



## สมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติด้วยวิธีการอบอ่อนทางความร้อน

### Mechanical Properties of 3D Printed Parts with Thermal Annealing

ศิวศิษฐ์ ปิจมิตร<sup>1,3</sup> ไกรสร วงษ์ปู้<sup>1,\*</sup> ปรีดา จิวปัญญา<sup>1,3</sup> ภาควงุมิ ใจชมภู<sup>1,3</sup> และพินิจ เนื่องภิรมย์<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอมือง จังหวัดตาก 63000

<sup>2</sup> สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอมือง จังหวัดเชียงใหม่ 53000

<sup>3</sup> หน่วยวิจัยการพัฒนากำลังคนด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอมือง จังหวัดตาก 63000

<sup>4</sup> ศูนย์ความเป็นเลิศทางวิชาชีพและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอมือง จังหวัดเชียงใหม่ 53000

Siwasit Pitjamit<sup>1,3</sup>, Kraisorn Wongpoo<sup>1,\*</sup>, Parida Jewpanya<sup>1,3</sup>, Pakpoom Jaichompoo<sup>1,3</sup>

and Pinit Nuangpirom<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

41/1 Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, Thailand, 63000

<sup>2</sup> Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Mai

128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

<sup>3</sup> Innovation and Technology Manpower Development Center, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

41/1 Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, Thailand, 63000

<sup>4</sup> Center of Excellence for Professional and Technological, Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: wongpoo.k@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-9855-6789

Received: 1 November 2022, Revised: 30 April 2023, Accepted: 30 April 2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติในระบบ Fused Deposition Modeling: (FDM) ด้วยวิธีอบอ่อนทางความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เงื่อนไขทางความร้อนในการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมในภาคอุตสาหกรรมด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลหลายระดับ กำหนดปัจจัยในการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการอบอ่อน เวลาในการอบอ่อน และประเภทของการให้ความร้อน โดยกำหนดอุณหภูมิในการอบอ่อนช่วง 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อน 30 ถึง 50 นาที และประเภทของการให้ความร้อน ระหว่างการอบอ่อน และหลังการอบอ่อน ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุพอลิแลกติกแอซิดในการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติร่วมกับเครื่องอบอ่อนทางความร้อนสำหรับผลตอบในการศึกษาเป็นการวัดค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงเอนกประสงค์ และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab สำหรับวิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ จากการดำเนินงานวิจัยพบว่า ผลการทดลองเงื่อนไขทางความร้อนในการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิในการอบอ่อนทางความร้อน 60 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อน 30 นาที และประเภทของการให้ความร้อนเป็นระหว่างการอบอ่อน โดยให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 52.41 เมกะปาสกาล

**คำสำคัญ** การออกแบบการทดลอง การพิมพ์สามมิติ การอบอ่อนทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน



## Abstract

This research aims to study the mechanical properties of the Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing by thermal annealing method, and to provide a recommendation for the selection of suitable industrial 3D printing thermal conditions by the multi-level factorial experiments. In this research, the parameters in the study were annealing temperature, annealing hold time, and type of heating. The annealing temperature was set in the range of 60 to 70 °C, the annealing hold time was 30 to 50 minutes, and the type of heating was during annealing and post annealing. In this investigation, polylactic acid was used to print the specimens with the FDM 3D printer with a heat annealing machine. As for the results, the tensile strength was measured with a universal testing machine using Minitab software for statistical analysis and processing. From the experiments, it was found that the most suitable 3D printing thermal conditions were the annealing temperature of 60°C, the annealing hold time of 30 minutes, and during annealing. The ultimate tensile strength was 52.41 MPa.

**Keywords:** Design of Experiment; 3D Printing; Thermal Annealing; Mechanical Property; Thermal Property

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบชิ้นส่วนมีการพัฒนาและสามารถขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) หรือ การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) กันอย่างแพร่หลาย โดยเทคโนโลยีนี้มีบทบาทเป็นอย่างมากในวงการอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมทางการแพทย์ การจัดการศึกษาที่บูรณาการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และคณิตศาสตร์ (Science, Technology, Engineering and Mathematics, STEM) และการวิจัย สำหรับการช่วยสร้างชิ้นงานต้นแบบ ชิ้นส่วนทดแทนต่าง ๆ วัสดุที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดในการพิมพ์ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) [1, 2]

PLA เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (Aliphatic Polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic Acid) ซึ่งกรดแลคติกสามารถผลิตได้จากการหมัก แป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาล เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างชิ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง [3] พอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดขึ้นรูป

(Compression Molding) การอัดรีด (Extrusion) การเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) และการพิมพ์สามมิติ [4]

สำหรับสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันสามารถจำแนกได้ตามความง่ายในการพิมพ์ขึ้นรูป ความซับซ้อนของรูปลักษณะของชิ้นงาน ความแข็งแรงของชิ้นงาน ความยืดหยุ่น การทนต่อแรงกระแทก การทนความร้อนและการเชื่อมประสานกันระหว่างชิ้น ในขณะการขึ้นรูป เป็นต้น [5] จากการพิมพ์สามมิติพบว่าชิ้นงานที่พิมพ์จากวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกที่ได้จะคุณสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพค่อนข้างต่ำกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่น ๆ เนื่องจากการพิมพ์ขึ้นรูปในอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิปกติทำให้การจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ พลาสติกเกือบทุกชนิดจะหลอมเหลวเมื่อถูกความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อถูกทำให้เย็นลง หรือปล่อยให้คายความร้อนออกไป ทั้งนี้คุณสมบัติทางเคมีจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนรูปร่าง โดยคุณสมบัติโดยทั่วไปของ PLA คือ มีความเหนียว น้ำหนักเบา และจุดหลอมเหลวไม่สูงมาก แต่มีความแข็งแรงน้อย ดังนั้นการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน PLA ด้วยวิธีการอบอ่อนทางความร้อน (Thermal Annealing) เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ มาเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับใช้กับวัสดุพลาสติกเนื่องจากการให้ความร้อนกับโครงสร้างอณูฐานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพียงเล็กน้อยจะสามารถกระตุ้น



