



การศึกษาผลกระทบของปัจจัยการอัดรีดต่อคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล โดยใช้การออกแบบการทดลอง

ธีรยุทธ์ ณ นคร* ธนสาร อินทรกำธรชัย และ กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 06 5924 9292 อีเมล: teerayut.nanakorn14@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2025.06.001

รับเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2568 แก้ไขเมื่อ 2 เมษายน 2568 ตอรับเมื่อ 1 พฤษภาคม 2568 เผยแพร่ออนไลน์ 6 มิถุนายน 2568

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลสำหรับการพิมพ์สามมิติ เพื่อแก้ไขปัญหาการสะสมของเศษพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและลดต้นทุนการจัดการขยะ โดยศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิลและความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีดต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (%EL) ผ่านการออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล 650 กรัม และความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด 100 รอบต่อนาที ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 33.334 เมกะปาสคาล ลดลง 14.91 เปอร์เซ็นต์ และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุเฉลี่ย 3.012 เปอร์เซ็นต์ ลดลง 10.89 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะเส้นใยที่ผลิตได้มีความสม่ำเสมอที่ 1.75 ± 0.15 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับวัสดุใหม่ และเมื่อนำมาทดสอบการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบชุดดันเส้นแบบตีหัวฉีดที่ติดตั้งชุดดันเส้นเพื่อง่ายต่อการปรับค่าขึ้นงานจากเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลมีคุณภาพผิว รูปร่างและความสวยดีกว่าเส้นใยพลาสติก ABS ใหม่ แต่การใช้วัสดุรีไซเคิลสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบได้ 34.41 เปอร์เซ็นต์ (ประหยัดได้ 55.75 บาทต่อกิโลกรัม) และลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ลง 61.94 เปอร์เซ็นต์ ($1.1799 \text{ kg CO}_2\text{e}$) ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเม็ดพลาสติกใหม่

คำสำคัญ: กระบวนการอัดรีดเส้นใยพลาสติก การปรับปรุงคุณสมบัติพลาสติก การพิมพ์สามมิติ การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง



A Study on the Effects of Extrusion Factors on the Mechanical Properties of Recycled ABS Plastic Fibers Using Experimental Design

Teerayut Na Nakorn*, Thanasan Intarakumthornchai and Krisada Asawarungsaengkul

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 06 5924 9292, E-mail: teerayut.nanakorn14@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2025.06.001

Received 18 February 2025; Revised 2 April 2025; Accepted 1 May 2025; Published online: 6 June 2025

© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This study focuses on improving the properties of recycled ABS plastic filaments for 3D printing to address the issue of plastic waste accumulation that affects the environment and to reduce waste management costs. The research examines the effects of the ratio of added recycled ABS plastic scraps and the screw speed in the extrusion process on the ultimate tensile strength and the material's elongation capability. A Central Composite Design (CCD) under the Response Surface Methodology (RSM) was used for the experimental design. The results showed that an addition rate of 650 grams of recycled ABS plastic and a screw speed of 100 revolutions per minute in the extrusion process resulted in an average ultimate tensile strength of 33.334 megapascals, representing a 14.91 percent decrease, and an average elongation of 3.012 percent, representing a 10.89 percent decrease. The produced filament exhibited a consistent diameter of 1.75 ± 0.15 millimeters when compared to the new material. When tested with a printer using a dual-gear extruder system with an attached injection head, it was found that workpieces made from recycled ABS filament had inferior surface quality, shape, and appearance compared to those made from new ABS filament. However, using recycled materials can reduce plastic pellet consumption by up to 34.41 percent (saving 55.75 THB per kilogram) and significantly reduce carbon dioxide emissions by 61.94 percent (1.1799 kg CO₂e) compared to virgin ABS pellets, highlighting its economic and environmental benefits.

Keywords: Plastic Fiber Extrusion Process, Improving Plastic Properties, 3D Printing, Response Surface Analysis

Please cite this article as: T. Na Nakorn, T. Intarakumthornchai, and K. Asawarungsaengkul, "A study on the effects of extrusion factors on the mechanical properties of recycled ABS plastic fibers using experimental design," *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 1, pp. 1–20, ID. 261-047815, Jan.–Mar. 2026 (in Thai), doi: 10.14416/j.kmutnb.2025.06.001.

1. บทนำ

ปัจจุบันหลายอุตสาหกรรมได้มุ่งเน้นการพัฒนาแนวทางในการจัดการและเพิ่มมูลค่าพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก โดยเฉพาะการนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งวัสดุเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มวัสดุสีเขียว (Green Materials) ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) ซึ่งผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตร อาทิ แป้งข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย มีคุณสมบัติย่อยสลายได้ในธรรมชาติและเป็นวัสดุที่ยั่งยืน [1]–[5] ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene; ABS) มีต้นกำเนิดจากปิโตรเลียม [6] มีข้อจำกัดด้านการย่อยสลายและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หากไม่จัดการอย่างถูกวิธีจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและความยั่งยืนของทรัพยากรของโลกในระยะยาว ด้วยเหตุนี้นักวิจัยส่วนใหญ่ในหลาย ๆ ประเทศคิดหาแนวทางการปรับปรุงพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยยังคงคุณสมบัติที่ยอมรับได้ [7] เพื่อลดการใช้พลาสติกใหม่ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ปิโตรเลียม [8] สำหรับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากตามธรรมชาติที่นักวิจัยให้ความสำคัญในการคิดแนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติกันอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันเพื่อให้ได้เส้นใยมีคุณภาพเทียบเท่ากับเส้นใยใหม่ [9] โดยใช้พอลิเมอร์เหลือใช้หรือของเสีย จัดเป็นวัสดุรีไซเคิลเป็นวัสดุตั้งต้นร่วมกับเม็ดพลาสติกใหม่เพื่อรักษาคุณสมบัติเชิงกลให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมการพิมพ์สามมิติอย่างยั่งยืน

อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) จัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ปิโตรเลียมมีสาร 3 องค์ประกอบหลัก คือ อะครีโลไนไตรล์ ช่วยให้มีความแข็งแรงและทนทาน บิวทาไดอีน เพิ่มคุณสมบัติความยืดหยุ่นและทนต่อแรงกระแทก และสไตรีน ให้ความเงางามและความเสถียรภาพทางความร้อน ส่งผลให้อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนที่ผ่านการใช้งาน แล้วนำกลับมาใช้ใหม่เป็นทรัพยากรหมุนเวียนถูกนำมาใช้เป็น วัตถุดิบตั้งต้นในการปรับปรุงคุณสมบัติร่วมกับอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-

สไตรีนใหม่ [10]–[17] ด้วยวิธีการรีไซเคิลผ่านกระบวนการอัดรีดให้เป็นเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล [18]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่ผ่านการใช้งานถูกนำมาใช้ในการศึกษาและปรับปรุงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุในการผลิตผลิตภัณฑ์เส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี [19] นักวิจัยจึงศึกษาการนำเทอร์โมพลาสติกผ่านการใช้งานแล้วมาผสมกับพลาสติกใหม่หรือพลาสติกชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น [12], [13], [15], [16], [20] วิธีที่ช่วยให้กระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือนำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) และประยุกต์ใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เข้ามาศึกษาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติ [21]–[25] โดยหลักการออกแบบการทดลองเป็นการวางแผนและเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการรีไซเคิลผ่านกระบวนการอัดรีดเส้นใย [18], [26]–[30] เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่มีความเหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ และหาอิทธิพลของปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าความทนทานแรงดึงสูงสุดและค่าความสามารถในการยืดของวัสดุของเส้นใยที่เป็นวัสดุในการพิมพ์สามมิติ (FDM) โดยใช้วิธีการทดสอบแรงดึง [31]–[33] เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความทนทานแรงดึงสูงสุดและค่าความสามารถในการยืดของวัสดุของเทอร์โมพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I [34] และทดลองการพิมพ์ชิ้นงานจริง ได้แก่ แบบจำลองเรือ Benchy [35] เพื่อตรวจสอบคุณภาพผิวและค่าความคลาดเคลื่อนจากการนำเส้นใยหลังการปรับปรุงไปใช้งานจริง [19], [36], [37]

จากการศึกษากระบวนการอัดรีดเส้นใย ABS รีไซเคิล ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้การสร้างแผนการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) มีจำนวนปัจจัย 2 ปัจจัย กำหนดระดับปัจจัย 2 ระดับ และการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด

39 การทดลอง วิธีการนี้ช่วยวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลได้อย่างครบถ้วนและแม่นยำ นำไปสู่การปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุรีไซเคิลให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งช่วยลดปริมาณเศษขยะพลาสติกและต้นทุนวัตถุดิบในกระบวนการผลิต หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง และกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความทนทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความสามารถในการยืดของวัสดุ (%EL) โดยใช้ฟังก์ชัน Response optimizer [26]–[30]

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการลดการใช้พลาสติกใหม่และเพิ่มมูลค่าให้กับพลาสติกใช้แล้ว โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลร่วมกับวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) เพื่อศึกษาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีด โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้เส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลมีค่าความทนทานแรงดึงสูงสุดและค่าความสามารถในการยืดของวัสดุอยู่ระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริงในการพิมพ์สามมิติ ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปขยายผลในระดับอุตสาหกรรมในระดับที่สามารถนำไปใช้งานจริงในงานพิมพ์สามมิติได้ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลาสติกใหม่และเพิ่มมูลค่าให้กับพลาสติกใช้แล้ว นอกจากนี้ยังสามารถนำแนวทางนี้ไปประยุกต์กับพลาสติกชนิดอื่น เช่น PLA หรือ PETG เพื่อเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ และรองรับความต้องการของตลาดการพิมพ์สามมิติที่เติบโตอย่างต่อเนื่อง

