

อิทธิพลของสถานะเส้นใยในลอน 12 และพารามิเตอร์ในการพิมพ์ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติ

Influence of PA12 Filament Conditions and Printing Parameters on Mechanical Properties of FDM 3D Printing Parts

มานอช นำฟู^{1,2,3} ไกรสร วงษ์ปู้^{1,3} อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี^{1,3}
กิตติ วิโรจรัตนภาพิศาล^{1,3*} ธวัชชัย ไชยลังการ^{1,2} และ ปรียานุช เมฆฉาย^{1,3}
Manoch Numfu^{1,2,3}, Krisorn Wongpoo^{1,3}, Ukrit Thanasuptawee^{1,3},
Kitti Wirotrattanaphaphisan^{1,3*}, Tawachai Chailungkarn^{1,2}
and Priyanuch Mekchai^{1,3}

Received: 10 October 2024

Revised: 31 January 2025

Accepted: 10 March 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสถานะความชื้นของเส้นใยในลอนที่แตกต่างกัน รวมถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานพิมพ์ 3 มิติ เพื่อเป็นแนวทางให้กับผู้ใช้ในการตัดสินใจก่อนนำเส้นใยในลอนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ชิ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ ผลการศึกษาพบว่าการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติด้วยเส้นใยในลอนที่มีความชื้นต่ำจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ดี โดยเส้นใยในลอนที่มีความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีที่สุดที่ค่า 54.05 เมกะปาสคาล และเส้นใยในลอนที่มีความชื้น 1.63 และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงมาตามลำดับ การเพิ่มจุดหลอมเหลวและความเร็วในการพิมพ์

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ประเทศไทย 63000

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak, Thailand 63000

³ ศูนย์ปฏิบัติการระบบการผลิตอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ประเทศไทย 63000

² AMSC Center, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak, Thailand 63000

³ หน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงและการผลิตสมัยใหม่เพื่ออุตสาหกรรมการผลิต การแพทย์ และการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ประเทศไทย 63000

³ Advanced Materials and Modern Manufacturing Research Unit for Manufacturing, Medical and Agricultural Industries, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak, Thailand 63000

*ผู้เขียนประสานงาน (Corresponding author) e-mail: mnf.impe@gmail.com

สามารถช่วยปรับปรุงความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานได้ โดยเส้นใยไนลอนที่มีความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ ควรปรับตั้งค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส และกำหนดความเร็วในการพิมพ์ที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีที่สุดในช่วงของค่าความชื้นนี้ และหากเส้นใยไนลอนที่มีความชื้น 1.63 เปอร์เซ็นต์ ให้ปรับตั้งค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส และกำหนดความเร็วในการพิมพ์ที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ในส่วนเส้นใยไนลอนที่มีความชื้น 3.17 เปอร์เซ็นต์ ให้ปรับตั้งค่าจุดหลอมเหลวที่ 300 องศาเซลเซียส และกำหนดความเร็วในการพิมพ์ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที ในขณะที่ความชื้นยังมีผลกระทบอย่างมากต่อความต้านทานแรงกระทำของชิ้นงาน 3 มิติด้วยเช่นเดียวกัน โดยความชื้นในเส้นใยไนลอนที่สูงขึ้นทำให้ความต้านทานแรงกระทำลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเส้นใยไนลอนมีความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าความต้านทานแรงกระทำที่ดีที่สุดคือ 17.18 กิโลจูล ในขณะที่เส้นใยไนลอนมีความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 1.63 และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าความต้านทานแรงกระทำลดลงตามลำดับ การปรับค่าจุดหลอมเหลวและความเร็วในการพิมพ์สามารถช่วยปรับปรุงความต้านทานแรงกระทำของชิ้นงานได้เล็กน้อย ในกรณีเส้นใยไนลอนที่มีความชื้นสูงให้ลดอุณหภูมิจุดหลอมเหลวลงมาที่ 260 องศาเซลเซียส และเพิ่มความเร็วในการพิมพ์เป็น 60 มิลลิเมตรต่อวินาที จากผลวิจัยที่ได้สามารถเป็นแนวทางในการปรับตั้งค่าเครื่องพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ สำหรับการใช้งานเส้นใยไนลอนที่มีความชื้นก่อนนำมาพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางกลที่ดี

คำสำคัญ: สมบัติทางกล เส้นใยไนลอน พารามิเตอร์ในการพิมพ์ ชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติ

ABSTRACT

This research investigates the moisture conditions in nylon filaments and the influence of printing parameters on the mechanical properties of 3D-printed parts. The findings provide guidance for users in selecting and preparing nylon filaments before 3D printing. The study revealed that printing with low-moisture nylon filaments resulted in higher tensile strength. Specifically, nylon filament with 0% moisture content exhibited the highest tensile strength at 54.05 MPa, while filaments with moisture levels of 1.63% and 3.17% showed progressively lower tensile strengths. Adjusting the melting temperature and printing speed can enhance tensile strength. For nylon with 0% moisture, setting the melting point to 260°C and the printing speed to 30 mm/s resulted the best tensile strength. Similarly, nylon with 1.63% moisture required the same settings, while nylon with 3.17% moisture performed better at a melting temperature of 300°C and a speed of 45 mm/s. Additionally, moisture content significantly affected impact resistance, with higher moisture levels leading to reduced impact strength. Nylon with 0% moisture demonstrated the highest impact resistance at 17.18 kJ, which decreased with increasing moisture content. Adjusting the melting temperature and printing speed can slightly improve impact resistance, particularly for high-moisture filaments. Reducing the melting point to 260°C and increasing the printing speed to 60 mm/s was recommended for such cases. The findings of this study offer practical guidelines for

optimizing 3D printing parameters when using nylon filaments with varying moisture levels, ensuring desirable mechanical properties in 3D-printed parts.

Keywords: Mechanical Properties; Nylon Filaments; Printing Parameters; FDM Printing 3D Parts

บทนำ

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นหนึ่งเทคโนโลยีในการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติยังสามารถเลือกวัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานได้หลากหลาย [1] อีกทั้งสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างแม่นยำและประหยัดต้นทุนการผลิต [2] เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่นเทคโนโลยี SLS (Selective Laser Sintering) เทคโนโลยี FDM (Fused Deposition Modeling) เทคโนโลยีSLA (Stereolithography) และเทคโนโลยี LOM (Laminated Object Manufacturing) เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีFDM เป็นหนึ่งเทคโนโลยีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายอีกทั้งเทคโนโลยีFDM ยังเป็นเทคโนโลยีที่ใช้งานง่ายและมีสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งทำให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด [3] โดยเทคโนโลยี FDM ส่วนใหญ่วัสดุหลักที่ใช้ในการพิมพ์ 3 มิติ คือ เส้นพลาสติก (Filament) ซึ่งมีมากมายให้เลือกใช้หลากหลายชนิด เช่น เส้นพลาสติก PLA (Polylactic Acid), ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene), PETG (Polyethylene terephthalate Glycol-modified), TPU (Flexible filament), PVA (Polyvinyl alcohol) และ Nylon หรือ PA (Polyimide) เป็นต้น ซึ่งเส้นพลาสติกแต่ละประเภทก็จะให้สมบัติที่แตกต่างกัน การเลือกเส้นพลาสติกให้ถูกประเภทกับงานจะช่วยให้ชิ้นงานที่พิมพ์ออกมานั้นได้ตามสมบัติที่ต้องการ [4] ในส่วนของงานทางด้านวิศวกรรมที่ต้องการความแข็งแรง คงทน และทนความร้อนวัสดุในล่อนสามารถนำมาตอบโจทย์ดังกล่าวได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะไนล่อน 12 (PA 12) กำลังเป็นที่นิยมมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งไนล่อน 12 เป็นโพลิเมอร์ไนล่อนที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความแข็งแรงทนทานยืดหยุ่น ทนความร้อน ทนต่อสารเคมี แต่ในขณะเดียวกันไนล่อนเป็นเส้นพลาสติกที่พิมพ์ยาก เพราะตัวไนล่อน นั้นดูดความชื้นจากในอากาศได้ดี [5] หากปล่อยเส้นใยไนล่อนทิ้งไว้ในสภาพอากาศทั่วไปเป็นระยะเวลานานโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของกล่องที่ใช้ในการจัดเก็บเส้นใยไนล่อนที่ดีแล้ว อาจทำให้ไนล่อนดูดความชื้นในสภาพอากาศห้องเข้าสู่เส้นตัวพลาสติกได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติทางกลของชิ้นงานหลังจากการพิมพ์ด้วยเส้นไนล่อนที่มีความชื้นเปลี่ยนแปลงไปจากไฟล์งาน 3 มิติต้นแบบ [6, 7] และส่งผลทำให้ชิ้นงานที่ผลิตมีคุณภาพลดลง [8] ดังแสดงในรูปที่ 1การศึกษาถึงสภาวะเส้นใยไนล่อนจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพในกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ โดยเฉพาะสมบัติทางกลของชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติ

