

การพัฒนาเครื่องอัดรีดเพื่อการผลิตเส้นพลาสติก สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ จากวัสดุรีไซเคิล

Development of an Extruder in the Making of 3D Printing Filament from Recycled Plastics

วีระยุทธ จิตวิริยะ^{1*}, สติชัย ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์² และบุญฤทธิ์ แก้วประชุม³

Weerayut Jitwiriya^{1*}, Sittichai Limrungruengrat² and Boonrit Kaewprachum³

^{1*,2,3}คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาชื่น 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

^{1*,2,3}College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

E-mail : weerayut.j@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ 25 พฤษภาคม 2564

Received May. 25, 2021

วันที่รับแก้บทความ 27 กรกฎาคม 2564

Revised Jul. 27, 2021

วันที่ตอบรับบทความ 6 กันยายน 2564

Accepted Sep. 6, 2021

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างมากสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมสมัยใหม่ วัสดุสำหรับการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติเป็นพลาสติกมีราคาแพง นอกจากนี้ในปัจจุบันพบปัญหาด้านขยะพลาสติกมีจำนวนมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกรีไซเคิลสำหรับงานพิมพ์ 3 มิติ โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดรีด คุณภาพของการอัดรีด คุณภาพการพิมพ์ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ พลาสติกรีไซเคิล 3 ประเภทที่ทำการทดลองในศึกษานี้คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) อะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (ABS) และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกรีไซเคิลที่สร้างขึ้น สามารถทำงานแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล (PLC) โปรแกรมควบคุมระบบความร้อนและระบบม้วนจัดเก็บเส้นพลาสติกถูกเพิ่มในเครื่องอัดรีดด้วย ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอัดรีดอยู่ที่ร้อยละ 72.9 ถึงร้อยละ 78.3 การทดสอบการอัดรีดเส้นพลาสติกรีไซเคิล PLA ไม่สามารถอัดรีดและคงตัวตามรูปแบบของหัวดายได้ ส่วนพลาสติกรีไซเคิล HDPE และ ABS สามารถอัดรีดออกมาเป็นเส้นพลาสติกได้ด้วยคุณภาพความกลมร้อยละ 60 (HDPE) และร้อยละ 78 (ABS) นอกจากนี้ การทดสอบการขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติของ ABS แสดงผลลัพธ์ที่ดีกว่า HDPE อย่างมีนัยสำคัญในแง่ของความสมบูรณ์ของพื้นผิวสำเร็จ ความง่ายในการพิมพ์และการยึดติดกันระหว่างชิ้นในด้านเศรษฐศาสตร์ จะเห็นว่าพลาสติกรีไซเคิล ABS สามารถทดแทนวัสดุสำหรับงานการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ ได้และลดต้นทุนค่าวัสดุลงได้มากถึงร้อยละ 38.5

คำสำคัญ: เครื่องอัดรีดเส้นพลาสติก, การรีไซเคิลขยะพลาสติก, งานพิมพ์ 3 มิติ, วัสดุทดแทน

Abstract

3D printing has escalated in popularity in modern engineering design. Plastic materials for 3D printing are expensive and the large increase in the amount of plastic waste is an issue nowadays. Thus, this research aimed to develop a recycled plastic extruder for 3D printing by considering the performance of the extruder, the quality of extrusion, the quality of 3D printing, and the economic aspect. Three sample types of recycled plastics were experimented with in this study: 1) High Density Polyethylene (HDPE); 2) Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS); and 3) Polylactic Acid (PLA). The created recycled plastics extruder was programmed and automatically operated by an application of Programmable Logic Controller (PLC). A thermo controller and a rolling storage system were extended onto the device. The average efficiency test result of the extruder was 73.9% to 78.3%. In the extrusion experiment, the PLA recycled plastic could not be extruded into strands and stabilized according to the die shape, whereas the recycled plastics of HDPE and ABS could be extruded into strands with physical roundness of 60% and 78% respectively. Moreover, the 3D printing experiment of ABS showed a significantly greater result over HDPE in terms of surface completion, facility of printing and adhesiveness among layers of printing. Economically, it can be highlighted that the ABS recycled plastic can be an alternative 3D printing material with a cost reduction at 38.5%.

Keywords: Plastics Extruder, Plastics Waste Recycling, 3D Printing, Alternative Material

1. บทนำ

การออกแบบชิ้นงานในปัจจุบันมีการพัฒนาและใช้เทคโนโลยีการขึ้นรูปชิ้นงานแบบ 3 มิติ กันอย่างแพร่หลาย (Shahrubudin, N., et al., 2019) (Srinivasa, P., et al., 2018) โดยมีบทบาทและความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในวงการอุตสาหกรรม การแพทย์ การวิจัยและการศึกษา สำหรับการช่วยสร้างชิ้นงานต้นแบบหรือการสร้างชิ้นส่วนทดแทนต่าง ๆ วัสดุพลาสติกที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดคือ PLA และ ABS คุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันสามารถจำแนกได้ดังนี้ ความง่ายในการพิมพ์ขึ้นรูป รูปลักษณ์ของชิ้นงานเมื่อพิมพ์เสร็จ ความแข็งแรงของชิ้นงาน ความยืดหยุ่น การทนต่อแรงกระแทก การทนความร้อนและการเชื่อมประสานกันระหว่างชิ้น ในขณะการขึ้นรูป เป็นต้น สำหรับการสร้างชิ้นงานที่ไม่จำเป็นต้องมีคุณภาพของชิ้นงานที่ดีมากนัก การใช้วัสดุทดแทนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดการสิ้นเปลืองในการสร้างชิ้นงานต้นแบบได้

