

ประเภทเส้นใยพลาสติกต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ธเนศ รัตนวิไล* พรณานุตบุตร อาริษา พรหมใหม่ และ นพณัฐ จาตุรนต์ลักษณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thanate.r@psu.ac.th

วันที่รับบทความ: 28 มกราคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 4 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 21 กรกฎาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: กระบวนการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ได้แก่ ประเภทของพลาสติก ABS, PLA และ PETG ความเร็วในการพิมพ์ ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ความหนาของผนังชิ้นงาน และความสูงของแต่ละชั้น ผลการทดสอบและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ ได้แก่ ประเภทของพลาสติก ความหนาของผนังชิ้นงาน ความสูงของแต่ละชั้น ความเร็วในการพิมพ์ และความหนาแน่นของการเติมชิ้นงานตามลำดับ โดยปัจจัยทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงปัจจัยในการพิมพ์ที่ให้ความแข็งแรงแก่ชิ้นงานมากที่สุดในพลาสติกทุกกลุ่มที่มีความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่มีความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 20% และความสูงแต่ละชั้นที่ 0.3 มิลลิเมตร ขณะที่พลาสติกที่ให้ความแข็งแรงมากที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ PLA ซึ่งมีความแข็งแรงอัด แรงดึง และแรงดัดที่ 25.29, 20.84 และ 63.44 MPa ตามลำดับ

คำสำคัญ: เส้นพลาสติก; เครื่องพิมพ์ 3 มิติ; พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์; สมบัติเชิงกล; การวิเคราะห์เชิงสถิติ

Effect of Plastic Filament Type on Mechanical Properties of 3D-printed Parts

Thanate Ratanawilai*, Pornnapa Nuttabut, Arisa Prommai, and Noppanat Jaturonlux

Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

* Corresponding author, E-mail: thanate.r@psu.ac.th

Received: 28 January 2025; Revised 4 July 2025; Accepted: 21 July 2025

Online Published: 20 August 2025

Abstract: The manufacturing process has been continuously improved in the industry. The 3D-printer has become one of the most widely used new techniques for manufacturing. This study aims to investigate how the mechanical characteristics of the test samples are affected by the 3D-printing parameters. Types of plastic (ABS, PLA, PETG), printing speed, infill density, shell thickness, and layer height are all printing parameters. In the test findings, the mechanical characteristics of samples made using 3D-printers are compared. It was found that the printing parameters, which are plastic type, shell thickness, layer height, printing speed, and Infill density, respectively had a significant effect on the mechanical properties. The mechanical strength increases when the printing parameters are increased. Furthermore, the findings indicate that the shell thickness 3 layers, printing speed 30 mm/s, Infill density 20%, and layer height 0.3 mm are the printing parameters that provide the best mechanical qualities for all kinds of plastics. PLA is the plastic that exhibits the best mechanical qualities in this study which the compressive, tensile, and bending strengths are 25.29, 20.84, and 63.44 MPa, respectively.

Keywords: Plastics filament; 3D-printer; Printing process parameters; Mechanical properties; Statistical analysis



1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน นับว่ามีความสำคัญอย่างมากในการผลิตสินค้าต่าง ๆ โดยกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากพลาสติก สามารถทำได้หลากหลายวิธีตามลักษณะของชิ้นงาน เช่น การอัดรีดขึ้นรูป การอัดรีดขึ้นรูปชิ้นงาน หรือการอัดฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน [1,2] อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่มีราคาแพง และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตมีราคาสูง การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลิตภัณฑ์จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นทั้งในส่วนของการจักร เครื่องมือ หรือแรงงาน ปัจจุบันกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากพลาสติกได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยหนึ่งในกระบวนการผลิตที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน คือ การผลิตแบบเพิ่มเนื้อ (Additive Manufacturing)

เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D-printer) เป็นหนึ่งในเครื่องจักรที่มีการใช้เทคนิคกระบวนการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ โดยทำการฉีดเนื้อพลาสติกเป็นลำดับชั้นซ้อนทับกันจนออกมาเป็นชิ้นงานตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยอาศัยการควบคุมการผลิตผ่านระบบแบบดิจิทัล [3] สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนวัสดุการบิน อวกาศ ชิ้นส่วนวัสดุอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมอื่น ๆ [4,5] เป็นต้น ชิ้นงานที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์สามมิติเหมาะกับการสร้างชิ้นงานต้นแบบก่อนทำการผลิตจริง เนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ สามารถเพิ่มความซับซ้อนของโครงสร้างให้ได้ชิ้นงานที่เหมาะสมกับการใช้งาน และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้ง่าย วัสดุที่ใช้

ในการขึ้นรูปอาจแตกต่างกัน เช่น พลาสติก ผงฝุ่นหรือซีเมนต์ โดยยังคงใช้หลักการขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติที่อาศัยหลักการสร้างชิ้นงานเป็นชั้น ๆ เช่นเดียวกัน [6]

ระบบการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติมีหลายระบบ แต่ที่พบแพร่หลายได้แก่ ระบบ Fused Deposition Modeling (FDM) หรือ Fused Filament Fabrication (FFF) [7] เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF เป็นเครื่องจักรที่ผลิตชิ้นงานจากวัสดุเส้นพลาสติก (Filament) ซึ่งมีหลากหลายประเภท ทั้งที่มีความแข็งแรงสูง เหนียวนำไฟฟ้าได้ หรืออาจยืดหยุ่นเหมือนยาง ขึ้นกับความต้องการของผู้ใช้งาน เส้นพลาสติกที่มีการนำมาใช้งานกับเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF มากที่สุดมี 3 ประเภท ได้แก่ พลาสติกอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene; ABS) พลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) และพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (Polyethylene Terephthalate glycol; PETG) นอกจากนี้พลาสติกทั้ง 3 ชนิดแล้ว เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF ยังสามารถใช้งานกับพลาสติกกลุ่มเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอเธอร์อีเธอร์คีโตน (Polyether Ether ketone; PEEK) พอลิโพรไพลีน (Polypropylene; PP) เป็นต้น [8,9]

