44.71	25.28	0.0078	716.75
5*	12.53	3.70	46.35	26.93	0.0091	768.66
ค่าเฉลี่ย	12.53	3.60	45.16	25.52 ^b	0.0089 ^a	750.66 ^b
SD	0.10	0.06	0.98	0.95	0.0011	33.94

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b, ^c คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-9 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.53	3.69	46.28	26.95	0.0104	768.85
2	12.42	3.60	44.67	29.67	0.0099	818.39
3*	12.51	3.71	46.41	27.00	-----	778.86
4	12.44	3.67	45.71	27.06	0.0093	798.88
5*	12.33	3.59	44.29	18.50	0.0067	512.68
ค่าเฉลี่ย	12.46	3.65	45.55	27.89 ^a	0.0099 ^a	795.37 ^a
SD	0.06	0.05	0.82	1.54	0.0006	24.96

ตารางผนวก ก.9-10 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิคาร์บอนเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.38	3.87	47.86	71.90	----	1,950.53
2	12.38	3.79	46.92	75.35	0.0124	2,086.93
3	12.37	3.85	47.64	75.13	0.0112	2,094.53
4	12.35	3.77	46.57	74.57	0.0133	2,081.12
5	12.35	3.86	47.62	75.57	0.0123	2,130.94
ค่าเฉลี่ย	12.36	3.82	47.19	75.16 ^{b,c}	0.0123 ^a	2,098.38 ^b
SD	0.02	0.04	0.53	0.43	0.0009	22.39

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-11 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.35	3.81	47.05	75.78	0.0128	2,108.39
2	12.40	3.81	47.22	74.54	0.0117	2,073.08
3	12.37	3.80	47.03	74.84	-----	2,075.36
4*	12.38	3.84	47.53	76.22	0.0135	2,148.66
5	12.46	3.78	47.14	74.94	-----	2,087.53
ค่าเฉลี่ย	12.40	3.80	47.11	75.03 ^c	0.0123 ^b	2,086.09 ^b
SD	0.05	0.01	0.09	0.53	0.0008	16.16

ตารางผนวก ก.9-12 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.49	3.77	47.03	71.59	-----	2,029.76
2	12.43	3.69	45.84	77.57	0.0123	2,145.65
3	12.49	3.72	46.41	75.71	0.0122	2,109.24
4*	12.48	3.62	45.14	78.87	0.0127	2,209.34
5	12.37	3.83	47.38	75.98	0.0132	2,173.03
ค่าเฉลี่ย	12.43	3.75	46.54	76.42 ^b	0.0126 ^a	2,142.64 ^b
SD	0.06	0.07	0.78	1.01	0.0006	32.00

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-13 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.47	3.28	40.90	39.16	0.0068	1,263.45
2	12.50	3.29	41.16	35.86	0.0126	1,246.63
3	12.43	3.32	41.22	35.72	0.0100	1,216.43
4*	12.46	3.25	40.54	33.95	0.0128	1,233.44
5	12.49	3.24	40.46	36.85	0.0108	1,289.29
ค่าเฉลี่ย	12.47	3.28	40.95	36.14 ^b	0.0111 ^b	1,250.78 ^b
SD	0.04	0.04	0.42	0.62	0.0013	36.61

ตารางผนวก ก.9-14 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิเอทิลีนเทเรฟเทอเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.43	3.22	39.97	38.47	0.0068	1,375.57
2	12.45	3.28	40.85	36.41	0.0126	1,236.89
3*	12.53	3.25	40.78	33.59	0.0099	1,183.33
4	12.32	3.27	40.25	37.33	0.0128	1,276.56
5	12.42	3.24	40.21	36.89	0.0108	1,255.89
ค่าเฉลี่ย	12.40	3.26	40.44	36.88 ^b	0.0121 ^{a,b}	1,256.45 ^b
SD	0.07	0.02	0.36	0.46	0.0011	19.84

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-15 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	13.16	3.15	41.42	34.28	0.0118	1,195.99
2	13.19	3.00	39.62	32.83	0.0117	1,133.53
3	13.14	2.83	37.22	32.79	0.0134	1,144.31
4*	13.10	2.83	37.07	31.55	0.0073	1,104.46
5	13.17	2.86	37.72	33.40	0.0137	1,138.16
ค่าเฉลี่ย	13.17	2.90	38.19	33.01 ^c	0.0129 ^a	1,138.67 ^c
SD	0.03	0.09	1.27	0.34	0.0011	5.41

ตารางผนวก ก.9-16 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.48	3.33	41.51	59.43	0.0099	2,390.10
2	12.36	3.35	41.44	58.92	0.0095	2,435.31
3	12.39	3.27	40.53	63.31	0.0102	2,649.10
4*	12.48	3.20	39.93	64.56	0.0117	2,726.85
5	12.39	3.40	42.13	58.65	0.0107	2,398.60
ค่าเฉลี่ย	12.41	3.34	41.40	60.08 ^b	0.0101 ^c	2,468.28 ^c
SD	0.05	0.05	0.66	2.18	0.0005	122.13

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b, ^c คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-17 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.44	3.29	40.94	59.24	0.009	2,618.86
2	12.36	3.32	41.04	63.84	0.0103	2,750.33
3*	12.39	3.25	40.26	64.86	0.0089	2,767.52
4	12.37	3.35	41.48	60.06	0.0109	2,494.96
5	12.45	3.29	40.95	62.05	0.0113	2,594.87
ค่าเฉลี่ย	12.39	3.32	41.16	61.98 ^b	0.0108 ^{b,c}	2,613.39 ^{b,c}
SD	0.05	0.03	0.28	1.89	0.0005	128.69

ตารางผนวก ก.9-18 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.38	3.42	42.33	58.46	0.0102	2,437.04
2	12.41	3.43	42.55	59.30	0.0111	2,376.58
3	12.42	3.28	40.77	65.37	0.0116	2,774.02
4	12.43	3.40	42.30	62.35	0.0111	2,507.38
5*	12.37	3.30	40.85	66.03	0.0096	2,842.33
ค่าเฉลี่ย	12.41	3.38	41.99	61.37 ^b	0.0110 ^b	2,523.76 ^b
SD	0.02	0.07	0.82	3.15	0.0006	175.20

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-19 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.58	3.52	44.31	5.67	0.0500	162.77
2	12.46	3.52	43.81	5.69	0.0500	162.31
3	12.44	3.50	43.51	5.73	0.0493	163.83
4*	12.52	3.51	43.96	5.48	----	161.46
5*	12.45	3.49	43.49	5.85	0.0499	168.45
ค่าเฉลี่ย	12.49	3.51	43.88	5.70 ^{a,b}	0.0498 ^a	162.97 ^a
SD	0.08	0.01	0.40	0.03	0.0004	0.78

ตารางผนวก ก.9-20 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.43	3.50	43.45	5.76	0.0498	162.39
2	12.41	3.57	44.27	5.64	0.0498	157.22
3	12.41	3.54	43.93	5.48	0.0498	158.16
4*	12.46	3.54	44.06	5.19	0.0499	157.09
5	12.55	3.55	44.50	5.23	0.0499	160.59
ค่าเฉลี่ย	12.46	3.55	44.23	5.45 ^b	0.0498 ^a	158.66 ^a
SD	0.08	0.02	0.29	0.21	0.0001	1.74

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-21 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.44	3.51	43.62	5.93	0.0499	172.02
2	12.43	3.48	43.23	5.40	0.0499	171.84
3	12.42	3.49	43.39	5.79	0.0499	166.02
4*	12.42	3.50	43.46	5.83	-----	169.57
5*	12.46	3.56	44.41	5.65	-----	160.32
ค่าเฉลี่ย	12.43	3.49	43.41	5.71 ^{a,b}	0.0499 ^a	169.96 ^a
SD	0.01	0.02	0.20	0.27	0.0000	3.41

ตารางผนวก ก.9-22 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.33	3.39	41.81	1.26	0.0475	28.64
2*	12.26	3.37	41.26	1.02	0.0496	23.63
3	12.28	3.39	41.63	1.18	0.0469	34.07
4	12.37	3.40	42.10	1.14	0.0456	25.01
5*	12.36	3.41	42.20	1.18	0.0499	38.58
ค่าเฉลี่ย	12.33	3.39	41.85	1.19 ^c	0.0467 ^b	29.24 ^b
SD	0.05	0.01	0.24	0.06	0.0010	4.56

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-23 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.29	3.44	42.33	1.16	0.0495	26.38
2*	12.29	3.49	42.86	1.28	0.0497	32.13
3*	12.29	3.39	41.61	1.03	0.0496	28.45
4	12.24	3.38	41.41	1.10	0.0489	26.79
5	12.50	3.48	43.54	1.27	0.0492	29.60
ค่าเฉลี่ย	12.34	3.43	42.43	1.18 ^c	0.0492 ^a	27.59 ^a
SD	0.14	0.05	1.07	0.09	0.0003	1.75

ตารางผนวก ก.9-24 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.33	3.49	43.07	1.39	0.0490	35.78
2	12.35	3.51	43.38	1.34	0.0498	29.28
3	12.27	3.54	43.38	1.33	0.0466	29.04
4	12.23	3.51	42.94	1.36	0.0499	32.46
5*	12.25	3.49	42.72	1.34	0.0406	29.07
ค่าเฉลี่ย	12.28	3.52	43.23	1.34 ^b	0.0488 ^a	30.26 ^a
SD	0.06	0.02	0.25	0.02	0.0019	1.91

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-25 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.38	3.42	42.34	3.67	0.0500	90.19
2	12.33	3.44	42.40	3.40	0.0487	83.23
3	12.37	3.42	42.28	3.47	0.0491	79.14
4*	12.41	3.39	42.06	3.46	0.0482	99.97
5	12.44	3.39	42.17	3.50	0.0488	89.25
ค่าเฉลี่ย	12.38	3.42	42.28	3.46 ^a	0.0489 ^a	83.87 ^a
SD	0.06	0.03	0.12	0.05	0.0002	5.09

ตารางผนวก ก.9-26 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.56	3.42	42.96	3.31	0.0455	83.57
2	12.47	3.42	42.69	3.49	0.0446	86.42
3*	12.39	3.43	42.51	3.36	0.0500	78.97
4*	12.40	3.40	42.11	3.50	-----	89.91
5	12.38	3.39	42.00	3.35	0.0483	87.66
ค่าเฉลี่ย	12.47	3.41	42.55	3.38 ^a	0.0461 ^b	85.88 ^b
SD	0.09	0.02	0.50	0.09	0.0019	2.10

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-27 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.29	3.41	41.94	3.29	0.0496	85.83
2	12.31	3.46	42.59	3.18	0.0496	80.78
3*	12.37	3.45	42.62	3.08	0.0499	76.82
4	12.44	3.47	43.16	3.06	0.0497	86.00
5	12.50	3.45	43.13	3.10	0.0500	84.27
ค่าเฉลี่ย	12.42	3.46	42.96	3.11 ^b	0.0498 ^a	83.68 ^a
SD	0.10	0.01	0.32	0.06	0.0002	2.66

ตารางผนวก ก.9-28 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.30	3.43	42.20	24.99	0.0125	1,275.36
2	12.26	3.43	42.04	24.82	0.0115	1,223.64
3	12.33	3.40	41.95	25.38	0.0122	1,268.11
4*	12.30	3.40	41.85	25.72	0.0146	1,251.79
5	12.29	3.41	41.87	24.61	0.0102	1,249.61
ค่าเฉลี่ย	12.30	3.42	42.02	24.95 ^c	0.0116 ^b	1,254.18 ^b
SD	0.03	0.02	0.14	0.33	0.0010	23.07

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^a, ^b, ^c คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ตารางผนวก ก.9-29 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.37	3.50	43.28	23.78	0.012	1,215.11
2	12.29	3.39	41.66	27.98	0.0114	1,365.01
3*	12.28	3.39	41.60	26.56	0.0141	1,302.59
4	12.28	3.37	41.37	27.35	0.0101	1,385.82
5	12.27	3.46	42.42	26.24	0.0114	1,289.65
ค่าเฉลี่ย	12.28	3.41	41.82	27.19 ^b	0.0110 ^b	1,346.83 ^b
SD	0.01	0.05	0.54	0.88	0.0008	50.60

ตารางผนวก ก.9-30 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการโค้งงอของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm ²)	Flexural strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.36	3.43	42.41	25.48	0.0159	1,280.21
2	12.34	3.45	42.63	25.53	0.0138	1,247.52
3	12.27	3.46	42.44	25.59	0.0134	1,275.97
4*	12.29	3.55	43.68	24.08	0.0130	1,126.12
5*	12.33	3.49	43.08	24.16	0.0111	1,148.90
ค่าเฉลี่ย	12.32	3.45	42.49	25.53 ^{b,c}	0.0144 ^a	1,267.90 ^a
SD	0.05	0.02	0.12	0.06	0.0013	17.78

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

^{a, b, c} คือ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA)

ภาคผนวก ก.10 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact testing)