ในปัจจุบันมีการใช้สิ่งของและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ผลิตจากพลาสติกในชีวิตประจำวัน เป็นปริมาณมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากเช่นกัน (Buranasing, N., 2019) ดังนั้นทางภาครัฐจึงให้ความสำคัญกับผลเสียที่เกิดจากขยะพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและมลพิษในสิ่งแวดล้อม จึงได้มีนโยบายเร่งด่วนเพื่อตอบสนองต่อปัญหาและแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกที่เกิดขึ้น จากการศึกษาปริมาณขยะภายนอกประเทศ (Wasadadamrongdee, S., 2019) พบว่าปริมาณขยะพลาสติกมากกว่าร้อยละ 79 ยังคงสะสมตกค้างในสิ่งแวดล้อม

โดยมีเพียงร้อยละ 9 ที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ (รีไซเคิล) ส่วนสถานการณ์ขยะพลาสติกในกรุงเทพ (Phromphak, C., 2020) ยังคงพบขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษางานวิจัยวิธีการแก้ไข และแนวทางการลดขยะพลาสติกจากต่างประเทศ (Muhammad, I. et al., 2018) จากปี ค.ศ.1999 ถึง ค.ศ.2017 ได้มีการนำเสนอหลากหลายเทคนิคในการกำจัดขยะพลาสติก โดยเทคนิคที่ไม่มี ความซับซ้อนและสะดวกต่อการนำมาประยุกต์ใช้คือ การรีไซเคิลและการแปลงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ ซึ่งสอดคล้องกับทางภาคเอกชน (Green Globe Institute, 2018) ดังนั้นการนำขยะพลาสติกมาสร้าง มูลค่าด้วยการนำมารีไซเคิลจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจอย่างมาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำประเด็นค่าวัสดุพลาสติกสำหรับงานขึ้นรูป 3 มิติ และปัญหาด้านขยะ พลาสติกมาประยุกต์เข้าด้วยกัน ด้วยการออกแบบและการสร้างเครื่องอัดรีด (Extruder) ตัวเครื่อง สามารถควบคุมอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิดแบบอัตโนมัติ และสามารถม้วนเก็บไว้ในที่ม้วนเก็บเส้นพลาสติกได้ มีการทดสอบการรีดเส้นพลาสติก การพิมพ์ขึ้นรูป ประสิทธิภาพ ของเครื่องอัดรีดและการวิเคราะห์ความคุ้มค่าสำหรับการนำพลาสติกกรีไซเคิลมาใช้ในการพิมพ์ ขึ้นรูป 3 มิติ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกที่สามารถควบคุมการทำงาน แบบอัตโนมัติด้วย PLC สำหรับพลาสติกกรีไซเคิลชนิด PLA ABS และ HDPE

2.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดรีด

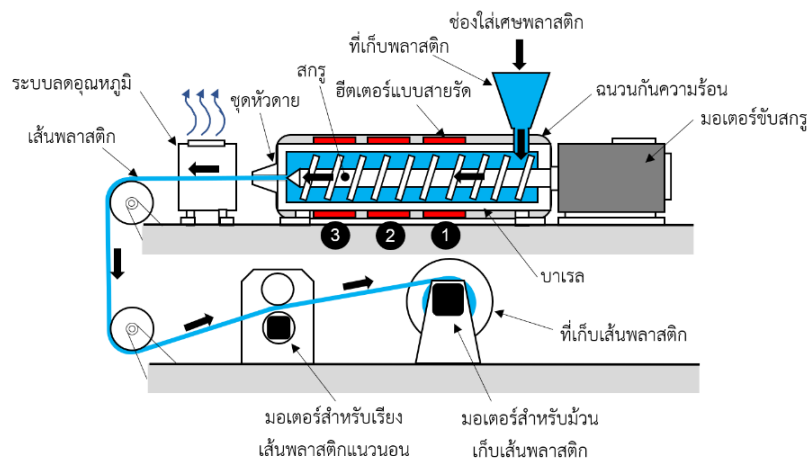
2.3 เพื่อศึกษาคุณภาพของการอัดรีดเส้นพลาสติกและการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ

2.4 เพื่อประเมินความคุ้มค่าจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการนำพลาสติกกรีไซเคิล เป็นวัสดุทดแทนในงานขึ้นรูป 3 มิติ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แนวคิดการออกแบบเครื่องอัดรีด

หลักการออกแบบเครื่องอัดรีดและระบบควบคุมการทำงานด้วย PLC แบบอัตโนมัติ ตามภาพที่ 1 เศษพลาสติกส่งผ่านบาเรลด้วยสกรูเดี่ยว (Single screw) ขณะเดียวกันถูกให้ความร้อน ด้วยฮีตเตอร์ 3 ชุด และเคลื่อนที่ผ่านหัวดายที่มีหน้าตัดแบบวงกลม 1.75 mm ชนิดของพลาสติก รีไซเคิลที่เลือกมาใช้ คือ PLA ABS และ HDPE คุณสมบัติพื้นฐาน อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง ของบาเรล (T_1 , T_2 และ T_3) และอุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) ของพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 มีสเต็ปมิ่งมอเตอร์ (Stepping motor) ที่สามารถปรับความเร็วรอบการหมุนของสกรู มีระบบจัดเรียงเส้นพลาสติกเข้าโรลเก็บ มีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) type J สำหรับการวัด อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของบาเรลจำนวน 3 ตัว ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอัดรีดสามารถ ควบคุมและกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังนี้ อัตราการป้อนพลาสติก การทำงานของฮีตเตอร์ ความเร็ว ในการเก็บเส้นพลาสติกเข้าม้วนและอุณหภูมิที่บาเรล รวมถึงมีระบบการเก็บค่าตัวแปรข้อมูล ทั้งอุณหภูมิของบาเรลแต่ละตำแหน่ง ความเร็วของเส้นพลาสติกและความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน



ภาพที่ 1 แนวคิดการออกแบบเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติก

