วัสดุชีวการแพทย์เพื่อใช้ในงานทางทันตกรรม

โดย

นายณฐวัฒน์ กาญจนวลีกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

วัสดุชีวการแพทย์เพื่อใช้ในงานทางทันตกรรม

โดย
นายณฐวัฒน์ กาญจนวลีกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

BIOMATERIAL FOR DENTISTRY APPLICATIONS

By

MR. Nathawat KANCHANAWALEEKUN

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	วัสดุชีวการแพทย์เพื่อใช้ในงานทางทันตกรรม
โดย	ณฐวัฒน์ กาญจนวลีกุล
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เฆษะปะบุตร)

....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(รองศาสตราจารย์มาณพ ปานะโปย)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

59402203 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ, วัสคุครอบฟันชั่วคราว, พอลิแลคติกแอซิด

นาย ณฐวัฒน์ กาญจนวลีกุล: วัสดุชีวการแพทย์เพื่อใช้ในงานทางทันตกรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาวัสดุทดแทนทางทันตกรรมสำหรับใช้เป็นวัสดุครอบฟันชั่วคราวทำจากพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติและสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ภาพ 3 มิติ (3D printing) ทำการศึกษาโดยนำพอลิแลคติกแอซิดเสริมแรงด้วยผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเรน APS เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและให้มีลักษณะพื้นผิวที่ใกล้เคียงกับฟันจริงและนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกายภาพ ทำการผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวหนอนคู่ (Co-rotating Twin screw extruder) และนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก(Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในส่วนของปริมาณผลึก(X_c) มีค่ามากกว่าของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด จากการศึกษาสมบัติรีออลอยีพบว่าวัสดุทุกสูตรแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning แสดงว่าวัสดุสามารถขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติได้ เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลโดยรวม ได้แก่ มอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural modulus) ความต้านทานต่อแรงกด (Compressive modulus) พบว่าพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และลักษณะทางโครงสร้างสัณฐานวิทยาชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณ 5-15% เกิดขึ้นได้ดี แต่ที่ปริมาณ 20% เกิดการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์ส่งผลให้สมบัติเชิงกลทั้งหมดลดลง

59402203 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)
Keyword : 3d-printing technology, polylactic acid, temporary dental crowns

MR. NATHAWAT KANCHANAWALEEKUN : BIOMATERIAL FOR DENTISTRY APPLICATIONS THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR PAJEARA PATANATABUTR, Ph.D.

This research is a study of alternative materials for temporary dental crowns made from biodegradable polymer, which are molded using 3D printing. Polylactic acid was reinforced with aluminum oxide powder treated surface by APS-silane to improve mechanical and surface properties. Thermal , mechanical , and physical properties of the PLA composites were investigated. The PLA composites were obtained by mixing polylactic acid with 5, 10, 15 and 20% by weight of aluminum oxide powder using a co-rotating twin-screw extruder. The PLA composites were printed using 3D printing and compared to injected specimens molded by injection molding. The DSC results indicated that glass transition temperature (T_g) and melting temperature (T_m) of the composites obtained from 3D printing were similar to injection molding. However, the crystallinity (X_c) of 3D printed specimens was higher than that of the injection molded specimens. Rheological study revealed that all aluminum oxide/PLA composites showed shear-thinning flow behavior, indicating that the composites could be molded using 3D printing technology. Considering the overall mechanical properties such as tensile modulus, flexural modulus, and compressive modulus, the PLA composite with 15% by weight of aluminum oxide showed the best mechanical properties. In addition, morphological structure of the PLA composites showed good distribution of aluminum oxide powder at 5-15% by weight, but aggregation occurred at 20% by weight of aluminum oxide powder which related to the poorer mechanical properties.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร และรองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ในการสละเวลาให้คำปรึกษาและคอยชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัยตลอดจนอบรมสั่งสอน และช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นขณะทำงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เฒษะปะบุตร รองศาสตราจารย์มาณพ ปานะโปย และศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช ที่สละเวลามาเป็นประธานและคณะกรรมในการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ตลอดจนให้คำแนะนำในการนำไปปรับและแก้ไขงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ผ่านลุล่วงไปได้ และขอพระขอบคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา ที่คอยอำนวยความสะดวกในด้านการจัดหาอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยและสารเคมีที่ใช้ดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและซ่อมแซมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ ที่คอยส่งเสียเลี้ยงดู และให้กำลังใจในการทำงานวิจัย ตลอดจนการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้ผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

ณฐวัฒน์ กาญจนวลีกุล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ
กิตติกรรมประกาศ .... ฉ
สารบัญ .... ช
สารบัญตาราง .... ฏ
สารบัญรูป .... ฑ
สารบัญอักษรย่อ .... ต
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 แนวคิดและสมมุติฐานของงานวิจัย 2
1.4 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย 2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป 3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
2.1 วัสดุชีวการแพทย์ที่ใช้ในงานทันตกรรม 7
2.1.1 วัสดุพอลิเมอร์ 7
2.1.2 วัสดุเซรามิก 8
2.1.3 โลหะผสม 11
2.2 ทันตกรรมและกระบวนการครอบฟัน 20
2.2.1 ทันตกรรม 20

มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.2.2 ประเภทของการครอบฟัน 21
2.2.3 กระบวนการครอบฟัน 23
2.2.4 น้ำลายของมนุษย์ 26
2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 31
2.3.1 ความสำคัญของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 31
2.3.2 วัสดุที่นิยมใช้ในเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 35
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 43
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 43
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน 44
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 44
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย 45
3.4.1 การผสม การขึ้นรูปและการพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ และการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR 45
3.4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก 47
3.4.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 50
3.4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์หลังผ่านการจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 54

4.1 การผสมและการขึ้นรูปของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ 55

4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงอลูมิเนียมออกไซด์หลังผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APS ด้วยเทคนิค FTIR 55

4.1.2 ผลการทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt flow indexer) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ 56

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ของชิ้นงานพอลิ แลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก 58

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC) 58

4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยเครื่อง Rotational rheometer 60

4.2.3 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) 62

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติการดึงยืด (Tensile testing) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 65

4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural testing) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 69

4.2.6 ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 72

4.2.7 ผลการศึกษาความแข็งบนพื้นผิวด้วยเทคนิค Shore hardness test ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 74

4.2.8 ผลการศึกษาสมบัติความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 75

4.2.9 ผลการศึกษาพื้นผิวรอยแตกหักของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) 77

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 79

4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC) 79

4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ... 82

4.3.3 ผลการทดสอบหารูพรุนทั้งหมด (Total porosity) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 84

4.3.4 ผลการศึกษาความแข็งบนพื้นผิว (Shore hardness test) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 87

4.3.5 ผลการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) 89

4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังผ่านการจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 91

4.4.1 ผลการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) 91

4.4.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฉดสี (Color test) 95

4.4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 99

4.3.4 ผลการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) 102

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 105

5.1 สรุปผลวิจัย 105

5.2 ข้อเสนอแนะ 107

ภาคผนวก 107

ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดลองต่างๆ 108

ภาคผนวก ข การนำเสนอผลงานวิจัย 153

รายการอ้างอิง 161

ประวัติผู้เขียน 168

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แสดงอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3)........................3

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทั่วไปของเซรามิกในทางทันตกรรม [12] 10

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงเฉดสีพอลิเมทิลเมทาคริเลท (PMMA) ที่มีการปรับภาพพื้นผิวด้วยสารไซเลน [17].. 13

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมของสารเคมีที่นำมาผสมเป็นน้ำลายเทียมตามสูตรของ SAGF medium(AS-1) และ Carter-Brugirard Saliva(AS-2) [31] 29

ตารางที่ 2.4 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งที่พื้นผิวของสารเคลือบฟัน 30

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลพอลิแลคติกแอซิด(PLA)และวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยเทอร์โมพลาสติก(CCFR-PLA)... 38

ตารางที่ 2.6 สมบัติการดึงยืดของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบชนิดต่างๆ 40

ตารางที่ 2.7 สมบัติการดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดวัสดุเสริมองค์ประกอบชนิดต่างๆ.....................40

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนที่ใช้ในงานวิจัย...45

ตารางที่ 3.2 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องพิมพ์ 3 มิติ 46

ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมของสารเคมีในน้ำลายเทียมที่ใช้ในงานวิจัย [31].....................................52

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งแรกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก.. 59

ตารางที่ 4.2 ค่าความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 75

ตารางที่ 4.3 ค่าความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 76

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งแรกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 80

ตารางที่ 4.5 ปริมาณผลึกที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จากการให้ความร้อนครั้งแรก(1st heating scan) 81

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หลังการทดสอบการดูดซึมน้ำ(Water absorption) เป็นระยะเวลา 30 วัน 93

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หลังการทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) เป็นระยะเวลา 30 วัน 94

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีหลังทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก 95

ตารางที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีหลังทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 97

ตารางที่ 4.10 ค่ามอดูลัสต่อการกดอัด(Compressive modulus) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบ(Non-test) ชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) และชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) 99

ตารางที่ 4.11 ค่ามอดูลัสต่อการกดอัด(Compressive modulus) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบ(Non-test) ชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) และชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) 100

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ PMMA [8] 7

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด [9] 8

รูปที่ 2.3 รากฟันเทียมที่ทำจากโลหะไทเทเนียม [16] 11

รูปที่ 2.4 Vickers hardness ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทันตกรรม (DRCs) ที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณต่างๆ [18] 13

รูปที่ 2.5 Flexural modulus ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทันตกรรม (DRCs) ที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณต่างๆ[18] 14

รูปที่ 2.6 Flexural strength ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทันตกรรม (DRCs) ที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณต่างๆ [18] 14

รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนเฟสของ gibbsite $Al(OH)_3$ ไปเป็น alpha-$A1_2O_3$ [19] 16

รูปที่ 2.8 Tensile strength ของพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ (a) 550 °C และ (b) 850 °C [20] 16

รูปที่ 2.9 Hardness shore D ของพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ (a) 550 °C (b) และ 850 °C [20] 17

รูปที่ 2.10 Flexural strength ของพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ (a) 550 °C และ(b) 850 °C [20] 18

รูปที่ 2.11 Hardness Shore A ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทั้ง 4 กลุ่ม [21] 19

รูปที่ 2.12 Young’s modulus (MPa) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทั้ง 4 กลุ่ม [21] 19

รูปที่ 2.13 การครอบฟันแบบใช้โลหะล้วน [23] 21

รูปที่ 2.14 การครอบฟันแบบเรซินและเซรามิก [24] 22

รูปที่ 2.15 การครอบฟันแบบใช้วัสดุเซรามิกผสมโลหะ [25] 22

รูปที่ 2.16 กระบวนการครอบฟัน [27] 25

รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการสวมใส่ฟันเทียมบนรากฟันปลอม [27] 26

รูปที่ 2.18 ต่อมน้ำลายและส่วนประกอบของต่อมน้ำลาย [28] 27

รูปที่ 2.19 ผล DSC ของ PLA (a) DSC thermogram ของการให้ความครั้งที่ 1 2 และ 3 (b) แสดงค่า Tg, Tc, T_{m1}, T_{m2} ของกราฟ PLA [30]........ 28

รูปที่ 2.20 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Stereo lithography (SLA) [33]........ 31

รูปที่ 2.21 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) [33] 32

รูปที่ 2.22 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ 3D jet printer systems [33]........ 32

รูปที่ 2.23 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Selective Laser Sintering (SLS) [33]........ 33

รูปที่ 2.24 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Powder bed fusion (PBF) [35]........ 33

รูปที่ 2.25 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Direct energy deposition (DED) [35] 34

รูปที่ 2.26 โครงสร้างรูพรุนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ[38] 36

รูปที่ 2.27 ระบบ Integrated tissue–organ printer (ITOP) [38]........ 37

รูปที่ 2.28 โครงสร้าง Scaffold ของ PLA ที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติ [37]........ 38

รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบพฤติกรรมความหนืดเส้นใยของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ A1(50%) A2(57%) และ PLA [40] 39

รูปที่ 2.30 ความหยาบของพื้นผิวขนานกับทิศทางของการพิมพ์ 3 มิติ[12]........ 40

รูปที่ 2.31 ความหยาบของพื้นผิวที่ตั้งฉากกับทิศทางของการพิมพ์ 3 มิติ[12]........ 41

รูปที่ 2.32 ปริมาณรูพรุนวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิด พอลิคาโปรแลคโตนและไฮดรอกซี อะพาไทต์(PLA/PCL/HA) [42]........ 42

รูปที่ 2.33 ค่า Compressive Modulus ของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิด พอลิคาโปรแลคโตนและไฮดรอกซีอะพาไทต์(PLA/PCL/HA) [42] 42

รูปที่ 4.1 IR Spectrum ของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว(Untreated Al_2O_3) และผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (APS treated Al_2O_3)........ 55

รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบดัชนีการไหล(MFI) ของวัสดุที่ขึ้นรูปจากกระบวนการอัดรีดพลาสติก 56

รูปที่ 4.3 DSC Thermogram ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก 58

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) กับความถี่ ที่อุณหภูมิทดสอบ 180 °C ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 60

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Loss modulus กับอุณหภูมิ ความถี่ในการทดสอบ 1 เฮิรตซ์ ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 62

รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิ ความถี่ในการทดสอบ 1 เฮิรตซ์ ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 63

รูปที่ 4.7 ค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 65

รูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile strength) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 66

รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก (Elongation at break) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 67

รูปที่ 4.10 ค่าความต้านทานการดัดโค้ง(Flexural strength) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 69

รูปที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นความเครียด ณ จุดแตกหัก (%Strain at break) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 70

รูปที่ 4.12 ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 72

รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด 74

รูปที่ 4.14 พื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope(SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 77

รูปที่ 4.15 DSC Thermogram ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 79

รูปที่ 4.16 ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 82

รูปที่ 4.17 ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 83

รูปที่ 4.18 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ 85

รูปที่ 4.19 ความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 87

รูปที่ 4.20 ความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 88

รูปที่ 4.21 พื้นผิวชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope(SEM) ที่กำลังขยาย 200 เท่า 89

รูปที่ 4.22 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการจุ่มแช่ในน้ำ (Water absorption) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป (a) ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและ(b) เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 91

รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป (a)ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและ (b)เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ 92

รูปที่ 4.24 พื้นผิวชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดหลังการทดสอบน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) เป็นระยะเวลา 30 วัน ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope(SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า 102

รูปที่ 4.25 พื้นผิวชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หลังการทดสอบน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) เป็นระยะเวลา 30 วัน ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope(SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า 103

สารบัญอักษรย่อ

PLA	คือ พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านการให้ความร้อนจากเครื่องอัดรีด
5A_PLA	คือ พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก
10A_PLA	คือ พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก
15A_PLA	คือ พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก
20A_PLA	คือ พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ในปัจจุบันการครอบฟันในเป็นแนวทางการรักษาที่ได้ผลดีในผู้ป่วยทางทันตกรรม โดยการครอบฟันนั้นเป็นการบูรณะฟันที่ได้รับความเสียหายหรือการแตกหัก จากสาเหตุต่างๆ เช่น การสบฟัน การเสื่อมสภาพของฟันตามกาลเวลา และฟันที่มีรูผุขนาดใหญ่มาก เพื่อให้ฟันกลับมามีความแข็งแรงและประสิทธิภาพใช้งานได้เหมือนเดิม ในการรักษาฟันนั้นมีหลายกระบวนการและหลายขั้นตอน โดยในการรักษาฟันโดยกระบวนการครอบฟันนั้นต้องใช้ระยะเวลาในการรักษา โดยผู้รับการรักษาต้องเดินทางมาเพื่อพบแพทย์ 2 ครั้ง โดยในครั้งแรกจะเป็นการครอบฟันชั่วคราวเพื่อรอให้รากฟันเทียมนั้นเกิดการประสานเข้ากันกับเหงือกโดยในขั้นตอนนี้จะมีการใส่ที่ครอบฟันชั่วคราวลงไปก่อน เพื่อให้เหงือกเกิดการรักษาและเข้ากันได้กับรากฟันเทียมโดยใช้ระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ โดยระหว่างนั้นจะมีการนำแบบพิมพ์ฟันจำลองไปยังห้องแลปสำหรับทำฟันที่นำมาครอบฟันถาวร เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมและพอดีในการรักษา และ การนัดพบแพทย์ครั้งต่อไป จะเป็นการรื้อฟันที่นำมาครอบฟันแบบชั่วคราวออก จากนั้นจะติดยึดฟันที่นำมาครอบฟันแบบถาวรลงไปและตรวจเช็คพร้อมปรับแต่งให้มีความเหมาะสม [1-5]

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ กำลังเป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีความสะดวกและรวดเร็วในการสร้างชิ้นงานต้นแบบ(Prototype) โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบหัวฉีด (Fused Deposition Modeling) โดยวัสดุพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานต้นแบบ เช่นพอลิแลคติกแอซิด พอลิอะคริโลไนไตรส์-บิวาไดอีน-สไตรีน(ABS) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อหาวัสดุทดแทนที่เหมาะสมและสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟันชั่วคราวได้โดยใช้การพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) เพื่อลดระยะเวลาในการพิมพ์ฟันชั่วคราว โดยที่ครอบฟันชั่วคราวส่วนมากทำมาจาก วัสดุพอลิเมอร์จำพวกอะคริลิก เช่น PMMA ซึ่งย่อยสลายในธรรมชาติได้ยาก[6, 7] ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำที่ครอบฟันชั่วคราวจาก พอลิแลคติกแอซิดซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ และเสริมความแข็งแรงด้วยผงอลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้มีสีใกล้เคียงกับสีฟันและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาวัสดุทดแทนสำหรับที่ครอบฟันชั่วคราวทางทันตกรรม ศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ของวัสดุทดแทนทางทันตกรรมสำหรับใช้เป็นวัสดุครอบฟันชั่วคราว

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการขึ้นรูปวัสดุทดแทนสำหรับที่ครอบฟันชั่วคราวทางทันตกรรม โดยวิธีการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก เปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

1.3 แนวคิดและสมมุติฐานของงานวิจัย

เนื่องวัสดุสำหรับนำมาขึ้นรูปที่ครอบฟันชั่วคราวทางทันตกรรมนั้นส่วนมากทำมาจากวัสดุพอลิเมอร์จำพวกอะคริลิก เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) โดยที่ครอบฟันชั่วคราวนั้นจะต้องทิ้งไปเมื่อมีการใช้ที่ครอบฟันแบบถาวร ซึ่งในปัจจุบันการครอบฟันเป็นวิธีที่นิยมอย่างมากในการรักษาฟันจากสาเหตุต่างๆ เช่น ฟันผุขนาดใหญ่ ฟันแตกหักจากอุบัติเหตุ หรือการเสื่อมสภาพของฟันตามกาลเวลา โดยผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะหาวัสดุที่สามารถทดแทนพอลิเมอร์ชนิดพอลิอะคิริก และมีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติได้ จึงมีแนวคิดที่จะนำพอลิแลคติกแอซิด(PLA) มาทดแทน ซึ่งในปัจจุบันพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยผู้วิจัยได้ทำการผสมผงอลูมิเนียมออกไซต์ลงไปเพื่อให้พอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้มีสภาพพื้นผิวใกล้เคียงกับสีฟันจริง จากนั้นนำไปทดสอบการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) โดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบหัวฉีด (Fuse deposition modeling) เนื่องจากเทคนิคนี้มีวิธีการใช้งานที่ง่ายและมีต้นทุนต่ำ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ

1.4 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

1.4.1 วัสดุคอมโพสิตที่ทำการผสมระหว่างพอลิเมอร์ คือ พอลิแลคติกแอซิด เกรด 4032D และ วัสดุที่นำมาผสมคือผงอลูมิเนียมออกไซด์ ใช้ในปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก และทำการปรับปรุงพื้นผิวเซรามิกอลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน 3-Aminopropy ltriethoxy-silane(APS) ที่อัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักเทียบกับผงอลูมิเนียมออกไซด์

1.4.2 ขึ้นรูปเส้นฟิลาเมนต์ (Filament) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Co-rotating Twin screw extruder) รุ่น SHJ-25 จากบริษัท Yougteng ประเทศจีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

สกรู 25 มิลลิเมตร ยาว 360 เซนติเมตร และค่า L/D คือ 40 เพื่อให้ได้เส้น Extrudate ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5-1.7 มิลลิเมตร นำไปทดสอบการพิมพ์ 3 มิติ

1.4.3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบที่ใช้ในงานวิจัยคือ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D-Printer) แบบ Fuse deposited modeling (FDM) รุ่น 557E1 ผลิตโดยบริษัท NTT Pro IIID Printer ประเทศไทย

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อนำมาประยุกต์ใช้

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการดำเนินงานวิจัย

1.5.3 ดำเนินงานวิจัยโดยแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆดังนี้

1.5.3.1 ปรับปรุงพื้นผิวของผงอลูมิเนียมออกไซต์ ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APS ที่อัตราส่วน 10% โดยน้ำหนักเทียบกับผงอลูมิเนียมออกไซต์และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR)

1.5.3.2 นำผงอลูมิเนียมออกไซด์มาทำการผสมกับพอลิแลคติกแอซิดโดยมีทั้งหมด 5 สูตร ตามอัตราส่วนดังตารางที่ 1.1 ด้วยเครื่อง Twin-screw extruder ชนิด co-rotating และขึ้นเป็นเส้นฟิลาเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5-1.7 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ และนำเส้นฟิลาเมนต์บางส่วนไปตัดเป็นเม็ดเพื่อศึกษาสมบัติความหนืดเบื้องต้น โดยการหาค่าดัชนีการไหล Melt Flow index (MFI) ของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D1238

ตารางที่ 1.1 แสดงอัตราส่วนของพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3)

ตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำหนัก		น้ำหนักไซเลนเทียบกับผงอลูมิเนียมออกไซด์
	น้ำหนักพอลิแลคติกแอซิด (g)	น้ำหนักผงอลูมิเนียมออกไซด์ (g)	
PLA	100	-	-
5A_PLA	95	5	10
10A_PLA	90	10	10
15A_PLA	85	15	10
20A_PLA	80	20	10

1.5.3.3 ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile test) สมบัติต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural test) และสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding)

1.5.3.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ของวัสดุของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปจากกระบวนการฉีด (Injection molding) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์

- ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ในโหมด Heat-Cool-Heat ด้วย อัตราการให้ความร้อน 3°C/min
- ศึกษาสมบัติการไหลด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหลแบบแผ่นคู่ขนาน (Parallel plate rheometer) โดยใช้สภาวะการทดสอบแบบปรับความถี่เชิงมุม (Frequency sweep) โดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression molding) ขนาดชนิดงานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร
- ศึกษาสมบัติทางความร้อนชองวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกส์ (Dynamic mechanical thermal analysis) ใช้สภาวะการทดสอบแบบปรับอุณหภูมิ (Temperature sweep) โดยความถี่และความเครียดในการทดสอบคงที่ และให้แรงในโหมดดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending mode) ใช้ชิ้นงานในการทดสอบจากชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติต้านทานต่อการดัดโค้ง
- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D638
- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural test) ตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยให้แรงในโหมดดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending mode)
- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐาน ASTM D695
- ศึกษาความแข็งแรงบนพื้นผิว (Shore hardness test) ด้วยหัวกดแบบ Shore D ตามมาตรฐาน ISO 868
- ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ตามมาตรฐาน ASTM D1630
- ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance)
- ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

1.5.3.5 ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) สำหรับการทดสอบสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วยเครื่องมือวิเคราะห์

- ขึ้นรูปชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบสมบัติต้านทานต่อการกดอัด ASTM D695 โดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ชิ้นงานละ 12 ตัวอย่างเพื่อนำไปทดสอบการกดอัด
- ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ในโหมด Heat-Cool-Heat ด้วยอัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing)
- ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐาน ASTM D 695
- ศึกษาปริมาณรูพรุนทั้งหมด (Total porosity) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)
- ศึกษาความแข็งแรงบนพื้นผิว (Shore hardness test) ด้วยหัวกดแบบ Shore D ตามมาตรฐาน ISO 868
- ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

1.5.3.6 ศึกษาสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของวัสดุหลังผ่านการจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์

- ทำการจุ่มแช่ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐาน ASTM D695 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และ และกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding)
- ศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำและน้ำลายเทียมของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) โดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานเปียก
- ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวมของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing)
- ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐาน ASTM D695 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)

- ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

1.5.5 ดำเนินการให้ผลงานหรือส่วนหนึ่งของผลงานได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์ในวารสารหรือสิ่งพิมพ์ทางวิชาการ หรือนำเสนอต่อที่ประชุมวิชาการที่มีรายงานการประชุม (Proceeding) อย่างน้อย 1 เรื่อง

1.5.6 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5.7 สอบวิทยานิพนธ์

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.6.1 สามารถเตรียมวัสดุทดแทนสำหรับที่ครอบฟันชั่วคราวทางทันตกรรม โดยสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพที่ดี

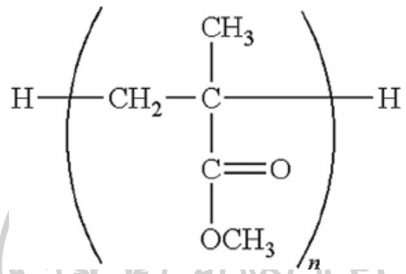
1.6.2 สามารถใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติเพื่อขึ้นรูปวัสดุการครอบฟันชั่วคราวทางทันตกรรมเพื่อช่วยลดระยะเวลาในการขึ้นรูปได้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุชีวการแพทย์ที่ใช้ในงานทันตกรรม

2.1.1 วัสดุพอลิเมอร์

2.1.1.1 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) [7]

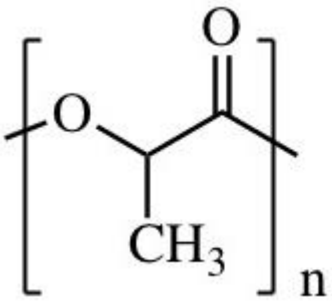


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ PMMA [8]

โครงสร้างของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) แสดงในรูปที่ 2.1 โดยพอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นวัสดุที่มีการใช้มานานแล้วในทางทันตกรรม เป็นที่นิยมในการผสมที่ครอบฟัน และการผลิตฟันปลอม เนื่องจากสมบัติที่ดี เช่น การขึ้นรูปที่ง่าย การซ่อมแซมสะดวก ต้นทุนต่ำและการยอมรับที่ดีของผู้ป่วย อีกทั้ง คุณสมบัติทางชีวภาพไม่มีรส ไม่มีกลิ่น โปร่งใสและมีลักษณะความงามที่ยอดเยี่ยม แต่ PMMA ใช้เป็นวัสดุฐานฟันปลอมมีปัญหามากมายเช่น ความต้านทานเชิงกลต่ำ ความไวต่อการก่อตัวของจุลินทรีย์จากสิ่งแวดล้อมในช่องปากที่ปนเปื้อนสูงขาดความทึบแสง และปฏิกิริยาภูมิแพ้ส่วนใหญ่เกิดจากการชะล้างของมอนอเมอร์ การเสื่อมสมบัติทางกลและความต้านทานต่อการสึกหรอในสภาพแวดล้อมด้วยน้ำโดยเฉพาะในน้ำลายของมนุษย์ [6, 7]

2.1.1.2 พอลิแลคติกแอซิด [9]

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) จัดเป็นไบโอพอลิเมอร์ (Biopolymer) หรือพอลิเมอร์ทางชีวภาพสังเคราะห์มาจากกรดแลคติก (lactic aicd) ได้เป็นพอลิเอสเตอร์สายโซ่ตรง (Ali]hatic polyester) กรดแลคติกนั้นผลิตจากกระบวนการหมักแป้งหรือน้ำตาลจากพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย และพอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมลาสติก (Thermoplastic) โดยแสดงโครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิดในรูปที่ 2.2 พอลิแลคติกแอซิดสามารถขึ้นรูปได้จากกระบวนการผลิตทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดรีด (Extrusion) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) และการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) [9, 10]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด [9]

การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดจะเกิดผ่านปฏิกิริยาสามรูปแบบ คือ ปฏิกิริยาการพอลิเมอร์ไรเซชั่นแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซิโอโทรปิค (Azeotropic dehydrative condensation) และปฏิกิริยาการการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide formation) ซึ่งการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดโดยผ่านการเปิดวง (Ring-opening polymerization) ของแลคไทด์พอลิแลกติกแอซิด จะทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูง (มากกว่า 100,000 ดาลตัน) และพอลิแลคติดแอซิดส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันส่วนมากเป็นพอลิแลคติกชนิดแอล เกือบทั้งหมด เรียกว่า พอลิแอล-แลคติกแอซิด (PLLA) [9]

2.1.2 วัสดุเซรามิก

เซรามิกสามารถแบ่งได้หลายแบบเช่น แบ่งตามองค์ประกอบหลักอุณหภูมิที่ใช้เผา หรือวิธีการขึ้นรูปเป็นต้น โดยในทางทันตกรรมออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้ [11]

2.1.2.1 เซรามิกดั้งเดิม (conventional, traditional หรือ feldspaticceramic)

โดยในกลุ่มนี้ เป็นเซรามิกพวกแรกที่นำมาใช้ในทางทันตกรรมมีองค์ประกอบหลักคือ เฟลด์สปาร์ (feldspar) และองค์ประกอบอื่นได้แก่ ควอตซ์ (quartz) เม็ดสีโลหะ (metallic pigment) ซึ่งเป็นออกไซด์ของโลหะต่างๆสารทำให้เกิดความทึบแสง (opacifier) เช่นดีบุกสารดัดแปรงจากแกว(glass modifier) สารทำให้เกิดการวาวแสง(fluorescence) เช่น ซีเรียมออกไซด(cerium oxide)และสารช่วยในการขึ้นรูป(modeling) ไดแก แคโอลิน(kaolin) เมื่อนำองค์ประกอบทั้งหมดมาเผารวมกันและบดให้ ละเอียดพบว่าส่วนของควอตซ์ไมมีการเปลี่ยนแปลงส่วนของ เฟลด์สปาร์ (feldspar) เกิดการสลายตัวได้เป็นกลาสเมทริกซ์ (glass matrix) และเนื่องจากครอบฟันโลหะเคลือบเซรามิกนั้นมีโครงโลหะอยู่ภายในจึงทำให้เกิดความทึบแสง เปนข้อจำกัดเรื่องความสวยงาม ในกรณีครอบฟันซี่หน้า โดยที่ฟัน ข้างเคียงของผู้ปวยโปร่งแสงมาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเซรามิกให้มีความแข็งแรงมากขึ้น เพื่อสามารถสรางครอบฟันที่ไม่มีโครงโลหะหรือที่เรียกว่าครอบฟันเซรามิกทั้งซี่

2.1.2.2 กลาสเซรามิก (Glass-ceramics)

เป็นเซรามิกที่มีการพัฒนาให้มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยเพิ่มการปริมาณของวัฏภาคผลึก (crystalline) ด้วยขบวนการที่เรียกวาการอบร้อน(ceraming) ซึ่งเป็นขบวนการควบคุมการเกิดผลึก (controlledcrystallization) ด้วยความร้อน (heattreatment) ร่วมกับการใส่สารสร้างนิวเคลียส (nucleating agent) ไวในเซรามิกให้เป็นจุดเริ่มต้นของขบวนการเกิดผลึก (crystallization) โดยเมื่อนำเซรามิกนี้ไปหลอมที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนดจะทำให้เกิดผลึกที่มีรูปร่างกลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน(homogeneity) และมีปริมาณผลึกจำนวนมากกระจายอยู่ในชั้น เซรามิก ปริมาณของผลึกที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงของเซรามิกเพิ่มมากขึ้นเช่นกันซึ่งเพียงพอที่นำมาใช้ครอบฟันเซรามิกทั้งซี่

2.1.2.3 ออกไซด์เซรามิก (Oxide Ceramic)

องค์ประกอบหลัก ของเซรามิกประเภทนี้เป็นออกไซด์โลหะซึ่งมีความแข็งแรงมากแต่ มีข้อเสียคือมีสีขาวขุ่นและทึบแสง จึงใช้เซรามิกประเภทนี้ทำเป็นโครงเซรามิก และวีเนียรด้านนอกด้วยเซรามิกชนิดดั้งเดิม โดยเซรามิกกลุ่มนี้ประกอบด้วยออกไซด์โลหะปริมาณมากและมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่จำนวนน้อยดังนั้นจึงไม่เกิดพันธะกับเรซินซีเมนต์ด้วยสารคู่ควบได้ และไม่สามารถเพิ่มความขรุขระบนพื้นผิวด้านในการใช้กรดกัด

เซรามิกที่มีอลูมินาเป็นส่วนประกอบหลัก (alumina based ceramic) อลูมินาเป็นออกไซด์ของอลูมิเนียมมีสมบัติ ที่แข็งแรงมากสามารถหยุดการเกิดรอยร้าว(crack stopper) สำหรับเซรามิกที่มีอลูมินาเป็นส่วนประกอบหลักสามารถแบ่งออกเป็นสอง ประเภทตามปริมาณของอลูมินา ได้แก่ เซรามิกเสริมความแข็งแรงดวยอลูมินา (Aluminous reinforced ceramic)โดยเพิ่มปริมาณอลูมินาในเซรามิกดั้งเดิมร้อยละ 17.0 เป็นร้อยละ 40.0-50.0 โดยน้ำหนักในเซรามิกนี้ทำให้ความแข็งแรงของเซรามิกเพิ่มขึ้นแต่ความโปร่งแสง ของเซรามิกลดลงอย่างมากจึงนำมาใช้เป็นโครงเซรามิก

โครงเซรามิกแทรกด้วยแก้ว (Glass-infiltrated ceramic core)เนื่องจากเซรามิกที่เสริมความแข็งแรงดวยอลูมินา มีปริมาณอลูมินาเพียงร้อยละ 40-50 โดยน้ำหนัก โดยเติมอลูมินาลงไปในขั้นตอนการผลิตผงเซรามิกและไม่สามารถเติมลงไป ได้มากกว่านี้แล้วดังนั้นการเพิ่มปริมาณอลูมินาให้มากขึ้นต้องทำโดยวิธีอื่นจึงเป็นที่มาของเซรามิกชนิดนี้ โดยใช้วิธีขึ้นรูปสองขั้น ตอนในการสร้างโครงเซรามิกคือขั้นตอนสลิปแคสติง(slip casting) แล้วตามด้วยขั้นตอนการแทรกด้วยแก้วในโครงเซรามิก (glass-infiltration)

2.1.2.4 การนำอลูมิเนียมออกไซด์มาใช้ในงานทางทันตกรรม [11]

ในทางทันตกรรมการครอบฟันจะใช้วัสดุจำพวกเซรามิกในการครอบฟัน ในทางทันตกรรมเซรามิกเรียกจัดเป็นอโลหะ โดยโครงสร้างอนินทรีย์ที่มีส่วนผสมระหว่างออกซิเจนกับโลหะหรือสารกึ่งโลหะเป็นบางส่วน โดยส่วนมากมักเป็น โซเดียม(Na) แคลเซียม(Ca) แมกนีเซียม(Mg) ซิลิคอน(Si) ฟอสฟอรัส(P) โซโครเนียม(Zr) และ ไททาเนียม(Ti) เซรามิกในทางทันตกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ อลูมินา(Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ที่แข็งที่สุดชนิดหนึ่งที่รู้จัก เซรามิกที่ที่เป็นธาตุชนิดเดียวนั้นหายาก เพรชเป็นเซรามิกที่สำคัญชนิดหนึ่งซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่แข็งที่สุดโดยใช้ในการตัดเคลือบฟัน

โดยทั่วไปองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ของฟันคือเซรามิก-ไฮดรอกซีอะพาไทด์ดังนั้นเซรามิก เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทด์(hydroxyapatite) โวลาสโทไนต์(wollastonite) ถูกใช้เป็นวัสดุสำหรับการปลูกถ่ายกระดูก การใช้เซรามิกได้รับการสนับสนุนว่ามีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ความสวยงาม(aesthetics) ความทนทาน(durability) และการปรับแต่งที่ง่าย (customization) ความพิเศษของเซรามิกครอบฟันคือ มีความสามารถในการเลียนแบบฟันธรรมชาติ สี ความโปร่งแสงและความแข็งแรง เซรามิคมีความคงตัวภายในดีเยี่ยมและทนต่อการสึกหรอ การจำแนกประเภทของเซรามิคในทางทันตกรรม นั้นเป็นไปไม่ได้เนื่องจากมีการปรับปรุงองค์ประกอบมากมาย โดยตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทั่วไปของเซรามิกในทางทันตกรรม

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบทั่วไปของเซรามิกในทางทันตกรรม [12]

Materials	wt%
Silica	~62
Alumina	~18
Boric Oxide	~7
Potash (K_2O)	~7
Soda (Na_2O)	~4
Other oxides	~2

อลูมิเนียมพอร์ซเลน(Aluminous porcelain) มีส่วนผสมเป็นแก้วและอลูมิเนียมออกไซด์อย่างน้อย 35% โดยปริมาตร โดยเป็นเซรามิกหลักที่นิยมใช้กันทั่วไปและมีขั้นบางๆของแพลตินัม เมื่อเทียบกับเซรามิกล้วน แกนที่เป็นโลหะจะมีความแข็งแรงกว่าพอร์ซเลน ความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง (flexural strength) ของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นแกน อยู่ที่ 700 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับแกนจาก

In-Ceram Zirconia แกนอลูมิเนียมบริสุทธิ์ ผลิตโดยบริษัท Techceram Ltd. โดยจะผลิต die แบบพิเศษเพื่อให้ได้ แกนอลูมินาที่มีความหนาแน่น 80-90% และถูกเผาที่อุณหภูมิ 1170 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ความแข็งแรงและความโปร่งแสงสูงสุด การใช้ Aluminous crowns เพิ่มขึ้นอย่างมาก ในช่วงกลางปี 1960 บริษัท Nobel Biocare (Sweden) ได้นำระบบการกดอลูมิเนียมออกไซด์ลงบนแผ่นโลหะ โดยการถอดรูปทรงจากดายแล้วนำมาเผาโดยอลูมินาใช้เพื่อทำแกนโครงสร้างเซรามิก สำหรับปลูกรากฟันเทียม(CeraOne®) และสำหรับที่ครอบฟันธรรมดา(Procera®) [13]

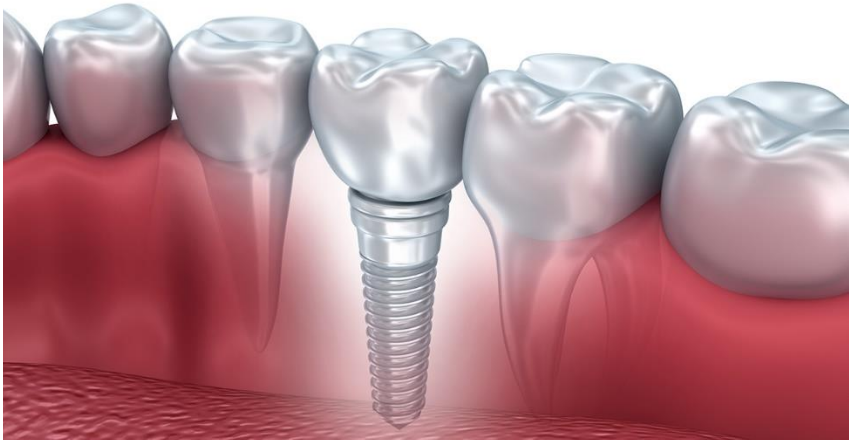
2.1.3 โลหะผสม

2.1.3.1 ไทเทเนียม [14]

ไทเทเนียมมีสมบัติที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นชั้นออกไซด์เคลือบที่บริเวณผิว ช่วยป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมีเช่นเดียวกับโครเมียมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิม(Stainless steel) โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นชั้นบางๆ ซึ่งมีความแข็งแรงและยึดแน่นกับบริเวณพื้นผิวทำให้ไทเทเนียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง สมบัติเชิงกลและกายภาพของไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบ

ความสามารในการเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ(Biocompatibility) เนื่องจากโลหะผสมไทเทเนียมจะมีชั้นของออกไซด์ที่หนาประมาณ 5-10 นาโนเมตร ซึ่งมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวของไทเทเนียม และเป็นออกไซด์ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาต่างๆ สามารถทนต่อน้ำ เกลือ สภาพแวดล้อมต่างๆ ภายในร่างกายได้โดยไม่เกิดการสลายตัว อีกทั้งชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมยังยอมให้ของเหลว โปรตีน เนื้อเยื่อแข็งและเนื้อเยื่ออ่อนต่างๆ เข้ามายึดเกาะได้อย่างแนบสนิท

2.1.3.2 การนำไทเทเนียมมาใช้ในทางทันตกรรมครอบฟัน [14, 15]



รูปที่ 2.3 รากฟันเทียมที่ทำจากโลหะไทเทเนียม [16]

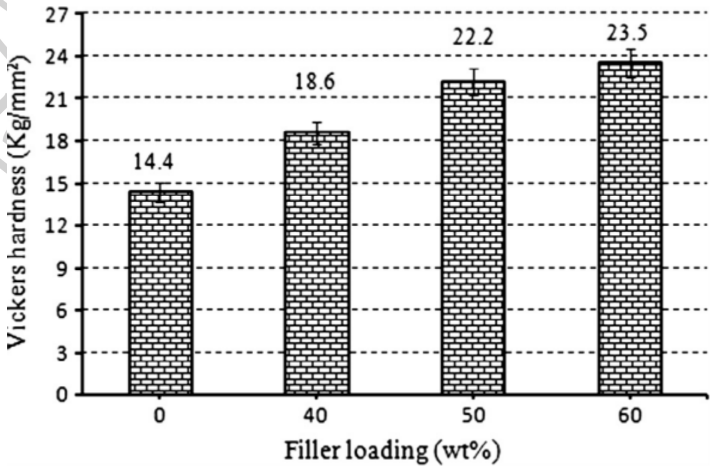
โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ในงานทันตกรรมครอบฟัน และฟันปลอมชนิดติดแน่นควรมีสมบัติที่มีความแข็งแรง คงรูป มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อในช่องปาก ไม่เกิดการกัดกร่อนและสามารถยึดติดกับพอร์ซเลน ในระหว่างขั้นตอนการเผาพอร์ซเลนออกไซด์ที่ผิวของโลหะสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อพอร์ซเลน ทำให้เกิดแรงยึดทางเคมีขึ้น นอกจากนี้ไอออนของโลหะ ต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอร์ซเลน เห็นได้ว่าไทเทเนียมเป็นโลหะที่มีสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานทันตกรรมครอบฟัน เนื่องจากมีสมบัติการสร้างชั้นออกไซด์บริเวณผิวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งมีความหนาแน่นต่ำสามารถทำชิ้นงานที่มีน้ำหนักเบาได้ดี และมีความแข็งแรงสูง และชั้นออกไซด์สามารถหลุดและเกิดการยึดติดกับพอร์ซเลนได้ ทำให้นำมาใช้ในการเชื่อมต่อโลหะกับพอร์ซเลนได้ จึงทำให้ไทเทเนียมเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ทดแทนโลหะผสมชนิดดั้งเดิม ในรูปที่ 2.3 แสดงรากฟันเทียมที่ทำจากโลหะไทเทเนียม โดยรากฟันเทียมเป็นการนำรากเทียมที่ทำมาจากวัสดุไทเทเนียมหรือเซรามิกที่มีลักษณะคล้ายสกรูใส่เข้าไปในขากรรไกร โดยใช้รากฟันเทียมเป็นหลักยึดครอบฟัน สะพานฟัน หรือฟันปลอมถอดได้ทั้งปากเพื่อทดแทนฟันที่สูญเสียไป โดยใช้เวลาในการรักษาทั้งหมดประมาณ 3-6 เดือน โดยระยะเวลาและจำนวนครั้งในการมารับการรักษาขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณและคุณภาพของกระดูกขากรรไกร จำนวนฟันที่ต้องการทำรากฟันเทียม [16]

จากงานวิจัยของ Sutheera Mongkhontreerat และคณะ [17] เป็นการศึกษาผลของนาโนซิลิกา (Nano-silica) ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารไซเลนต่อสมบัติสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพของสีของพอลิเมทิลเมทาคริเลต(PMMA) โดยวัดจากค่าจากมาตรฐาน National Bureau of standards(NBS) ที่แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสีจากคลินิก โดยกำหนดให้ค่า NBS ที่เสถียรสีอยู่ระหว่าง 0.0-1.5 ค่า NBS สามารถคำนวณได้จากค่า ∆EX0.92 จากการศึกษาพบว่า การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของนาโนซิลิกาด้วยสารไซเลนส่งผลให้ค่าสมบัติความต้านทานการดัดโค้ง(Flexural modulus) มีค่าสูงขึ้นในทางสถิติ และมีค่าความต้านทานการดัดโค้งสูงสุด(Flexural strength) เพิ่มขึ้นด้วย และการเปลี่ยนแปลงเฉดสีดังแสดงในตารางที่ 2.2 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีของพอลิเมทิลเมทาคริเลท(PMMA)ที่มีการปรับภาพพื้นผิวด้วยสารไซเลน พบว่าพอลิเมทิเมทาคริเลท (PMMA) ที่มีการผสมนาโนซิลิกาและปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยไซเลน 1% มีเสถียรภาพของสีมากที่สุด โดยวัดจากค่ามาตรฐาน National Bureau of standards(NBS) ที่ไม่เกิน 1.5

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงเฉดสีพอลิเมทิลเมทาคริเลท (PMMA) ที่มีการปรับภาพพื้นผิวด้วยสารไซเลน [17]

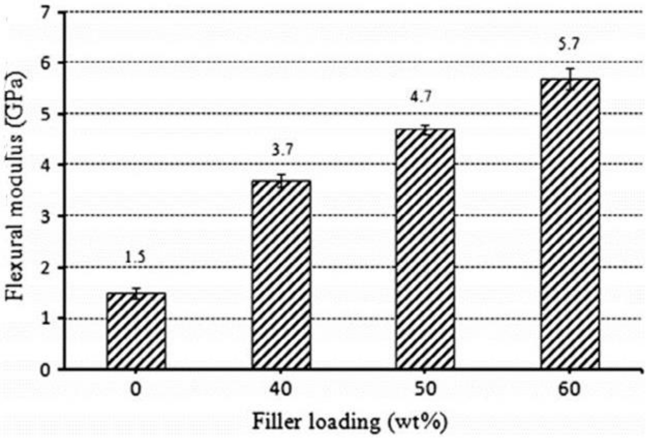
Nano-silica	Clear Polymethyl Methacrylate			Tooth-colored Polymethyl Methacrylate		
	ΔE Mean (SD)	NBS Mean (SD)	Unit Color Stability	ΔE Mean (SD)	NBS Mean (SD)	Unit Color Stability
1%	4.18 (1.09)	3.85 (1.01)	☒	1.21 (0.45)	1.12 (0.41)	☑
3%	9.55 (0.77)	8.79 (0.71)	☒	1.52 (0.37)	1.40 (0.34)	☑
5%	9.07 (0.87)	8.34 (0.80)	☒	1.86 (0.20)	1.72 (0.18)	☒

จากงานวิจัยของ Saad Omar Alsharif และคณะ[18] เป็นการศึกษาปริมาณการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบทางทันตกรรม (Dental resin composites, DRCs) การเตรียม DRC จะใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ผสมกับ Bis-GMA ที่เป็นมอนอเมอร์ โดยปรับปรุงสภาพพื้นผิวของอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APS ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณ 40% 50% และ 60% โดยน้ำหนัก จากนั้นทดสอบความแข็งที่ผิวด้วยเทคนิค Vickers hardness แสดงผลในรูปที่ 2.4 พบว่าเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Vickers hardness เพิ่มขึ้น โดยอนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์นั้นแข็งและเปราะมากกว่าเนื้อของวัสดุเสริมองค์ประกอบทางทันตกรรม (DRCs) ดังนั้นจึงเป็นเหตุที่ทำให้ค่า Vickers hardness เพิ่มขึ้น

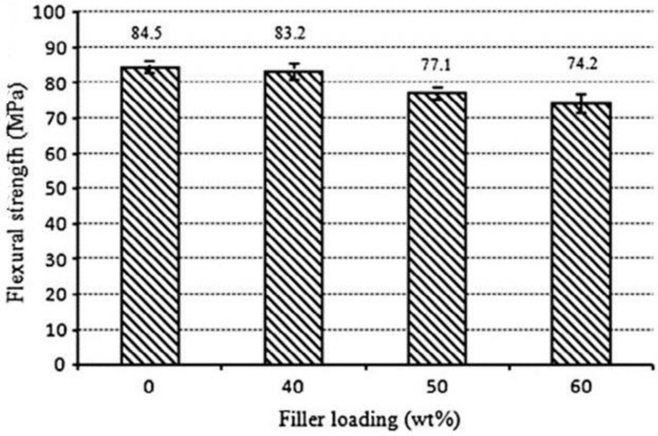


รูปที่ 2.4 Vickers hardness ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทันตกรรม (DRCs) ที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณต่างๆ [18]