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย คือ อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ประกอบด้วย เศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS) ที่ได้จากกระบวนการพิมพ์สามมิติและเม็ดพลาสติก ABS ใหม่ (Virgin) จากบริษัท โกลบอลคอนเน็คชั่นส์ จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุรีไซเคิล

2.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุรีไซเคิล

จากรูปที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุรีไซเคิลก่อนเริ่มกระบวนการอัดรีดเริ่มจากการคัดแยกเศษพลาสติก ABS ตามขนาดและสี จากนั้นทำความสะอาดเพื่อลดสิ่งปนเปื้อน และนำเข้าสู่เครื่องบดย่อย ENERGY789 รุ่น 300 เพื่อลดขนาดให้อยู่ในช่วง 3.0–5.0 มิลลิเมตร โดยคัดกรองด้วยตะแกรงมีขนาดรู 3.0 มิลลิเมตร และรู 5.0 มิลลิเมตร วัตถุดิบถูกชั่งตามสูตรการทดลองด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล WT-N มีความละเอียด 0.1 กรัมจำนวน 39 ชุด ตามอัตราส่วนที่กำหนดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนวัสดุรีไซเคิล

องค์ประกอบ	เกรด	อัตราส่วน			หน่วย
ABS รีไซเคิล (Recycle)	Extrusion	500	650	800	กรัม
ABS บริสุทธิ์ (Virgin)	PA-747S	500	350	200	กรัม
รวม	-	1,000	1,000	1,000	กรัม

จากนั้นผสมให้กระจายตัวด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High Speed Mixer) ยี่ห้อ ADV รุ่น HS-100L ใช้เวลาผสม 5 นาที และอบเพื่อกำจัดความชื้นภายในเนื้อพลาสติกด้วยเครื่องอบร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ France Etuves รุ่น XU058 ในอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6–8 ชั่วโมง วัสดุที่ผ่านการเตรียมถูกนำเข้าสู่กระบวนการอัดรีดเพื่อผลิตเส้นใยสำหรับการพิมพ์สามมิติและทดสอบสมบัติเชิงกล

2.3 การวิเคราะห์สภาพปัญหาและแนวทางการแก้ไข

การศึกษานี้มุ่งแก้ปัญหาการสะสมของเศษพลาสติก ABS จากกระบวนการพิมพ์สามมิติ ซึ่งเป็นสาเหตุของปริมาณขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเสนอแนวทางการรีไซเคิลผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุด้วยการผสมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิลกับเม็ดพลาสติก ABS ใหม่ การออกแบบการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของเส้นใยพลาสติกให้มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน พร้อมทั้งลดต้นทุนและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุรีไซเคิล โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพเชิงเศรษฐศาสตร์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การกำหนดปัจจัยหลักในการดำเนินการทดลอง โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยบนพื้นฐานการออกแบบการทดลองและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจากการศึกษากระบวนการอัดรีดสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่หนึ่งคือ การกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ปัจจัยอัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS) และปัจจัยอัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS) โดยกำหนดระดับต่ำ (-1) กลาง (จุดกึ่ง กลาง: 0) และสูง (1) แสดงดังตารางที่ 2 ระดับของปัจจัย R-ABS อยู่ที่ 500 650 และ 800 หน่วยกรัม เป็นระดับปัจจัยที่ต้องการศึกษาและปัจจัย ESS อยู่ที่ 80 90 และ 100 หน่วยรอบต่อนาที ระดับปัจจัยถูกกำหนดโดยอ้างอิงข้อกำหนดจากคู่มือเครื่องจักร (80-250 รอบต่อนาที) เพื่อให้ได้กระบวนการหลอมและการผสมที่เหมาะสมลดการเสื่อมสภาพของวัสดุจากอุณหภูมิสูง และเพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของเทอร์โมพลาสติกกลุ่มที่สองคือตัวแปรตอบสนองแบ่งออกเป็น 2 ตัวแปร ได้แก่ ค่าความทนทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความสามารถในการยืดของวัสดุ (%EL) ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานพิมพ์สามมิติ กรณีที่ค่า UTS สูงช่วยให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและทนต่อแรงกระทำได้ดี หากค่า UTS ต่ำอาจทำให้ชิ้นงานเปราะและแตกหักง่าย โดยเฉพาะในเส้นใยที่มีสัดส่วนวัสดุรีไซเคิลสูงซึ่งพบปัญหา Layer Delamination หรือเกิดการแยกชั้นระหว่างเส้นใยที่พิมพ์ และกรณีค่า %EL ที่สูงช่วยเพิ่มความเหนียวและ

ความสามารถในการรองรับแรงดัดงอหรือแรงกระแทกได้ดี หากค่า %EL ต่ำส่งผลให้ชิ้นงานเปราะไม่สามารถต้านทานต่อแรงดัดงอหรือแรงบิดในระหว่างการพิมพ์ ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวสูงและลดความสามารถในการใช้งานจริง

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

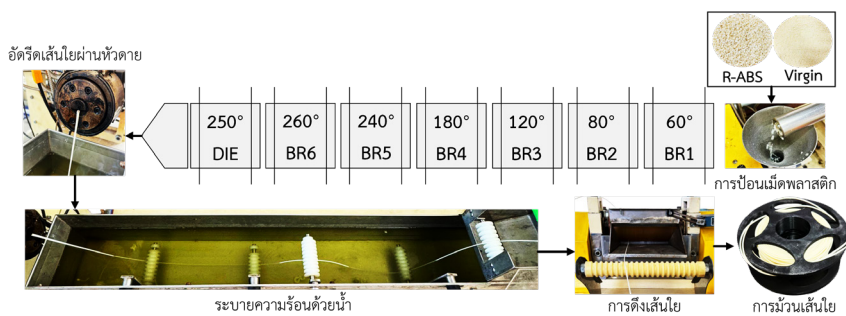
ปัจจัย (Factor)	ระดับปัจจัย (Level)			หน่วย
	-1	0	1	
อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS)	500	650	800	กรัม
อัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS)	80	90	100	รอบต่อนาที

2.4 การออกแบบการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีจำนวนปัจจัย 2 ปัจจัย กำหนดระดับปัจจัยที่ 2 ระดับ ผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง (RSM) แบบส่วนประสมกลาง (CCD) มีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ประกอบด้วยจุดการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k (Cube Points: 1) จำนวน 12 การทดลอง จุดการทดลองตำแหน่งกึ่งกลาง (Center Points: 0) จำนวน 15 การทดลองและจุดการทดลองนอกบริเวณ (Axial Points: -1) จำนวน 12 การทดลอง ดังนั้นจึงมีการทดลองทั้งหมด 39 การทดลอง

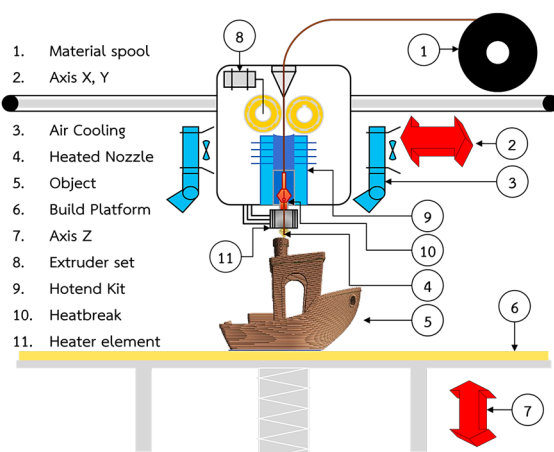
2.5 กระบวนการอัดรีดเส้นใย

การอัดรีดเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนร่วม (Twin-Screw Extruders) ยี่ห้อ CT รุ่น CTE-D20L40 จะติดตั้งอุปกรณ์และระบบแบบครบวงจร ซึ่งรวมถึงรางน้ำสำหรับการระบายความร้อน ชุดดึงเส้นใยและเครื่องมือวัดเส้นใย โดยการอัดรีดมีการปรับตั้งอุณหภูมิบาร์เรล (Barrel; BR) ในโซนที่ 1 ถึง 6 และโซนของหัวตาย (Die) หน่วยองศาเซลเซียส อ้างอิงจาก (MatWeb Material Property Data, ABS: Extruded) แสดงดังรูปที่ 2 สำหรับการอัดรีดจะดำเนินการตามแบบแผนการทดลองแสดงดังตารางที่ 5



รูปที่ 2 การปรับตั้งอุณหภูมิบาร์เรลเครื่องอัดรีดสกรูคู่

เมื่อกำหนดอุณหภูมิของบาร์เรลและหัวตายเสร็จแล้ว ขั้นตอนถัดไป คือ การอัดรีดเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล โดยเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบซึ่งประกอบด้วยเศษพลาสติก รีไซเคิลและเม็ดพลาสติกใหม่ จากนั้นป้อนวัสดุลงในกรวย ป้อนเข้าสู่กระบอบบาร์เรลและสกรูของเครื่องอัดรีดพลาสติก จะถูกหลอมละลายและถูกฉีดผ่านหัวตาย เพื่อขึ้นรูปเป็น เส้นใยก่อนผ่านรางน้ำหล่อเย็นเพื่อให้คงรูปและแข็งตัว เส้นใย ที่แข็งตัวจะถูกดึงผ่านลูกกลิ้งและม้วนเก็บเป็นขดแสดงดัง รูปที่ 2 เมื่อเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลถูกอัดออกจาก หัวตาย จะเข้าสู่รางน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิและคงรูป จากนั้นถูกส่งผ่านเครื่องดึงเส้นใย โดยปรับความเร็วรอบ ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ขนาดของเส้นใยถูกตรวจสอบด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์เป็น จำนวน 10 จุด ทุก ๆ ความยาว 300 มิลลิเมตร เพื่อตรวจวัด ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมิติและวิเคราะห์ข้อผิดพลาด เชิงเปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดมาตรฐานที่กำหนด