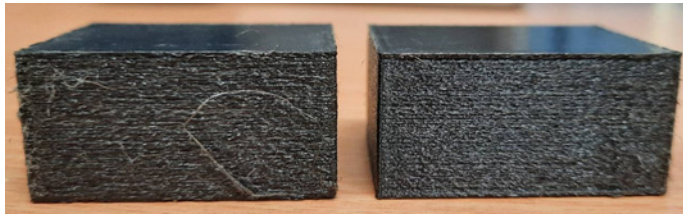


Figure 1 The 3D printed parts made from nylon filament. 3D printed part made with high (Left) and low (Right) moisture content filament.

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงสภาวะของเส้นใยไนลอนที่มีค่าความชื้นในตัวเส้นใยที่ต่างกัน รวมถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิมพ์ขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติ เพื่อเป็นแนวทางให้กับผู้ใช้ในการตัดสินใจก่อนนำเส้นใยไนลอนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ ผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์สำหรับการควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเพื่อทำการศึกษอิทธิพลของสภาวะเส้นใยไนลอน 12 และพารามิเตอร์ในการพิมพ์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติ มีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบ 3 มิติในการทดลองเส้นพลาสติกไนลอน 12 (PA12) เสริมคาร์บอนไฟเบอร์ยี่ห้อ Polymaker ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ใช้เป็นวัสดุในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ FLASHFORGE รุ่น GUIDER II S ในการสร้างชิ้นงานทดสอบ 3 มิติ ซึ่งสามารถพิมพ์งานได้กว้าง 280 มม. ยาว 250 มม. และสูง 300 มม. หัวฉีดขนาด 0.4 มิลลิเมตร มีความเร็วในการฉีดสูงสุด 200 มิลลิเมตรต่อวินาที หัวฉีด Hi-Temp ทำความร้อนได้ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3



Physical Properties

Property	Testing Method	Typical Value
Density	ISO1183, GB/T1033	1.06 g/cm ³ at 23°C
Melt Index	280°C, 2.16 kg	25 g/10 min

Figure 2 Nylon filament (PA 12). [9]



Figure 3 FLASHFORGE 3D Printing machine.

3.กระบวนการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยเพื่อการศึกษาอิทธิพลของสภาวะเส้นใยไนลอน 12 และพารามิเตอร์ในการพิมพ์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความชื้นในเส้นพลาสติกก่อนการพิมพ์ (Moisture Content: MC) ความเร็วในการพิมพ์ (Printing Speed: PS) และอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature: MT) ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวัสดุไนลอน 12 ดังแสดงในรูปที่ 4

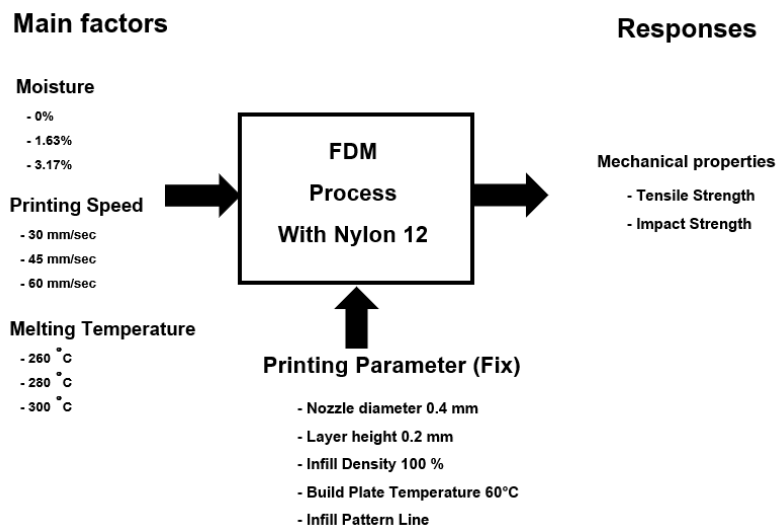


Figure 4 Factors and parameters used in the research.

การดำเนินการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^k โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยทั้ง 3 ต่อค่าความต้านแรงดึงและค่าความต้านทานแรงกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 5

Level				
Factors	Low	Medium	High	Unit
Melting Temperature	260	280	300	Degree Celsius
Printing Speed	30	45	60	mm. / sec
Moisture content	0%	1.63%	3.17%	Percentage

Figure 5 Factors in research operations.

3.1 การเตรียมวัสดุในการทดลอง กำหนดความชื้นในเส้นใยไพล่อนก่อนนำเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ ขึ้นงาน เส้นใยไพล่อนจะถูกกำหนดความชื้นเป็น 3 ช่วง โดยช่วงความชื้นเริ่มต้นนับจากการเปิดใช้งานเริ่มต้น เมื่อรับวัสดุจากผู้ขายโดยกำหนดช่วงความชื้นที่ 0% และระดับความชื้นอีก 2 ระดับ กำหนดโดยการแช่เส้นใยไพล่อนในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง และ 144 ชั่วโมงตามลำดับ [5] จากนั้นนำเส้นใยไพล่อนออกมาเป่าลมให้แห้งและปล่อยวางไว้ในบรรยากาศ 15 นาที ก่อนนำเข้าสู่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ การวัดปริมาณความชื้นในเส้นใยไพล่อนด้วยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการแช่น้ำ โดยใช้สมการที่ 1 ในการหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำในตัวเส้นใย

$$Moisture = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

m_0 = mass of moistened filament

m = mass of dried filament

การกำหนดช่วงของความชื้นในเส้นใยไพล่อนพิจารณาจากกราฟเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเส้นใยไพล่อนที่ได้จากการวัดปริมาณความชื้นในเส้นใยไพล่อนด้วยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการแช่น้ำในช่วงระยะเวลาแตกต่างกัน จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าช่วงระยะเวลาในการแช่เส้นใยไพล่อนจากเริ่มต้นจนถึงระยะเวลา 72 ชั่วโมงทำให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นในเส้นใยไพล่อนมีการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อหลัง 72 ชั่วโมงเป็นต้นไป

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในเส้นใยไนลอนมีการเพิ่มขึ้นชัดเจนจนถึงช่วงระยะเวลา 144 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ความชื้นในเส้นใยไนลอนมีการเพิ่มขึ้นน้อยมาก โดยพิจารณาจากกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเส้นใยไนลอนก่อนพิมพ์ ได้กำหนดช่วงความชื้น 0%, 1.63% และ 3.17% ในการทดลอง และเส้นใยไนลอนที่ช่วงความชื้นดังกล่าวจะถูกนำมาพิมพ์เพื่อสร้างชิ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง (Tensile Strength) มาตรฐาน ISO 527-2/1A/50 [10] และทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact Strength) ด้วยวิธี Charpy impact test ตามมาตรฐาน ISO 179 [11] ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยทิศทางการพิมพ์ขึ้นรูป (Fill Pattern) กำหนดตามแนวยาวและขวางทำมุม 0° และ 90° ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากการพิมพ์ขึ้นรูปในลักษณะดังกล่าวสามารถรับแรงดึงได้สูงสุด [12]