รูปที่ 2.5 แสดงผลที่ได้จากการทดลองความต้านทานการดัดโค้ง พบว่าค่า Flexural modulus สูงสุดมีค่า 5.7 MPa เป็นของวัสดุเสริมองค์ประกอบทางทันตกรรม(DRCs) ที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 60% โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของค่า Flexural modulus เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของผงอลูมิเนียมออกไซด์ และเป็นผลมาจากการกระจายตัวของอลูมิเนียมออกไซด์อย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ ส่งผลให้สามารถรับความเครียดที่สูงขึ้นได้ ในรูปที่ 2.6 แสดงค่า Flexural strength พบว่าเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่า Flexural strength มีค่าลดลง โดยมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเมทริกซ์ที่ไม่มีการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของผงอลูมิเนียมออกไซด์ มีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ จึงไม่ขัดขวางการแพร่กระจายของรอยร้าวเช่นเดียวกับการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเส้นใย



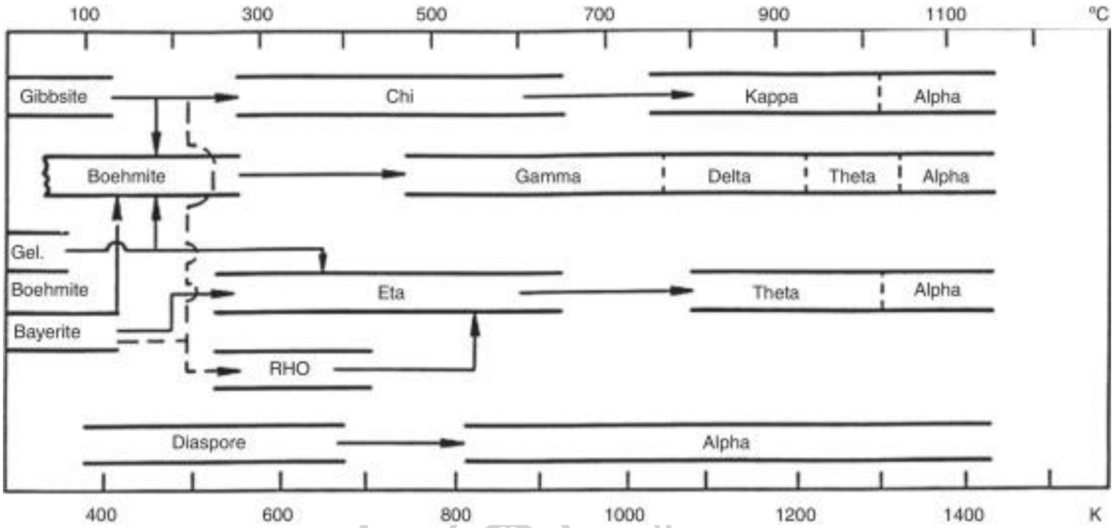
รูปที่ 2.5 Flexural modulus ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทันตกรรม (DRCs) ที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณต่างๆ[18]



รูปที่ 2.6 Flexural strength ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทันตกรรม (DRCs) ที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณต่างๆ [18]

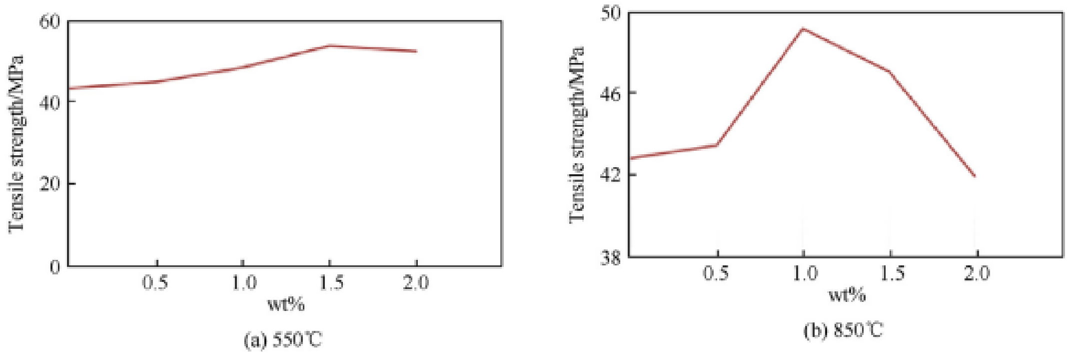
จากงานวิจัยของ Lamouri Samir และ คณะ[19] อลูมินาเป็นหนึ่งในวัสดุเซรามิกที่นิยมใช้กันอย่างมากในทางการแพทย์ เช่นการ ศัลกรรมกระดูกและการปลูกถ่าย เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่น่าสนใจ เพื่อให้ได้อลูมินาที่มีความหนาแน่นตามที่ต้องการ ต้องใช้การควบคุมการผลิตที่สมบูรณ์แบบ ตั้งแต่การสังเคราะห์ผง ไม่จนถึงการเผา Gibbsite $Al(OH)_3$ และ Boehmite (AlO(OH)) เป็นสารตั้งต้นที่ใช้มากที่สุดในการเตรียม alpha-Al_2O_3

ในรูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนเฟสของ gibbsite $Al(OH)_3$ ไปเป็น alpha-$A1_2O_3$ในระหว่างการบำบัดด้วยความร้อน(heat treatment) อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จะเปลี่ยนเป็นอลูมินาในขั้นเมต้าก่อนที่จะเปลี่ยนขั้นสุดท้ายเป็น alpha-Al_2O_3 เพื่อเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิก Boehmite (AlO(OH)) จะเปลี่ยนเป็น gamma-Al2O3 ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 500–550 °C โดยการเอาน้ำออกจากโครงสร้าง การเปลี่ยน gamma-Al_2O_3 โมโนคลินิกเฟส(d = 3.56 g cm^{-3}) ไปเป็น alpha-Al_2O_3 เฮกซะโกนอลเฟส (d = 3.98 g cm^{-3}) จะมีการลดลงของปริมาตรถึง 10% ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นมากของความหนาแน่น การเปลี่ยน theta-Al_2O_3 ไปเป็น alpha-Al_2O_3 จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 1050–1200 °C การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดผ่านกลไกทางกลการเติบโตของนิวเคลียส และ เกรนโดยได้รับอิทธิพลจากตัวแปรหลายอย่างเช่น ขนาดของเกรน องค์ประกอบทางเคมี และอัตราการให้ความร้อน การเปลี่ยนเฟสจาก theta-Al_2O_3 ⟶ alpha-Al_2O_3 มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการเผาผนึกเพื่อควบคุมโครงสร้างทางจุลภาค สภาวะการเผา(sintering) การก่อตัวของ alpha-Al_2O_3 จะก่อให้เกิดโครงสร้างจุลภาคแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งพัฒนาขึ้นในระหว่างการเปลี่ยนเฟส alpha-Al_2O_3 นอกจากนี้การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสให้แม่นยำนั้นทำได้ยาก เนื่องจากขั้นตอนการเปลี่ยนเฟสนั้นมีความไม่เสถียรและความว่องไวสูง การศึกษาต่างๆ แสดงให้เห็นว่าการกัดเซาะด้วยพลังงานที่สูงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนเฟสจาก อลูมิเนียมออกไซด์ไปเป็น alpha-Al_2O_3 ที่เสถียรยิ่งขึ้น การเปลี่ยนเฟสนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และขนาดอนุภาค การศึกษาบางส่วนจะใช้เทคนิค X-rays diffraction ศึกษาระหว่างการเปลี่ยนเฟส Gibbsite $Al(OH)_3$ และ Boehmite (AlOOH) ที่เปลี่ยนเฟสเป็น alpha-Al_2O_3 พบว่าขนาดผลึก alpha-Al_2O_3 ที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็กได้มาจากการเปลี่ยนเฟสจาก Boehmite และทรงกลมขนาดใหญ่ได้มากจากการเปลี่ยนเฟสของ Gibbsite ดังนั้นผงดิบและการบดผงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการเผาผลึกกลาสอัดแน่น เทคนิคหลายอย่างถูกใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการชุบแข็งเช่น เมล็ด alpha-Al_2O_3 และสารเติมแต่งของอลูมินา



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนเฟสของ gibbsite $Al(OH)_3$ ไปเป็น alpha-$A1_2O_3$ [19]

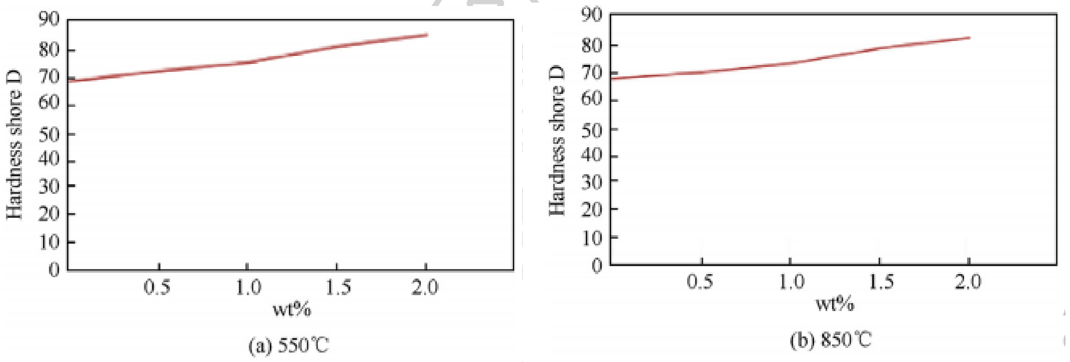
จากงานวิจัยของ Hayder Abbas และ [20] ได้ทำการผสมอลูมิเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและพอลีเอสเตอร์เรซินในอัตราส่วน 4:96 (EP4% : 96%UPE) สังเคราะห์โดยวิธีการ Sol-gel และศึกษาขนาดของอนุภาคที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล โดยได้ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile test) โดยการทดสอบแรงดึงเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของวัสดุ



รูปที่ 2.8 Tensile strength ของพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ (a) 550 °C และ (b) 850 °C [20]

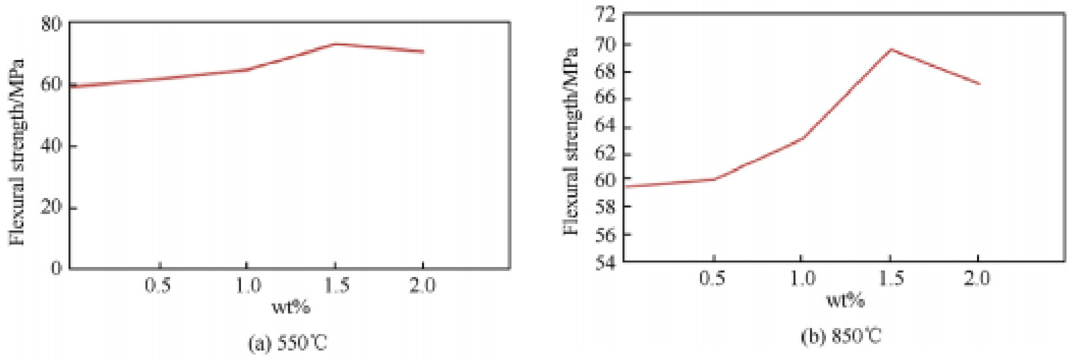
จากรูปที่ 2.8(a) แสดงผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและพอลีเอสเตอร์เรซินในอัตราส่วน 4:96 ที่ใส่อนุภาคนาโนคอมโพสิตและผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 550 °C ผลการวิจัยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength และปริมาณการเพิ่มขึ้นของอนุภาคเป็นสัดส่วนโดยตรงกัน หมายความว่าอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่าพื้นผิวของอนุภาคนาโนที่สูงช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนแรงระหว่าง

พอลิเมอร์ผสมและอนุภาคนาโนคอมโพสิต รูปที่ 2.8(b) แสดงผลพฤติกรรมการต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและพอลิเอสเตอร์เรซินในอัตราส่วน 4:96 ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 850 °C พบว่ามีค่า Tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผง เพิ่มขึ้นแต่ได้ค่าที่น้อยกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 550 °C การปรับปรุงสมบัติเชิงกลเกิดจากการความสามารถในการกระจายตัวและความแข็งแรงในการยึดติดของวัสดุนาโนคอมโพสิตในพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วย การลดลงของค่า Tensile strength ที่แสดงในรูป 2.8(a) ที่ปริมาณ 2% และรูป 2.8(b) ที่ปริมาณ1.5-2% เป็นผลมาจากความแตกต่างของอนุภาคและการรวมกลุ่มกันของอนุภาค เปรียบเสมือนจุดรวมความเครียด ดังนั้นการรวมกลุ่มกันของอนุภาคทำให้เกิดการลดลงของสมบัติเชิงกล



รูปที่ 2.9 Hardness shore D ของพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ (a) 550 °C (b) และ 850 °C [20]

การทดสอบความแข็งที่พื้นผิวเป็นพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในการระบุว่า วัสดุนั้นๆมีสมบัติที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยรูปที่ 2.9(a) และ 2.9(b) แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบความแข็งที่ผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีพอกซีเรซินและพอลิเอสเตอร์เรซินในอัตราส่วน 4:96 บ่มที่อุณหภูมิ 550 °C และ 850 °C ผลการวิจัยพบว่าเมื่ออนุภาคนาโนคอมโพสิตเพิ่มขึ้น ให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าอนุภาคนาโนคอมโพสิตมีความต้านทานสูงต่อการขีดข่วน แสดงถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมและอนุภาคนาโนคอมโพสิต การลดลงของการแตกหักขนาดเล็กภายในวัสดุคอมโพสิตแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลดังสังเกตได้ในรูปที่ 2.8 ที่เกิดความแตกต่างเล็กน้อยของการเพิ่มขึ้นของค่า Tensile strength



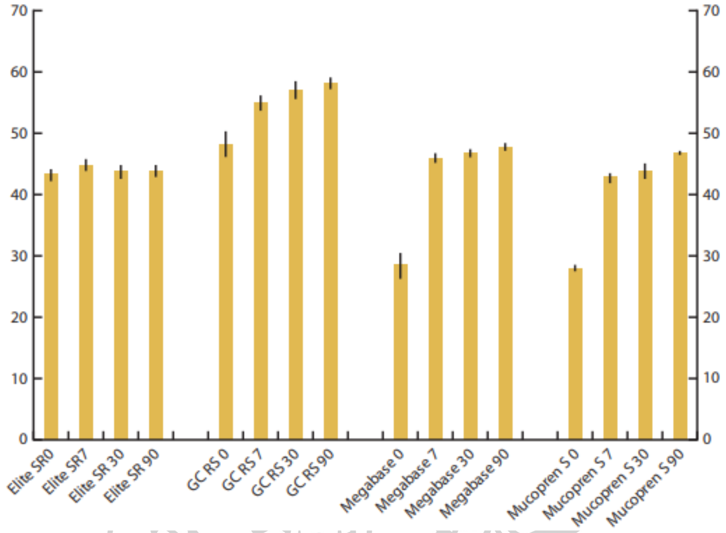
รูปที่ 2.10 Flexural strength ของพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์นาโนคอมโพสิตที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ (a) 550 °C และ(b) 850 °C [20]

ความสามารถในการต้านทานการดัดโค้งคือปริมาณความแข็งแรงของวัสดุที่สามารถรับได้ก่อนที่จะถูกเปลี่ยนรูปหรือแตกหัก แสดงในรูปที่ 2.10a และ b ผลการทดสอบพบว่าพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนคอมโพสิต ส่งผลให้ค่าความต้านทานการดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนคอมโพสิตผสมอยู่มีความต้านทานและความแข็งแรงที่รองรับน้ำหนักจากภายนอกได้

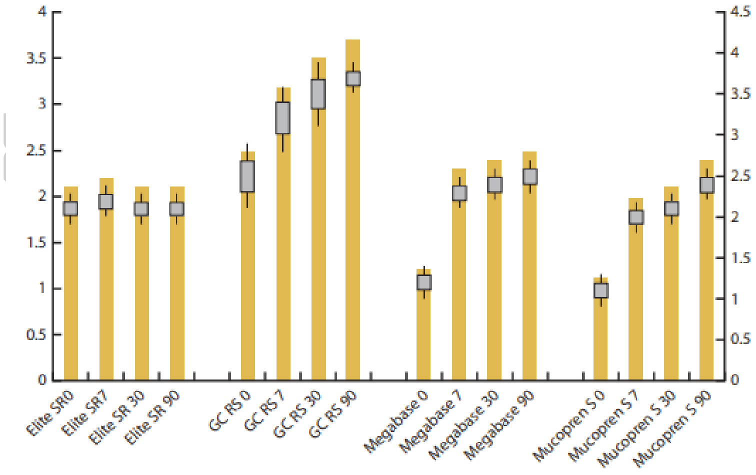
จากงานวิจัยของ Nowakowska Toporowska และคณะ [21] เป็นการทดสอบความแข็งแรงของพื้นผิววัสดุเมื่อทำการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมเป็นระยะเวลา 7 30 และ 90 วัน โดยแสดงในรูปที่ 2.11 พบว่า วัสดุชนิด Elite Soft Relining เป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งน้อยที่สุด และการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งในในวัสดุชนิด GC Reline Soft มีค่าอยู่ประมาณ 10 Shore A ตลอดระยะเวลาในการทดลอง ในขณะที่วัสดุชนิด Megabase และ Mucopren มีค่าการเพิ่มขึ้นอยู่ประมาณ 19 Shore A วัสดุ 2 ชนิดนี้มีความเสถียรน้อยที่สุดในแง่ของความแข็งที่พื้นผิว ในขณะที่ GC Reline Soft และ Elite Soft Relining เป็นวัสดุมีความเสถียรที่มากกว่า ความยืดหยุ่นของวัสดุมีสัมพันธ์กันควรสอดคล้องกันกับความยืดหยุ่นของเยื่อบุในช่องปากและค่า Young’s modulus ของวัสดุที่ ไม่ควรต่ำกว่าค่าเนื้อเยื่อในช่องปาก ซึ่งหมายความว่าสำหรับเยื่อบุในช่องปากที่มีความยืดหยุ่นน้อยใช้การอ่อนตัวเกินไปเป็นข้อห้ามในการใช้งาน

ในรูปที่ 2.12 แสดงค่า Young’s modulus ของวัสดุทั้งหมดพบว่ามีค่าระหว่าง 1.1 ถึง 3.7 MPa ในขณะที่ค่าเฉลี่ยความยืดหยุ่น Young’s modulus ของเยื่อบุรองรับฟันปลอมคือ 1.3 ถึง 5.0 MPa ดังนั้นวัสดุชนิด Elite Soft Relining อาจเหมาะสมกว่าสำหรับผู้ป่วยที่มีเยื่อบุในช่องปากที่

ยืดหยุ่น และการลดลงของค่า Young' modulus ในวัสดุชนิด GC Reline Soft อาจเป็นวัสดุประโยชน์สำหรับผู้ป่วยที่มีช่องปากยืดหยุ่นน้อยกว่าเนื้อเยื่อบุในช่องปาก



รูปที่ 2.11 Hardness Shore A ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทั้ง 4 กลุ่ม [21]



รูปที่ 2.12 Young's modulus (MPa) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบทั้ง 4 กลุ่ม [21]

2.2 ทันตกรรมและกระบวนการครอบฟัน

2.2.1 ทันตกรรม

ทันตกรรม (Dentsitry) ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 ระบุว่า ทันตกรรม คือ “การรักษาโรคทางฟัน เหงือก ขากรรไกรและโรคภายในช่องปาก” โดยการทันตกรรมจะสามารถแบ่งได้หลากหลายรูปแบบ[22]

2.2.1.1 ทันตกรรมทั่วไป

ทันตกรรมทั่วไปคือ การตรวจสภาพช่องปากและฟัน การทำความสะอาด รักษาสุภาพเหงือกและฟันเพื่อให้มีสุขภาพที่ดีและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ประกอบไปด้วย การตรวจโรงทางทันตกรรม การขูดหินปูน การอุดฟัน และการขัดฟัน

2.2.1.2 ทันตกรรมเพื่อความงาม

เป็นวิธีทางทันตกรรมที่ช่วยในการเสริมสร้าง และมุ่งเน้นด้านการพัฒนาความสวยงามของฟันรอยยิ้ม การฟอกสีฟันด้วยเลเซอร์ การสร้างรอยยิ้มที่สวยงามโดยการผสมผสานและประยุกต์ใช้ทันตกรรมเพื่อความงามประเภทต่างๆ

2.2.1.3 ทันตกรรมรากฟันเทียม

การปลูกรากฟันเทียมเป็นวิธีสมัยใหม่ในการแทนที่รากฟันที่แท้จริง โดยทันตแพทย์จะทำการปลูกรากฟันเทียมลงบนกระดูกรองรับ ซึ่งจะสร้างพื้นฐานที่แข็งแรงให้แก่ฟันที่นำมาทดแทนฟันที่สูญเสียไป โดยทั่วไปจะผลิตจากวัสดุไทเทเนียมที่ได้รับการวินิจฉัยว่าไม่ก่อให้เกิดโรคและผลค้างเคียงใดๆ ต่อร่างกายมนุษย์

2.2.1.4 ทันตกรรมประดิษฐ์

ทันตกรรมประดิษฐ์เป็นองค์ความรู้ใหม่แขนงหนึ่งที่ช่วยในการสร้าง และทดแทนฟันที่สูญเสียไป การแก้ไขปัญหาฟันที่เปราะบางหรือแตกหัก เช่น วิธีการปลูกราฟัน ทำฟันไทเทเนียม การครอบฟันและสะพานฟัน ฟันปลอมแบบถอดได้ การอุดฟันด้วยวัสดุเรซินสีเดียวกับฟัน

2.2.1.5 ทันตกรรมจัดฟัน

การจัดฟันเป็นทันตกรรมสาขาหนึ่งที่ให้ความสำคัญของการจัดเรียงตัวของฟัน เพราะฟันที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบนั้นจะส่งผลต่อโครงหน้า ความสามารถในการบดเคี้ยว และความยากลำบากการดูแลรักษาความสะอาดฟัน

2.2.1.6 ทันตกรรมเด็ก

ทันตกรรมเด็กเป็นการดูแลรักษาฟันของเด็ก รวมถึงการให้ความรู้และวิธีการดูแลฟันน้ำนม ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับทันตกรรมป้องกัน เพื่อให้เกิดความสำคัญของการดูแลฟันอย่างถูกวิธีและป้องกันการเกิดฟันผุ การดูแลรักษาฟันตั้งแต่เด็กๆจะช่วยให้มีสุขภาพฟันที่แข็งแรงได้ในภายหลัง

2.2.1.7 ทันตกรรมป้องกัน

ทันตกรรมป้องกันเป็นการดูแลรักษาฟันแท้ตามธรรมชาติให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานไปตลอดชีวิต การดูแลเอาใจใส่สุขภาพฟันองเราตลอดเวลานั้น ย่อมดีกว่าการเข้ารับการรักษาหรือวิธีการบูรณะฟันอย่างแน่นอน

2.2.2 ประเภทของการครอบฟัน

2.2.3.1 การครอบฟันแบบใช้โลหะล้วน[1]

รูปที่ 2.13 การครอบฟันแบบใช้โลหะล้วน [23]

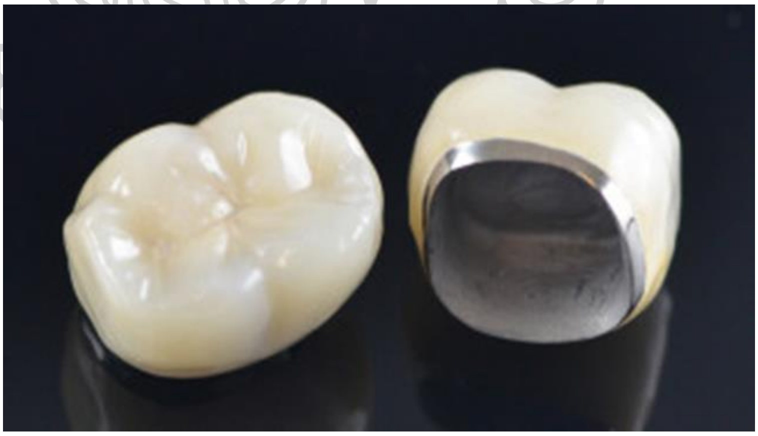
รูปที่ 2.13 แสดงการครอบฟันแบบใช้โลหะล้วน โดยวัสดุโลหะล้วนนั้นจะมีข้อดีคือ ความแข็งแรงและทนทานมากเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ จึงเหมาะสมกับการรักษาฟันกราม เพราะฟันกรามนั้นทำหน้าที่บดเคี้ยว ทำให้ได้รับแรงกดดันมากกว่าฟันบริเวณอื่นๆ จึงควรใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงในการรักษา และมีวิธีการผลิตที่ง่ายกว่าวิธีอื่น อีกทั้งมีผลดีต่อสุขภาพเหงือกมากกว่า แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถนำมาใช้ในการรักษาฟันบริเวณด้านหน้าได้เนื่องจากสีของโลหะชัดเจน ทำให้สังเกตเห็นได้ง่าย

2.2.3.2 การครอบฟันด้วยวัสดุเรซินและเซรามิก

รูปที่ 2.14 การครอบฟันแบบเรซินและเซรามิก [24]

รูปที่ 2.14 แสดงการครอบฟันด้วยวัสดุเซรามิกนั้นมีข้อดีคือ มีสีใกล้เคียงกับสีฟันมากที่สุด เพราะวัสดุเรซินและเซรามิกมีหลายเฉดสี ทันตแพทย์สามารถเลือกใช้โทนสีให้เข้ากับฟันจริงของผู้ป่วยได้ และเนื่องจากมีสีใกล้เคียงกับฟันตามธรรมชาติจึงนิยมใช้ในการรักษาฟันบริเวณด้านหน้า เพราะเป็นบริเวณที่เห็นได้ชัดเจน จึงไม่ควรใช้โลหะ และทำให้ภาพลักษณ์ของผู้ป่วยไม่เปลี่ยนแปลง ข้อเสีย คือ การครอบฟันประเภทนี้จะต้องกรอฟันปริมาณมาก โครงสร้างของฟันจึงถูกกรอออกไปมากเช่นกัน จึงง่ายต่อการอักเสบและติดเชื้อมากกว่าการครอบฟันประเภทอื่นๆ

2.2.3.3 การครอบฟันแบบใช้วัสดุเซรามิกผสมโลหะ



รูปที่ 2.15 การครอบฟันแบบใช้วัสดุเซรามิกผสมโลหะ [25]

การครอบฟันด้วยวัสดุเซรามิกผสมโลหะมีข้อดีคือให้ภาพลักษณ์ที่เป็นธรรมชาติ เพราะเซรามิกมีสีใกล้เคียงกับฟันจริง อีกทั้งมีส่วนผสมของโลหะช่วยเพื่อความแข็งแรงได้ มีความทนทานมากกว่าการครอบฟันแบบเซรามิกล้วนจึงเหมาะกับบริเวณฟันกรามซึ่งอยู่ในด้านในที่ต้องรับแรงกดดัน

มากกว่าฟันด้านหน้า แต่มีข้อเสียคือหากมีเหงือกร่น อาจมองเห็นเป็นสีเข้มบริเวณฟันที่นำมาครอบไว้ ซึ่งใช้กับบริเวณเหงือกเนื่องจากเป็นบริเวณที่เป็นโลหะ

2.2.3 กระบวนการครอบฟัน

การครอบฟันเป็นการบูรณะฟันที่ได้รับความเสียหายหรือแตกหัก จากสาเหตุต่างๆ เช่น การสบฟัน หรือ การเสื่อมสภาพของฟันตามกาลเวลา รวมถึงฟันที่ฟันที่ไม่ได้รับการบำรุงรักษาและฟันที่มีรูผุขนาดใหญ่ เพื่อให้ฟันมีความแข็งแรงและประสิทธิภาพใช้งานได้เหมือนเดิมดังเดิม การครอบฟันมักจะใช้วัสดุพอร์เซเลนหรือเซรามิกเป็นส่วนประกอบซึ่งสามารถปรับสีให้เข้ากับสีฟันตามธรรมชาติได้ ส่วนวัสดุอื่น เช่น ทอง โลหะผสม อะครีลิก และเซรามิก จะมีความแข็งแรงมากกว่าพอร์เซเลน จึงมักจะใช้สำหรับด้านหลังของฟัน โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้พอร์เซเลนเชื่อมติดกับภายนอกของโลหะ เพราะโลหะทั้งสองชนิดมีความแข็งแรงมากกว่า [11]

ก่อนที่จะทำการครอบฟันนั้น ฟันจะต้องมีขนาดเล็กที่จะใส่ที่ครอบฟันและสะพานฟันได้พอดี หรืออาจมีการกรอฟันเพื่อลดขนาดฟัน โดยทันตแพทย์จะทำแม่พิมพ์ฟันเพื่อพิมพ์ฟันสำหรับที่ครอบฟัน แต่ถ้าหากใช้พอร์เซเลน ทันตแพทย์จะกำหนดเฉดสีที่เหมาะสมสำหรับที่ครอบฟันและที่ยึดฟันปลอมเพื่อให้เข้ากับฟันที่มีอยู่ การใช้รอยพิมพ์เช่นนี้ ต้องใช้ห้องทดลองสำหรับทันตกรรมในการผลิตที่ครอบฟัน และที่ยึดฟันปลอมตามวัสดุที่ทันตแพทย์เป็นผู้กำหนด ที่ครอบฟันและที่ยึดฟันปลอมสำรองนี้จะนำมาครอบฟัน ที่เตรียมไว้สำหรับ ที่ครอบฟันและที่ยึดฟันปลอมถาวรที่กำลังผลิตอยู่ เมื่อที่ครอบฟันและที่ยึดฟันปลอมผลิตเสร็จแล้ว ฟันปลอมสำรองจะถูกถอดออก และใส่ชิ้นถาวรลงไปแทนที่โดยใช้ปูนอุดฟัน เป็นที่ยึด[26]

อายุการใช้งานของที่ครอบฟัน และที่ยึดฟันปลอมนั้นมีอายุการใช้งานตลอดชีวิต แต่บางครั้งอาจหลวมและหลุดได้ ดังนั้นจึงต้องให้ให้แน่น และการทำความสะอาดฟันก่อนที่จะใส่ที่ครอบฟันหรือสะพานฟันถาวรลงไป เพราะสะพานฟันอาจจะหลวมและทำให้กระดูกฟันที่ยึกไว้ถูกทำลายโดยเชื้อโรคได้ การทำให้เหงือกแข็งแรงนั้นต้องแปรงฟันด้วยยาสีฟันผสม ฟลูออไรด์สองครั้งต่อวัน และใช้ไหมขัดฟันทุกวัน นอกจากนี้ยังต้องไปพบทันตแพทย์ตามระยะ เวลาที่กำหนด และให้ทันตแพทย์ทำความสะอาด และเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากฟันปลอมและที่ยึดฟันปลอม ควรงดการเคี้ยวอาหารแข็ง น้ำแข็ง หรือของแข็งแรงต่างๆ การครอบฟันเหมาะสำหรับผู้ที่มีฟันหักบริเวณปลายฟัน หรือผู้ที่มีรูผุของฟันขนาดใหญ่ หรือมีการอุดฟันไว้แล้วซึ่งมีขนาดใหญ่และอุดมานานแล้ว

2.2.3.1 รอยอุดฟันที่มีการใช้งานนาน

ฟันที่มีการอุดมานานแล้ว จะเกิดการสึกหรอ และอ่อนแอลงเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาผ่านไป และหากมีการผุของฟันเพิ่มมากขึ้น อาจทำให้การอุดฟันแบบทั่วไปนั้นมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ ดังนั้นการครอบฟันจึงเป็นวิธีการเหมาะสมมากกว่า

2.2.3.2 รูผุขนาดใหญ่

ฟันที่มีรูผุขนาดใหญ่จะทำให้โครงสร้างของฟันอ่อนแอ การอุดฟันแบบธรรมดาไม่สามารถทำได้ จึงควรใช่วิธีการครอบฟันแทน เพื่อที่จะรักษาโครงสร้างของฟันเดิมไว้

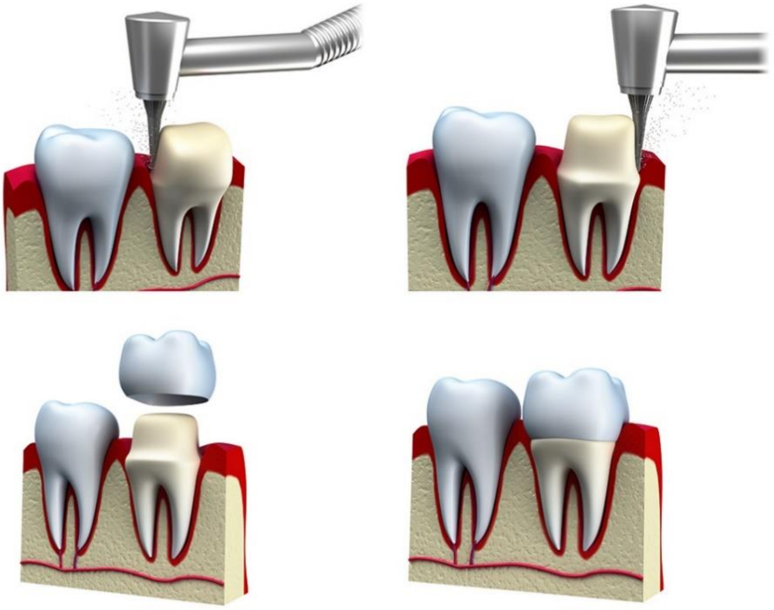
2.2.3.3 ฟันร้าวหรือฟันแตกหัก

ฟันที่แตกหักจากจากความเสียหายนั้น จะใช้วิธีการครอบฟันเพราะการอุดฟันนั้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากโครงสร้างอ่อนแอเกินไป การครอบฟันจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมเนื่องจากช่วยให้เกิดการยึดเกาะที่ดีกว่าและยังเป็นการป้องกันการแตกหักที่อาจเกิดขึ้นได้ หากมีการแตกหักใกล้บริเวณเส้นประสาท ทันตแพทย์จะแนะนำให้ทำการรักษารากฟันก่อนเข้ารับการักษาการครอบฟัน ในบางกรณีที่ฟันมีการแตกหรือหัก อาจไม่สามารถคงไว้ได้ จึงอาจต้องมีการถอนออก และใช้วิธีการครอบฟันทั้งซี่เพื่อเป็นการรักษา หากพบว่าฟันมีการแตกหัก และไม่ได้รับการรักษา อาจทำให้เกิดแรงกระแทกบริเวณฟันที่แตกหักมากเกินไป จนทำให้ฟันซี่นั้นมีความผิดปกติมากและแตกหักทั้งซี่ในที่สุด

2.2.3.4 การรักษารากฟัน

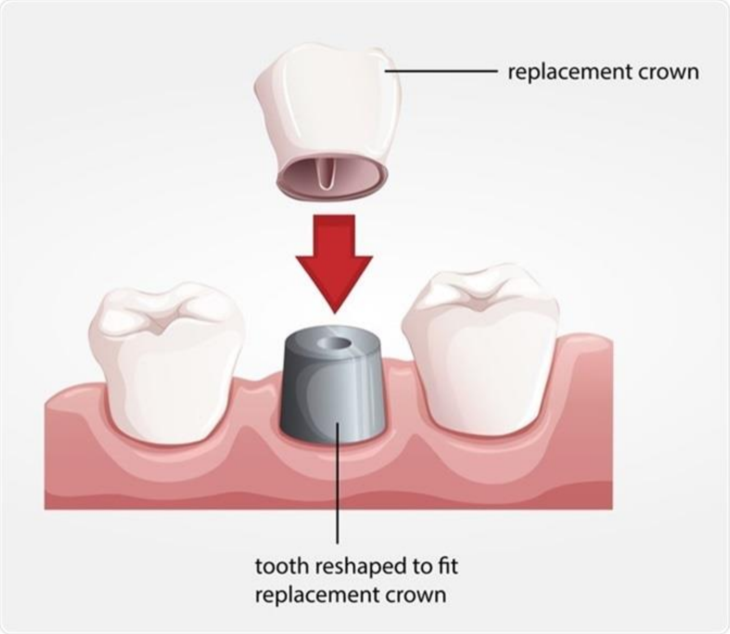
หลังจากการรักษารากฟันแล้ว ฟันซี่นั้นอาจยังมีความเปราะบางอยู่ และอาจจะทำให้แตกหักได้ การครอบฟันจึงเป็นวิธีการป้องกันที่ดีที่สุด

ขั้นตอนในการรักษามีหลายกระบวนการและหลายขั้นตอน อาจต้องใช้ระยะเวลาในการรักษา 2 ครั้ง เนื่องจากมีการนำแบบพิมพ์ฟันจำลองไปยังห้องแลปสำหรับทำฟันที่นำมาครอบฟัน เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมและพอดีในการรักษา[27]



รูปที่ 2.16 กระบวนการครอบฟัน [27]

รูปที่ 2.16 แสดงขั้นตอนในการครอบฟันชั่วคราว โดยในการนัดพบแพทย์ครั้งแรก ทันตแพทย์จะทำการตรวจฟันและฉีดยาชาบริเวณฟันที่จะกรอก่อนที่จะทำสะพานฟัน การกรอฟันนั้นทำเพื่อเป็นฐานให้แก่ฟันใหม่ที่จะมาครอบลงไป จากฐานฟันที่กรอกมีการอุดฟันไว้ส่วนที่อุดฟันจะดึงออก เนื่องจากมีการทำการครอบฟันลงไปแทนที่ จากนั้นจะพิมพ์ฟันเพื่อทำแบบจำลองและส่งแบบจำลองไปยังห้องแลปเพื่อทำการพิมพ์ฟันที่นำมาครอบฟัน จากนั้นทันตแพทย์จะทำการติดฟันที่นำมาครอบฟันแบบชั่วคราวสำหรับใช้งานระหว่างการรอผลิตฟันที่นำมาครอบฟันแบบถาวร โดยผู้ป่วยควรดูแลรักษาความสะอาด สุขอนามัยภายในช่องปากขณะติดฟันที่นำมาครอบฟันแบบชั่วคราว หากฟันที่นำมาครอบฟันชั่วคราวมีอาการหลวมหรือหลุด ให้พยายามใส่ฟันที่นำมาครอบฟันชั่วคราวไว้ตำแหน่งเดิมและทำการนัดทันตแพทย์เพื่อรักษาและแก้ไขหากไม่สามารถใส่ได้



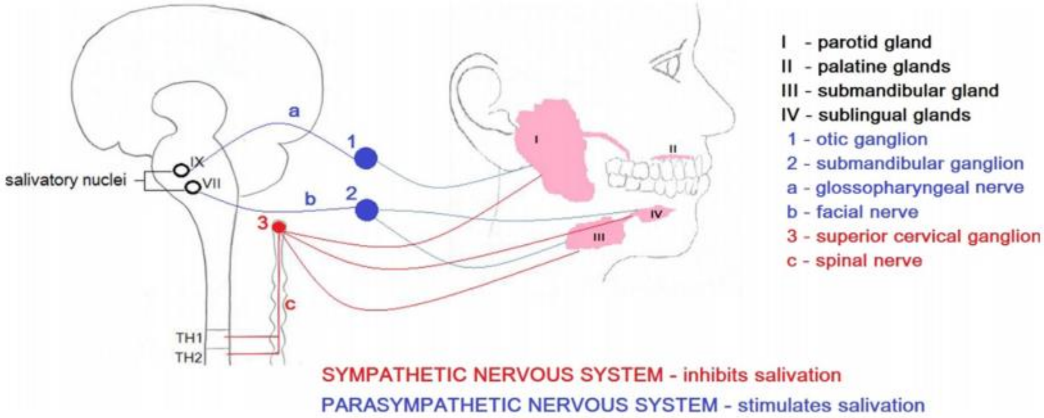
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการสวมใส่ฟันเทียมบนรากฟันปลอม [27]

การนัดพบแพทย์ครั้งต่อไป จะเป็นการรื้อฟันที่นำมาครอบฟันแบบชั่วคราวออก ติดยึดฟันที่นำมาครอบฟันแบบถาวรบนฟันโดยในรูปที่ 2.17 แสดงขั้นตอนการครอบฟันด้วยฟันเทียมหลังถอดที่ครอบฟันชั่วคราวออก จากนั้นตรวจเช็คพร้อมปรับแต่งให้มีความเหมาะสม

หมายเหตุ : อาจมีอาการเสียวฟันบริเวณฟันที่นำมาครอบฟันในช่วง 2-3 สัปดาห์แรก หากรับประทานอาหารหรือดื่มน้ำที่มีเย็นจัด ซึ่งอาการดังกล่าวถือว่าเป็นอาการปกติ และจะหายไปเองในเวลาไม่นาน แต่หากมีอาการเสียวฟันมาก หรือมีอาการไม่ระคายเคืองบริเวณฟันที่นำมาครอบฟัน ให้นัดพบทันตแพทย์ เพื่อเข้ารับการตรวจและปรับแต่งแก้ไขให้เหมาะสม

2.2.4 น้ำลายของมนุษย์

น้ำลายคือของเหลวที่ถูกขับออกมาจากต่อมน้ำลายขนาดใหญ่และเล็ก เป็นส่วนสำคัญที่สุดที่มีผลต่อสภาวะสมดุลของช่องปาก องค์ประกอบของน้ำลายและการหลั่งนั้นขึ้นอยู่กับต่อมน้ำลาย อายุ เพศ และปัจจัยกระตุ้น น้ำลายของมนุษย์นั้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำ 94-99% อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญ คือสัดส่วนของน้ำลายประกอบด้วยโปรตีน โดยเฉพาะไกลโคโปรตีน และไขมัน น้ำลายยังอุดมไปด้วยคาร์โบไฮเดรตเกลือและมี ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน เช่น ยูเรีย กรดยูริค กรดอะมิโนและ creatinine นอกจากขับถ่ายของต่อมน้ำลายแล้ว น้ำลายยังรวมถึงของเหลวจากเหงือก ส่วนประกอบในซีรั่ม แบคทีเรียและสารเมตาบอไลต์จากแบคทีเรีย เซลล์เยื่อบุผิวและเซลล์เม็ดเลือดขาว [28]



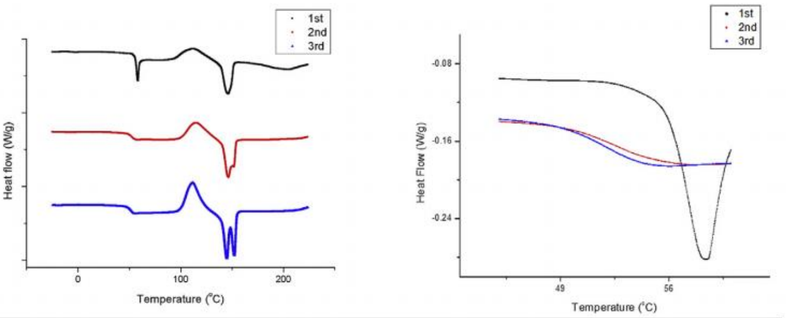
รูปที่ 2.18 ต่อมน้ำลายและส่วนประกอบของต่อมน้ำลาย [28]

ผู้ใหญ่จะหลั่งน้ำลายประมาณ 0.5-1 ลิตรต่อวันซึ่ง 80% เป็นเพราะการรับประทานอาหาร การหลั่งของน้ำลายจะถูกควบคุมอัตโนมัติโดยระบบประสาท แสดงในรูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาณและคุณภาพของน้ำลายนั้นเกิดจากโรคในช่องปาก เช่น โรคอัลไซเมอร์ โรคเบาหวาน โรคปอดเรื้อรัง และโรคมะเร็ง โดยเฉพาะเนื้องอกที่ศีรษะและคอ บทบาทสำคัญของน้ำลายคือการสร้างสภาพแวดล้อมการป้องกันสำหรับฟันและเยื่อบุในช่องปากต่อความหลากหลายของกลไกที่เป็นอันตราย สิ่งเร้าทางชีวภาพและเคมี นอกจากนี้ น้ำลายยังมีส่วนช่วยในระยะแรกของการย่อยอาหารและมีส่วนในการรับรู้รสชาติ คุณสมบัติของน้ำลายยังสามารถต้านเชื้อแบคทีเรีย เชื้อราและไวรัสได้ด้วย โดยการปรากฏตัวของน้ำลายอิมมูโนโกลบูลินรวมทั้งโปรตีนในระบบภูมิคุ้มกันเช่น lactoferrin และ lysozyme

น้ำลายเทียมนั้นมีไว้สำหรับใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในช่องปากเนื่องจากน้ำลายธรรมชาตินั้นมีตัวแปรที่มากเกินไป แต่ความเสถียรของวัสดุที่ใช้ในช่องปากนั้นเป็นสิ่งสำคัญ แต่ละองค์ประกอบของน้ำลายเทียมมีบทบาทสำคัญในการศึกษา ไม่เป็นจะเป็นการกัดกร่อน ค่า pH buffer การดูดซับน้ำ หรือความคงทนของวัสดุในช่องปาก เห็นได้ชัดว่าน้ำลายเทียมนั้น คล้ายกับน้ำลายมนุษย์สำหรับเงือนไขที่ใช้ทดสอบในช่องปาก ปัจจัย อื่นๆที่ต้องพิจารณาเช่น ความเป็นพิษ ปริมาณบัพเฟอร์ ส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ และอินทรีย์ โดยปริมาณแคลเซียมต้องปรับให้พอเหมาะกับค่า pH ที่เลือกเช่นเดียวกันกับองค์ประกอบทั้งหมด โดยขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความคงทนของเนื้อเยื่อฟันเมื่อสัมผัสกับสารละลาย [29]

จากบทวิจารณ์ในงานวิจัยของ Douglas Hsiao และคณะ [30] ได้วิเคราะห์ผลของ DSC ของพอลิแลคติกแอซิดในการให้ความร้อน 3 ครั้ง ในการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ปรากฏอุณหภูมิ Tg 55.35 °C คือการเปลี่ยนสถานะ glassy เป็นสถานะ rubbery นอกจากนี้ และพบพีคดูดความร้อนที่ชัดเจนที่ 56-60 °C. ส่วนในการให้ความร้อนครั้งที่ 2 และ 3 สังเกตเห็นพีค Tg ลดลงมาที่ 52.91 C และ 51.88 C ตามลำดับ ในส่วนของการให้ความร้อนทั้ง 2 ครั้ง พบว่าพีค endothermic หายไปใน Tg แต่ปรากฏพีคที่จุดหลอมเหลว 2 พีค การตกผลึกของ PLA เป็นสมบัติสำคัญในการให้ความร้อนครั้งแรก สังเกตเห็นจุดสูงสุดของความเป็นผลมาจากคืนสภาพของเอนทาปีเมื่อเส้นฟิลาเมนต์ PLA ได้รับความร้อน เป็นผลมาจากการดูดซับพลังงานความร้อน ผลึกของพอลิแลคติกแอซิดเกิดการจัดเรียงตัวใหม่และทำให้ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน พบจุดสูงสุดในการคายความร้อนอยู่ที่ 111.81 °C เป็นผลมาจากการตกผลึกแบบคายความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดเกิดเป็นพีค T_c และจุดหลอมเหลวสูงสุดอยู่ที่ 146.21 °C ในการให้ความร้อนครั้งที่ 2 และ 3 จะสังเกตอุณหภูมิหลอมเหลว 2 จุด โดยแสดงเป็น T_{m1} และ T_{m2} เป็นผลมาจากความหนาของผลึก lamellae ที่แตกต่างกันของพอลิแลคติกแอซิด โดยค่า T_{m1} เกิดจากการหลอมผลึกที่เกิดจากกระบวนการ Cold crystallization (T_c) ในขณะที่ T_{m2} เป็นผลมาจากการหลอมผลึกในกระบวนการให้ความร้อน และพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนซ้ำคือการให้ความร้อนครั้งที่ 2 และ 3 นั้นจะเพิ่มความแตกต่างระหว่าง T_{m1} และ T_{m2}

a



b	T_g (°C)	T_c (°C)	T_{m1}(°C)	T_{m2} (°C)
1st heating	55.35	111.39	146.21	
2nd heating	52.91	114.66	146.58	151.91
3rd heating	51.88	111.43	145.02	152.19

รูปที่ 2.19 ผล DSC ของ PLA (a) DSC thermogram ของการให้ความครั้งที่ 1 2 และ 3 (b) แสดงค่า Tg, Tc, T_{m1}, T_{m2} ของกราฟ PLA [30]

จากงานวิจัยของ Lamouri และ Samir [31] พบว่าไบโอแอกทีฟกลาส(Bioactive glasses) เป็นวัสดุที่มีความสำคัญ ที่ใช้งานได้หลากหลายทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อและทันตกรรม โดยในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อทางทันตกรรมนั้น โครงสร้างนาโนควรจะมีสมบัติที่น่าสนใจคือ มีพื้นผิวสูงและรูพรุนที่เหมาะสมกับพื้นผิว โดยในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้างเส้นใยไบโอแอกทีฟกราฟ (Bioactive glasses fiber) ขึ้นมาจาก ซิลิกา 2 ชนิด คือ ชนิด 45S5 และ 13-93 โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิ่ง (Electrospinning) ในการขึ้นรูปเส้นใยไบโอแอกทีฟกราฟ จากนั้นทำการจุ่มแช่ในสารละลายน้ำลายเทียมสองชนิดที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน โดยทำการจุ่มแช่และวัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงของธาตุในช่วงเวลาต่างๆ ผลการวิจัยพบว่าทั้งแก้วไบโอแอคทีฟ 45S5 และ 13-93 แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแร่ธาตุสูงในสารละลายน้ำลายเทียมทั้ง 2 ชนิด โดยในตาราง 2.3 แสดงส่วนผสมของน้ำลายเทียมที่ใช้ในงานวิจัย อย่างไรก็ตามอัตราการก่อตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) พบว่าขึ้นอยู่กับชนิดของแก้วและองค์ประกอบของน้ำลายเทียม การก่อตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) เกิดขึ้นในซิลิกาชนิด 45S5 ก่อนชนิด13-93 แต่หลังจาก 30 วันของการจุ่มแช่พบว่าพื้นผิวของ 13-93 ไฟเบอร์กลาสนั้นเปลี่ยนแปลงเป็นผลึก HA บริสุทธิ์ในขณะที่พื้นผิวซิลิกาชนิด 45S5 มีเฟสผลึกบางอย่างเพิ่มเติมเช่น Aragonite และแคลไซต์