ตารางที่ 1 สมบัติของพลาสติก

ชนิดพลาสติก	ρ (kg/m ³) (ASTM D1505)	C_p (KJ/kg·°C) (ASTM E1269)	T_m (°C)	T_{zone} (°C)		
				T ₁	T ₂	T ₃
ABS	1030 – 1090	1.67	196.1 – 225.6	179.4 – 205.6	198.9 – 230.0	182.2 – 235.0
PLA	1240 -1270	1.80	190.0 – 230.0	160.0 – 180.0	168.9 – 200.6	175.0 – 205.6
HDPE	942 – 988	1.90-1.92	181.1 – 218.3	135.0 – 241.1	162.8 – 221.1	156.7 – 235.6

3.2 การคำนวณเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติก

1) การประมาณขนาดของเครื่องอัดรีดตามขนาดของสกรู (Ugboya, A.P. Et al., 2019) กำหนดให้สกรูเป็นแบบสกรูเดี่ยวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ความยาวของบาริลจากช่องใส่พลาสติกจนถึงหัวตาย 600 mm ช่วงการป้อน 100 mm ช่วงการอัดตัว 300 mm ช่วงปลายบาริล 200 mm ระยะพิทของสกรู (β) 25 mm ความหนาของสันสกรู (e) 2.5 mm ความลึกของฟันสกรู (H) 2.5–3.75 mm ระยะห่างระหว่างสันสกรูและบาริล (δ) 0.0625 mm มุมองศาของสกรู (θ) 17.65° และขนาดของหัวตายมีโปรไฟล์เป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 mm

2) การประมาณความร้อนสำหรับการหลอมมวลพลาสติกภายในเครื่องอัดรีดตามสมการ 1 คือ $\dot{m}_c c_p \Delta T + \dot{m}_c \Delta h_f$ และการสูญเสียความร้อนสู่แวดล้อมคือ $\dot{q}_{loss}$ โดยที่ $\dot{q}_{heat}$ คือ พลังงานความร้อนที่ต้องการ (W), $\dot{m}_c$ คือ อัตรามวลพลาสติก (kg/s), c_p คือ ค่าความจุความร้อนของพลาสติก (J/kg·°C), ΔT คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C), Δh_f คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (J/kg) และ $\dot{q}_{loss}$ คือ การสูญเสียความร้อนสู่แวดล้อม (W)

$$\dot{q}_{heat} = \dot{m}_c c_p \Delta T + \dot{m}_c \Delta h_f + \dot{q}_{loss} \quad (1)$$

กำหนดการพิจารณาเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ ของพลาสติกในตารางที่ 1 ณ สภาวะคงที่ จากอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C (T_i) ไปจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว 250°C (T_o) อัตราการผลิตเส้นพลาสติก 50 cm/min ส่วน Δh_f มีค่าเป็น 0 เนื่องจากโครงสร้างของพลาสติกเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) ความร้อนที่ต้องใช้ในการหลอมเหลวพลาสติกอยู่ที่ 8 W 8.3 W และ 10.1 W ของ ABS HPDE และ PLA การวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนที่พื้นผิวของบาริลกับอากาศแวดล้อมเป็นการพาความร้อนแบบอิสระ (John, H.L. IV and John, H.L. V, 2019) อากาศเคลื่อนที่ผ่านรูปทรงกระบอกในแนวนอนขนานกับพื้นจากล่างขึ้นบน บาริลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 90 mm อุณหภูมิฟิล์มเท่ากับค่าเฉลี่ยของ T_i และ T_o ค่า Kinematic Viscosity (ν) $2.773 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ค่าการนำความร้อน (k) 0.034 W/m.K และ Prandtl number (Pr) 0.704 สามารถคำนวณค่า Rayleigh number (Ra) ได้ 3.492×10^{-6} ค่า Nusselt number (Nu) ได้ 20.786 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ประมาณ $7.86 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ดังนั้นปริมาณการสูญเสียความร้อน ($\dot{q}_{loss}$) จากพื้นผิวบาริลภายนอกสู่อากาศแวดล้อมเท่ากับ 244.7 W เพราะฉะนั้นจากสมการ (1) พิจารณาเฉพาะ PLA (ค่ามากที่สุด) จะได้ความร้อนที่ต้องการทั้งหมด 254.8 W มี Safety Factor (S.F.) เท่ากับ 4 จะได้ 1,019.2 W สรุปเลือกใช้ฮีตเตอร์แบบสายรัดขนาด 350 W จำนวน 3 ชุด

3) การประมาณขนาดกำลังมอเตอร์ขับเคลื่อน (Ugboya, A.P. Et al., 2019) ความเร็วรอบของสกรู N หาได้จากสมการ (2) โดยกำหนดให้มีปริมาตรการไหลมากที่สุด (Q_{max}) มีค่าเท่ากับอัตราการไหลแบบแรงจุด (Q_d) $2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ ของ PLA การรั่วระหว่างสกรูและบาริล (Q_l) และอัตราการไหลจากความดันตกคร่อม Q_p มีค่าเท่ากับ 0 m^3/s ดังนั้น N มีค่าประมาณ 73.42 rpm กรณีพิจารณาความดันสูงสุด (P_{max}) ที่ปลายทางออกของหัวตายเกิดขึ้นเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ ดังนั้น Q_p เท่ากับ Q_d แสดงได้ตามสมการ (3) โดยที่ η คือ ความหนืดของพลาสติกเหลว กำหนดให้มีค่าประมาณ $8.9 \times 10^5 \text{ Pa.s}$ ดังนั้น P_{max} มีค่าประมาณ $4.012 \times 10^9 \text{ Pa}$ เพราะฉะนั้นขนาดของสเต็ป มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนคำนวณจากผลคูณของ P_{max} และ Q_{max} โดยมี S.F. เท่ากับ 1.5 จะได้ขนาดของสเต็ปมอเตอร์ประมาณ 120.68 W ที่ความเร็วรอบไม่น้อยกว่า 110 rpm