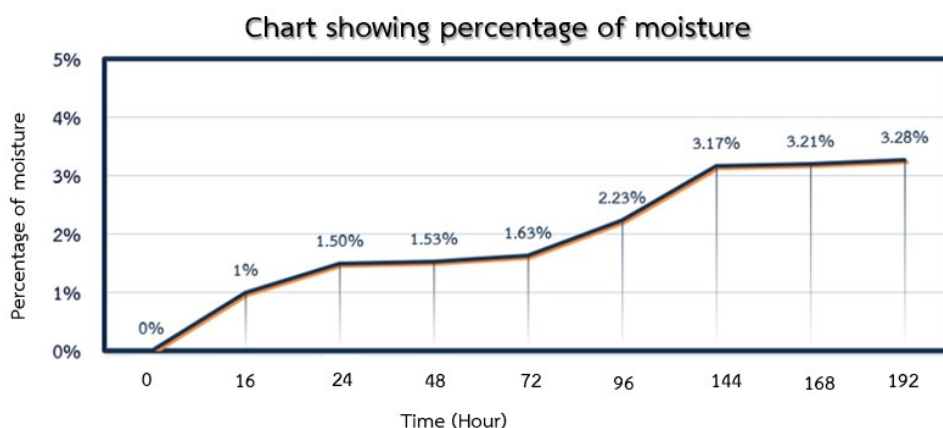


Figure 6 Percentage of moisture content of nylon filament before printing.

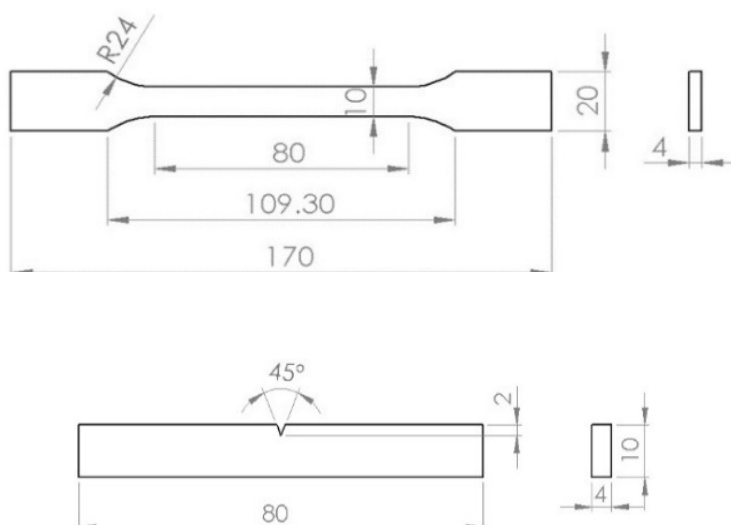


Figure 7 Shape and size of specimens for tensile and impact testing.

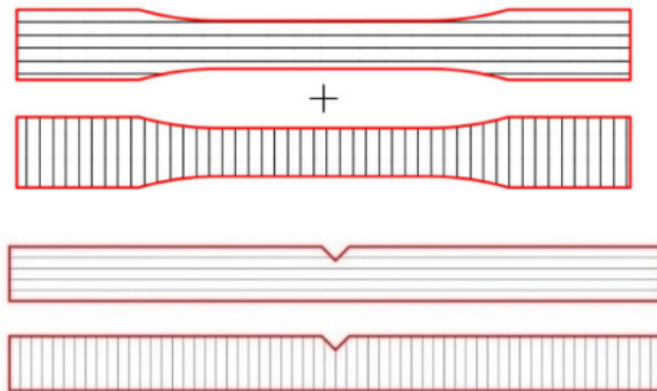
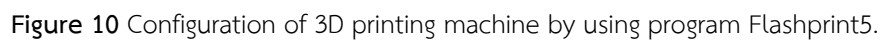
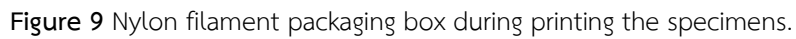


Figure 8 Fill pattern direction for printing the specimens.

3.2 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบเส้นใยในลอนทั้ง 3 ช่วงของความขึ้น (0%, 1.63% และ 3.17%) จะถูกนำมาขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงดึงและแรงกระแทกด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ FLASHFORGE รุ่น GUIDER IIs โดยใช้หัวพิมพ์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร ความสูงในแต่ละชั้นของการพิมพ์ 0.2 มิลลิเมตร การเติมเนื้อภายในของชิ้นงานทดสอบแบบ 100% อุณหภูมิฐานพิมพ์ 60 องศาเซลเซียสดังแสดงในตารางที่ 1 ในระหว่างการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบเส้นใยในลอนจะถูกจัดเก็บไว้ในกล่องปิดเพื่อควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นในตัวเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 9

Table 1 Printing configuration

Nozzle Diameter [mm]	0.4
Layer Height [mm]	0.2
Shell Count	3
Infill Density [%]	100
Printing Temperature [°C]	260/280/300
Build Plate Temperature [°C]	60
Print Speed [mm/s]	30/45/60
Infill Pattern	Line



3.3 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties Testing) ทางด้านความต้านทานแรงกระแทกกระทำโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 179 โดยเครื่องทดสอบ (Pneumatic Impact Tester) ยี่ห้อ Instron รุ่น 9050 ติดตั้งชิ้นงานทดสอบโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ Charpy Test มีน้ำหนักหัวตี 2 กิโลกรัม โดยตั้งหัวตีที่ 150 องศาแสดงในรูปที่ 12 และการทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงดึง (Tensile Strength) ดำเนินการตามมาตรฐาน ISO 527-2/1A/50 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine (UTM) โดยติดตั้งชิ้นงานทดสอบและใช้หัวจับชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบ Wedge Grip หนีบเป็นระยะ 115 มิลลิเมตร กำหนดความเร็วขณะดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที เริ่มดึงจนชิ้นงานขาดและนำค่าแรงดึงสูงสุดไปใช้คำนวณทางสถิติแสดงในรูปที่ 13



Figure 12 Impact testing.

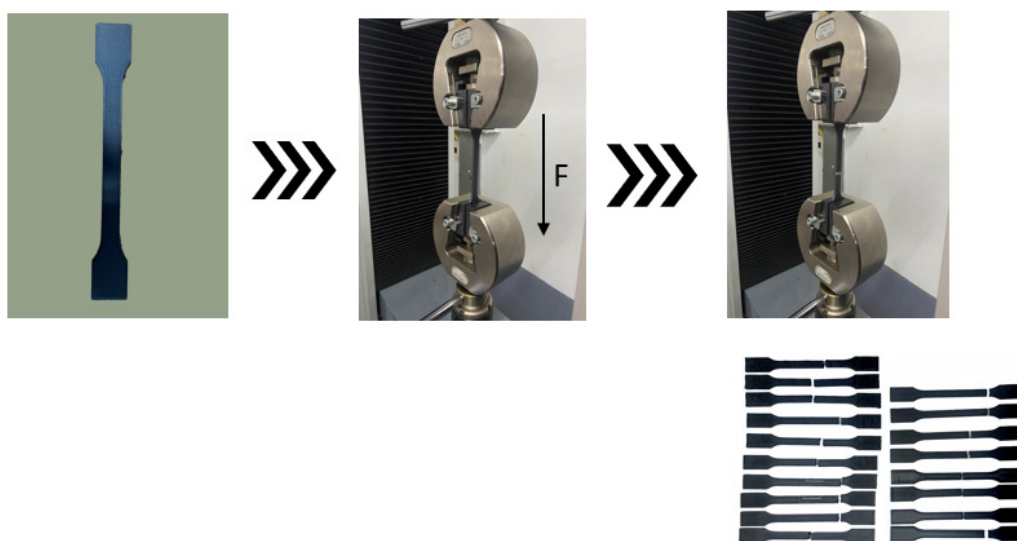


Figure 13 Ultimate tensile strength testing.