นอกจากประเภทของพลาสติกที่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานแล้ว ปัจจัยการผลิต เช่น ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (Printing Speed) ความหนาของผนังชิ้นงาน (Shell Thickness) ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (Infill Density) หรือความสูงของแต่ละชั้น (Layer Height) ก็เป็นอีกส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติ และคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ความหนาของชั้นที่ 0.2 มิลลิเมตรและทิศทาง การพิมพ์ตามแนวแรง

มีส่วนช่วยให้ความแข็งแรงดึงที่เพิ่มมากขึ้น [10] เช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน มีส่วนช่วยให้ชิ้นงานรับแรงดึงได้ดีมากยิ่งขึ้น และลักษณะโครงสร้างภายในมีความสามารถรับแรงดึงได้ใกล้เคียงกัน [11] ทั้งในด้านของวัสดุผสมที่มีการเพิ่มเส้นใยเสริมแรง ปัจจัยด้านความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานยังคงส่งผลเช่นเดียวกัน กับวัสดุพลาสติก [12] นอกจากนี้ปัจจัยการพิมพ์ที่ส่งผลต่อสมบัติวัสดุ ปัจจัยการพิมพ์ยังคงส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ความสูงของแต่ละชั้นช่วยให้ผนังชิ้นงานมีความเรียบมากยิ่งขึ้น (Surface and Roughness) การเปลี่ยนขนาดหัวฉีด (Nozzle) ให้เล็กลงสามารถเพิ่มความซับซ้อนโครงสร้างทั้งภายในและภายนอกของชิ้นงานได้ [13]

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาปัจจัยเดี่ยวของการพิมพ์ชิ้นรูปที่ส่งผลต่อการผลิตชิ้นงาน แต่ยังขาดการศึกษาปัจจัยร่วม (Two-way Interaction) ที่มีผลกระทบต่อสมบัติของชิ้นงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานด้วยการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2^K) ผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลด้านความสัมพันธ์เชิงเส้นและปฏิสัมพันธ์สองทางที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยมีปัจจัยในการศึกษา ได้แก่ ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (30, 90 มิลลิเมตรต่อวินาที) ความหนาของผนังชิ้นงาน (1, 3 ชั้น) ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (10, 20 %) และความสูงของแต่ละชั้น (0.1, 0.3 มิลลิเมตร) นอกจากนี้ยังเลือกใช้วัสดุสำหรับการพิมพ์ชิ้นรูปชิ้นงานที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ เส้นพลาสติก (Filament) ABS, PLA และ PETG โดยการใช้การทดสอบสมบัติทางกล

ของชิ้นงานในการเปรียบเทียบชิ้นงาน ได้แก่ การทดสอบแรงอัด การทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงดัดในการวัดผล โดยผลการศึกษาทั้ง 5 ปัจจัย จะเป็นแนวทางที่จะสามารถระบุปัจจัยหลักของการพิมพ์ที่มีต่อสมบัติของชิ้นงานได้อย่างชัดเจนและเหมาะสมได้มากยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษาการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้พิจารณาเลือกปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงานด้วยพลาสติก 3 ชนิด ได้แก่ ABS PLA และ PETG ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 จัดซื้อจากบริษัทฟาสต์โทเนียร์ จำกัด (กรุงเทพมหานคร) ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2^K) โดยมีชุดปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงาน 4 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาของผนังชิ้นงาน ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน และความสูงของแต่ละชั้น แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับดังแสดงในตารางที่ 1 โดยออกแบบการทดลองแต่ละชุดปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานดังตารางที่ 2 เพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ รุ่น FLASHFORGE FINDER 3.0 (รูปที่ 2) มีปัจจัยควบคุมการตั้งค่าเครื่องพิมพ์ นอกเหนือจากปัจจัยที่ได้ศึกษา ได้แก่ หัวฉีดขนาด 0.4 มิลลิเมตร อุณหภูมิหัวฉีด 245, 195 และ 225 องศาเซลเซียส อุณหภูมิฐานรอง 110, 60 และ 80 องศาเซลเซียส สำหรับพลาสติก ABS PLA และ PETG ตามลำดับ ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานและทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Instron universal testing machine 5582) ได้แก่ ความแข็งแรงอัด ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัด

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง

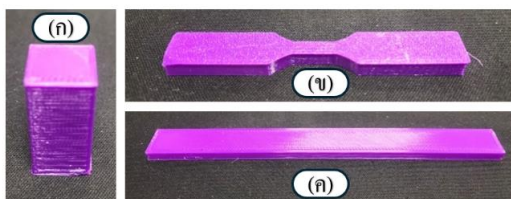
Factors	Level		
	Low	Medium	High
Printing speed (mm/s)	30	60	90
Shell thickness (line)	1	2	3
Infill density (%)	10	15	20
Layer height (mm)	0.1	0.2	0.3



รูปที่ 1 พลาสติก (Filament) 3 ประเภท



รูปที่ 2 เครื่องพิมพ์สามมิติ รุ่น FLASHFORGE FINDER 3.0



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบแรง (ก) อัด (ข) ดึง (ค) ตัด

ตารางที่ 2 การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2^k)