ตารางผนวก ก.10-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานต้นแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิด PLA

รูปแบบ	ครั้งที่	Impact strength (kJ/m ²)	ค่าเฉลี่ย	SD
8Drill*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		
Hex*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		
Spin	1	13.37	15.61	5.58
	2	21.96		
	3	11.50		
Sweep	1	3.00	5.47	2.27
	2	7.45		
	3	5.95		
Tri*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		

หมายเหตุ : * คือ ไม่สามารถหาค่า Impact strength ได้ เนื่องจาก ชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก

ตารางผนวก ก.10-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานต้นแบบ
บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิด CFPLA

รูปแบบ	ครั้งที่	Impact strength (kJ/m ²)	ค่าเฉลี่ย	SD
8Drill*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		
Hex*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		
Spin	1	15.57	15.28	1.33
	2	13.82		
	3	16.43		
Sweep	1	4.05	3.05	1.15
	2	3.33		
	3	1.79		
Tri*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		

หมายเหตุ : * คือ ไม่สามารถหาค่า Impact strength ได้ เนื่องจาก ชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก

ตารางผนวก ก.10-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานต้นแบบ
บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิด SPLA

รูปแบบ	ครั้งที่	Impact strength (kJ/m ²)	ค่าเฉลี่ย	SD
8Drill*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		
Hex*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		
Spin**	1	N/A	----	----
	2	N/A		
	3	N/A		
Sweep**	1	N/A	----	----
	2	N/A		
	3	N/A		
Tri*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		

หมายเหตุ : * คือ ไม่สามารถหาค่า Impact strength ได้ เนื่องจาก ชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก

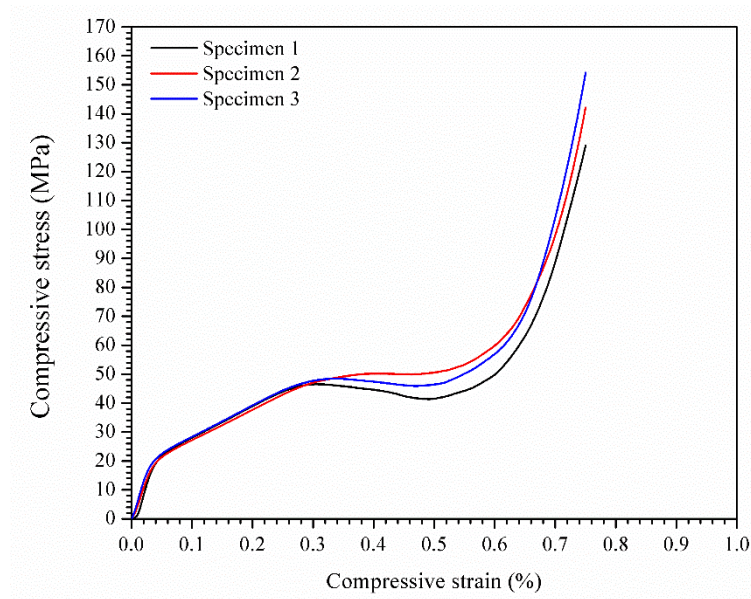
** คือ ชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้

ตารางผนวก ก.10-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานต้นแบบ
บรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ชนิด WPLA

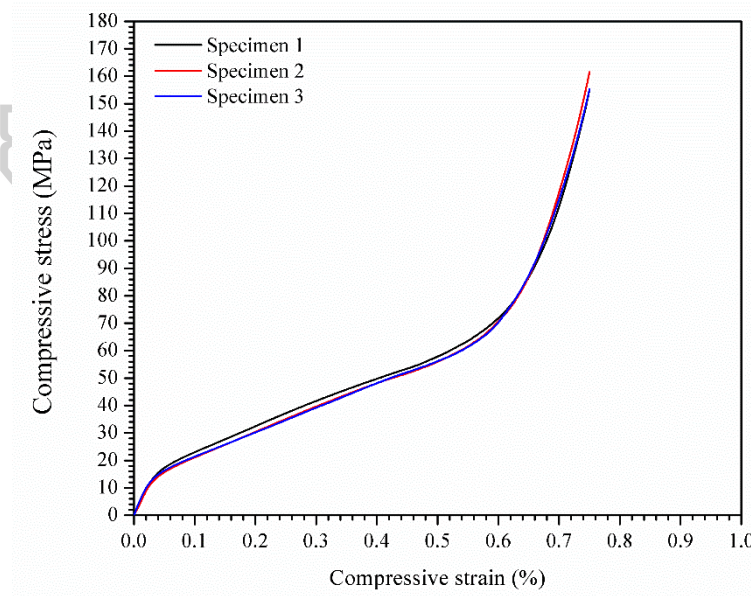
รูปแบบ	ครั้งที่	Impact strength (kJ/m ²)	ค่าเฉลี่ย	SD
8Drill*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		
Hex*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		
Spin	1	10.37	9.68	2.10
	2	11.35		
	3	7.32		
Sweep	1	2.55	2.78	0.39
	2	3.22		
	3	2.56		
Tri*	1	NB	-	-
	2	NB		
	3	NB		

หมายเหตุ : * คือ ไม่สามารถหาค่า Impact strength ได้ เนื่องจาก ชิ้นงานไม่เกิดการแตกหัก

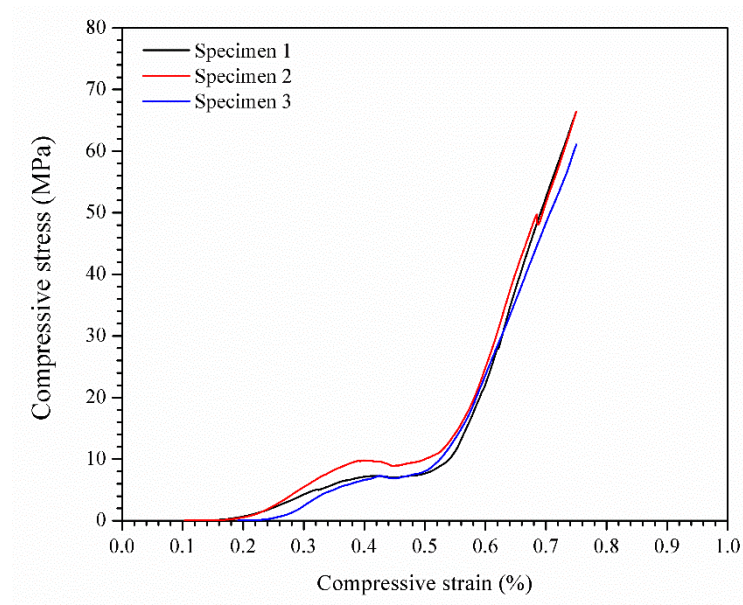
ภาคผนวก ก.11 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกด (Compressive test)



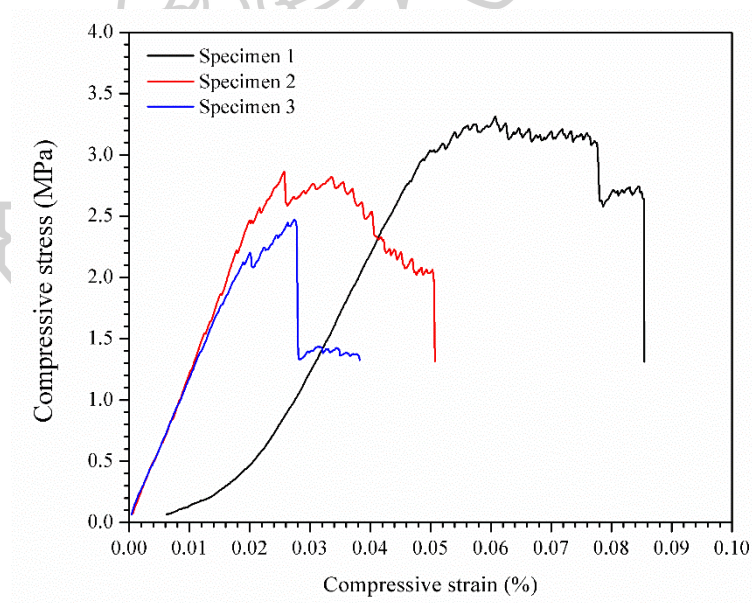
รูปผนวก ก.11-1 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill



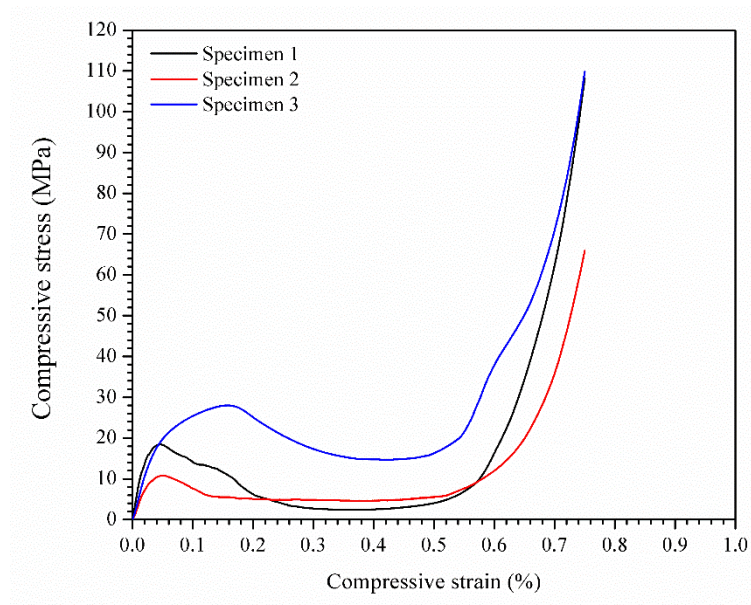
รูปผนวก ก.11-2 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Hex



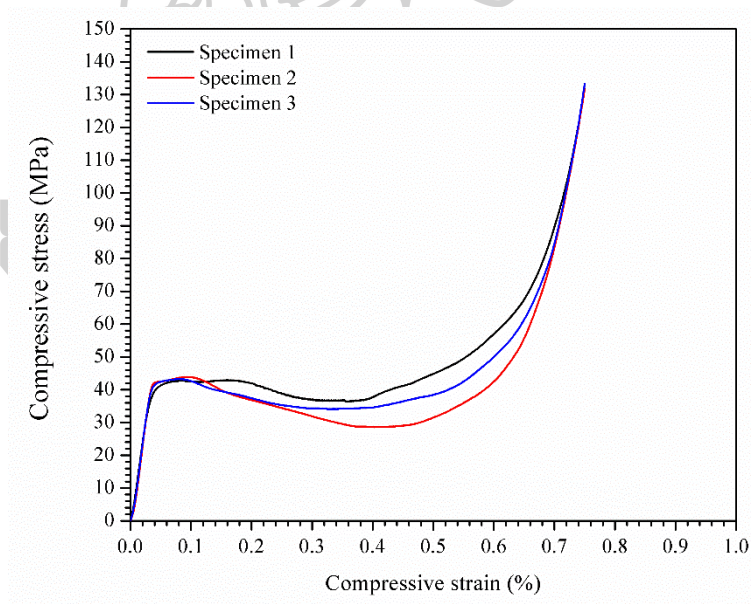
รูปผนวก ก.11-3 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Spin



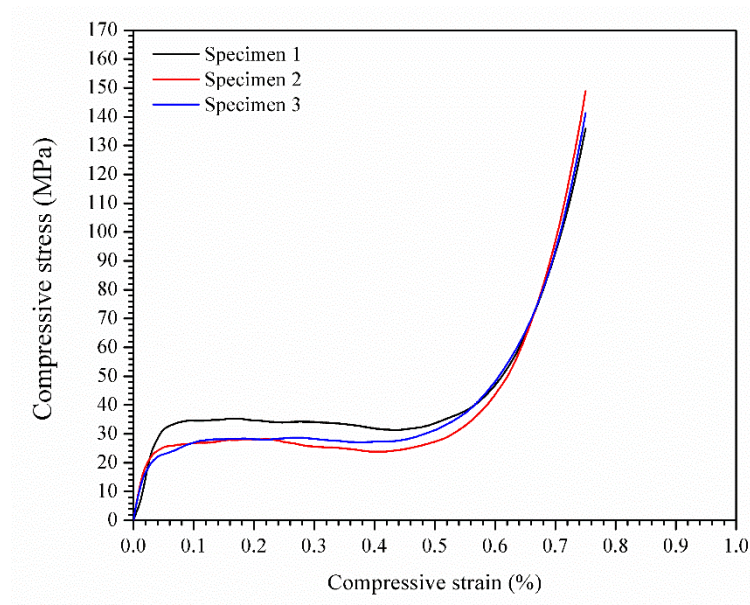
รูปผนวก ก.11-4 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep