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1.การทดสอบความต้านทานแรงดึงกระทำโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 527-2/1A/50 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2

Table 2 The results of tensile strength testing.

Tensile strength testing results : ISO 527-2/1A/50															
StdOrder	RunOrder	PTType	Blocks	Extruder Temp.	Travel Speed	Moisture	Tensile strength	StdOrder	RunOrder	PTType	Blocks	Extruder Temp.	Travel Speed	Moisture	Tensile strength
1	1	1	1	260	30	0	53.82	28	28	1	1	260	30	0	54.05
2	2	1	1	260	30	1.63	44.6	29	29	1	1	260	30	1.63	45.07
3	3	1	1	260	30	3.17	47.28	30	30	1	1	260	30	3.17	47.55
4	4	1	1	260	45	0	51.7	31	31	1	1	260	45	0	50.05
5	5	1	1	260	45	1.63	39.75	32	32	1	1	260	45	1.63	40.97
6	6	1	1	260	45	3.17	46	33	33	1	1	260	45	3.17	46.3
7	7	1	1	260	60	0	45.4	34	34	1	1	260	60	0	45.22
8	8	1	1	260	60	1.63	42.97	35	35	1	1	260	60	1.63	43.35
9	9	1	1	260	60	3.17	43.38	36	36	1	1	260	60	3.17	42.43
10	10	1	1	280	30	0	52.5	37	37	1	1	280	30	0	52.02
11	11	1	1	280	30	1.63	43.4	38	38	1	1	280	30	1.63	43.25
12	12	1	1	280	30	3.17	42.95	39	39	1	1	280	30	3.17	42.48
13	13	1	1	280	45	0	46	40	40	1	1	280	45	0	45.95
14	14	1	1	280	45	1.63	44.1	41	41	1	1	280	45	1.63	44.15
15	15	1	1	280	45	3.17	41.55	42	42	1	1	280	45	3.17	42.1
16	16	1	1	280	60	0	50	43	43	1	1	280	60	0	49.57
17	17	1	1	280	60	1.63	44.2	44	44	1	1	280	60	1.63	43.87
18	18	1	1	280	60	3.17	44.43	45	45	1	1	280	60	3.17	47.85
19	19	1	1	300	30	0	50.35	46	46	1	1	300	30	0	49.35
20	20	1	1	300	30	1.63	43.5	47	47	1	1	300	30	1.63	42.15
21	21	1	1	300	30	3.17	41.45	48	48	1	1	300	30	3.17	42.38
22	22	1	1	300	45	0	44.6	49	49	1	1	300	45	0	44.95
23	23	1	1	300	45	1.63	43.47	50	50	1	1	300	45	1.63	43.2
24	24	1	1	300	45	3.17	47.9	51	51	1	1	300	45	3.17	46.58
25	25	1	1	300	60	0	47.4	52	52	1	1	300	60	0	48.72
26	26	1	1	300	60	1.63	43.6	53	53	1	1	300	60	1.63	44.1
27	27	1	1	300	60	3.17	41.8	54	54	1	1	300	60	3.17	42.55

จากตารางที่ 2 นำค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมาสร้างกราฟพาเรโตและเส้นนัยสำคัญบนกราฟที่ระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคัดกรองปัจจัยให้เหลือเฉพาะปัจจัยหลักที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากกราฟพาเรโตแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 14

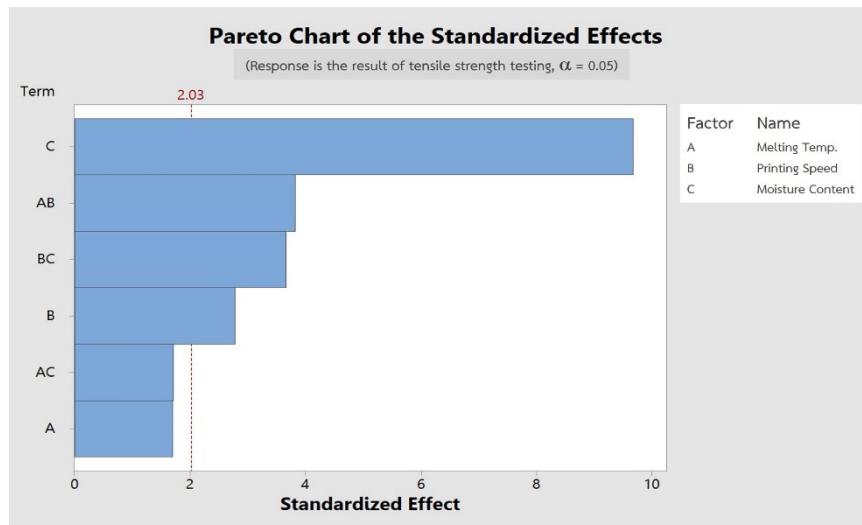


Figure 14 Pareto Chart of factors affecting tensile strength.

จากกราฟในรูปที่ 14 แสดงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ เห็นได้ชัดว่าความชื้นเป็นผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดตามด้วยความเร็วในการพิมพ์ ในขณะที่ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยประกอบด้วยจุดหลอมเหลว-ความเร็ว ความเร็ว-ความชื้น ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด เนื่องจากผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวแสดงผลกระทบเกินกว่าเส้นสีแดง ($\alpha = 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าพจน์ของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 3

Table 3 The results of hypothesis testing on factors affecting tensile strength.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	18	530.47	29.471	11.00	0.000
Linear	6	373.39	62.231	23.23	0.000
Melting Temperature	2	13.32	6.661	2.49	0.098
Printing Speed	2	29.25	14.623	5.46	0.009
Moisture Content	2	330.82	165.408	61.74	0.000
2-Way Interactions	12	157.09	13.090	4.89	0.000
MT * PS	4	69.26	17.315	6.46	0.001
MT * MC	4	22.95	5.738	2.14	0.096
PS * MC	4	64.87	16.218	6.05	0.001
Error	35	93.76	2.679		
Lack-of-Fit	8	80.42	10.053	20.35	0.000
Pure Error	27	13.34	0.494		
Total	53	624.23			

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect) ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึงคือ ค่าจุดหลอมเหลว ความเร็ว ความชื้น ซึ่งมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ดังแสดงในกราฟแสดงอิทธิพลหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 15 และเมื่อใช้ค่าจุดหลอมเหลว 280 และค่าจุดหลอมเหลว 300 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลงมาใกล้เคียงกันซึ่งไม่แตกต่างกันมาก โดยค่าความต้านทานแรงดึงที่ 280 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่าค่าจุดหลอมเหลวที่ 300 องศาเซลเซียส และพบว่าเมื่อความเร็วที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาทีจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความเร็ว 45 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงที่ลดลงต่ำที่สุด และเมื่อเส้นใยไนลอนมีความชื้นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงสุด ในขณะที่ความชื้นที่ 1.63 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มค่าความต้านทานแรงดึงลดลง และที่ความชื้นที่ 3.17 เปอร์เซ็นต์ ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 15

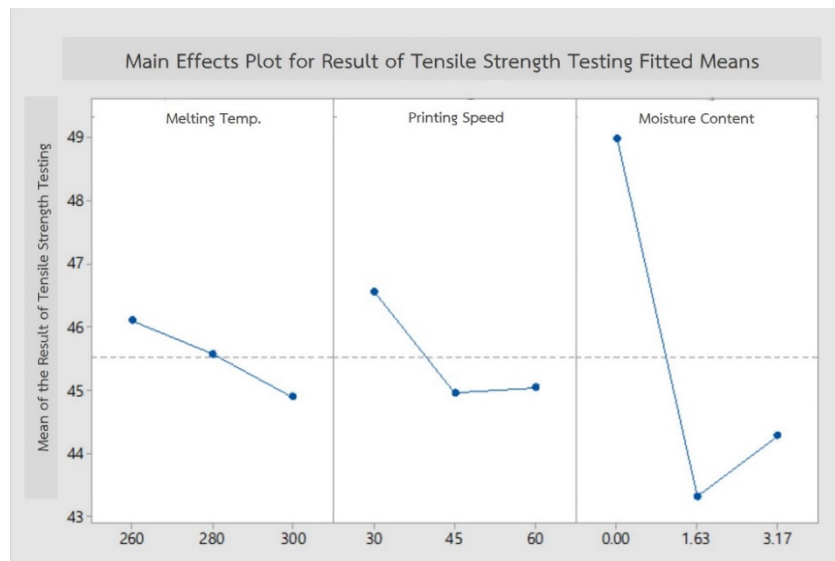


Figure 15 Main influences affecting tensile strength values.