Formulation	Shell	Printing	Infill	Layer
	Thickness	Speed	Density	Height
Setting 1	1	30	10	0.1
Setting 2	1	30	10	0.3
Setting 3	1	30	20	0.1
Setting 4	1	30	20	0.3
Setting 5	1	90	10	0.1
Setting 6	1	90	10	0.3
Setting 7	1	90	20	0.1
Setting 8	1	90	20	0.3
Setting 9	2	60	15	0.2
Setting 10	3	30	10	0.1
Setting 11	3	30	10	0.3
Setting 12	3	30	20	0.1
Setting 13	3	30	20	0.3
Setting 14	3	90	10	0.1
Setting 15	3	90	10	0.3
Setting 16	3	90	20	0.1
Setting 17	3	90	20	0.3

โดยทำการทดสอบ 3 ชิ้นในแต่ละการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงอัด ASTM D695-15 ด้วยชิ้นงานปริซึมขนาด 12.7×25.4×12.7 มิลลิเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) ใช้ความเร็วในการอัด 5 มิลลิเมตรต่อนาที [14] การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยชิ้นงานประเภท Type V ขนาด 9.53×63.5×4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) ใช้ความเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที [15] และการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด ตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยมีชิ้นงานขนาด 12.7×12.7×4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3(ค) ทำการกดอัดด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที [16]

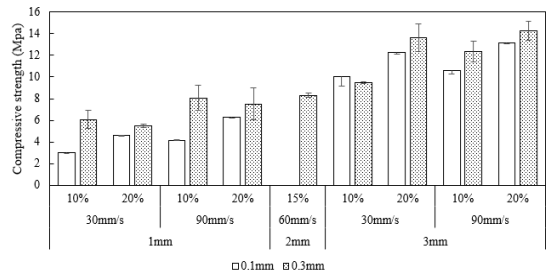


3. ผลการวิจัยและอภิปราย

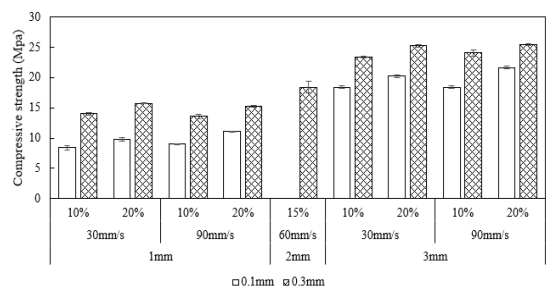
3.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงอัด

ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของชิ้นทดสอบจากพลาสติก ABS PLA และ PETG ที่มีการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานทั้ง 17 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4-6 และตารางที่ 3-4 พบว่าความแข็งแรงอัดของพลาสติก ABS อยู่ในช่วง 2.99-14.24 MPa พลาสติก PLA อยู่ในช่วง 8.40-25.51 MPa และพลาสติก PETG อยู่ในช่วง 3.34-14.65 MPa โดยที่พลาสติก PLA ให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงสุดในบรรดาพลาสติกทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดสอบของค่าความแข็งแรงอัดทำให้เห็นแนวโน้มจากปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงาน โดยค่าเฉลี่ยความแข็งแรงอัดแสดงให้เห็นจำนวนความหนาของผนังชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากปริมาณของเนื้อวัสดุที่ผิวชิ้นงานที่สัมผัสต่อแรงที่กระทำต่อชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นทำให้เนื้อวัสดุมีเนื้อชิ้นงานและปริมาณในการรับแรงเพิ่มมากยิ่งขึ้น

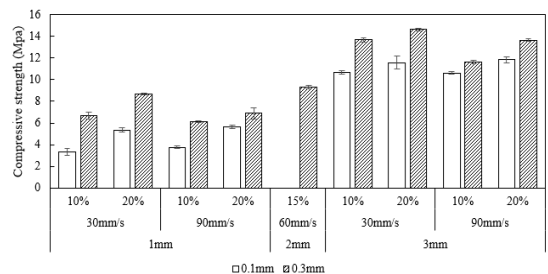
ในด้านปัจจัยความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน จะพบว่าเมื่อความหนาแน่นที่ค่า 10% มีค่าความแข็งแรงอัดที่น้อยกว่าความหนาแน่นที่ 20% เนื่องจากปริมาณความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ชิ้นงานมีปริมาณเนื้อด้านในมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงานที่ 20% รับแรงอัดที่มากกว่าต่อชิ้นงานได้ดีมากขึ้น ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ส่งผลให้ค่าสมบัติแรงอัดของชิ้นงานทดสอบเพิ่มสูงขึ้น [14] ในขณะที่ปัจจัยความสูงของแต่ละชั้น ให้ผลการทดสอบไปในทิศทาง



รูปที่ 4 ค่าความแข็งแรงอัดของพลาสติก ABS



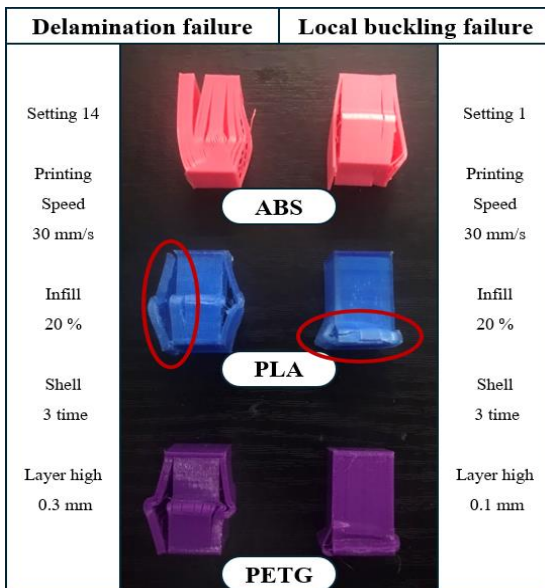
รูปที่ 5 ค่าความแข็งแรงอัดของพลาสติก PLA