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมของสารเคมีที่นำมาผสมเป็นน้ำลายเทียมตามสูตรของ SAGF medium(AS-1) และ Carter-Brugirard Saliva(AS-2) [31]

Substances	Concentration (g/l)	
	SAGF medium (AS-1)	Carter-Brugirard Saliva (AS-2)
NaCl	0.1256	0.70
KCl	0.9639	1.20
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0.2278	–
KH_2PO_4	0.6545	0.20
Urea	0.2000	0.13
NH_4Cl	0.1780	–
$NaHCO_3$	0.6308	1.50
KSCN	0.1892	0.33
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	0.7632	–
Na_2HPO_4	–	0.26

จากงานวิจัยของ Jame Jin Wu Lee และ คณะ[32] เป็นการศึกษาเปรียบเทียบสารเคลือบฟันกรามของมนุษย์ โดยใช้เทคนิค Nanoindentation เพื่อใช้ทำข้อมูลในส่วน มอดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus) และ ความแข็งบนพื้นผิว(Hardness,H) ในส่วนต่างๆของสารเคลือบฟันและพื้นผิว โดยตารางที่ 2.4 แสดงค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและความแข็งที่พื้นผิวฟันกราม ของมนุษย์(Homo sapiens) กอริลล่า(Gorilla) ซินแปนซี(Pam troglodytes) และ อุรังอุตัง(Pongo pyqmaeus) โดย

เป็นค่าที่ได้จากลิงเพศเมียทุกตัว ส่วนมนุษย์ไม่ระบุเพศ จากผลการทดสอบพบว่า ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น(Elastic modulus) ของสารเคลือบฟันในกลุ่มตัวอย่าง ของมนุษย์มีค่าต่ำที่สุด ตามมาด้วย กอริลล่า อุรังอุตัง และ ชิมแปนซี

ตารางที่ 2.4 ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งที่พื้นผิวของสารเคลือบฟัน

	Elastic modulus, *E* (GPa)	Hardness, *H* (mm)
Gorilla gorilla	93.0 ± 3.2	4.40 ± 0.20
Pongo pygmaeus	100.3 ± 2.9	4.83 ± 0.23
Pan troglodytes	104.0 ± 2.8	4.80 ± 0.20
Homo sapiens	90.6 ± 4.6	4.01 ± 0.37

มหาวิทยาลัยศิลปากร

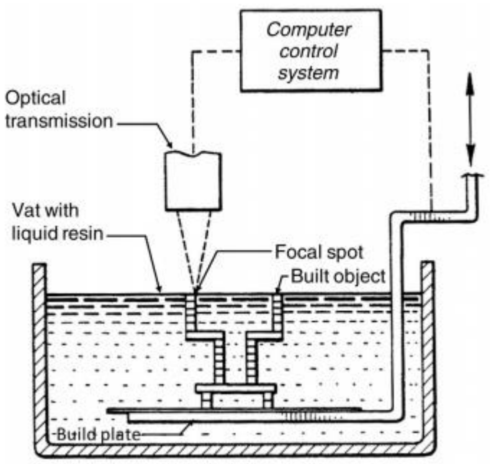
2.3 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

2.3.1 ความสำคัญของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

เทคโนโลยีใหม่ๆเกิดขึ้นมากมายและเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบันคือ เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) โดยการพิมพ์ 3 มิติเป็นการสร้างโมเดลเสมือนจริง(Prototype) หรือการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบนั้นเอง เครื่องพิมพ์ 3 มิติไม่ใช้เรื่องใหม่แต่มีประวัติมานานกว่า 30 ปีแต่ที่เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติกลับมาเป็นที่นิยมอีกครั้ง เพราะมีความพยายามในการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติให้เข้าสู่ผู้ใช้ในระดับครัวเรือนมากขึ้น นอกจากนั้น วิทยาศาสตร์ในหลายๆสาขา ก็พยายามในการประยุกต์ใช้หลักการของการพิมพ์ 3 มิติไปสู่การวิจัยในระดับที่ซับซ้อนขึ้นเรื่อยๆ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

หลักจากที่เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ ก็มีเทคนิควิธีการซับซ้อนขึ้นมาพร้อมกันในหลายๆ สายงาน เช่น การออกแบบ วิศวกรรม์ การแพทย์ จนถึงการบินและวิทยาการอวกาศ อีกทั้งมีเทคนิคเกิดขึ้นมากมายเพื่อให้เหมาะสมกับชิ้นงานและชนิดของวัสดุที่ต้องการขึ้นรูป ตัวอย่างของเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน [33]

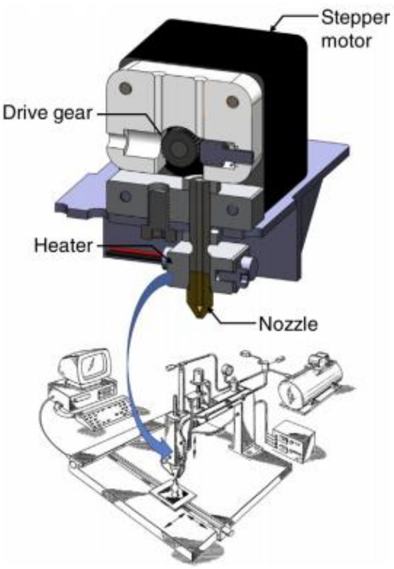
2.3.1.1 Stereo lithography (SLA)



รูปที่ 2.20 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Stereo lithography (SLA) [33]

เทคนิค SLA ถือว่าเป็นเทคโนโลยี rapid prototype แบบแรกที่คิดค้นขึ้นมา ในรูปที่ 2.20 แสดงเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติด้วยเครื่อง SLD โดยเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการยิงเลเซอร์ไปบนของเหลว เพื่อให้ของเหลวในแต่ละชั้นแข็งตัว โดยวัสดุที่ใช้จะเป็น liquid photopolymer (resin) โดยชิ้นงานที่ได้จะมีความละเอียดและแม่นยำสูง แต่ราคาเครื่องจักรและการค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาก็สูงตามไปด้วย ตัวอย่างการใช้เทคโนโลยี SLA ในการทำหมากรุกใช้เวลาทำทั้งสิ้น 2 ชั่วโมง

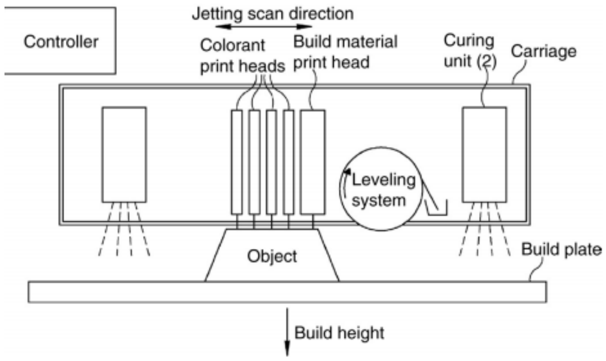
2.3.1.2 Fused Deposition Modeling (FDM)



รูปที่ 2.21 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) [33]

เทคนิค FDM เป็น เทคนิคที่แพร่หลายที่สุด เพราะใช้วัสดุเป็นเส้นฟิลาเมนต์หรือโลหะที่พันเป็นม้วน โดยในรูปที่ 2.21 แสดงขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเครื่อง FDM โดยเส้นฟิลาเมนต์จะถูกส่งผ่านไปยังหัวดาย โดยหัวดายจะหลอมแท่งพลาสติกให้หลอมเหลวก่อนนำมาพิมพ์ลงบนแท่นวาง เมื่อพลาสติกออกจากหัวดายพลาสติกจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว โดยเครื่องพิมพ์จะพ่นชิ้นงานออกมาทีละชั้น จนกระทั่งเป็นชิ้นงานโมเดล 3 มิติตามรูปทรงที่ต้องการ [34]

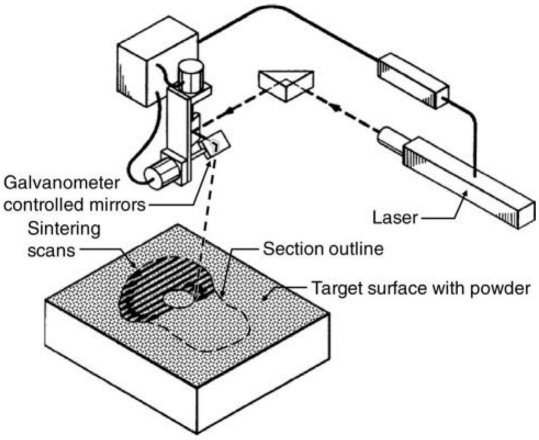
2.3.1.3 3D jet printer systems



รูปที่ 2.22 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ 3D jet printer systems [33]

รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติด้วยเครื่องชนิด 3D jet printer จะใช้หลักการของ Ink Jet printer แต่เป็นการพิมพ์ในรูปแบบ 3 มิติ โดยการพ่นวัสดุที่เป็น เทอร์โมพลาสติก เช่น โพลีเอสเตอร์ ผ่านหัวพ่นให้เป็นไปตามรูปทรงที่ต้องการ โดยเป็นวิธีที่ใช้งานง่าย และสร้างแบบจำลองได้อย่างรวดเร็ว วิธีนี้มีจุดเด่นอยู่ที่สามารถเลือกสีต่างๆได้

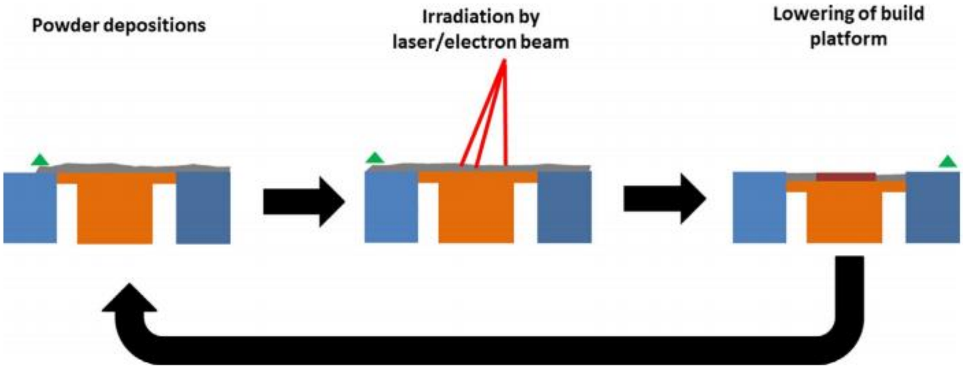
2.3.1.4 Selective Laser Sintering (SLS)



รูปที่ 2.23 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Selective Laser Sintering (SLS) [33]

ในรูปที่ 2.23 แสดงขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติด้วยเครื่องชนิด SLS โดยการเผาผลึกวัตถุดิบที่ใช้ด้วยแสงเลเซอร์ โดยใช้หลักการเดียวกันกับ SLA แต่ทำให้สามารถใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่า เช่น Thermoplastic Nylon, Polyamide และ Polystyrene โดยวัตถุดิบที่ใช้จะอยู่ในรูปผง เช่น โลหะ พลาสติก เซรามิกและแก้ว โดยเครื่องจะใช้เลเซอร์วาดรูปแบบขึ้นทีละชั้นและพ่นผงเหล่านี้ลงไปหลอมละลายกระทั่งกลายเป็นชิ้นงาน แต่วิธีนี้ใช้ในอุตสาหกรรมเท่านั้น

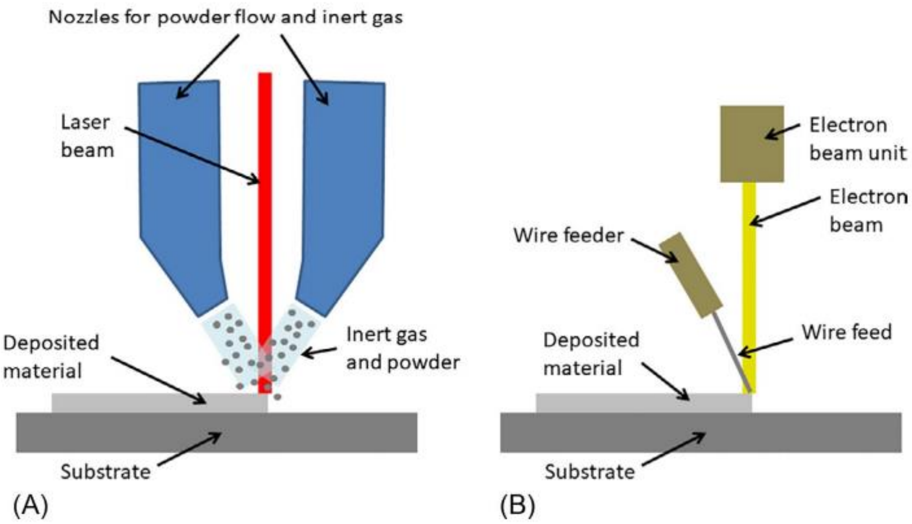
2.3.1.5 Powder bed fusion (PBF)



รูปที่ 2.24 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Powder bed fusion (PBF) [35]

รูปที่ 2.24 แสดงเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Powder bed fusion (PBF) โดยเทคนิคนี้นิยมใช้ในวัสดุประเภทโลหะ โดยเทคนิคนี้จะทำการยิงเลเซอร์หรือลำแสงอิเล็กตรอนลงไปบนชั้นของผงโลหะเพื่อทำให้โลหะหลอมเหลว โดยชั้นของผงโลหะจะถูกลำเลียงและคัดเลือกจากโปรแกรม CAD จากนั้นเลเซอร์หรือลำแสงอิเล็กตรอนจะยิงไปยังพื้นผิวของผงโลหะเพื่อทำการหลอมเหลวผงโลหะไปทีละชั้นๆ และหนาขึ้นเรื่อยๆตามชิ้นงานที่ออกแบบ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ 3 มิติ โดยเทคนิคนี้สามารถทำได้ในสภาพแวดล้อมที่เป็น ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์หรือก๊าซอาร์กอนเท่านั้น [36]

2.3.1.6 Direct energy deposition (DED)



รูปที่ 2.25 เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Direct energy deposition (DED) [35]

รูปที่ 2.25 แสดงเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยวิธีการ Direct energy deposition (DED) โดยวิธีการ DED เป็นวิธีการเพิ่มวัสดุไปพร้อมกับการให้ความร้อน โดยการให้ความร้อนจะเป็นการให้แบบเลเซอร์ ลำแสงอิเล็กตรอน หรือพลาสมา วัสดุที่เป็นผงโลหะหรือลวดจะทำให้ประสิทธิภาพในการสะสมของชั้นเลเยอร์ต่ำลงเมื่อเทียบกับลวดโลหะเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีบางส่วนที่ไม่ถูกหลอมเหลว โดยลำแสงอิเล็กตรอนต้องการสภาวะที่เป็นสุญญากาศเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการออกซิเดชันต่อระบบเลเซอร์

2.3.2 วัสดุที่นิยมใช้ในเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

2.3.2.1 วัสดุโลหะและอัลลอย (Metal and Alloys) [37]

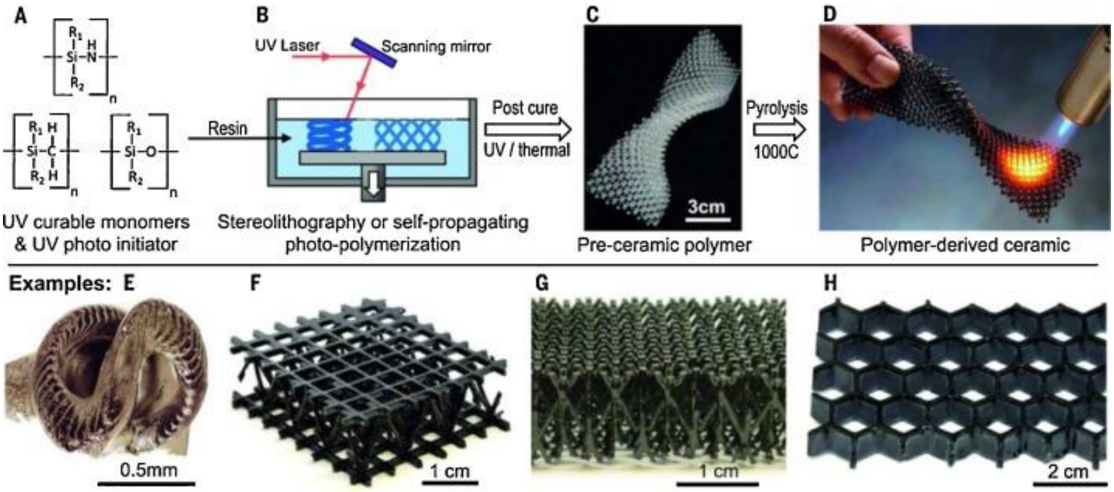
โดยทั่วไปในเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ วัสดุประเภทโลหะจะถูกใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อใช้ในแอปพลิเคชันขั้นสูงในอุตสาหกรรมด้านการบินและอวกาศ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมด้านการแพทย์ และการป้องกันด้านยานยนต์ ขั้นตอนการพิมพ์ 3 มิติของวัสดุประเภทโลหะจะประกอบด้วยขั้นตอนการหลอมโลหะ (ผงหรือลวด) โดยใช้แหล่งพลังงานเช่น เลเซอร์หรือลำอิเล็กตรอน วัสดุโลหะที่หลอมเหลวจะถูกพิมพ์ออกมาเป็น ชั้นๆ เพื่อสร้างชิ้นงาน โดยเทคนิคที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับการพิมพ์โลหะคือ powder bed fusion (PBF) และ Direct energy deposition (DED)

2.3.2.1. วัสดุเซรามิก(ceramics materials) [38]

วัสดุจำพวกเซรามิกและคอนกรีตไม่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ เพราะลักษณะที่เป็นผงของเซรามิกนั้นไม่สามารถหลอมรวมกันได้โดยการให้ความร้อน ณ จุดหลอมเหลว(heating point) แต่ในทางตรงกันข้ามโลหะและพอลิเมอร์สามารถหลอมรวมกันได้โดยการให้ความร้อนจนถึง Glass transition temperature(Tg) หรือ อุณหภูมิหลวมเหลว(Tm) เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์และโลหะแล้วเซรามิกจุดหลอมเหลวที่สูงมาก เป็นหนึ่งในความท้าทายอย่างมากในการหาสารเติมแต่งมาใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ปัจจุบันเทคนิค AM สามารถผลิตชิ้นงานเซรามิกได้โดยไม่มีรอยแตก หรือ รูพรุนขนาดใหญ่โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของพารามิเตอร์กระบวนการ AM และได้เซรามิกที่มีสมบัติเชิงกลที่คล้ายกับชิ้นส่วนเซรามิกแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ยังสามารถผลิตชิ้นส่วนเซรามิกที่ปราศจากรูพรุนได้อีกด้วยโดยใช้เทคนิค Colloidal processing techniques หรือ ขั้นตอนการเพิ่มความหนาแน่นให้สูงขึ้นหลังจากกระบวนการ AM สิ่งสำคัญคือต้องเน้นว่ากระบวนการทางอ้อมที่เกี่ยวข้องกับหลายขั้นตอนมีความเหมาะสมมากขึ้นในการผลิตเซรามิคชนิดต่างๆในขณะที่กระบวนการ AM โดยตรงซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นตอนเดียวเท่านั้นเหมาะสมกว่าในการผลิตชิ้นส่วนเซรามิคในเวลาอันสั้น

อย่างไรก็ตามกระบวนการ AM ก็มีข้อจำกัดคือความพร้อมในการใช้งานเป็นวัสดุเริ่มต้นสำหรับการผลิตวัตถุดิบ เพื่อตอบสนองความท้าทายของการผลิตเซรามิกในกระบวนการ AM Eckel และคณะ ได้เสนอแนวทางใหม่ในการผลิตชิ้นส่วนเซรามิกจากการพิมพ์ 3 มิติ โดยจะใช้มอนอเมอร์ผสมกับเซรามิกก่อน โดยใช้ UV เป็น photo-initiaton ดังแสดงในรูปที่ 2.26 โครงสร้างที่มีรูปแบบที่ซับซ้อนและมีรูพรุน เช่น เหล็กไขจุก(corkscrew) และโครงสร้างรังผึ้งที่สามารถประดิษฐ์ได้โดยง่าย

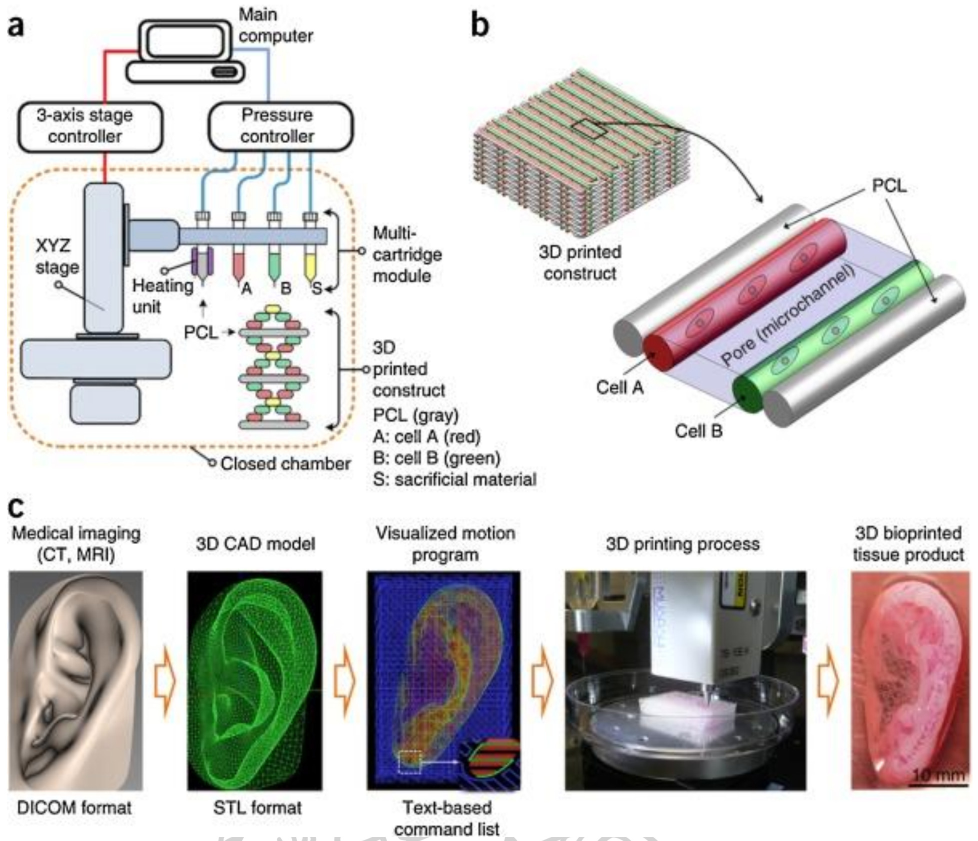
โดยใช้เครื่องพิมพ์แบบ stereolithography apparatus (SLA) 3D printer ชิ้นส่วนที่พิมพ์ 3 มิติ มีความเสถียรทางความร้อนสูงหลังการเผาด้วยกระบวนการ ไพโรไรซิสที่อุณหภูมิ 1000 °C และไม่มีการหดตัว วัสดุเซรามิคเหล่านี้เป็นที่สนใจของระบบป้องกันความร้อนชิ้นส่วนยานยนต์อุปกรณ์บรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ระบบไฟฟ้าเครื่องกลไฟฟ้าเครื่องเขียนแบบมีรูพรุน



รูปที่ 2.26 โครงสร้างรูพรุนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ[38]

2.3.3.2 วัสดุชีวภาพ(Bio material) [38]

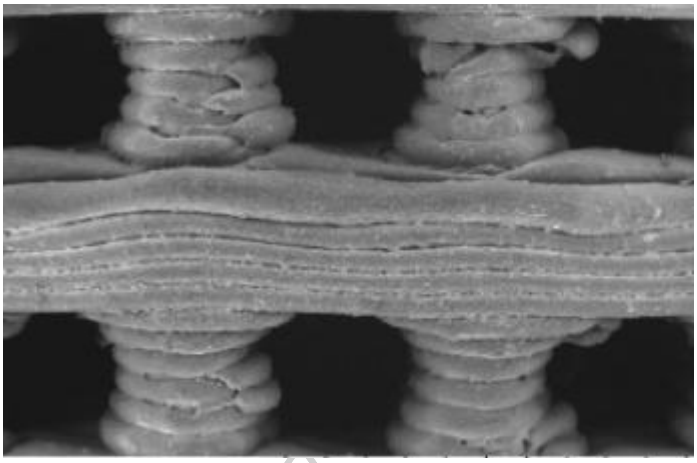
การพัฒนาล่าสุด วัสดุที่เข้ากันได้ทางชีวภาพสามารถได้ใช้การพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติสำหรับเนื้อเยื่อที่มีชีวิตแล้ว ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับยา เพื่อตอบสนองความจำเป็นในการปลูกถ่ายอวัยวะ โดยทั่วไปการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติของวัสดุชีวภาพมีข้อจำกัดอย่างมาก พอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์ทางชีวภาพ เช่น ไดบล็อกโคพอลิเมอร์(diblock copolymers) โซเดียมแอลจิเนต(sodium alginate) ไคโตซานและพอลิเมอร์ที่ใช้อะครีเลท แต่การเลือกวัสดุเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ หนึ่งในความท้าทายที่สำคัญสำหรับการพิมพ์ขึ้นรูปวัสดุชีวภาพ คือการสร้างโครงสร้างเซลล์แบบ 3 มิติ ด้วยโครงสร้างที่สมบูรณ์ Kang และคณะ รายงานว่าสามารถสร้างโครงสร้างเนื้อเยื่อของมนุษย์ได้หลายรูปทรงที่มีและให้สมบัติเชิงกลที่ดีดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ระบบ Integrated tissue–organ printer (ITOP) [38]

2.3.2.3 วัสดุพอลิเมอร์และคอมโพสิต(Polymer and Composite materials) [37]

วัสดุพอลิเมอร์ถือเป็นวัสดุที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมการพิมพ์ 3 มิติเนื่องจากมีความหลากหลายและง่ายต่อการนำไปใช้กับกระบวนการพิมพ์ 3 มิติที่แตกต่างกัน พอลิเมอร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ จะมีลักษณะเป็นเส้นฟิลาเมนต์ ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ความสามารถในการใช้งานการพิมพ์ 3 มิติของพอลิเมอร์และคอมโพสิตนั้นมีการค้นพบมาเป็นเวลาหลายปี ในการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นการบินและอวกาศ สถาปัตยกรรม การผลิตของเล่นและการแพทย์ ข้อดีของการผลิตคอมโพสิตโดยใช้การพิมพ์ 3 มิติ คือความสามารถในการปรับแต่งรูปทรงเรขาคณิตที่มีความแม่นยำสูง นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าวิธีการก่อสร้างแบบดั้งเดิมอื่น เช่นการขึ้นรูปและการอัดขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ที่กำหนดเอง ในทางกลับกันผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่สร้างโดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติมักใช้เป็นชิ้นงานต้นแบบ(prototypes) เนื่องจากขาดความแข็งแกร่งและความสามารถในการใช้งานบางอย่าง โดยในรูปที่ 2.26 แสดงชิ้นงาน Scaffold ที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติจากพอลิแลคติกแอซิดโดยถ่ายภาพจากเทคนิค SEM [37]



รูปที่ 2.28 โครงสร้าง Scaffold ของ PLA ที่ได้จากการพิมพ์ 3 มิติ [37]

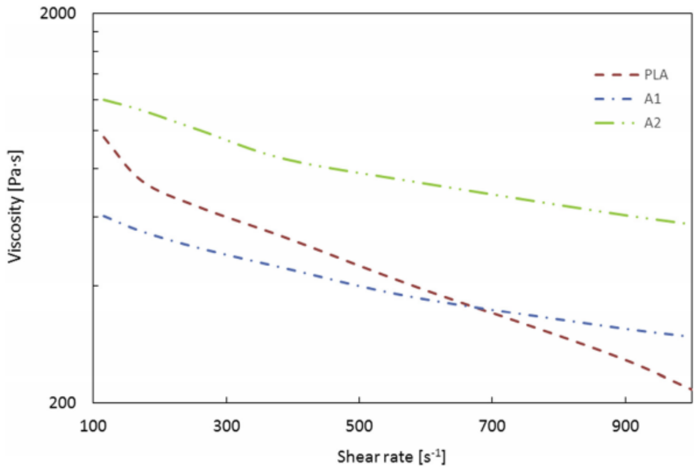
จากงานวิจัยของ M. Heidari-Raran และคณะ [39] ได้ทำการทดลองโดยการนำพอลิแลคติกแอซิดผสมกับเส้นใยต่อเนื่องของเทอร์โมพลาสติก(CRFT) และนำมาขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีพิมพ์ภาพ 3 มิติ ด้วยเครื่อง fused deposition modeling (FDM) ตารางที่ 2.5 แสดงค่าเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิด(PLA)และวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยเทอร์โมพลาสติก(CCFR-PLA) จากการทดสอบพบว่าสมบัติเชิงกลทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลง ค่า Tensile modulus และ Ultimate tensile strength ของ CCFR-PLA เมื่อเทียบกับ PLA มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 208% และ 36% ตามลำดับ ความเครียดของ CCFR-PLA ลดลงประมาณ 62% เนื่องจากการเสริมแรง CCFR-PLA

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลพอลิแลคติกแอซิด(PLA)และวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยเทอร์โมพลาสติก(CCFR-PLA)

Mechanical Properties	Pure PLA	CCFR-PLA	Difference, %
Tensile modulus (GPa)	2.69 ± 0.18	8.28 ± 0.56	207.8
Ultimate tensile strength (MPa)	44.86 ± 1.8	61.4 ± 2.1	36.8
Failure strain (%)	2.13 ± 0.12	0.81 ± 0.06	−61.9
Bending modulus (GPa)	2.87 ± 0.07	13.42 ± 0.31	367.6
Max. bending strength (MPa)	72.76 ± 1.6	152.1 ± 2.29	109

จากงานวิจัยของ Antonio Arnesano และคณะ [40] ทำการศึกษาโดยการผสมอลูมิเนียมออกไซด์ลงในเส้นใยของเทอร์โมพลาสติก โดย A1 คือเส้นใยของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์50%โดยน้ำหนัก และ A2 คือเส้นใยของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์57% โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปเป็นเส้นฟิลาเมนต์จากนั้นนำไปพิมพ์ภาพ 3 มิติด้วยเครื่องชนิด FDM และทำการศึกษาสมบัติรีออลอยี โดยได้ผลแสดงในรูปที่ 2.27 แสดงความหนืดของเส้นใยของเทอร์โม

พลาสติกที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ A1(50%) A2(57%) และPLA เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างความหนืดของ PLA มีค่าที่ต่ำกว่าอลูมิเนียมออกไซด์ 50%(A1) แต่สูงกว่าอลูมิเนียมออกไซด์57%(A2) โดยค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่ใช้ในการพิมพ์ภาพ 3 มิติ ความหนืดที่สูงขึ้นของ A2 นั้นมาจากปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบพฤติกรรมความหนืดเส้นใยของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ A1(50%) A2(57%) และ PLA [40]

จากงานวิจัยของ Zhaobing Liu และคณะ [41] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบที่แตกต่างกัน คือ ผงไม้ เซรามิก ทองแดง อลูมิเนียม และเส้นใยคาร์บอน โดยทดสอบสมบัติการดึงยืด(Tensile) และ การดัดโค้ง(Flexural) โดยได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.6 และ 2. ตามลำดับ พบว่าการผสมวัสดุเสริมองค์ประกอบลงไปนั้นช่วยให้เกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า modulus ของวัสดุ โดยในสูตรที่มีการผสม เซรามิก ทองแดง และอลูมิเนียมนั้นมีการเพิ่มขึ้นของค่า Tensile modulus และ Flexural modulus และสูตรที่เติมเซรามิกนั้นมีค่า Tensile modulus และ Flexural modulus สูงสุด โดยมีค่า 1056.31 MPa และ 4621.37 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ค่า Tensile strength และ Flexural strength เป็นของสูตรที่มีการผสมทองแดง โดยมีค่า 58.28 MPa และ 118.67 MPa ตามลำดับ ส่วนสูตรที่ผสม เส้นใยคาร์บอน และไม้ พบว่ามีค่า Tensile modulus และ Flexural modulus ลดลง เมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์

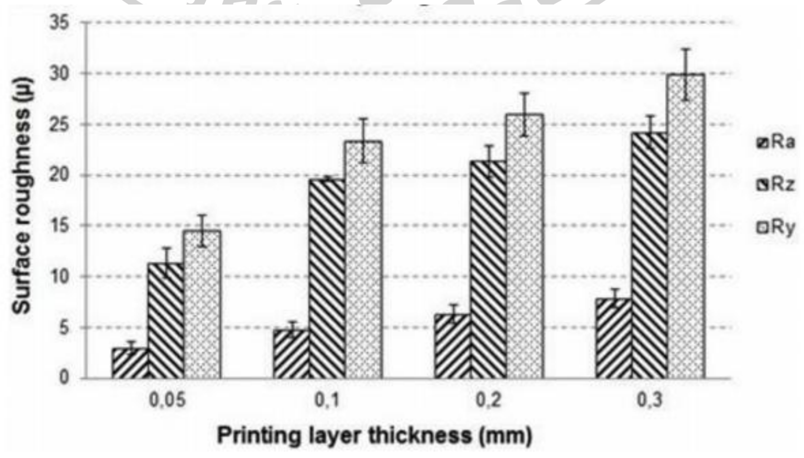
ตารางที่ 2.6 สมบัติการดึงยืดของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบชนิดต่างๆ

Mechanical properties of tensile tests	Printing orientations	Layer deposition	Materials					
			PLA	PLA+wood	PLA+ceramic	PLA+copper	PLA+aluminum	PLA+carbon fiber
Tensile modulus, MPa	Flat	0°/90°	707.1	656.8	1042.5	1002.6	838.4	596.4
		+45°/−45°	712.2	696.7	1056.3	1016.9	779.5	670.0
	On-edge	0°/90°	901.0	808.1	962.4	883.2	649.7	745.7
		+45°/−45°	800.5	784.1	907.2	836.2	760.9	717.4
	Upright	0°/90°	696.2	645.0	–	–	–	427.1
		+45°/−45°	738.7	673.0	–	–	–	584.3
Tensile strength, MPa	Flat	0°/90°	42.4	29.5	43.2	40.3	40.2	32.8
		+45°/−45°	47.0	33.4	46.3	49.3	42.8	31.6
	On-edge	0°/90°	63.4	35.9	46.5	53.7	46.8	38.2
		+45°/−45°	67.6	38.7	45.0	58.3	51.1	41.3
	Upright	0°/90°	30.5	19.1	–	–	–	16.8
		+45°/−45°	27.8	19.1	–	–	–	20.0
Elongation at break, %	Flat	0°/90°	6%	5%	5%	8%	5%	8%
		+45°/−45°	5%	5%	5%	5%	7%	6%
	On-edge	0°/90°	7%	5%	6%	6%	7%	6%
		+45°/−45°	8%	6%	7%	7%	7%	6%
	Upright	0°/90°	3%	4%	–	–	–	5%
		+45°/−45°	4%	3%	–	–	–	4%

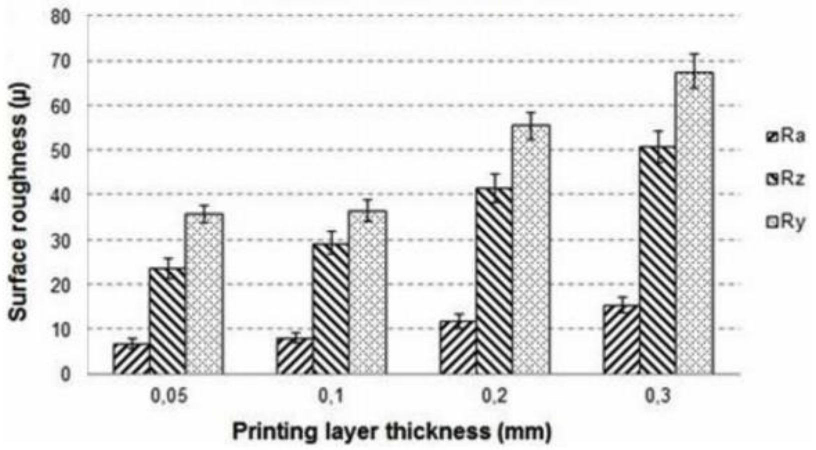
ตารางที่ 2.7 สมบัติการดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดวัสดุเสริมองค์ประกอบชนิดต่างๆ

Mechanical properties of flexural tests	Printing orientations	Layer deposition	Materials					
			PLA	PLA+wood	PLA+ceramic	PLA+copper	PLA+aluminum	PLA+carbon fiber
Flexural modulus, MPa	Flat	0°/90°	2075.2	1696.8	3022.3	2174.0	2492.1	1738.4
		+45°/−45°	2446.4	1749.8	3128.3	2227.0	2470.9	1729.7
	On-edge	0°/90°	2286.8	2704.3	4503.0	3118.9	3207.5	2844.3
		+45°/−45°	2538.4	2651.3	4621.4	3845.1	3275.8	2939.2
	Upright	0°/90°	2605.9	1992.8	–	–	–	1325.7
		+45°/−45°	2478.3	1653.0	–	–	–	1272.6
Flexural strength, MPa	Flat	0°/90°	69.7	40.4	57.8	55.5	62.8	50.3
		+45°/−45°	79.5	52.1	70.1	66.3	64.7	47.6
	On-edge	0°/90°	104.5	70.4	97.2	107.6	91.5	74.2
		+45°/−45°	109.5	71.0	100.1	118.7	97.8	75.6
	Upright	0°/90°	51.9	37.9	–	–	–	30.9
		+45°/−45°	42.4	27.1	–	–	–	25.9
Deflection at break, %	Flat	0°/90°	3%	2%	2%	3%	4%	4%
		+45°/−45°	4%	4%	3%	3%	5%	5%
	On-edge	0°/90°	4%	3%	3%	3%	6%	5%
		+45°/−45°	3%	4%	3%	3%	7%	5%
	Upright	0°/90°	2%	3%	–	–	–	3%
		+45°/−45°	2%	2%	–	–	–	3%

จากวิจัยของ Nadir Ayrilmis [12] ทำการศึกษาสมบัติของพื้นผิวของวัสดุที่ส่งผลต่อการพิมพ์ 3 มิติ โดยวัสดุที่ใช้เป็น PLA ผสมผงไม้บดและขึ้นรูปเป็นเส้นฟิลาเมนต์ เมื่อใช้วัสดุที่พิมพ์แบบสามมิติมีการพิมพ์เป็นชั้นบางๆซ้อนทับกัน หรือการเคลือบด้วยของเหลวบนพื้นผิว พื้นผิวที่หยาบและความสามารถในการเปียกผิวของวัสดุมีบทบาทสำคัญในการกำหนดคุณภาพของชิ้นงาน



รูปที่ 2.30 ความหยาบของพื้นผิวขนานกับทิศทางของการพิมพ์ 3 มิติ[12]

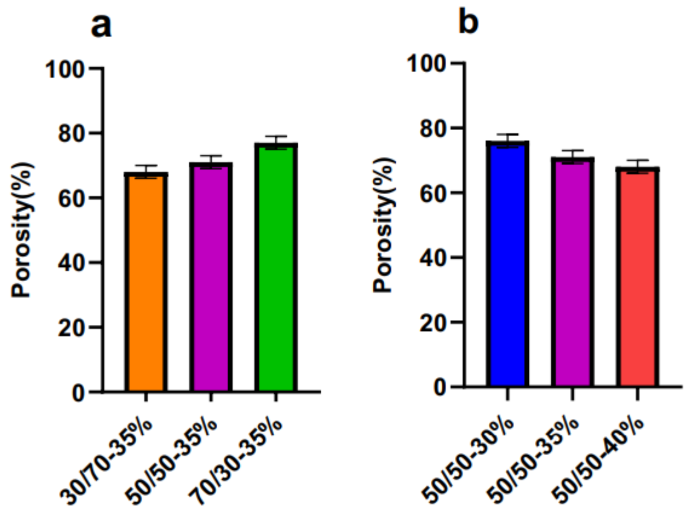


รูปที่ 2.31 ความหยาบของพื้นผิวที่ตั้งฉากกับทิศทางของการพิมพ์ 3 มิติ[12]

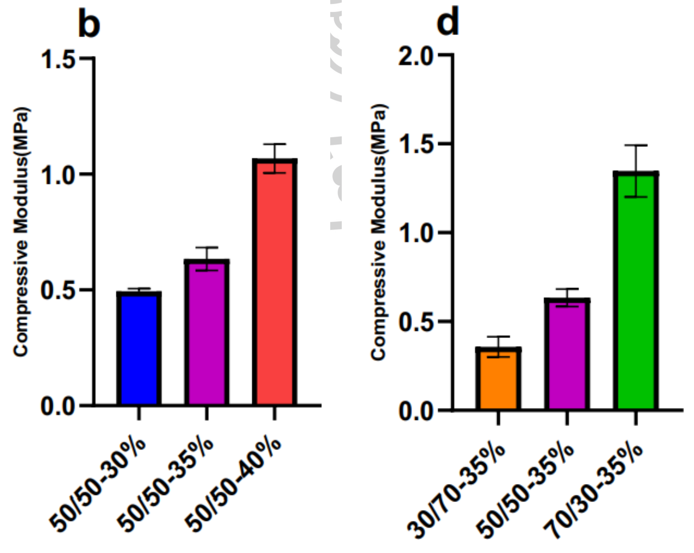
จากการทดสอบพบว่า ความหยาบผิวของชิ้นงานมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มความหนาในการการพิมพ์สูงขึ้น ค่าความหยาบผิวที่ขนาดกับพื้นผิวซึ่งขนานและตั้งฉากกับวิธีการพิมพ์ แสดงในรูปที่ 2.28 และ 2.29 ตามลำดับ ค่าความหยาบเฉลี่ยต่ำสุดที่มีค่า 2.92μ พบในชิ้นงานที่มีหนา 0.05 มิลลิเมตร ในขณะที่ค่าความหยาบเฉลี่ยสูงสุดมีค่าเท่า 7.86μ พบในชิ้นงานที่มีความหนาของการพิมพ์ 3.0 มิลลิเมตร ผลการวิจัยพบว่าทิศทางการพิมพ์มีผลต่อความหยาบของชิ้นงานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลมาจากการพิมพ์ภาพที่เป็นชั้นๆ ความแตกต่างระหว่างโครงสร้างทางเรขาคณิตระหว่างโมเดลจากโปรแกรม CAD และขั้นตอนการพิมพ์ภาพจากเครื่อง FDM ความแม่นยำในการพิมพ์ชิ้นงานที่ลดลง จะเพิ่มความหยาบของพื้นผิว และ ในทางกลับกันเมื่อความหนาของชั้นลดลง ความแม่นยำในการงานพิมพ์เพิ่มขึ้นและลดความหยาบของพื้นผิว แต่เพิ่มเวลาในการพิมพ์และส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง

จากงานวิจัยของ Shadi Hassanajil และคณะ [42] ศึกษาการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อพัฒนาโครงกระดูกที่เป็นการผสมกันระหว่าง พอลิแลคติกแอซิด พอลิคาโปรแลคโตนและไฮดรอกซีอะพาไทต์ (PLA/PCL/HA) โดยผสมเป็นสารละลายและทำการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ทำให้เกิดรูพรุนด้วยวิธี freeze drying และการชะอนุภาค จากผลการทดสอบรูพรุน ในรูปที่ 2.32 แสดงปริมาณรูพรุนวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิด พอลิคาโปรแลคโตนและไฮดรอกซีอะพาไทต์(PLA/PCL/HA) โดยรูปที่ 2.32a พบว่าเมื่อมีการผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์(HA) ที่ปริมาณ 35% พบว่ามีปริมาณรูพรุนอยู่ที่ 68-77% และในรูป 2.32b ผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์(HA) ที่ปริมาณ 30-40% พบว่าปริมาณรูพรุนลดลงเมื่อปริมาณผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์(HA)สูงขึ้น รูปที่ 2.33 แสดงค่า Compressive Modulus ของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิด พอลิคาโปรแลคโตนและไฮดรอกซีอะพาไทต์(PLA/PCL/HA) ในรูป

2.33b พบว่าเมื่อปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์(HA) สูงขึ้นส่งผลให้ค่า Compressive Modulus สูงขึ้น และ รูป 2.33d เมื่อปริมาณพอลิแลคติกแอซิดสูงขึ้นส่งผลให้ค่า Compressive Modulus สูงขึ้นแม้จะมีปริมาณรูพรุนที่มากขึ้นก็ตาม



รูปที่ 2.32 ปริมาณรูพรุนวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิด พอลิคาโปรแลคโตนและไฮดรอกซีอะพาไทต์(PLA/PCL/HA) [42]



รูปที่ 2.33 ค่า Compressive Modulus ของวัสดุผสมพอลิแลคติกแอซิด พอลิคาโปรแลคโตนและไฮดรอกซีอะพาไทต์(PLA/PCL/HA) [42]

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิแลคติกแอซิด(PLA) ใช้เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ เกรด Ingeo biopolymer 4043D LOT : EA-2828B133 ผลิตโดยบริษัท NatureWorks ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2 ผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เกรด 19443 ขนาด 150 mesh ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich

3.1.3 สารเชื่อมประสานไซเลน 3-Aminopropyl triethoxysilane (APS) ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich

3.1.4 สารสำหรับใช้ในการผสมน้ำลายเทียม (Artificial saliva)

- โซเดียมโฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate, $NaHCO_3$) เกรด Analytical Reagents มวลโมเลกุล 84.01 กรัม ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem

- โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) เกรด Analytical Reagents มวลโมเลกุล 58.44 กรัม ผลิตโดยบริษัท Labscan asia

- โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (Potassium thiocyanate, KSCN) เกรด Analytical Reagents มวลโมเลกุล 97.18 กรัม ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem

- โซเดียมไดโฮโดรเจนออโทฟอสเฟต (Sodium dihydrogen orthophosphate, $NaH_2PO_4.2H_2O$) เกรด Analytical Reagents มวลโมเลกุล 156.01 กรัม ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem

- โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride, KCl) เกรด Analytical Reagents มวลโมเลกุล 74.56 กรัม ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem

- ยูเรีย (Urea , KH_2CONH_2) เกรด Analytical Reagents มวลโมเลกุล 60.06 กรัม ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem

- โพแทสเซียมไดโฮโดรเจนออโทฟอสเฟต (Potassium dihydrogen orthophosphate, $NaH_2PO_4.2H_2O$) เกรด Analytical Reagents มวลโมเลกุล 136.09 กรัม ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

3.2.1 เครื่องอัดรีดพลาสติดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Co-rotating Twin screw extruder) รุ่น SHJ-25 จากบริษัท Yougteng ประเทศจีน

3.2.2 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine) รุ่น BA 250 CDC ผลิตโดยบริษัท Batterfeld ประเทศออสเตรีย

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

3.2.3 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) จากบริษัท Labtech Engineering Company ประเทศไทย

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.1 เครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) รุ่น VERTEX70 ผลิตโดยบริษัท BRUKER ประเทศเยอรมัน

3.2.2 เครื่อง Melt flow index (MFI) รุ่น D7053 ผลิตโดยบริษัท Kayeness inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.3 เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.4 Dynamic mechanical thermal analysis (DMA) รุ่น EPLEXOR 100 N ผลิตโดยบริษัท GABO Instrument ประเทศเยอรมัน

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

3.2.6 เครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น 5959 ผลิตโดยบริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.7 เครื่อง Abrasion tester รุ่น QC-617N ผลิตโดยบริษัท AVENO ประเทศจีน

3.2.8 เครื่อง Color reader รุ่น CR-10 จากบริษัท Konica Minolta Sensing Konica Minolta Sensing

3.2.9 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) รุ่น Tabletop Microscope TM3030 ผลิตโดยบริษัท HITACHI ประเทศญี่ปุ่น

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การผสม การขึ้นรูปและการพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ และการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR

3.4.1.1 ปรับปรุงพื้นผิวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน 3-aminopropyl triethoxysilane (APS) โดย ผงอลูมิเนียมออกไซด์แช่ในสารละลาย APS ใน น้ำกลั่น: เอทานอล ที่อัตราส่วน 30:70(V/V) โดยใช้สารละลายไซเลน 1 ลิตรต่ออลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3) 250 กรัม วัด pH ให้อยู่ที่ ประมาณ 6-7 ทำการแช่ผงอลูมิเนียมออกไซด์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำผงอลูมิเนียมออกไซด์มาให้ความร้อนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}C$ ทำการกวนตลอดเวลาด้วย Magnetic bar เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายมากรองด้วยผ้าขาวบางละเอียด และนำผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}C$ ระยะเวลา 1 วัน เพื่อให้น้ำและเอทานอลระเหยออกจากผงอลูมิเนียมออกไซด์ และทำการวิเคราะห์หมู่ฟังชั่นด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR) เพื่อทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างเพื่อหาหมู่ฟังก์ชั่น Si-O-Si ที่เพิ่มขึ้นและหมู่ -OH ที่ลดลงเพื่อเป็นการยืนยันว่าการปรับปรุงพื้นผิวของอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APS สามารถเกิดขึ้นได้ โดยนำผงอลูมิเนียมออกไซด์มาผสมกับ KBr ในอัตราส่วน 1:9 โดยน้ำหนักและอัดเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก จากนั้นนำมาทดสอบด้วยโหมด TR-FTIR