การวิเคราะห์ผลปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ระหว่างค่าจุดหลอมเหลวและความเร็วที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าเมื่อใช้จุดหลอมเหลวที่ 260, 280 และ 300 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วที่ 30, 45 และ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าจุดหลอมเหลว 300 องศาเซลเซียส ความเร็วที่ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำกว่า 30 และ 60 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ เมื่อลดค่าจุดหลอมเหลว 280 องศาเซลเซียส ความเร็วที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าความเร็ว 45 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนเวลาที่ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด และค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส ความเร็วที่ 45 และ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกันกับความเร็ว 45 มิลลิเมตรต่อวินาที และมีค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่าเพียงเล็กน้อย ส่วนความเร็วที่ 45 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่มีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุด ในขณะที่ผลกระทบร่วมระหว่างค่าจุดหลอมเหลวและความชื้นที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าเมื่อใช้ค่าจุดหลอมเหลว 260, 280 และ 300 องศาเซลเซียส และความชื้น 0, 1.63 และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ที่ความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่มากกว่า 1.63 และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ ทุกช่วงของค่าจุดหลอมเหลวตามลำดับ และผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วและความชื้นที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึง พบว่าเมื่อใช้ความเร็วที่ 30, 45 และ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าความชื้นที่ 0 เปอร์เซ็นต์มีค่าความต้านทานแรงดึงที่มากกว่าความชื้น 1.63 และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับทุกช่วงความเร็วดังแสดงในรูปที่ 16

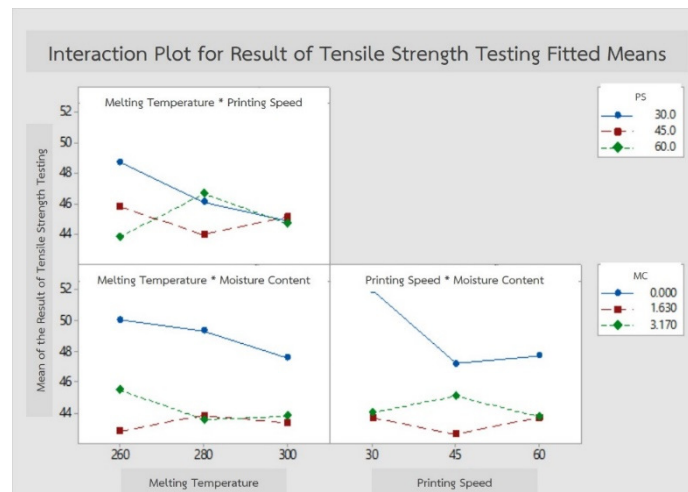


Figure 16 The main influence of 3 factors affecting tensile strength value.

ผลการทดสอบแรงดึงยังสามารถอธิบายได้ว่าเส้นใยไนลอนที่มีความชื้นต่ำจะมีความเหนียวและยืดหยุ่นที่สูงกว่าเส้นใยไนลอนที่มีความชื้นสูงโดยเฉพาะสมบัติทางด้านความเหนียว โดยสังเกตได้จากรูปที่ 17 กราฟแสดงค่าความเค้น - ความเครียด ของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบมากกว่าชิ้นงานทดสอบที่มีความชื้น 1.63 และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19 ตามลำดับ และเมื่อเส้นใยไนลอนมีปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นสมบัติทางด้านความยืดหยุ่นและความเหนียวก็จะลดลง รวมถึงค่าความต้านทานแรงดึงด้วยเช่นกัน โดยผลที่ได้เป็นไปในทางเดียวกันกับงานวิจัย [13] นั้นอธิบายได้ว่าชิ้นงาน 3 มิติ ที่ได้จากการพิมพ์จากเส้นใยไนลอนที่มีความชื้นสูงจะทำให้ความเหนียวลดลง

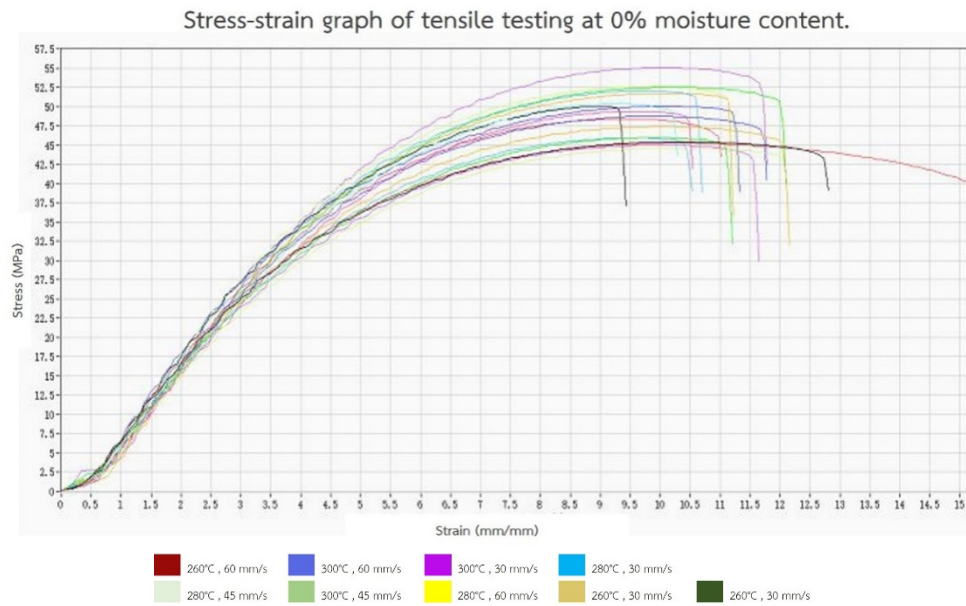


Figure 17 Stress-strain graph of tensile testing at 0% moisture content.