ให้โมเลกุลจัดเรียงตัวขึ้นมาใหม่อย่างเป็นระเบียบและเกิดเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้พลาสติกมีคุณภาพ และความแข็งแรงพอที่จะใช้งานด้านวิศวกรรม และอุตสาหกรรมได้มากขึ้น [6,7]

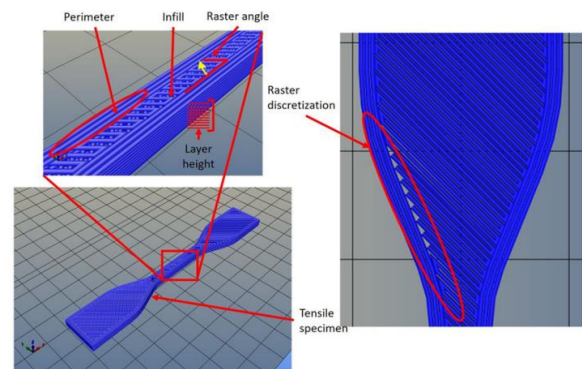
งานวิจัยที่แสดงคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นภายหลังจากอบอ่อนทางความร้อน ตัวอย่างเช่น [8,9] รายงานว่า ค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) และค่าความแข็งแรงกด (Compressive Strength) เพิ่มขึ้นจากการอบอ่อนทางความร้อนของชิ้นส่วน PLA ตัวอย่างหลังการทำอบอ่อนทางความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 300 วินาที จะมีค่าความแข็งแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) สูงกว่า PLA แบบที่ไม่ได้อบอ่อนถึง 58.3% ในขณะที่ค่าความแข็งแรงกดที่ทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเป็นเวลา 600 วินาที เพิ่มขึ้น 39.8% จากค่าความแข็งแรงกดที่ไม่ได้ทำการอบอ่อนทางความร้อน สอดคล้องกับงานวิจัย [10] ที่ศึกษาความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) ของวัสดุคอมโพสิตที่มี PLA และ PETG ซึ่งเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนสายสั้น (CF) จากการศึกษพบว่าทั้งวัสดุ PLA และ PETG มีความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ 2 และ 3 เท่าภายหลังจากการอบอ่อนทางความร้อน มีงานวิจัย [11] ทำการศึกษาที่คล้ายกันโดยศึกษาผลของการอบอ่อนทางความร้อนบนวัสดุผสมของ PLA ABS และ PETG ที่เสริมด้วยเส้นใยคาร์บอน อุณหภูมิในการอบอ่อนทางความร้อนทั้ง 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 65 °C 110 °C และ 85 °C และใช้เวลาในการอบอ่อนทางความร้อนเท่ากับ 60 นาที ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการอบอ่อนทางความร้อน 16.8% 3.34% และ 12.4% ตามลำดับ

ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการอบอ่อนทางความร้อนเพื่อหากระบวนการปรับปรุงสมบัติของ PLA ที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกายภาพ และทางสัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อให้โครงสร้างของพลาสติกชนิดนี้ดีขึ้นจาก 1) อุณหภูมิ 2) เวลา และ 3) ประเภทของการให้ความร้อนที่ได้รับอย่างเหมาะสม ส่งผลให้ชิ้นงานพลาสติกสามารถเพิ่มความแข็งแรงขึ้นได้

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

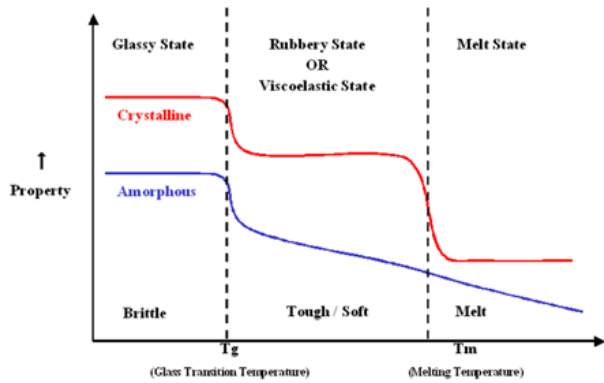
การพิมพ์สามมิติเป็นกระบวนการสร้างชิ้นงานสามมิติโดยการเติมชั้นของวัสดุต่อ ๆ กันภายใต้การควบคุมของคอมพิวเตอร์โดยชิ้นงานสามมิติจะถูกสร้างขึ้นโดยมีขั้นตอนในการร่างรูปภาพของชิ้นงานหรือที่เรียกว่า CAD (Computer-Aided Design) โดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะได้โมเดลสามมิติ หลังจากนั้นนำไฟล์ที่ได้จาก CAD ซึ่งเป็นไฟล์ stereolithography CAD หรือ .STL เข้าสู่โปรแกรมแบ่งชิ้นวัตถุ (Slicing Software) เพื่อแบ่งวัตถุเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 1 แล้วส่งต่อไปยังเครื่องพิมพ์ในการพิมพ์ชิ้นงานออกมา ซึ่งใช้วัสดุประเภทเส้น (Filament) พลาสติกชนิด PLA