รูปที่ 3 การพิมพ์สามมิติ (3D Printing) [30]

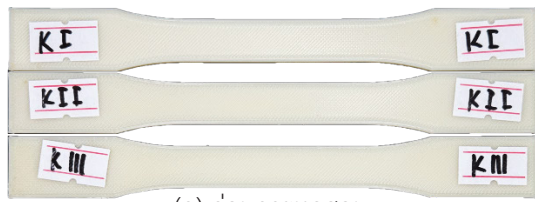
UltiMaker Cura 5.9.0 เพื่อควบคุมเงื่อนไขการพิมพ์ให้เหมาะสม กับคุณสมบัติของเส้นใย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อ คุณภาพและเสถียรภาพของชิ้นงานพิมพ์สามมิติ

ตารางที่ 3 การปรับตั้งพารามิเตอร์การพิมพ์สามมิติ

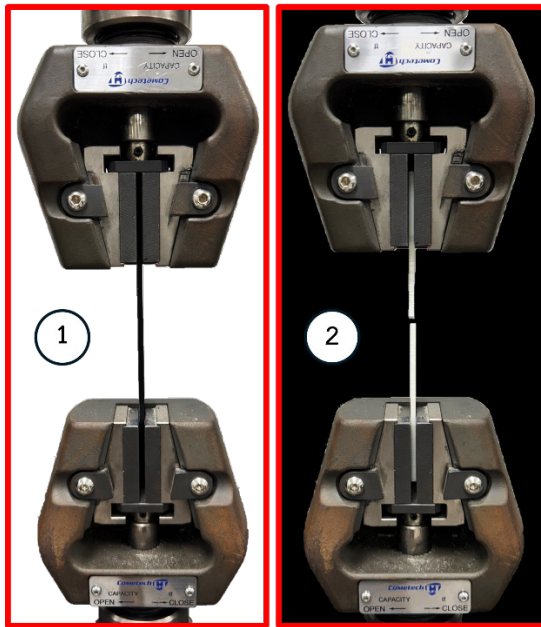
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
อุณหภูมิหัวฉีด	250	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิฐานพิมพ์	105	องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	100	เปอร์เซ็นต์
รูปแบบการเติม	Grid	—
ขนาด Nozzle	0.4	มิลลิเมตร
ความสูงของชั้น	0.2	มิลลิเมตร
ความเร็วการพิมพ์	80	มิลลิเมตรต่อนาที

2.6 การพิมพ์สามมิติ

การพิมพ์สามมิติด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printing) ยี่ห้อ Creality รุ่น Ender 5 S1 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีขึ้นรูปด้วยการสร้างแบบจำลองทับซ้อนหลอมรวม (Fused Deposition Modeling; FDM) แสดงดังรูปที่ 3 ถูกดำเนินการโดยใช้เส้นใย พลาสติก ABS รีไซเคิลที่ผ่านกระบวนการอัดรีดและอบที่ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อปรับสมดุล ความชื้นของเส้นใย การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 3 และการ Slice ไฟล์ชิ้นงานด้วยโปรแกรม



(ก) ก่อนการทดสอบ



(ข) หลังการทดสอบ

รูปที่ 4 ตัวอย่างชิ้นทดสอบแรงดึง

การพิมพ์สามมิติในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ 1) การพิมพ์แบบจำลองเรือ Benchy แสดงดังรูปที่ 8 เพื่อเปรียบเทียบด้านคุณภาพผิวและความคลาดเคลื่อนขนาด โดยใช้เครื่องมีดวัดเวอร์เนียรคาลิเปอร์ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 530 ความละเอียด 0.02 มิลลิเมตร และ 2) การพิมพ์ชิ้นทดสอบ (Dog-bone) ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 4 (ก) เป็นตัวอย่างประเมินคุณสมบัติเชิงกล โดยพิมพ์ตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้นต่อการขึ้นทดสอบ รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 390 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4 ขนาดมาตรฐาน ASTM D638 Type I [26]

ASTM D638 Type I	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความหนา (T)	3.2 ±0.4
ความกว้างส่วนแคบ (W)	13.0 ±0.5
ความยาวส่วนแคบ (L)	57.0 ±0.5
ความยาวเกจ (G)	50.0 ±0.25
ความกว้างมากที่สุด (WO)	19.0 ±6.4
ความยาวมากที่สุด (LO)	165.0 (No max)
ระยะจุดหนีบ (D)	115.0 ±5
รัศมีเส้นโค้ง (R)	76.0 ±1

2.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

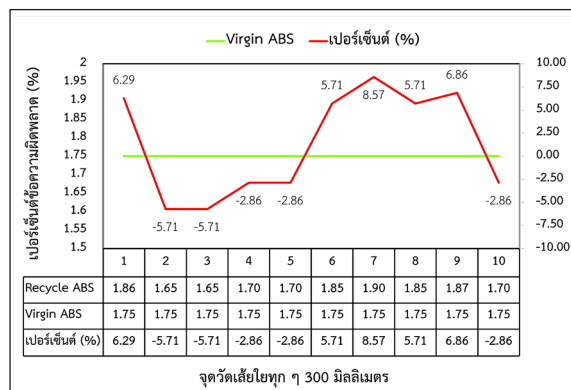
การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Properties) ของเทอร์โมพลาสติกเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Cometech รุ่น QC-506M1-204 โหลดเซลล์ขนาด 20 กิโลนิวตัน ก่อนเริ่มการทดสอบจะทำการเตรียมชิ้นทดสอบโดยการวัดขนาดชิ้นทดสอบ จากนั้นทำเครื่องหมายจุดจับยึดชิ้นทดสอบตำแหน่งความยาวเกจ (G)

ชิ้นทดสอบที่พิมพ์จากเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลในแต่ละระดับของปัจจัยการทดลองถูกจัดหมวดหมู่ด้วยรหัส KI-KIII แสดงดังรูปที่ 4 (ก) ที่เพื่อใช้ระบุเงื่อนไขของแต่ละกลุ่มตัวอย่างซึ่งแตกต่างกันตามการออกแบบการทดลอง โดยนำชิ้นงานทั้งหมดเข้าสู่การทดสอบแรงดึงในทิศทางแกน Z ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine) ที่ปรับตั้งพารามิเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ Dog Bone 1.5.6 โดยใช้อัตราการเคลื่อนที่ 0.2 มิลลิเมตรต่อนาที จนชิ้นงานเกิดการขาดแสดงลักษณะกระบวนการแสดงดังรูปที่ 4 หมายเลขหนึ่งและหมายเลขสอง ส่วนลักษณะของชิ้นทดสอบหลังการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 (ข) ผลลัพธ์จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบจำนวน 10 ชิ้น ถูกนำมาวิเคราะห์ค่าความ ทนทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุ โดยคำนวณค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลกับวัสดุใหม่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

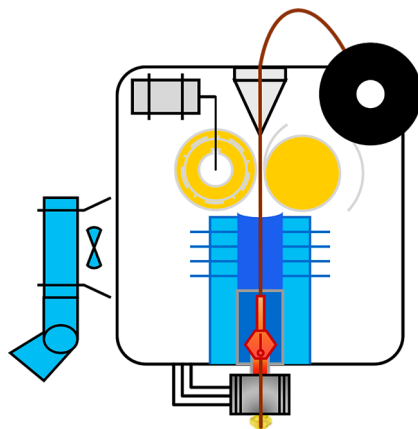
3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 การตรวจสอบเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