$$N = \frac{2Q_{max}}{\pi DWH(\cos \theta)} \quad (2)$$

$$P_{max} = \frac{6\eta\pi LDN(\cos \theta)}{H^2(\sin \theta)} \quad (3)$$

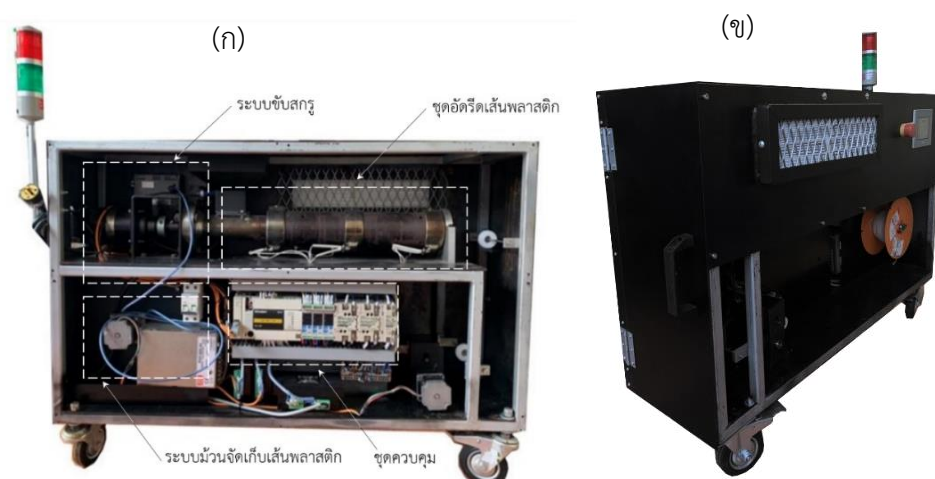
3.3 ระบบควบคุม

การควบคุมเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกใช้ PLC รุ่น FX-3U16MT เป็นหน่วยประมวลผล มีการรับและส่งสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจากอุปกรณ์ภายนอกผ่านหน้าจอ HMI แบบทัชสกรีน สำหรับการสั่งการทำงานและตั้งค่าการทำงานของส่วนต่าง ๆ โดยที่ Port ของ PLC สามารถเก็บข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ในระบบผ่านทางช่อง USB เช่น วัน เวลา อุณหภูมิ ความเร็วรอบมอเตอร์ ความยาวของเส้นพลาสติกและความเร็วในการผลิตของเส้น สามารถตั้งค่าโปรแกรมสำหรับการรักษา

ระดับของอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด ($\pm 1.5^{\circ}\text{C}$) มีฟังก์ชันควบคุมการหมุนของสตีปิ้งมอเตอร์สำหรับการป้อนและระบบม้วนเก็บเส้นพลาสติกแบบอัตโนมัติ

3.4 การสร้างชุดเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกรีไซเคิล

จากการออกแบบในหัวข้อที่ 3.1 ถึง 3.3 จึงสามารถสร้างชุดเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกรีไซเคิลได้ดังภาพที่ 2 (ก) โดยมีส่วนประกอบหลักดังนี้ ระบบขับเคลื่อนสกรู ชุดอัดรีดเส้นพลาสติก ระบบม้วนจัดเก็บเส้นพลาสติกและชุดควบคุม ส่วนในภาพที่ 2 (ข) แสดงลักษณะภายนอกเครื่องอัดรีด



ภาพที่ 2 เครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกรีไซเคิล (ก) ส่วนประกอบภายใน (ข) ลักษณะภายนอก

4. ผลการวิจัย

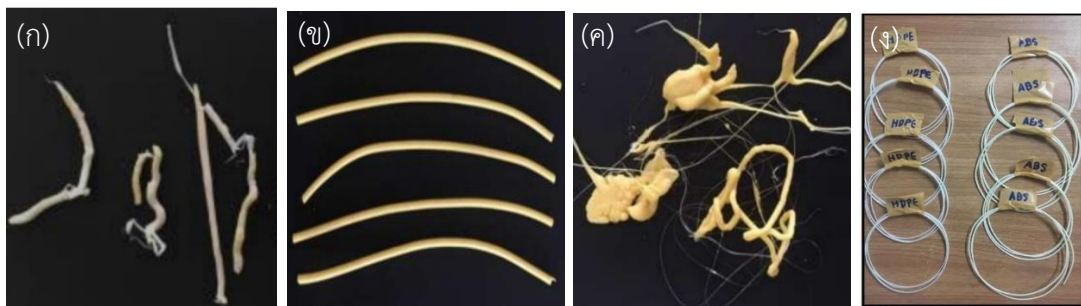
4.1 การทดสอบคุณภาพการอัดรีดเส้นพลาสติก

การทดลองและการวิเคราะห์มีการทดสอบการปรับค่าความเร็วรอบของสกรูที่ 60 rpm, 65 rpm, 70 rpm, 75 rpm และ 80 rpm ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยในการรีดเส้นพลาสติกจากการทดสอบการให้ความร้อนกับบาร์เล่เบื้องต้นพบว่า ขนาดสเกลของบาร์เล่ไม่ใหญ่มากและตำแหน่งของฮีตเตอร์ห่างกันไม่มากตามภาพที่ 1 จึงส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของบาร์เล่ที่ 3 ตำแหน่งต่างกันประมาณ $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ การทดสอบอุณหภูมิเริ่มต้นของพลาสติก 3 ชนิด ที่ความเร็วรอบขับเคลื่อน 60 rpm พบว่าสามารถเริ่มต้นกระบวนการอัดรีดได้ ABS ที่ 170°C PLA ที่ 120°C และ HDPE ที่ 155°C ดังนั้นการตั้งค่าอุณหภูมิในการรีดเส้นพลาสติกแสดงได้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การตั้งค่าอุณหภูมิในการทดลองการอัดรีดพลาสติก