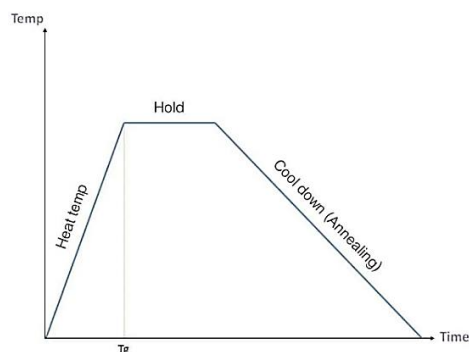
รูปที่ 1 การแบ่งวัตถุเป็นชั้น ๆ ใช้ซอฟต์แวร์ Slicing [12]

### 2.2. การอบอ่อนทางความร้อน (Thermal Annealing) ของชิ้นงานที่พิมพ์ขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

การพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานจากเครื่องพิมพ์สามมิติจะต้องใช้อุณหภูมิความร้อนที่จุดหลอมเหลว (Melting Temperature,  $T_m$ ) ของพลาสติกชนิดนั้น ๆ จึงจะสามารถไหลผ่านหัวฉีดได้ ดังรูปที่ 2 แต่การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานพลาสติกจะใช้แค่อุณหภูมิที่ทำให้วัสดุอ่อนตัว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) เท่านั้น เนื่องจากที่อุณหภูมิ  $T_g$  นี้พลาสติกที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ (Non-Crystalline) รวมถึงลักษณะกึ่งผลึก (Semicrystalline) มีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนเป็น ออสัณฐาน (Amorphous) ปนกันอยู่ จะเป็นการเปลี่ยนสถานะโครงสร้างใหม่ และสายโซ่โมเลกุลจะจัดเรียงตัวได้ดีกว่าแบบเดิม ด้วยอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) อย่างช้า ๆ ทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีเวลาจัดเรียงตัวมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกเพิ่มขึ้นได้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ  $T_g$  และ  $T_m$  [13]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ  $T_g$  กับเวลาของอัตราการเย็นตัวในระหว่างกระบวนการอบอ่อนทางความร้อน [14]

### 2.3 วัสดุพลาสติกกับการอบอ่อนทางความร้อน

พลาสติกวิศวกรรมและเกรดอุตสาหกรรมอาจทำการอบอ่อนทางความร้อนได้ยากในบางครั้ง เนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อวัสดุถูกผลิตหรือพัฒนาในระหว่างกระบวนการตัด หรือการเชื่อมส่วนประกอบที่ใช้เวลานาน อาจแตกหักหรือบิดงอได้ง่ายหากความเค้นภายในเกินความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าความร้อน จะส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่และปริมาณผลึก (Crystallinity) ของพลาสติกและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของชิ้นส่วนอย่างมาก [15,16] ดังนั้นการอบพลาสติกจึงมีหลักการไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ เวลาในการอบอ่อน เวลาในการเย็นตัว สภาพแวดล้อมในการพิมพ์ เป็นต้น วัสดุพลาสติกที่นิยมพิมพ์สามมิติในระบบ FDM ในปัจจุบัน ได้แก่ PLA PETG และ ABS มีค่าอุณหภูมิ  $T_g$  และอุณหภูมิในการพิมพ์สามมิติแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุณหภูมิ  $T_g$  และอุณหภูมิในการพิมพ์สามมิติ ของวัสดุพลาสติก PLA PETG และ ABS [17]

| วัสดุในการพิมพ์สามมิติ                            | อุณหภูมิ $T_g$ | อุณหภูมิในการพิมพ์ |
|---------------------------------------------------|----------------|--------------------|
| Polylactic Acid (PLA)                             | 65 °C          | 215 °C             |
| Polyethylene terephthalate Glycol-modified (PETG) | 75 °C          | 230 °C             |
| Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)             | 105 °C         | 255 °C             |

ในการดำเนินงานวิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการหาปัจจัยที่สำคัญในการพิมพ์ชิ้นรูป ชนิดและหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิตินิยามและความรู้เกี่ยวกับพลาสติกที่ใช้ในการพิมพ์ ชนิดและหลักการทำงานของตู้อบอ่อนทางความร้อน การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลและทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบ และการออกแบบการทดลอง

### 2.4 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่จุดกึ่งกลาง

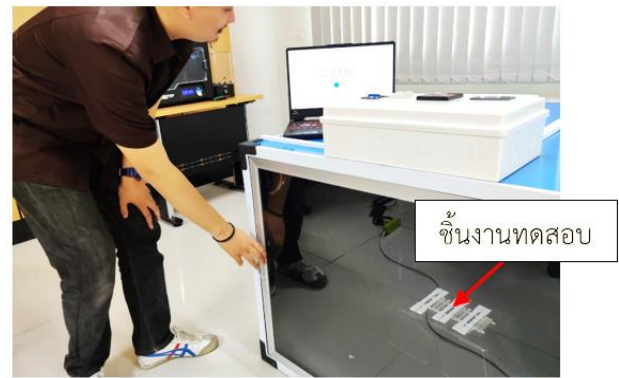
งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลหลายระดับ ด้วยโปรแกรม Minitab 19 ทำการศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการอบอ่อน (Annealing Temperature) 3 ระดับ เวลาในการอบอ่อน (Annealing Hold Time) 3 ระดับ อ้างอิงจากอุณหภูมิในการอบอ่อนที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดีที่สุดจากงานวิจัย 11 และประเภทของการให้ความร้อน (Type of Heating) 2 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง ดังตารางที่ 2 เพื่อหาเงื่อนไขสภาวะทางความร้อนที่เหมาะสมที่ทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบมีค่าที่มากที่สุด