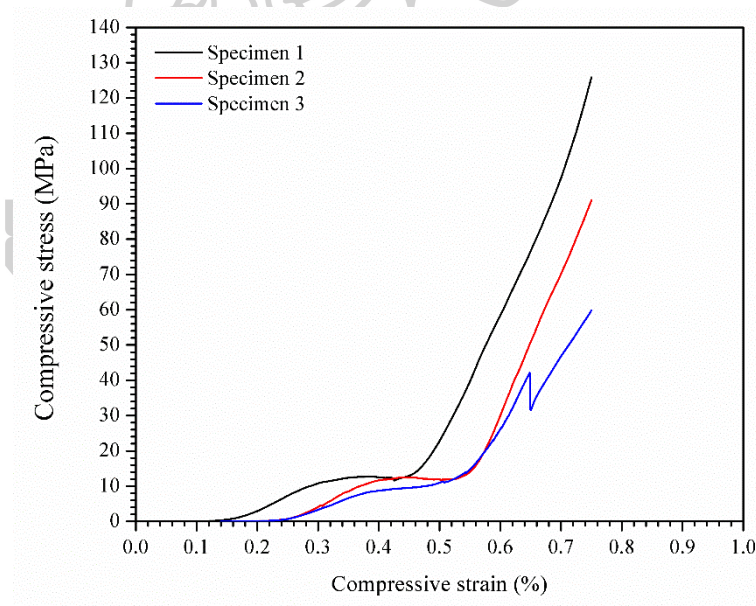
รูปผนวก ก.11-5 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Tri



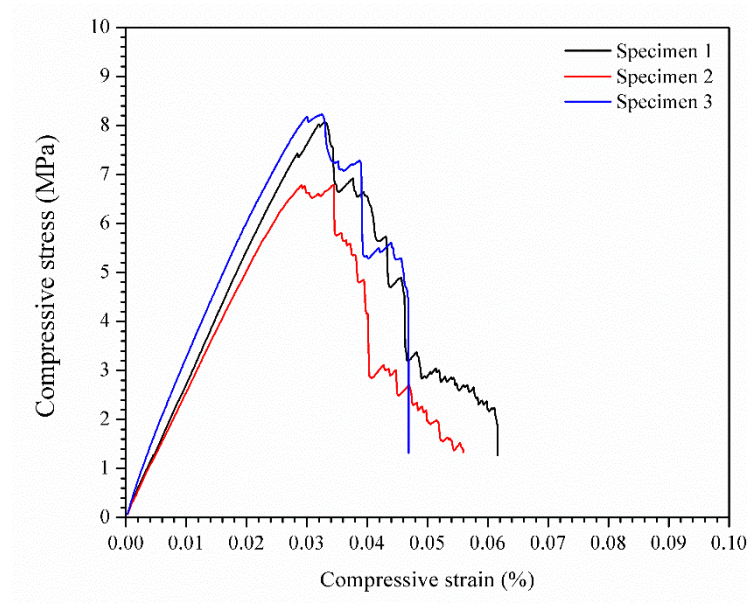
รูปผนวก ก.11-6 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill



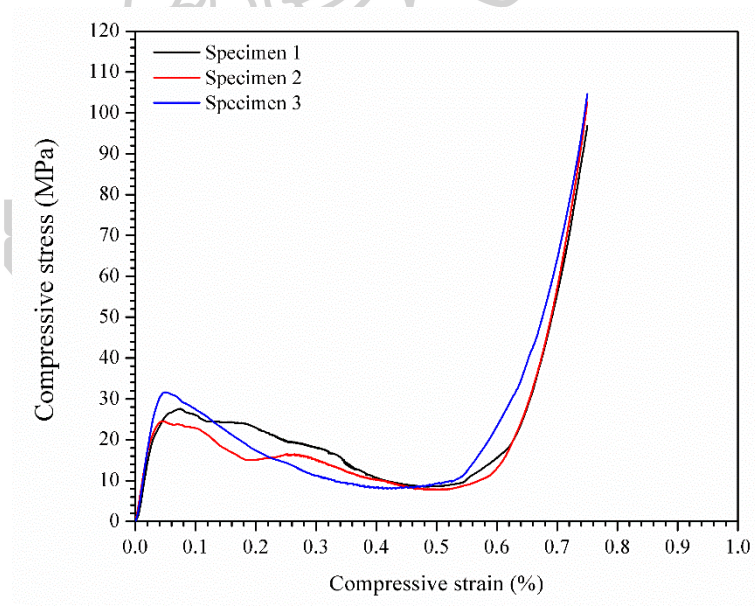
รูปผนวก ก.11-7 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Hex



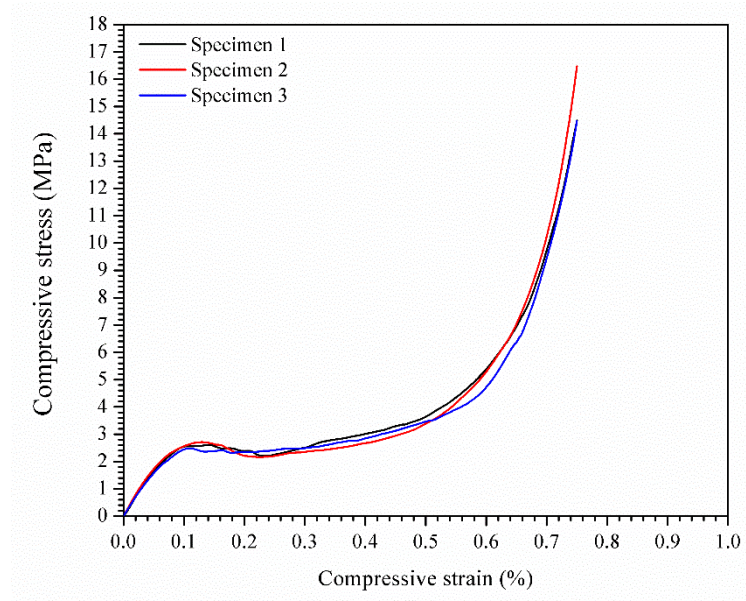
รูปผนวก ก.11-8 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Spin



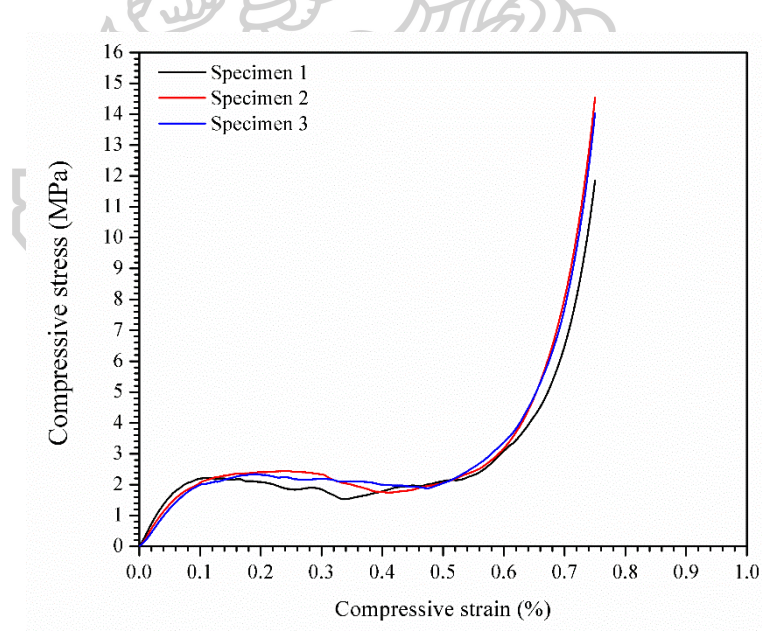
รูปผนวก ก.11-9 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep



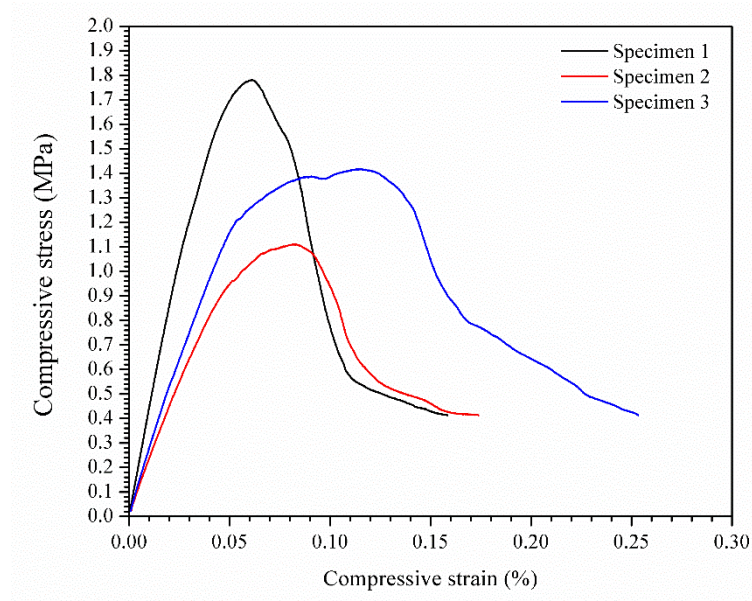
รูปผนวก ก.11-10 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Tri



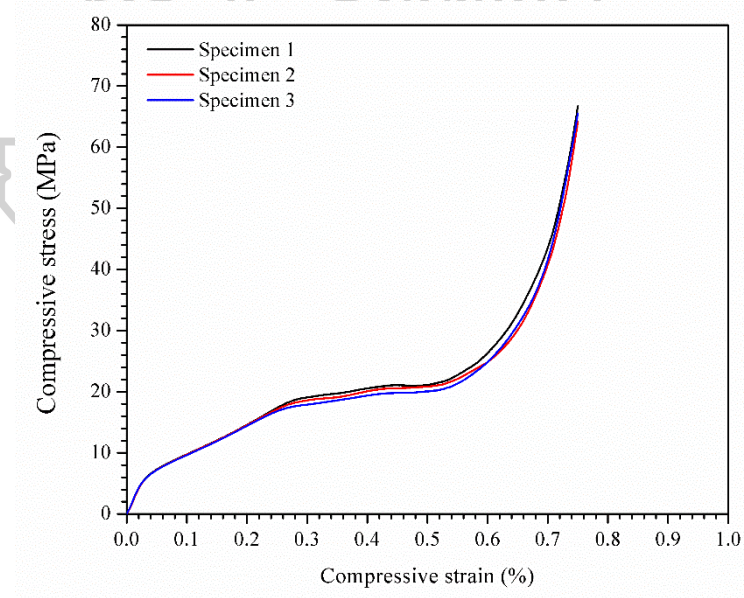
รูปผนวก ก.11-11 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด ที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill



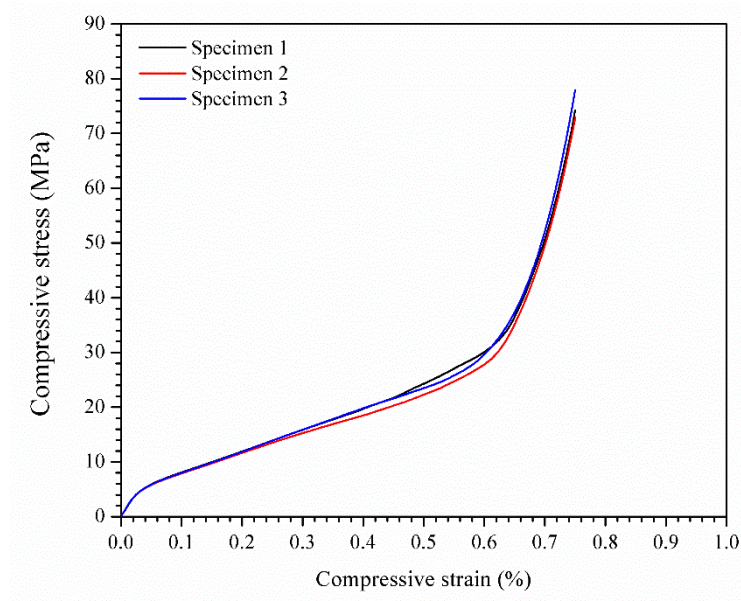
รูปผนวก ก.11-12 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด ที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Hex



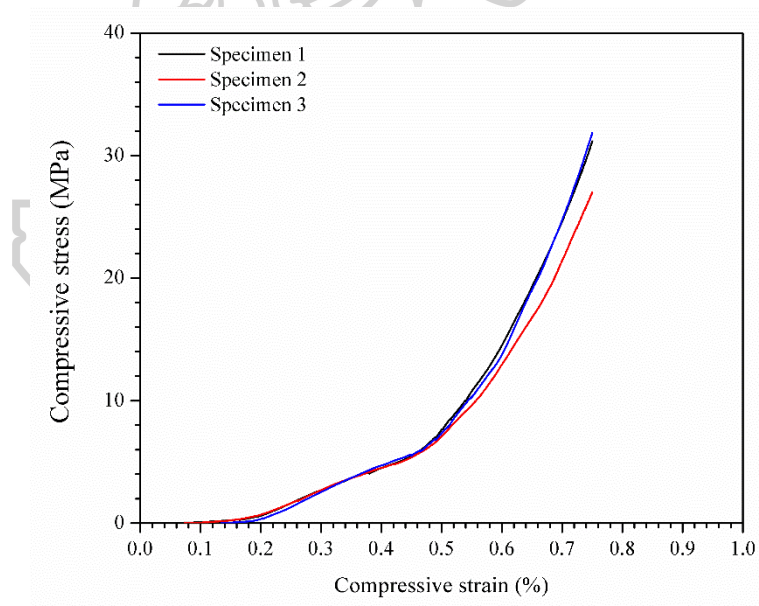
รูปผนวก ก.11-13 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิด ที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Tri