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำหนัก	
	น้ำหนักพอลิแลคติกแอซิด (g)	น้ำหนักผงอลูมิเนียมออกไซด์ (g)
PLA	100	-
5A_PLA	95	5
10A_PLA	90	10
15A_PLA	85	15
20A_PLA	80	20

3.4.1.2 การผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนแสดงอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 โดยนำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดไปทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวหนอนคู่ (Co-rotating Twin screw extruder) ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ส่วนป้อนเม็ดไปจนถึงหัวดายคือ 150 160 180 และ 200 °C โดยให้ความเร็วรอบการหมุนของสกรูอยู่ที่ 40 rpm และอัตราความเร็วในการดึงเส้น(Puller speed) ที่10 rpm เพื่อให้ได้เส้น Extrudate ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5-1.7 มิลลิเมตรสำหรับการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

3.4.1.3 ขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding) เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำหรับใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปตั้งแต่ส่วนป้อนเม็ดไปจนถึงหัวดายคือ 150 160 180 และ 200 °C โดยขึ้นรูปเป็น 3 ชนิดตามการทดสอบได้แก่ สมบัติต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile test) สมบัติต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural test) และสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test)

3.4.1.4 ขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยเครื่องพิมพ์ภาพ 3 มิติ โดยใช้เส้นฟิลาเมนต์ที่ขึ้นรูปได้จากกระบวนการอัดรีดพลาสติก (Extrusion) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5-1.7 มิลลิเมตรเพื่อให้ได้ชิ้นงานสำหรับใช้ในการทดสอบสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐาน ASTM D695 โดยมีขนาด ความกว้าง 13 มิลลิเมตร ความยาว 13 มิลลิเมตร และความสูง 26 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้งาน
Infill density (%)	90
Infill type	Line
Layer thickness (mm)	0.2
Nozzle diameter (mm)	0.4
Printing speed (mm/s)	50
Raster orientation direction (°)	±45°
Nozzle temperature (°C)	180 °C

3.4.2 ศึกษาดัชนีการไหล ด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดพลาสติก โดยนำเม็ดพลาสติกไปอบเป็นที่อุณหภูมิ 80 °C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปทำการทดสอบสมบัติการไหล โดยใช้โหลดขนาด 2.16 กิโลกรัม และใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 190 °C และคำนวณค่าที่ได้ออกมาในหน่วย กรัม/10นาที

3.4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

3.4.2.1 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) โดยใช้น้ำหนักของเม็ดพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ประมาณ 6-8 มิลลิกรัม ทดสอบในโหมด heat-cool-heat ศึกษาที่อุณหภูมิช่วง 30-180 °C ใช้อัตราการให้ความร้อน 3°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และคำนวณปริมาณผลึกตามสมการที่ 3.1 [43]

$$\%X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\omega_{PLA} \times H_m^o} \times 100 \qquad \text{(สมการที่ 3.1)}$$

เมื่อ ΔH_m คือ Enthalpy of melting (J/g)

ΔH_{cc} คือ Enthalpy of cold crystallization (J/g)

ω_{PLA} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิดในวัสดุ

H_m^o คือ Enthalpy of melting ของพอลิแลคติกแอซิดที่มีปริมาณผลึก 100% (93J/g)

3.4.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงรีออโลยีด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์เมื่อมีแรงเฉือนมากระทำต่อชิ้นงาน โดยทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Rotational rheometer รุ่น ARES G2 ผลิตโดยบริษัท TA แผ่นคู่ขนาน(Parallel plate) ที่ใช้ทำจากเหล็กกล้าปลอดสนิม(Stainless steel) ใช้ระบบ Forced convection oven (FCO) ในการให้ความร้อน โดยใช้สภาวะการทดสอบแบบปรับความถี่เชิงมุม (Angular frequency sweep) ตั้งแต่ 1-100 เรเดียน/วินาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 180 °C โดย โดยใช้ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติก (Compression molding) ขนาดชนิดงานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งในการทดลองในใช้ระยะการตัดขอบ (Trim gap) ที่ความสูง 1.9 มิลลิเมตร โดยความสูงนี้จะทำให้

ชิ้นงานไหลได้เต็มแผ่นคู่ขนานที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์ 25 มิลลิเมตร แล้วทำการทดสอบที่ระยะ Gap สูง 1.8 มิลลิเมตร

3.4.2.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกลแบบไดนามิกส์ (Dynamic mechanical thermal analysis) ใช้สภาวะการทดสอบแบบปรับอุณหภูมิ (Temperature sweep) โดยความถี่และความเครียดในการทดสอบคงที่ และให้แรงในโหมดดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending mode) ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ 1 เฮิรตซ์ และอุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 30-130 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/min ใช้ชิ้นงานในการทดสอบจากชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติต้านทานต่อการดัดโค้งมาตัดด้วยเครื่อง laser cut ให้มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมพื้นผ้าที่มีขนาดความกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 4-4.5 เซนติเมตร

3.4.2.4 ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) ใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน และใช้อัตราการดึงยืด 5 มิลลิเมตรต่อนาที ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C โดยทำการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยืดเพื่อหาค่า Young’s modulus ค่า Tensile strength และ %Elongation at break ทำการทดสอบสูตรละ 8 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.2.5 ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural test) ตามมาตรฐาน ASTM D790 ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) ใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน และทดสอบด้วยความเร็วของหัวกดชิ้นงานเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ระยะ Support span เท่ากับ 80 มิลลิเมตร กดจนกระทั่งถึง 5% strain โดยให้แรงในโหมดดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending mode) ทำการทดสอบเพื่อหาค่า Flexural modulus ค่า Flexural strength ทำการทดสอบสูตรละ 8 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.2.6 ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐาน ASTM D695 ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 50 กิโลนิวตัน และใช้อัตราการกด 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทดสอบหาค่า Compressive modulus ทำการทดสอบสูตรละ 6 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.2.7 ศึกษาความแข็งพื้นผิว (Shore hardness test) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) โดยใช้เครื่อง Durometer หัวกดชนิด Shore D สำหรับทดสอบพลาสติก โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน ทำการกดไปบนพื้นผิวของชิ้นงาน จำนวน 5 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.2.8 ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ตามมาตรฐาน ASTM D1630 เพื่อวัดความคงทนของวัสดุเมื่อมีการเสียดสี โดยนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากการทดสอบการกดอัดมาตัดด้วยเครื่อง laser cut ให้มีขนาด กว้าง 25.5 มิลลิเมตร ยาว 25.5 มิลลิเมตร และมีความหนา 6.35 มิลลิเมตร โดยทำการขัดถูด้วยเครื่อง Abrasion Tester รุ่น QC-617N ใช้กระดาษทรายเบอร์ #40 เส้นผ่านศูนย์กลางล้อขัด 150 มิลลิเมตร ความเร็วรอบการหมุน 45 rpm โหลดขนาด 5 ปอนด์ โดยตอนแรกทำขัดเพื่อให้ชิ้นงานมีพื้นผิวโค้งเข้ากับล้อหมุนประมาณ 5 รอบ จากนั้นปรับระยะการขัดให้เท่ากับ 2.54 มิลลิเมตร และทำการขัดให้ผิวความหนาชิ้นงานหายไป 2.54 มิลลิเมตร ใช้มาตรฐาน NBS ในการความสามารถในการทนทานต่อการขัดคือโดยมีสูตรคำนวณตามสมการที่ 3.2 โดยทำการขัดชิ้นงานเป็นจำนวน 5 ตัวอย่าง

$$\text{NBS} = \frac{\text{จำนวนรอบการขัดชิ้นงานทดสอบ}}{\text{จำนวนรอบการขัดของตัวอย่างมาตรฐาน}} \times 100 \qquad \text{(สมการที่ 3.2)}$$

จำนวนรอบการขัดของชิ้นงานทดสอบ คือค่าที่เกิดขึ้นจริงจากตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

จำนวนรอบการขัดของตัวอย่างมาตรฐาน คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากการขัดตัวอย่างทดสอบมาตรฐาน

การทดสอบความคงทนต่อการสึกหรอทำได้โดยนำชิ้นงานทำการขัดบนกระดาษทรายจากนั้นทำการวัดน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ และน้ำหนักชิ้นงานหลังการทดสอบและนำไปคำนวณตามสมการที่ 3.3 [44]

$$W_r = \frac{m_i - m_f}{L} \qquad \text{(สมการที่ 3.3)}$$

เมื่อ m_i คือ น้ำหนักของชิ้นงานเริ่มต้น

m_f คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการทดสอบ

L คือ ความยาวของชิ้นงานทดสอบ

3.4.2.9 ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) โดยนำชิ้นงานมาตัดส่วนที่เกินออกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ หลังจากนั้นนำไปเคลือบพื้นผิวรอยแตกด้วยทอง

และแพลตตินัมด้วยเทคนิค Sputtering เพื่อป้องกันการสะสมของประจุไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ SEM โดยใช้กำลังขยายสูงสุด 2000 เท่า ความต่างศักย์ (Acceleration voltage) 5.0 kV

3.4.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

3.4.3.1 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) โดยใช้น้ำหนักของเม็ดพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ประมาณ 6-8 มิลลิกรัมจากทั้ง 2 ชิ้นงาน ทดสอบในโหมด heat-cool-heat ศึกษาที่อุณหภูมิช่วง 30-180 °C ใช้อัตราการให้ความร้อน 3°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

3.4.3.2 ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐาน ASTM D695 ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 50 กิโลนิวตัน และใช้อัตราการกด 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทดสอบหาค่า Compressive modulus ทำการทดสอบสูตรละ 6 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.3.3 การทดสอบหารูพรุนทั้งหมด (Total porosity) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3มิติ โดยนำชิ้นงานไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 1 วันจากนั้นนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 1 วัน และเมื่อครบกำหนดเวลาให้เช็ดชิ้นงานให้แห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่ารูพรุนเปิด (Open porosity) ตามสมการที่ 3.4[45]

$$\text{Total porosity(\%)} = \frac{(m_{sat}-m_{dry})/\rho_{water}}{V} \times 100 \qquad \text{(สมการที่ 3.4)}$$

เมื่อ m_{sat} คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำกลั่น

m_{dry} คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการอบ

ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำ

V คือ ปริมาตรของชิ้นงานทดสอบ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.4.3.4 ศึกษาความแข็งพื้นผิว (Shore hardness test) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) โดยใช้เครื่อง Durometer หัวกดชนิด Shore D สำหรับทดสอบพลาสติก โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน ทำการกดไปบนพื้นผิวของชิ้นงาน จำนวน 5 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.3.5 ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) โดยนำชิ้นงานมาตัดส่วนที่เกินออกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ หลังจากนั้นนำไปเคลือบพื้นผิวรอยแตกด้วยทองและแพลตตินัมด้วยเทคนิค Sputtering เพื่อป้องกันการสะสมของประจุไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ SEM โดยใช้กำลังขยายสูงสุด 2000 เท่า ความต่างศักย์ (Acceleration voltage) 5.0 kV

3.4.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์หลังผ่านการจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

3.4.4.1 ทำการจุ่มแช่ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐาน ASTM D695 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding) และ เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้สารละลายน้ำลายเทียมที่ทำการผสมขึ้นเองตามสูตรของ Carter-Brugirard Saliva โดยมีส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดยละลายในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water) เป็นจำนวน 1.5 ลิตร และวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH Meter ได้ประมาณ 6.8 ทำการจุ่มแช่ด้วยใช้ปริมาณน้ำลายเทียม 150 มิลลิลิตร บรรจุลงในบีกเกอร์และนำชิ้นงานมาจุ่มแช่ โดยใน 1 บีกเกอร์จะไปประกอบไปด้วยชิ้นงาน 2 กลุ่ม คือชิ้นงานจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก จำนวน 5 สูตร และชิ้นงานจากเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จำนวน 5 สูตรรวมเป็น 10 ชิ้นงานใน 1 บีกเกอร์ โดยทำการทดลองเป็นจำนวน 5 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับการจุ่มแช่ในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (Deionized water) โดยทำการบรรจุชิ้นงานเหมือนกัน

ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมของสารเคมีในน้ำลายเทียมที่ใช้ในงานวิจัย [31]

สารเคมี	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)
Sodium chloride (NaCl)	0.70
Potassium chloride (KCl)	1.20
Potassium dihydrogen orthophosphate (KH_2PO_4)	0.20
Urea (KH_2CONH_2)	0.13
Sodium hydrogen carbonate ($NaHCO_3$)	1.50
Potassium thiocyanate (KSCN)	0.33
Sodium dihydrogen orthophosphate (Na_2HPO_4)	0.26

3.4.4.2 ศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption) และการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) โดยนำชิ้นงานที่จุ่มแช่ในน้ำลายเทียมและน้ำกลั่นปราศจากไอออน(Deionized water) ในแต่ละบีกเกอร์มาทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นใช้กระดาษทิชชูซับบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานให้แห้งและทำการชั่งด้วยเครื่องชั่ง ทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 3 วัน เป็นระยะเวลา 30 วัน โดยทำการชั่งหนักชิ้นงานในทุกบีกเกอร์ที่ทดสอบ จากนั้นนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นตามสมการที่ 3.5

$$\%Weight=\frac{w_2-w_1}{w_1}\times 100 \qquad \text{(สมการที่ 3.5)}$$

โดย w_1 คือ น้ำหนักแห้งของชิ้นงานก่อนการทดสอบ

w_2 คือ น้ำหนักชิ้นงานเปียก ณ วัน ที่ทดสอบ

3.4.4.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฉดสีของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ ของชิ้นงานขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) ก่อนและหลังจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมด้วยเครื่อง Color reader โดยทำการวัดในตู้ไฟและใช้แสงแบบ daylight วัดค่า L a และ b จากนั้นนำไปคำนวณเป็นค่า ΔE ได้ตามสมการที่ 3.6 เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยทำการวัดสีในทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

$$\Delta E = \sqrt{(L_2-L_1)^2+(a_2-a_1)^2+(b_2-b_1)^2} \qquad \text{(สมการที่ 3.6)}$$

โดย L_1, a_1 และ b_1 เป็นค่าที่วัดได้จากชิ้นงานก่อนการทดสอบ

L_2, a_2 และ b_2 เป็นค่าที่วัดได้จากชิ้นงานหลังการทดสอบหลัง

3.4.4.4 ศึกษาสมบัติต้านทานต่อการกดอัด (Compressive test) ตามมาตรฐานASTM D695 ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ^{o}C ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 50 กิโลนิวตัน และใช้อัตราการกด 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทดสอบหาค่า Compressive modulus และค่า Compressive strength ทำการทดสอบสูตรละ 5 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.4.5 ศึกษาความแข็งพื้นผิว (shore hardness test) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) โดยใช้เครื่อง Durometer หัวกดชนิด Shore D สำหรับทดสอบพลาสติก โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน ทำการกดไปบนพื้นผิวของชิ้นงาน จำนวน 5 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.4.6 ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) โดยนำชิ้นงานมาตัดส่วนที่เกินออกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ หลังจากนั้นนำไปเคลือบพื้นผิวรอยแตกด้วยทองและแพลตตินัมด้วยเทคนิค Sputtering เพื่อป้องกันการสะสมของประจุไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ SEM โดยใช้กำลังขยายสูงสุด 2000 เท่า ความต่างศักย์ (Acceleration voltage) 5.0 kV

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและหาวัสดุทดแทนสำหรับใช้เป็นวัสดุครอบฟันทางทันตกรรมชั่วคราว (Temporary dental crown) โดยในปัจจุบันที่ครอบฟันชั่วคราวส่วนมากทำมาจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์จำพวกอะคริลิก เช่น PMMA ซึ่งย่อยสลายในธรรมชาติได้ยาก งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดหาวัสดุทดแทนสำหรับที่ครอบฟันชั่วคราวจากพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ และสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ภาพ 3 มิติ เนื่องจากที่ครอบฟันชั่วคราวนั้นมีการใช้งานเพียง 2 สัปดาห์เท่านั้นก่อนจะทำการใส่ฟันปลอมเข้าไป โดยวัสดุที่ผู้วิจัยสนใจนำมาศึกษาคือ พอลิแลคติกแอซิด ซึ่งพอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายในธรรมชาติได้ อีกทั้งยังนิยมใช้ในการนำไปขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และในงานวิจัยนี้จะเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิดด้วยผงอลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้มีสีที่ใกล้เคียงกับฟันจริงและมีสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการผสมและวิเคราะห์สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ ที่ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกหรือเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ตอนที่ 1 การผสม การขึ้นรูปและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

ตอนที่ 2 การศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆของขึ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

ตอนที่ 3 การศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

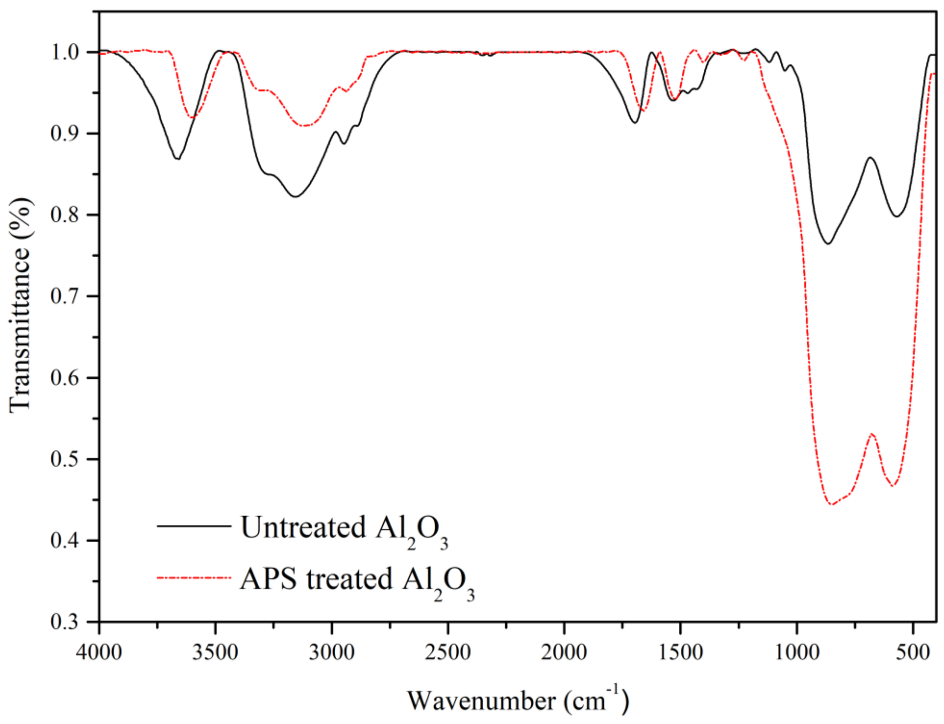
ตอนที่ 4 ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ พอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆหลังผ่านการจุ่มแช่ชิ้นงานใน

สารละลายน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกหรือเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

โดยในงานวิจัยนี้มีจะวิเคราะห์ผลด้วยการคำนวณทางสถิติด้วยวิธี วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95%

4.1 การผสมและการขึ้นรูปของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมอลูมิเนียมออกไซด์

4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงอลูมิเนียมออกไซด์หลังผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APS ด้วยเทคนิค FTIR

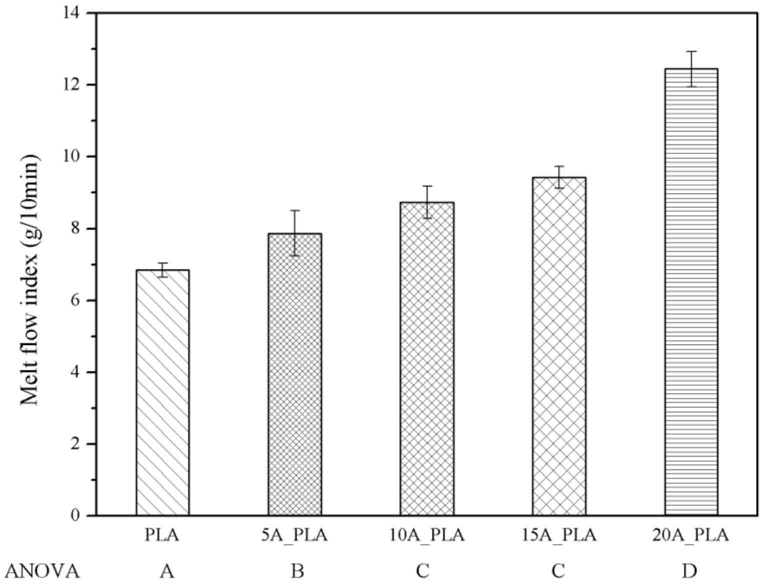


รูปที่ 4.1 IR Spectrum ของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว(Untreated Al_2O_3) และผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (APS treated Al_2O_3)

การปรับปรุงพื้นผิวของผงอลูมิเนียมออกไซด์นั้นเพื่อช่วยให้พื้นผิวของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปกคลุมด้วยหมู่ไฮดรอกซิล(–OH) นั้นมีปริมาณที่ลดลงและเกิดความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมด้วยคือพอลิแลคติกแอซิด จึงจำเป็นต้องหาสารเชื่อมประสานไซเลน APS ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล(–OH) ของผงอลูมิเนียมออกไซด์ และเข้ากันกับพอลิแลคติกแอซิด ในงานวิจัยนี้ใช้ 3-Aminopropyl triethoxysilane (APS) ในการปรับปรุงพื้นผิวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ โดย APS

สามารถเข้าทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของอลูมิเนียมออกไซด์ได้ [46] อีกทั้งสารเชื่อมประสานไซเลน APS มีหมู่เอมีน ($-NH_2$) ในโครงสร้างซึ่งสามารถทำอันตรกิริยากับหมู่ hydroxyl (-OH) ที่ปลายสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิดเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน(H-bonds) ได้ โดยในรูปที่ 4.1 แสดงผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR โดยในสูตร Untreated Al_2O_3 คือผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว ส่วน APS Treated Al_2O_3 คือผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APS ในสูตร Untreated Al_2O_3 พบตำแหน่งการสั่นที่ 3100-3400 cm^{-1} เป็นของหมู่ hydroxyl (-OH) ที่และตำแหน่งการสั่นที่ 500-700 cm^{-1} เป็นของหมู่ Si-O-Al ที่ส่วน APS Treated Al_2O_3 พบตำแหน่งการสั่น 3100-3400 cm^{-1} เป็นของหมู่ hydroxyl (-OH) โดยพบว่ามีความเข้มของพีคที่น้อยกว่าสูตร Untreated Al_2O_3 เนื่องมาจากหมู่ hydroxyl(-OH) บนพื้นผิวของผงอลูมิเนียมออกไซด์นั้นได้เข้าทำปฏิกิริยากับสารเชื่อมประสานไซเลน APS เกิดเป็นหมู่ Si-O-Al ส่งผลให้ความเข้มของพีคที่ตำแหน่งของหมู่ hydroxyl(-OH) มีค่าลดลง และหมู่ Si-O-Al ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยานั้นปรากฏพีคการสั่นที่ 500-700 cm^{-1} ซึ่งเป็นของหมู่ Si-O-Al Stretching พบว่ามีความเข้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในสูตร APS Treated Al_2O_3 แสดงว่าสารเชื่อมประสานไซเลน APS สามารถทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของอลูมิเนียมออกไซด์ได้

4.1.2 ผลการทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt flow indexer) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมอลูมิเนียมออกไซด์



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบดัชนีการไหล(MFI) ของวัสดุที่ขึ้นรูปจากกระบวนการอัดรีดพลาสติก

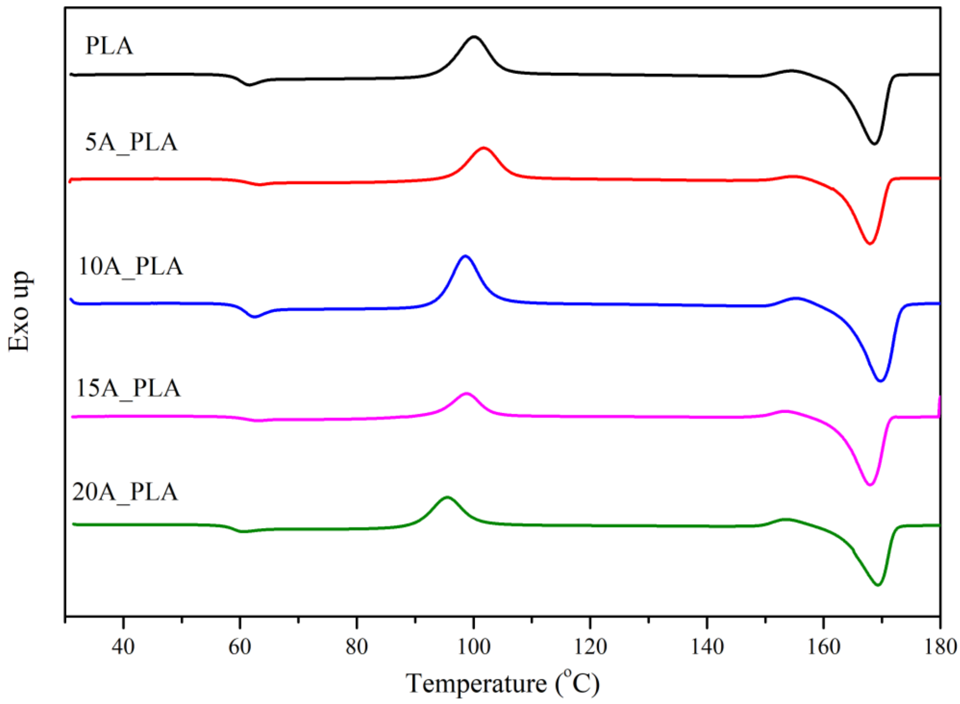
การทดสอบดัชนีการไหลด้วยเทคนิค Melt flow index (MFI) โดยใช้โหลดขนาด 2.16 กิโลกรัมและใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 190 องศาเซลเซียสตามมาตรฐาน ASTM D1238 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 ค่าดัชนีการไหลของของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการขึ้นรูปจากกระบวนการอีดรีดพลาสติก โดยพอลิแลคติกแอซิดมีค่าดัชนีการไหล(MFI)เฉลี่ยเท่ากับ 6.84 กรัม/10นาที พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าดัชนีการไหล(MFI)เฉลี่ยเท่ากับ 7.87 กรัม/10นาที 8.73 กรัม/10นาที 9.42 กรัม/10นาที และ 12.44 กรัม/10นาที ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์มีความแตกต่างกันของค่าดัชนีการไหล ยกเว้นพอลิแลคติกแอซิดที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% และ 15% โดยน้ำหนักนั้นไม่มีความแตกต่างของค่าดัชนีการไหล แสดงว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ในการผสมเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการไหลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตาม โดยค่าดัชนีการไหลที่เพิ่มขึ้นหมายถึงความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ลดลง เมื่อพิจารณาลักษณะอนุภาคของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม เมื่อนำผงอลูมิเนียมออกไซด์มาผสมกับพอลิเมอร์จึงส่งผลให้เมื่อพอลิเมอร์ได้รับอุณหภูมิจนถึงจุดหลอมเหลวอนุภาคทรงกลมของผงอลูมิเนียมออกไซด์จะไปแทรกระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวเสมือนกลายเป็นตัวลดความเสียดทานภายใน(internal lubricant) ให้กับระบบพอลิเมอร์ผสมสารเติมแต่ง ส่งผลให้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมลงไปจะช่วยให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการไหลได้ง่ายยิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ของชิ้นงานพอลิ แลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC)

เทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC) เป็นเทคนิคที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาที่อุณหภูมิช่วง 30-180 °C ใช้อัตราการให้ความร้อน 3°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ทดสอบในวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก



รูปที่ 4.3 DSC Thermogram ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

รูปที่ 4.3 แสดงกราฟ DSC Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) พบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโดยมี T_g อยู่ในช่วง 58-60 °C แสดงว่าการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ไม่ส่งผลต่อค่า

Free volume ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ของ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 153-155 °C และ 167-169 °C โดยในงานวิจัยของ Douglas Hsiao [30] อธิบายไว้ว่าการเกิดพีค ณ อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) 2 จุด โดยแสดงเป็นค่า T_{m1} และ T_{m2} เป็นผลมาจากการให้ความร้อนซ้ำกับพอลิแลคติกแอซิดส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวมากขึ้น เป็นผลที่มากความหนาที่แตกต่างกันของผลึก (lamellae thickness) โดยค่า T_{m1} เกิดจากการหลอมคริสตัลในกระบวนการ Cold crystallization ในขณะที่ T_{m2} เป็นผลมาจากการหลอมผลึกในกระบวนการให้ความร้อน ซึ่งการเกิด T_{m1} นั้นส่งผลให้เกิดพีค Cold crystallization temperature(T_{cc}) ที่มีค่าอยู่ที่ 99-101 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิแลคติกแอซิดเกิดผลึกซ้ำระหว่างกระบวนการให้ความร้อน แสดงว่าพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์นั้นไม่สามารถตกผลึกได้อย่างสมบูรณ์ในระหว่างขั้นตอนการหล่อเย็น(Cooling) จากกระบวนการฉีดพลาสติก(Injection molding) เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดนั้นมีสมบัติการตกผลึกที่ค่อนข้างช้าอ้างอิงจากงานวิจัยของ Daniele Battegazzor และคณะ [47]

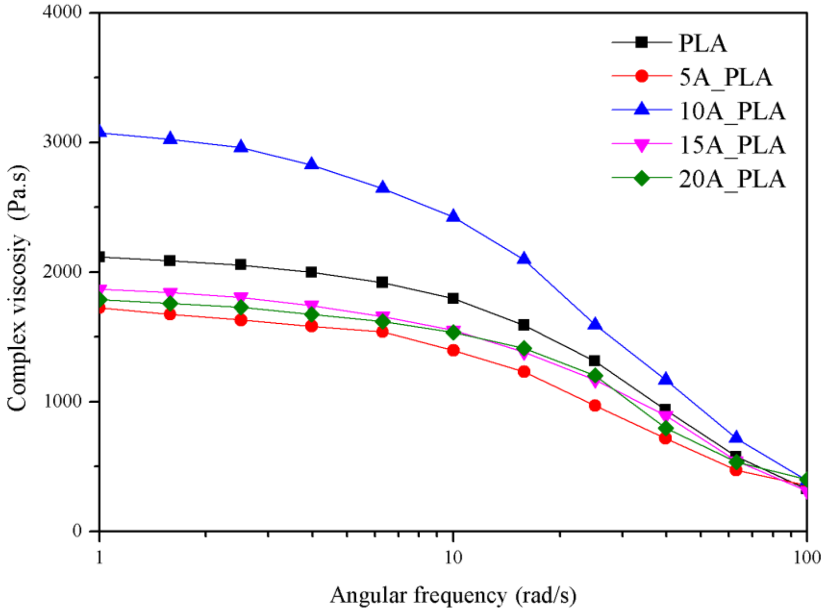
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งแรกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	H_{cc} (J/g)	H_{m1} (J/g)	H_{m2} (J/g)	$\%X_c$ (%)
NeatPLA	58.43	100.11	154.37	168.72	24.47	2.20	-34.54	8.46
5A_PLA	58.64	99.11	155.03	169.31	25.87	2.29	-35.90	8.76
10A_PLA	59.46	98.63	155.12	169.70	23.66	2.65	-36.57	12.26
15A_PLA	58.64	96.36	154.37	169.63	17.59	2.84	-30.56	12.81
20A_PLA	60.14	99.33	153.62	167.90	17.73	2.44	-30.55	13.95

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และปริมาณผลึกที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 พบว่าในสูตร PLA มีปริมาณผลึก 8.46% พอลิแลคติกแอซิดที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ

5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก มีปริมาณผลึก(X_c) 8.76% 12.26% 12.81% และ 13.95% ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจากผงอลูมิเนียมออกไซด์ทำหน้าที่เปรียบเสมือน nucleating agent ช่วยเหนียวนำให้สายโซ่พอลิเมอร์พับตัวเกิดเป็นผลึกได้ง่ายเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นปริมาณผลึกจึงเพิ่มขึ้นตาม [48]

4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยเครื่อง Rotational rheometer



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) กับความถี่ ที่อุณหภูมิทดสอบ 180 °C ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

การศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเครื่อง Rotational rheometer แบบใช้แผ่นโลหะคู่ขนาด (Parallel plate) แบบปรับความถี่เชิงมุม (Angular frequency sweep) ทำการศึกษาในช่วงความถี่ (Frequency) $1 < \omega < 100$ Hz โดยในรูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) กับความถี่ พอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ โดยในช่วงความถี่ในการทดสอบที่ 1-10 เรเดียนต่อวินาที พบว่าพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 0% 5% และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่ามีความหนืดเชิงซ้อนที่ใกล้เคียงกัน ส่วนพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 10% โดยน้ำหนัก นั้นมีความ

หนืดสูงสุดเป็นเพราะว่าอาจมีความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงอลูมิเนียมออกไซด์มากที่สุด โดยกราฟทุกเส้นแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian เป็นพฤติกรรมการไหลที่เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นจะไม่ทำให้ค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) เปลี่ยนแปลง และในช่วงความถี่ในการทดสอบที่ 10-100 เรเดียนต่อวินาที พบว่ากราฟทุกเส้นแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning เป็นพฤติกรรมการไหลที่เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิเมอร์ลดลง โดยในงานวิจัยนี้การขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้เครื่องชนิด Fused Deposition Modeling (FDM) โดยเครื่องชนิดนี้จะทำการพิมพ์ภาพออกมาเป็นชั้นเลเยอร์ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางหัวดายอยู่ที่ 0.4 มิลลิเมตร ความยาว 2 มิลลิเมตร ปรับค่าความเร็วในการพิมพ์คือ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถหาค่าอัตราการไหล(Volume flow rate, $\dot{Q}$) และค่าอัตราเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$) ได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

$$\dot{Q} = \pi R^2 v \qquad \text{สมการที่ 4.1}$$

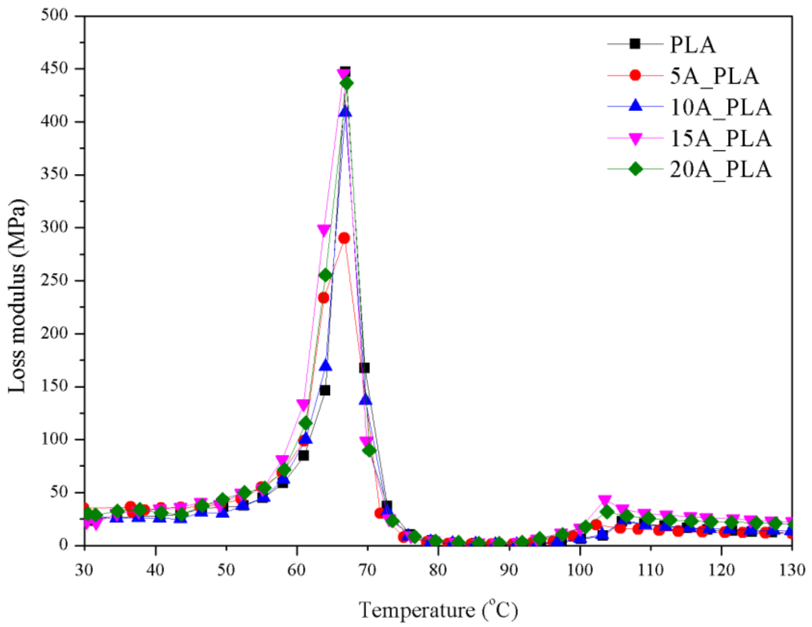
$$\dot{\gamma} = \frac{4\dot{Q}}{\pi R^3} \qquad \text{สมการที่ 4.2}$$

เมื่อ R คือรัศมีของหัวดาย และ v คือความเร็วในการพิมพ์

จากค่าความเร็วในการพิมพ์ (Printing speed) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที สามารถคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร(Volume flow rate,$\dot{Q}$) มีค่าเทากับ 6.28 mm^3/s และอัตราเฉือน มีค่าเท่ากับ 1000 เฮิรตซ์ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับกราฟความหนืดเชิงซ้อน(Complex viscosity) ในรูปที่ 4.4 จะพบว่าอยู่ในช่วงที่พอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ แสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning ทั้งหมด แสดงว่าความเร็วการพิมพ์(Printing speed) ที่ใช้ในการวิจัยนี้พอลิเมอร์มีความหนืดเชิงซ้อน(complex viscosity) ที่ต่ำส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลออกจากหัวฉีด(Nozzle) ได้ง่ายขึ้น

4.2.3 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกส์ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)

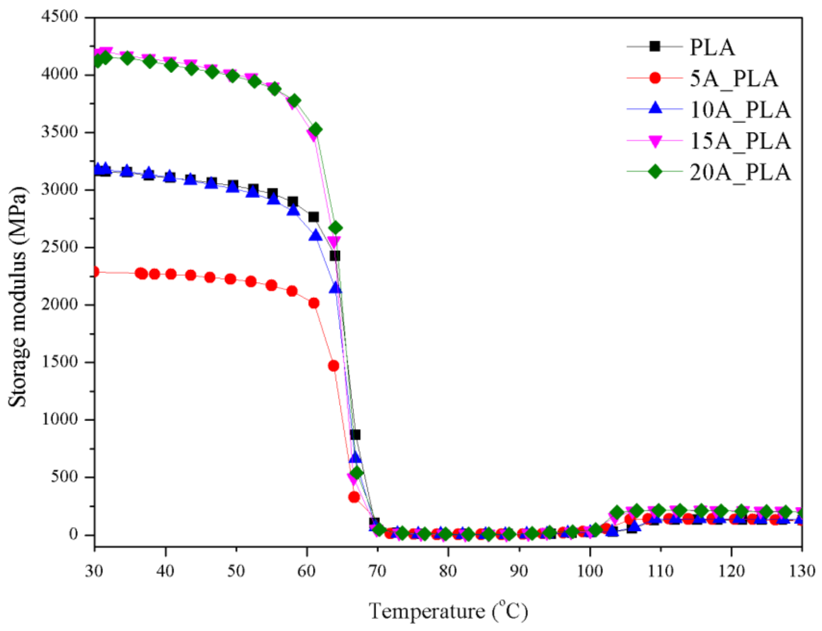
จากศึกษาสมบัติทางความร้อนเชิงกลแบบไดนามิกซ์ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analysis(DMA) โดยใช้ในโหมดการดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending) ที่ความถี่ในการทดสอบ 1 เฮิร์ต อุณหภูมิที่ทดสอบ 30 ถึง 130 °C ทำการศึกษาในช่วงของ Linear viscoelastic ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/min โดยในการทดสอบจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Loss modulus และ Storage modulus กับอุณหภูมิที่ทดสอบ



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Loss modulus กับอุณหภูมิ ความถี่ในการทดสอบ 1 เฮิรตซ์ ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Loss modulus กับอุณหภูมิของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ โดยค่า Loss modulus เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถการปลดปล่อยพลังงานของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำต่อระบบโดยอาจจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน ค่า Loss modulus เป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุในส่วนที่เป็นพฤติกรรมวิสโคส(viscous behavior) โดยในช่วงแรกของการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 °C ค่า Loss modulus มีค่าน้อยเนื่องจากว่าพอลิเมอร์อยู่ในสถานะคล้ายแก้ว(Glassy state)

เนื่องจากยังไม่ถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว(T_g)ของพอลิเมอร์ทำให้โครงสร้างภายในจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ส่งผลให้มีค่า Free volume ที่ต่ำสายโซ่พอลิเมอร์จึงสั่นไหวได้ยากการสูญเสียพลังงานจึงน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปเรื่อยๆจนใกล้ถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ พบว่าค่า Loss modulus มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเพิ่มสูงสุดที่อุณหภูมิในการทดสอบประมาณ 65 °C การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า Loss modulus เนื่องมาจากอุณหภูมิในช่วงนี้มีพลังงานจลน์อย่างมากเพียงพอที่จะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการสั่นไหว นั่นหมายความว่าในช่วงนี้พอลิเมอร์มีการสูญเสียพลังงานอย่างมากเมื่อมีการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิ ความถี่ในการทดสอบ 1 เฮิรตซ์ ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

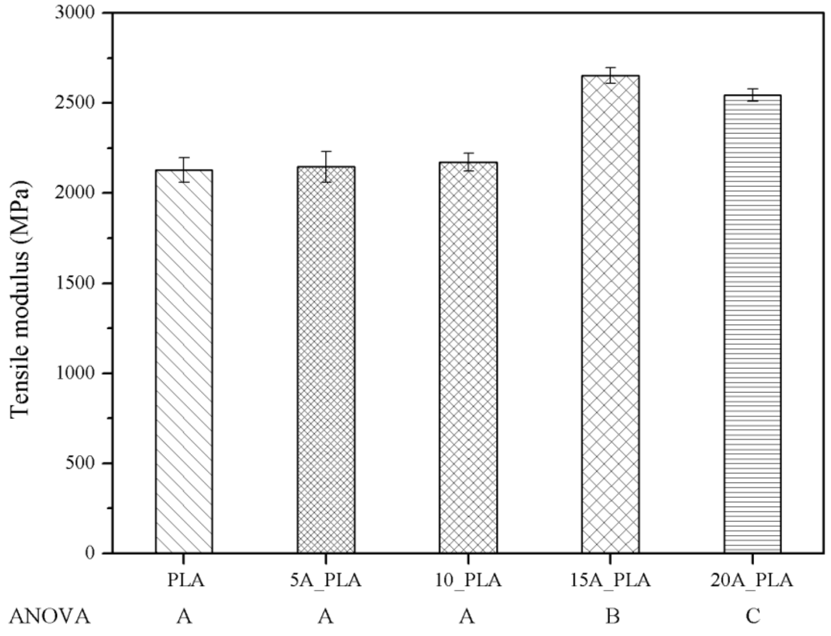
จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Storage modulus กับอุณหภูมิของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ ค่า Storage modulus แสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานเอาไว้ของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกแบบไดนามิกส์และคืนพลังงานกลับมาอย่างสมบูรณ์เมื่อเอาแรงกระทำออกจากระบบ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุในส่วนที่เป็นพฤติกรรมอิลาสติก(Elastic behavior) ของวัสดุ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการทดสอบที่ 30 °C พบว่าค่า Storage modulus ของพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน โดยมี

ค่า Storage modulus สูงสุดอยู่ประมาณ 4,300 MPa พอลิแลคติกแอซิดและพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก มีค่า Storage modulus รองลงมา และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% โดยน้ำหนักมีค่า Storage modulus ต่ำที่สุด โดยในช่วงแรกของการทดสอบที่อุณหภูมิยังไม่ถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ทำให้โครงสร้างภายในจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบมีค่า Free volume ที่ต่ำทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสั่นไหวได้ยากและสามารถกักเก็บพลังงานไว้ได้มากค่า Storage modulus ของพอลิเมอร์จึงมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้เข้าใกล้อุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) พบว่าค่า Storage modulus ของพอลิเมอร์มีค่าค่อยๆลดลง และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ที่อุณหภูมิประมาณ 65 ^{o}C ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ DSC ในข้างต้น แสดงว่าพอลิเมอร์เกิดการสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วเนื่องจากสายโซ่เกิดการสั่นไหวได้

เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ความร้อนเชิงกลแบบไดนามิก(DMTA) พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 40 ^{o}C ซึ่งเป็นช่วงการใช้งานของวัสดุครอบฟันชั่วคราวและจะนำไปใช้ภายใน บริเวณช่องปาก โดยทั่วไปร่างกายมนุษย์จะมีอุณหภูมิปกติที่ 37 ^{o}C [49] พบว่าค่า Storage modulus ของวัสดุพอลิเมอร์พอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ นั่นแสดงถึงสมบัติด้าน Elastic ที่เด่นชัดกว่า Viscous ซึ่งแสดงถึงความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของวัสดุโดยมีค่า Storage modulus อยู่ระหว่าง 2,300 ถึง 4,300 MPa แสดงว่าในการใช้งานพอลิเมอร์จะไม่เกิดการเสียรูปเนื่องจากอุณหภูมิใช้งานมีค่าต่ำกว่า อุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์พอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติการดึงยืด (Tensile testing) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

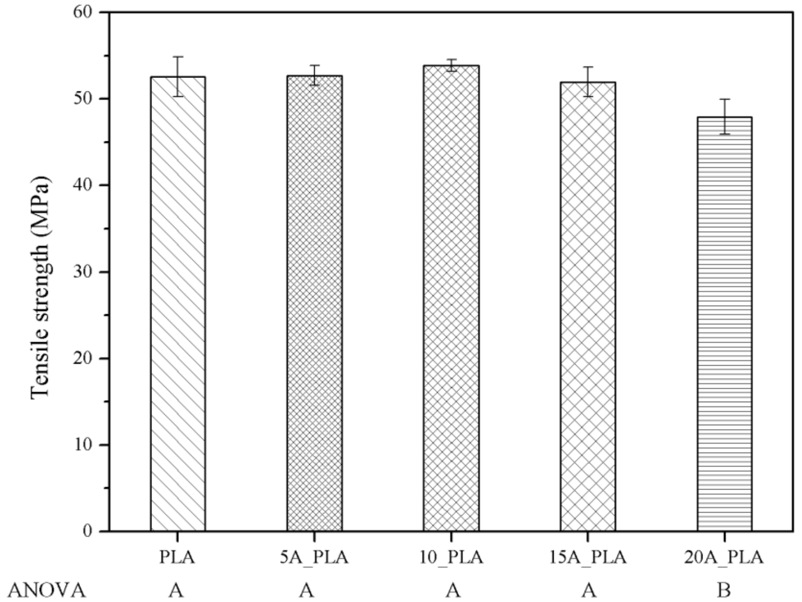
การศึกษาสมบัติการต้านทานต่อการดึงยืดนั้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก ใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน และใช้อัตราการดึงยืด 5 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในระหว่างการให้แรงดึง โดยได้ค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง(Tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นการยืด ณ จุดแตกหัก (%Elongation at break) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.7 ค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

รูปที่ 4.9 แสดงค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) 2129.32 MPa และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus 2146.20 MPa 2172.94 MPa 2654.49 MPa และ 2544.35 MPa ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA)กับพอลิแลคติกแอซิดผสมผง

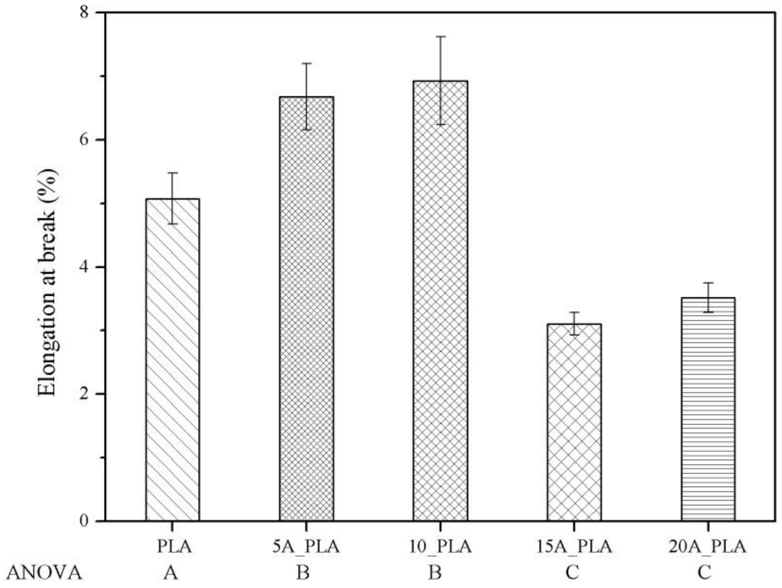
อลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% และ 10% โดยน้ำหนัก ไม่พบความแตกต่างของมอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) แสดงว่าการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณต่ำกว่า 10% โดยน้ำหนักไม่ช่วยให้พอลิแลคติกแอซิดมีค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) ที่เพิ่มขึ้น แต่พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นแตกต่างจากพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% และ 10% โดยน้ำหนัก แสดงว่าเมื่อผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณมากกว่า 10% จะช่วยให้พอลิแลคติกแอซิดมีค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) ที่สูงขึ้น เนื่องจากการถ่ายโอนแรงเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกได้ดียิ่งขึ้น แต่เมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นถึง 20% มีค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 15% โดยลดลงประมาณ 4.2% เทียบกับสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 15% อาจจะเป็นเพราะว่าปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์มีมากเกินไปจนเกิดการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์ ส่งผลให้เกิดเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ได้



รูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile strength) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) ของพอลิแลคติกแอซิด มีค่า 52.57 MPa

พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) 52.73 MPa 53.87 MPa 51.97 MPa และ 47.94 MPa ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าแบ่งค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่ม A ได้แก่พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก กลุ่ม B ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาในกลุ่ม A พบว่าไม่มีความแตกต่างของค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) หมายความว่าการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์กับพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 5-15% โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลให้ความยืดหยุ่น(Elastic)หรือค่าความแข็งเกร็ง(Stiffness) ของวัสดุลดลง แต่พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก กลับพบว่ามีค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด (Tensile strength) แตกต่างจากกลุ่ม A โดยมีค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) ลดลง 8.8% เทียบกับพอลิแลคติกแอซิด(PLA) เนื่องมาจากเมื่อผงอลูมิเนียมออกไซด์เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ทำให้ค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) ลดลง