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองหาเงื่อนไขทางความร้อนที่เหมาะสมที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งแรงสูงที่สุด

| ปัจจัย                     | ระดับ           |          |              |
|----------------------------|-----------------|----------|--------------|
|                            | ต่ำ (-1)        | กลาง (0) | สูง (+1)     |
| A.อุณหภูมิในการอบอ่อน (°C) | 60              | 65       | 70           |
| B.เวลาในการอบอ่อน (นาท)    | 30              | 40       | 50           |
| C.ประเภทของการให้ความร้อน  | ระหว่างการพิมพ์ | -        | หลังการพิมพ์ |



รูปที่ 4 เครื่องอบอ่อนทางความร้อนกับการใช้งานร่วมกับเครื่องพิมพ์สามมิติ



รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบจากการพิมพ์สามมิติร่วมกับการอบอ่อนทางความร้อน



รูปที่ 6 การทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่อง UTM

## 2.5 วัสดุเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในการทดลอง เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM ยี่ห้อ Flashforge รุ่น Creator Pro เครื่องพิมพ์สามมิติเป็นระบบ 2 หัวฉีด ขนาดของรูหัวฉีด 0.4 มิลลิเมตร อุณหภูมิในการพิมพ์สูงสุด 240 °C อุณหภูมิฐานพิมพ์สูงสุด 120 °C ความหนาของชั้น 0.4 มิลลิเมตร เส้นพลาสติกที่ใช้พิมพ์ได้ PLA, PETG, ABS ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติก 1.75 มิลลิเมตร ความเร็วในการพิมพ์ 30 ถึง 100 มิลลิเมตรต่อวินาที ขนาดของฐานพิมพ์ 227×148×150 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์สามมิติในการทดลอง เส้นพลาสติก PLA ยี่ห้อ X3D Filament ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่สามารถพิมพ์ได้ 190 ถึง 220 °C อุณหภูมิฐานพิมพ์ 50 °C

ตู้อบอ่อนทางความร้อนแบบฮีตเตอร์ ใช้สำหรับในการให้ความร้อนโดยนำเครื่องพิมพ์สามมิติติดตั้งในตู้อบเพื่อควบคุมสภาวะทางความร้อน ตู้อบแบบฮีตเตอร์ รุ่น Over Heat Protection ดังรูปที่ 4 และขนาดภายในตู้อบกว้าง 90 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร สามารถควบคุมช่วงอุณหภูมิได้ 30 ถึง 100 °C ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน  $\pm 5$  °C และใช้อัตราการเย็นตัวในระหว่างกระบวนการอบอ่อนทางความร้อนคงที่ 10 °C ต่อชั่วโมง

## 2.6 การพิมพ์สามมิติสำหรับชิ้นงานทดสอบ

ทำการออกแบบชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งแรงดึงและการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานทดสอบในแกน x แกน y และแกน โดยใช้โปรแกรม Solid Work 2020 ทำการบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .STL และนำเข้าไฟล์เข้าสู่



โปรแกรมสำเร็จรูป Cura Slicer ทำการปรับตำแหน่ง และ กำหนดปัจจัยในการพิมพ์ให้แก่ชิ้นงาน ได้แก่ ขนาดของเนื้อพลาสติกที่ฉีด (Infill) เป็น 100% รูปแบบของเนื้อพลาสติกที่ฉีดเป็น Rectilinear เพราะเป็น Infill Pattern ที่จะทำให้ค่าความแข็งแรงตึงมากที่สุดจากงานวิจัย [18] อุณหภูมิในการพิมพ์ 200 °C ความเร็วในการพิมพ์ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิของฐานพิมพ์ 60 °C บันทึกลงไฟล์เป็นนามสกุล .Gcode ก่อนการใช้งานเครื่องพิมพ์สามมิติทำการให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheat) ให้กับฐานพิมพ์และหัวพิมพ์ก่อนเพื่อลดความเสียหายของชิ้นงานในขณะพิมพ์ และทำการพิมพ์ชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองในตารางที่ 2 จะได้รูปชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 5

### 2.7 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลความเค้นแรงตึงชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 638 [19] ทดสอบทุกเงื่อนไขการทดลองโดยเครื่องทดสอบความเค้นแรงตึงอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) ยี่ห้อ MATEST รุ่น H001B ได้แก่ การทดสอบความเค้นแรงตึงโดยใช้โหลดเซลล์ 10 กิโลนิวตัน ความเร็วโหลดในการทดสอบ 5 มิลลิเมตร ต่อ นาที ดังรูปที่ 6

### 2.8 การตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานวิทยา (Morphology)

นำชิ้นงานทดสอบตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure Analysis) ของด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ SOPTOP Microscope กำลังขยาย 5 เท่า บริเวณด้านข้างเพื่อดูความหนาของชั้น (Layer) เพื่อเปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนด้วยการอบอ่อนในรูปแบบต่าง ๆ