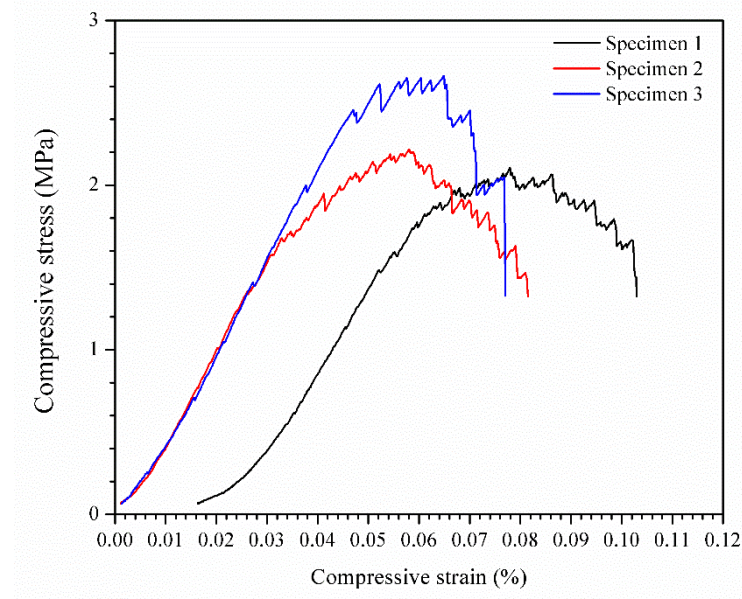
รูปผนวก ก.11-14 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วย ผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill



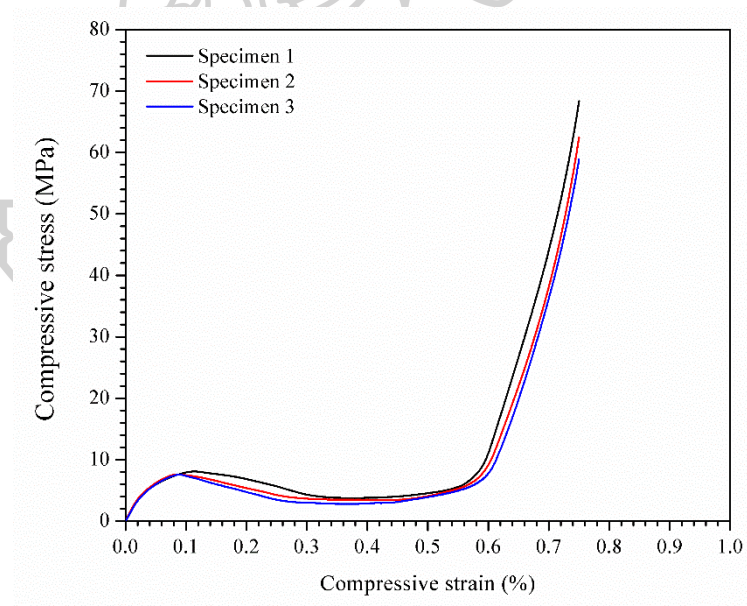
รูปผนวก ก.11-15 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วย ผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Hex



รูปผนวก ก.11-16 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วย ผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Spin



รูปผนวก ก.11-17 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วย ผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep



รูปผนวก ก.11-18 แสดง Compressive stress-strain curve ของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วย ผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Tri

ตารางผนวก ก.11-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	5.5461	46.57	0.31	129.02	0.75	420.67
2	5.5308	50.27	0.41	142.21	0.75	306.28
3	5.5540	48.54	0.34	154.27	0.75	356.05
ค่าเฉลี่ย	5.54	48.46	0.35	141.83	0.75	361.00
SD	0.01	1.85	0.05	12.63	0.00	57.36

ตารางผนวก ก.11-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Hex

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	5.4299	69.17	0.60	155.08	0.75	609.60
2	5.4078	68.71	0.63	161.54	0.75	677.72
3	5.4097	65.43	0.65	155.33	0.75	616.21
ค่าเฉลี่ย	5.42	67.77	0.63	157.31	0.75	634.51
SD	0.01	2.04	0.03	3.66	0.00	37.57

ตารางผนวก ก.11-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Spin

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	4.0008	8.21	0.43	66.43	0.75	41.84
2	4.0274	9.87	0.45	66.45	0.75	62.54
3	4.0889	7.30	0.43	61.10	0.75	61.22
ค่าเฉลี่ย	4.04	8.46	0.44	64.66	0.75	55.20
SD	0.05	1.31	0.01	3.08	0.00	11.59

ตารางผนวก ก.11-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	3.4137	3.38	0.06	3.31	0.06	97.80
2	3.4078	2.84	0.03	2.80	0.03	129.46
3	3.4269	2.42	0.026	2.47	0.03	115.71
ค่าเฉลี่ย	3.42	2.88	0.04	2.86	0.04	114.32
SD	0.01	0.48	0.02	0.42	0.02	15.87

ตารางผนวก ก.11-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Tri

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	4.3103	18.48	0.05	108.19	0.75	863.45
2*	4.2660	11.35	0.04	65.97	0.75	428.60
3	4.7293	28.52	0.16	109.85	0.75	495.78
ค่าเฉลี่ย	4.44	23.50	0.10	109.02	0.75	462.19
SD	0.26	7.10	0.08	1.17	0.00	47.50

ตารางผนวก ก.11-6 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	5.4457	42.77	0.08	131.74	0.75	1281.53
2	5.6219	42.89	0.11	131.59	0.75	1332.45
3	5.5499	42.91	0.13	133.26	0.75	1343.69
ค่าเฉลี่ย	5.5392	42.86	0.11	132.20	0.75	1319.22
SD	0.09	0.08	0.02	0.92	0.00	33.12

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.11-7 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Hex

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	5.4603	34.38	0.38	135.90	0.75	882.38
2	5.4717	30.12	0.33	148.86	0.75	550.52
3	5.4808	29.87	0.27	141.25	0.75	564.38
ค่าเฉลี่ย	5.4709	31.46	0.33	142.00	0.75	665.76
SD	0.01	2.53	0.06	6.51	0.00	187.73

ตารางผนวก ก.11-8 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Spin

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	4.1910	13.76	0.45	125.91	0.75	89.87
2	4.2639	12.50	0.44	91.08	0.75	88.58
3*	4.2806	0.00	0.00	59.84	0.75	263.93
ค่าเฉลี่ย	4.2452	13.13	0.44	108.49	0.75	89.22
SD	0.05	0.89	0.01	24.63	0.00	0.91

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.11-9 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	3.7363	8.03	0.033	8.07	0.03	278.39
2	3.6643	6.84	0.032	6.79	0.03	256.01
3	3.7270	8.27	0.038	5.47	0.04	345.62
ค่าเฉลี่ย	3.7092	7.71	0.03	6.77	0.04	293.34
SD	0.04	0.77	0.00	1.30	0.01	46.64

ตารางผนวก ก.11-10 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Tri

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	4.7581	26.47	0.07	96.82	0.75	892.71
2	4.7857	24.50	0.05	102.69	0.75	909.67
3	4.7500	31.63	0.05	104.63	0.75	1026.29
ค่าเฉลี่ย	4.7646	27.53	0.05	101.38	0.75	942.89
SD	0.02	3.68	0.01	4.07	0.00	72.72

ตารางผนวก ก.11-11 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	5.0073	2.61	0.14	14.50	0.75	35.98
2	4.9191	2.71	0.13	16.47	0.75	37.55
3	5.0058	2.48	0.11	14.47	0.75	34.09
ค่าเฉลี่ย	4.98	2.60	0.13	15.15	0.75	35.88
SD	0.05	0.12	0.02	1.15	0.00	1.73

ตารางผนวก ก.11-12 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Hex

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	4.7154	2.22	0.12	11.84	0.75	37.80
2	4.8877	2.45	0.24	14.54	0.75	27.75
3	4.8403	2.34	0.19	14.04	0.75	27.16
ค่าเฉลี่ย	4.81	2.34	0.18	13.47	0.75	30.90
SD	0.09	0.11	0.06	1.43	0.00	5.98

ตารางผนวก ก.11-13 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Tri

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	4.3541	1.78	0.06	1.78	0.06	44.16
2	4.2434	1.11	0.08	1.10	0.08	22.71
3	4.3155	1.39	0.09	1.41	0.11	26.70
ค่าเฉลี่ย	4.30	1.43	0.08	1.43	0.08	31.19
SD	0.06	0.34	0.02	0.34	0.02	11.41

ตารางผนวก ก.11-14 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ 8Drill

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1*	3.6207	21.10	0.45	66.77	0.75	90.94
2	3.6149	19.84	0.35	64.24	0.75	278.58
3	3.5906	18.97	0.40	65.54	0.75	291.41
ค่าเฉลี่ย	3.61	19.41	0.38	64.89	0.75	285.00
SD	0.02	0.62	0.04	0.92	0.00	9.07

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.11-15 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Hex

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	3.5320	31.11	0.63	74.28	0.75	331.41
2	3.4892	28.92	0.65	72.95	0.75	334.72
3	3.5215	29.76	0.68	78.00	0.75	355.47
ค่าเฉลี่ย	3.51	29.93	0.65	75.08	0.75	340.53
SD	0.02	1.10	0.03	2.62	0.00	13.05

ตารางผนวก ก.11-16 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Spin

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1	2.7689	5.48	0.45	31.17	0.75	119.77
2*	2.7616	5.23	0.50	27.03	0.75	106.53
3	2.7814	5.18	0.55	31.83	0.75	131.38
ค่าเฉลี่ย	2.77	5.33	0.50	31.50	0.75	125.57
SD	0.01	0.21	0.07	0.47	0.00	8.21

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ตารางผนวก ก.11-17 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Sweep

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1*	2.2830	2.11	0.08	2.11	0.08	51.37
2	2.2986	2.22	0.06	2.22	0.06	58.97
3	2.3110	2.66	0.06	2.58	0.06	57.97
ค่าเฉลี่ย	2.30	2.44	0.06	2.40	0.06	58.47
SD	0.01	0.32	0.00	0.26	0.00	0.71

ตารางผนวก ก.11-18 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบแรงกดของพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของชิ้นงานต้นแบบ Tri

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	Compressive stress at Yield (MPa)	Compressive strain at Yield (mm/mm)	Compressive stress at Tensile strength (MPa)	Compressive strain at Tensile strength (mm/mm)	Compressive Modulus (MPa)
1*	3.0511	8.09	0.11	68.36	0.75	150.15
2	3.0639	7.63	0.09	62.48	0.75	167.66
3	3.0640	7.58	0.09	58.88	0.75	160.96
ค่าเฉลี่ย	3.06	7.61	0.09	60.68	0.75	164.31
SD	0.01	0.03	0.00	2.54	0.00	4.74

หมายเหตุ : * คือ ตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณ เนื่องจากมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าเฉลี่ย \pm S.D.