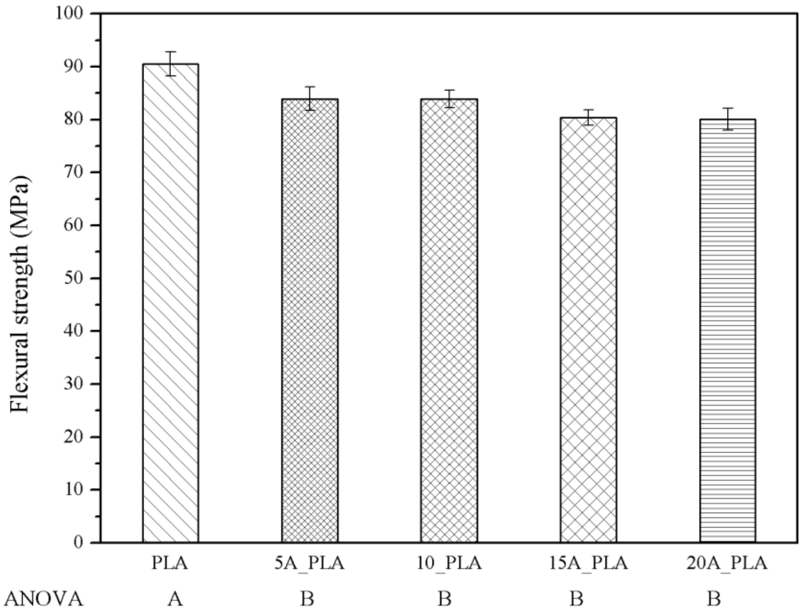


รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก (Elongation at break) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

รูปที่ 4.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก(Elongation at break) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ จากการทดสอบพบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก(Elongation at break) 5.08% และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก(Elongation at break) 6.68% 6.93% 3.11% และ 3.52% ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก(Elongation at break) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่ม A ได้แก่พอลิแลคติกแอซิด(PLA) กลุ่ม B พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% และ 10% โดยน้ำหนัก และ กลุ่ม C B พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% และ 20% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า การเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5-10% โดยน้ำหนัก นั้นไม่มีความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก(Elongation at break) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15-20% นั้นมีการลดลงของค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก(Elongation at break) อย่างมาก โดยลดลงประมาณ 40% เทียบกับ PLA สาเหตุเนื่องมาจากการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์เกิดเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) เมื่อมีแรงมากระทำจากภายนอกทำให้การเคลื่อนไหวของสายโซ่เป็นไปได้ยากจึงเกิดการแตกหักได้ง่าย เมื่อพิจารณาสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืดโดยรวมพบว่าพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) ค่าเปอร์เซ็นการยืดที่จุดแตกหัก(Elongation at break) และค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) ที่เหมาะสม

4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural testing) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

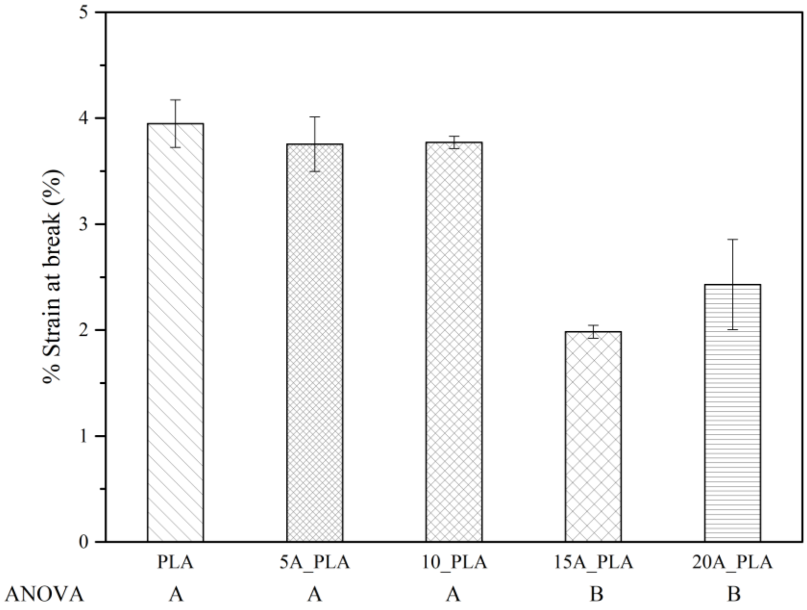
การศึกษาสมบัติต้านทานต่อการดัดโค้งจะศึกษาตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยให้แรงในโหมดดัดงอแบบ 3 จุด (Three-point bending mode) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก ใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน และใช้อัตราการกด 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในระหว่างการถูกดัดโค้งจากแรงภายนอก โดยได้ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ความต้านทานต่อการดัดโค้ง(Flexural strength) ค่าเปอร์ความเครียด ณ จุดแตกหัก(%Strain at break) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.10 ค่าความต้านทานการดัดโค้ง(Flexural strength) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

รูปที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานการดัดโค้ง (Flexural strength) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีค่าความต้านทานการดัดโค้ง(Flexural strength) 48 MPa และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานการดัดโค้ง (Flexural strength) 83.94 MPa 83.95 MPa 80.38 MPa และ 80.10 MPa ตามลำดับ เมื่อทำการ

วิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าทุกสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปมีความแตกต่างของค่าความต้านทานการดัดโค้ง (Flexural strength) เทียบกับพอลิแลคติกแอซิด(PLA)โดยลดลงมากสุด 11.4% ในพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก คิดเทียบกับPLA แต่เมื่อผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณที่เพิ่มขึ้นกลับไม่พบความแตกต่างของค่าความต้านทานการดัดโค้ง (Flexural strength) หมายความว่าผงอลูมิเนียมออกไซด์สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ส่งผลให้ความยืดหยุ่น(Elastic) หรือค่าความแข็งเกร็ง(Stiffness) ของวัสดุลดลงเพียงเล็กน้อยนั้นสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อการดึงยืดสูงสุด(Tensile strength) ของวัสดุ



รูปที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นความเครียด ณ จุดแตกหัก (%Strain at break) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

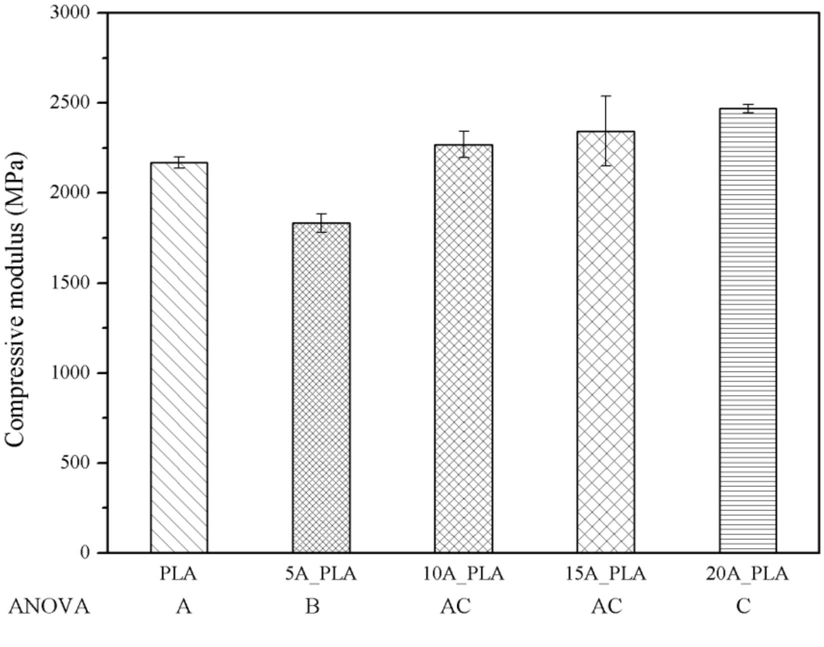
รูปที่ 4.11 แสดงค่าเปอร์เซ็นความเครียด ณ จุดแตกหัก (%Strain at break) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีค่าเปอร์เซ็นความเครียด ณ จุดแตกหัก (%Strain at break) 3.97% และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าเปอร์เซ็นความเครียด ณ จุดแตกหัก (%Strain at break) 3.75% 3.77% 1.98% และ 2.43% ตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่าเปอร์เซ็นความเครียด ณ จุดแตกหัก (%Strain at break) แบ่งออกเป็นกลุ่ม A ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดและพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% และ 10% โดยน้ำหนัก กลุ่ม B ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% และ 20% โดยน้ำหนัก โดยในกลุ่ม A พบว่าการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 5% กับ 10% มีค่าเปอร์เซ็นความเครียด ณ จุดแตกหัก (%Strain at break) ลดลงเล็กน้อย แต่ไม่ได้แตกต่างกันในทางสถิติ ซึ่งแตกต่างจากกลุ่ม B ที่มีการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 15-20% พบว่ามีการลดลงของค่าเปอร์เซ็นความเครียด ณ จุดแตกหัก (%Strain at break) อย่างชัดเจนและแตกต่างจากกลุ่ม A แสดงว่าการเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 15-20% โดยน้ำหนักจะเกิดการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์ได้ส่งผลให้เกิดจุดรวมความเค้น(Stress concentration)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

4.2.6 ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

การศึกษาสมบัติต้านทานการกดอัดนั้นทำการทดสอบตามมาตรฐานASTM D695 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและกระบวนการพิมพ์ภาพ 3 มิติ โดยขึ้นรูปชิ้นงานให้มีขนาดตรงตามมาตรฐานมีความกว้าง ความยาว และความสูงคือ 13x13x26 มิลลิเมตร ใช้โหลดเซลล์ขนาด 50 กิโลนิวตัน อัตราการกดอัด 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที โดยกดลงไปที่ 50% ของความสูงเริ่มต้นคือ 13 มิลลิเมตรและทำการหยุดทดสอบ จากการทดสอบนี้จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในระหว่างการถูกกดอัดจากแรงภายนอก โดยได้ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ



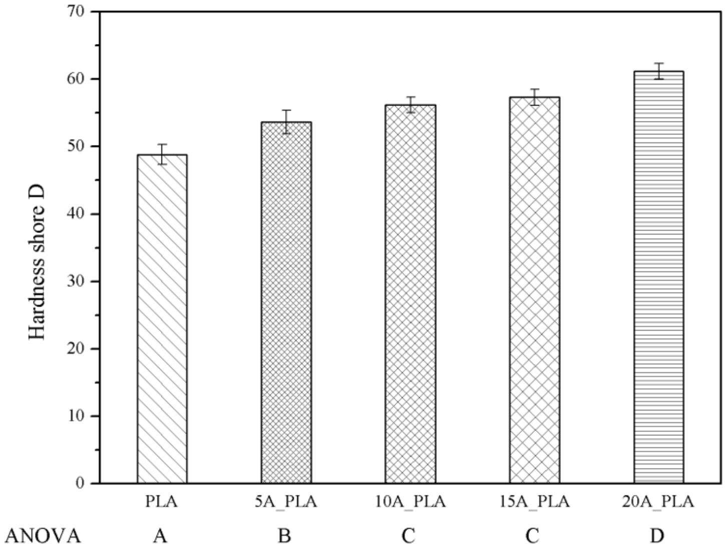
รูปที่ 4.12 ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

จากรูปที่ 4.12 ค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) 2170.1 MPa และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสการกดอัด

(Compressive modulus) 1833.94 MPa 2269.49 MPa 2344.03 MPa 2469.67 MPa เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการวิเคราะห์ว่า เมื่อผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปที่ 5% โดยน้ำหนัก ค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ลดลงเมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด(PLA) เมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์อยู่ที่ 10-15% พบว่าค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PLA แต่ยังไม่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดในทางสถิติ แต่เมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์อยู่ที่ 20% พบว่าค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) มีความแตกต่างจากพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

4.2.7 ผลการศึกษาความแข็งบนพื้นผิวด้วยเทคนิค Shore hardness test ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด



รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

การทดสอบความแข็งที่พื้นผิวด้วยหัวกดแบบ Shore D ตามมาตรฐาน ISO 868 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก โดยใช้โหลดขนาด 5 กิโลนิวตัน จากรูปที่ 4.13แสดงค่าความแข็งบนพื้นผิวที่ได้จากการทดสอบ พอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) 48D และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) 53D 56D 57D และ 61D ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ส่งผลให้ค่าความแข็งที่พื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 5-10% มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA ในทางสถิติ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 15% พบว่าค่าความแข็งที่พื้นผิวไม่มีความแตกต่างกับปริมาณ 10% ในทางสถิติ และเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 20% มีค่าความแข็งที่พื้นผิวแตกต่างกับปริมาณ 15% ในทางสถิติ การเพิ่มขึ้นของความแข็งที่พื้นผิวของชิ้นงานเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นแสดงว่าผงอลูมิเนียมออกไซด์สามารถกระจายตัวของอนุภาคได้ดีในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดโดยสังเกตได้จากเทคนิค SEM ที่มีการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ได้ดีในสูตรที่มีการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 5-15% โดยน้ำหนัก

4.2.8 ผลการศึกษาสมบัติความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) เป็นการทดสอบโดยนำชิ้นงานขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร และหนา 6 มิลลิเมตรมาทำการขัดด้วยกระดาษทราย ทำการขัดถูชิ้นงานให้ความหนาของชิ้นงานหายไป 2.54 มิลลิเมตร และนำไปเทียบกับชิ้นงานตัวอย่างโดยการคำนวณตามสมการที่ 3.2 ส่วนความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ทำการขัดชิ้นงานเป็นระยะเวลา 20 นาที โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบและนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามสมการที่ 3.3

ตารางที่ 4.2 ค่าความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

ตัวอย่างชิ้นงาน	จำนวนรอบการขัดเฉลี่ย (รอบ)	S.D	Abrasion resistance (%)
ตัวอย่างมาตรฐาน	190	1.52	-
Neat PLA	960.	17.34	504^{a}
5A_PLA	1081	88.74	568^{b}
10A_PLA	1083	116.73	569^{b}
15A_PLA	1130	112.18	593^{c}
20A_PLA	1135	69.63	596^{c}

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน โดยทำการขัดชิ้นงาน 3 ชิ้นและนำค่ามาเฉลี่ยกันพบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีค่าความทนทานต่อการขัดถู(Abrasion resistance) 504% และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนักมีค่าความทนทานต่อการขัดถู(Abrasion resistance) 568% 569% 593% และ 596% ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าเมื่อมีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปปริมาณ 5% และ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) มีค่าเพิ่มขึ้นแตกต่างจากพอลิแลคติกแอซิด และเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่

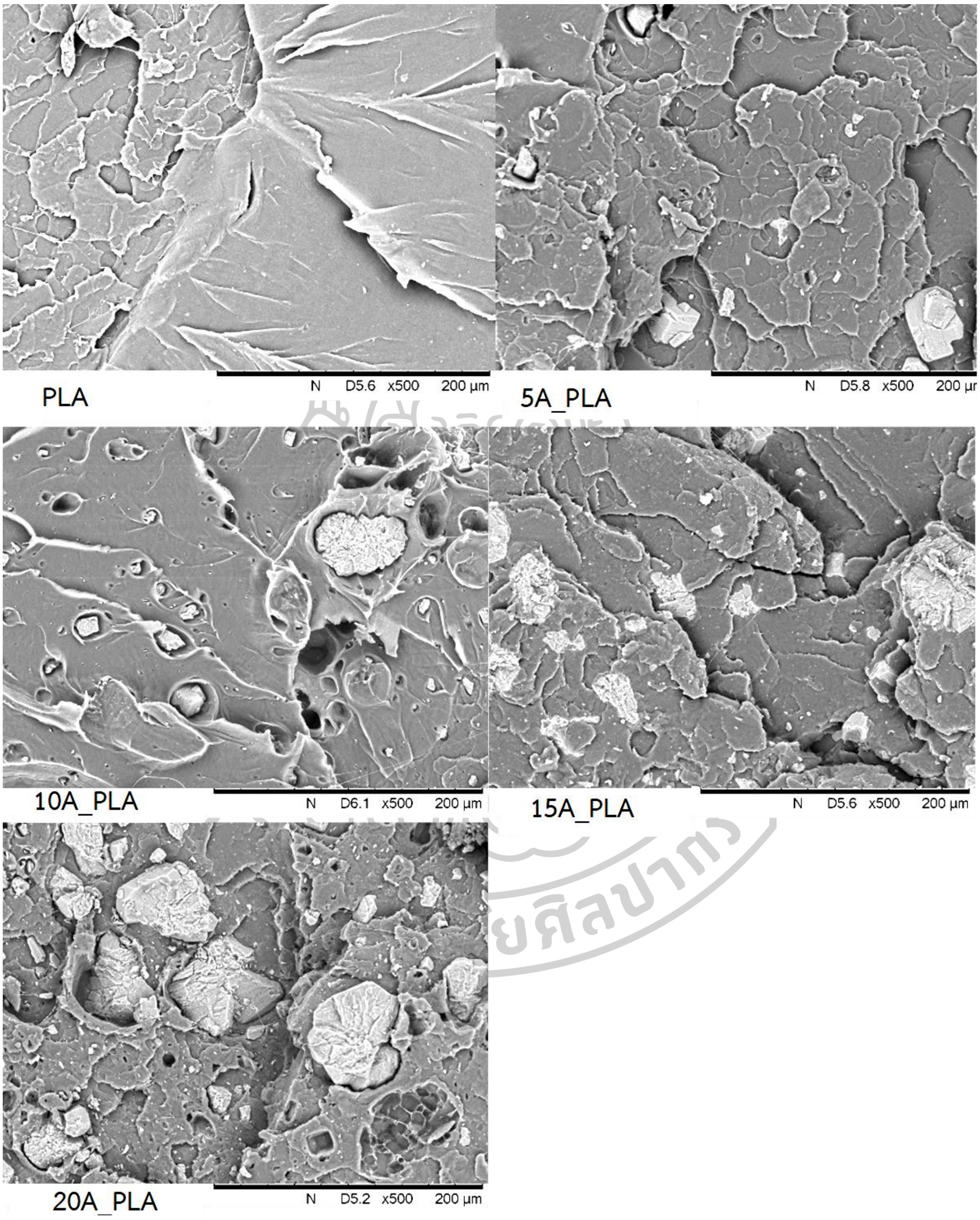
15 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่ามีความแตกต่างของค่าความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) เทียบกับพอลิแลคติกแอซิด และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปปริมาณ 5% และ 10%

ตารางที่ 4.3 ค่าความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

ตัวอย่างชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนทดสอบ	น้ำหนักหลังทดสอบ	W_r (g/mm)
Neat PLA	12.47	7.80	0.1868[a]
5A_PLA	12.68	8.26	0.1765[b]
10A_PLA	13.15	8.76	0.1759[b]
15A_PLA	13.34	8.99	0.1741[b]
20A_PLA	13.70	9.50	0.1681[c]

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน โดยทดสอบชิ้นงาน 3 ชิ้นและนำค่ามาเฉลี่ยกันพบว่า โดยแสดงเป็นค่า Wr คืออัตราการสึกหรอของชิ้นงาน พอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีค่าความทนทานต่อการสึกหรอ(Wear resistance) 0.1868 g/mm และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) 1765 g/mm 0.1741 g/mm 0.1681 g/mm และ 0.1681 g/mm จากการทดสอบพบว่าค่าความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์สูงขึ้น โดยค่า W_r คืออัตราการสึกหรอของวัสดุยิ่งมีค่าน้อยนั้นหมายความว่าวัสดุมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำและเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% ได้ผลการวิเคราะห์ว่าเมื่อมีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณ 5-15% โดยน้ำหนัก พบว่ามีความแตกต่างของค่าความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) เมื่อเทียบกับ PLA แต่พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ไม่มีความแตกต่างของค่าความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ในทางสถิติ แต่เมื่อผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความทนทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance) มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ

4.2.9 ผลการศึกษาพื้นผิวรอยแตกหักของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

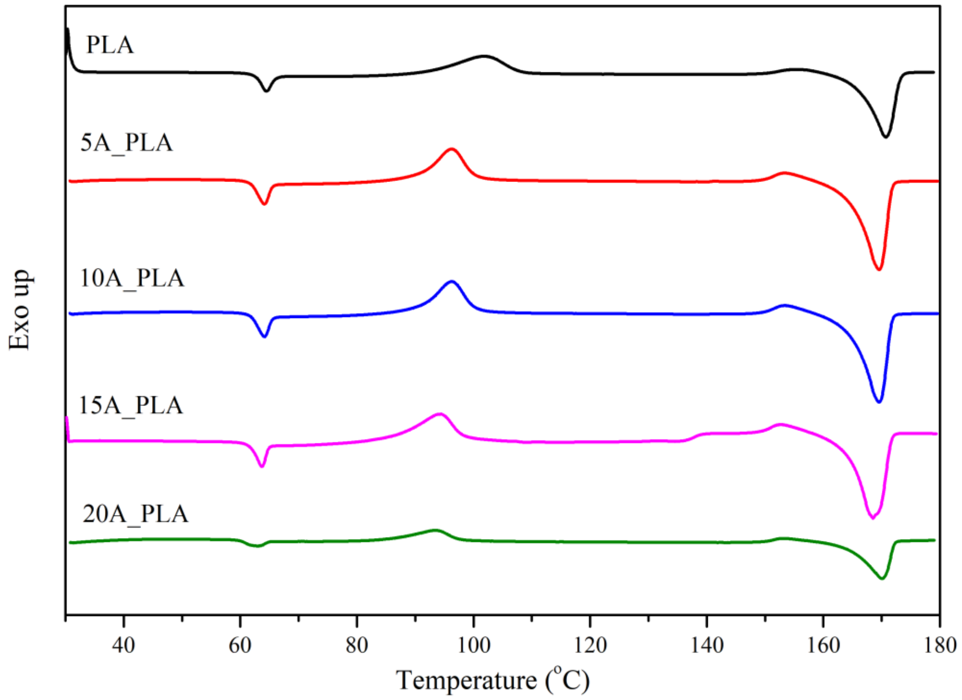


รูปที่ 4.14 พื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope(SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกลองจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เป็นเทคนิคที่สามารถบ่งบอกลักษณะความเข้ากันได้ของพอลิแลคติกแอซิดกับผงอลูมิเนียมออกไซด์โดยทำการศึกษาจากพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานหลังผ่านการทดสอบด้วยความต้านทานต่อการดัดโค้ง(Flexural test) ในรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA) ในนั้นมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ(Brittle fracture) โดยสังเกตได้จากลักษณะที่พื้นผิวรอยแตกมีความคมชัดและค่อนข้างเรียบ เมื่อพิจารณาในพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% พบว่าพื้นผิวรอยแตกมีลักษณะที่ขรุขระและมีการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ในเมททริกซ์พอลิแลคติกแอซิด และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% มีลักษณะพื้นผิวรอยแตกเหมือนกับสูตร 5% แต่พบว่ามีร่องรอยการหลุดออกของผงอลูมิเนียมออกไซด์(pull out) ออกจากเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิดหลายตำแหน่ง และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% กับ 20% โดยน้ำหนัก พบว่ามีลักษณะพื้นผิวรอยแตกเหมือนสูตร 5% และมีการหลุดออกของผงอลูมิเนียมออกไซด์(pull out) เหมือนกับสูตร 10% แต่มีการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์และการหลุดออกของผงอลูมิเนียมออกไซด์ขนาดใหญ่ และในทุกสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์พบว่าช่องว่างระหว่างผงอลูมิเนียมออกไซด์และเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิดนั้นมีลักษณะที่ค่อนข้างแคบแสดงว่าผงอลูมิเนียมออกไซด์และพอลิแลคติกแอซิดยึดสามารถเข้ากันได้และมีการยึดเหนียวกันเนื่องจากได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APS และจากผลการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) และค่ามอดูลัสการการกดอัด (Compressive modulus) ในพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักนั้นเกิดการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มากกว่าการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% ส่งผลให้ค่ามอดูลัสการดึงยืด(Tensile modulus) และค่ามอดูลัสการการกดอัด(Compressive modulus) ของการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% ต่ำกว่าการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC)



รูปที่ 4.15 DSC Thermogram ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

รูปที่ 4.16 แสดงกราฟ DSC Thermogram ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกันในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว Glass transition temperature (T_g) แสดงพีค Endothermic อย่างชัดเจน เนื่องจากในเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เส้นพอลิเมอร์เมื่อออกจากหัว Nozzle นั้นจะสัมผัสกับอากาศโดยตรง ส่งผลให้เส้นพอลิเมอร์นั้นเกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเส้นพอลิเมอร์ที่พิมพ์ออกมาจะอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว(Glassy state) มากกว่าความเป็นผลึก และสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มที่จะไม่เสถียรและจะเปลี่ยนให้วัสดุมีความแข็งและเปราะมากขึ้น ซึ่งเรียกกว่ากระบวนการ structural relaxation หรือ physical aging [30] อุณหภูมิหลอมเหลว(Melting temperature, T_m) พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง และปรากฏพีค Cold

crystallization temperature(T_{cc}) เช่นเดียวกันกับในตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก(Injection molding) แสดงว่าพอลิแลคติกแอซิดและเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ นั้นไม่สามารถตกผลึกได้อย่างสมบูรณ์ในระหว่างการหล่อเย็น

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งแรกของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	H_{cc} (J/g)	H_{m1} (J/g)	H_{m2} (J/g)	%X_c (%)
NeatPLA	61.88	101.78	155.16	170.74	14.25	1.97	-22.47	6.72
5A_PLA	61.23	96.20	153.53	169.89	19.46	4.11	-35.21	13.17
10A_PLA	61.48	96.20	153.42	169.63	20.50	4.24	-35.97	13.42
15A_PLA	63.77	94.45	152.59	168.55	18.88	3.82	-33.42	14.56
20A_PLA	62.73	93.34	153.15	170.07	17.51	4.41	-32.41	14.10

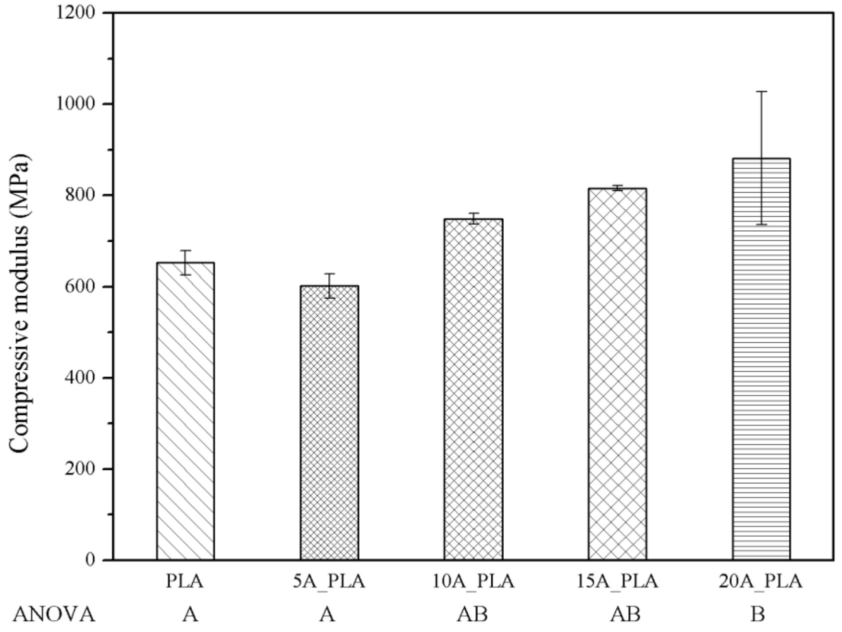
จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว(Melting temperature, T_m) และปริมาณผลึกของชิ้นงานที่ได้จากเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA)มีปริมาณผลึก(X_c) 6.72% พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก มีปริมาณผลึก (X_c) 13.17% 13.42% 14.56% และ 14.10% ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตาม แสดงว่าผงอลูมิเนียมออกไซด์นั้นช่วยให้พอลิแลคติกแอซิดสามารถเกิดผลึกได้ง่ายขึ้น เนื่องจากผงอลูมิเนียมออกไซด์มีลักษณะเป็นทรงกลมที่เปรียบเสมือน nucleating agent ช่วยให้พอลิแลคติกแอซิดสามารถเกิดผลึกได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.5 ปริมาณผลึกที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จากการให้ความร้อนครั้งแรก (1st heating scan)

ตัวอย่าง	กระบวนการฉีดพลาสติก	เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ	ปริมาณผลึกที่แตกต่างกัน (%)
NeatPLA	8.46	6.72	-1.74
5A_PLA	8.76	13.17	4.41
10A_PLA	12.26	13.42	1.16
15A_PLA	12.81	14.56	1.75
20A_PLA	13.95	14.10	0.15

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลึก(X_C)ที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA)มีการลดลงของปริมาณผลึก 1.74% และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20% โดยน้ำหนัก มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึก 4.41% 1.16% 1.75% และ 0.15% ตามลำดับ จากกการเปรียบเทียบพบว่าปริมาณผลึกในสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิตินั้นมีปริมาณผลึกที่มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกเล็กน้อย โดยเพิ่มขึ้นมากสุดในสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก เพราะมีการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ได้ดีจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือน nucleating agent แต่เมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกกลับน้อยลงสาเหตุเนื่องมากจากเกิดการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์ส่งผลให้สมบัติด้าน nucleating agent ลดลงทำให้ปริมาณผลึกของชิ้นงานที่รูปด้วยกระบวนการฉีดและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีความแตกต่างกันไม่มาก

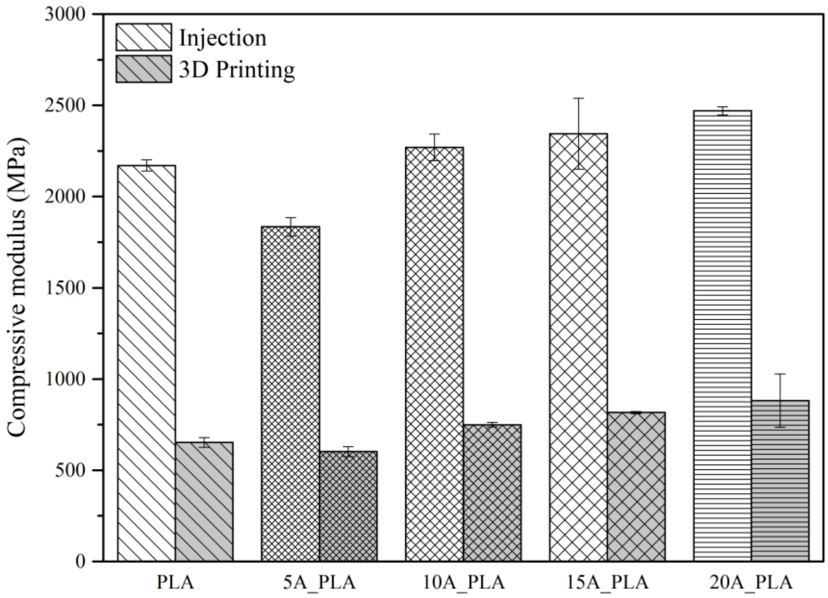
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 4.16 ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

การพิจารณาสมบัติเชิงกลในส่วนชิ้นงานขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ นั้นมีการทดสอบเฉพาะสมบัติการกดเนื่องจากการใช้งานของวัสดุจะใช้ในด้านการกดทับเป็นส่วนมาก รูปที่ 4.16 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) 653.07 MPa และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) 602 MPa 749.27 MPa 816.11 MPa และ 882.11 MPa ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าเมื่อผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ ลงไปที่ 5% ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ไม่มีความแตกต่างกับ PLA ในทางสถิติ เมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10-15% พบว่าค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PLA แต่ยังไม่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดในทางสถิติ แต่เมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์อยู่ที่ 20% พบว่าค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA ในทางสถิติ แสดงว่าเมื่อ

ปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10-20% จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) มีความแตกต่างจากพอลิแลคติกแอซิด



รูปที่ 4.17 ค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

เมื่อเปรียบเทียบผลของค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) โดยพอลิแลคติกแอซิดมีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ลดลง 69.91% และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ลดลง 67.17% 66.99% 65.18% และ 64.28% ตามลำดับ การลดลงของค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) เนื่องมาจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) มีความหนาแน่นที่น้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) อีกทั้งยังรูพรุนแบบเปิด(Open porosity) ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) โดยเมื่อพิจารณาจากภาพโครงสร้างสัณฐานวิทยาจากการส่อง

กล้อง SEM จะพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) จะปรากฏช่องว่าง (Air gaps) ระหว่างชั้นของเส้นฟิลาเมนต์ที่ซ้อนทับกัน ซึ่งช่องว่าง(Air gaps) ในชิ้นงานเปรียบเสมือนจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ของวัสดุซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Erick O. Cisneros-López และคณะ[50]

4.3.3 ผลการทดสอบหารูพรุนทั้งหมด (Total porosity) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตารางที่ 4.6 ปริมาณรูพรุนทั้งหมด (Total porosity) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)

ชิ้นงาน	น้ำหนักหลังอบ (g)	น้ำหนักหลังแช่ในน้ำกลั่น (g)	ส่วนต่างน้ำหนัก (g)	ปริมาตรชิ้นงาน (cm^3)	Total porosity (%)
PLA	4.8302	4.8541	0.0239	6.10	0.39
5A_PLA	4.7317	4.7594	0.0277	5.30	0.52
10A_PLA	5.4967	5.5607	0.0640	5.39	1.19
15A_PLA	6.0328	6.1074	0.0746	5.75	1.30
20A_PLA	5.8598	5.9584	0.0986	5.53	1.79

จากการทดสอบหาปริมาณรูพรุนทั้งหมด (Total porosity) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีปริมาณรูพรุนทั้งหมด (Total porosity) 0.39% และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีปริมาณรูพรุนทั้งหมด (Total porosity) 0.52% 1.19% 1.30% และ 1.79% ตามลำดับโดยปริมาณรูพรุนเปิดนั้นแสดงถึงช่องว่างภายในชิ้นงานโดยพบว่าปริมาณรูพรุนเปิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยรูพรุนเปิดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีปริมาณพื้นผิว (Surface area) สูงขึ้น ทำให้ระหว่างการทดสอบเมื่อนำชิ้นงานไปแช่ในน้ำกลั่น น้ำกลั่นจะมาเกาะที่พื้นผิวของชิ้นงานได้ปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการแพร่ของน้ำมาบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานและเกิดการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในชิ้นงานได้ โดยปริมาณน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากทำการจุ่มแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 1 วัน พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ

ผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยรูปที่ 4.18 แสดงชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าลักษณะภายนอกของชิ้นงานมีรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการซ้อนทับกันของเส้นฟิลาเมนต์และมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น

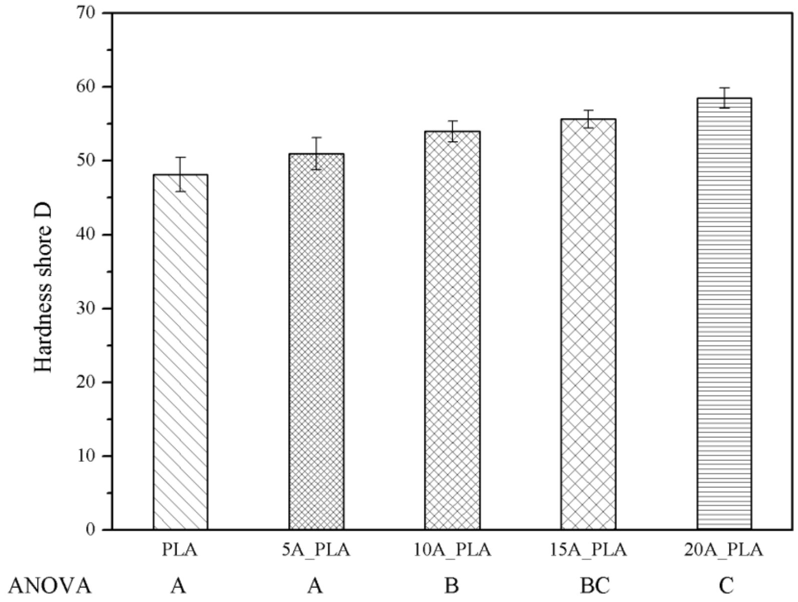
รูปที่ 4.18 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ

ตารางที่ 4.7 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) และชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)

ชิ้นงาน	ชิ้นงาน Injection			ชิ้นงาน 3D printing		
	ปริมาตรเฉลี่ย (cm^3)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3)	ปริมาตรเฉลี่ย (cm^3)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3)
PLA	5.9125	7.2067	1.2189	4.5048	4.9455	1.0974
5A_PLA	5.9759	7.1482	1.2209	4.3979	4.9127	1.1171
10A_PLA	5.7389	7.4722	1.3088	4.4859	5.4658	1.2222
15A_PLA	5.7848	7.7720	1.3361	4.6285	5.9275	1.2807
20A_PLA	5.7372	7.7622	1.3445	4.7600	5.9450	1.2487

โดยตารางที่ 4.7 แสดงความหนาแน่นชิ้นงานชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีค่าความหนาแน่น 1.2189 g/cm^3 และ 1.0974 g/cm^3 พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% มีค่าความหนาแน่น 1.2209 g/cm^3 และ 1.1171 g/cm^3 พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% มีค่าความหนาแน่น 1.3088 g/cm^3 และ 1.2222 g/cm^3 พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% มีค่าความหนาแน่น 1.3088 g/cm^3 และ 1.2222 g/cm^3 และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% มีค่าความหนาแน่น 1.3088 g/cm^3และ 1.2222 g/cm^3 จากการทดสอบพบว่าเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์สูงขึ้นส่งผลให้ความหนานแน่นของชิ้นงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตาม เมื่อพิจารณาในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding) พบว่ามีความหนาแน่นที่มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และเมื่อพิจารณาในส่วนของการทดสอบหาปริมาณรูพรุนเปิด (Open porosity) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) พบว่ามีความสอดคล้องกันเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณรูพรุนเปิด (Open porosity) เพิ่มขึ้นตาม

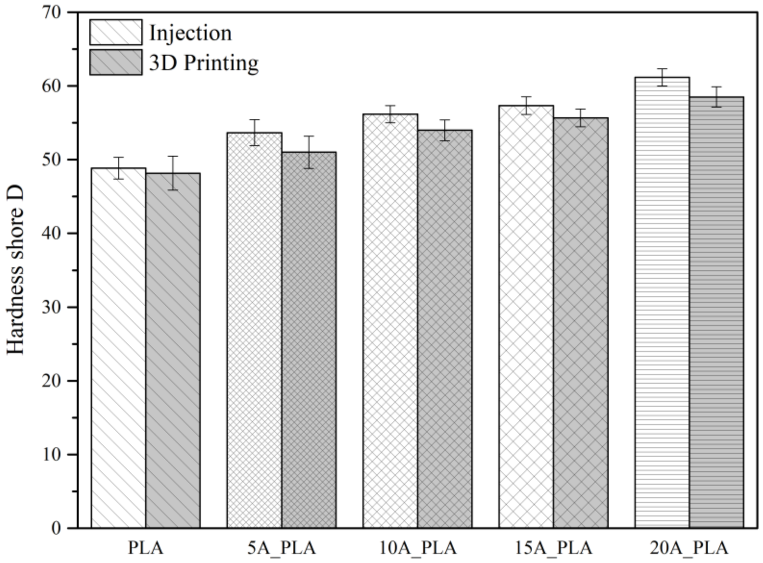
4.3.4 ผลการศึกษาความแข็งบนพื้นผิว (Shore hardness test) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 4.19 ความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

การทดสอบความแข็งแรงด้วยหัวกดแบบ Shore D ตามมาตรฐาน ISO 868 ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้โหลดขนาด 5 กิโลนิวตัน จากรูปที่ 4.18แสดงค่าความแข็งบนพื้นผิวที่ได้จากการทดสอบ พอลิแลคติกแอซิด(PLA) มีค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) 48D และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) 51D 54D 55D และ 68D ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าพอลิแลคติกแอซิด(PLA)และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% ไม่มีความแตกต่างของค่าความแข็งบนพื้นผิว แต่ที่ปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10% พบว่ามีค่าความแข็งบนพื้นผิวแตกต่างจากพอลิแลคติกแอซิด(PLA) และเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 15% พบว่าค่าความแข็งที่พื้นผิวเพิ่มขึ้นและมีความแตกต่างไม่มากเมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% และเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 20% มีค่าความแข็งที่พื้นผิวแตกต่างอย่างชัดเจนกับผงอลูมิเนียมออกไซด์

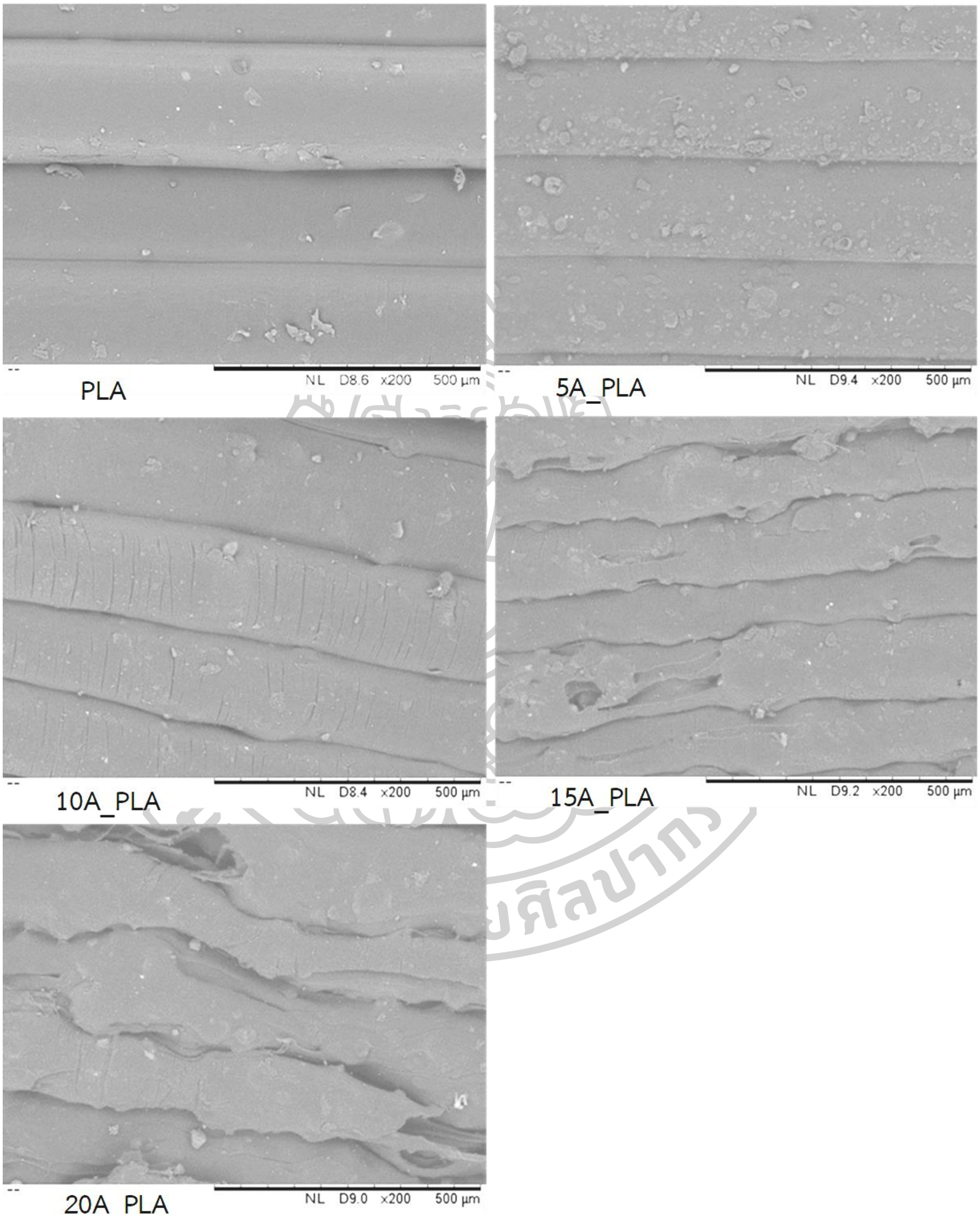
ปริมาณ 10% การเพิ่มขึ้นของความแข็งที่พื้นผิวของชิ้นงานเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น แสดงว่าผงอลูมิเนียมออกไซด์สามารถกระจายตัวของอนุภาคได้ดีในเมททริกซ์พอลิแลคติกแอซิด



รูปที่ 4.20 ความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

รูปที่ 4.19 แสดงผลการเปรียบเทียบความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิตินั้นมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าไม่มีความแตกต่างกันของค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานทั้ง 2 กระบวนการขึ้นรูป จึงสรุปได้ว่าการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติไม่ส่งผลให้ค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของวัสดุเปลี่ยนแปลง

4.3.5 ผลการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)



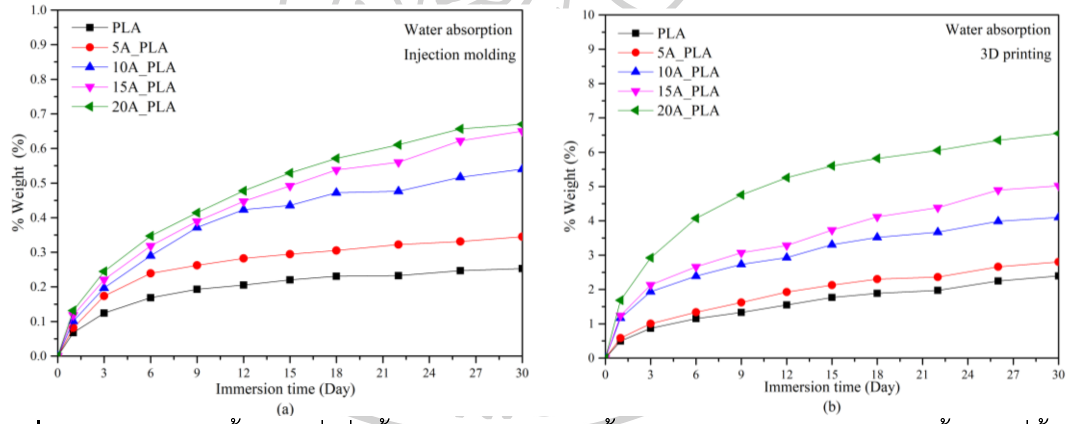
รูปที่ 4.21 พื้นผิวชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope(SEM) ที่กำลังขยาย 200 เท่า

ในรูปที่ 4.20 แสดงลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่กำลังขยาย 200 เท่า ในรูปพอลิแลคติกแอซิด(PLA)แสดงพื้นผิวของชิ้นงานที่มีลักษณะราบเรียบและมีช่องว่าง (Air-gaps)ของเส้นฟิลาเมนต์ ผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% พบว่ามีการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออดไซด์ในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดได้ดีและมีช่องว่าง(Air-gaps)ของเส้นฟิลาเมนต์แต่มีระยะห่างที่แคบกว่าพอลิแลคติกแอซิดเล็กน้อย พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% พบว่า เส้นฟิลาเมนต์เริ่มมีความขรุขระเล็กน้อย การกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดี ช่องว่าง(Air-gaps)ของเส้นฟิลาเมนต์แต่มีระยะห่างที่แคบกว่าพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% พบว่าเส้นฟิลาเมนต์เริ่มมีความขรุขระที่พื้นผิวมากขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% การกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีและช่องว่าง(Air-gaps)ของเส้นฟิลาเมนต์แต่มีระยะห่างที่แคบกว่าพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% เส้นฟิลาเมนต์ในแต่ละชั้นมีความขรุขระมากกว่าสูตรอื่นๆเนื่องจากปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์มากที่สุด อีกทั้งยังเกิดการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์เช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและมีช่องว่างระหว่างชั้นของเส้นฟิลาเมนต์เหมือนพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยช่องว่าง(Ari-gaps) ระหว่างชั้นของเส้นฟิลาเมนต์ในชิ้นงานเปรียบเสมือนจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณมีค่าลดลง

4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังผ่านการจุ่มแช่ชิ้นงานในสารละลายน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

4.4.1 ผลการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test)

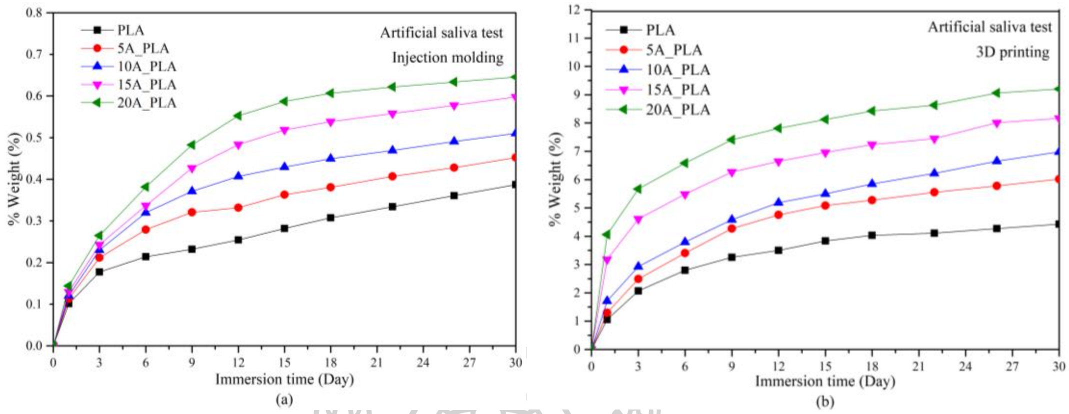
การทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ(Water absorption) และการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ได้ทำการทดสอบโดยนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จำนวนสูตรละ 6 ชิ้นงาน ทำการจุ่มแช่ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน(Deionized water) และในน้ำลายเทียม โดยทำการจุ่มแช่เป็นระยะเวลา 30 วัน และทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของตามสมการที่ 3.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ(Water absorption) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติโดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาในการทดสอบ โดยทำการทดสอบทั้งสิ้น 30 วัน