## 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

### 3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของความแข็งแรงตึง

ผลจากการวิจัยได้จากการทดลอง โดยนำปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการอบอ่อน เวลาในการอบอ่อน และประเภทของการให้ความร้อน ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงตึงตามเงื่อนไขจากการออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 36 การทดลอง เพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงตึงซึ่งลำดับการทดลองและผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัย อุณหภูมิในการอบอ่อน (A) เวลาในการอบอ่อน (B) ประเภทของการให้ความร้อน (C) ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าตอบสนองในการ

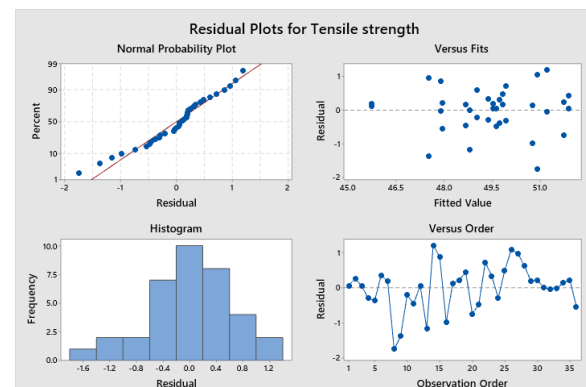
ทดลองหรือค่าความเค้นสูงสุด ได้แก่ ปัจจัย A B และ C เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และเมื่อวิเคราะห์ผลของปัจจัยร่วม พบว่าปัจจัย A\*C, A\*C มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยร่วมเหล่านี้มีผลต่อค่าความแข็งแรงตึงในการทดลอง แสดงค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงตึงที่วิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab 19 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นกับค่าตอบสนองในการทดลอง โดยในการทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 84.92 เปอร์เซ็นต์ และหลังทำการปรับค่า มีค่าเท่ากับ 76.02 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นการอธิบายถึงความน่าเชื่อถือของค่าตอบสนองที่มีผลมาจากปัจจัยในการทดลอง หากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยิ่งเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ ยิ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือของการทดลองที่มากขึ้น

| Source                         | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-Value | P-Value |
|--------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Model                          | 13 | 84.3909 | 6.4916  | 9.53    | 0.000   |
| Linear                         | 5  | 61.9310 | 12.3862 | 18.19   | 0.000   |
| Annealing Temp                 | 2  | 17.3606 | 8.6803  | 12.75   | 0.000   |
| Hold Time                      | 2  | 31.7898 | 15.8949 | 23.34   | 0.000   |
| Type of heating                | 1  | 12.7806 | 12.7806 | 18.77   | 0.000   |
| 2-Way Interactions             | 8  | 22.4599 | 2.8075  | 4.12    | 0.004   |
| Annealing Temp*Hold Time       | 4  | 11.8444 | 2.9611  | 4.35    | 0.010   |
| Annealing Temp*Type of heating | 2  | 9.9134  | 4.9567  | 7.28    | 0.004   |
| Hold Time*Type of heating      | 2  | 0.7020  | 0.3510  | 0.52    | 0.604   |
| Error                          | 22 | 14.9811 | 0.6810  |         |         |
| Lack-of-Fit                    | 4  | 3.2604  | 0.8151  | 1.25    | 0.325   |
| Pure Error                     | 18 | 11.7206 | 0.6511  |         |         |
| Total                          | 35 | 99.3720 |         |         |         |

| Model Summary |        |           |            |
|---------------|--------|-----------|------------|
| S             | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
| 0.825202      | 84.92% | 76.02%    | 59.63%     |

รูปที่ 7 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งแรงตึงของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 8 แผนภูมิการกระจายตัวของค่าความแข็งแรงตึง



ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ  
ทั้งหมด 36 การทดลอง

| StdOrder | A  | B  | C       | Tensile Strength (MPa) |
|----------|----|----|---------|------------------------|
| 1        | 60 | 30 | ระหว่าง | 51.95                  |
| 2        | 60 | 30 | หลัง    | 52.01                  |
| 3        | 60 | 40 | ระหว่าง | 49.68                  |
| 4        | 60 | 40 | หลัง    | 49.63                  |
| 5        | 60 | 50 | ระหว่าง | 49.37                  |
| 6        | 60 | 50 | หลัง    | 49.72                  |
| 7        | 65 | 30 | ระหว่าง | 50.01                  |
| 8        | 65 | 30 | หลัง    | 49.16                  |
| 9        | 65 | 40 | ระหว่าง | 46.14                  |
| 10       | 65 | 40 | หลัง    | 48.83                  |
| 11       | 65 | 50 | ระหว่าง | 48.22                  |
| 12       | 65 | 50 | หลัง    | 49.59                  |
| 13       | 70 | 30 | ระหว่าง | 47.63                  |
| 14       | 70 | 30 | หลัง    | 52.34                  |
| 15       | 70 | 40 | ระหว่าง | 48.76                  |
| 16       | 70 | 40 | หลัง    | 49.79                  |
| 17       | 70 | 50 | ระหว่าง | 45.86                  |
| 18       | 70 | 50 | หลัง    | 48.15                  |
| 19       | 60 | 30 | ระหว่าง | 52.41                  |
| 20       | 60 | 30 | หลัง    | 51.01                  |
| 21       | 60 | 40 | ระหว่าง | 49.15                  |
| 22       | 60 | 40 | หลัง    | 50.65                  |
| 23       | 60 | 50 | ระหว่าง | 50.06                  |
| 24       | 60 | 50 | หลัง    | 49.08                  |
| 25       | 65 | 30 | ระหว่าง | 50.32                  |
| 26       | 65 | 30 | หลัง    | 51.98                  |
| 27       | 65 | 40 | ระหว่าง | 48.47                  |
| 28       | 65 | 40 | หลัง    | 49.65                  |
| 29       | 65 | 50 | ระหว่าง | 48.86                  |
| 30       | 65 | 50 | หลัง    | 49.74                  |
| 31       | 70 | 30 | ระหว่าง | 48.79                  |
| 32       | 70 | 30 | หลัง    | 51.17                  |
| 33       | 70 | 40 | ระหว่าง | 47.87                  |
| 34       | 70 | 40 | หลัง    | 50.91                  |
| 35       | 70 | 50 | ระหว่าง | 45.95                  |
| 36       | 70 | 50 | หลัง    | 47.40                  |