ภาคผนวก ก.12 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงาน (Open porosity)

ตารางผนวก ก.12-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของพอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน- สไตรีน (ABS) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชั้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
ABS30	1	0.4512	0.4548	0.4742	0.76	0.69	0.06
	2	0.4759	0.4790	0.4888	0.64		
	3	0.4766	0.4800	0.5002	0.68		
ABS40	1	0.4921	0.4954	0.5022	0.66	0.51	0.14
	2	0.4861	0.4880	0.4910	0.39		
	3	0.4832	0.4856	0.4870	0.49		
ABS50	1	0.4594	0.4618	0.4788	0.50	0.44	0.10
	2	0.4480	0.4502	0.4597	0.48		
	3	0.4536	0.4551	0.4654	0.32		

ตารางผนวก ก.12-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของพอลิเอไมด์ (PA) ที่ขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชั้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
PA30	1	0.4106	0.4451	0.4304	8.04	10.08	1.85
	2	0.4246	0.4798	0.4747	11.66		
	3	0.4595	0.5087	0.4681	10.54		
PA40	1	0.4767	0.5041	0.4888	5.62	5.85	0.63
	2	0.4601	0.4916	0.4814	6.56		
	3	0.4644	0.4899	0.4759	5.37		
PA50	1	0.4813	0.5069	0.4891	5.25	5.23	0.12
	2	0.4636	0.4902	0.4992	5.34		
	3	0.5054	0.5312	0.5060	5.11		

ตารางผนวก ก.12-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของพอลิคาร์บอเนต (PC) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชั้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
PC30	1	0.5625	0.5649	0.5013	0.48	0.48	0.00
	2	0.5573	0.5597	0.5037	0.48		
	3	0.5881	0.5906	0.5293	0.47		
PC40	1	0.5679	0.5708	0.5065	0.57	0.65	0.24
	2	0.5571	0.5618	0.5144	0.92		
	3	0.5675	0.5697	0.4953	0.45		
PC50	1	0.5439	0.5474	0.5054	0.69	0.59	0.11
	2	0.5293	0.5323	0.4934	0.61		
	3	0.5657	0.5681	0.5056	0.48		

ตารางผนวก ก.12-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรต ที่ถูกปรับปรุงด้วยไกลคอล (PETG) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชั้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
PETG30	1	0.4605	0.4660	0.4261	1.29	1.55	0.61
	2	0.4245	0.4343	0.4382	2.24		
	3	0.4569	0.4615	0.4194	1.10		
PETG40	1	0.4159	0.4271	0.4377	2.57	2.11	0.47
	2	0.4693	0.4786	0.4384	2.13		
	3	0.4604	0.4674	0.4317	1.63		
PETG50	1	0.4107	0.4177	0.4097	1.71	1.39	0.47
	2	0.3958	0.4027	0.4283	1.62		
	3	0.4112	0.4146	0.4011	0.85		

ตารางผนวก ก.12-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชั้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
PLA30	1	0.4602	0.4714	0.4499	2.50	1.88	0.57
	2	0.4767	0.4826	0.4289	1.38		
	3	0.4629	0.4706	0.4341	1.78		
PLA40	1	0.4594	0.4664	0.4356	1.61	1.68	0.37
	2	0.4742	0.4803	0.4484	1.36		
	3	0.4917	0.5010	0.4463	2.09		
PLA50	1	0.4561	0.4641	0.4587	1.75	1.60	0.15
	2	0.4665	0.4739	0.4636	1.60		
	3	0.4677	0.4739	0.4292	1.45		

ตารางผนวก ก.12-6 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของพอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFPLA) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชั้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
CFPLA30	1	0.4620	0.4709	0.4514	1.98	1.64	0.39
	2	0.4621	0.4693	0.4195	1.72		
	3	0.4558	0.4608	0.4139	1.21		
CFPLA40	1	0.4473	0.4534	0.4049	1.51	1.88	0.37
	2	0.4411	0.4506	0.4241	2.25		
	3	0.4236	0.4314	0.4146	1.89		
CFPLA50	1	0.4109	0.4184	0.4099	1.83	1.95	0.24
	2	0.4642	0.4719	0.4306	1.79		
	3	0.4446	0.4536	0.4045	2.23		

ตารางผนวก ก.12-7 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของพอลิแลคติกแอซิดที่ถูกปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเหนียว (SPLA) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชั้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
SPLA30	1	0.5741	0.5804	0.4805	1.31	1.39	0.19
	2	0.5362	0.5435	0.4532	1.62		
	3	0.6068	0.6129	0.4885	1.25		
SPLA40	1	0.5816	0.5884	0.4807	1.42	1.33	0.11
	2	0.5618	0.5681	0.4615	1.37		
	3	0.5744	0.5801	0.4721	1.21		
SPLA50	1	0.5365	0.5426	0.4394	1.39	1.30	0.08
	2	0.5919	0.5981	0.4811	1.29		
	3	0.5619	0.5675	0.4565	1.23		

ตารางผนวก ก.12-8 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของพอลิแลคติกแอซิด เสริมแรงด้วยผงไม้ (WPLA) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชั้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
WPLA30	1	0.3313	0.3465	0.4684	3.25	2.88	0.47
	2	0.3058	0.3158	0.4251	2.36		
	3	0.3243	0.3386	0.4728	3.03		
WPLA40	1	0.3136	0.3345	0.4712	4.45	3.22	1.36
	2	0.3145	0.3221	0.4330	1.76		
	3	0.3067	0.3210	0.4157	3.45		
WPLA50	1	0.3067	0.3246	0.4740	3.79	2.81	0.85
	2	0.3143	0.3243	0.4529	2.21		
	3	0.3248	0.3356	0.4476	2.42		

ตารางผนวก ก.12-9 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชิ้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
TPE30	1	0.4329	0.4411	0.4210	1.95	1.69	0.35
	2	0.5041	0.5101	0.4646	1.29		
	3	0.4876	0.4960	0.4602	1.83		
TPE40	1	0.4771	0.4846	0.4420	1.70	1.74	0.45
	2	0.4811	0.4911	0.4555	2.20		
	3	0.5150	0.5209	0.4507	1.31		
TPE50	1	0.5042	0.5106	0.4465	1.44	1.34	0.11
	2	0.5204	0.5260	0.4616	1.22		
	3	0.5053	0.5115	0.4515	1.38		

ตารางผนวก ก.12-10 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบรูพรุนเปิดของชิ้นงานของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) ที่ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	ชิ้นที่	น้ำหนัก หลังอบ (g)	น้ำหนักหลัง แช่น้ำกลั่น (g)	ปริมาตร ชิ้นงาน (cm ³)	Open Porosity (%)	ค่าเฉลี่ย OP (%)	SD
TPU30	1	0.5637	0.5728	0.4746	1.92	1.80	0.44
	2	0.5601	0.5705	0.4800	2.17		
	3	0.5405	0.5466	0.4647	1.32		
TPU40	1	0.5345	0.5472	0.4597	2.77	2.36	0.71
	2	0.5692	0.5823	0.4757	2.76		
	3	0.5699	0.5770	0.4633	1.54		
TPU50	1	0.5575	0.5637	0.4649	1.34	1.98	0.70
	2	0.5469	0.5598	0.4748	2.72		
	3	0.5619	0.5708	0.4745	1.88		



ภาคผนวก ข
การนำเสนอผลงานวิจัย

ภาคผนวก ข.1 การประชุมวิชาการ Asian Workshop on Polymer Processing (AWPP2018)

-บันทึกงานการประชุม (Proceeding)

Asian Workshop on Polymer Processing

MTEC
a member of NSTDA

สมาคมโพลีเมอร์แห่งประเทศไทย
Polymer Society of Thailand

AWPP 2018
Asian Workshop on Polymer Processing
10-13 DECEMBER 2018
Chiang Mai, Thailand

AWPP 2018

CONFERENCE PROCEEDING

December 10-13, 2018

**Chiangmai Grandview Hotel
& Convention Center, Chiang Mai, Thailand**

Jointly organized by

Rajamangala University of Technology Thanyaburi (Thailand)
National Metal and Materials Technology Center (Thailand)
POLYMER SOCIETY OF THAILAND (Thailand)

TPAC **TPCC** **KISTLER**
measure. analyze. innovate.

Effect of Printing Speed on Thermal and Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples for Shipping Packaging

Phiraphong Wongwisitchai, Nattakarn Hongsriphan, and Pajaera Patanathabutr*

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

*Patanathabutr_P@su.ac.th

Abstract— Due to the growing of on-line shopping, new packaging materials have to be redesigned or developed to support shipping of goods or items from local suppliers to worldwide online customers. The objective of the research was to design a new type of shipping packaging that could be fabricated using 3D-printing technology. Three types of 3D-printing filaments were purchased from commercial suppliers including non-biodegradable polyesters; polycarbonate (PC), poly(ethylene terephthalate glycol-modified) (PETG), and biodegradable polyester; poly(lactic acid) (PLA). A graphic drawing of a dogbone-shape specimen was generated by a simulation program and then fabricated into specimens using these polymer filaments by a commercial 3D-printer. The printing speeds varied to be 30, 40, and 50 mm/s, respectively. Specimens were also fabricated by injection molding for comparison. The results showed that tensile strength and elongation at break of injection molded specimens were higher than those fabricated by 3D-printing technique. The 3D-printed specimens of PETG and PLA had lower tensile strength 48% and 36%, respectively, however, PC specimens did not have different tensile strength. The stress-strain curve of PLA injection molding specimens was resembled that of specimens fabricated by 3D-printer, which the similar necking pattern was observed. On the other hand, the stress-strain curve of PC injection molded specimens showed cold drawing but that of 3D-printed specimens did not show. The stress-strain curve of PETG injection molded specimens showed ductile behaviour, but the 3D-printed specimens showed brittle behaviour. Mechanical properties of specimens fabricated by the 3D-printing technique with varied printing speeds did not differ. SEM micrographs indicated fractured surface in the 3D-printed specimens.

Keywords— 3D-printing technology; filament; printing speed; and mechanical properties

I. INTRODUCTION

Currently, the online business or e-commerce is very popular due to its convenience and low cost. The buyers can view, compare, and select the product quickly. By this online trading business, the sellers must send goods to the buyers by mails or shipping. This leads to the importance of shipping packaging that is required to protect goods delivered to the buyers in good condition with low cost. Using plastics for protecting damage in shipping has been used in many forms such as expanded polyethylene foam, air bubble polyethylene sheets, or polyvinyl blister pack.

However, some products that are too heavy and have complex shape that require special shipping packaging material rather than the conventional materials. Moreover, these complex-shape packaging should be fabricated using a melt processing method that is inexpensive in order to reduce the overall cost. By this regard, the shipping packaging produced by injection molding would be considered too expensive to meet the requirement.

3D-printing is an innovative additive manufacturing (AM) technology which produces part directly from pre-designed digital model without additional tooling or assembling. High quality prototype or ready-to-use product, regardless the complexity of its geometry and topology, can be easily produced by a 3D-printer in a short time at low cost without wasting materials. 3D-printing has the advantages to print complex objects with an internal structure, simple operation, and customizable in the whole manufacturing process. In recent years, 3D-printing has been widely applied in many fields, such as machinery, biomedicine, polymer, aerospace, automotive engineering, biotechnology and so on. [1]

There are many types of 3D-printing including liquid-based systems, e.g., stereographic (SLA), solid-based systems, e.g. fused deposition modeling (FDM) and laminated object manufacturing (LOM), and powder-based systems, e.g. selective laser melting (SLM) and selective laser sintering (SLS), which are solid-based systems, are especially popular, especially FDM, due to its low cost equipment, variability in material selection, easy-to-use operation, and minimize wasting material. This technology would be used to produce online shipping packaging that has complex shape and has enough strength to protect the delivered goods.

The FDM process works as follows; a three dimensional solid must be created by the computer aided design (CAD) software. Then, the 3D model is exported to the FDM software using the stereolithography (STL) format. After that the STL format is converted to G-Code file. The G-Code is produced by a dedicated software commonly called slicer or slicing software that takes into account the virtual geometry, the characteristics of the printing material, and the specific features of the 3D-printer. [2]

There were literatures that investigated the infill percentage affecting on tensile strength of 3D-printed parts. The tensile strength was increased as the infill percentage was increased. The infill percentage of 100% had the most tensile strength and the effect of number of contours became less [3]. Habibur Rahman *et al.* studied the scale factor that was applicable to ABS based FDM additive manufacturing. Also, there were literatures discussed that the 0°, 45°-45°, and 90° of layer orientation of 3D-printed part had effect on the tensile properties. As the 0° orientation gave higher tensile strength than the 45°-45° and 90° orientation.[4] B.M. Tymrak *et al* investigated the 3D-printed parts with a layer height of 0.2 mm had higher tensile strength than those with layer heights of 0.3 and 0.4 mm [5].

The research methodology of this research consisted of the simulation analysis of the design, the selection of materials, the optimizing 3D-printing condition, and the testing and analysis of properties. A graphic drawing of a dogbone-shape specimen was generated by a simulation program. Three commercially available polymer filaments; polycarbonate, poly(ethylene terephthalate-glycol), and poly(lactic acid), were selected and studied in term of thermal and rheological properties. Then, the filaments were fabricated into dogbone-shape specimens by a commercial 3D-printer (FDM) and an injection molding machine. The optimized printing condition (i.e. nozzle temperature, bed temperature, and raster orientation) was obtained, and three different printing speeds were varied to fabricate the printed specimens. Morphologies of the printed specimens were studied via scanning electron microscope (SEM). Finally, influence of 3D-printing speed was investigated in terms of tensile properties.

II. MATERIALS AND EXPERIMENTAL

A. Materials

Polycarbonate (PC) was purchased in filament form (diameter of 1.75 mm) by Polymaker Industries, LLC., USA. The PC filament was reported to have a tensile strength of 60 MPa, a flexural strength of 95 MPa, and a melt flow index of 24 g/10 min (300 °C, 1.2 kg). Poly(ethylene terephthalate-glycol) (PETG) was purchased in filament form (diameter of 1.75 mm) by Torwell Technologies Co., Limited, Australia. The PETG filament was reported to have a tensile strength of 50 MPa, a flexural strength of 720 MPa, and a melt flow index of 20 g/10 min (200 °C/5 kg). Poly(lactic acid) (PLA) was purchased in filament form (diameter of 1.75 mm) by Torwell Technologies Co., Limited, Australia. The PLA filament was reported to have a tensile strength of 62 MPa, a flexural strength of 66 MPa, and a melt flow index of 6 g/10 min (190 °C/2.16 kg).