รูปที่ 4.22 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการจุ่มแช่ในน้ำ (Water absorption) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป (a) ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและ(b) เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ในรูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย (a)กระบวนการฉีดและ (b)เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์สูงขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในแต่ละวันมีค่าสูงขึ้นตามเนื่องจากผงอลูมิเนียมออกไซด์มีหมู่ไฮดรอกซิล(-OH) ที่สามารถทำอันตกิริยากับโมเลกุลของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถดูดซับบนพื้นผิวของชิ้นงานและเกิดการแพร่เข้าสู่ภายในชิ้นงานได้ส่งผลให้น้ำหนักโดยรวมของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟพบว่า ในช่วง 1-12 วันในการทดสอบพบว่าค่าเปอร์เซ็นน้ำหนักที่

เพิ่มขึ้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักอย่างรวดเร็วสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ และที่ระยะเวลาการทดสอบในวันที่ 13-30 วันพบว่าค่าเปอร์เซ็นน้ำหนักมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง



รูปที่ 4.23 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูป (a)ด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและ (b)เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ในรูปที่ 4.22 แสดงผลการหลังการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย (a)กระบวนการฉีดและ (b)เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์สูงขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในแต่ละวันมีค่าสูงขึ้นตามเหมือนกับการทดสอบการดูดซับน้ำ(Water absorption) แต่เมื่อพิจารณาในช่วงเวลา 1-12 วันพบว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่มากกว่าการทดสอบการดูดซับน้ำ(Water absorption) ทั้งนี้เนื่องมาจากในน้ำลายเทียมนั้นมีส่วนผสมที่เป็นกรดอ่อนและเบสอ่อน ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล(-OH)ได้ดี อีกทั้งเมทริกซ์เป็นพอลิแลคติกแอซิดซึ่งมีสมบัติความเป็นกรดอ่อนและเบสอ่อน ทำให้กรดก่อนและเบสอ่อนที่ผสมในน้ำลายเทียมนั้นกัดกร่อนพื้นผิวของพอลิแลคติกแอซิดได้ ส่งผลให้น้ำสามารถดูดซึมที่พื้นผิวของชิ้นงานและเกิดการแพร่เข้าสู่ภายในชิ้นงานได้ง่ายกว่า

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หลังการทดสอบการดูดซึมน้ำ(Water absorption) เป็นระยะเวลา 30 วัน

ตัวอย่าง	การดูดซึมน้ำ (Water absorption) (%Weight)	
	กระบวนการฉีด	การพิมพ์ 3 มิติ
PLA	0.25	2.34
5A_PLA	0.34	2.80
10A_PLA	0.54	4.10
15A_PLA	0.64	5.02
20A_PLA	0.66	6.54

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเปอร์เซ็นน้ำหนัก(%Weight)ที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding) และเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) หลังการทดสอบการดูดซึมน้ำ(Water absorption เป็นระยะเวลา 30 วัน เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการดูดซับน้ำ (Water absorption) ระหว่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมีค่าการดูดซับน้ำ(Water absorption) มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดถึง 10 เท่า เนื่องมาจากในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดนั้นพื้นผิวของชิ้นงานนั้นราบเรียบและปิดสนิทไม่มีช่องว่าง(Air-gaps) แตกต่างจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่พื้นผิวนั้นเป็นการซ้อนทับกันเป็นชั้นๆของเส้นฟิลาเมนต์ เมื่อน้ำเข้าไปดูดซึมบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานและเกิดแพร่ของน้ำเข้าไปภายในช่องว่าง(Air-gaps) ส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานที่ขึ้นรูปเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีด

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หลังการทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) เป็นระยะเวลา 30 วัน

ตัวอย่าง	น้ำลายเทียม (Artificial saliva test) (%Weight)	
	กระบวนการฉีด	การพิมพ์ 3 มิติ
PLA	0.38	4.42
5A_PLA	0.45	6.01
10A_PLA	0.51	6.97
15A_PLA	0.59	8.16
20A_PLA	0.64	9.23

โดยในตารางที่ 4.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นน้ำหนัก(%Weight)ที่เพิ่มขึ้นของชิ้นชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หลังการทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) เป็นระยะเวลา 30 วัน เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมีค่าน้ำหนัก(%Weight)ที่เพิ่มขึ้น มากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดถึง 10 เท่า เช่นเดียวกันกับการทดสอบการดูดซับน้ำ(Water absorption) เนื่องมาจากในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดนั้นพื้นผิวของชิ้นงานนั้นราบเรียบและปิดสนิทไม่มีช่องว่าง(Air-gaps) แตกต่างจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่พื้นผิวนั้นเป็นการซ้อนทับกันของเส้นฟิลาเมนต์ ชิ้นงานจึงมีช่องว่างทำให้น้ำลายเทียม(Artificial saliva) สามารถดูดซึมเข้าไปภายในชิ้นงานได้ส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากกระบวนการฉีด

4.4.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฉดสี (Color test)

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงเฉดสีของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ทำการทดสอบโดยนำเครื่องวัดสี(Color reader) ทำการส่องไปบนพื้นผิวของชิ้นงานในตู้ไฟที่ให้แสงแบบกลางวัน(Day light) โดยเปรียบเทียบค่าระหว่างก่อนการทดสอบเป็นค่า L_1 a_1 และ b_1 และค่าที่วัดหลังการทดสอบเป็นค่า L_2 a_2 และ b_2 จากนั้นนำไปคำนวณตามสมการที่ 3.5 เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม (ΔE) โดยค่า L แสดงถึง ความสว่าง (lightness) จาก สีขาว(+L) จนเปลี่ยนเป็นสีดำ(–L) ค่า a แสดงถึง สีแดง(+a) จนเปลี่ยนเป็นสีเขียว(-a) และ ค่า b แสดงถึง สีเหลือง(+b) จนเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน(-b)

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีหลังทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

ชิ้นงาน	ก่อนการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม			หลังการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม			ΔE
	L_1	a_1	b_1	L_2	a_2	b_2	
PLA	67.13 ±3.76	13.16 ±5.82	-0.03 ±7.81	54.22 ±2.15	-0.76 ±1.82	0.13 ±1.51	18.98 ±7.65
5A_PLA	63.64 ±3.74	5.45 ±1.53	6.41 ±2.58	60.89 ±3.21	4.36 ±1.02	6.01 ±1.42	2.99 ±1.37
10A_PLA	68.68 ±2.00	6.87 ±3.04	7.04 ±3.91	66.76 ±3.56	2.75 ±1.01	6.94 ±2.47	4.55 ±2.94
15A_PLA	70.47 ±1.76	4.00 ±4.57	4.97 ±3.51	66.70 ±2.53	12.34 ±4.71	5.52 ±3.67	9.17 ±0.80
20A_PLA	67.41 ±0.82	8.47 ±2.61	3.63 ±1.86	67.17 ±1.60	11.98 ±1.94	2.55 ±3.65	3.88 ±2.06

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(ΔE) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด จากการทดสอบชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดก่อนการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม พบว่าค่าความสว่าง(L) ของพอลิแลคติกแอซิดมีค่า 67.13 และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าความสว่างคือ 63.64 68.68 70.4 และ 67.41 ตามลำดับ พบว่าค่าความสว่างของสูตรที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 5% โดยน้ำหนัก มีค่าความ

สว่างลดลงเมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดแสดงว่าการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% ทำให้ความสว่างของชิ้นงานลดลงเพราะพื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระเพิ่มขึ้นจากการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ทำให้การสะท้อนของแสงเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ค่าความสว่างลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10-15% พบว่าค่าความสว่างมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่ามีการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นพื้นผิวของชิ้นงานจึงเกิดการสะท้อนของแสงได้ดีทำให้ความสว่างของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 20% พบว่าค่าความสว่างของชิ้นงานมีค่าลดลงเนื่องมาจาการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์ส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระการสะท้อนของแสงจงเกิดได้ไม่ดีส่งผลให้ค่าความสว่างลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดก่อนและหลังการจุ่มแช่ในน้ำลาย พบว่ามีค่าความสว่างที่ลดลงอย่างมากในสูตร PLA แต่ในสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5-20% มีการลดลงของค่าความสว่างเพียงเล็กน้อยแสดงว่าผงอลูมิเนียมออกไซด์ช่วยให้ชิ้นงานมีทนทานต่อการเปลี่ยนสีเพิ่มข้น

เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) 18.98 และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) คือ 2.99 4.55 9.17 และ 3.88 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีการเปลี่ยนแปลงเฉดสีหลังจากการทดสอบจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมมากที่สุด และในสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) ลดลงโดยสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก แสดงว่าผงอลูมิเนียมออกไซด์ช่วยให้ชิ้นงานมีทนทานต่อการเปลี่ยนสีมากขึ้น

ตารางที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีหลังทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ชิ้นงาน	ก่อนการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม			หลังการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม			ΔE
	L_1	a_1	b_1	L_2	a_2	b_2	
PLA	61.42 ±2.48	1.72 ±2.72	2.45 ±2.88	53.46 ±2.90	2.97 ±1.74	0.89 ±3.92	8.20 ±1.53
5A_PLA	65.40 ±1.66	6.65 ±1.75	3.83 ±2.65	62.04 ±1.97	6.06 ±1.26	2.62 ±1.86	3.61 ±0.98
10A_PLA	79.94 ±1.89	7.22 ±1.56	3.76 ±1.72	76.48 ±1.32	2.65 ±1.36	7.78 ±1.89	7.00 ±0.63
15A_PLA	77.23 ±2.35	11.40 ±2.21	3.78 ±1.39	76.91 ±2.05	17.43 ±2.77	-0.24 ±3.78	7.25 ±2.47
20A_PLA	79.51 ±2.26	12.36 ±1.34	1.68 ±1.12	78.33 ±1.65	18.28 ±2.46	1.22 ±1.51	6.05 ±1.34

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(ΔE) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าค่าความสว่าง(L) ของพอลิแลคติกแอซิดมีค่า 61.42 และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าความสว่างคือ 65.40 79.94 77.23 และ 79.51 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความของชิ้นงานที่ขึ้นด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด สูตรพอลิแลคติกแอซิดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่าความสว่างน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด แต่ในสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5-20% โดยน้ำหนัก ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่าความสว่างมากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด เป็นเพราะว่าชิ้นงานขึ้นด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ได้ดีกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ส่งผลให้การสะท้อนของแสงเกิดขึ้นได้ดีค่าความสว่างจึงสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ก่อนและหลังการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม พบว่ามีค่าความสว่างที่ลดลงอย่างมากในสูตร PLA แต่ในสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5-20% มีการลดลงของค่าความสว่างเพียงเล็กน้อยแสดงว่าผงอลูมิเนียมออกไซด์ช่วยให้ชิ้นงานมีทนทานต่อการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) 8.20 และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) คือ 3.60 7.00 7.25 และ 6.05 ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่าสูตรพอลิแลคติกแอซิดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวมหลังจากการทดสอบจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมมากที่สุดเหมือนกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด ส่วนสูตรที่มีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5-20% โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) ลดลง แต่มีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด เพราะว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมีช่องว่าง(Air gaps) ทำให้พื้นผิวของชิ้นงานโดนกรดอ่อนและเบสอ่อนกัดกร่อนได้ง่ายทำให้มีความขรุขระเพิ่มขึ้นการสะท้อนของแสงจึงลดลงส่งผลให้ค่าเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม(∆E) เพิ่มสูงขึ้น

4.4.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

การพิจารณาสมบัติเชิงกลในส่วนชิ้นงานขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ นั้นมีการทดสอบเฉพาะสมบัติการกดอัดเนื่องจากการใช้งานของวัสดุจะใช้ในด้านการกดทับเป็นส่วนมาก

ตารางที่ 4.10 ค่ามอดูลัสต่อการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบ(Non-test) ชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) และชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำลายเทียม(Artificial saliva test)

ชิ้นงาน	ค่ามอดูลัสต่อการกดอัด(Compressive modulus) (MPa)				
	ก่อนจุ่มแช่	S.D.	แช่น้ำกลั่น	แช่น้ำลายเทียม	S.D.
PLA	2170.10[a]	30.69	2063.32[b]	2075.93[b]	85.87
5A_PLA	1833.94[a]	51.19	2044.85[b]	2019.37[b]	113.69
10A_PLA	2269.49[a]	73.01	2261.84[a]	2,248.15[a]	67.31
15A_PLA	2344.03[a]	193.86	2266.72[a]	2354.99[a]	93.52
20A_PLA	2469.67[a]	22.11	2251.22[a]	2401.82[a]	666.52

โดยในตารางที่ 4.10 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบ(Non-test) ชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับน้ำ(Water absorption) และชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) โดยพอลิแลคติกแอซิด(PLA) ในชิ้นงานที่ทำการจุ่มแช่ในน้ำกลั่น มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) เท่ากับ 2,063.32 MPa และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) 2,044.85 MPa 2,261.84 MPa 2,266.72 MPa และ 2,251.22 MPa ตามลำดับ และพอลิแลคติกแอซิด(PLA) ในชิ้นงานที่ทำการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) เท่ากับ 2,075.93 MPa และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) 2,019.37 MPa 2,248.15 MPa 2,354.99 MPa และ 2,401.82 MPa ตามลำดับ

จากการทดสอบพบว่าค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบ(Non-test) ชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับน้ำ(Water absorption) และชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ในสูตรพอลิแลคติกแอซิดเมื่อทำการจุ่มแช่ในน้ำและน้ำลายเทียมพบว่ามีการลดลงของค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) เช่นเดียวกันกับพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนักพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) แสดงว่าการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปนั้นช่วยให้ชิ้นงานสามารถทนทานต่อน้ำและน้ำลายเทียมในระยะเวลา 30 วันได้

ตารางที่ 4.11 ค่ามอดูลัสต่อการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบ(Non-test) ชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับน้ำ(Water absorption) และชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำลายเทียม(Artificial saliva test)

ชิ้นงาน	ค่ามอดูลัสต่อการกดอัด(Compressive modulus) (MPa)				
	ก่อนจุ่มแช่	S.D.	แช่น้ำกลั่น	แช่น้ำลายเทียม	S.D.
PLA	653.07[a]	26.58	461.52[b]	494.62[b]	83.99
5A_PLA	602.00[a]	27.19	568.80[b]	608.10[b]	42.81
10A_PLA	749.27[a]	12.22	705.78[a]	773.11[a]	45.14
15A_PLA	816.11[a]	5.53	734.25[a]	805.86[a]	24.84
20A_PLA	882.10[a]	146.22	789.97[a]	810.18[a]	81.75

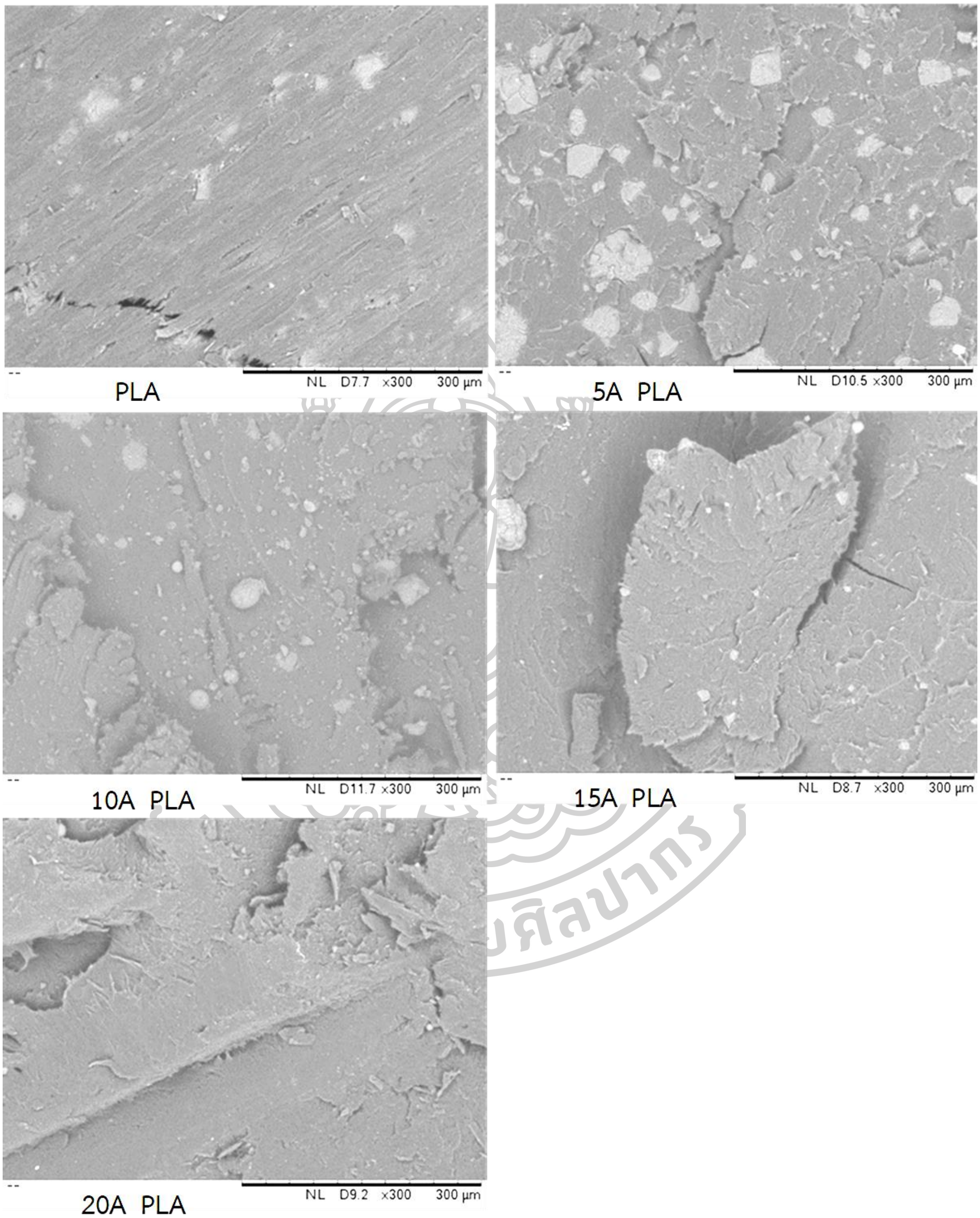
ในตารางที่ 4.11 แสดงค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) ของชิ้นงานขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบ(Non-test) ชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับน้ำ(Water absorption) และชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) โดยพอลิแลคติกแอซิด(PLA) ในชิ้นงานที่ทำการจุ่มแช่ในน้ำกลั่น มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) เท่ากับ 461.52MPa และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) 568.80 MPa 705.78 MPa 734.25 MPa และ 789.97 MPa ตามลำดับ และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ในชิ้นงานที่ทำการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม มีค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) เท่ากับ 494.62 MPa และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก มีค่ามอดูลัสการกดอัด (Compressive modulus) 608.10 MPa 773.11 MPa 805.86 MPa และ 810.18 MPa ตามลำดับ

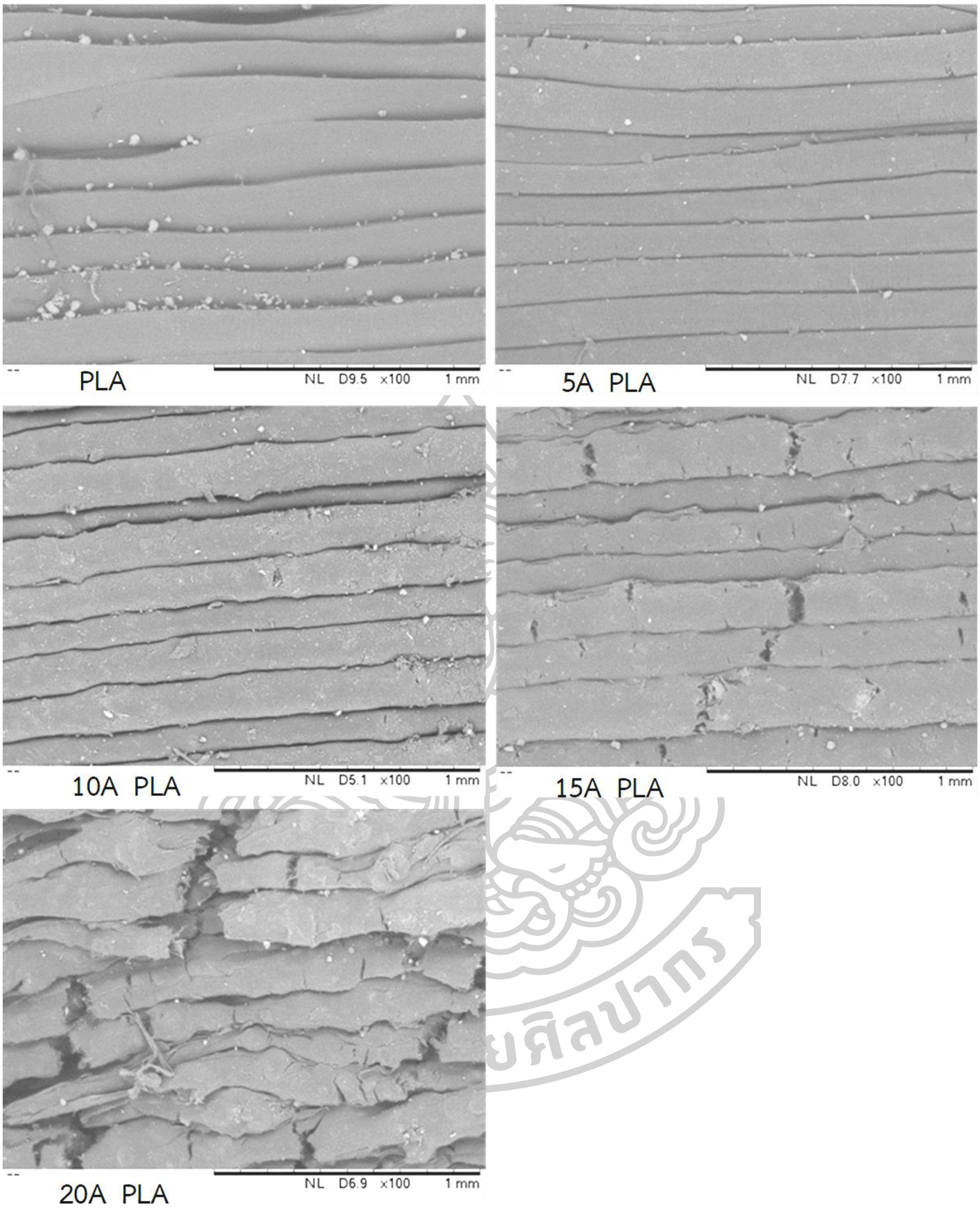
เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทดสอบ(Non-test) ชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับน้ำ(Water absorption) และชิ้นงานที่ทดสอบด้วยน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว(One-way ANOVA) ด้วยวิธีของ R.A. Fisher ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่ามอดูลัสการกดอัด(Compressive modulus) ของพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% เมื่อทำการจุ่มแช่ในน้ำและน้ำลายเทียม พบว่ามีค่าลดลง ส่วนพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% 15% และ 20% พบว่าไม่มีความแตกต่างของค่ามอดูลัสต่อการกดอัด(Compressive modulus) หลังการจุ่มแช่ในน้ำและน้ำลายเทียมและเมื่อนำชิ้นงานที่แตกหักไปตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าในทุกสูตรมีช่องว่าง(Air-gaps) ระหว่างผงอลูมิเนียมออกไซด์และเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดที่แคบทำให้การถ่ายโอนแรงเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่า(Compressive modulus) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงถึงแม้จะผ่านการจุ่มแช่ในน้ำและน้ำลายเทียมเป็นระยะเวลา 30 วัน

มหาวิทยาลัยศิลปากร

4.3.4 ผลการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)



รูปที่ 4.24 พื้นผิวชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดหลังการทดสอบน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) เป็นระยะเวลา 30 วัน ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope(SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 4.25 พื้นผิวชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หลังการทดสอบน้ำลายเทียม (Artificial saliva test) เป็นระยะเวลา 30 วัน ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope(SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ในรูปที่ 4.22 แสดงลักษณะพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) หลังการทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) พบว่าพอลิแลคติกแอซิดในนั้นมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ(Brittle fracture) โดยสังเกตได้จากลักษณะที่พื้นผิวรอยแตกมีความคมชัดและค่อนข้างเรียบ เมื่อพิจารณาพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% พบว่ามีลักษณะพื้นผิวรอยแตกที่ขรุขระเล็กน้อยและมีการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ได้ดี และในทุกสูตรพบว่าช่องว่างระหว่างผงอลูมิเนียมออกไซด์กับเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิดนั้นมีลักษณะที่ค่อนข้างแคบเนื่องจากมีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APS จากผลการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติค่ามอดูลัสการการกดอัด(Compressive modulus) โดยมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อผ่านการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมและเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสการการกดอัด(Compressive modulus) สูงขึ้นตาม

ในรูปที่ 4.23 แสดงลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ(3D printing) หลังการทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) ที่กำลังขยาย 100 เท่า ในรูปพอลิแลคติกแอซิดแสดงพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานที่มีลักษณะราบเรียบและมีช่องว่าง(Air-gaps) ของเส้นฟิลาเมนต์ พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% พบว่ามีการกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออดไซด์ในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดได้ดีและมีช่องว่าง(Air-gaps)ของเส้นฟิลาเมนต์แต่มีระยะห่างที่แคบกว่าพอลิแลคติกแอซิดเล็กน้อย พอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 10% พบว่าเส้นฟิลาเมนต์เริ่มมีความขรุขระเล็กน้อย การกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดี ช่องว่าง(Air-gaps)ของเส้นฟิลาเมนต์แต่มีระยะห่างที่แคบกว่าสูตร 5% และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% และ 20% เส้นฟิลาเมนต์ในแต่ละชั้นมีความขรุขระมากกว่าสูตรอื่นๆเนื่องจากปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์มากที่สุด อีกทั้งยังเกิดการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์เช่นเดียวกันกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและมีช่องว่างระหว่างชั้นของเส้นฟิลาเมนต์เหมือนพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% หลังการทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม(Artificial saliva test) พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติค่ามอดูลัสการการกดอัด(Compressive modulus) โดยมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อผ่านการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมและเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสการการกดอัด(Compressive modulus) สูงขึ้นตาม

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อหาวัสดุทดแทนสำหรับใช้เป็นวัสดุครอบฟันทางทันตกรรมชั่วคราว ที่ทำจากพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติและสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการพิมพ์ภาพ 3 มิติ(3D printing) จึงได้ทำการศึกษาโดยนำพอลิแลคติกแอซิดและทำการเสริมแรงด้วยผงอลูมิเนียมออกไซด์และให้มีสีที่ใกล้เคียงกับฟันจริง และทำการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิง โดยทำการผสมพอลิแลคติกแอซิดกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ทั้งหมด 5 สูตร คือ พอลิแลคติกแอซิด(PLA) และพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก ทำการผสมพอลิแลคติกแอซิดทำการผสมกับผงอลูมิเนียมออกไซด์เครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวหนอนคู่ (Co-rotating Twin screw extruder) และนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทำการทดสอบสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงผล และสมบัติทางกายภาพ จากการศึกษาสามารถสรุปผลวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature, T_m) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่าใกล้เคียงกัน และพบพีค Cold crystallization temperature(T_{cc}) ทั้ง 2 ชิ้นงาน แต่ในส่วนของปริมาณผลึก(X_c) พบว่าชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีค่ามากกว่าของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด โดยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก ของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีปริมาณผลึกมากที่สุด

5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงรีโอโลยีด้วยเครื่อง Parallel plate rheometer ในช่วงความถี่ 1 ถึง 100 เรเดียนต่อวินาที พบว่าพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ จะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Shear thinning และที่ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์ (Printing speed) เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity) ของพอลิเมอร์ลดลงส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลผ่าน Nozzle ได้ง่ายยิ่งขึ้น

5.1.3 จากการศึกษาการวิเคราะห์สมบัติความร้อนเชิงผลแบบไดนามิกส์ (DMTA) พบว่าช่วงอุณหภูมิ 25-40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของวัสดุ ค่า Storage modulus ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ทุกสูตร ยังมีความแข็งเกร็ง

(Stiffness) ที่สูง ทำให้สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมินี้ได้ โดยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก มีค่า Storage modulus ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของวัสดุสูงที่สุด

5.1.4 จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ทุกสูตร พบว่าค่ามอดูลัสการดึงยืด (Tensile modulus) และความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์มีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลโดยรวมพบว่าพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

5.1.5 จากการศึกษาสมบัติความแข็งที่พื้นผิว (Hardness shore D) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าค่าความแข็งที่พื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมออกไซด์มีปริมาณสูงขึ้น และค่าความแข็งที่พื้นผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

5.1.6 จากการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกด (Compressive modulus) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive modulus) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด และเมื่อทำการทดสอบการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมพบว่าความต้านทานต่อแรงกด (Compressive modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่มีสมบัติความต้านทานต่อแรงกด (Compressive modulus) สูงที่สุด

5.1.7 จากการศึกษาหาปริมาณรูพรุนทั้งหมด (Total porosity)) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีปริมาณรูพรุนทั้งหมด (Total porosity) เพิ่มขึ้นเมื่อผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณมากขึ้น

5.1.8 จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฉดสีโดยรวม (ΔE) ของชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หลังการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีการเปลี่ยนแปลงเฉดสีมากและมีค่าลดลงเมื่อมีการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น

5.1.9 จากการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดและชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ พบว่า การกระจายตัวของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ปริมาณ 5-15% ในเมทริกซ์พอลิแลคติกแอซิดเกิดขึ้นได้ดี แต่ที่ปริมาณ 20% เกิดการรวมกลุ่มกันของผงอลูมิเนียมออกไซด์ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อย และปริมาณช่องว่างระหว่างชั้นของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันโดยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีปริมาณช่องว่างน้อยที่สุด

จากผลการวิจัยสามารถเตรียมวัสดุทดแทนสำหรับที่ครอบฟันชั่วคราวทางทันตกรรมและสามารถใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติเพื่อขึ้นรูปวัสดุการครอบฟันชั่วคราวทางทันตกรรมได้ โดยจากงานวิจัยพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่มีสมบัติทางความร้อนศึกษา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ส่งผลให้เกิดช่องว่างในชิ้นงานทำให้สมบัติเชิงผลมีค่าลดลง ดังนั้นควรปรับพารามิเตอร์ นอกเหนือจากที่ตั้งค่าไว้เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์และมีปริมาณช่องว่างน้อยที่สุด

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดลองต่างๆ

ภาคผนวก ก.1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดัชนีการไหล (MFI)

ตารางผนวก ก.1-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของ PLA

ครั้งที่	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10 min)	ค่าเฉลี่ย	SD

1	90.32	1.0753	7.1433	6.8468	0.1938
2	90.64	1.0149	6.7182		
3	90.15	1.0088	6.7141		
4	91.06	1.0543	6.9468		
5	90.56	1.0130	6.7116		

ตารางผนวก ก.1-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของสูตร 5A_PLA

ครั้งที่	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10 min)	ค่าเฉลี่ย	SD
1	90.14	1.1657	7.7593	7.8705	0.6354
2	90.04	1.3374	8.9120		
3	92.79	1.1692	7.5603		
4	91.78	1.2083	7.8991		
5	90.65	1.0911	7.2218		

ตารางผนวก ก.1-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของสูตร 10A_PLA

ครั้งที่	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10 min)	ค่าเฉลี่ย	SD
1	76.34	1.0462	8.2227	8.7333	0.4509
2	76.20	1.0577	8.3283		
3	75.85	1.1314	8.9498		
4	75.54	1.1713	9.3034		
5	76.60	1.1314	8.8621		

ตารางผนวก ก.1-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของสูตร 15A_PLA

ครั้งที่	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10 min)	ค่าเฉลี่ย	SD
1	72.18	1.1009	9.1514		

2	72.10	1.1919	9.9187	9.4285	0.3017
3	72.44	1.1275	9.3385		
4	72.60	1.1486	9.4923		
5	71.98	1.1087	9.2417		

ตารางผนวก ก.1-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบหาค่าดัชนีการไหลของสูตร 20A_PLA

ครั้งที่	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFI (g/10 min)	ค่าเฉลี่ย	SD
1	61.22	1.2196	11.9530	12.4497	0.4926
2	61.22	1.3361	13.0947		
3	61.22	1.2196	11.9530		
4	60.98	1.2845	12.6386		
5	60.65	1.2746	12.6094		

มหาวิทยาลัยศิลปากร

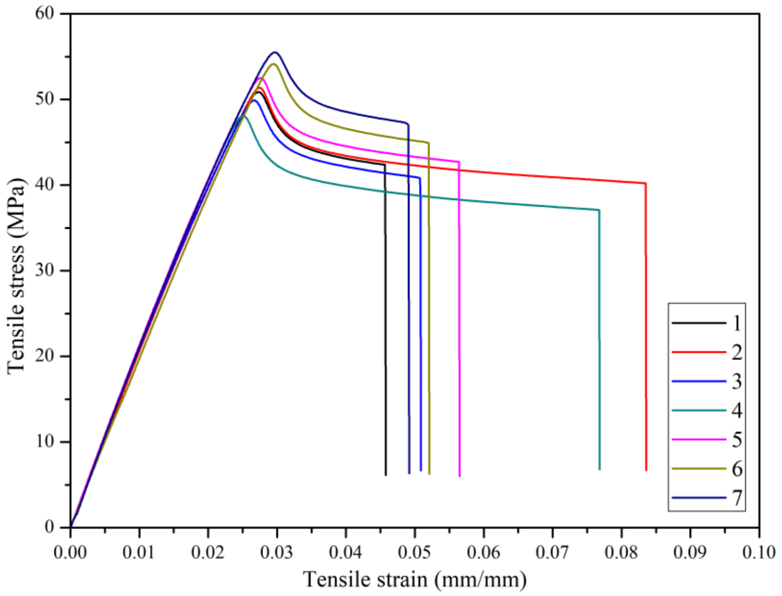
ภาคผนวก ก.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงรีออโลยีด้วยเครื่อง Parallel plate rheometer

ตารางภาคผนวก ก.2-1 แสดงค่า Complex viscodity ที่ความถี่ 1, 10 และ 100 เรเดียนต่อวินาทีของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ทีปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	ค่า Complex viscosity (Pa.s)		
	Frequensy 1 rad/sec	Frequensy 10 rad/sec	Frequensy 100 rad/sec
PLA	2115.36	1796.76	326.269
5A_PLA	1725.75	1395.42	355.406
10A_PLA	3075.61	2424.42	393.305
15A_PLA	1867.67	1551.19	311.679
20A_PLA	1788.01	1535.96	400.821

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ก.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding)

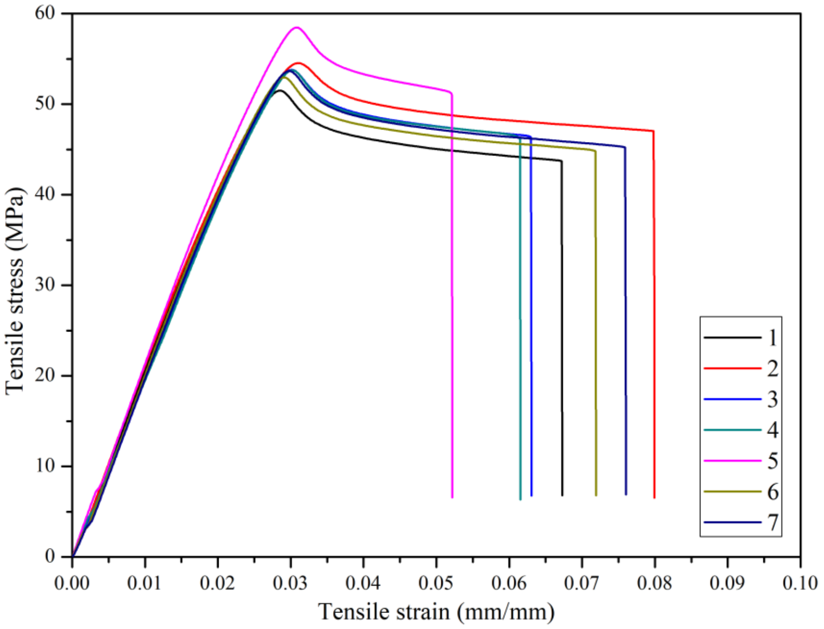


รูปที่ ก.3-1 ผลการทดสอบการดึงยืดของพอลิแลคติกแอซิด(PLA) ในชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding)

ตารางผนวก ก.3-1แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยืดของพอลิแลคติกแอซิด(PLA)

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.87	3.32	43.34	50.83	4.57	2,136.35
2*	12.87	3.49	44.89	42.89	8.35	2,081.44
3	12.86	3.39	43.39	49.89	5.08	2,144.69
4*	12.83	3.32	41.34	48.06	7.68	2,188.82
5	12.87	3.50	45.15	52.51	5.65	2,168.65
6	12.85	3.48	44.54	54.13	5.20	2,021.45
7	12.87	3.39	43.73	55.47	4.91	2,203.18
ค่าเฉลี่ย	12.86	3.42	44.03	52.57	5.08	2134.87
SD	0.05	0.06	0.79	2.30	0.40	68.50

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

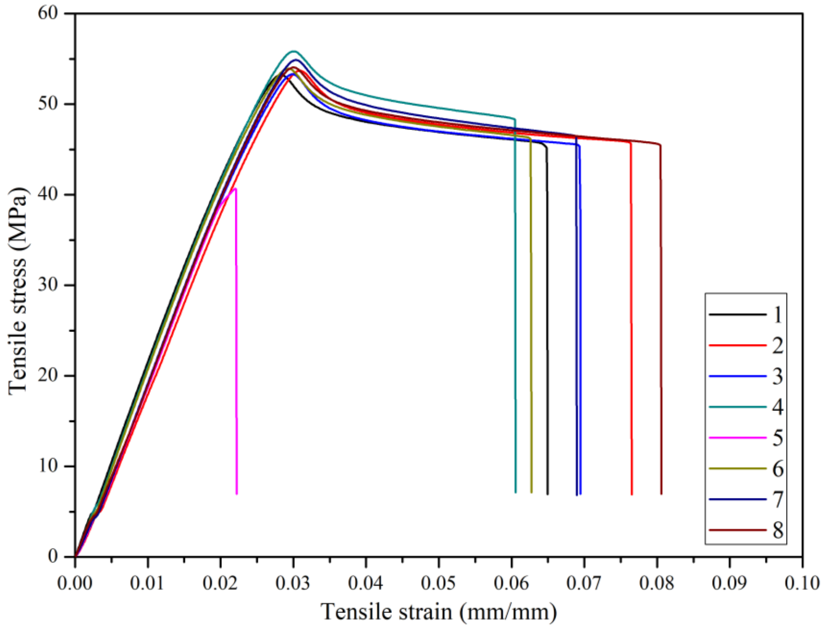


รูปที่ ก.3-2 ผลการทดสอบการดึงยืดในสูตร 5A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.3-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยืดของสูตร 5A_PLA

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.87	3.32	41.73	51.50	6.72	2,147.28
2*	12.87	3.49	42.18	54.53	7.99	2,169.78
3*	12.86	3.39	42.31	53.78	6.31	2,137.18
4	12.83	3.32	44.76	53.74	6.15	2,005.42
5*	12.87	3.50	45.28	58.46	5.21	2,232.29
6	12.85	3.48	41.60	52.95	7.18	2,176.28
7*	12.87	3.39	41.60	53.65	7.60	2,154.96
ค่าเฉลี่ย	12.83	3.33	42.70	52.73	6.68	2109.66
SD	0.06	0.12	1.79	1.14	0.52	91.43

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

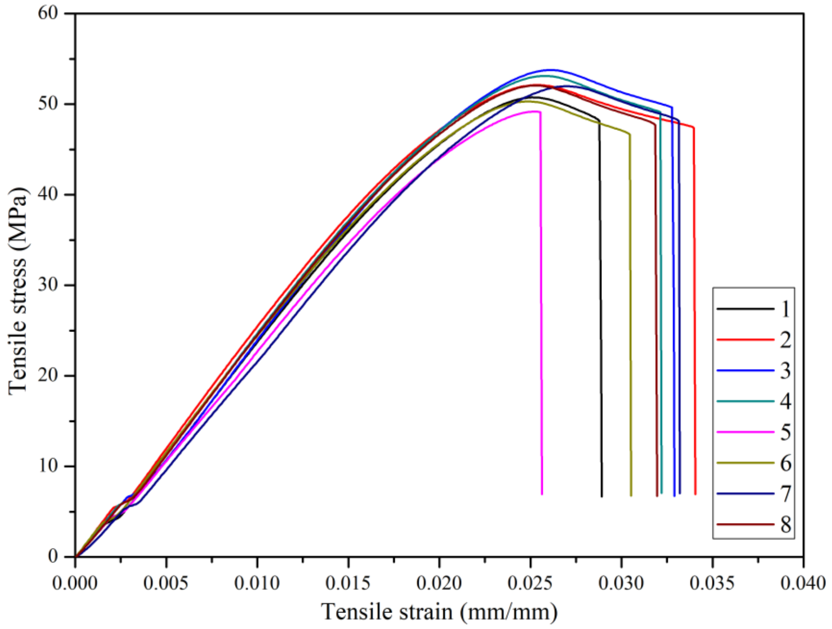


รูปที่ ก.3-3 ผลการทดสอบการดึงยืดในสูตร 10A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.3-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยืดของสูตร 10A_PLA

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.86	3.26	41.73	53.22	6.49	2,221.83
2*	12.87	3.29	42.44	53.69	7.65	2,029.64
3	12.84	3.27	41.86	53.30	6.94	2,155.10
4*	12.84	3.26	41.73	55.82	6.05	2,221.69
5*	12.86	3.31	42.70	40.65	2.21	2,115.31
6	12.85	3.27	41.86	53.91	6.27	2,229.08
7	12.83	3.26	41.73	54.87	6.89	2,138.71
8	12.87	3.28	42.31	54.05	8.06	2,128.93
ค่าเฉลี่ย	12.82	3.27	41.90	53.87	6.93	2174.73
SD	0.04	0.01	0.24	0.67	0.69	47.31

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

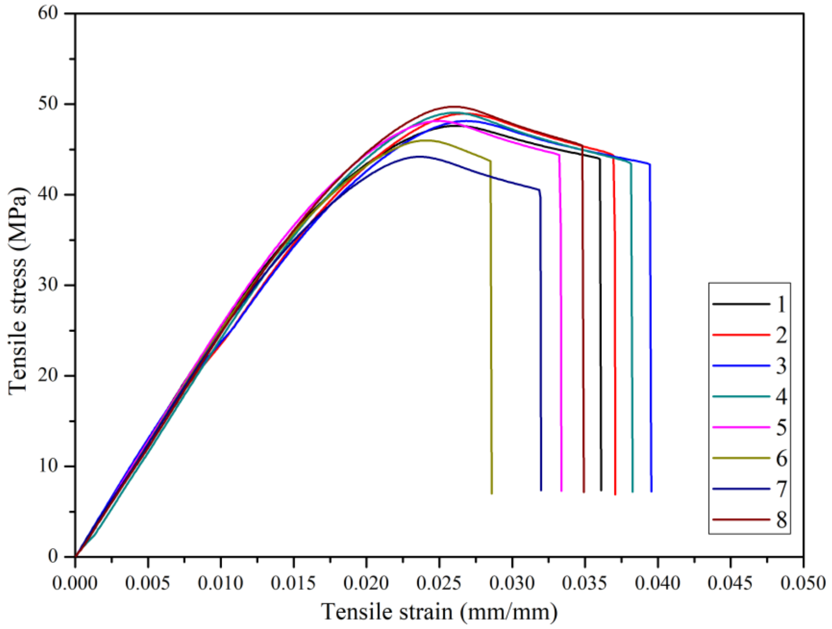


รูปที่ ก.3-4 ผลการทดสอบการดึงยืดในสูตร 15A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.3-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยืดของสูตร 15A_PLA

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	12.91	3.29	40.48	47.61	3.60	2,597.17
2*	12.86	3.30	40.48	48.96	3.70	2,541.14
3	12.87	3.32	40.61	48.14	3.95	2,650.84
4	12.89	3.28	40.61	49.05	3.82	2,509.01
5*	12.93	3.29	40.74	48.14	3.33	2,571.83
6	12.87	3.29	40.48	45.99	2.85	2,575.52
7*	12.87	3.29	40.61	44.19	3.19	2,528.67
8	12.89	3.31	40.61	49.72	3.48	2,518.30
ค่าเฉลี่ย	13.10	3.10	40.59	47.94	3.52	2544.35
SD	0.00	0.01	0.10	1.98	0.23	33.85

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.