### 3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบการทดลอง

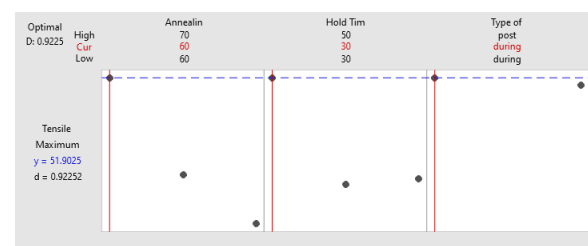
ความถูกต้องของการออกแบบการทดลองสามารถตรวจสอบได้จากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าความเค้นสูงสุดทั้ง 4 แบบ ดังรูปที่ 8 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

แผนภาพความน่าจะเป็นปกติ (Normal Probability Plot) แสดงถึงข้อมูลที่กระจายตัวโดยมีแนวโน้มเป็น เส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์มีกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ฮิสโตแกรม (Histogram) แสดงถึง

ข้อมูลที่กระจายตัวในลักษณะของระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์มีกระจายตัวแบบปกติ การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Versus Fits) แสดงถึงความแปรปรวนของข้อมูลที่กระจายตัวในลักษณะไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แสดงว่า ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์ไม่แตกต่างกัน การตรวจสอบความเป็นอิสระของ Residual (Versus Order) แสดงถึงข้อมูลที่กระจายตัวในลักษณะไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน แสดงว่า ข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์ไม่แปรผันตามลำดับการทดลอง

### 3.3 การหาเงื่อนไขที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่เหมาะสม

การศึกษาเงื่อนไขที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่เหมาะสมจากการทำ Response Optimization ซึ่งอธิบายถึงการวิเคราะห์ระดับของปัจจัยที่ทำให้ได้ผลตอบมีค่ามากที่สุด (Maximum) โดยในการวิเคราะห์ค่าความเค้นสูงสุดจะทำการกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) เท่ากับ 52.41 MPa เนื่องจากเป็นค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ชิ้นงานทดสอบสามารถรับได้ และกำหนดค่าน้อยสุด (Lower) เท่ากับ 45.86 MPa เนื่องจากเป็นค่าความแข็งแรงดึงน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริง รวมถึงการกำหนดค่าน้ำหนักผลตอบ (Weight) และค่าความสำคัญ (Importance) เท่ากับ 1 เนื่องจากต้องการให้ค่าผลตอบ เข้าใกล้ค่ามากที่สุด (Maximize) จากรูปที่ 9 อธิบายได้ว่า การกำหนดค่าที่เหมาะสมดังที่กล่าวมาข้างต้น จะทำให้ได้เงื่อนไขของการอบอ่อนทางความร้อนที่จะส่งผลให้เกิดค่าความแข็งแรงดึงที่เหมาะสมที่สุด จากผลการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิในการอบอ่อนเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อนเท่ากับ 30 นาที และประเภทของการให้ความร้อนระหว่างการพิมพ์ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจากการทำนายผลเท่ากับ 51.90 MPa และมีค่า Desirability เท่ากับ 0.9225

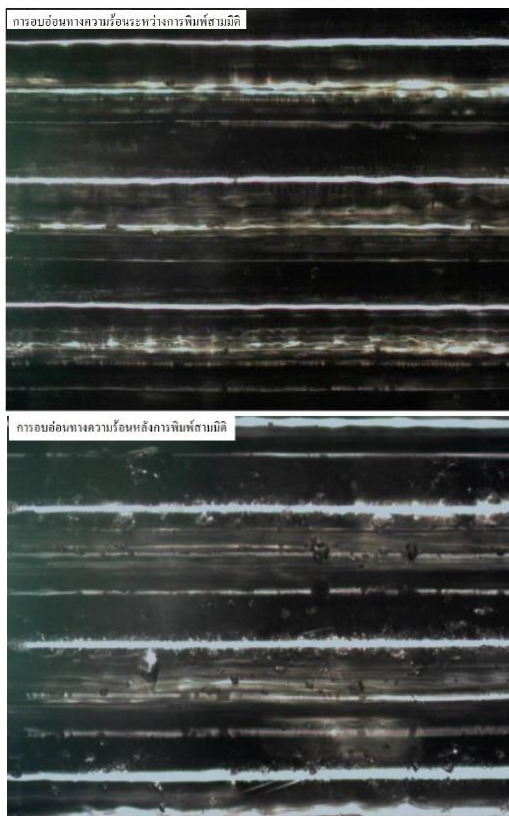


รูปที่ 9 ค่าของปัจจัยทางความร้อนที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่เหมาะสมที่สุด