B. Experimental methods

1) Tensile specimen manufacturing for 3D-Printing

PC tensile dogbone specimens were computer-modeled according to the required geometry outlined in ASTM D638 and 3D-printed using a Colido 2.0 Plus Desktop 3D printer, Thailand. PETG and PLA tensile

dogbone specimens were computer-modeled according to the required geometry outlined in ASTM D638 and 3D-printed using a NTT Pro 3D printer, Thailand. All specimens were printed in a room-temperature environment at ambient-humidity conditions. The controlled printing parameters are tabulated in Table I.

TABLE I. PARAMETER FOR 3D-PRINTED SPECIMENS.

Parameters	Polymer filament		
	PC	PETG	PLA
Infill density (%)	100	100	100
Printing speed (mm/s)	30, 40, 50	30, 40, 50	30, 40, 50
Nozzle temperature (°C)	250	240	220
Bed temperature (°)	120	33	33
Layer thickness (mm)	0.2	0.2	0.2
Raster orientation (°)	±45°	±45°	±45°

2) Tensile specimen manufacturing for Injection molding

Prior to injection molding, the PC, PETG, and PLA filament was pelletized and dried in an air-circulating oven at 100, 110 and 60 °C for 24 hr., respectively. Injection molding was performed using a BA 250 CDC injection molding machine (Battenfeld Co., Ltd., Austria). The specimens with standard shapes were obtained by injection molding at 260, 260, and 230 °C and an injection pressure of 140, 140, and 110 Bar. The specimens were conditioned in a temperature and relative humidity were controlled at 23 °C ± 2 °C and 50% ± 10%, respectively.

C. Characterization

1) Differential Scanning Calorimetry (DSC)

The glass transition and the melting temperature of the polymers were analyzed in a heat-cool-reheat mode using a differential scanning calorimeter (DSC 1 Auto sample Robot, Mettler Toledo, USA). Approximately 7-10 mg samples were cut from the original filaments and 3D-printed specimen, then sealed in an aluminum pan. The heating rate was 5 °C/min over the range between 30 and 260 °C and the cooling rate was at 5 °C/min in nitrogen atmosphere.

2) Rotational Rheometer

Rheological properties were determined using a rotational rheometer (ARES-G2, TA Instruments, USA). The measurements were performed using a 25 mm diameter parallel plate geometry with a gap between the plates of 1 mm. Samples were cut from the PC, PETG, and PLA filaments. The testing was performed in a frequency sweeps in the range of 0.01-100 rad/s. The testing temperature of PC, PETG, and PLA filaments were set at 250, 240, and 220 °C with a strain of 50, 50, and 80%, respectively.

3) Scanning Electron Microscopy (SEM)

The morphologies of the tensile fractured surfaces of the 3D-printed specimens were observed and analyzed by a scanning electron microscope (Tabletop Microscopy TM3030, HITACHI Co., Ltd., Japan) at room temperature. The samples were coated with gold using a vacuum sputter coater. The samples were viewed perpendicular to the fractured surface.

4) Tensile Testing

Specimens of PC, PETG, and PLA injection and 3D-printing were tested for tensile strength, tensile modulus, and elongation at break according to ASTM D638 using a universal testing machine (5969, Instron Engineering Corporation, USA). The crosshead speed and load were set at 50 mm/min and 5 kN, respectively. Additionally, all the specimens were performed at room temperature (23 °C) and 50% relative humidity and the reported values were collected from at least five independent tests.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Thermal properties

Fig. 1a and 1b show the DSC thermograms of polymer filaments and 3D-printed specimens, respectively. Table II summarizes glass transition temperature (T_g), crystal melting temperature (T_m), enthalpy of fusion (ΔH_m), and the degree of crystallinity (X_c). It was seen that the thermal transitions of these polymers were not altered due to 3D-printing process. The PETG and PLA 3D-specimen showed the same T_g as those of the original filaments, while the PC 3D-specimen showed a slight decrease of T_g compared to the original filament. This indicated that the melting duration time in the nozzle of the 3D-printer did not cause thermal degradation of the polymer molecules. Both PLA specimens showed a double crystal melting peak, and the PLA filament had a 28% higher X_c than the 3D-printed specimen. This was attributed to the difference of PLA crystallization kinetics (thermal history) according to the work by Nofar *et al.* [6] Since the 3D-printed PLA specimen was cooled down differently from the commercial PLA filament, the heat-cool-reheat process in the DSC testing caused crystals to re-melt or unmelt and thus form the different X_c .

TABLE II. THERMAL PROPERTIES OF POLYMER FILAMENT AND 3D-PRINTED SPECIMENS.

Sample	T_g (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_{m1} (J/g)	ΔH_{m2} (J/g)	X_c (%)
PC (filament)	111.0	-	-	-	-	-
PC (3D)	108.1	-	-	-	-	-
PETG (filament)	79.3	-	-	-	-	-
PETG (3D)	79.5	-	-	-	-	-
PLA (filament)	60.9	160.6	167.9	30.4	23.5	57.9
PLA (3D)	60.8	160.8	168.0	15.5	22.9	41.3

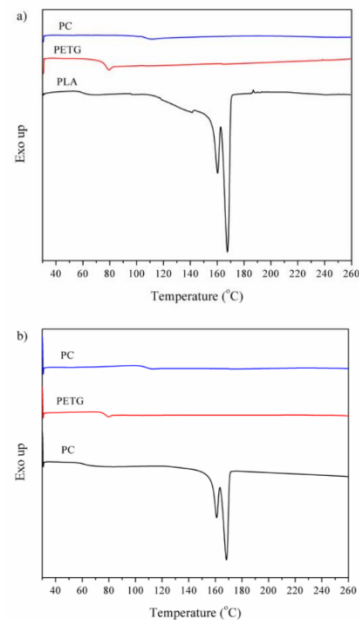


Fig. 1. DSC thermograms (2nd heating scan) of polymer filament (a), and polymer 3D-printed specimen (b).

B. Rheological properties

In order to investigate the printability of polymer filaments, their complex viscosities were studied via a rotational rheometer. Fig. 2 shows the complex viscosities of PC, PETG, and PLA tested at 250, 240, and 220 °C, respectively. These temperatures were similar to the optimized printing temperatures for these filaments. From the graphs, it was seen that PLA had the highest complex viscosity, followed by PETG and PC. The PC and PETG melts showed Newtonian behavior at the range of studied frequency. On the other hand, the PLA melt showed the Newtonian behavior at the frequency lower than 10 rad/s, afterwards the shear thinning behavior (non-Newtonian) was presented.

Fig. 3 shows that storage and loss modulus of PC, PETG, and PLA filaments tested at 250, 240, and 220 °C, respectively. It was seen that PLA had the highest storage and loss modulus at the optimized printing condition, followed by PETG and PC. Considering from these properties, it was clearly shown that the values of loss modulus were higher than that of storage modulus. In the other words, these viscous melts could flow and be stretched gradually under shear stress.

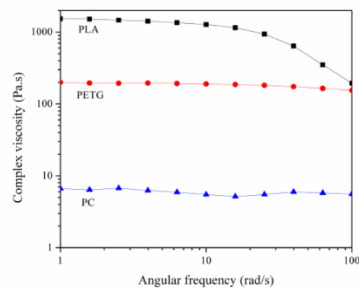


Fig. 2. Complex viscosities of PC (250°C), PETG (240°C), and PLA (220°C).

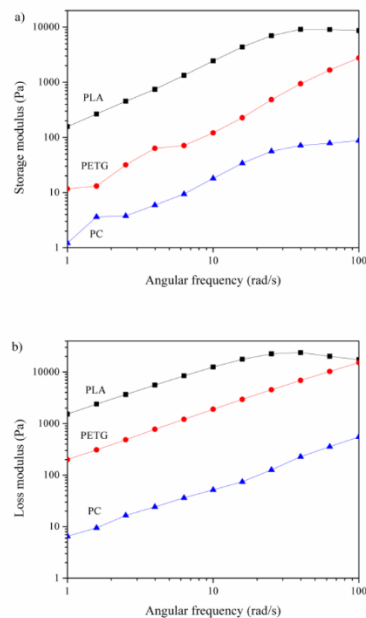


Fig. 3. Storage modulus (a) and loss modulus (b) of PC (250°C), PETG (240°C), and PLA (220°C).

The Fused Deposition Molding (FDM) is presently the most popular consumer-level 3D-printers for printing polymers, at which it is based on extrusion additive manufacturing systems. In this research, the FDM-based 3D-printer was the machine that was used to fabricate these polymer filaments into products. The diameter and

the length of nozzle was 0.40 mm and 0.80 mm, respectively. The printing speeds varied to be 30, 40, and 50 mm/s at a suitable printing temperature for each polymer, which gave the volumetric flow rate (Q) to be 3.77, 5.03, and 6.28 mm³/s, respectively. From the relationship between volumetric flow rate (Q) and shear rate ($\dot{\gamma}$) in a circular pipe can be described by $\dot{\gamma} = 4Q/\pi R^3$, thus the theoretical shear rate is about 600, 800, and 1000 s⁻¹, respectively. Considering the values of shear rate, the fabrication of PC, PETG, and PLA filaments using the 3D-printing technology by this machine was in the shear thinning region. Therefore, the higher printing speed was the lower complex viscosity of the polymer filaments would be. At a faster printing speed, the melt will be extruded from the nozzle easier with less elasticity.

C. Morphologies of the 3D-printed specimens

Fig. 4 shows SEM micrographs from the tensile fractured surface of the 3D-printed specimens of PC, PETG, and PLA, respectively. Compared to injection molded specimens, all 3D-printed specimens were broken in brittle behaviour. The orientation of the filament formed by the deposited layer by layer was clearly observed. In addition, the SEM micrographs revealed the presence of air-gaps or voids between the layers. This was similar to the work by Behzad Rankouhi *et al.*[7], which they fabricated 3D-printed ABS specimens and reported that the layer thickness of 0.2 mm had smaller air-gaps than the layer thickness of 0.4 mm. In this work, the optimized printing condition was thus set at the layer thickness of 0.2 mm. It could be noted that the PC specimens had the least numbers of air-gap. This was attributed to PC had quite low viscosity during the 3D-printing process, so that the melt could flow and fill into the air-gaps between layers. The localized ductility was observed on the PC fracture surface. The higher viscous PETG melts formed distorted layers which the faster printing speed resulted on fewer air-gaps due to flexibility of the elastic melt. These layers were broken in brittle behaviour. In contrast, the highest viscous PLA melts formed the clear layer thickness with consistent air-gaps between layers. The difference caused by the printing speeds on air-gaps was not clearly observed. However, localized ductility was evident by some fine fibrils attached between layers.

D. Tensile properties

Fig. 5a, 5b, and 5c show the typical engineering stress-strain curves of PC, PETG, and PLA, respectively. The stress-strain curves can be divided into several regions, such as elastic deformation region, yield point, necking region, cold drawing region, and fracture point. From Fig. 5a, it can be seen that the PC injection molded specimen exhibited the cold drawing, but its 3D-printed specimens only exhibited the necking. From Fig. 5b, the PETG injection molded specimen exhibited the cold drawing and failed in ductile behavior, however, its 3D-printed specimens failed in brittle behavior. For PLA, the stress-strain curve in Fig. 5c of the injection molded specimens had resembled that of specimens fabricated by the 3D-printing technique.

Fig.6 presents tensile strength, tensile modulus, and elongation at break of the specimens fabricated by injection molding and 3D-printing. It is seen that tensile strength and elongation at break of PC injection molded specimens were resembled that of specimens fabricated by 3D-printing. On the other hand, the tensile modulus of the PC 3D-printed specimen was significantly lower than the injection molded specimens. This was correlated to the

SEM micrographs of the PC 3D-printed specimens that the layer by layer orientation had the least air-gaps with good binding between layers. This kind of orientation required much lower stress to deform than the solid body obtained from the injection molding. However, good bonding between layers needed the stress to break the polymer matrix in similar level.

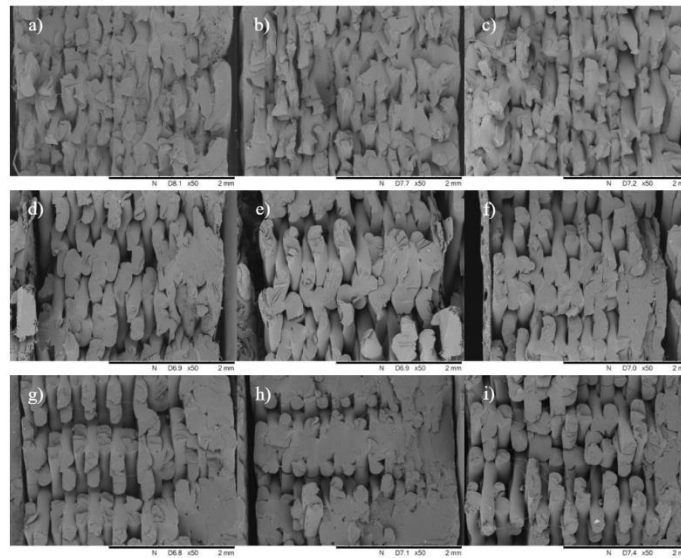


Fig. 4. SEM micrographs show the cross-sectional fractured surface of the 3D-printed specimens of PC at the printing speed of 30 mm/s (a), 40 mm/s (b), and 50 mm/s (c); of PETG at the printing speed of 30 mm/s (d), 40 mm/s (e), and 50 mm/s (f); and of PLA at the printing speed of 30 mm/s (g), 40 mm/s (h), and 50 mm/s (i).