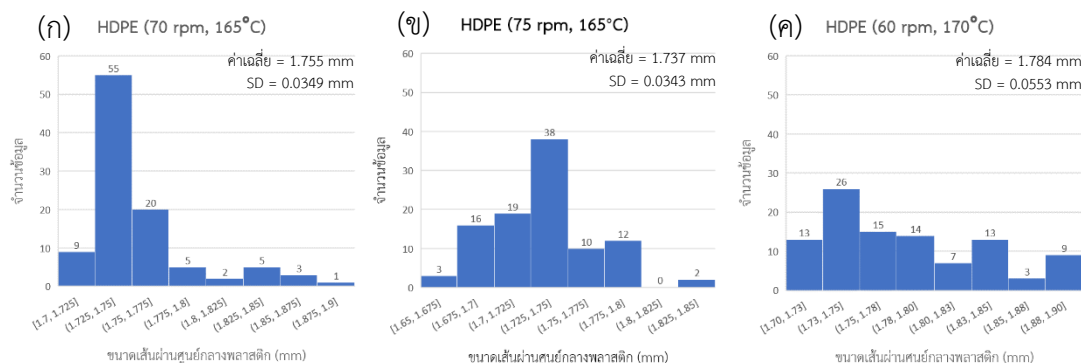
พลาสติก	อุณหภูมิที่ 1	อุณหภูมิที่ 2	อุณหภูมิที่ 3	อุณหภูมิที่ 4	อุณหภูมิที่ 5
ABS	$170.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$175.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$180.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$185.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$190.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$
PLA	$120.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$130.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$140.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$150.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$160.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$
HDPE	$155.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$160.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$165.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$170.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$	$175.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$

ผลการอัดรีดเส้นพลาสติก HDPE ABS และ PLA จากการเก็บข้อมูลด้วยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเวอร์เนียร์ดิจิตอลความละเอียด 2 ตำแหน่ง การวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางทุก ๆ 90 องศา (จำนวน 2 ข้อมูลต่อ 1 จุด และหาค่าเฉลี่ย) สำหรับในทุก ๆ ความยาว 10 cm เป็นความยาวต่อเนื่องทั้งหมด 10 m จำนวนการทดลองละ 10 ชุดข้อมูล พบว่าการอัดรีดเส้น PLA ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 120°C ไม่สามารถอัดฉีดขึ้นรูปได้สมบูรณ์ ชุดขับเคลื่อนสกรูเกิดเสียงขัดกันภายในเนื่องจากอุณหภูมิในการหลอมเหลวไม่มากพอ ส่วนภาพที่ 3 (ก) คือผลการอัดรีดเส้นที่อุณหภูมิเฉลี่ย 130°C พบว่าเส้นพลาสติกมีลักษณะโค้งงอ ขาดจากกันได้ง่ายไม่สามารถดึงเป็นเส้นได้ ส่วนผลของการอัดรีดที่อุณหภูมิเฉลี่ย 140°C แสดงตามภาพที่ 3 (ข) พบว่าเส้นพลาสติกสามารถอัดรีดเป็นเส้นได้เกือบสมบูรณ์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.3 mm มีลักษณะแข็งกรอบ แตกหักได้ง่าย ไม่มีความยืดหยุ่น จึงไม่สามารถม้วนเก็บได้ ส่วนผลการอัดรีดที่อุณหภูมิ 150°C ตามภาพที่ 3 (ค) พบว่าลักษณะของเส้นพลาสติกเหลวมากเกินไปและแข็งตัวเป็นก้อนอย่างรวดเร็วจากผลลัพธ์ดังกล่าว จึงได้ทดสอบเพิ่มเติมที่อุณหภูมิเฉลี่ย 145°C พบว่าได้ผลคล้ายคลึงกับการทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C

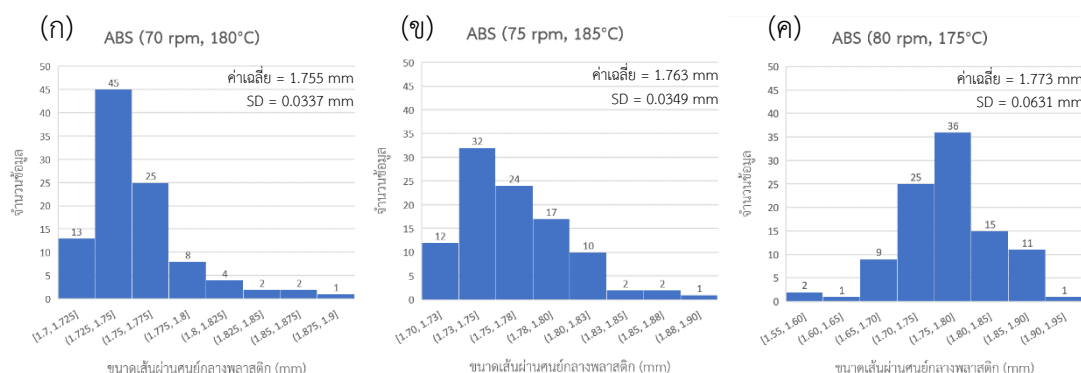


ภาพที่ 3 ผลการอัดรีดเส้น (ก) PLA อุณหภูมิ 130°C (ข) PLA ที่อุณหภูมิ 140°C (ค) PLA ที่อุณหภูมิ 150°C (ง) HDPE และ ABS

ส่วน HDPE และ ABS สามารถอัดรีดเป็นเส้นและม้วนเก็บเข้าม้วนเก็บได้ ตามภาพที่ 3 (ง) ผลการอัดรีดเส้นพลาสติกชนิด HDPE และ ABS แสดงเป็นข้อมูลแบบแผนภูมิฮิสโตแกรมแจกแจงความถี่ของขนาดความกลมเส้นพลาสติก ความเร็วรอบในการอัดรีดเส้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดของ HDPE คือ 70 rpm ที่ 165°C ในภาพที่ 4 (ก) รองลงมาเป็น 75 rpm ที่ 165°C ในภาพที่ 4 (ข) และ 60 rpm ที่ 170°C ในภาพที่ 4 (ค) ตามลำดับ ส่วน ABS คือ 70 rpm ที่ 180°C ในภาพที่ 5 (ก) รองลงมาเป็น 75 rpm ที่ 185°C ในภาพที่ 5 (ข) และ 80 rpm ที่ 175°C ในภาพที่ 5 (ค) ตามลำดับ