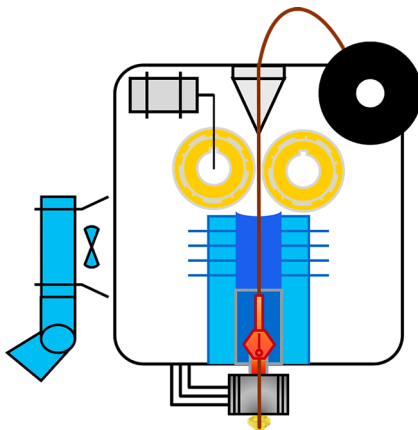
เส้นใยพลาสติก ABS ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการพิมพ์สามมิติโดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.75 มิลลิเมตร มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.05 ถึง ± 0.10 มิลลิเมตร หรือประมาณ ± 2.86 ถึง ± 5.71 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะให้ช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยอมรับได้ประมาณ 1.70–1.80 มิลลิเมตร หรือประมาณ 1.65–1.85 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลจากการวัดทุกระยะ 300 มิลลิเมตร และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 5 พบว่ามีค่าเฉลี่ย 1.77 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.15 มิลลิเมตร (ประมาณ $\pm 8.57\%$) โดยมีช่วงค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ที่ 1.65 และ 1.90 มิลลิเมตร ตามลำดับ [38]–[40] ส่งผลให้ขณะที่พิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบชุดดันเส้นแบบติดกับหัวฉีดดันเส้นเข้าโดยตรง (Dual Drive Extruder) ซึ่งใช้กลไกชุดดันเส้นเฟืองขับแบบเดี่ยวร่วมกับลูกกลิ้ง (Single Gear Extruder + Idler Wheel) หรือเฟืองขับแบบนึ่งระบบสปริงกด (Spring-Loaded Idler) แสดงดังรูปที่ 6 (ก) ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเส้นใยไม่ลื่นไหลและติดขัด เนื่องจากขนาดเส้นใยไม่สม่ำเสมอทำให้ชิ้นงานที่พิมพ์ไม่มีความต่อเนื่อง จึงเกิดข้อบกพร่องด้านมิติและโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 7 (ก) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงเปลี่ยนเป็นกลไกชุดดันเส้นเฟืองขับแบบสองตัว (Dual Drive Extruder) หรือเฟืองขับแบบหนีบเส้นใยพลาสติกทั้งสองด้านด้วยระบบล็อกเฟืองสองด้าน (Active Clamping System) แสดงดังรูปที่ 6 (ข) หลังจากการปรับปรุงกลไกชุดดันเส้นใยสามารถแก้ไขปัญหาได้ดี เส้นใยลื่นไหลและไม่ติดขัดส่งผลให้ชิ้นงานที่พิมพ์มีความต่อเนื่อง ไม่สะดุดและสามารถรักษาความเร็วในการพิมพ์ได้สม่ำเสมอมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 (ข) โดยเฉพาะกับเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเบี่ยงเบนในช่วง 1.65–1.90 มิลลิเมตร ช่วยให้กระบวนการป้อนหรือดันเส้นใยเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าก่อนการปรับปรุง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงกลไกชุดดันเส้นใยสามารถแก้ไขปัญหาในการพิมพ์สามมิติของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5 เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน



(ก) ชุดดันเส้นเฟืองขับแบบเดี่ยวร่วมกับลูกกลิ้ง



(ข) ชุดดันเส้นเฟืองขับแบบสองตัว

รูปที่ 6 ระบบชุดดันเส้นแบบติดหัวฉีด



(ก) ก่อนปรับปรุงระบบชุดต้นเส้นใย



(ข) หลังปรับปรุงระบบชุดต้นเส้นใย

รูปที่ 7 การเปรียบเทียบแบบจำลองเรือ Benchy ของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลก่อนและหลังปรับปรุงระบบชุดต้นเส้นใย



(ก) เส้นใยพลาสติก ABS ใหม่



(ข) เส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบแบบจำลองเรือ Benchy ของเส้นใยพลาสติก ABS ใหม่และรีไซเคิล

3.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการพิมพ์สามมิติ

การเปรียบเทียบความสามารถในการพิมพ์ชิ้นงานจริงของเส้นใยพลาสติก ABS ใหม่ แสดงดังรูปที่ 8 (ก) และเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล แสดงดังรูปที่ 8 (ข) ในด้านคุณภาพผิวชิ้นงานผ่านตรวจสอบ 8 จุดสำคัญ คือ ฮัลล์ ความสมมาตร หน้าแนวนอนแบบระนาบ รูปทรงกระบอก พื้นผิวที่มีความลาดเอียงต่ำ รูแนวนอนขนาดใหญ่ รูแนวนอนขนาดเล็ก และรูเล็กเอียง และความคลาดเคลื่อนขนาดชิ้นงานตามท่อนอกแบบผ่านตรวจสอบ 9 จุดสำคัญ คือ ความกลมของปล่องไฟ (A, B และ C) ขนาดกระบอกหลัง (D, E และ F) ความสูงรวม (G และ H) ขนาดกล่องบรรจุทุก (I, J และ K) ความยาวรวมแนวนอน

(L) ความกว้างรวมแนวนอน (M) เส้นผ่านศูนย์กลางท่อฮอว์สไปป์ (N และ O) ขนาดหน้าต่างด้านหน้า (P) และความยาวหลังคา (Q) [41] ผลจากการเปรียบเทียบ 1) ด้านคุณภาพผิวชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานจากเส้นใยพลาสติก ABS ใหม่มีลักษณะผิวที่เรียบเนียนเส้นขึ้นต่อเนื่องและสม่ำเสมอ มีความคมชัดในจุดฮัลล์หน้าแนวนอนแบบระนาบ รูปทรงกระบอกและมีความสมมาตรของรูปทรงได้ดีในทุกมิติ ทั้งขอบรูแนวนอนขนาดใหญ่ รูแนวนอนเล็ก รวมถึงรูเอียงขนาดเล็ก ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างชั้นและเสถียรภาพเชิงมิติที่ดี ในทางตรงกันข้ามชิ้นงานจากเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลมีลักษณะผิวหยาบ

เส้นชั้นไม่ต่อเนื่อง ความสมมาตรบิดเบี้ยวเล็กน้อย และมีรอยขรุขระชัดเจน โดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวที่มีความลาดเอียงต่ำและรูแนวออนขนาดเล็ก ซึ่งมีขอบที่ไม่คมชัด และ 2) ความคลาดเคลื่อนขนาดชิ้นงานจากตารางที่ 5 พบว่า ชิ้นงานจากเส้นใยพลาสติก ABS ใหม่มีค่าคลาดเคลื่อนขนาดที่มีค่าเป็นศูนย์ในจุดวัด B C D E F G H K O และ P และมีค่าคลาดเคลื่อนในช่วง ± 0.20 มิลลิเมตร ในจุดวัด A I J L M N และ Q และชิ้นงานจากเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลมีค่าคลาดเคลื่อนขนาดที่มีค่าเป็นศูนย์ในจุดวัด B C F G K L และ O เท่านั้น และมีค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเป็น ± 0.50 มิลลิเมตร ในจุดวัด A D E H I J M N P และ Q ดังนั้นเส้นใยพลาสติก ABS ใหม่ให้ความแม่นยำสูงกว่าอย่างชัดเจน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนขนาดเป็นศูนย์ใน 10 จุดวัด และค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 0.20 มิลลิเมตร ในอีก 7 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติที่ต้องการความแม่นยำสูง ส่วนเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลแม้มีค่าคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ใน 7 จุดวัด แต่มีค่าคลาดเคลื่อนที่สูงถึง ± 0.50 มม. ใน 10 จุดที่สำคัญโดยเฉพาะบริเวณที่มีความซับซ้อนของรูปทรงและพื้นที่ขนาดเล็กเหมาะกับการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติทั่วไปที่ไม่ต้องการความละเอียดสูงและเน้นลดต้นทุนวัตถุดิบ

การปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงานพิมพ์สามมิติจากเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านกระบวนการออบโออะซิโตน (Acetone Vapor Smoothing) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการลดรอยเส้นพิมพ์ เพิ่มความเรียบเนียน และความเงางามของพื้นผิว ส่งผลให้ลักษณะภายนอกของชิ้นงานมีความใกล้เคียงกับกระบวนการฉีดขึ้นรูป จึงเหมาะสำหรับชิ้นงานต้นแบบ ชิ้นส่วนอุตสาหกรรม และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคุณภาพผิวสูง [42]–[46] โดยกระบวนการนี้ควรควบคุมระยะเวลาอบในช่วง 20–24 นาที และเติมอะซิโตนลงในกล่องที่มีขนาด $120 \times 170 \times 100$ มิลลิเมตร ให้ระดับสูงจากตัวเครื่องอัลตราโซนิก ประมาณ 1–3.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงระดับที่เหมาะสมสำหรับการสร้างไอระเหยอะซิโตนที่มีประสิทธิภาพ [47]

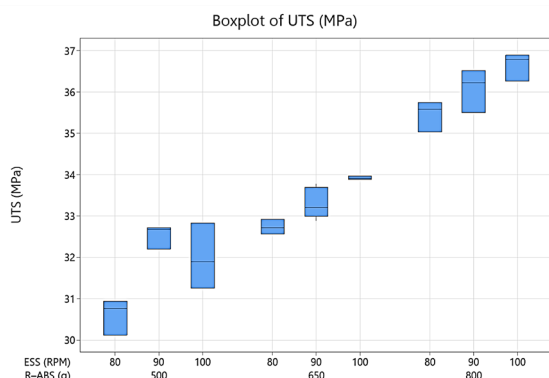
ตารางที่ 5 ความคลาดเคลื่อนขนาดชิ้นงานตามทีออกแบบ

ขนาดทีออกแบบ	ค่าคลาดเคลื่อน	
	Virgin	R-ABS
A = 3.00	-0.10	-0.10
B = 7.00	0.00	0.00
C = 11.00	0.00	0.00
D = 9.00	0.00	-0.10
E = 12.00	0.00	+0.10
F = 0.30	0.00	0.00
G = 48.00	0.00	0.00
H = 15.50	0.00	+0.20
I = 12.00×10.81	-0.10×-0.21	0.00×-0.11
J = 8.00×7.00	0.00×-0.10	-0.40×-0.50
K = 9.00	0.00	0.00
L = 60.00	-0.20	0.00
M = 31.00	-0.10	+0.20
N = 4.00	-0.10	-0.30
O = 0.30	0.00	0.00
P = 10.50×9.50	0.00×0.00	$-0.20 \times +0.10$
Q = 23.00	-0.10	+0.20

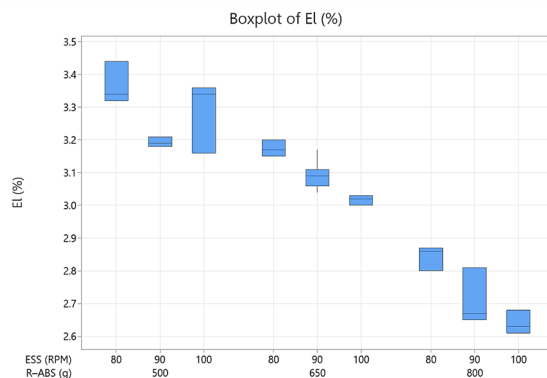
3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS) โดยวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยอัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS) และอัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS) ที่มีอิทธิพลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (%EI) โดยทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเรียงลำดับจากต่ำสุดไปสูงสุด