### 3.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานวิทยา

จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 5 เท่า เพื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้น (Layer) จากการพิมพ์ ขึ้นงานโดยเปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบการอบอ่อนทางความร้อนระหว่างการพิมพ์สามมิติ และหลังการพิมพ์สามมิติ ดังรูปที่ 10 พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ทำการอบอ่อนระหว่างการพิมพ์ มีชั้นในการพิมพ์ที่ชิดกันมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Amza และคณะ [20] ที่ทำการศึกษากลไกในการอบอ่อนทางความร้อนที่ส่งผลให้โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกที่ดีขึ้นจากเงื่อนไขของอุณหภูมิ เวลา ประเภทของการให้ความร้อนที่ได้รับอย่างเหมาะสมกับประเภทของวัสดุ ผลทำให้พลาสติกมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจากเดิมซึ่งเป็นกลไกในการเพิ่มความแข็งแรง



รูปที่ 10 รูปถ่ายความหนาของชั้นของชิ้นงานทดสอบการอบอ่อนทางความร้อนระหว่างการพิมพ์สามมิติ (บน) และหลังการพิมพ์สามมิติ (ล่าง)

### 3.5 อภิปรายผลการทดลอง

ผลทดลองสมบัติเชิงกลจากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทั้ง 3 ปัจจัย เมื่อได้ทดสอบชิ้นงานถึงจุดแรงดึงสูงสุดแล้วได้นำมาเปรียบเทียบกับระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้ทำ

การอบอ่อนทางความร้อน ชิ้นงานที่พิมพ์ระหว่างการอบอ่อนทางความร้อน และหลังทำการอบอ่อนทางความร้อน พบว่าชิ้นงานที่ทำการอบอ่อนทางความร้อนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการอบอ่อนทางความร้อน การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานจะใช้แค่อุณหภูมิที่ทำให้วัสดุอ่อนตัว (Tg) เท่านั้น เนื่องจากที่อุณหภูมิอ่อนตัวของพลาสติกนี้ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบรวมถึงลักษณะกิ่งผลึกจะเป็นการเปลี่ยนสถานะโครงสร้างใหม่ และสายโซ่โมเลกุลจะจัดเรียงตัวได้ดีกว่าแบบเดิมด้วยอัตราการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีเวลาจัดเรียงตัวมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 52.41 MPa เปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบจากการขึ้นรูปแบบฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) และจากการพิมพ์สามมิติตามเอกสารทางเทคนิค (Technical Datasheet) พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดจากการทดลองมีค่าไม่แตกต่างจากการพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบเดียวกัน มีค่าไม่ต่างจากการขึ้นรูปแบบฉีดขึ้นรูป (52.00 MPa) และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Vukasovic และงานวิจัยของ Wang ที่พิมพ์สามมิติขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และทดสอบได้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 69.80 MPa และ 60.30 MPa ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงจากการทดลองมีค่าน้อยกว่าแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความความแข็งแรงดึงจากการทดลองกับเอกสารทางเทคนิคและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| ผลการเปรียบเทียบชิ้นงานจากวัสดุ PLA จากการขึ้นรูปแบบต่างๆ                  | Tensile Strength (MPa) |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| ชิ้นงานทดสอบจากการทดลอง                                                    | 52.41                  |
| ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดขึ้นรูปจากเอกสารทางเทคนิค [20]             | 52.00                  |
| ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติจากเอกสารทางเทคนิค [21]           | 50.00                  |
| ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติจากงานวิจัย Vukasovic และคณะ [23] | 69.80                  |
| ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์สามมิติจากงานวิจัย Wang และคณะ [22]      | 60.30                  |



จากงานวิจัยของ Wach และคณะ [8] ศึกษาถึงประโยชน์ของการอบอ่อนทางความร้อนให้กับพลาสติกจากการพิมพ์สามมิติจะขึ้นกระบวนการและขั้นตอนที่ถูกต้องอย่างเหมาะสม ซึ่งมีข้อดีหลายประการทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ได้แก่ ขนาดของชิ้นงานมีความเสถียร สามารถนำไปตัดแต่งเพิ่มเติมได้ ชิ้นงานมีความแข็งแรงและความสมบูรณ์ เหมาะสมใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ลดการหดตัวและการขยายตัว ความทนทานต่อสารเคมีได้ดีขึ้น ความต้านทานการสึกหรอ ดีจากเดิม มีประสิทธิภาพที่จะใช้งานได้มากขึ้น

#### 4. บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการการศึกษาผลของการอบอ่อนทางความร้อนที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของชิ้นงานจากการพิมพ์สามมิติเพื่อหาเงื่อนไขของปัจจัยที่เหมาะสมประกอบด้วย อุณหภูมิในการอบอ่อน เวลาในการอบอ่อน และประเภทของการให้ความร้อน จากการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

จากผลการทดลองการทดสอบความแข็งแรงดึง พบว่า อุณหภูมิในการอบอ่อนทางความร้อน 60 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อน 30 นาที และประเภทของการให้ความร้อนเป็นระหว่างการอบอ่อน ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด เท่ากับ 52.41 MPa