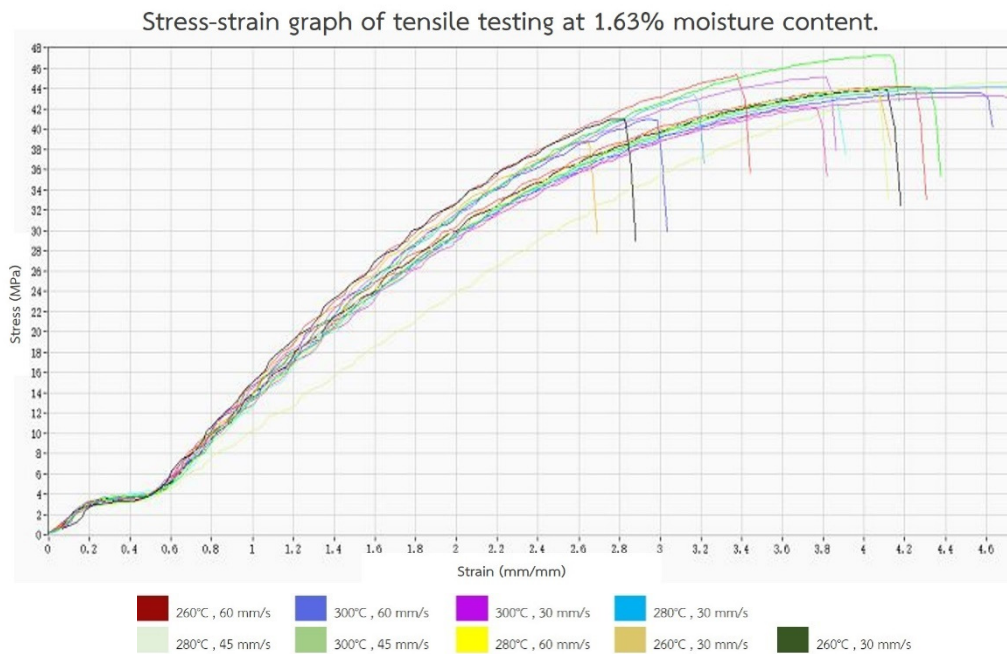


Figure 18 Stress-strain graph of tensile testing at 1.63% moisture content.

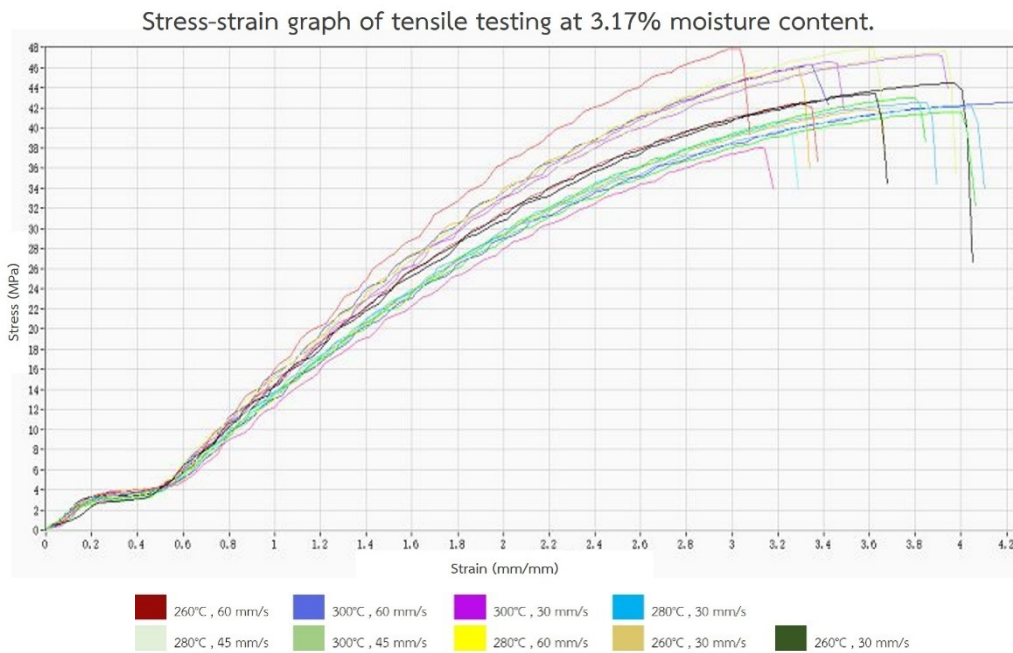


Figure 19 Stress-strain graph of tensile testing at 3.17% moisture content.

2.การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกกระทำโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 179 โดยเครื่องทดสอบ (Pneumatic Impact Tester) ยี่ห้อ Instron รุ่น 9050 ติดตั้งชิ้นงานทดสอบโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ Charpy Test ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4

Table 4 The results of impact testing.

Impact testing results : ISO179															
StdOrder	RunOrder	PlType	Blocks	Extruder Temp.	Travel Speed	Moisture	Impact	StdOrder	RunOrder	PlType	Blocks	Extruder Temp.	Travel Speed	Moisture	Impact
1	1	1	1	260	30	0	16.78	28	28	1	1	260	30	0	16.06
2	2	1	1	260	30	1.63	12.44	29	29	1	1	260	30	1.63	10.78
3	3	1	1	260	30	3.17	9.86	30	30	1	1	260	30	3.17	10.81
4	4	1	1	260	45	0	15.38	31	31	1	1	260	45	0	17.18
5	5	1	1	260	45	1.63	10.35	32	32	1	1	260	45	1.63	10.92
6	6	1	1	260	45	3.17	11.28	33	33	1	1	260	45	3.17	10.74
7	7	1	1	260	60	0	16.42	34	34	1	1	260	60	0	16.91
8	8	1	1	260	60	1.63	11.98	35	35	1	1	260	60	1.63	12.73
9	9	1	1	260	60	3.17	12.04	36	36	1	1	260	60	3.17	11.24
10	10	1	1	280	30	0	11.56	37	37	1	1	280	30	0	12.29
11	11	1	1	280	30	1.63	12.11	38	38	1	1	280	30	1.63	12.4
12	12	1	1	280	30	3.17	10.67	39	39	1	1	280	30	3.17	10.6
13	13	1	1	280	45	0	13.07	40	40	1	1	280	45	0	13.14
14	14	1	1	280	45	1.63	11.35	41	41	1	1	280	45	1.63	11.85
15	15	1	1	280	45	3.17	10.39	42	42	1	1	280	45	3.17	11.2
16	16	1	1	280	60	0	16.55	43	43	1	1	280	60	0	16.42
17	17	1	1	280	60	1.63	10.88	44	44	1	1	280	60	1.63	11.46
18	18	1	1	280	60	3.17	10.28	45	45	1	1	280	60	3.17	11.1
19	19	1	1	300	30	0	13.63	46	46	1	1	300	30	0	13.18
20	20	1	1	300	30	1.63	13.44	47	47	1	1	300	30	1.63	10.99
21	21	1	1	300	30	3.17	10.81	48	48	1	1	300	30	3.17	10.35
22	22	1	1	300	45	0	16.12	49	49	1	1	300	45	0	14.88
23	23	1	1	300	45	1.63	13.4	50	50	1	1	300	45	1.63	11.75
24	24	1	1	300	45	3.17	10.35	51	51	1	1	300	45	3.17	11.35
25	25	1	1	300	60	0	14.5	52	52	1	1	300	60	0	15.96
26	26	1	1	300	60	1.63	11.93	53	53	1	1	300	60	1.63	10.46
27	27	1	1	300	60	3.17	10.39	54	54	1	1	300	60	3.17	10.14

กระทำการนำค่าความต้านทานแรงกระแทกมาสร้างกราฟพาเรโตที่ระดับนัยสำคัญที่ต้องการ ($\alpha = 0.05$) เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลในการคัดกรองปัจจัยที่เหลือเฉพาะปัจจัยหลักที่มีผลต่อแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากกราฟพาเรโตที่ระดับ $\alpha = 0.05$ จะได้กราฟแสดงผลกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 20

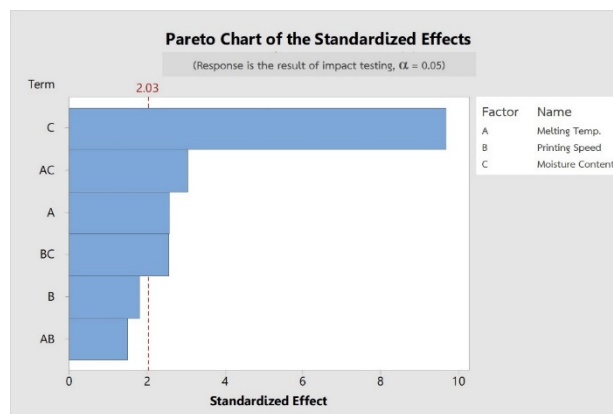


Figure 20 Pareto Chart of factors affecting impact testing.