รูปที่ 6 ค่าความแข็งแรงอัดของพลาสติก PETG

ตรงกันข้าม เมื่อค่าความสูงของแต่ละชั้นเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากพฤติกรรมของวัสดุที่มีโครงสร้างแซนวิช โดยสามารถสังเกตจากรอยแตกหักของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่ามีการแตกหักแบบชั้นแยกออกจากกัน (Delamination Failure) เนื่องจากระยะห่างระหว่างชั้นที่ระยะ 0.3 มิลลิเมตร ส่งผลให้ระหว่างชั้นของชิ้นงานเชื่อมติดกันไม่ได้ ขณะที่ระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตรช่วยให้

ระหว่างชั้นของชิ้นงานเชื่อมติดกันได้ดีจนเกือบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) แต่เนื่องจากภายในชิ้นงานมีปริมาณความหนาแน่นภายในน้อย ทำให้เกิดการแตกหักแบบโก่งเตาะเฉพาะแห่ง (Local Buckling) ผนังไม่สามารถรับแรงได้อย่างเต็มที่ ด้วยสาเหตุนี้เลยทำให้ค่าความสูงของแต่ละชั้นที่ 0.3 มิลลิเมตรรับแรงอัดได้มากกว่าค่าความสูงชั้นที่ 0.1 มิลลิเมตร ในขณะที่ปัจจัยความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานให้ค่าแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนมากนัก โดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับพลาสติก ABS ให้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับพลาสติก PLA และ PETG ที่พบว่าเมื่อค่าความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงอัดเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 7 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานจากแรงอัด

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความแข็งแรงอัด พบว่าปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงาน ความหนาของผนังชิ้นงาน (A) ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (B) ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (C) และความสูงของแต่ละชั้น (D) มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงอัด

Formulation	Compressive strength (MPa)		
	ABS	PLA	PETG
Setting 1	2.99 ^I	8.40 ^J	3.34 ^H
Setting 2	6.08 ^{FGH}	14.06 ^G	6.69 ^F
Setting 3	4.57 ^{HI}	9.79 ^I	5.36 ^G
Setting 4	5.47 ^{G^H}	15.75 ^F	8.64 ^E
Setting 5	4.12 ^{HI}	9.02 ^{IJ}	3.74 ^H
Setting 6	8.05 ^{DEF}	13.61 ^G	6.14 ^{FG}
Setting 7	6.30 ^{FGH}	11.08 ^H	5.62 ^G
Setting 8	7.52 ^{EFG}	15.24 ^F	6.90 ^F
Setting 9	8.29 ^{CDEF}	18.42 ^E	9.33 ^E
Setting 10	10.04 ^{BCD}	18.42 ^E	10.68 ^D
Setting 11	9.50 ^{CDE}	23.43 ^B	13.67 ^B
Setting 12	12.24 ^{AB}	20.22 ^D	11.58 ^C
Setting 13	13.62 ^A	25.29 ^A	14.65 ^A
Setting 14	10.60 ^{BC}	18.41 ^E	10.62 ^D
Setting 15	12.34 ^{AB}	24.07 ^B	11.60 ^C
Setting 16	13.11 ^A	21.68 ^C	11.85 ^C
Setting 17	14.24 ^A	25.51 ^A	13.667 ^B

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ

Source	DF	Compressive strength				Tensile strength				Flexural strength			
		Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	1550.35	155.04	543.91	0.000	509.41	50.94	69.0	0.000	4411.13	441.11	35.35	0.000
Linear	4	1545.98	386.49	1355.93	0.000	498.94	124.73	169.0	0.000	4315.18	1078.79	86.44	0.000
A	1	1202.05	1202.05	4217.12	0.000	304.19	304.19	412.2	0.000	687.43	687.43	55.08	0.000
B	1	1.98	1.98	6.95	0.012	20.01	20.01	27.1	0.000	0.01	0.01	0.00	0.978
C	1	42.98	42.98	150.79	0.000	1.28	1.28	1.7	0.195	129.92	129.92	10.41	0.003
D	1	298.96	298.96	1048.84	0.000	173.44	173.44	235.0	0.000	3497.81	3497.81	280.28	0.000
2-Way Interactions	6	4.38	0.73	2.56	0.036	10.47	1.746	2.3	0.049	95.95	15.99	1.28	0.290
AB	1	0.34	0.34	1.18	0.284	4.81	4.81	6.5	0.015	1.14	1.14	0.09	0.764
AC	1	0.49	0.49	1.71	0.199	0.19	0.19	0.2	0.609	0.76	0.76	0.06	0.806
AD	1	0.12	0.12	0.41	0.523	0.35	0.35	0.4	0.491	6.83	6.83	0.55	0.464
BC	1	0.51	0.51	1.78	0.191	0.18	0.18	0.2	0.622	24.35	24.35	1.95	0.171
BD	1	2.25	2.25	7.89	0.008	4.31	4.31	5.8	0.021	58.41	58.41	4.68	0.037
CD	1	0.68	0.68	2.38	0.132	0.61	0.61	0.8	0.366	4.45	4.45	0.36	0.554
Error	37	10.55	0.29			27.30	0.73			461.75	12.48		
Lack-of-Fit	5	3.04	0.61	2.59	0.045	5.16	1.03	1.4	0.219	119.01	23.80	2.22	0.076
Pure Error	32	7.51	0.23			22.13	0.69			342.74	10.71		
Total	47	1560.90				536.71				4872.88			