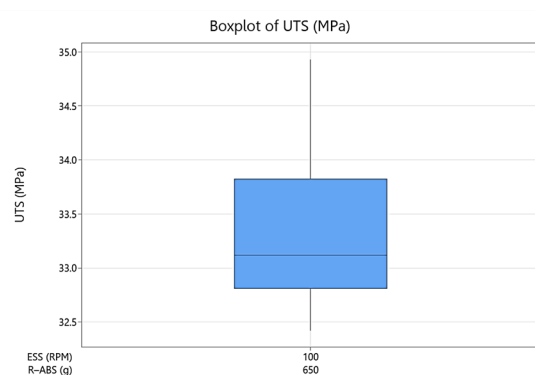
รูปที่ 9 ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS) พบว่า ปัจจัย R-ABS ที่ระดับต่ำ 500 กรัม และปัจจัย ESS ระดับ 80 90 และ 100 รอบต่อนาที ให้ค่า UTS ที่ 30.14–30.94, 32.20–32.72 และ 31.25–32.83 เมกะปาสกาล ปัจจัย R-ABS ที่ระดับกลาง 650 กรัม และปัจจัย ESS ระดับ 80 90 และ 100 รอบต่อนาที ให้ค่า UTS ที่ 32.56–32.92, 32.88–33.78 และ 33.89–33.97 เมกะปาสกาล ปัจจัย R-ABS ที่ระดับสูง 800 กรัม ปัจจัย ESS ระดับ 80 90 และ



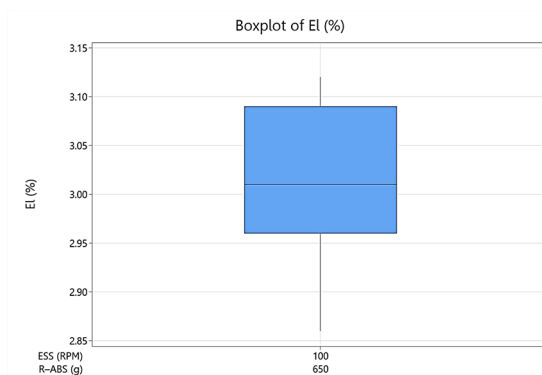
รูปที่ 9 ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS)



รูปที่ 11 ค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (%EL)



รูปที่ 10 การทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS)



รูปที่ 12 การทดลองเพื่อยืนยันผลของค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (%EL)

100 รอบต่อนาที ให้ค่า UTS ที่ 35.03–35.75, 35.50–36.52 และ 36.26–36.89 เมกะปาสคาล และการทดลองเพื่อยืนยันผลจากรูปที่ 10 พบว่า ปัจจัย R-ABS ระดับกลาง 650 กรัม และปัจจัย ESS ระดับสูง 100 รอบต่อนาที ให้ค่า UTS ที่ 32.42–34.93 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

รูปที่ 11 ค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (%EL) พบว่า ปัจจัย R-ABS ที่ระดับสูง 800 กรัม และปัจจัย ESS ระดับ 100 90 และ 80 รอบต่อนาที ให้ค่า %EL อยู่ที่ 2.61–2.68, 2.65–2.8 และ 2.8–2.86 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัย R-ABS ที่ระดับ กลาง 650 กรัม และปัจจัย ESS ระดับ 100 90 และ 80 รอบ ต่อนาที ให้ค่า %EL อยู่ที่ 3.00–3.03, 3.04–3.17 และ 3.15–3.2 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัย R-ABS ที่ระดับต่ำ 500 กรัม ปัจจัย ESS ระดับ 100 90 และ 80 รอบต่อนาที ให้ค่า %EL

ที่ 3.16–3.36, 3.18–3.21 และ 3.32–3.44 เปอร์เซ็นต์ และการทดลองเพื่อยืนยันผลจากรูปที่ 12 พบว่า ปัจจัย R-ABS ระดับกลาง 650 กรัม และปัจจัย ESS ระดับ สูง 100 รอบต่อนาที ให้ค่า %EL ที่ 2.86–3.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากที่กล่าวมาพบว่า เมื่อเพิ่มระดับปัจจัย R-ABS และปัจจัย ESS ส่งผลต่อค่า UTS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะที่ปัจจัย R-ABS ระดับ 800 กรัม และปัจจัย ESS ระดับ 100 รอบต่อนาที ให้ค่า UTS สูงสุดในช่วง 36.26–36.89 เมกะปาสคาล ส่วนค่า %EL มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มระดับปัจจัย R-ABS โดยพบค่าสูงสุดในช่วง 3.32–3.44 เปอร์เซ็นต์ ที่ปัจจัย R-ABS ระดับ 500 กรัม และปัจจัย ESS ระดับ 80 รอบต่อนาที ดังนั้นเงื่อนไขที่ดีที่สุดเหมาะสมที่สุดในการ ผลิตเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล จากการ

ทดลองเพื่อยืนยันผล คือ ปัจจัย R-ABS ระดับ 650 กรัม และ ปัจจัย ESS ระดับ 100 รอบต่อหน้าที่ ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 33.334 เมกะปาสคาล และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุอยู่ที่ 3.012 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.4 การคำนวณปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในกระบวนการพิมพ์สามมิติพบว่าพลังงานที่ใช้ในการทำความร้อนหัวฉีดและฐานพิมพ์มีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียงเล็กน้อย [48] และมีช่วงเวลาน้อยในการปรับอุณหภูมิ จึงไม่ส่งผลต่อสภาพแวดล้อมอย่างนัยสำคัญ [49] แต่ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า Product Carbon Footprint (PCF) อย่างมีนัยสำคัญ คือ ประเภทของวัตถุดิบโดยการใช้เศษพลาสติก ABS รีไซเคิลอยู่ที่ 650 กรัม ($0.146 \text{ kg CO}_2\text{e}$) [50] และเม็ดพลาสติก ABS ใหม่ที่ 350 กรัม ($3.10 \text{ kg CO}_2\text{e}$) อ้างอิงจาก (Bage-plastics) สามารถลดการปล่อย CO_2 ลงได้ถึง 61.94 เปอร์เซ็นต์ ($1.1799 \text{ kg CO}_2\text{e}$) เมื่อเทียบกับการใช้เม็ดพลาสติกใหม่ (100 เปอร์เซ็นต์) แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการนำเศษพลาสติก ABS รีไซเคิลมาใช้ในการขึ้นงานพิมพ์สามมิติ ซึ่งสามารถช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ

3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การวิเคราะห์แบบจำลองของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (%EL) บ่งชี้ถึงข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องตามหลักสถิติและทฤษฎี โดยแบ่งการตรวจสอบออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ 1) การแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวสอดคล้องกับเส้นแนวโน้มปกติ แสดงถึงการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล 2) การตรวจสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูล (Versus Order) พบว่าข้อมูลไม่มีรูปแบบวัฏจักรหรือแนวโน้มที่ผิดปกติ แสดงถึงความเป็นอิสระระหว่างตัวแปร และ 3) การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Versus Fits) พบว่า

ค่าความคลาดเคลื่อนกระจายตัวสมดุรอบค่าศูนย์ทั้งด้านบนและด้านล่าง บอถึงความเสถียรภาพ แม่นยำ และน่าเชื่อถือของชุดข้อมูล

3.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง

การหาโมเดลการทดลองที่เหมาะสม (Final Model) โดยคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากโมเดล และยังคงปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญเก็บไว้ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ โดยการวิเคราะห์ค่า p -value ที่ระดับ นัยสำคัญ 0.05 ของเทอมปัจจัยหลัก (Linear) เทอมกำลังสอง (Square) และเทอมปัจจัยร่วม (Interaction)

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS) พบว่า ค่า p -value ของเทอมโมเดลรวม = 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) แสดงว่าโมเดลการทดลองนี้มีนัยสำคัญทางสถิติและสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดี โดยเทอมของปัจจัยหลัก (Linear) ของปัจจัย R-ABS และปัจจัย ESS มีค่า p -value = 0.000 แสดงว่าส่งผลกระทบท่อค่า UTS อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับเทอมกำลังสอง (Square) พบว่าปัจจัย R-ABS* R-ABS มีค่า p -value = 0.000 แสดงว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปัจจัย ESS*ESS มีค่า p -value = 0.080 ซึ่งใกล้เคียงระดับนัยสำคัญ (p -value = 0.05) จึงถูกนำเข้ามาในโมเดลเพื่อเพิ่มความแม่นยำ หลังจากทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปสร้างสมการทำนายผลแบบเข้ารหัสแสดงได้ดังสมการที่ (1) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์การตัดสินใจ (R -sq) เท่ากับ 93.40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำนายความผันแปร (R -sq (adj)) เท่ากับ 92.62 เปอร์เซ็นต์ และค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ค่าตอบสนอง (R -sq (pred)) = 90.86 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าโมเดลการทดลองนี้ความน่าเชื่อถือและมีความสามารถในการทำนายค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดได้อย่างแม่นยำ

$$UTS = 33.375 + 2.174 (R-ABS) + 0.627 (ESS) + 0.698 (R-ABS*R-ABS) - 0.281 (ESS*ESS) \quad (1)$$

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS)