จากกราฟในรูปที่ 20 แสดงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญ เห็นได้ชัดว่าความชื้นเป็นผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกตามด้วยค่าจุดหลอมเหลว ในขณะที่ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกคือ ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยประกอบด้วย จุดหลอมเหลว-ความชื้น ความเร็ว-ความชื้น ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด เนื่องจากผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวแสดงผลกระทบเกินกว่าเส้นสีแดง ($\alpha = 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าพจน์ของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 5

Table 5 The results of hypothesis testing on factors affecting impact testing.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	18	222.398	12.3554	15.33	0.000
Linear	6	190.192	31.6987	39.34	0.000
Melting Temperature	2	7.781	3.8906	4.83	0.014
Printing Speed	2	4.436	2.2181	2.75	0.078
Moisture Content	2	177.975	88.9873	110.44	0.000
2-Way Interactions	12	32.206	2.6838	3.33	0.003
MT * PS	4	5.925	1.4813	1.84	0.144
MT * MC	4	14.764	3.6910	4.58	0.004
PS * MC	4	11.517	2.8791	3.57	0.015
Error	35	28.202	0.8058		
Lack-of-Fit	8	14.169	1.7711	3.41	0.008
Pure Error	27	14.033	0.5197		
Total	53	250.599			

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก (Main Effect) ที่ส่งผลกระทบบต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกคือ ค่าจุดหลอมเหลว ความเร็ว ความชื้น ซึ่งมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงที่สุด และเมื่อใช้ค่าจุดหลอมเหลว 280 และค่าจุดหลอมเหลว 300 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงมาใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่แตกต่างกันมาก โดยค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ 280 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกน้อยกว่าค่าจุดหลอมเหลวที่ 300 และพบว่าเมื่อความเร็วที่ 45, 60 มิลลิเมตรต่อวินาที จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อใช้ความเร็ว 30 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่ามีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ลดลงต่ำที่สุด

และเมื่อเส้นใยไพล่อนมีความชื้นที่ 3.17เปอร์เซ็นต์ จะมีความต้านทานแรงกระแทกที่ต่ำสุด ในขณะที่ความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ และ 1.63 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มค่าความต้านทานแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 21

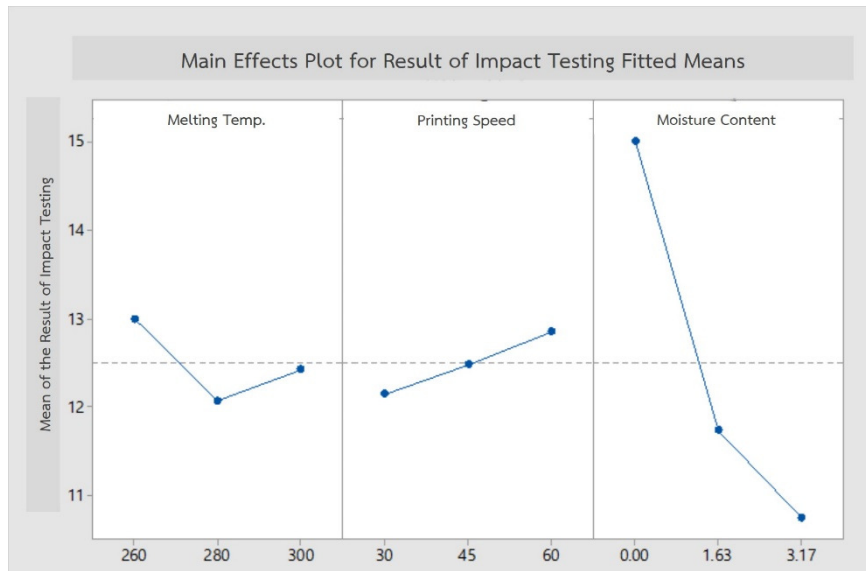


Figure 21 Main influences affecting impact testing values.

การวิเคราะห์ผลปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ระหว่างค่าจุดหลอมเหลวและความเร็วที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก พบว่าเมื่อใช้จุดหลอมเหลวที่ 260 , 280 และ 300 องศาเซลเซียสและความเร็วที่ 30 , 45 และ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก โดยที่ค่าจุดหลอมเหลว 280 องศาเซลเซียส ความเร็วที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ต่ำกว่าความเร็ว 45 และ 60 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ และเมื่อเพิ่มค่าจุดหลอมเหลวเป็น 300 องศาเซลเซียสและความเร็วที่ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกน้อยกว่าความเร็ว 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนความเร็วที่ 45 มิลลิเมตรต่อวินาทีที่มีค่าความต้านทานแรงกระแทกมากที่สุดและค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส ความเร็วที่ 30 และ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าความต้านทานแรงกระแทก ที่ใกล้เคียงกันที่ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าเพียงเล็กน้อย ส่วนความเร็วที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าความต้านทานแรงกระแทกต่ำที่สุด ในขณะที่ผลกระทBRร่วมกันระหว่างค่าจุดหลอมเหลวและความชื้น พบว่าที่ความชื้นในเส้นใยไพล่อน 0 เปอร์เซ็นต์มีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่มากกว่าความชื้นในเส้นใยไพล่อน 1.63 เปอร์เซ็นต์และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ทุกช่วงค่าจุดหลอมเหลวตามลำดับ และผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วและความชื้น พบว่าเมื่อใช้ความเร็วที่ 30, 45 และ 60 มิลลิเมตรต่อวินาทีความชื้นที่ความชื้นในเส้นใยไพล่อน 0 เปอร์เซ็นต์มีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่มากกว่าความชื้น 1.63 เปอร์เซ็นต์และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับทุกช่วงความเร็วดังแสดงในรูปที่ 22

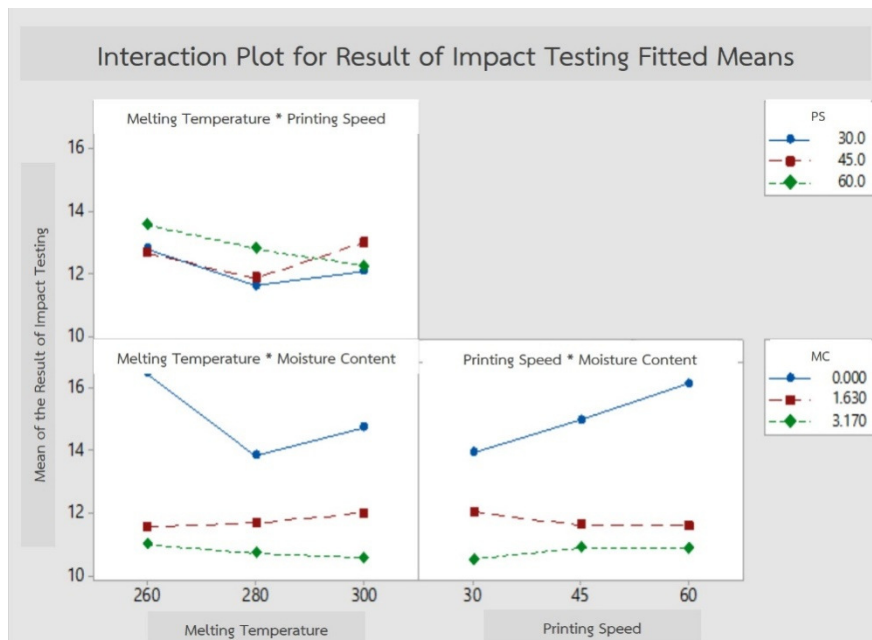


Figure 22 The main influence of 3 factors affecting impact testing value.