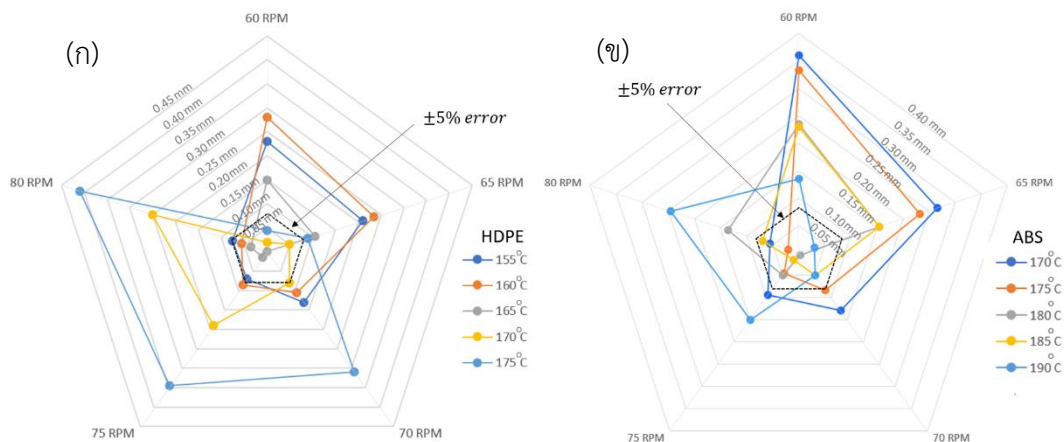


ภาพที่ 4 ข้อมูลการวัดขนาดเส้นพลาสติก HDPE (ก) ที่ 70 rpm อุณหภูมิ 165°C (ข) ที่ 70 rpm อุณหภูมิ 165°C (ค) ที่ 80 rpm อุณหภูมิ 175°C



ภาพที่ 5 ข้อมูลการวัดขนาดเส้นพลาสติก ABS (ก) ที่ 70 rpm อุณหภูมิ 180°C (ข) ที่ 75 rpm อุณหภูมิ 185°C (ค) ที่ 80 rpm อุณหภูมิ 175°C

เมื่อนำข้อมูลทุกสภาวะในการทดลองมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณภาพเชิงสถิติด้วยการแสดงเป็นแผนภูมิเรดาร์ โดยข้อมูลแสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ต่างจากขนาดมาตรฐานที่กำหนด 1.75 mm สำหรับแต่ละอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (แสดงเป็นจุดสีข้อมูล 5 อุณหภูมิ) และความเร็วรอบของมอเตอร์สำหรับการอัดรีด (60 rpm, 65 rpm, 70 rpm, 75 rpm, 80 rpm) แสดงตามภาพที่ 6 (ก) และภาพที่ 6 (ข) สำหรับพลาสติก HDPE และ ABS กำหนดโซนรอบค่าขนาดที่ยอมรับได้อยู่ที่ $\pm 5\%$ หรือ ± 0.0875 mm แสดงผลอยู่ภายในกรอบเส้นประและแสดงตามตารางที่ 3



ภาพที่ 6 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขนาดความกลมของการอัดรีดพลาสติกรีไซเคิล (ก) HDPE (ข) ABS

ตารางที่ 3 การตั้งค่าอุณหภูมิและความเร็วรอบในการอัดรีดพลาสติกที่น้อยกว่า error $\pm$ 5%

ชนิด	อุณหภูมิในกระบวนการอัดรีด (°C)				
	60 rpm	65 rpm	70 rpm	75 rpm	80 rpm
HDPE	170,175	170	165,170	155,165	155,160,165
ABS	-	170	175,180,190	175,180,185	170,175,180

ผลการอัดรีดเส้นพลาสติกทั้ง 3 ชนิด พบว่า ชนิด PLA ไม่สามารถอัดรีดขึ้นรูปเป็นเส้นได้ในทุก ๆ อุณหภูมิที่กำหนด เกิดจากส่วนผสมของสารเคมีของ PLA ที่ไม่เหมือนกันจากผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด จึงทำให้การหาจุดหลอมเหลวของ PLA และพฤติกรรมการแข็งตัวของพลาสติกเป็นไปได้อย่างยาก ส่วน HDPE และ ABS พบว่าเกิดความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความเร็วรอบของกระบวนการอัดรีด โดยที่ชนิด HDPE ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 165°C ลงมา ทำให้เส้นพลาสติกมีขนาดใกล้เคียงขนาดที่กำหนดมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบ แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงมากกว่า 165°C ส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่ผกผันกัน ส่วนชนิด ABS ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 175°C ลงมา การเพิ่มความเร็วรอบส่งผลให้ขนาดของเส้นพลาสติกใกล้เคียงขนาดที่กำหนดมากขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิ 180°C 185°C และ 190°C โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมอยู่ที่ 70 rpm 75 rpm และ 65 rpm ตามลำดับ