แหล่งที่มา (Source)	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-value
ตัวแบบ (Model)	4	96.225	24.0562	120.28	0.000
เทอมปัจจัยหลัก (Linear)	2	92.189	46.0945	230.47	0.000
อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS)	1	85.108	85.1078	425.53	0.000
อัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS)	1	7.081	7.0813	35.41	0.000
เทอมกำลังสอง (Square)	2	4.036	2.0178	10.09	0.000
อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS)*อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS)	1	4.033	4.0334	20.17	0.000
อัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS)*อัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS)	1	0.653	0.6525	3.26	0.080
ความผิดพลาด (Error)	34	6.800	0.2000		
ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตัวแบบ (Lack-of-Fit)	4	2.436	0.6091	4.19	0.008
ความผิดพลาดจริง (Pure Error)	30	4.364	0.1455		
รวม (Total)	38	103.025			

S = 0.447218, R-sq = 93.40%, R-sq (adj) = 92.62%, R-sq (pred) = 90.86%

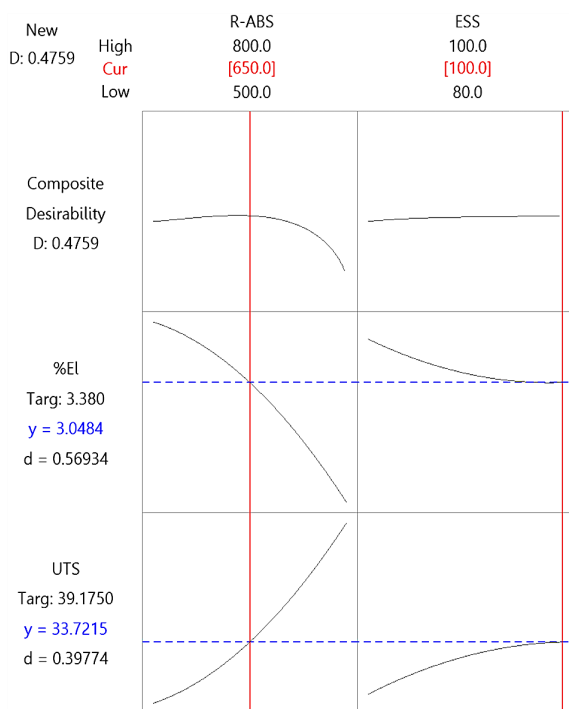
ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุ (%EL)

แหล่งที่มา (Source)	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-value
ตัวแบบ (Model)	5	1.55950	0.31190	105.69	0.000
เทอมปัจจัยหลัก (Linear)	2	1.46356	0.73178	247.96	0.000
อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS)	1	1.36676	1.36676	463.13	0.000
อัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS)	1	0.09680	0.09680	32.80	0.000
เทอมกำลังสอง (Square)	2	0.08454	0.04227	14.32	0.000
อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS)*อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS)	1	0.08439	0.08439	28.59	0.000
อัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS)*อัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS)	1	0.01491	0.01491	5.05	0.031
ปฏิสัมพันธ์สองทาง (2-Way Interaction)	1	0.01141	0.01141	3.87	0.058
อัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS)*อัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS)	1	0.01141	0.01141	3.87	0.058
ความผิดพลาด (Error)	33	0.09739	0.00295		
ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตัวแบบ (Lack-of-Fit)	3	0.02299	0.00766	3.09	0.042
ความผิดพลาดจริง (Pure Error)	30	0.07440	0.00248		
รวม (Total)	38	1.65689			

S = 0.0543245, R-sq = 94.12%, R-sq (adj) = 93.23%, R-sq (pred) = 90.88%

จากตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุ (%EL) พบว่า ค่า p -value ของเทอมโมเดลรวม = 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่าโมเดลการทดลองนี้มีนัยสำคัญทางสถิติ

และสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดี โดยเทอมปัจจัยหลัก (Linear) ของปัจจัย R-ABS และปัจจัย ESS มีค่า p -value = 0.000 แสดงว่าส่งผลกระทบท่อค่า UTS อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับเทอมกำลังสอง (Square) พบว่า



รูปที่ 13 ผลลัพธ์จากฟังก์ชัน Response Optimizer

ปัจจัย R-ABS*R-ABS และปัจจัย ESS*ESS มีค่า p -value = 0.031 แสดงว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และเทอมปัจจัยร่วม (Interaction) พบว่าปัจจัยปัจจัย R-ABS*ESS มีค่า p -value = 0.058 ซึ่งใกล้เคียงระดับนัยสำคัญ จึงถูกนำเข้ามาในโมเดลเพื่อเพิ่มความแม่นยำ หลังจากทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปสร้างสมการทำนายผลแบบเข้ารหัส แสดงได้ดังสมการที่ (2) และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R -sq) เท่ากับ 94.12 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำนายความผันแปร (R -sq (adj)) เท่ากับ 93.23 เปอร์เซ็นต์ และค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ค่าตอบสนอง (R -sq (pred)) = 90.88 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าโมเดลการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือและมีความสามารถในการทำนายค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุได้อย่างแม่นยำ

$$\%El = 3.0793 - 0.2756(R-ABS) - 0.0733(ESS) - 0.1009(R-ABS*R-ABS) + 0.0424(ESS*ESS) - 0.0308(R-ABS*ESS) \quad (2)$$

3.7 การวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมและค่าตอบสนอง

การทำนายระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer จากรูปที่ 13 เป็นผลจากการทำนายพบว่าค่า Composite Desirability ($D = 0.4759$) อยู่ในระดับปานกลาง (0 ถึง 1) บ่งชี้ว่าเงื่อนไขปัจจุบันของปัจจัยอัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS) อยู่ที่ระดับ 650 กรัม และปัจจัยอัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS) อยู่ที่ระดับ 100 รอบต่อนาที เส้นใยที่ได้จะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 33.7215 เมกะปาสคาล และค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุเฉลี่ยอยู่ที่ 3.0484 เปอร์เซ็นต์ ยังไม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เนื่องจากค่าตอบสนองค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุต่ำกว่าค่าเป้าหมาย โดยเฉพาะค่าตอบสนองค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (33.7215 เมกะปาสคาล) ซึ่งต่ำกว่าค่าเป้าหมาย (39.1750 เมกะปาสคาล) ทำให้มีค่า Desirability ระดับต่ำ ($D = 0.39774$) ส่งผลให้ค่า Composite Desirability โดยรวมลดลง ขณะที่ค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุ (3.0484 เปอร์เซ็นต์) ต่ำกว่าค่าเป้าหมาย (3.380 เปอร์เซ็นต์) และมีค่า Desirability ระดับปานกลาง ($D = 0.56934$) ซึ่งยังไม่เพียงพอแต่ละข้ออนให้เห็นถึงความสมดุลระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval; CI) และช่วงการพยากรณ์ (Prediction Interval; PI) ที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าค่าพยากรณ์ของโมเดลยังมีความไม่แน่นอนสูง โดยช่วงค่า PI ของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (32.741–34.702 เมกะปาสคาล) และค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุ (2.9291–3.1677 เปอร์เซ็นต์) ที่ได้มีช่วงค่าที่กว้างซึ่งหมายความว่าค่าผลลัพธ์จากการทดสอบเพื่อยืนยันผลอาจมีการกระจายตัวสูงและแนะนำให้เพิ่มระดับปัจจัยอัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิลไปที่ 700–750 กรัม และปรับลดระดับปัจจัยอัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีดไปที่ 90–95 รอบต่อนาที เพื่อเพิ่มค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าความสามารถในการยึดตัวของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้ค่า Composite Desirability

โดยรวมดีขึ้น รวมถึงเพิ่มจำนวนตัวอย่างเพื่อลดค่าความแปรปรวน ของช่วงความเชื่อมั่น (CI) และช่วงการพยากรณ์ (PI) เพื่อให้การพยากรณ์มีความแม่นยำยิ่งขึ้น ดังนั้นความน่าสนใจของการใช้ฟังก์ชัน Response optimizer คือ การช่วยค้นหา ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลได้อย่างแม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการผลิตจริงได้อย่างมั่นใจ โดยให้คุณสมบัติที่สมดุลระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ ซึ่งเหมาะสม สำหรับการใช้งานในการพิมพ์ 3 มิติ

3.8 การทดลองเพื่อยืนยันผล

จากการวิเคราะห์ Multiple Response Prediction พบว่า เงื่อนไขปัจจุบันแสดงดังรูปที่ 13 โดยช่วงค่า CI ของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (33.353–34.090 เมกะปาสคาล) และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (3.0035–3.0933 เปอร์เซ็นต์) แสดงว่าค่าเฉลี่ยที่แท้จริงของการทดลองเพื่อยืนยันผลน่าจะอยู่ในช่วงนี้ เมื่อนำค่าปัจจัยและระดับปัจจัย ที่วิเคราะห์ได้จากฟังก์ชัน Response optimizer ไปทำการทดสอบเพื่อยืนยันผล โดยทดลองจำนวน 10 ชุด พบว่า ค่าเฉลี่ยที่ได้ของค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 33.334 เมกะปาสคาล และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุเฉลี่ยเท่ากับ 3.012 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงค่า CI และ PI ของค่าพยากรณ์จากโมเดล แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีออกแบบการทดลองพินิจตอบสนองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) สามารถกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลให้ดียิ่งขึ้น

การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลร่วมกับเม็ดพลาสติก ABS ใหม่ และทดสอบสมมติฐานโดยใช้สถิติ t-Test แบบทางเดียว (One Tailed Test) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งสองกรณีเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS) และความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (%EL) คือ กรณีที่หนึ่งการเปรียบเทียบระหว่างการทดลอง ยืนยันผล (33.334 เมกะปาสคาล และ 3.012 เปอร์เซ็นต์) กับ ค่าทำนายผลจากฟังก์ชัน Response optimizer (33.7215

เมกะปาสคาล และ 3.0484 เปอร์เซ็นต์) และกรณีที่สองการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองยืนยันผลกับค่าเฉลี่ยของ Virgin ABS (39.175 เมกะปาสคาล และ 3.38 เปอร์เซ็นต์) ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าเฉลี่ยความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด และความสามารถในการยืดตัวของวัสดุของเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของ Virgin ABS (p -value = 0.000) แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการทำนายผล (p -value = 0.141 และ 0.201) ซึ่งยืนยันได้ว่า ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลได้ดี

3.9 การคำนวณต้นทุนวัตถุดิบ

คำนวณต้นทุนวัตถุดิบ (Production Cost; PC) ในการผลิตเส้นใยพลาสติก ABS รีไซเคิล 1,000 กรัม พิจารณาจากอัตราส่วนเศษพลาสติก 650 กรัม (40 บาทต่อกิโลกรัม) และเม็ดพลาสติกใหม่ 350 กรัม (85 บาทต่อกิโลกรัม) พบ ต้นทุนเศษพลาสติกเท่ากับ 26 บาท และต้นทุนเม็ดพลาสติกใหม่เท่ากับ 29.75 บาท รวมต้นทุน 55.750 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนเม็ดพลาสติกใหม่ 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดต้นทุนได้สูงถึง 34.41 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วัสดุรีไซเคิลในการลดต้นทุนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ

3.10 การพิจารณานำไปใช้งาน

เงื่อนไขการนำวัสดุไปใช้งานจริงโดยพิจารณาจากค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS: CI = 33.353–34.090, PI = 32.741–34.702 เมกะปาสคาล) และค่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (%EL: CI = 3.0035–3.0933, PI = 2.9291–3.1677 เปอร์เซ็นต์) เพราะว่าผลลัพธ์จากฟังก์ชัน Response Optimizer และการทดสอบยืนยันผลให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงค่า CI และ PI แสดงถึงความแม่นยำของการพยากรณ์สมบัติวัสดุ วัสดุนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลางและความยืดหยุ่นเล็กน้อยเพื่อลดความเปราะรองรับแรงดึงและแรงกระแทกเบา โดยไม่เน้น

ความละเอียดของผิว ชิ้นงาน ตัวอย่างชิ้นงาน เช่น ชิ้นส่วนรับแรงต่ำ (Light-Duty Parts) ตัวล็อกขนาดเล็ก (Small Clips) ตัวจับยึดชิ้นส่วน (Brackets, Mounts) ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ใช้แรงน้อย ต้นแบบโมเดลจำลองและของใช้ทั่วไป อย่างไรก็ตาม หากต้องการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวให้เรียบเนียนและลดรอยเส้นพิมพ์ การอบโออะซิโตนสามารถช่วยให้ชิ้นงานมีความเรียบเนียนและความเงางามเพิ่มขึ้น โดยควรควบคุมระยะเวลาและปริมาณอะซิโตนให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการเสียรูปของโครงสร้างและความคลาดเคลื่อนของมิติชิ้นงาน

4. สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองพินผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นโพลีลอสติก ABS จากเศษพลาสติกรีไซเคิลร่วมกับเม็ดพลาสติกใหม่ ผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยอัตราส่วนการเติมเศษพลาสติก ABS รีไซเคิล (R-ABS) ระดับ 650 กรัม และอัตราความเร็วของสกรูในกระบวนการอัดรีด (ESS) ระดับ 100 รอบต่อนาที และเมื่อนำระดับปัจจัยดังกล่าวไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (UTS) เฉลี่ยเท่ากับ 33.334 เมกะปาสคาล และค่าความสามารถในการยืดตัว (%EL) เฉลี่ย 3.012 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรีไซเคิลจะลดลงจากวัสดุใหม่ 14.91 และ 10.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในชิ้นส่วนที่ไม่รับแรงสูง เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักรขนาดเล็ก ต้นแบบ และของใช้ทั่วไป อีกทั้งยังสามารถช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบได้ 34.41 เปอร์เซ็นต์ (ประหยัดได้ 55.75 บาท ต่อ กิโลกรัม) และลดการปล่อยคาร์บอนได้ถึง 61.94 เปอร์เซ็นต์ (1.1799 kg CO₂e) เมื่อเทียบกับการใช้เม็ดพลาสติกใหม่ทั้งหมด (85 บาทต่อ กิโลกรัม และ 3.10 kg CO₂e) สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วัสดุรีไซเคิลในการลดต้นทุนวัตถุดิบและผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งแนวทางดังกล่าวยังสามารถขยายผลไปสู่พลาสติกชีวภาพชนิดอื่น เช่น PLA หรือ PETG เพื่อเพิ่มทางเลือกวัสดุที่ยั่งยืนรองรับการเติบโตของตลาดและอุตสาหกรรมการพิมพ์สามมิติ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตนานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. K. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, "Sustainable bio-composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 10, no. 1/2, pp. 19–26, 2002.
- [2] A. Wattanakornsiri, K. Pachana, S. Kaewpirom, M. Traina, and C. Migliaresi, "Preparation and properties of green composites based on tapioca starch and differently recycled paper cellulose fibers," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 20, pp. 801–809, 2012.
- [3] A. Bismarck, A. Baltazar-y-Jimenez, and K. Sarikakis, "Green composites as panacea? socio-economic aspects of green materials," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 8, pp. 445–463, 2006.
- [4] D. Fico, D. Rizzo, R. Casciaro, and C. E. Corcione, "A review of polymer-based materials for Fused Filament Fabrication (FFF): Focus on sustainability and recycled materials," *Polymers*, vol. 14, no. 3, pp. 465, Jan. 2022.
- [5] C. Burkhardt, P. Freigassner, O. Weber, P. Imgrund, and S. Hampel, "Fused Filament Fabrication (FFF) of 316L green parts for the MIM process,"

- in *Proceedings World PM2016 - AM - Deposition Technologies*, Hamburg, Germany, 2021.
- [6] S. B. Borrelle, J. Ringma, K. L. Law, C. C. Monnahan, L. Lebreton, A. McGivern, E. Murphy, J. Jambeck, G. H. Leonard, M. A. Hilleary, M. Eriksen, H. P. Possingham, H. D. Frond, L. R. Gerber, B. Polidoro, A. Tahir, M. Bernard, N. Mallos, M. Barnes, and C. M. Rochman, "Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution," *Science*, vol. 369, no. 6510, pp. 1515–1518, 2020.
- [7] I. C. Vela, T. B. Vilches, G. Berdes, F. Johnsson, and H. Thunman, "Co-recycling of natural and synthetic carbon materials for a sustainable circular economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 365, pp. 132674, 2022.
- [8] J. Lim, Y. Ahn, and J. Kim, "Optimal sorting and recycling of plastic waste as a renewable energy resource considering economic feasibility and environmental pollution," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 169, pp. 685–696, 2023.
- [9] I. C. Vela, J. Maric, J. González-Arias, and M. Seemann, "Feedstock recycling of cable plastic residue via steam cracking on an industrial-scale fluidized bed," *Fuel*, vol. 355, pp. 129518, 2024.
- [10] W. Yu, M. Li, W. Lei, and Y. Chen, "FDM 3D printing and properties of PBAT/PLA blends," *Polymers*, vol. 16, no. 1140, pp. 1–15, 2024.
- [11] F. Laoutid, S. Lafqir, A. Toncheva, and P. Dubois, "Valorization of recycled tire rubber for 3D printing of ABS- and TPO-based composites," *Materials*, vol. 14, no. 5889, pp. 1–17, 2021.
- [12] O. K. Gohatre, M. Biswal, S. Mohanty, and S. K. Nayak, "An effective sustainable approach towards recycling and value addition of waste poly (vinyl chloride) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) recovered from electronic waste (e-waste)," *Journal of Polymer Research*, vol. 28, no. 328, pp. 1–16, 2021.
- [13] W. Seok, E. Jeon, and Y. Kim, "Effects of annealing for strength enhancement of FDM 3D-printed ABS reinforced with recycled carbon fiber," *Polymers*, vol. 15, no. 3110, pp. 1–20, 2023.
- [14] E. Kuram, G. Timur, B. Ozcelik, and F. Yilmaz, "Influences of injection conditions on strength properties of recycled and virgin PBT/PC/ABS," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 29, no. 12, pp. 1260–1268, 2014.
- [15] T. T. Do, V.-T. Nguyen, H. D. S. Toan, P. S. Minh, T. M. T. Uyen, T. H. Huynh, V. T. Nguyen, and V. T. T. Nguyen, "Influences of TPU content on the weld line characteristics of PP and ABS blends," *Polymers*, vol. 15, no. 2321, pp. 1–14, 2023.
- [16] B. Qiao, G. Hu, M. He, and Y. Li, "Reactive compatibility of recycled HIPS and ABS blends with maleic anhydride grafted styrene-ethylene-butadiene-styrene and oxazoline-modified recycled ABS," *Oxidation Communications*, vol. 39, no. 2A, pp. 2085–2100, 2016.
- [17] V. Kumar, R. Singh, and I. P. S. Ahuja, "On mechanical and thermal properties of cryo-milled primary recycled ABS," *Sadhana*, vol. 45, no. 80, pp. 1–13, 2020.
- [18] M. Hassanien, M. Alkhader, B. A. Abu-Nabah, and W. Abuzaid, "A low-cost process for fabricating