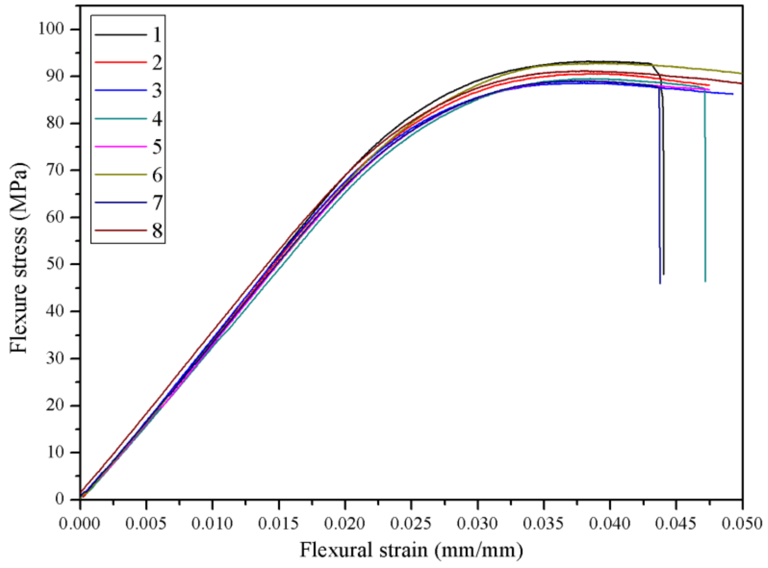
รูปที่ ก.3-5 ผลการทดสอบการดึงยืดในสูตร 20A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.3-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดึงยืดของสูตร 20A_PLA

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.10	3.09	40.48	47.61	3.60	2,597.17
2	13.10	3.09	40.48	48.96	3.70	2,541.14
3*	13.11	3.11	40.61	48.14	3.95	2,650.84
4	13.08	3.10	40.61	49.05	3.82	2,509.01
5	13.10	3.11	40.74	48.14	3.33	2,571.83
6*	13.10	3.11	40.48	45.99	2.85	2,575.52
7	13.09	3.09	40.61	44.19	3.19	2,528.67
8	13.10	3.10	40.61	49.72	3.48	2,518.30
ค่าเฉลี่ย	13.10	3.10	40.59	47.94	3.52	2544.35
SD	0.01	0.01	0.10	1.98	0.23	33.85

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

ภาคผนวก ก.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดัดโค้ง (Flexural testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding)

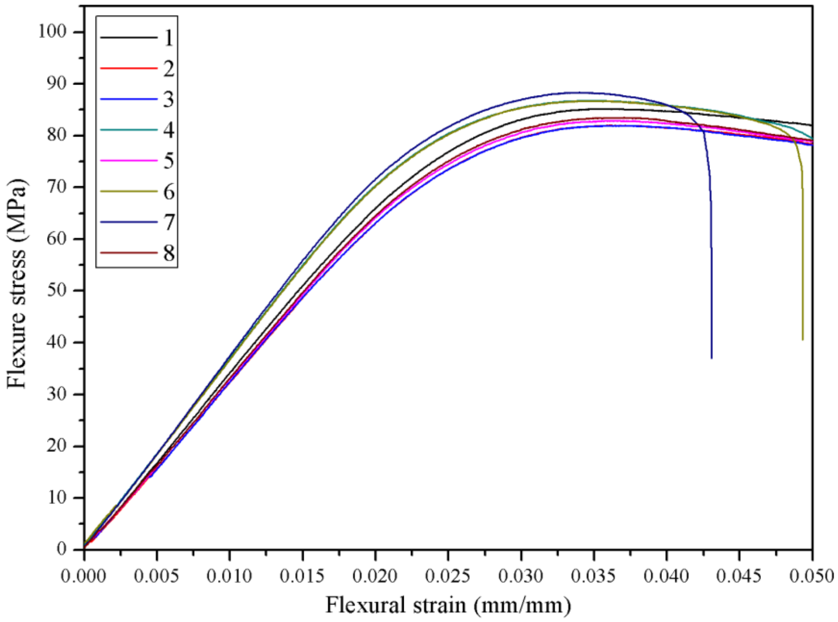


รูปที่ ก.4-1 ผลการทดสอบการดัดโค้งในพอลิแลคติกแอซิด(PLA) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding)

ตารางผนวก ก.4-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิด(PLA)

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Flexural Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.27	3.50	42.99	93.19	4.02	3584.70
2*	12.23	3.33	40.69	90.55	4.26	3530.79
3	12.35	3.48	42.94	88.54	4.13	3523.30
4*	12.48	3.44	42.97	89.45	3.59	3361.66
5	12.38	3.34	41.35	89.02	3.71	3467.89
6	12.56	3.46	43.50	92.71	4.17	3446.79
7	12.49	3.39	42.38	88.99	3.71	3456.96
8*	12.49	3.49	43.54	91.12	3.56	3502.83
ค่าเฉลี่ย	12.41	3.43	42.54	90.49	3.95	3495.93
SD	0.12	0.07	1.02	2.26	0.22	57.77

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

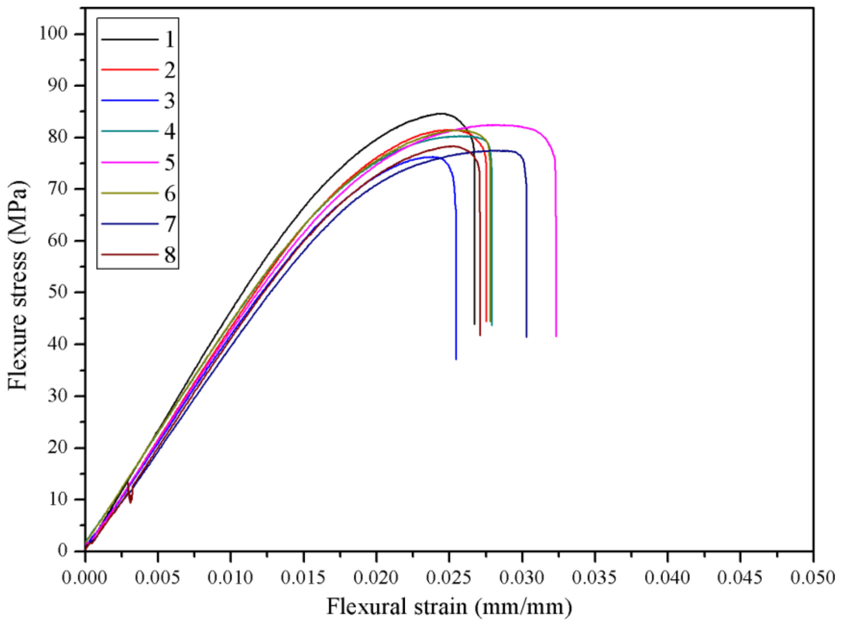


รูปที่ ก.4-2 ผลการทดสอบการดัดโค้งของสูตร 5A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.4-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดัดโค้งของสูตร 5A_PLA

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Flexural Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.48	3.24	40.48	85.08	4.08	3,481.87
2	12.60	3.31	41.66	81.96	3.83	3,341.60
3	12.87	3.27	42.04	81.94	3.88	3,350.91
4	12.45	3.56	44.32	86.78	3.40	3,681.75
5	12.87	3.27	42.04	82.77	4.08	3,330.35
6	12.65	3.45	43.68	86.70	3.49	3,682.24
7*	12.49	3.46	43.22	88.30	3.12	3,773.75
8	12.88	3.26	42.03	83.47	3.84	3,337.48
ค่าเฉลี่ย	12.66	3.35	42.43	83.94	3.75	3454.05
SD	0.19	0.12	1.23	2.24	0.26	176.69

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

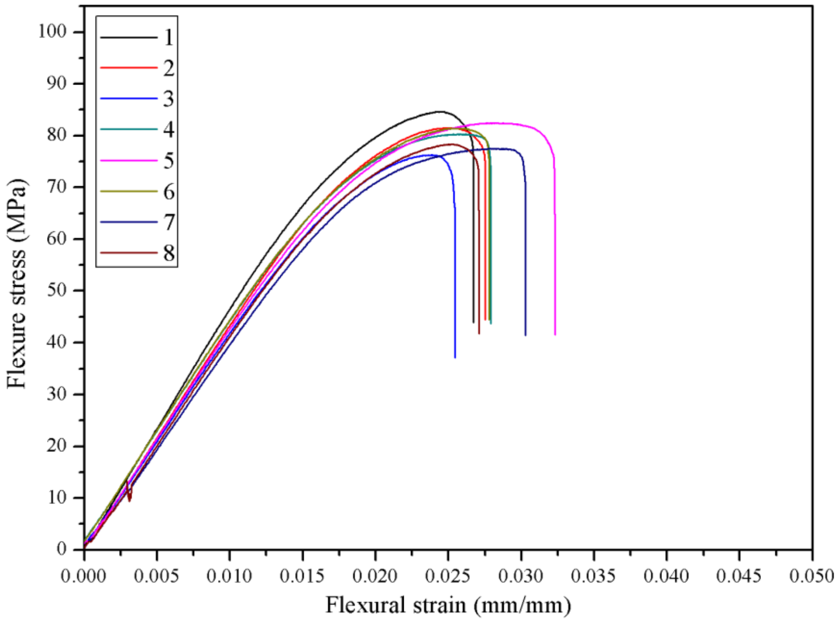


รูปที่ ก.4-3 ผลการทดสอบการดัดโค้งในสูตร 10A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.4-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดัดโค้งของสูตร 10A_PLA

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Flexural Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.80	3.26	41.77	80.63	3.99	3,376.24
2	12.67	3.25	41.18	81.72	3.76	3,422.31
3*	12.54	3.27	41.01	85.93	3.62	3,614.96
4*	12.43	3.29	40.94	81.30	3.84	3,306.44
5*	12.34	3.28	40.43	80.28	3.64	3,327.72
6	12.66	3.32	41.99	85.45	3.77	3,707.56
7	12.80	3.29	42.15	84.87	3.71	3,901.54
8	12.44	3.26	40.60	83.70	3.85	3,515.06
ค่าเฉลี่ย	12.59	3.28	41.26	83.94	3.77	3,636.62
SD	0.17	0.02	0.00	1.64	0.06	212.86

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

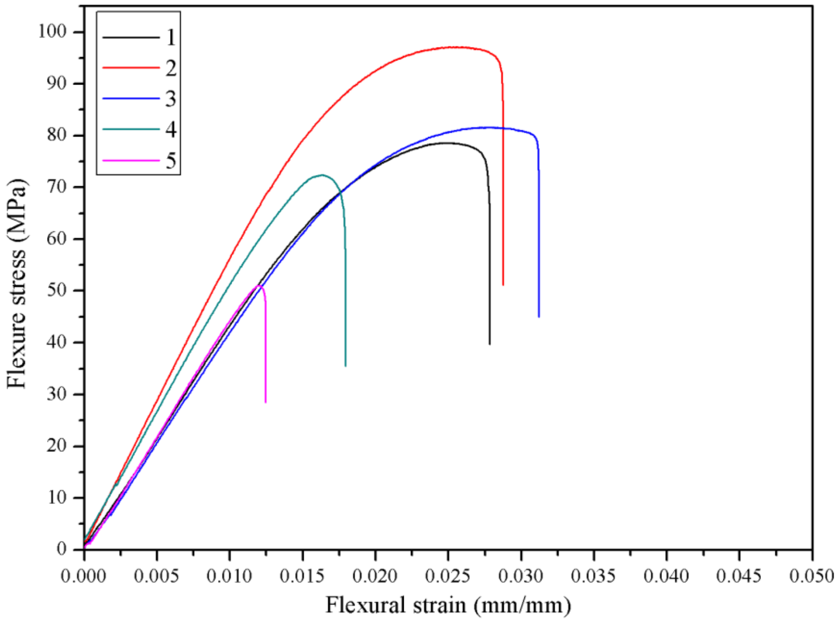


รูปที่ ก.4-4 ผลการทดสอบการดัดโค้งในสูตร 15A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.4-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดัดโค้งของสูตร 15A_PLA

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Flexural Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1*	12.48	3.20	39.94	84.62	1.91	4,664.09
2	12.48	3.31	41.35	81.48	1.94	4,419.56
3*	12.38	3.29	40.69	76.28	1.60	4,237.33
4	12.56	3.35	42.03	80.31	2.04	4,341.25
5*	12.49	3.30	41.18	82.45	2.74	4,346.11
6	12.48	3.31	41.31	81.40	1.93	4,357.35
7*	12.38	3.25	40.24	77.51	2.92	4,099.38
8	12.56	3.29	41.36	78.32	2.03	4,289.67
ค่าเฉลี่ย	12.48	3.29	41.01	80.38	1.98	4351.96
SD	0.07	0.04	0.68	1.47	0.06	53.52

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.



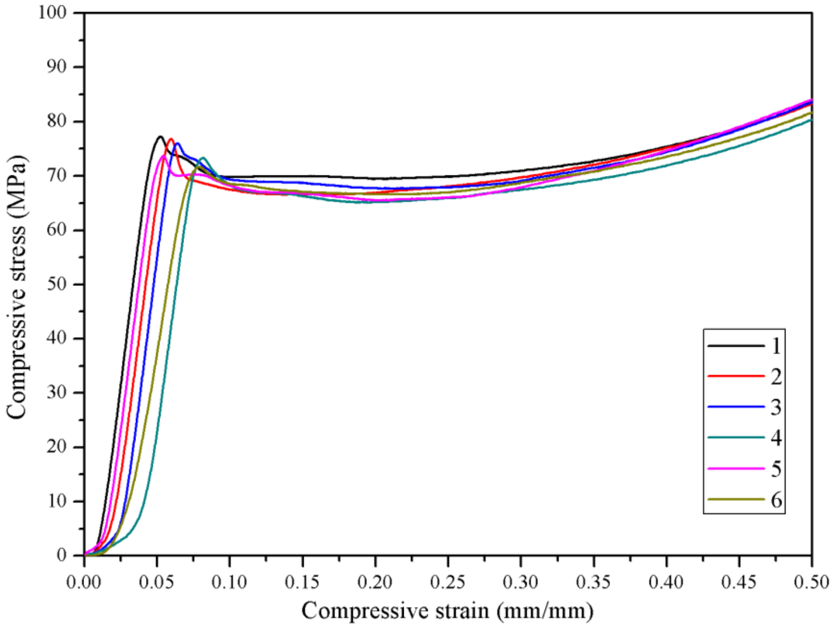
รูปที่ ก.4-5 ผลการทดสอบการดัดโค้งในสูตร 20A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.4-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการดัดโค้งของสูตร 20A_PLA

ตัวอย่างที่	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	พื้นที่ (mm^2)	Flexural Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural Modulus (MPa)
1	12.49	3.26	40.76	78.63	2.13	4,420.60
2*	12.45	3.03	37.76	97.11	2.71	5,615.87
3	12.43	3.29	40.94	81.58	2.73	4,388.60
4*	12.56	3.17	39.78	72.37	0.54	5,148.14
5*	12.00	3.22	38.68	51.07	0.29	4,639.19
ค่าเฉลี่ย	12.39	3.20	39.59	80.10	2.43	4,404.60
SD	0.22	0.10	0.02	2.09	0.43	22.63

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

ภาคผนวก ก.5 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) ของชิ้นงานที่ข้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding)

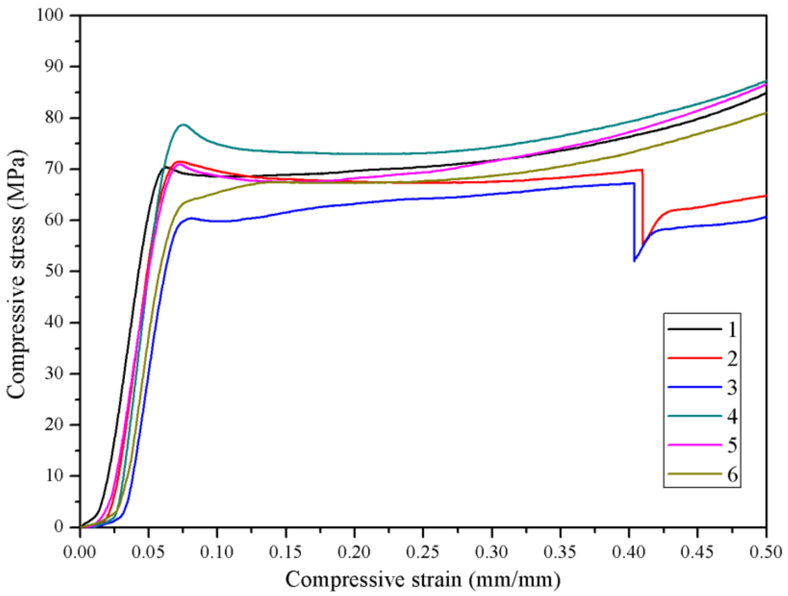


รูปที่ ก.5-1 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection molding)

ตารางผนวก ก.5-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	197.76	30.20	5971.38	83.87	2,205.49
2	183.17	29.74	5447.58	83.34	2,133.02
3	201.57	29.85	6016.72	83.61	2,180.84
4*	205.83	29.60	6092.68	80.44	2,013.77
5	179.34	29.72	5328.99	84.16	2,161.04
6*	198.50	29.72	5899.49	81.64	1,699.59
ค่าเฉลี่ย	194.36	29.80	5792.81	83.74	2,170.1
SD	10.61	0.21	321.76	0.35	30.7

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

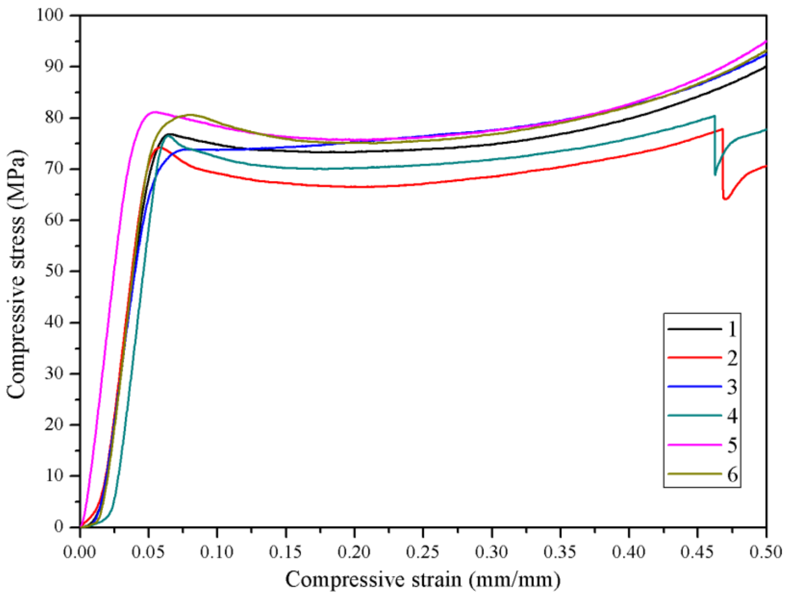


รูปที่ ก.5-2 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 5A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.5-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 5A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	225.99	29.78	6728.78	84.89	1,892.49
2*	205.40	29.84	6129.21	64.82	2,003.83
3*	201.72	29.83	6017.40	60.79	1,824.94
4*	193.82	29.71	5757.54	87.32	2,254.51
5	201.88	29.98	6052.26	86.65	1,797.63
6	175.38	29.74	5215.73	81.06	1,811.70
ค่าเฉลี่ย	200.70	29.81	5983.49	84.20	1,833.94
SD	16.45	0.10	494.59	2.86	51.19

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

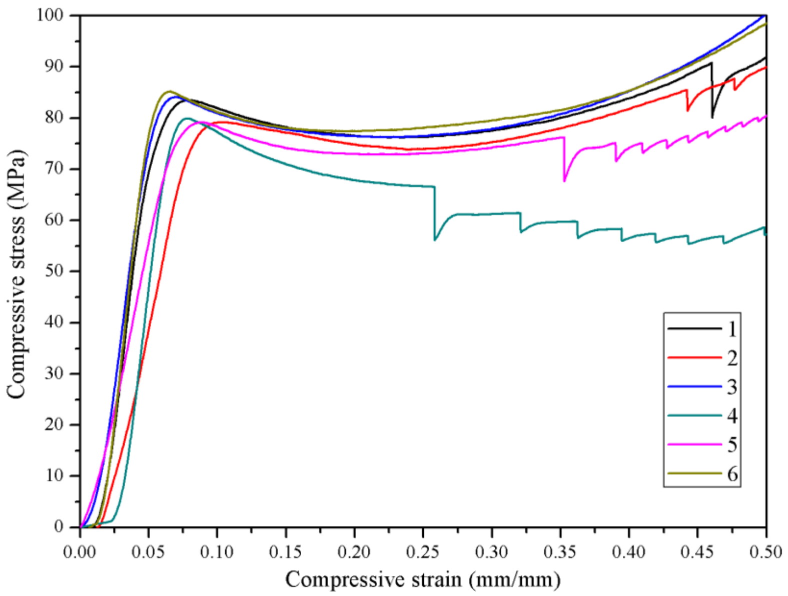


รูปที่ ก.5-3 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 10A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.5-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 10A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	194.55	29.65	5767.54	91.93	2,331.34
2*	188.01	29.29	5506.87	89.99	1,301.76
3	191.82	29.73	5702.93	100.39	2,156.82
4*	199.39	29.52	5885.96	57.30	2,290.71
5*	200.60	29.38	5893.52	80.53	1,353.43
6	196.01	29.50	5781.23	98.51	2,543.92
ค่าเฉลี่ย	195.06	29.51	5756.34	96.94	2,344.03
SD	4.71	0.16	142.44	4.44	193.86

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

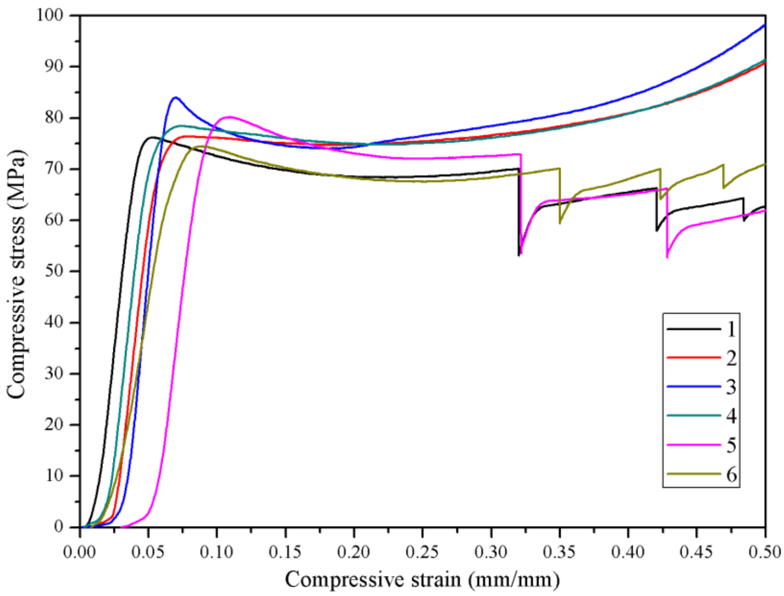


รูปที่ ก.5-4 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 15A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.5-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 15A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	185.57	29.00	5380.62	90.12	2,178.36
2*	183.84	29.27	5381.02	70.63	2,215.48
3*	206.42	28.59	5901.59	92.46	947.01
4	208.11	28.70	5971.61	77.82	2,280.02
5	210.26	29.33	6166.90	95.05	2,356.32
6	196.80	28.89	5684.58	93.19	2,263.26
ค่าเฉลี่ย	198.50	28.96	5747.72	89.04	2,269.49
SD	11.65	0.30	323.34	7.75	73.01

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.



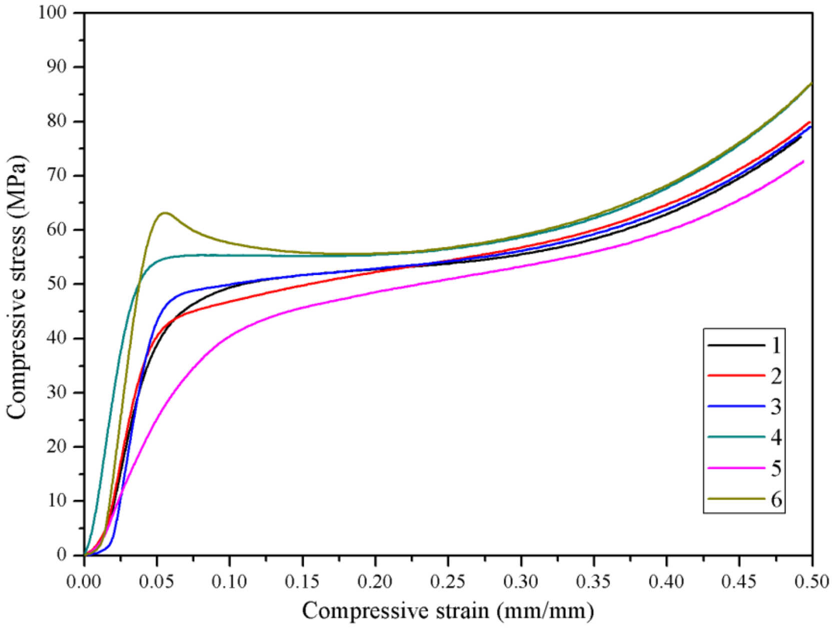
รูปที่ ก.5-5 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 20A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.5-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 20A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1*	193.36	29.10	5626.81	62.80	2,600.48
2	195.69	29.82	5834.39	90.88	2,454.03
3*	198.95	28.34	5638.32	98.36	2,941.05
4	190.18	29.80	5667.35	91.45	2,485.30
5*	191.63	28.92	5542.05	61.98	2,318.38
6*	204.01	28.78	5871.47	71.02	1,696.06
ค่าเฉลี่ย	195.64	29.13	5696.73	91.17	2,469.67
SD	5.14	0.58	128.51	0.40	22.11

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

ภาคผนวก ก.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

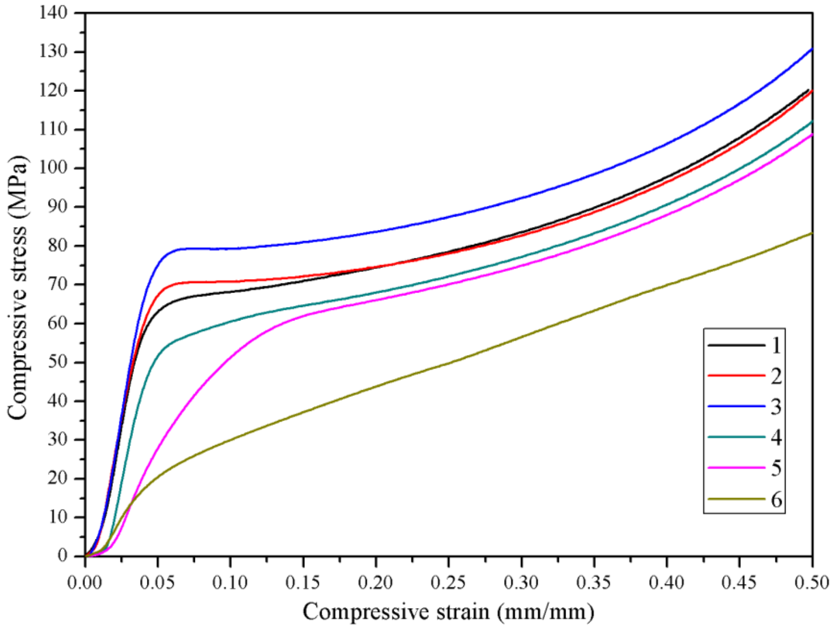


รูปที่ ก.6-1 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

ตารางผนวก ก.6-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	170.86	26.26	4485.83	124.59	941.95
2	169.43	26.59	4505.26	130.25	988.89
3*	173.78	26.41	4588.68	89.43	617.86
4	176.50	26.72	4715.26	109.48	715.45
5*	171.19	26.60	4553.74	97.05	606.012
6*	168.14	26.62	4475.10	144.40	1058.95
ค่าเฉลี่ย	171.65	26.53	4553.98	121.45	882.10
SD	3.04	0.17	89.95	10.73	146.22

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

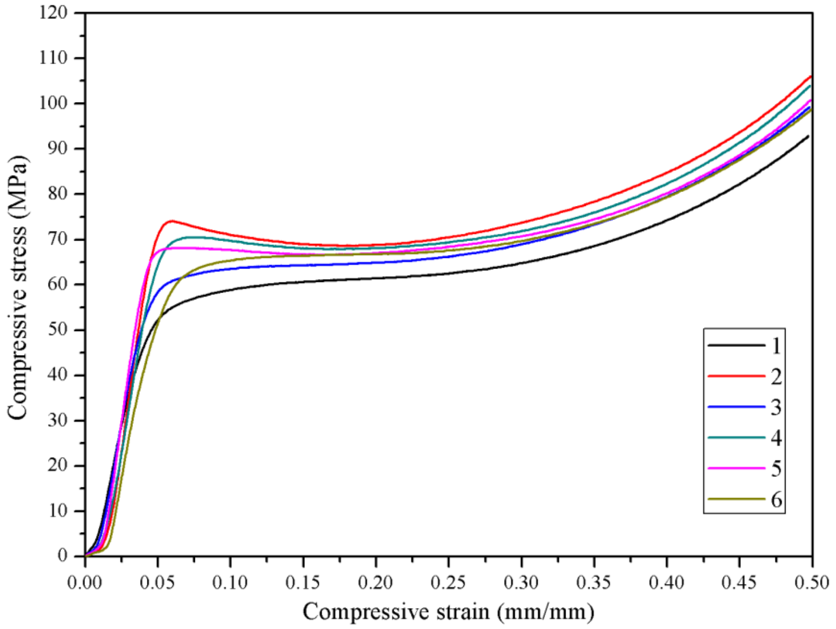


รูปที่ ก.6-2 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 5A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

ตารางผนวก ก.6-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 5A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	168.59	26.43	4455.92	77.25	633.17
2	167.82	26.11	4380.86	79.91	583.16
3	167.89	26.09	4380.35	79.05	589.66
4*	168.08	26.12	4390.32	86.76	1005.50
5*	166.83	26.33	4391.91	72.73	475.92
6*	169.68	26.04	4417.72	87.11	1076.39
ค่าเฉลี่ย	168.15	26.18	4402.85	78.74	602.00
SD	0.94	0.16	29.34	1.36	27.19

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

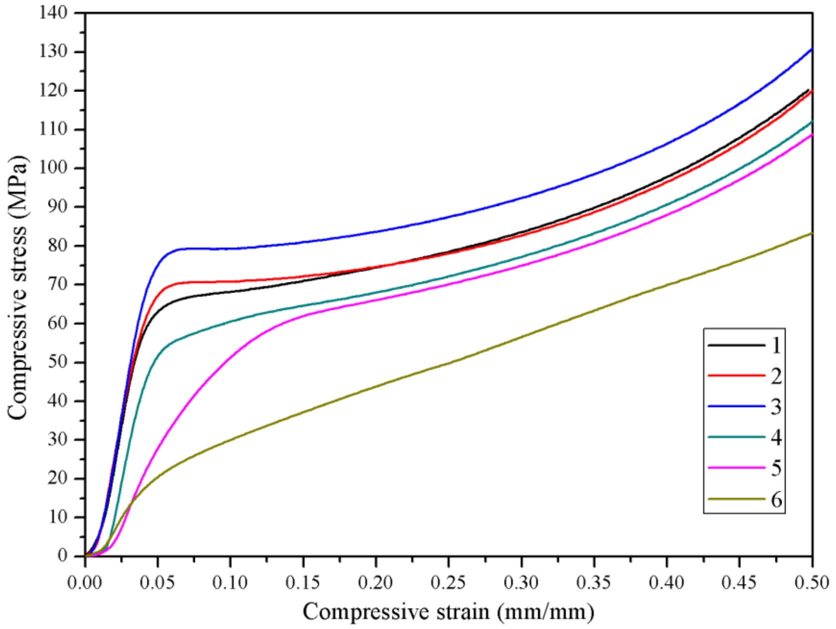


รูปที่ ก.6-3 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 10A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

ตารางผนวก ก.6-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 10A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1*	169.95	26.15	4444.29	92.84	702.73
2*	172.25	26.08	4491.52	105.99	753.94
3	169.59	26.12	4429.73	99.19	743.30
4	173.62	26.10	4531.54	103.96	763.32
5	171.69	26.08	4477.75	100.81	741.18
6*	171.04	26.05	4454.66	98.76	793.78
ค่าเฉลี่ย	171.36	26.10	4471.58	101.32	749.27
SD	1.50	0.04	36.92	2.43	12.22

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

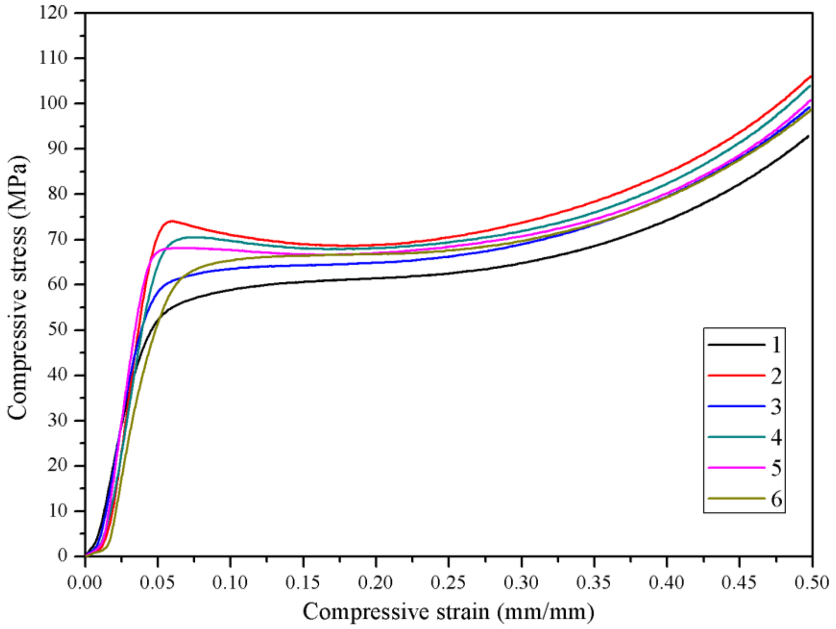


รูปที่ ก.6-4 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 15A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

ตารางผนวก ก.6-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 15A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	175.98	26.15	4601.92	120.25	820.02
2	177.30	25.93	4597.26	120.58	812.20
3	182.78	25.65	4687.29	133.18	891.84
4*	177.84	25.95	4614.10	112.41	651.64
5	176.80	25.97	4590.58	109.00	613.89
6*	172.10	26.02	4477.99	83.36	822.67
ค่าเฉลี่ย	177.13	25.94	4594.86	120.42	816.11
SD	3.44	0.17	67.30	0.23	5.53

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.



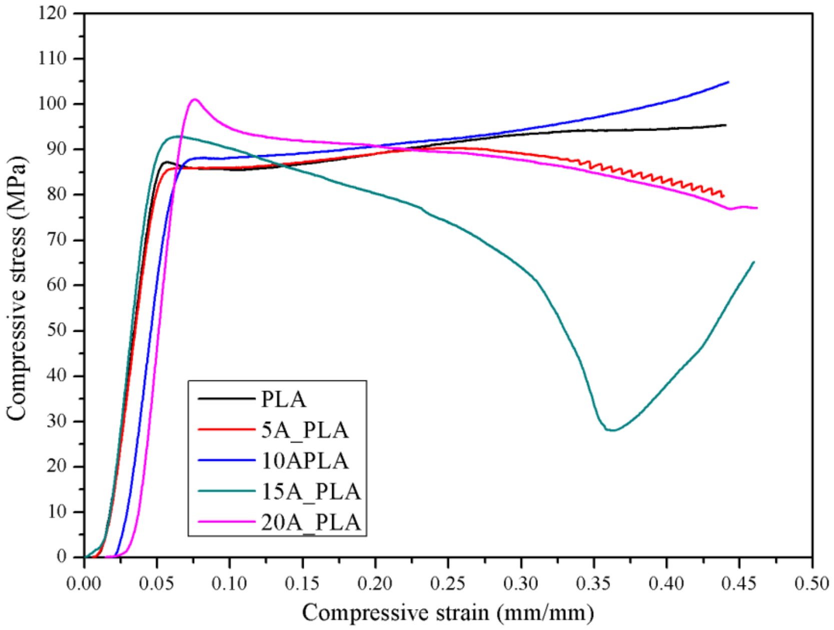
รูปที่ ก.6-5 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 20A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing)

ตารางผนวก ก.6-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 20A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	175.46	26.13	4583.97	124.59	941.95
2	190.28	25.59	4868.23	130.25	988.89
3	180.63	25.94	4684.62	89.43	617.86
4*	184.55	25.82	4765.02	109.48	715.45
5	181.92	25.73	4680.73	97.05	606.012
6*	186.92	25.82	4825.25	144.40	1058.95
ค่าเฉลี่ย	183.29	25.84	4734.64	121.45	882.10
SD	5.17	0.18	104.97	10.73	146.22

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

ภาคผนวก ก.7 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) ของชิ้นงานที่ข้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 30 วัน



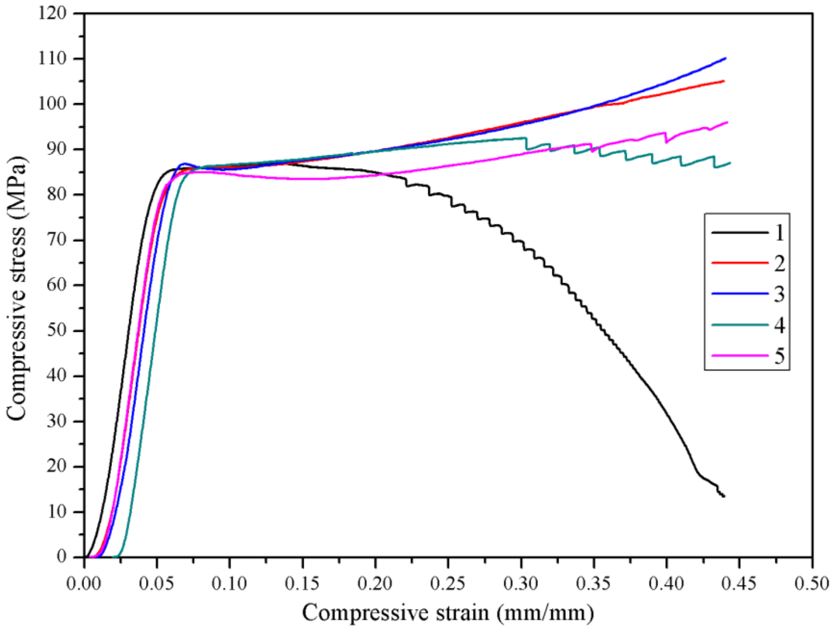
รูปที่ ก.7-1 ผลการทดสอบการกดอัดชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน

ตารางผนวก ก.7-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัด

สูตร	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
PLA	206.12	29.63	6106.16	95.44	2063.32
5A_PLA	178.82	29.68	5306.56	79.77	2044.85
10A_PLA	183.66	29.40	5399.72	104.94	2261.84
15A_PLA	199.51	28.87	5759.74	65.22	2266.72
20A_PLA	195.49	28.30	5531.48	77.16	2251.22

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ก.8 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมเป็นระยะเวลา 30 วัน

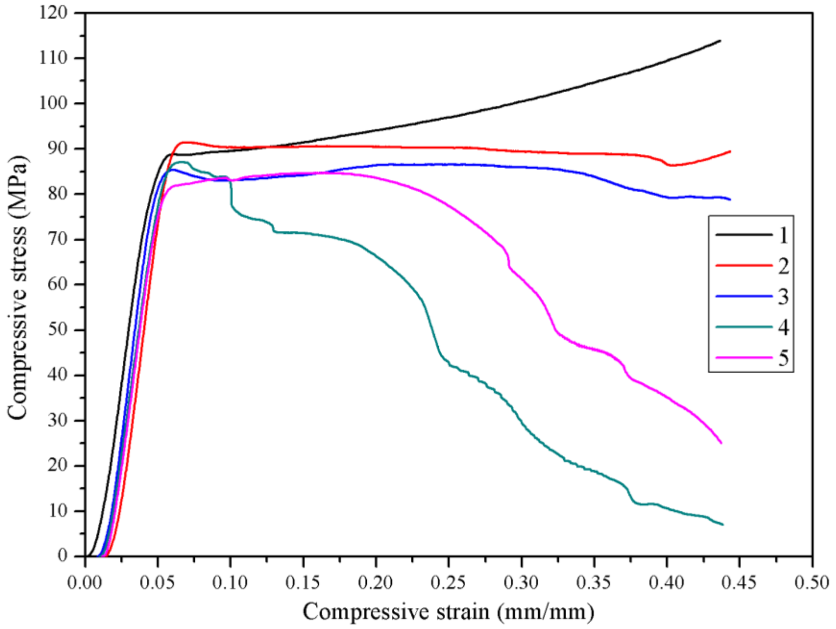


รูปที่ ก.8-1 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.8-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1*	203.03	29.36	5960.93	13.55	1,988.60
2*	217.01	29.47	6394.33	105.11	1,356.21
3	199.10	29.70	5912.46	110.19	2,000.68
4	205.44	29.70	6101.62	87.14	2,057.80
5	209.71	29.67	6222.23	96.06	2,169.32
ค่าเฉลี่ย	206.73	29.59	6116.29	97.80	2,075.93
SD	6.14	0.14	175.80	11.62	85.77

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

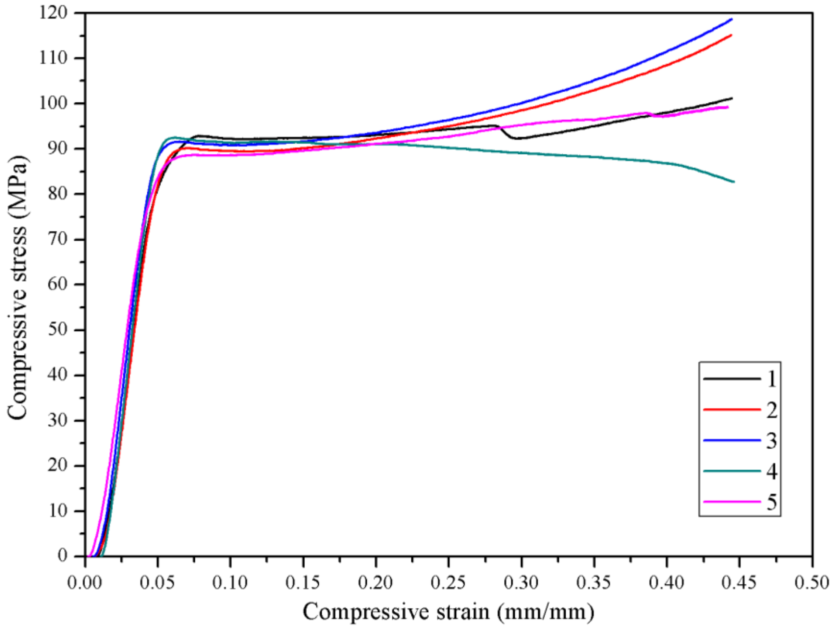


รูปที่ ก.8-2 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 5A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.8-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 5A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1*	213.65	29.74	6353.86	113.86	1,349.57
2	221.19	29.33	6487.55	89.49	2,099.05
3	184.33	29.54	5444.05	78.73	1,939.69
4*	210.67	30.18	6358.09	7.08	2,342.01
5*	197.07	29.74	5859.98	25.07	2,452.89
ค่าเฉลี่ย	200.96	29.70	5968.35	84.11	2,019.37
SD	17.01	0.28	508.86	7.61	112.69

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

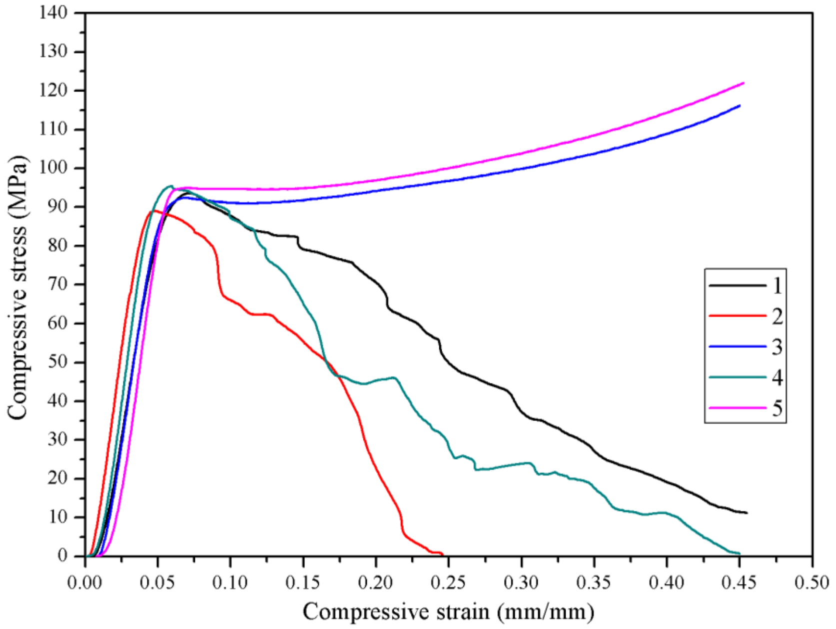


รูปที่ ก.8-3 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 10A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.8-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 10A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	182.25	29.48	5371.80	101.21	2,218.46
2	212.52	29.60	6289.53	115.18	2,325.21
3	204.76	29.48	6035.17	118.70	2,200.79
4*	178.35	29.39	5240.75	82.71	2,805.23
5*	203.96	29.38	5991.33	99.23	1,541.15
ค่าเฉลี่ย	194.25	29.45	5721.38	111.69	2,248.15
SD	14.47	0.08	436.08	9.25	67.31

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

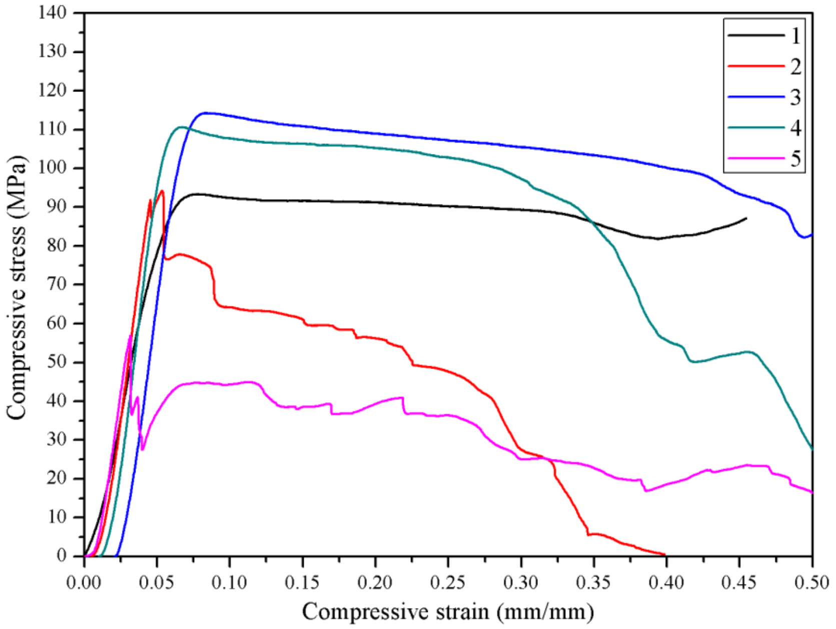


รูปที่ ก.8-4 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 15A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.8-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 15A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1*	192.65	28.65	5519.55	11.26	2,319.51
2*	204.11	29.27	5974.35	0.53	2,825.91
3	194.23	29.56	5741.45	116.20	2,288.86
4*	211.17	28.98	6118.69	0.72	2,887.68
5	201.84	28.82	5816.95	122.07	2,421.13
ค่าเฉลี่ย	200.59	29.02	5821.79	119.14	2,354.99
SD	6.79	0.33	206.45	4.15	93.52

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.