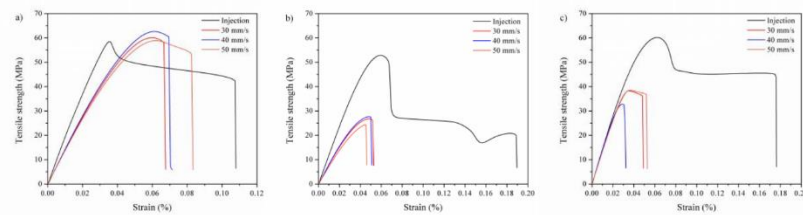


Fig. 5. Typical engineering stress-strain curves of samples. a) PC, b) PETG, and c) PLA

On the other hand, the 3D-printed specimens of PETG had a significant reduction of tensile modulus (-38%), tensile strength (-48%), and elongation at break (-77%). This resulted directly from there were air-gaps between layers.[8] Typically, PETG is an engineering thermoplastics with high tensile strength and fair

toughness. These voids inside the 3D-printer specimens became the stress concentrators to initiate crack and then brittle failure. Fig. 6c shows that the 3D-printed specimens of PLA also had a reduction of tensile strength (-36%) and elongation at break (-73%). Whereas the tensile modulus of PLA injection molded specimens had resembled that of

fabricated by 3D-printing. This resulted from the PLA layers in the 3D-printed specimens was almost similar to the filaments themselves since the melt was so viscous to be extruded and form layers with the least distortion of the filaments. However, the high air-gaps inside the specimen

caused them to initiate crack and failed faster than the solid body of the injection molded specimens. It should be noted that these tensile properties did not affect by the printing speeds. This was in agreement with the work by Ala'aldin Alafaghania *et al.* [9].

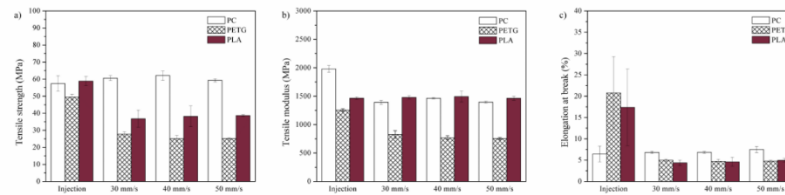


Fig. 6. Tensile strength (a), tensile modulus (b), and elongation at break (c) of the injection molded specimens and the 3D-printed specimens from PC, PETG, and PLA.

IV. CONCLUSION

In this work, the drawing of dog-bone specimens was generated and then used to fabricate the 3D-printed specimens in a FDM-based 3D-printer with the optimized printing condition. Thermal properties of polymer filaments was studied via DSC and found that the PETG and PLA 3D-printed specimens presented the glass transition temperature similar to the original filaments. This indicated the melting duration time in the nozzle of the 3D-printer did not cause thermal degradation. However, the PLA filament had the higher degree of crystallinity than the 3D-printed specimen. Due to rheological properties tests, the complex viscosities of the PC and PETG filaments presented the Newtonian behavior at the range of studied frequency. On the other hand, the PLA filament presented the Newtonian behavior at the frequency lower than 10 rad/s, afterwards the shear thinning behavior (non-Newtonian) was presented. The calculated shear rate of the varied printing speeds were in the shear thinning region of these polymers. From tensile test results, it was found that the printing speeds (30, 40, and 50 mm/s) showed no effect on tensile properties. Based on SEM micrographs, tensile properties depended on the presence of air-gaps in the 3D-printed specimens. In overall, the 3D-printed specimens having layer-by-layer structure had lower tensile properties than the solid-body specimens made by injection molding. Finally, the 3D-printed specimens by PC filaments had the most resembled tensile properties to the injection molded specimens due to having the least air-gaps.

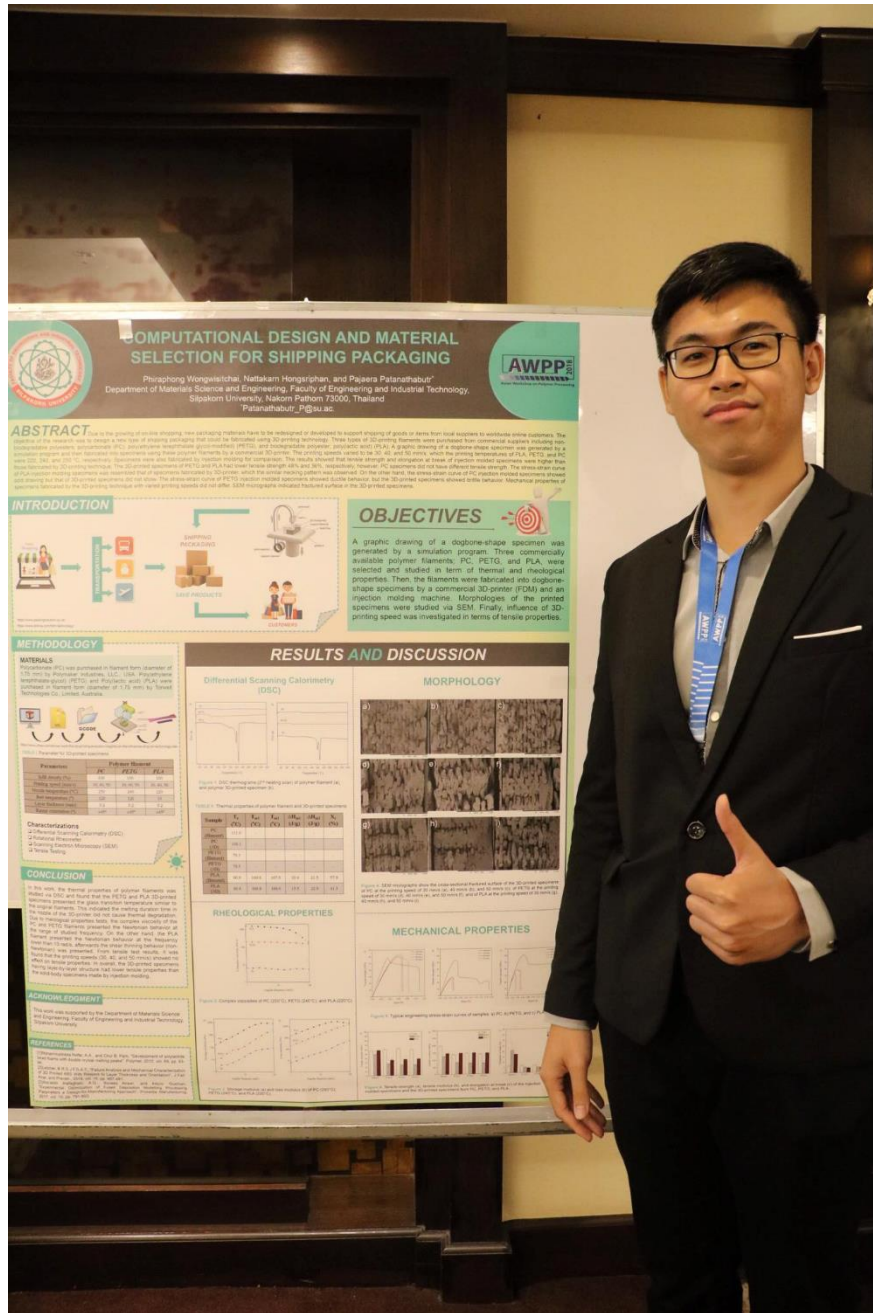
ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

1. J. Wang, L. Wang, R. Wang, Y. Zheng, and L. Wu, "Anti-gravitational 3D printing of polycaprolactone-bonded Nd-Fe-B based on fused deposition modeling".

- Journal of Alloys and Compounds, 2017. vol. 715, pp. 146-153.
2. J.R. Cortez Dizona, Q. Chen, and R. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers". Additive Manufacturing, 2018. vol. 20, pp. 44-67.
3. K.G. Mostafa, and A.J. Qureshi, "Strength to cost ratio analysis of FDM Nylon 12 3D Printed Parts". Procedia Manufacturing, 2018. vol. 26, pp. 753-762.
4. O.S. Es-Said, R. Noorani, M. Mendelson, and R. Marloth, "Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples". Materials and Manufacturing Processes, 2007. vol. 15, pp. 107-122.
5. B. Tymrak, M.A. Kreiger and J.M. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions". Materials & Design, 2014. vol. 58, pp. 242-246.
6. M. Nofar, A. Ameli and C.B. Park, "Development of polylactide bead foams with double crystal melting peaks". Polymer, 2015. vol. 69, pp. 83-94.
7. B. Rankouhi and T. Letcher, "Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation". J Fail. Anal. and Preven., 2016. vol. 16, pp. 467-481.
8. D.P. Schmitza and S. Dul, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of ABS carbon-based composites manufactured via fused deposition modelling". Materials Today Communications, 2018. vol. 15, pp. 70-80.
9. A. Alafaghani, B. Alrawi, and A. Guzman, "Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters a Design-for-Manufacturing Approach". Procedia Manufacturing, 2017. vol. 10, pp. 791-803.



รายการอ้างอิง

1. ณีภูวนิช ตัณมานะศิริ [อินเทอร์เน็ต]. *3D Printing : เทคโนโลยีแห่งโอกาส*. [cited 15 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.tcdc.or.th/creativethailand/article/Insight/20010>.
2. DBale. [อินเทอร์เน็ต]. หลักการออกแบบบรรจุภัณฑ์. [cited 15 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.dbale.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538899940>.
3. ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนพานนท์ [อินเทอร์เน็ต]. วัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์. [cited 16 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1788/packaging-material>.
4. เอทีซี [อินเทอร์เน็ต]. วิชาบรรจุภัณฑ์ในงานโลจิสติกส์. [cited 17 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.atc.ac.th/Thaiatc/C.pdf>.
5. Chang and Kuang-Hua, *Project S5 - Design with SolidWorks*, in *Design Theory and Methods Using CAD/CAE*. 2015, Academic Press: Boston. p. 407-447.
6. Sandeep Rathee, Manu Srivastava and et al., *Effect of varying spatial orientations on build time requirements for FDM process: A case study*. Defence Technology, 2017, 13: p. 92-100.
7. Youtube. [Internet]. *SolidWorks Tutorial #181: Cola Bottle*. [cited 2017 Jul 24]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=Gnuq0ssOsM0>.
8. Youtube. [Internet]. *Tutorial SolidWorks: How to Model a Box*. [cited 2017 Jul 24]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=BdiOfRORTXY>.
9. Phyblas. [อินเทอร์เน็ต]. *maya python* เบื้องต้น บทที่ ๑: บทนำ. [cited 24 กรกฎาคม 2560]; Available from: <https://phyblas.hinaboshi.com/maso01>.
10. Youtube. [Internet]. *Autodesk MAYA 2014 - Complete Soda Can Modeling*. [cited 2017 Jul 24]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=EY4-JmuczXM&t=491s>.
11. Youtube. [Internet]. *Autodesk MAYa 2013 - Potato Chips Bag Modeling-Texturing*. [cited 2017 Jul 24]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=M0VEEgoYWNQ>.

12. Thaiware. [Internet]. *Blender* ออกแบบ 3D. [cited 25 กรกฎาคม 2560]; Available from: <https://software.thaiware.com/10101-Blender-Animation-Download.html>.
13. Youtube. [Internet]. *Blender Tutorial Making a Coke Can - UV Mapping and Multiple Material Slots Part 1 (Old Version)*. [cited 2017 Jul 25]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=n6t3tehdsHU>.
14. ผศ.ประจวบ เพิ่มสุวรรณ และ พัฒน์ พิสิษฐเกษม [อินเทอร์เน็ต]. จะจัดการบรรจุภัณฑ์โลจิสติกส์อย่างไรให้มีประสิทธิภาพ . [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKFwjZ7NidvpPVAhVJtI8KHVUaC_oOFggsMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.bu.ac.th%2Fknowledgecenter%2Fexecutive_journal%2Fjan_mar_12%2Fpdf%2Faw018.pdf&usq=AFOjCNG6X_e3XvO4e1iJCnVsyr-XCG1TWg.
15. KPN Packaging. [อินเทอร์เน็ต]. *RSC (Regular Slotted Container)*. [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: http://www.kpnpacking.com/html_th/product_cardboardrsc.html.
16. KPN Packaging.[อินเทอร์เน็ต]. *FOL (Full Overlap Container)*. [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: http://www.kpnpacking.com/html_th/product_cardboardfol.html.
17. KPN Packaging. [อินเทอร์เน็ต]. *HSC (Half Slotted Container with Cover)*. [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: http://www.kpnpacking.com/html_th/product_cardboardhsc.html.
18. United Container. [อินเทอร์เน็ต]. *PTHS (Half Slotted Box with Half Slotted Partial Cover)*. [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.uccbox.com>.
19. United Container. [อินเทอร์เน็ต]. ประเภทของกล่องลูกฟูก. [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.uccbox.com>.
20. United Container. [อินเทอร์เน็ต]. *FPF (Five Panel Foder)*. [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.uccbox.com>.
21. SCG Packaging.[อินเทอร์เน็ต]. *Logistic Packaging*. [cited 20 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.scgpackaging.com/industrial-packaging/paper-packaging/4/TH>.
22. BIGBOX OF RAZORS. [Internet]. *100 BOX OF BLUE RAZORS*. [cited 2017 Jul 20]; Available from: <https://www.bigboxofrazors.com/products/100-box-of-razors>.