*A คือความหนาของผนังชิ้นงาน B คือความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน C คือความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน และ D คือความสูงแต่ละชั้น

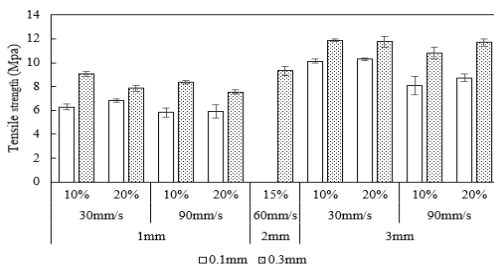
นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้น (BD) มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญด้วยเช่นกัน ส่วนอิทธิพลร่วมของปัจจัยอื่นๆ ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัดของชิ้นงาน เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) โดยการแบ่งกลุ่มด้วยวิธี Fisher LSD Method ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานของพลาสติกทั้ง 3 ชนิดที่ให้ค่าความแข็งแรงอัด

ดีที่สุด คือ ปัจจัยการตั้งค่าชุดที่ 13 (Setting 13) โดยมีความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 20% และความสูงของแต่ละชั้นที่ 0.3 มิลลิเมตร โดยการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มเอ (A) ซึ่งหมายถึงกลุ่มที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดและให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงสุดอีกด้วย ขณะที่กลุ่มเอช (H) ให้ค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด จึงสามารถกล่าวได้ว่า การตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชุดที่ 13 (Setting 13) มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุด

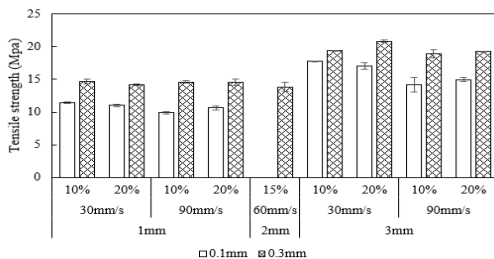


3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง

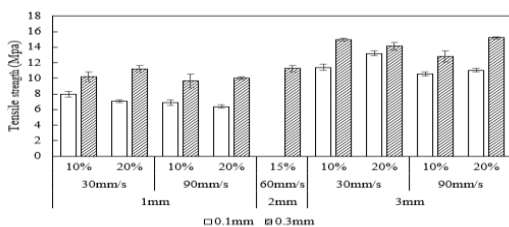
ผลการทดสอบผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบจากพลาสติก ABS PLA และ PETG ดังแสดงในรูปที่ 8-10 และตารางที่ 4 และ 5 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติก ABS อยู่ในช่วง 5.81-11.89 MPa พลาสติก PLA อยู่ในช่วง 9.91-20.84 MPa และพลาสติก PETG อยู่ในช่วง 6.38-15.23 MPa โดยพลาสติกกลุ่ม PLA ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุดในบรรดาพลาสติกทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ



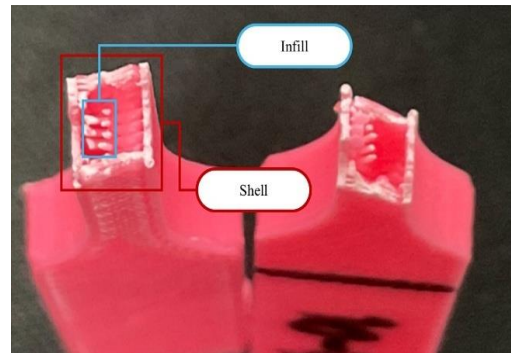
รูปที่ 8 ค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติก ABS



รูปที่ 9 ค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติก PLA



รูปที่ 10 ค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติก PETG



รูปที่ 11 จุดแตกหักของชิ้นงานแรงดึง

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นแนวโน้มค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความแข็งแรงอัด เมื่อความหนาของผนังชิ้นงานมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนปัจจัยความสูงของแต่ละชั้นมีการเพิ่มขึ้นจาก 0.1 มิลลิเมตร เป็น 0.3 มิลลิเมตร พบว่าให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนปัจจัยของความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานและความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับบริเวณที่เกิดความเสียหาย พบว่าบริเวณเกิดความเสียหายหลักจะเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน ขณะที่บริเวณเนื้อภายในชิ้นงาน เกิดการเสียหายที่น้อยกว่า โดยสามารถสังเกตจากชิ้นงานหลังการทดสอบพบว่าเกิดรอยฉีกขาดบริเวณผนังภายนอกชิ้นงานมากกว่าบริเวณภายในเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 11 เป็นผลจากการเคลื่อนที่หัวฉีดอย่างรวดเร็วส่งผลให้ระยะเวลาและปริมาณเนื้อวัสดุที่ฉีดออกจากหัวพิมพ์น้อย เป็นผลให้เนื้อวัสดุบริเวณผนังชิ้นงานซึ่งทำหน้าที่ในการยึดเกาะระหว่างชั้นรับแรงได้น้อยลง เกิดการฉีกขาดและแตกหักได้ง่ายกว่าการเคลื่อนที่หัวฉีดช้าๆ ที่ทำให้มีปริมาณของวัสดุและมีระยะเวลาฉีดมากยิ่งขึ้น