- reinforced 3D printing thermoplastic filaments,” *Polymers*, vol. 15, no. 315, 2023.
- [19] M. Tanase, A. I. Portoaca, A. Dinita, G. Branoiu, F. Zamfir, E.-E. Sirbu, and C. Calin, “Optimizing mechanical properties of recycled 3D-printed PLA parts for sustainable packaging solutions using experimental analysis and machine learning,” *Polymers*, vol. 16, no. 3268, pp. 1–35, Nov. 2024.
- [20] M. Rahimi, M. Esfahanian, and M. Moradi, “Effect of reprocessing on shrinkage and mechanical properties of ABS and investigating the proper blend of virgin and recycled ABS in injection molding,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 12, pp. 2359–2365, 2014.
- [21] M. Waseem, B. Salah, T. Habib, W. Saleem, M. Abas, R. Khan, U. Ghani, and M. U. R. Siddiqi, “Multi-response optimization of tensile creep behavior of PLA 3D printed parts using categorical response surface methodology,” *Polymers*, vol. 12, no. 2962, pp. 1–17, 2020.
- [22] A. Boondaeng, J. Keabpimai, P. Srichola, P. Vaithanomsat, C. Trakunjae, and N. Niyomvong, “Optimization of textile waste blends of cotton and PET by enzymatic hydrolysis with reusable chemical pretreatment,” *Polymers*, vol. 15, no. 1964, pp. 1–15, Apr. 2023.
- [23] A. A. Khalid, A. M. Gora, A. D. Rafindadi, S. I. Haruna, and Y. E. Ibrahim, “Response surface methodology approach for the prediction and optimization of the mechanical properties of sustainable laterized concrete incorporating eco-friendly calcium carbide waste,” *Infrastructures*, vol. 9, no. 206, pp. 1–20, 2024.
- [24] A. I. Andres, M. J. Petron, A. M. Lopez, and M. L. Timon, “Optimization of extraction conditions to improve phenolic content and *in vitro* antioxidant activity in craft brewers’ spent grain using response surface methodology (RSM),” *Foods*, vol. 9, no. 1398, pp. 1–13, 2020.
- [25] S. M. Robles-Apodaca, R. I. Gonzalez-Vega, S. Ruiz-Cruz, M. I. Estrada-Alvarado, L. A. Cira-Chavez, E. Marquez-Rios, C. L. Del-Toro-Sanchez, J. d. J. Ornelas-Paz, G. M. Suarez-Jimenez, and V. M. Ocano-Higuera, “Optimization of extraction process for improving polyphenols and antioxidant activity from papaya seeds (*Carica papaya* L.) using response surface methodology,” *Processes*, vol. 12, no. 2729, pp. 1–24, 2024.
- [26] W. Seok, E. Jeon, and Y. Kim, “Effects of annealing for strength enhancement of FDM 3D-printed ABS reinforced with recycled carbon fiber,” *Polymers*, vol. 15, no. 3110, 2023.
- [27] C. Kneidinger, E. Wagner, M. Langauer, and G. Zitzenbacher, “Estimation of the shear viscosity of mixed-polymer materials for screw extrusion-based recycling process modeling,” *Polymers*, vol. 16, no. 1339, pp. 1–25, 2024.
- [28] P. Kothavade, A. Kafi, C. Dekiwadia, V. Kumar, S. B. Sukumaran, K. Shanmuganathan, and S. Bateman, “Extrusion 3D printing of intrinsically fluorescent thermoplastic polyimide: Revealing an undisclosed potential,” *Polymers*, vol. 16, no. 2798, pp. 1–15, 2024.
- [29] S. Singh and P. Hubert, “High-performance polymer blends: Manufacturing of polyetherimide (PEI)–polycarbonate (PC)–based filaments for 3D printing,” *Polymers*, vol. 16, no. 3384, 2024.

- pp. 1–25, 2024.
- [30] M. N. Ahmad, M. R. Ishak, M. M. Taha, F. Mustapha, Z. Leman, D. D. A. Lukista, Irianto, and I. Ghazali, “Application of taguchi method to optimize the parameter of Fused Deposition Modeling (FDM) using oil palm fiber reinforced thermo plastic composites,” *Polymers*, vol. 14, no. 2140, pp. 1–15, 2022.
- [31] Z. Liu, Q. Lei, and S. Xing, “Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber– based PLA composites fabricated by FDM,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 3741–3751, 2019.
- [32] J. Januteniene, M. Vasylius, A. Tadzijevas, V. K. Sovas, D. Sapalas, and S. Grigaliuniene, “Influence of recycling and UV exposure on the properties of 3D printing polymer materials,” *Polymers*, vol. 16, no. 3292, pp. 1–18, 2024.
- [33] T. Appalsamy, S. L. Hamilton, and M. J. Kgaphola, “Tensile test analysis of 3D printed specimens with varying print orientation and infill density,” *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 121, pp. 1–15, 2024.
- [34] ASTM International, “D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,” *ASTM Standards*, 2022.
- [35] N. A. Patil, K. Joshi, J. Lee, K. E. Strawhecker, R. Dunn, T. Lawton, E. D. Wetzel, and J. H. Park, “Additive manufacturing of thermoplastic elastomer structures using dual material core–shell filaments,” *Additive Manufacturing*, vol. 82, pp. 104044, 2024.
- [36] T. Kurose, Y. Abe, M. V. A. Santos, Y. Kanaya, A. Ishigami, S. Tanaka, and H. Ito, “Influence of the Layer Directions on the Properties of 316L Stainless Steel Parts Fabricated through Fused Deposition of Metals,” *Materials*, vol. 13, no. 2493, pp. 1–12, 2020.
- [37] A. Yankin, Y. Alipov, A. Temirgali, G. Serik, S. D. Nova, D. Talamona, and A. Perveen, “Optimization of printing parameters to enhance tensile properties of ABS and nylon produced by fused filament fabrication,” *Polymers*, vol. 15, no. 3043, pp. 1–15, 2023.
- [38] M. A. Z. Aris, S. Mat, M. S. Sam, F. R. Ramli, M. R. Alkahari, and S. I. A. Kudus, “Design and development of 3D printer filament extruder,” *Proceedings of Mechanical Engineering Research Day 2020*, pp. 293–294, 2020.
- [39] M. N. Ahmad, M. R. Ishak, M. M. Taha, F. Mustapha, and Z. Leman, “A review of natural fiber–based filaments for 3D printing: Filament fabrication and characterization,” *Materials*, vol. 16, no. 11, pp. 4052, 2023.
- [40] Z. A. S. Nafis, M. Nuzaimah, S. I. Abdul Kudus, Y. Yusuf, R. A. Ilyas, V. F. Knight, and M. N. F. Norrahim, “Effect of wood dust fibre treatments reinforcement on the properties of recycled polypropylene composite (r–WoPPC) filament for fused deposition modelling (FDM),” *Materials*, vol. 16, no. 2, pp. 479, 2023.
- [41] Creative Tools. 3DBenchy: A 3D model designed for testing and benchmarking 3D printers. [Online]. Available: <https://3DBenchy.com>.
- [42] S. Juneja, J. S. Chohan, R. Kumar, S. Sharma, R. A. Ilyas, M. R. M. Asyraf, and M. R. Razman, “Impact of process variables of acetone vapor jet drilling on surface roughness and circularity of 3D– printed abs parts: Fabrication and



- studies on thermal, morphological, and chemical characterizations,” *Polymers*, vol. 14, no. 1367, pp. 1–28, 2022.
- [43] A. Garg, A. Bhattacharya, and A. Batish, “Chemical vapor treatment of ABS parts built by FDM: Analysis of surface finish and mechanical strength,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, pp. 2175–2191, 2017.
- [44] A. Mathew, S. R. Kishore, A. T. Tomy, M. Sugavaneshwaran, S. G. Scholz, A. Elkaseer, V. H. Wilson, and A. J. Rajan, “Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: A critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 1161–1178, 2023.
- [45] F. B. Jiménez Aguilar, J. Varela-Soriano, A. Medina-Castro, S. G. Torres-Cedillo, J. Cortes-Perez, and M. Jimenez-Martinez, “Post-fabrication treatment process for ABS printed parts using acetone vapor,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 10, pp. 1561–1574, 2025.
- [46] A. A. Demircali, D. Yilmaz, A. Yilmaz, O. Keskin, M. Keshavarz, and H. Uvet, “Enhancing mechanical properties and surface quality of FDM-printed ABS: A comprehensive study on cold acetone vapor treatment,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, pp. 4027–4039, 2024.
- [47] P. Hongthong and A. Maneeratphairoj, “Development of Surface Improvement Oven for 3D Printing from ABS Material,” Bachelor's Thesis, Department of Industrial Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, 2019.
- [48] J. Tinz, T. de Ancos, and H. Rohn, “Carbon footprint of mechanical recycling of post-industrial plastic waste: Study of ABS, PA66GF30, PC and POM regrinds,” *Waste*, vol. 1, pp. 127–139, 2023.
- [49] M. Elbadawi, A. W. Basit, and S. Gaisford, “Energy consumption and carbon footprint of 3D printing in pharmaceutical manufacture,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 639, pp. 122926, 2023.
- [50] M. E. Hernandez, J. A. Albajez, M. P. Lamban, J. Royo, J. Santolaria, and L. C. Ng Corrales, “Fused deposition modelling process environmental performance through the carbon footprint evaluation,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1193, pp. 012127, 2021.