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาถึงสถานะของเส้นใยไพลอนที่มีค่าความชื้นในตัวเส้นใยที่แตกต่างกัน รวมถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิมพ์ขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นในเส้นใยไพลอนที่สูงขึ้นส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการปรับค่าพารามิเตอร์ในการพิมพ์ขึ้นรูปสามารถช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงได้ โดยหากเส้นใยไพลอนมีความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ ผู้ใช้ควรปรับค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส กำหนดความเร็วในการพิมพ์ที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีที่สุดคือ 54.05 เมกะปาสคาล ในขณะที่เมื่อเส้นใยไพลอนมีความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 1.63 เปอร์เซ็นต์ ผู้ใช้ควรปรับค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส และกำหนดความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำลงมากคือ 45.07 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับเส้นใยที่มีความชื้นในระดับนี้ และเมื่อเส้นใยไพลอนมีความชื้นสูงขึ้นเป็น 3.17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่สูงที่สุดในการทดลองครั้งนี้ หากผู้ใช้ปรับค่าจุดหลอมเหลวที่ 300 องศาเซลเซียส และกำหนดความเร็วในการพิมพ์ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้กลับสูงขึ้นมาที่ 47.90 เมกะปาสคาล ซึ่งได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าความชื้นที่ 1.63 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากการเพิ่มจุดหลอมเหลวและความเร็วในการพิมพ์ที่ช่วยชดเชยผลกระทบจากความชื้นในตัวเส้นใยไพลอนได้ แต่ก็ยังไม่สามารถให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงเท่ากับกรณีที่ไม่มีความชื้นในเส้นใยไพลอน ในขณะเดียวกันการปรับค่าพารามิเตอร์ในการพิมพ์ขึ้นรูปสามารถช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานแรงกระแทกด้วยเช่นกัน โดยหากเส้นใยไพลอนมีความชื้น 0 เปอร์เซ็นต์ ผู้ใช้ควรปรับค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส กำหนดความเร็วในการพิมพ์ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที จะให้ค่าความ

ด้านทานแรงกระแทกที่ดีที่สุดคือ 17.18 กิโลจูล ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงที่สุด ในขณะที่เมื่อเส้นใยไนลอนมีความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 1.63 เปอร์เซ็นต์ ผู้ใช้ควรปรับค่าจุดหลอมเหลวที่ 300 องศาเซลเซียส และกำหนดความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที จะได้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงมาอยู่ที่ 13.44 กิโลจูล ซึ่งเป็นการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับเส้นใยที่มีความชื้นในระดับนี้ และเมื่อเส้นใยไนลอนมีความชื้นสูงขึ้นที่ 3.17 เปอร์เซ็นต์ ผู้ใช้ควรปรับค่าจุดหลอมเหลวที่ 260 องศาเซลเซียส และกำหนดความเร็วในการพิมพ์ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที จะได้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ได้ต่ำสุดที่ 12.04 กิโลจูล ความชื้นที่สูงสุดที่ 3.17 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานลดลงอย่างมาก แม้ว่าจะปรับค่าพารามิเตอร์อื่นๆช่วยแล้วก็ตาม

การพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยเส้นใยไนลอนที่ไม่มีความชื้นจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีที่สุด การมีความชื้นในเส้นใยไนลอนก่อนการพิมพ์ขึ้นรูปจะลดความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัย [10, 14] และในกรณีที่เส้นใยไนลอนมีความชื้นสูง การเพิ่มจุดหลอมเหลวและความเร็วในการพิมพ์อาจช่วยปรับปรุงความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานได้ แต่ก็ยังไม่ดีเท่ากับการใช้เส้นใยไนลอนก่อนพิมพ์ที่ไม่มีความชื้น อีกทั้งความชื้นมีผลกระทบอย่างมากต่อความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน 3 มิติ โดยความชื้นในเส้นใยไนลอนที่สูงขึ้นทำให้ความต้านทานแรงกระแทกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สภาวะที่ไม่มีความชื้นในเส้นใยจะให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่สูง ในขณะที่การเพิ่มจุดหลอมเหลวและความเร็วในการพิมพ์ในสภาวะเส้นใยไนลอนมีความชื้นสูงไม่ได้ช่วยปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงาน ผู้ใช้ควรควบคุมความชื้นในเส้นใยไนลอนก่อนนำมาพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติให้น้อยที่สุด เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางกลที่ดี โดยสามารถดูข้อเสนอแนะในการปรับตั้งค่าการพิมพ์ได้จากตารางที่ 6 เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานเส้นใยไนลอนที่มีความชื้น

Table 6 Recommendations for setting of the 3D printing machine with moist nylon filament.

Moisture Content (%)	Melting Temperature (°C)	Printing Speed (mm/sec)	Tensile resistance (MPa)	Impact resistance (KJ)
0%	260	30	54.05	-
1.63%	260	30	45.07	-
3.17%	300	45	47.90	-
0%	260	45	-	17.18
1.63%	300	30	-	13.44
3.17%	260	60	-	12.04

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการระบบการผลิตอัตโนมัติและสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ในการทำวิจัย รวมทั้งหน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงและการผลิตสมัยใหม่เพื่ออุตสาหกรรมการผลิต การแพทย์ และการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย และขอขอบคุณ รศ.ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร สาขาวิศวกรรม

อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (นครราชสีมา) ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย และขอขอบคุณ นายพิชญุตม์ ยอดเกลี้ยง นายอนุสรณ์ มั่นศิริไพบุลย์ และนายศุภฤกษ์ แก้วหายเคราะห์ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ในการช่วยเก็บข้อมูลและดำเนินงานวิจัย

References

- [1] Jiang S., et al. (2018). Mechanical Properties Analysis of Polyetherimide Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling. *High Performance Polymers*, 31(1), 97-106.
- [2] Attaran, M. (2017). The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. *Business horizons*, 60(5), 677-688.
- [3] El Magri, A., et al. (2020). Optimization of Printing Parameters for Improvement of Mechanical and Thermal Performances of 3D Printed Poly (ether ether ketone) Parts. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(37), 49087.
- [4] Nattawat. (2024). *How to Select 3D Filament for 3D Printer*. Available from: <https://www.siamreap.com/2020/01/how-to-select-3d-filament-for-3d-printer/#nylon-filament>. Accessed date: 5 June 2024.
- [5] Banjo, A. D., et al. (2022). Moisture-Induced Changes in the Mechanical Behavior of 3D Printed Polymers. *Composites Part C: Open Access*, 7, 100243.
- [6] Monson, L., et al. (2008). Moisture Absorption by Various Polyamides and Their Associated Dimensional Changes. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(1), 355-363.
- [7] Thanasuptawee, U., et al. (2024). Effects of Moisture on Mechanical Properties of 3D-Printed Part with Nylon 6. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 14(1), 62-81.(in Thai)
- [8] Wang, X., et al. (2017). 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442-458.
- [9] Polymaker. (2024). *Technical data sheet: PolyMide™ PA12-CF*. Available from: https://polymaker.com/wp-content/uploads/lanadownloads/PolyMide_PA12_CF_TDS_V5.1.1.pdf. Accessed date: 5 March 2024.
- [10] ASTM International. (2020). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Available from: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4839427/mod_resource/content/4/D638.1207962-1.pdf. Accessed date: 13 March 2024.
- [11] International Organization for Standardization. (2023). *Plastics - Determination of Charpy impact properties - Part 1: Non-instrumented impact test (ISO Standard No. 179-1:2023)*.
- [12] Bonada, J., et al. (2021). Influence of Infill Pattern on the Elastic Mechanical Properties of Fused Filament Fabrication (FFF) Parts Through Experimental Tests and Numerical Analyses. *Materials*, 14(18), 5459.
- [13] Haijun G., et al. (2022). Impact of Moisture Absorption on 3D Printing Nylon Filament.

Research Article

Journal of Advanced Development in Engineering and Science

Vol.15 ● No.43 • May – August 2025

In *The 33rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference 2022* (p. 16-22). 25 – 57 July, 2022, Austin, Texas, USA.