นอกเหนือจากการวิเคราะห์แนวโน้มและลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน การวิเคราะห์ผลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าความหนาของผนังชิ้นงาน (A) ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (B) และความสูงของแต่ละชั้น (D) ส่งผลกระทบบ่อยต่อค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) ยกเว้นความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (C) ที่ไม่ส่งผลกระทบบจากผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติเป็นข้อยืนยันปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงได้แก่ ความหนาของผนังชิ้นงาน ความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้น ซึ่งผลการศึกษามีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่สรุปว่า ค่าความแข็งแรงดึงลดลงเมื่อความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น [16] ในด้านของปัจจัยปฏิสัมพันธ์สองทางพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ความเร็วในการพิมพ์กับความหนาของผนังชิ้นงาน (AB) ที่ $P\text{-value} = 0.015$ และความเร็วในการพิมพ์กับความสูงของแต่ละชั้น (BD) ที่ $P\text{-value} = 0.021$ เป็นปัจจัยหลักเดียวกันที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน จึงสามารถสรุปได้ว่าความเร็วในการพิมพ์เป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน โดยมีปัจจัยความหนาของผนังชิ้นงานและความสูงของแต่ละชั้นเป็นอิทธิพลรอง เมื่อทำการแบ่งกลุ่มด้วย Fisher LSD Method ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานของพลาสติกทั้ง 3 ชนิดที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือปัจจัยการตั้งค่าการพิมพ์ชุดที่ 13 (Setting 13) ซึ่งมีพลาสติก PLA และ ABS จัดอยู่ในกลุ่มเอ (A) และพลาสติก PETG อยู่ในกลุ่มเอบี (AB)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของพลาสติก ABS PLA และ PETG

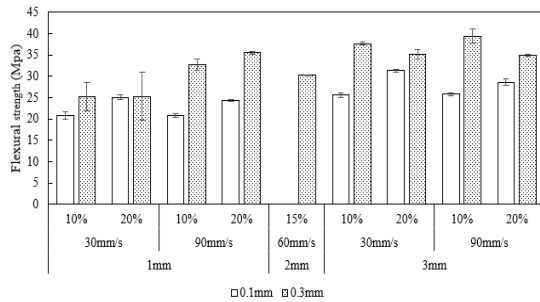
Formulation	Tensile strength (MPa)		
	ABS	PLA	PETG
Setting 1	6.29 ^J	11.48 ^F	7.97 ^F
Setting 2	9.08 ^{DEF}	14.66 ^E	10.23 ^{CDE}
Setting 3	6.83 ^{IJ}	11.04 ^{FG}	7.09 ^{FG}
Setting 4	7.85 ^{GHI}	15.19 ^E	11.23 ^{CD}
Setting 5	5.81 ^J	9.91 ^G	6.85 ^{FG}
Setting 6	8.34 ^{EF}	14.61 ^E	9.66 ^E
Setting 7	5.92 ^J	10.68 ^{FG}	6.38 ^G
Setting 8	7.54 ^{HI}	14.54 ^E	10.00 ^{DE}
Setting 9	9.31 ^{CDE}	13.86 ^E	11.26 ^{CD}
Setting 10	10.13 ^{BCD}	17.74 ^{CD}	11.41 ^C
Setting 11	11.88 ^A	19.42 ^{AB}	14.98 ^A
Setting 12	10.30 ^{BC}	17.04 ^D	13.21 ^B
Setting 13	11.77 ^A	20.84 ^A	14.15 ^{AB}
Setting 14	8.08 ^{FGH}	14.19 ^E	10.57 ^{CDE}
Setting 15	10.81 ^{AB}	18.93 ^{BC}	12.84 ^B
Setting 16	8.73 ^{EF}	14.96 ^E	11.06 ^{CDE}
Setting 17	11.70 ^A	19.26 ^B	15.22 ^A

3.3 ผลการทดสอบแข็งแรงดึง

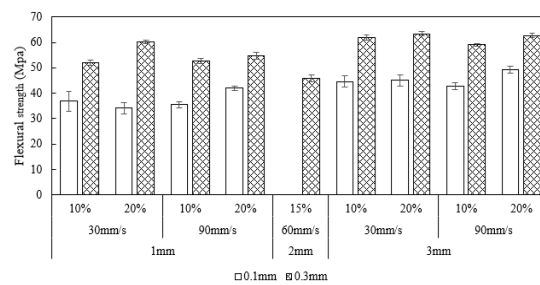
ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงดัดของชิ้นทดสอบจากพลาสติก ABS PLA และ PETG ดังแสดงในรูปที่ 12-14 และตารางที่ 4 และ 6 พบว่าค่าความแข็งแรงดัดของพลาสติก ABS อยู่ในช่วง 20.81-39.45 MPa พลาสติก PLA อยู่ในช่วง 34.13-63.44 MPa และพลาสติก PETG อยู่ในช่วง 21.23- 44.04 MPa โดยที่พลาสติกกลุ่ม PLA ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงที่สุดในบรรดาพลาสติก 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ ผลทดสอบค่าความแข็งแรงดัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความแข็งแรงดึง โดยพบว่าเมื่อความหนาของผนังชิ้นงานมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดเพิ่มมากขึ้นไปด้วย



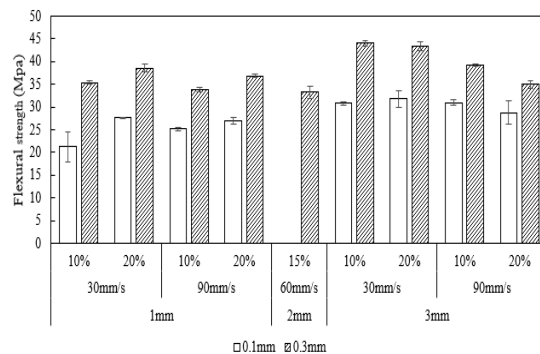
บทความวิจัย



รูปที่ 12 ค่าความแข็งแรงดัดของพลาสติก ABS



รูปที่ 13 ค่าความแข็งแรงดัดของพลาสติก PLA



รูปที่ 14 ค่าความแข็งแรงดัดของพลาสติก PETG

ด้านปัจจัยความสูงของแต่ละชั้น เมื่อเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.1 มิลลิเมตร เป็น 0.3 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานและความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดัด ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของพลาสติก ABS PETG และ PLA