23. วิกีพีเดีย. [อินเทอร์เน็ต]. กระสอบ. [cited 20 กรกฎาคม 2560]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A%E0%B8%AD%E0%B8%9A>.
24. ขจรพงศ์. [อินเทอร์เน็ต]. ถุงจัมโบ้. [cited 20 กรกฎาคม 2560]; Available from: http://www.puiya.com/index.php?lay=boardshow&ac=webboard_show&WBntype=1&No=1553605.
25. ฟ้าไทยบรรจุภัณฑ์. [อินเทอร์เน็ต]. กระสอบกราเวียร์. [cited 20 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.ft2555.com>.
26. SCG Packaging. [อินเทอร์เน็ต]. *Corrugated Containers*. [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.scgpackaging.com/industrial-packaging/paper-packaging/1/TH>.
27. United Container. [อินเทอร์เน็ต]. ถาด *Tray*. [cited 20 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.uccbox.com>.
28. Eggs4U.NET. [อินเทอร์เน็ต]. ไข่ไก่. [cited 20 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.eggs4u.net/?name=product&file=readproduct&id=23>.
29. ดร.อมรรัตน์ สวัสดิ์ทิต. [อินเทอร์เน็ต]. การใช้งานไม้เพื่อการหีบห่อ. [cited 20 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.108wood.com/index.php?lay=show&ac=article&id=578752&Ntype=6>.
30. NP Packing. [อินเทอร์เน็ต]. ลังไม้หีบ. [cited 20 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.nppacking.com/>.
31. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร [อินเทอร์เน็ต]. การพัฒนาโครงสร้างบรรจุภัณฑ์ ตอนที่ 5 (วัสดุกันกระแทก และ การปิดกล่อง). [cited 16 กรกฎาคม 2560]; Available from: http://www.foodnetworksolution.com/news_and_articles/article.
32. [Internet] Y. *Air cushion machine - AirBoy micro MiniAir TUTORIAL ENGLISH*. [cited 2017 Jul 23]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=yD4uVbRS1C8>.
33. Youtube. [Internet]. *Mini Air -Void fillers & Air Bubble, Cushion for protective packaging*. [cited 2017 Jul 23]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=8RwfGUUd7fU>.
34. Youtube. [Internet]. *UNIQBAG airbag packaging*. [cited 2017 Jul 23]; Available

- from: <https://www.youtube.com/watch?v=xq1-1Mipn10>.
35. สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง [อินเทอร์เน็ต]. วัสดุกันกระแทก. [cited 17 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.pack1900.com/index.php?lay=show&ac=article&id=538811996>.
 36. Reddit [Internet]. *Packing Peanut : the Forbidden Cheeto*. [cited; Available from: https://www.reddit.com/r/forbiddensnacks/comments/7oumn8/packing_peanut_the_forbidden_cheeto/.
 37. Blog T.R.s. *Styrofoam packing pellets*. [cited 2019 May 20]; Available from: https://tomroush.net/2015/11/13/grad-school-paper-cutters-and-styrofoam-packing-peanuts/img_7811/.
 38. Indiamart. *Thermocol Beans*. [cited 2019 May 20]; Available from: <https://dir.indiamart.com/impcat/thermocol-beans.html>.
 39. Inhabitat [Internet]. *Packaging the Future : Fluffy Natural Packaging*. [cited 2019 May 20]; Available from: <https://inhabitat.com/packaging-the-future-fluffy-natural-packaging/?fbclid=IwAR3svOrXIAFjNOG3L2M9iWiaa39-vBg8u5SRS2qPLBZTMDm59A3xDrqFGqO>.
 40. กิติรดา หงษ์รัมย์ และ ชมพร แววโนรี [อินเทอร์เน็ต]. เทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์สามมิติ. [cited 18 กรกฎาคม 2560]; Available from: <https://sites.google.com/a/bumail.net/3dprintingdimension/thekhnoloyi-khxng-kheruxngphimph-sam-miti>.
 41. วิชาการ.คอม [อินเทอร์เน็ต]. เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ *3D printing*. [cited 18 กรกฎาคม 2560]; Available from: <http://www.vcharkarn.com/varticle/57825>.
 42. Rupinder Singh, Piyush Bedi and et al., *Effect of single particle size, double particle size and triple particle size Al₂O₃ in Nylon-6 matrix on mechanical properties of feed stock filament for FDM*. Composites Part B: Engineering, 2016, 106: p. 20-27.
 43. Xuemin Cui, Shixi Ouyang and et al., *A study on green tapes for LOM with water-based tape casting processing*. Materials Letters, 2003, 57: p. 1300-1304.
 44. Thierry Chartiera C.D., Pierre-Marie Geffroy, Vincent Pateloup, Maggy Colas, Julie Cornette, Sophie Guillemet-Fritsch, *Influence of irradiation parameters on the polymerization of ceramic reactive suspensions for stereolithography*. Journal

- of the European Ceramic Society, 2017.
45. Marion Dehurtevent, Lieven Robberecht and et al., *Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing*. Dental Materials, 2017, 33: p. 477-485.
 46. Shangqin Yuan, Fei Shen and et al., *3D soft auxetic lattice structures fabricated by selective laser sintering: TPU powder evaluation and process optimization*. Materials & Design, 2017, 120: p. 317-327.
 47. Xu Yi, Zhou-Jian Tan and et al., *Three dimensional printing of carbon/carbon composites by selective laser sintering*. Carbon, 2016, 96: p. 603-607.
 48. X3D : Innovative 3D Printing Solutions. [อินเทอร์เน็ต]. *3D Printing แบบ FDM คืออะไร*. [cited 19 กรกฎาคม 2560]; Available from: <https://x3dtechnology.com/blogs/3d-printing-101/fdm-3d-printing>.
 49. Omar Ahmed Mohamed, Syed Hasan Masood and et al., *Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design*. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40: p. 10052-10073.
 50. MatterHackers. [Internet]. *Standard Filament*. [cited 2017 Jul 20]; Available from: <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>.
 51. Elvin Karana, Paul Hekkert and et al., *Material considerations in product design: A survey on crucial material aspects used by product designers*. Materials & Design, 2008, 29: p. 1081-1089.
 52. Haruo Sasaki, Kaku Saito and et al., *Development of an Air Cushioning Material Based on a Novel Idea*. Packaging Technology and Science, 1999, 12: p. 143-150.
 53. Dong-Mei Wang and Z.-W. Wang, *Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard*. Packaging Technology and Science, 2007, 21: p. 309-316.
 54. Pankaj B. Pathare and U.L. Opara, *Structural design of corrugated boxes for horticultural produce: A review*. Biosystems Engineering, 2014, 125: p. 128-140.
 55. S. Paul Singh, Gary Burgess and et al., *Measurement and analysis of the second-day air small and light-weight package shipping environment within Federal*

- Express. Packaging Technology and Science*, 2004, 17: p. 119-127.
56. Jian-Yuan Lee, Jia An and et al., *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*. *Applied Materials Today*, 2017, 7: p. 120-133.
 57. L.M. Galantucci, F. Lavecchia and et al., *Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2008, 57: p. 243-246.
 58. Gui Kun and W. Xi, *Design and Analysis of Cushioning Packaging for Home Appliances*. *Procedia Engineering*, 2017, 174: p. 904-909.
 59. O. S. Es-Said, J. Foyos and et al., *Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples*. *Materials and Manufacturing Processes*, 2000, 15: p. 107-122.
 60. Behzad Rankouhi, Sina Javadpour and et al., *Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation*. *J Fail. Anal. and Preven.*, 2016, 16: p. 467-481.
 61. K. G. Jaya Christiyani, U. Chandrasekhar and et al., *Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer*. *J. Inst. Eng. India Ser. C*, 2016.
 62. Kurniawan Yuniarto, Yohanes Aris Purwanto and et al., *Infrared and Raman studies on polylactide acid and polyethylene glycol-400 blend*. *The 3rd International Conference on Advanced Materials Science and Technology (ICAMST 2015)*, 2016.
 63. Gustavo Domínguez-Rodríguez, J. J. Ku-Herrera and et al., *An assessment of the effect of printing orientation, density, and filler pattern on the compressive performance of 3D printed ABS structures by fuse deposition*. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017.
 64. Piotr Rytlewski, Krzysztof Moraczewski and et al., *Effects of Coffee on the Stability of Accelerated Aged Poly(acrylonitrile-butadiene-styrene)*. *J. APPL. POLYM. SCI.*, 2014.
 65. J.P. Cosas Fernandes, L.D.C. Castro and et al., *New insights on the compatibilization of PA6/ABS blends: A co-localized AFM-Raman study*. *Polymer*, 2018, 146: p. 151e160.

66. Mohammadreza Nofar, Aboutaleb Ameli and et al., *Development of polylactide bead foams with double crystal melting peaks*. *Polymer*, 2015, 69: p. 83-94.
67. Achim Frick and A. Rochman, *Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC)*. *Polymer Testing*, 2004, 23: p. 413-417.
68. Tyler Sonsalla, Arden L. Moore and et al., *3-D printer settings effects on the thermal conductivity of acrylonitrile butadiene styrene (ABS)*. *Polymer Testing*, 2018, 70: p. 389-395.
69. Minghui Li, Yizao Wan and et al., *Preparation and properties of polyamide 6 thermal conductive composites reinforced with fibers*. *Materials and Design*, 2013, 51: p. 257-261.
70. Can Yang, Xiao-Hong Yin and et al., *Simulation study on flow dependent thermal conductivity of PC/MWCNTs nanocomposites considering interface topography*. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: p. 1207-1218.
71. S.M. Lebedev, O.S. Gefle and et al., *Poly(lactic acid)-based polymer composites with high electric and thermal conductivity and their characterization*. *Polymer Testing*, 2017, 58: p. 241-248.
72. Hitoshi Takagi , Shuhei Kako and et al., *Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites*. *Advanced Composite Materials*, 2007, 16: p. 377-384.
73. Dawon Jang, Dong Su Lee and et al., *Opto-thermal technique for measuring thermal conductivity of polyacrylonitrile based carbon fibers*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 78: p. 137-142.
74. Kanotha Kamau-Devers, Zachary Kortum and et al., *Hydrothermal aging of bio-based poly(lactic acid) (PLA) wood polymer composites: Studies on sorption behavior, morphology, and heat conductance*. *Construction and Building Materials*, 2019, 214: p. 290-302.
75. Junchao Liu, Weiwei Li and et al., *Improved thermal conductivity of thermoplastic polyurethane via aligned boron nitride platelets assisted by 3D printing*. *Composites Part A*, 2019, 120: p. 140-146.
76. Inc Y.A. *Biodegradable Plastics and Composites*. [cited 2019 May 20]; Available from: http://www.ytca.com/biodegradable_plastics_and_composites.
77. Kotiba Hamad, Mosab Kaseem and et al., *Melt Rheology of Poly(Lactic*

- Acid/Low Density Polyethylene Polymer Blends*. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2011, 1: p. 208-214.
78. Sung-Hoon Ahn, Michael Montero and et al., *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. *Rapid Prototyping*, 2002, 4: p. 248-257.
79. Marco Leite, André Varanda and et al., *Mechanical properties and water absorption of surface modified ABS 3D printed by fused deposition modelling*. *Rapid Prototyping Journal*, 2017.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย พีระพงษ์ วงศ์วิศิษฐ์ชัย
วัน เดือน ปี เกิด	21 ตุลาคม 2536
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสัจดีพิทยาคม จังหวัดชลบุรี พ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมี และวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2559 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
ที่อยู่ปัจจุบัน	27 หมู่ 10 ตำบลห้วยใหญ่ อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี 20150 E-mail : Wongwisitchai_p@su.ac.th
ผลงานตีพิมพ์	Phiraphong Wongwisitchai, Nattakarn Hongsrphan, and Pajaera Patanathabutr, "Effect of Printing Speed on Thermal and Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples for Shipping Packaging", Asian Workshop on Polymer Processing (AWPP2018), December 10-13, 2018, Chiang Mai, Thailand.