4.2 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติก

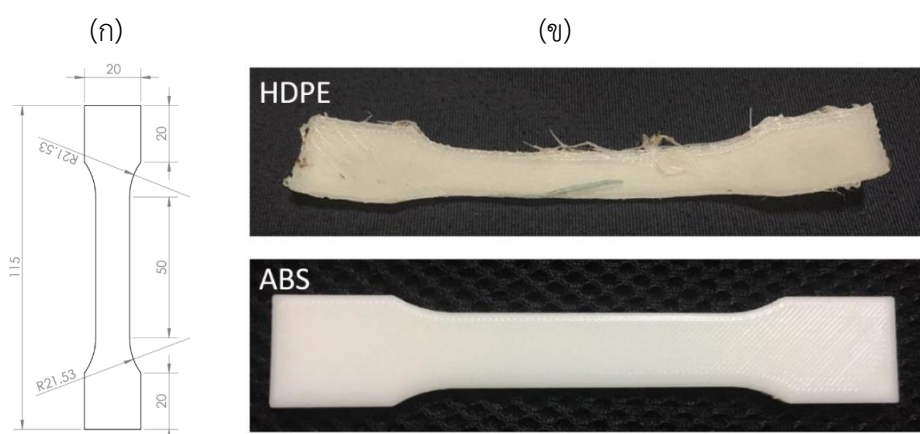
1) ประสิทธิภาพการผลิตเส้นพลาสติก จากสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของเศษมวลพลาสติกที่ใส่เข้าไปกับมวลเส้นพลาสติกที่ออกมา ที่ผลการทดลองการอัดรีดเส้นพลาสติกของ HDPE และ ABS มวล 100 g ที่ความเร็วรอบ 70 rpm และอุณหภูมิ 170°C เก็บข้อมูลมวลเส้นพลาสติกและเวลาในการอัดรีดอย่างละ 10 ชุดข้อมูล พบว่าชนิด HDPE ใช้เวลาเฉลี่ยในกระบวนการอัดรีดประมาณ 14.6 นาที ที่ประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 72.9 ส่วนชนิด ABS ใช้เวลาเฉลี่ยในกระบวนการอัดรีดประมาณ 22.4 นาที ที่ประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 78.3

2) ประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิ จากการทดสอบโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการอัดรีดจากการกำหนดช่วงอุณหภูมิจากที่กำหนด ± 1.5 °C ที่อุณหภูมิ 170°C ความเร็ว

รอบ 70 rpm เป็นเวลา 1 ชม เก็บข้อมูลทุก ๆ 10 วินาที ที่สภาวะของอุณหภูมิคงที่ของพลาสติก ABS และ HDPE พบว่ามีค่าผิดพลาดของอุณหภูมิที่ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดใกล้เคียงกันเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 7.8

4.3 ผลการทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

จากการนำเส้นพลาสติกกรีไซเคิล HDPE และ ABS ในหัวข้อ 4.1 มาขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ขนาดของเส้นพลาสติกกรีไซเคิลที่ผ่านเครื่องอัดรีดสามารถใช้งานผ่านเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ทั้งหมด โดยมีรูปร่างและขนาดชิ้นงานตามภาพที่ 7 (ก) ผลการพิมพ์ 3 มิติ แสดงตามภาพที่ 7 (ข) พบว่า HDPE สามารถขึ้นรูปตามแบบที่กำหนดได้แต่ไม่สมบูรณ์ เกิดการหลุดออกจากฐานพิมพ์ เนื่องจากการหดตัว ลักษณะรูปร่างโดยรวมผิวชิ้นงานไม่เรียบและมีลักษณะแข็งเปราะ ส่วน ABS พบว่าสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ดี ผิวเรียบ แข็งแรงและมีรูปร่างตามที่กำหนด



ภาพที่ 7 (ก) รูปร่างชิ้นงานจากการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ (ข) ผลการขึ้นรูป 3 มิติ ของ HDPE และ ABS

4.4 การทดสอบการคุ้มค่าสำหรับการผลิตเส้นพลาสติกกรีไซเคิลทดแทน

1) การวิเคราะห์ต้นทุนเมื่อทดแทนวัสดุด้วยพลาสติกกรีไซเคิล คิดเป็นพลังงานความร้อน ร้อยละ 83.33 ระบบควบคุมร้อยละ 5.56 ระบบขับเคลื่อนและระบบจัดเก็บเส้นพลาสติก ร้อยละ 11.11 พลาสติกทั้งสองชนิดใช้พลังงานไฟฟ้าในการเตรียมระบบอยู่ที่ประมาณ 1,087 Watts เป็นเวลา 40 นาที (ฮีตเตอร์ที่งานร้อยละ 100) คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 0.725 หน่วย ส่วนพลังงานในกระบวนการอัดรีดประมาณ 1,166 Watts ใช้เวลา 20 นาที ที่ความเร็วรอบ 70 rpm คิดเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.388 หน่วย กำหนดค่าไฟฟ้า 3.5 บาทต่อหน่วย การผลิต HDPE ได้ 100 g และ ABS ได้ 70 g ต้นทุนวัสดุพลาสติกกรีไซเคิล HDPE 60 บาท/kg และ ABS 43.75 บาท/kg ดังนั้นในการผลิตพลาสติกกรีไซเคิลมีต้นทุนทั้งหมดของ HDPE ประมาณ 77 บาท/kg และ ABS ประมาณ 67 บาท/kg โดยที่ม้วนพลาสติกใหม่ของ HDPE และ ABS มีราคาอยู่ที่ประมาณ 1,190 บาท/kg และ 400 บาท/kg จากผลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า การใช้พลาสติกกรีไซเคิล HDPE ช่วยลดต้นทุนลงได้มากถึงร้อยละ 93.5 และที่ร้อยละ 83.3 สำหรับพลาสติกกรีไซเคิล ABS

2) การพิจารณาการคืนทุน (Jaturong, L., 2020) ตามตารางที่ 4 ด้วยการพิจารณารวมต้นทุนคงที่ (Fixed cost) จากราคาการสร้างเครื่องอัดรีด 60,000 บาท พิจารณาผลกำไรใน 1 วัน เครื่องทำงาน 6 ชม. อายุการทำงานของเครื่อง 5 ปี คิดราคาซากเป็นร้อยละ 10 ของราคาเครื่อง