Formulation	Flexural strength (MPa)		
	ABS	PETG	PLA
Setting 1	20.87 ^H	21.23 ^K	36.88 ^{G^H}
Setting 2	25.14 ^{FGH}	35.39 ^{CDE}	52.09 ^{CD}
Setting 3	25.06 ^{FGH}	27.65 ^{HIJ}	34.13 ^H
Setting 4	25.32 ^{FGH}	38.59 ^{CD}	60.35 ^A
Setting 5	20.80 ^H	25.16 ^{JK}	35.47 ^H
Setting 6	32.78 ^{BCD}	33.80 ^{EFG}	52.6 ^{CD}
Setting 7	24.32 ^{GH}	27.05 ^{IJ}	41.99 ^{FG}
Setting 8	35.58 ^{ABC}	36.88 ^{CDE}	54.74 ^{BC}
Setting 9	30.28 ^{CDEF}	33.32 ^{EFG}	45.78 ^{EF}
Setting 10	25.57 ^{FGH}	30.83 ^{GHI}	44.62 ^{EF}
Setting 11	37.68 ^{AB}	44.03 ^A	61.88 ^A
Setting 12	31.38 ^{CDE}	31.8 ^{FGH}	45.02 ^{EF}
Setting 13	35.21 ^{ABC}	43.33 ^{AB}	63.44 ^A
Setting 14	25.84 ^{EF^{GH}}	30.90 ^{GHI}	42.78 ^F
Setting 15	39.45 ^A	39.23 ^{BC}	59.03 ^{AB}
Setting 16	28.62 ^{DEFG}	28.73 ^{HIJ}	49.34 ^{DE}
Setting 17	34.90 ^{ABC}	34.94 ^{DEFG}	62.67 ^A

ความหนาของผนังชิ้นงาน (A) ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (C) และความสูงของแต่ละชั้น (D) มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 6 ยกเว้นความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (B) ที่ส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อสมบัติชิ้นงาน สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้น (BD) มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญ นอกเหนือจากนั้นอิทธิพลร่วมปัจจัยอื่นๆ ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดัดอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าปัจจัยความสูงของแต่ละชั้นในการพิมพ์ชิ้นงานเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัดเมื่อพิจารณาร่วมกับบริเวณจุดแตกหักของชิ้นงานซึ่ง



เกิดขึ้นบริเวณฐานของชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าบริเวณภายในได้รับความเค้นน้อย ขณะที่บริเวณของฐานชิ้นงานเป็นจุดที่รับความเค้นมากที่สุด จากการรอยฉีกขาดสีขาว จากผลการศึกษาปัจจัยร่วมสรุปได้ว่า ความสูงของแต่ละชั้นที่เพิ่มมากขึ้นของฐานชิ้นงานอันเป็นผลจากปัจจัยการพิมพ์ด้านความสูงของแต่ละชั้น มีผลกระทบมากกว่าค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานที่ได้รับจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

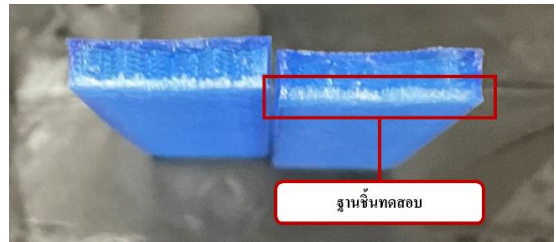
เมื่อทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วย Fisher LSD Method ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานของพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าความแข็งแรงดัดเหมาะสมที่สุดจากการตั้งค่าปัจจัยที่ 11 (Setting 11) ซึ่งมีค่าความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 10% และ ความสูงของแต่ละชั้น ที่ 0.3 ซึ่งมีพลาสติก PLA และ PETG อยู่ในกลุ่มเอ (A) และพลาสติก ABS ในกลุ่มเอบี (AB)

4. บทสรุป

ผลการศึกษาปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงานพลาสติก PLA, PETG และ ABS ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF พบว่า

1. สมบัติความแข็งแรงอัดของชิ้นงานได้รับอิทธิพลจากปัจจัยการพิมพ์ทุกปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปัจจัยหลักคือความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานและความสูงของแต่ละชั้นเกิดปฏิสัมพันธ์สองทางอย่างมีนัยสำคัญ

2. ความหนาของผนังชิ้นงาน ความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้น มีผลต่อสมบัติความแข็งแรงดัดโดยมีความเร็วในการพิมพ์เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติความแข็งแรงดัด และมีปัจจัยความหนาของผนังชิ้นงานและความสูงของแต่ละชั้นมีอิทธิพลรอง



รูปที่ 15 จุดแตกหักของชิ้นงานแรงดัด

เนื่องจากชิ้นงานมีการรับแรงดัดมากที่สุดบริเวณผนังชิ้นงาน

3. ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน และความสูงของแต่ละชั้น มีผลกระทบต่ค่าความแข็งแรงดัด โดยมีปัจจัยความสูงของแต่ละชั้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงาน เป็นผลให้เกิดปฏิสัมพันธ์สองทางระหว่างความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้นอย่างมีนัยสำคัญ การแตกหักของชิ้นงานแสดงให้เห็นจุดรับแรงดัดมากที่สุดที่บริเวณฐานของชิ้นงาน