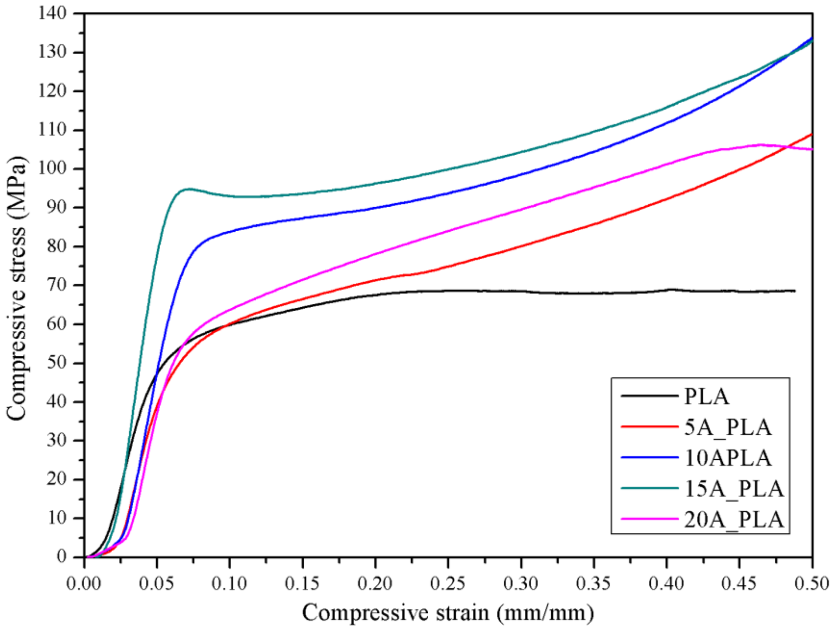
รูปที่ ก.8-5 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 20A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตารางผนวก ก.8-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 20A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1*	195.04	28.73	5603.60	87.20	1,930.52
2*	204.59	29.36	6005.70	0.59	2,945.79
3	210.05	28.73	6034.61	83.10	2,873.12
4	204.53	28.49	5826.15	27.48	3,202.95
5	191.12	29.64	5664.83	16.42	2,686.99
ค่าเฉลี่ย	200.14	28.87	5777.73	85.15	2,401.82
SD	7.30	0.52	211.66	2.90	666.52

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

ภาคผนวก ก.9 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน

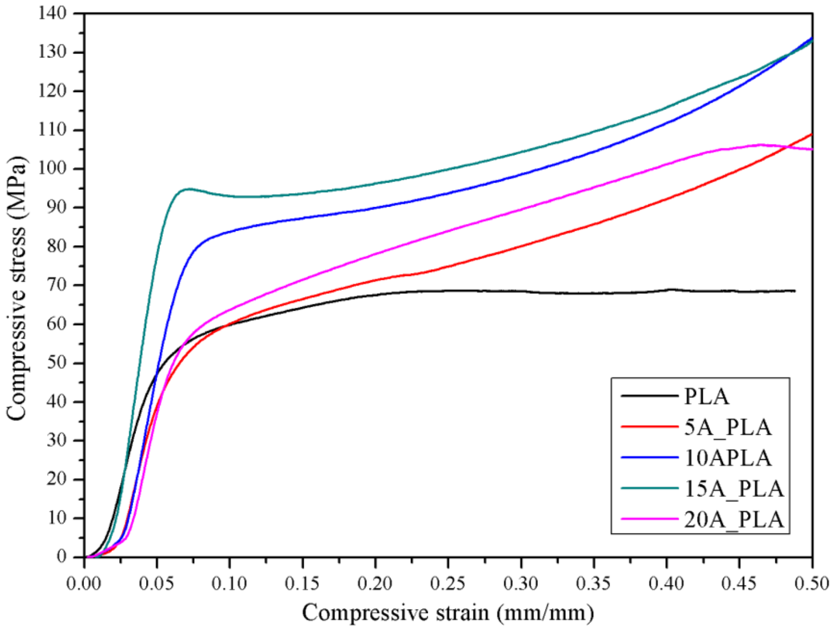


รูปที่ ก.9-1 ผลการทดสอบการกดอัดชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน

ตารางผนวก ก.9-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัด

สูตร	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
PLA	170.91	26.39	4510.25	68.61	461.52
5A_PLA	167.50	26.13	4376.85	108.98	568.80
10A_PLA	171.89	26.15	4494.95	133.80	705.78
15A_PLA	182.99	24.42	4468.71	125.79	734.25
20A_PLA	188.57	25.61	4828.30	104.78	789.97

ภาคผนวก ก.10 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกดอัด (Compressive testing) ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียม เป็นระยะเวลา 30 วัน

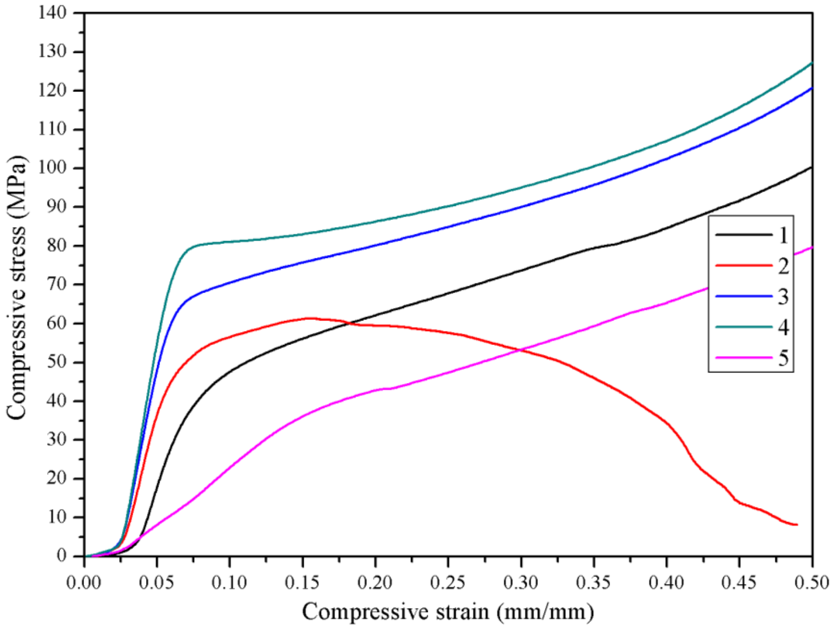


รูปที่ ก.10-1 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)

ตารางผนวก ก.10-1 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	162.16	26.09	4229.93	65.93	435.24
2*	167.95	26.39	4431.47	125.93	1,005.58
3	169.66	26.59	4510.46	53.63	2,393.16
4*	172.05	26.43	4547.29	88.37	2,714.14
5	170.95	26.45	4521.54	69.80	554.01
ค่าเฉลี่ย	168.55	26.39	4448.14	67.87	494.62
SD	3.89	0.18	129.42	2.73	83.99

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

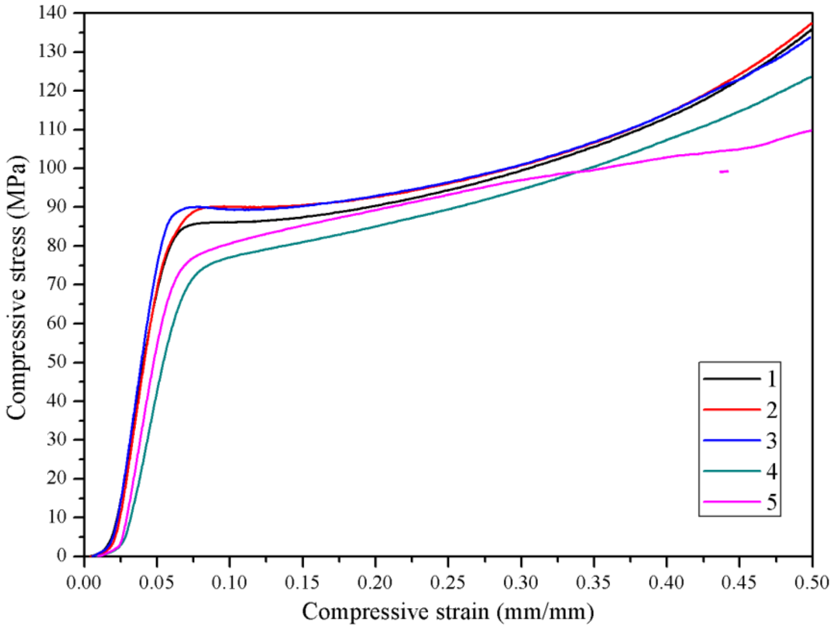


รูปที่ ก.10-2 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 5A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)

ตารางผนวก ก.10-2 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 5A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	166.39	26.25	4367.77	100.27	562.82
2*	169.06	26.02	4398.21	8.17	1074.73
3	167.64	26.12	4377.81	120.71	613.56
4	169.96	26.12	4439.29	127.61	647.92
5	171.37	26.14	4479.53	79.86	286.87
ค่าเฉลี่ย	168.88	26.13	4412.52	116.20	608.10
SD	1.94	0.08	46.42	14.21	42.81

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

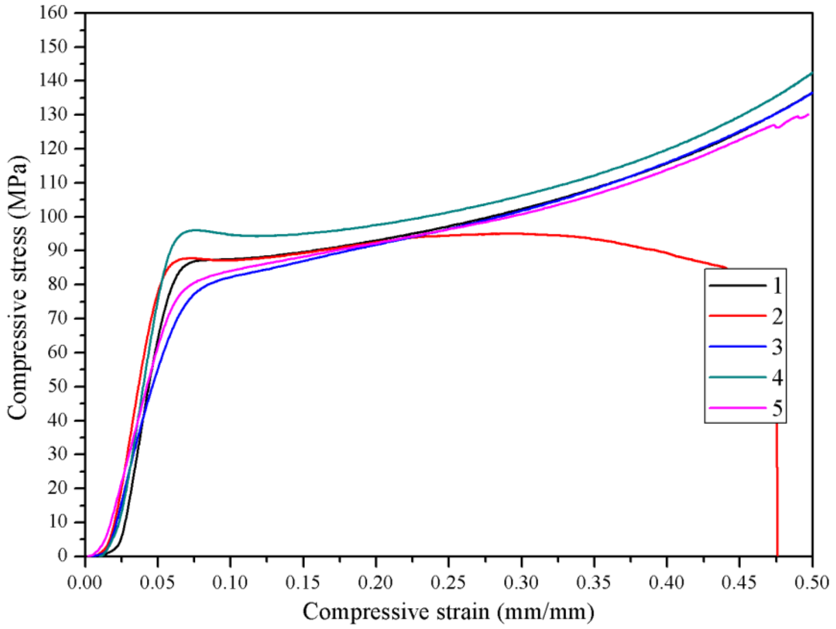


รูปที่ ก.10-3 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 10A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)

ตารางผนวก ก.10-3 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 10A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	171.38	26.14	4478.90	135.80	824.87
2*	173.82	26.06	4529.80	137.39	2,473.21
3*	173.95	26.18	4553.19	133.72	2,575.99
4	171.96	26.19	4503.51	123.58	752.58
5	169.52	26.20	4440.50	109.73	741.87
ค่าเฉลี่ย	172.12	26.15	4501.18	123.04	773.11
SD	1.84	0.06	43.90	13.05	45.14

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

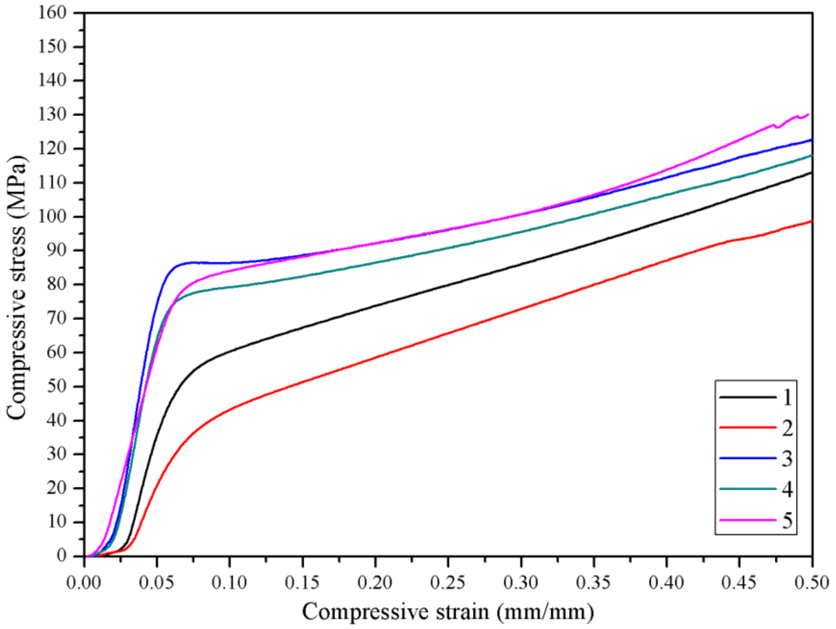


รูปที่ ก.10-4 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 15A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)

ตารางผนวก ก.10-4 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 15A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	178.72	26.15	4673.56	137.23	779.20
2*	179.59	26.15	4696.24	49.98	2,522.85
3	182.65	25.84	4718.72	137.66	828.34
4*	180.62	26.20	4731.34	142.63	2,677.37
5	179.85	26.05	4684.11	130.16	810.04
ค่าเฉลี่ย	180.28	26.08	4700.79	135.02	805.86
SD	1.48	0.15	23.95	4.21	24.84

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.



รูปที่ ก.10-5 ผลการทดสอบการกดอัดในสูตร 20A_PLA ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing)

ตารางผนวก ก.10-5 แสดงค่าที่ได้จากการทดสอบการกดอัดของสูตร 20A_PLA

ตัวอย่างที่	พื้นที่ (mm^2)	ความสูง (mm)	ปริมาตร (mm^3)	Compressive Strength (MPa)	Compressive Modulus (MPa)
1	183.78	25.79	4739.67	113.67	858.17
2	181.58	25.71	4667.47	99.59	856.60
3*	181.91	25.89	4708.76	123.36	2523.75
4*	192.37	25.78	4958.42	118.90	1025.43
5	186.20	25.83	4809.53	97.13	715.79
ค่าเฉลี่ย	185.17	25.80	4776.77	103.46	810.18
SD	4.43	0.07	114.04	8.92	81.75

หมายเหตุ : * คือตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากมีค่าไม่อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย ± S.D.

ภาคผนวก ก.11 แสดงข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน Compressive ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน

ตารางภาคผนวก ก.11-1 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
PLA	7.4093	7.4143	7.4236	7.4256	7.4264	7.4265
5A_PLA	6.5192	6.5245	6.5305	6.5348	6.5363	6.5376
10A_PLA	6.7549	6.7617	6.7682	6.7745	6.7800	6.7835
15A_PLA	7.6012	7.6102	7.618	7.6254	7.6308	7.6352
20A_PLA	7.5993	7.6093	7.6179	7.6257	7.6308	7.6356

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ก.12 แสดงข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน Compressive ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด(Injection) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมเป็นระยะเวลา 30 วัน

ตารางภาคผนวก ก.12-1 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) ของสูตร PLA

ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
1	6.4746	6.4807	6.4885	6.4927	6.4958	6.4990
2	7.0928	7.1002	7.1064	7.1101	7.1151	7.1202
3	7.4669	7.4757	7.4836	7.4867	7.4907	7.4948
4	7.2067	7.2135	7.2219	7.2251	7.2283	7.2316
5	7.7563	7.7636	7.7803	7.7841	7.7876	7.7912
เฉลี่ย	7.1995	7.2067	7.2161	7.2197	7.2235	7.2273
S.D.	0.4792	0.4798	0.4825	0.4823	0.4824	0.4825

ตารางภาคผนวก ก.12-2 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) ของสูตร 5A_PLA

ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
1	7.2167	7.2249	7.2345	7.2360	7.2372	7.2383
2	8.0289	8.0375	8.0505	8.0514	8.0529	8.0546
3	6.6631	6.6720	6.6891	6.6972	6.7053	6.7134
4	7.8204	7.8284	7.8519	7.8543	7.8567	7.8591
5	7.2701	7.2781	7.2918	7.2945	7.2977	7.3011
เฉลี่ย	7.3998	7.4082	7.4236	7.4267	7.4300	7.4333
S.D.	0.5398	0.5397	0.5406	0.5383	0.5362	0.5341

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางภาคผนวก ก.12-3 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) ของสูตร 10A_PLA

ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
1	6.7047	6.7168	6.7453	6.7477	6.7481	6.7485
2	7.6999	7.7133	7.7450	7.7548	7.7646	7.7744
3	7.9981	8.0100	8.0351	8.0383	8.0405	8.0427
4	7.8597	7.8633	7.8671	7.8703	7.8715	7.8727
5	7.8159	7.8207	7.8271	7.8307	7.8323	7.8344
เฉลี่ย	7.6157	7.6248	7.6439	7.6484	7.6514	7.6545
S.D.	0.5203	0.5186	0.5134	0.5141	0.5151	0.5162

ตารางภาคผนวก ก.12-4 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) ของสูตร 15A_PLA

ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
1	7.5105	7.5202	7.5401	7.5427	7.5443	7.5459
2	7.5389	7.5495	7.5780	7.5902	7.5924	7.5946
3	8.2482	8.2592	8.2822	8.2901	8.2947	8.2993
4	7.9253	7.9356	7.9603	7.9665	7.9693	7.9721
5	7.8078	7.8168	7.8367	7.8437	7.8479	7.8521
เฉลี่ย	7.8061	7.8163	7.8395	7.8466	7.8497	7.8528
S.D.	0.3035	0.3038	0.3036	0.3038	0.3049	0.3060

ตารางภาคผนวก ก.12-5 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding) ของสูตร 20A_PLA

ชิ้นงาน	**น้ำหนักชิ้นงาน (g)**					
	เริ่มต้น	**วันที่ 1**	**วันที่ 9**	**วันที่ 15**	**วันที่ 22**	**วันที่ 30**
1	7.5002	7.5107	7.5369	7.5509	7.5549	7.5415
2	7.8081	7.8200	7.8405	7.8459	7.8489	7.8601
3	7.9665	7.9780	8.0091	8.0115	8.0146	8.0169
4	7.5761	7.5868	7.6198	7.6220	7.6239	7.6301
5	8.1232	8.1347	8.1559	8.1725	8.1741	8.1771
เฉลี่ย	7.7948	7.8060	7.8324	7.8406	7.8433	7.8451
S.D.	0.2608	0.2613	0.2591	0.2603	0.2599	0.2638

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ก.13 แสดงข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน Compressive ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำเป็นระยะเวลา 30 วัน

ตารางภาคผนวก ก.13-1 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ตัวอย่าง	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
PLA	4.8302	4.8541	4.8722	4.8859	4.8944	4.905
5A_PLA	4.7317	4.7594	4.7793	4.7948	4.8084	4.8229
10A_PLA	5.4967	5.5607	5.6031	5.6281	5.647	5.6575
15A_PLA	6.0328	6.1074	6.1615	6.1933	6.218	6.2308
20A_PLA	5.8598	5.9584	6.0309	6.0984	6.1384	6.1677

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ก.14 แสดงข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน Compressive ที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) หลังผ่านการจุ่มแช่ในน้ำลายเทียมเป็นระยะเวลา 30 วัน

ตารางภาคผนวก ก.14-1 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ของสูตร PLA

ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
1	4.0301	4.1007	4.1944	4.2443	4.2893	4.3017
2	5.0307	5.1012	5.2176	5.2288	5.2313	5.2519
3	5.4110	5.4209	5.4639	5.4756	5.4818	5.4907
4	5.4700	5.4941	5.5895	5.5252	5.5328	5.5410
5	4.2101	4.2905	4.4722	4.6039	4.6092	4.6364
เฉลี่ย	4.8304	4.8815	4.9875	5.0156	5.0289	5.0443
S.D.	0.6730	0.6468	0.6198	0.5659	0.5530	0.5493

ตารางภาคผนวก ก.14-2 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ของสูตร 5A_PLA

ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
1	4.4610	4.5781	4.6194	4.6236	4.6551	4.6864
2	5.0601	4.9301	4.9998	5.0614	5.0990	5.1363
3	4.9607	5.0115	5.2039	5.2455	5.2591	5.2720
4	5.1416	5.2089	5.2488	5.2622	5.2763	5.2896
5	3.7406	3.9388	4.2904	4.3585	4.3726	4.3852
เฉลี่ย	4.6728	4.7335	4.8725	4.9102	4.9324	4.9539
S.D.	0.5845	0.4994	0.4094	0.4018	0.4009	0.4006

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางภาคผนวก ก.14-3 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ของสูตร 10A_PLA

ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
1	5.5301	5.5999	5.7503	5.8011	5.8911	6.0025
2	5.6417	5.7194	5.8807	5.9659	5.9840	5.8527
3	5.6367	5.7252	5.8712	5.9559	5.9931	6.0124
4	5.3489	5.4654	5.6301	5.6713	5.6967	5.8328
5	5.4704	5.5901	5.7614	5.7518	5.7822	5.8547
เฉลี่ย	5.5256	5.6200	5.7787	5.8292	5.8694	5.9110
S.D.	0.1226	0.1074	0.1026	0.1289	0.1288	0.0885

ตารางภาคผนวก ก.14-4 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ของสูตร 15A_PLA

ชิ้นงาน	น้ำหนักชิ้นงาน (g)					
	เริ่มต้น	วันที่ 1	วันที่ 9	วันที่ 15	วันที่ 22	วันที่ 30
1	6.1360	6.2447	6.3266	6.4126	6.4606	6.4872
2	6.2107	6.2730	6.4039	6.4403	6.4407	6.4499
3	6.1145	6.2545	6.3704	6.4064	6.4623	6.4774
4	5.9320	6.1757	6.2958	6.3032	6.3046	6.4035
5	5.1256	5.5091	5.9724	6.0108	6.0504	6.1108
เฉลี่ย	5.9038	6.0914	6.2738	6.3147	6.3437	6.3858
S.D.	0.4469	0.3276	0.1735	0.1777	0.1766	0.1571

ตารางภาคผนวก ก.14-5 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ของสูตร 20A_PLA

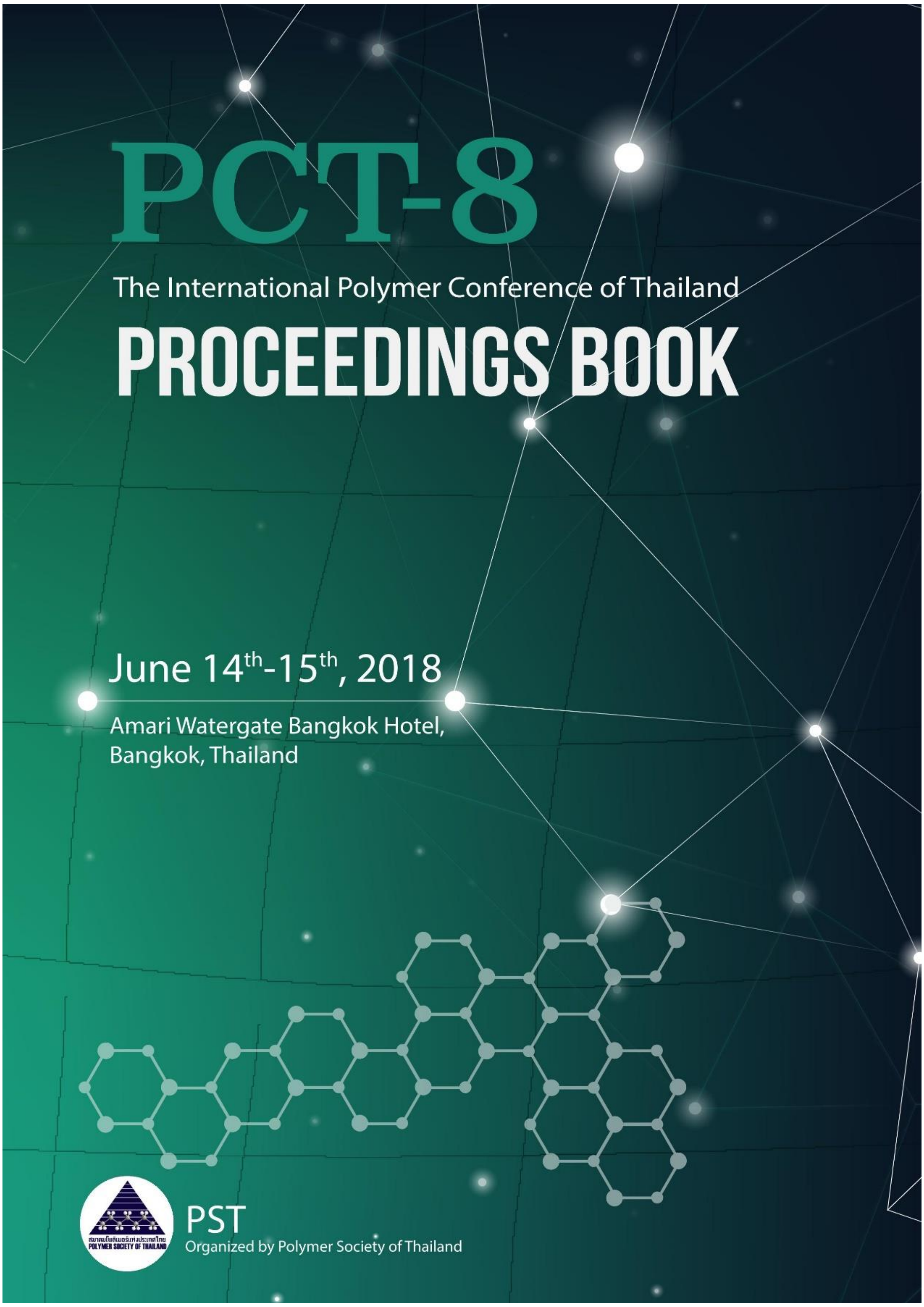
ชิ้นงาน	**น้ำหนักชิ้นงาน (g)**					
	เริ่มต้น	**วันที่ 1**	**วันที่ 9**	**วันที่ 15**	**วันที่ 22**	**วันที่ 30**
1	5.6905	5.8692	6.0990	6.1720	6.2142	6.2550
2	5.2178	5.4286	5.7858	5.8332	5.8726	5.9305
3	6.3428	6.4063	6.5148	6.5391	6.5579	6.5813
4	5.2406	5.9145	5.9899	6.0140	6.0313	6.0419
5	6.2098	6.2959	6.4476	6.4844	6.5124	6.5435
เฉลี่ย	5.7403	5.9829	6.1674	6.2085	6.2377	6.2704
S.D.	0.5265	0.3880	0.3086	0.3023	0.2977	0.2912

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ข

การนำเสนอผลงานวิจัย

มหาวิทยาลัยศิลปากร


PCT-8
The International Polymer Conference of Thailand
PROCEEDINGS BOOK
June 14th-15th, 2018
Amari Watergate Bangkok Hotel,
Bangkok, Thailand
PST
Organized by Polymer Society of Thailand

PROCEEDINGS

-[PCT-8]-n

The International Polymer Conference of Thailand

Annual Polymer Conference
June 14th – 15th, 2018

Amari Watergate Bangkok Hotel,
Bangkok, Thailand

Organized by

The Polymer Society of Thailand (PST)

Preparation of Poly(Lactic Acid)/Alumina Composites For Dentistry Application

Nathawat Kanchanawaleekun[1*], Nattakarn Hongsriphan[1], and Pajaera Patanathabutr[1]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanam Chan Place Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand

Phone +66 3424 1708, Fax +66 3424 1708, *E-mail: kanchanawalee_n@silpakorn.edu

Abstract

Currently, the polymeric material used to fabricate temporary crowns in dentistry application is poly(methyl methacrylate) (PMMA), which is non-biobased polymer and fabricated by milling. This research objective is aimed to find polymeric materials to replace PMMA and be able to fabricate by 3D printing technique, which could provide faster making of temporary crowns. Poly(lactic acid) (PLA), the most applicable biodegradable polymer, was processed by alumina powder in the ratio of 5, 10, 15 and 20% by weight. Alumina surface was modified with (3-Aminopropyl) triethoxysilane (APTES) at 10% by weight compared to alumina powder. The obtained composites were characterized rheological and mechanical properties in order to determine the optimized formulation for fabrication using 3D printing technique. It was found that higher alumina content in the PLA composites increased flexural modulus but decreased elongation at break. Rheological property results showed that the PLA composite adding silane-treated alumina of 10 wt% had the highest storage and loss modulus. In addition, the optimum condition for 3D printing of the PLA/alumina composite filament will be further studied.

Keywords: Poly(lactic acid); Composite; Temporary crowns; and 3D Printing

1. Introduction

Temporary crown is the curing method that works well in dental patients. Temporary crown is a restoration of damaged or broken teeth from many causes, for example by occlusion or by time and teeth with very large perforation to work efficiently as before. The curing method is composed of many processes and steps. The duration of the curing might take twice since it requires molding temporary crown in the dental laboratory to create the perfect size that fits the patient and dismantling the temporary crown and attaching the permanent crown with the teeth, then checking and adjusting as appropriate. [1]

Currently, temporary crown is made from acrylic polymer, such as poly(methyl methacrylate) or PMMA [2] which is not either bio-based material and biodegradable. In this work, we propose to find the polymeric material that is suitable and can be used to make a temporary crown using 3D-printing technology [3] to reduce the duration of making the temporary crown. Poly(lactic acid) or PLA, a bio-based and biodegradable polymeric material, was compounded with alumina powder, in order to make them look more like a real tooth and have better mechanical performance. Since PLA and alumina have different hydrophilicity, alumina surface was treated with 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) in order to improve compatibility and dispersion of the fillers during the compounding. In this report, thermal and rheological properties of composite compounds were evaluated and compared with extruded neat PLA. Also, composite compounds were injection molded into specimens to determine improvement of mechanical properties by means of flexural testing.

2. Experimental Methods

PLA pellets, Ingeo 4032D extrusion grade, was purchased from NatureWorks (USA). The polymer has a density of 1.24 g/cm^3 and MFI of 3.9 g/10 min (190°C, 2.16 kg). Alumina powder was purchased from Sigma-Aldrich (USA) with the average particle size of 100 µm. 3-aminopropyltrieth-oxysilane (APTES) was purchased from Sigma-Aldrich (USA) and used as received.

Table 1. Thermal properties of neat PLA and PLA/alumina composites.

Sample	First heating						Second heating					
	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	H_{cc} J/g	H_m J/g	$\%X_c$ (%)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	H_{cc} J/g	H_m J/g	$\%X_c$ (%)
Neat PLA	58.82	100.11	169.72	24.23	32.84	9.26	60.24	109.26	168.23	26.87	32.91	6.49
5% Alumina	58.77	99.11	169.31	24.09	33.40	10.54	60.31	101.76	167.97	21.76	34.23	14.11
10% Alumina	59.32	98.63	169.78	23.54	33.33	11.70	60.33	100.79	168.37	22.59	34.58	14.32
15% Alumina	58.58	96.36	169.63	19.80	27.89	10.23	58.44	98.83	167.97	13.52	28.48	18.92
20% Alumina	57.70	95.41	169.39	17.59	29.22	15.63	60.24	99.33	167.97	14.50	28.38	18.66

APTES of 10 wt% was dissolved in water/ethanol mixture (30/70 w/w). Then, alumina powder was suspended in the solution at 80°C with mechanical stirring continuously for 3 hours, and then was filtered and dried at 120°C for 18 hours. [4, 5].

Prior to compounding, PLA and APTES silane treated alumina particles were dried in a vacuum oven at 60°C for 24 hours. The composites were melt compounded using a twin-screw extruder (SHJ-25, S/D 40, Yongteng, China) using the barrel temperature profile of 150-180°C and a screw speed of 20 rpm. The extrudate was cooled down in water bath and the pull-off speed was set to obtain the extrudate diameter of 1.7 mm for 3D-printing. Neat PLA extrudate/filament was also prepared under the same condition. Some of them were pelletized and injection molded (Plus 350/75, Battenfeld, Austria) into rectangular specimens for flexural testing.

Differential scanning calorimetry (DSC) was performed under nitrogen atmosphere using a differential scanning calorimeter (TGA/DSC1, Mettler Toledo, USA). Extrudates were cut into 7-10 mg samples and tested in a heat-cool-reheat mode with a heating rate of 5°C/min from 30 to 180°C. Flexural modulus and Flexural strength were evaluated in accordance to ASTM D792 using an universal testing machine (Model 5969, Instron Engineering Corporation, USA). The testing was carried out with a crosshead speed of 5 mm/min. Rheological properties was determined using a rotational rheometer (ARES-G2, TA Instruments, USA). The testing condition was performed in a frequency sweep mode (0.01-100 rad/s) at 180°C with a strain of 80%.

3. Results and Discussion

3.1 Differential scanning calorimetry (DSC)

Thermal properties from DSC studies are presented in Table 1. Typically, shifting of glass transition temperature (T_g) is used to determine compatibility between polymer matrix and additive or fillers. In this study, shifting of T_g was slightly changed to indicate interaction between PLA molecules and silane treated alumina particles. In cooling step, crystallization temperatures (T_c) were not observed in all samples. However, the cold crystalline temperatures (T_{cc}) decreased when the content of APTES treated alumina particles increased. This was attributed to silane-treated alumina acted as nucleating agents [6] during applying thermal energy above the T_g for PLA molecules to crystallize. For crystal melting temperatures (T_m), it was found that adding silane treated alumina did not alter T_m in both the first and second heating scans. This indicated that silane treated alumina did not affect the crystal structures of PLA although these alumina reduced the T_{cc}. The degree of crystallinity (X_c) increased with the presence of silane treated alumina. Comparing between the first and second heatings, the X_c of the second heating scan was somewhat higher. This supported the annealing effect of the PLA/alumina composites that the slower heating/cooling rate, was the higher degree of crystallinity could be obtained. Therefore, the printing condition that favors annealing of the composite material would provide higher rigidity due to higher degree of crystallinity.

3.2 Rheological properties by rotational rheometer

Figure 1 shows the complex viscosity of neat PLA and PLA/alumina composites tested at 180°C. It was found that all samples showed Newtonian behaviour at the frequency lower than 10 rad/s, then the shear-thinning behaviour (non-Newtonian) was present for all materials. At high frequency, filler content did not affect on complex viscosities which they were in the closed values. At low frequency, adding silane-treated alumina impacted on complex viscosities significantly. Hassanabadi *et al.* [7] suggested that from a morphological point of view, percolation was the concentration that due to an increase of filler concentration, particles started to interconnect and form a network structure.

Only PLA composite adding silane-treated alumina of 10 wt% had significantly higher complex viscosity than neat PLA, while the others had lower complex viscosities. Moreover, the onset of non-Newtonian behaviour in the PLA/alumina 10 wt% occurred at lower frequency than the rest of them. This could be attributed that APTES treated alumina of 10 wt% was the percolation concentration that alumina particles (particle size of 100 μm) could form effective particle-particle interaction which required high shear stress for mobility of PLA molecules. However, such networks were broken down when increasing alumina content higher than 10 wt%.

The Fused Deposition Modeling (FDM) is the machine that will be used to fabricate these composite filaments into products by 3D-printing technique. The opening diameter and the length of the printing head is 4 mm and 8 mm, respectively. The printing speed could be varied in the range of 30-50 mm/s, which gives the volumetric flow rate ($\dot{Q}$) (cross-sectional area times speed) to be 377-628 mm³/s.

From the relationship between volumetric flow rate ($\dot{Q}$) and shear rate ($\dot{\gamma}$) in pipe, $\dot{\gamma} = 4\dot{Q}/(\pi R^3)$, the calculated shear rate would be about 60-100 s^{-1}. Therefore, the fabrication of PLA/alumina filament using this machine will be in the shear thinning region. The higher printing speed is the lower complex viscosity of the composite. However, the alumina content would rarely affect on complex viscosity.

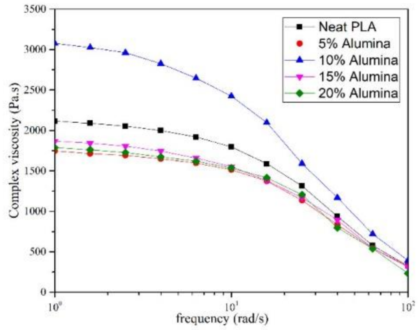


Figure 1. Complex viscosities of neat PLA and PLA/alumina composites with different alumina content (at 180°C).

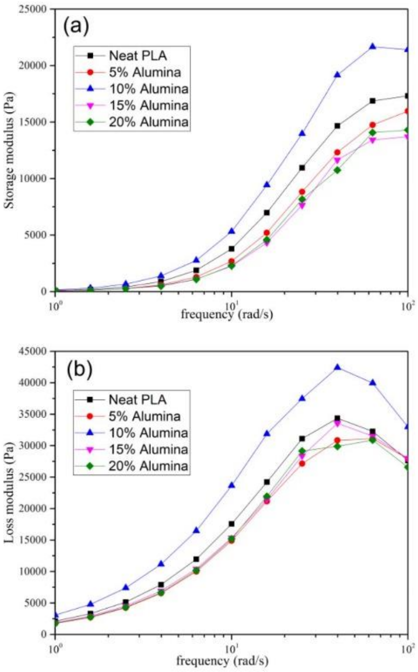


Figure 2. Storage and loss modulus of neat PLA and PLA/alumina composites with different alumina content: (a) Storage modulus (b) Loss modulus (at 180°C).

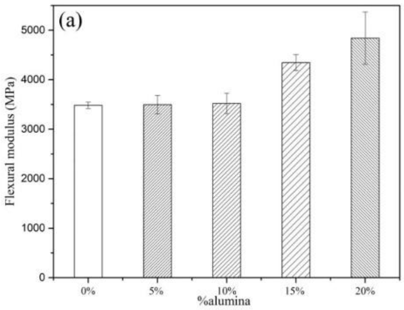
Storage and loss modulus of neat PLA and PLA/alumina composites plotted in logarithm scale were shown in Figure 2(a) and 2(b), respectively. Storage modulus represents elastic response of the materials when subjected to dynamic loading. It is seen that the composites were solid-like at high frequency, which the PLA/alumina 10 wt% had the highest storage modulus. Typically, peaks of loss modulus could be used to indicate compatibility between polymer matrix and fillers. Similarly to shifting of T_g in the DSC results, the peaks of loss modulus did not differ significantly.

3.3 Flexural properties of injection molded specimens

In order to study effect of alumina content on mechanical properties of the PLA/alumina composites, composite compounds were injection molded into specimens and tested in accordance to ASTM-D790. Flexural modulus and flexural strength for neat PLA and PLA/alumina composites with different alumina content are shown in Figure 3(a) and 3(b), respectively.

It was found that flexural modulus increased when silane-treated alumina content higher than 10 wt%. This was in agreement with the study by Kasuga *et al.* [8] that the modulus of elasticity of PLA composite did not increase when adding calcium carbonate of 10 wt% compared to neat PLA and increased when adding calcium carbonate more than 20 wt%. They used ^{13}NMR spectra to suggest bonding between carboxyl groups and calcium ions. Since alumina particles in this study was APTES treated, the interfacial adhesion between PLA matrix and silane treated alumina particles was expected to improve although there was slightly shifting in T_g observed in DSC results. Moreover, increasing the degree of crystallinity of PLA when adding silane treated alumina would improve rigidity of the PLA matrix.

In contrast, flexural strength was reduced with the presence of fillers [9] indicating the interfacial adhesion between PLA matrix and silane-treated alumina particles was not sufficient enough to dissipate loading energy between phases. Also, this might be attributed to dispersed alumina particles inhibited disentanglement of PLA molecules during the extension, so that the higher filler loading reduced the flexural strength of the composites.



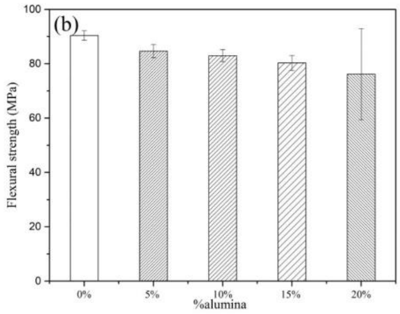


Figure 3. Flexural properties of neat PLA and PLA/alumina composites with different alumina content: (a) Flexural modulus (b) Flexural strength.

4. Conclusion

In this report, the composites between PLA and APTES treated alumina were successful prepared with the loading between 5-20 wt%. These composites could be extruded into filaments ready for 3D-printing fabrication. From DSC results, it showed that adding silane-treated alumina did not change the T_m of PLA, and increased the degree of crystallinity due to silane treated alumina acted as nucleating agents. Rheological results indicated that the silane treated alumina of 10 wt% could be the percolation content that gave the highest complex viscosity and storage modulus. However, flexural modulus of the injection molded specimen was increased when the silane treated alumina content was more than 10 wt%. The

optimum condition for 3D-printing of these PLA/alumina composite filaments will be further studied.

References

[1] Raghavan, R. N., Ceramics in Dentistry 2012.

[2] Totu, E. E., Nechifor, A. C., Nechifor, G., Aboul-Enein, H. Y., and Cristache, C. M., "Poly(methyl methacrylate) with TiO_2 nanoparticles inclusion for stereolitographic complete denture manufacturing − the fututre in dental care for elderly edentulous patients?", Journal of Dentistry, 59: 68-77 (2017).

[3] Tahayeri, A., Morgan, M., Fugolin, A. P., Bompolaki, D., Athirasala, A., Pfeifer, C. S., Ferracane, J. L., and Bertassoni, L. E., "3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials", Dental Materials, 34: 192-200 (2018).

[4] Tran, T. P. T., Bénézet, J.-C., and Bergeret, A., "Rice and Einkorn wheat husks reinforced poly(lactic acid) (PLA) biocomposites: Effects of alkaline and silane surface treatments of husks", Industrial Crops and Products, 58: 111-124 (2014).

[5] Xie, Y., Hill, C. A. S., Xiao, Z., Militz, H., and Mai, C., "Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 41: 806-819 (2010).

[6] Scaffaro, R., Lopresti, F., and Botta, L., "PLA based biocomposites reinforced with Posidonia oceanica leaves", Composites Part B: Engineering, 139: 1-11 (2018).

[7] Hassanabadi, H. M., Wilhelm, M., and Rodrigue, D., "A rheological criterion to determine the percolation threshold in polymer nano-composites", Rheologica Acta, 53: 869-882 (2014).

[8] Kasuga, T., Maeda, H., Kato, K., Nogami, M., Hata, K., and Ueda, M., "Preparation of poly(lactic acid) composites containing calcium carbonate (vaterite)", Biomaterials, 24: 3247-3253 (2003).

[9] Hakimelahi, H. R., Hu, L., Rupp, B. B., and Coleman, M. R., "Synthesis and characterization of transparent alumina reinforced polycarbonate nanocomposite", Polymer, 51: 2494-2502 (2010).

รายการอ้างอิง

1. Hospital, P. เปลี่ยนสีฟันให้สวยด้วยการครอบฟัน. 2019 [cited 2561 18 กรกฎาคม]; Available from: https://www.phyathai.com/article_detail/2722/th.
2. คลินิกแพทย์จัดฟันเดนต้าจอย. กระบวนการครอบฟัน. 2560 [cited 2560 18 กรกฎาคม]; Available from: http://www.dentajoy.com/th/cosmetic_dental_crowns.asp.
3. Skytraindentalgroup. ครอบฟัน. 2019 [cited 2562 18 กรกฎาคม]; Available from: http://www.skytraindental.com/service/%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%9A%E0%B8%9F%E0%B8%B1%E0%B8%99/.
4. ศูนย์ดูแลสุขภาพช่องปากคอลเกต. การครอบฟันและการยึดฟันปลอม. 2560 [cited 2560 18 กรกฎาคม]; Available from: http://www.colgate.co.th/th/th/oc/oralhealth/cosmetic-dentistry/bridges-and-crowns/article/what-are-dental-crowns-and-tooth-bridges.
5. Raghavan, R.N., *Ceramics in Dentistry*. dental surgeon, ed. chennai. 2012, india
6. Totu Eugenia Eftimie, Nechifor Aurelia Cristina, Nechifor Gheorghe, Aboul-Enein Hassan Y., and C.C. Marilena, *Poly(methyl methacrylate) with TiO2 nanoparticles inclusion for stereolitographic complete denture manufacturing – the fututre in dental care for elderly edentulous patients.* Journal of Dentistry, 2017. 59: p. 68-77.
7. Unnikrishnan Lakshmi, Mohanty Smita, Nayak Sanjay, and K.A. Anwar, *Preparation and characterization of poly(methyl methacrylate)–clay nanocomposites via melt intercalation: Effect of organoclay on thermal, mechanical and flammability properties.* Materials Science and Engineering: A, 2011. 528(12): p. 3943-3951.
8. researchgate. *Structural formula of PMMA.* . 2560 [cited 2560 23 กรกฎาคม 2560]; Available from: https://www.researchgate.net/figure/280386980_fig1_ Fig-2-Structural-formula-of-PMMA.
9. เลิศวรสิริกุล, อ., *Poly(lactic acid): Polyester from Renewable Resources* 2554.
10. Samadi Kosar, Francisco Michelle, Hegde Swati, Diaz Carlos A., Trabold Thomas A., Dell Elizabeth M., and L.C. L., *Mechanical, rheological and anaerobic*

biodegradation behavior of a Poly(lactic acid) blend containing a Poly(lactic acid)-co-poly(glycolic acid) copolymer. Polymer Degradation and Stability, 2019. 170: p. 109018.

11. Loredana, C., 6 - *Ceramics for dentistry: Commercial devices and their clinical analysis*, in *Advances in Ceramic Biomaterials*, P. Palmero, F. Cambier, and E. De Barra, Editors. 2017, Woodhead Publishing. p. 181-248.
12. Nadir, A., *Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament.* Polymer Testing, 2018. 71: p. 163-166.
13. Cheung, K.C. and B.W. Darvell, *Sintering of dental porcelain: effect of time and temperature on appearance and porosity.* Dental Materials, 2002. 18(2): p. 163-173.
14. เทพรัตน์ เขมาลีกุล, ป.ส., *Titanuum in dentistry* review article, 2006. 27: p. 43-54.
15. Prasad, S., M. Ehrensberger, M.P. Gibson, H. Kim, and E.A. Monaco, *Biomaterial properties of titanium in dentistry.* Journal of Oral Biosciences, 2015. 57(4): p. 192-199.
16. Pattaya, B.H. รากฟันเทียม เพิ่มบุคลิกภาพ และการบดเคี้ยวดั่งฟันธรรมชาติ. 2019 [cited 2562 18 กรกฎาคม]; Available from: https://www.bangkokpattayahospital.com/th/healthcare-services/dental-cosmetic-and-implant-center-th/dental-articles-th/item/2576-implants-th.html.
17. Sutheera Mongkhontreerat, Piriya Yavirach, Marisa Sukapattee, Nathawat Pleumsamran, Pattaranat Banthitkhunanon, Pattarika Angkasith, Apichai Yavirach, and P. Chaijareenont, *Effect of Silanized Nano-Silica on Flexural Properties and Color Stability of Polymethyl Methacrylate.* CM Dent 2017. 38: p. 71-81.
18. Alsharif Saad Omar, Bin Md Akil Hazizan, Abbas Abd El-Aziz Nasser, and A.B.A. Zainal, *Effect of alumina particles loading on the mechanical properties of light-cured dental resin composites.* Materials & Design (1980-2015), 2014. 54: p. 430-435.
19. Lamouri Samir, Hamidouche Mohamed, Bouaouadja Noureddine, Belhouchet Houcine, Garnier Vincent, Fantozzi Gilbert, and T.J. François., *Control of the* γ*-alumina to* α*-alumina phase transformation for an optimized alumina*

densification. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2017. 56(2): p. 47-54.

20. Sallal Hayder Abbas., Abdul-Hameead Alaa A., and O.F. Mohammad., *Effect of nano powder (Al2 O3 -CaO) addition on the mechanical properties of the polymer blend matrix composite.* Defence Technology, 2019.

21. Nowakowska-Toporowska, Agnieszka Malecka, Krystyna Raszewski, Zbigniew Wieckiewicz, and Wlodzimierz, *Changes in hardness of addition-polymerizing silicone-resilient denture liners after storage in artificial saliva.* The Journal of Prosthetic Dentistry, 2019. 121(2): p. 317-321.

22. HONESTDOCS, ก. ครบทุกเรื่องครอบฟัน (*Crown*). 2562 [cited 2562 18 กรกฎาคม]; Available from: https://www.honestdocs.co/what-is-crowns.

23. dental, S. *Dental Crown*. 2019 [cited 2019 18 กรกฎาคม]; Available from: https://solardentaltx.com/dental-crown/.

24. TrudentCeramics. *Dental Crowns Melbourne*. 2019 [cited 2019 23 july]; Available from: https://www.trudentceramics.com.au/dental-crown.html.

25. DentalCare. *dental crown*. 2019 [cited 2019 18 กรกฎาคม]; Available from: http://www.dentcare.ae/tag/dental-crown/.

26. ศูนย์ดูแลสุขภาพช่องปากคอลเกต. อะไรคือการครอบฟัน และการยึดฟันปลอม. 2560 18 กรกฎาคม 2560]; Available from: http://www.colgate.co.th/th/th/oc/oral-health/cosmetic-dentistry/bridges-and-crowns/article/what-are-dental-crowns-and-tooth-bridges.

27. Smith, Y. *Procedure for Dental Crowns*. 2019 [cited 2019 18 august]; Available from: https://www.news-medical.net/health/Procedure-for-Dental-Crowns.aspx.

28. Chojnowska Sylwia, Baran Tomasz, Wilinska Iwona, Sienicka Paulina, Cabaj-Wiater Iwona, and K. Małgorzata, *Human saliva as a diagnostic material.* Advances in Medical Sciences, 2018. 63(1): p. 185-191.

29. Leung, V.W.H. and B.W. Darvell, *Artificial salivas for in vitro studies of dental materials.* Journal of Dentistry, 1997. 25(6): p. 475-484.

30. Hsiao Douglas, H.S.H., Chen Rung-Shu, Chen Min-Huey, *Characterization of designed directional polylactic acid 3D scaffolds for neural differentiation of human dental pulp stem cells.* Journal of the Formosan Medical Association,

2019.

31. Deliormanlı and A. M., *Investigation of in vitro mineralization of silicate-based 45S5 and 13-93 bioactive glasses in artificial saliva for dental applications.* Ceramics International, 2017. 43(4): p. 3531-3539.

32. Lee James J. W., M.D., Constantino Paul J., Lucas Peter W., Smith Tanya M. and Lawn Brian R., *Properties of tooth enamel in great apes.* Acta Biomaterialia, 2010. 6(12): p. 4560-4565.

33. David, K., 28 - *Three-Dimensional Printing of Plastics*, in *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)*, M. Kutz, Editor. 2017, William Andrew Publishing. p. 617-634.

34. Raj S. Aravind, M.E., K. Jayakrishna., *A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties.* Materials Today: Proceedings, 2018. 5(5, Part 2): p. 11219-11226.

35. Sing S. L., C.F. Tey, Tan J. H. K., Huang S., and Y.W. Yee., 2 - 3*D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing.* Rapid Prototyping of Biomaterials (Second Edition), 2020: p. 17-40.

36. Murr, L.E., *Metallurgy principles applied to powder bed fusion 3 D printing/additive manufacturing of personalized and optimized metal and alloy biomedical implants: an overview.* Journal of Materials Research and Technology, 2020. 9(1): p. 1087-1103.

37. Ngo Tuan D., K.A., Imbalzano Gabriele, Nguyen Kate T. Q. and Hui David, *Additive manufacturing (3 D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.* Composites Part B: Engineering, 2018. 143: p. 172-196.

38. Jian-YuanLee, J.A., Chee Kai Chua, *Fundamentals and applications of 3 D printing for novel materials.* Applied Materials Today, 2017. 7: p. 120-133.

39. Heidari-Rarani M., R.A. M., and Z.A. M., *Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites.* Composites Part B: Engineering, 2019. 175: p. 107147.

40. Arnesano Antonio, Kunjalukkal Padmanabhan Sanosh, Notarangelo Antonio, Montagna Francesco, and L. Antonio, *Fused deposition modeling shaping of*

glass infiltrated alumina for dental restoration. Ceramics International, 2019.

41. Liu, Z., Q. Lei, and S. Xing, *Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM.* Journal of Materials Research and Technology, 2019. 8(5): p. 3741-3751.

42. Hassanajili Shadi, Karami-Pour Ali, Oryan Ahmad , and T. Talaei-Khozani, *Preparation and characterization of PLA/PCL/HA composite scaffolds using indirect 3 D printing for bone tissue engineering.* Materials Science and Engineering: C, 2019. 104: p. 109960.

43. Xu Chuanhui, Yuan Daosheng, Fu Lihua, and C. Yukun, *Physical blend of PLA/NR with co-continuous phase structure: Preparation, rheology property, mechanical properties and morphology.* Polymer Testing, 2014. 37: p. 94-101.

44. Siva Prasad, D. and C. Shoba, *Hybrid composites – a better choice for high wear resistant materials.* Journal of Materials Research and Technology, 2014. 3(2): p. 172-178.

45. Jarzyna, J.A., E. Puskarczyk, and J. Motyka, *Estimating porosity and hydraulic conductivity for hydrogeology on the basis of reservoir and elastic petrophysical parameters.* Journal of Applied Geophysics, 2019. 167: p. 11-18.

46. Culler, S.R., H. Ishida, and J.L. Koenig, *Structure of silane coupling agents adsorbed on silicon powder.* Journal of Colloid and Interface Science, 1985. 106(2): p. 334-346.

47. Daniele Battegazzore, S.B., Alberto Frache, *Crystallization kinetics of poly(lactic acid)-talc composites.* Express polymer letters, 2011. 5(10): p. 849-858.

48. Wang, L., Wang Ya-nan, Huang Zhi-gang, and W. Yun-xuan, *Heat resistance, crystallization behavior, and mechanical properties of polylactide/nucleating agent composites.* Materials & Design (1980-2015), 2015. 66: p. 7-15.

49. Smutzer Gregory, Jacob Jeswin C., Tran Joseph T., S.D. I, Gambhir Shilpa, Devassy Roni K., Tran Eric B., Hoang Brian T., and M.J. F., *Detection and modulation of capsaicin perception in the human oral cavity.* Physiology & Behavior, 2018. 194: p. 120-131.

50. Cisneros-López Erick O., Pal Akhilesh K., Rodriguez Arturo U., M.M. Wu Feng, Mielewski Deborah F., Kiziltas Alper, and M.A. K., *Recycled Poly (Lactic Acid)-*

based 3 D Printed Sustainable Biocomposites: A Comparative Study with Injection Molding. Materials Today Sustainability, 2019: p. 100027.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ณฐวัฒน์ กาญจนวลีกุล
วัน เดือน ปี เกิด	20 กรกฎาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนวัดนวลนรดิศ พ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม พ.ศ. 2559 ศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม
ที่อยู่ปัจจุบัน	115/177 หมู่บ้านชนันธรณ์วินมิลล์ ถนนเลียบคลองภาษีเจริญฝั่งใต้ เขตหนองแขม แขวงหนองแขม กรุงเทพมหานคร
ผลงานตีพิมพ์	Nathawat Kanchanawaleekun, Nattakarn Hongsriphan, and Pajaera Patanathabutr, "Preparation of Poly(Lactic Acid)/Alumina Composites For Dentistry Application ", The International Polymer Conference of Thailand(PCT-8), June 14-15, 2018, Bangkok, Thailand.