จากผลการทำนายเพื่อหาเงื่อนไขที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่เหมาะสม พบว่า อุณหภูมิในการอบอ่อนทางความร้อน 60 องศาเซลเซียส เวลาในการอบอ่อน 30 นาที และประเภทของการให้ความร้อนเป็นระหว่างการอบอ่อน ให้ค่าทำนายความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุดเท่ากับ 51.90 MPa ซึ่งผลการทดลองจริงและผลการทดลองจากการทำนายมีค่าไม่แตกต่างกัน

ทั้งนี้งานวิจัยถัดไปผู้เขียนจะทำการทดสอบความสามารถในการคงขนาด (Dimensional Stability) ตามมาตรฐาน ASTM D1204 และปริมาณความเป็นผลึก (%Crystallinity) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ต่อไปในอนาคต

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณ คุณณัฐพล หมีไพรพุกษ์ คุณนรินทร์ เอี่ยมสอาด คุณอภิสิทธิ์ กลิ่นบัว สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ช่วยในการจัดหาข้อมูล และทำการทดลอง

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบในการดำเนินงานวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dilberoglu UM, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia manufacturing*. 2017 Jan 1;11:545-54.
- [2] Farré-Guasch E, Wolff J, Helder MN, Schulten EA, Forouzanfar T, Klein-Nulend J. Application of additive manufacturing in oral and maxillofacial surgery. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2015 Dec 1;73(12):2408-18.
- [3] Davachi SM, Kaffashi B. Polylactic acid in medicine. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2015 Jun 23;54(9):944-67.
- [4] Ilyas RA, Sapuan SM, Harussani MM, Hakimi MY, Haziq MZ, Atikah MS, Asyraf MR, Ishak MR, Razman MR, Nurazzi NM, Norrrahim MN. Polylactic acid (PLA) biocomposite: Processing, additive manufacturing and advanced applications. *Polymers*. 2021 Apr 18;13(8):1326.
- [5] Liu Z, Wang Y, Wu B, Cui C, Guo Y, Yan C. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Jun 19;102:2877-89.
- [6] Yang C, Tian X, Li D, Cao Y, Zhao F, Shi C. Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017 Oct 1;248:1-7.



- [7] Lluch-Cerezo J, Meseguer MD, García-Manrique JA, Benavente R. Influence of thermal annealing temperatures on powder mould effectiveness to avoid deformations in ABS and PLA 3D-printed parts. *Polymers*. 2022 Jun 27;14(13):2607.
- [8] Wach RA, Wolszczak P, Adamus - Włodarczyk A. Enhancement of mechanical properties of FDM - PLA parts via thermal annealing. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2018 Sep;303(9):1800169.
- [9] Valvez S, Silva AP, Reis PN, Berto F. Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites. *Procedia Structural Integrity*. 2022 Jan 1;37:738-45.
- [10] Bhandari S, Lopez-Anido RA, Gardner DJ. Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing*. 2019 Dec 1;30:100922.
- [11] Rangisetty S, Peel LD. The effect of infill patterns and annealing on mechanical properties of additively manufactured thermoplastic composites. *InSmart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* 2017 Sep 18 (Vol. 58257, p. V001T08A017). American Society of Mechanical Engineers.
- [12] Popescu D, Zapciu A, Amza C, Baci F, Marinescu R. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*. 2018 Aug 1;69:157-66.
- [13] Injection Molding Online. What are the typical thermal transitions in polymers. Available from: <http://injectionmoldingonline.com/Molding101/Polymers.aspx/> [Accessed 30th March 2023].
- [14] Hsueh MH, Lai CJ, Wang SH, Zeng YS, Hsieh CH, Pan CY, Huang WC. Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed pla and petg, using fused deposition modeling. *Polymers*. 2021 May 27;13(11):1758.
- [15] Lee J, Lee H, Cheon KH, Park C, Jang TS, Kim HE, Jung HD. Fabrication of poly (lactic acid)/Ti composite scaffolds with enhanced mechanical properties and biocompatibility via fused filament fabrication (FFF)-based 3D printing. *Additive Manufacturing*. 2019 Dec 1;30:100883.
- [16] Pastorek M, Kovalcik A. Effects of thermal annealing as polymer processing step on poly (lactic acid). *Materials and Manufacturing Processes*. 2018 Nov 18;33(15):1674-80.
- [17] Pitjarnit S, Thunsiri K, Nakkiew W, Wongwichai T, Pothacharoen P, Wattanutchariya W. The possibility of interlocking nail fabrication from FFF 3D printing PLA/PCL/HA composites coated by local silk fibroin for canine bone fracture treatment. *Materials*. 2020 Mar 28;13(7):1564.
- [18] Dave HK, Patadiya NH, Prajapati AR, Rajpurohit SR. Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2021 May;235(10):1811-27.
- [19] Amza CG, Zapciu A, Constantin G, Baci F, Vasile MI. Enhancing mechanical properties of polymer 3D printed parts. *Polymers*. 2021 Feb 13;13(4):562.



- [20] Kaynak C, Varsavas SD. Performance comparison of the 3D-printed and injection-molded PLA and its elastomer blend and fiber composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2019 Apr;32(4):501-20.
- [21] Stoica CR, Maier R, Istrate A, Mandoc AC. Assessment of Static Mechanical Properties of Additively Manufactured Polylactic Acid (PLA) on Entry-Level FDM 3D Printer. *Mater. Plast*. 2021 Jun 1;58(2).
- [22] Vukasovic T, Vivanco JF, Celentano D, García-Herrera C. Characterization of the mechanical response of thermoplastic parts fabricated with 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019 Oct;104:4207-18.
- [23] Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Feb 1;110:442-58.