4. ความสูงของแต่ละชั้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้รับจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ที่ความสูง 0.3 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีโครงสร้างแบบแกนวิซหรือลามิเนตที่จะมีพฤติกรรมการแตกหักในรูปแบบของการขาดแบบแยกชั้น ขณะที่ความสูง 0.1 มิลลิเมตรจะทำให้ชิ้นงานเข้าใกล้โครงสร้างวัสดุแบบเนื้อเดียวทำให้ชิ้นงานมีการแตกหักรูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะแห่งซึ่งพฤติกรรมการแตกหักนี้มักจะเกิดขึ้นกับโครงสร้างวัสดุแบบเนื้อเดียวที่มีปริมาณเนื้อวัสดุภายในน้อย

5. ปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงานที่เหมาะสมได้แก่ความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 20% และ ความสูงของแต่ละชั้น ที่ 0.3 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงอัดและแรงดัดดีที่สุด



ส่วนการพิมพ์ชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงตัดได้ดีที่สุดคือชุดปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานที่ความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 10% และความสูงของแต่ละชั้น ที่ 0.3 มิลลิเมตร

การศึกษาปัจจัยในสร้างชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF ยังคงมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงาน เช่น การลดระยะเวลาการพิมพ์ชิ้นงานแต่ยังคงได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรง อีกทั้งอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่กำลังมีการศึกษาอยู่ในปัจจุบัน แนวทางเหล่านี้ยังคงเป็นความท้าทายที่สำคัญต่อการศึกษาระบบการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุที่ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติและคุณภาพชิ้นงานที่ดีและเหมาะสมต่อการใช้งาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานนี้ได้รับการสนับสนุนและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีไม่ยางพาราและการจัดการ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Singh and A. Verma, A brief review on injection moulding manufacturing process, *Materials Today Proceedings*, 2017, 4(2), 1423-1433.
- [2] M.S. Alam, J. Kaur, H. Khaira and K. Gupta, Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters, A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(3), 445-473.
- [3] F.A. Khan, H.K. Celik, O. Oral and A.E. Rennie, A short review on 4D printing, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2018, 2, 59-67.
- [4] K. Pathak, R. Saikia, A. Das, D. Das, M.A. Islam, P. Pramanik, A. Parasar, P.P. Borthakur, P. Sarmah, M. Saikia and B. Borthakur, 3D printing in biomedicine: advancing personalized care through additive manufacturing, *Exploration of Medicine*, 2023, 4, 1135-67.
- [5] H. Vieyra, J.M. Molina-Romero, J.d.D. Calderón-Nájera and A. Santana-Díaz, Engineering, recyclable, and biodegradable plastics in the automotive industry: A review, *Polymers*, 2022, 14, 3412.
- [6] K.C. Datsiou, E. Saleh, F. Spirrett, R. Goodridge, I. Ashcroft and D. Eustice, Additive manufacturing of glass with laser powder bed fusion, *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102(8), 4410-4414,
- [7] A.S. Ramírez, R. D'Amato, F.B. Haro, M.I. Marcos and J.M.d. Agustín del Burgo, Composite material created by additive manufacturing techniques FFF and robocasting for the manufacture of medical parts, *The 6th International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality, Proceedings*, 2018, 410-415.

- [8] C.A. Chatham, C.E. Zawaski, D.C. Bobbitt, R.B. Moore, T.E. Long and C.B. Williams, Semi-crystalline polymer blends for material extrusion additive manufacturing printability: a case study with poly (ethylene terephthalate) and polypropylene, *Macromolecular Materials and Engineering*, 2019, 304(5), 1800764.
- [9] S. Ding, B. Zou, P. Wang and H. Ding, Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM. *Polymer Testing*, 2019, 78(1), 105948.
- [10] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz and A. Conejero, Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing, *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, 3(3), 183-192.
- [11] F. Saenz, C. Otarola, K. Valladares and J. Rojas, Influence of 3D printing settings on mechanical properties of ABS at room temperature and 77 K, *Additive Manufacturing*, 2021, 39, 101841.
- [12] H. Dao, Y. Cheng, W. Ye, D Zhang, J. Li, Z. Miao and S. Rudykh, Effect of process parameters on tensile mechanical properties of 3D printing continuous carbon fiber-reinforced PLA composites, *Materials*, 2020, 13, 3850.
- [13] B.V.d. Voorde, A. Katalagarianakis, S. Huysman, A. Toncheva, J.M. Raquez, I. Duretek, C. Holzer, L. Cardon, K.V. Bernaerts, D.V. Hemelrijck, L. Pyl and S.V. Vlierberghe, Effect of extrusion and fused filament fabrication processing parameters of recycled poly (ethylene terephthalate) on the crystallinity and mechanical properties, *Additive Manufacturing*, 2022, 50(1), 102518.
- [14] S. Oudah, H. Al-Attraqchi, and N. Nassir, The effect of process parameters on the compression property of acrylonitrile butadiene styrene produced by 3D printer, *Engineering and Technology Journal*, 2022, 40(1), 189-194.
- [15] S. Brischetto and R. Torre, Tensile and compressive behavior in the experimental tests for PLA specimens produced via fused deposition modelling technique, *Journal of Composites Science*, 2020, 4(3), 140.
- [16] G. Pelin, C. E. Pelin, M. Botan, A. Stefan, G.C. Cristea and A.A.M. Panait, Thermo-mechanical properties of fused filament fabricated PLA at elevated temperatures, *Incas Bulletin*, 2023, 15(1), 59-70.