ค่าแรงงานในการผลิต 225 บาทต่อวัน ค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักรคิดเป็นร้อยละ 100 ของค่าเสื่อมราคา ดังนั้นจะได้ต้นทุนรวมคงที่เป็น 68.2 บาท (ค่าเสื่อมราคา ค่าซ่อมบำรุง และค่าเสียโอกาส) ดังนั้นเวลาโดยประมาณสำหรับการคืนทุนของ HDPE คือ 36 วัน และ ABS คือ 448 วัน

ตารางที่ 4 การคิดต้นทุนรวมคงที่และเวลาคืนทุน

วัสดุ	กำลังการผลิต	ค่าไฟ	ค่าแรง	ต้นทุนรวม	ต้นทุนวัสดุใหม่	กำไรสุทธิ	เวลาคืนทุน
HDPE	1.80 kg	29.6 บาท	225 บาท	430.78 บาท	2,142.0 บาท	1,711.2 บาท	36 วัน
ABS	1.26 kg	30.0 บาท	225 บาท	378.37 บาท	504.0 บาท	125.6 บาท	448 วัน

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การสร้างและทดสอบเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกด้วยขยะรีไซเคิลของ PLA HDPE และ ABS พบว่าพลาสติกที่สามารถอัดรีดเป็นเส้นและเก็บเข้าม้วนได้คือ HDPE และ ABS ตัวเครื่องอัดรีดเส้นพลาสติกสามารถควบคุมอุณหภูมิในการให้ความร้อนตามที่กำหนดได้ร้อยละ 92.2 และควบคุมความเร็วในการรีดเส้นพลาสติกให้คงที่ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นได้ ตัวเครื่องมีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 72.9 ถึงร้อยละ 78.3 (อุณหภูมิ 170°C และความเร็วรอบ 70 rpm) อุณหภูมิการอัดรีดและความเร็วรอบที่เหมาะสมของ HDPE คือ อุณหภูมิ 165 °C ที่ความเร็วรอบ 70 RPM ส่วนของ ABS คือ อุณหภูมิ 180 °C ที่ความเร็วรอบ 70 RPM การใช้วัสดุพลาสติกกรีไซเคิลสำหรับการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ ทดแทนการใช้วัสดุใหม่สามารถลดต้นทุนลงได้มากถึงร้อยละ 83.1 สำหรับ HDPE และร้อยละ 38.5 สำหรับ ABS การสร้างเครื่องมีระยะเวลาในการคืนทุนสำหรับ HDPE คือ 36 วัน และ ABS คือ 448 วัน การทดสอบการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติพบว่า พลาสติกกรีไซเคิล ABS สามารถพิมพ์ขึ้นรูปโดยมีลักษณะชิ้นงานออกมาได้สมบูรณ์ที่สุด โดยมีคุณลักษณะทางกายภาพที่คล้ายคลึงกับการใช้วัสดุใหม่ เช่น ลักษณะผิวสำเร็จของชิ้นงาน ไม่แข็งเปราะ ขนาดและรูปร่างถูกต้องตามที่กำหนด ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปสร้างชิ้นงานมากกว่าชนิด HDPE และ PLA ส่วนผลการนำพลาสติกกรีไซเคิล HDPE และ PLA ในการศึกษาครั้งนี้ไม่สำเร็จเนื่องจากพลาสติกทั้งสองชนิดนี้มีความหลากหลายทางโครงสร้างและความแตกต่างทางคุณสมบัติเฉพาะสูตรของผู้ผลิต ดังนั้นการนำเอาวัสดุพลาสติกกรีไซเคิลหลากหลายชนิดและหลากหลายโครงสร้างเข้ามาผสมกัน อาจทำให้คุณสมบัติบางประการของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือสูญเสียไป

6. เอกสารอ้างอิง

- Buranasing, N. (2019). **“Plastic waste” Global problems that need to be dealt.** [online], Available: https://www.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/parliament_parcy/ewt_dl_link.php?nid=58603&filename=index. Access on July 2, 2020. (in Thai)
- Green Globe Institute. (2018). **If you still love each other, say goodbye to plastic waste.** [online], Available: <https://www.greenglobeinstitute.com/Frontend/BookDetail.aspx?ContentID=f6d5751e-f360-440c-af3b-9682bd3f5a2c>. Access on June 3, 2021. (in Thai)
- Jaturong, L. (2020). **Economic analysis of engineering in the use of basic agricultural machinery.** [online], Available: <https://iaid.in.th/2020/08/07/engineering-economics/> Access on June 20, 2021. (in Thai)
- John, H.L.IV. and John, H.L.V. (2019). **A Heat Transfer Textbook, 5th ed.** USA: Phlogiston Press Cambridge Massachusetts.
- Muhammad, I. et al. (2018). Plastics waste as a significant threat to environment – a systematic literature review, **Review on Environmental Heath**, vol. 33 (4), September 2018, pp. 383 - 406.
- Phromphak, C. (2020). **The current situation of plastic waste in Bangkok.** [online], Available https://www.senate.go.th/document/Ext23700/23700555_0002.PDF Access on November 17, 2020. (in Thai)
- Shahrubudin, N., T.C., Lee and Ramlan, R., (2019). An Overview in 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications, **Procedia Manufacturing, Vol. 35**, June 2019, pp. 1286 – 1296.
- Srinivasa, P., et. al., (2018). 3D Printing in Dentistry, **Journal of 3D Printing in Medicine**, Vol. 2 (3), August 2018, pp. 89 - 91.
- Ugboya, A.P., Odiamenhi, A.M. and Aigbojie, O.E. (2019). The Design and Construction of a Single Screw Extruder, **Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)**, vol. 6 (7), July 2019, pp. 10341 - 10349.
- Wasadadamrongdee, S. (2019). Overview of measures to reduce single-use plastic waste abroad, **Environnemental journal**, 23 (Vol.2). [online], Available: <http://www.ej.eric.chula.ac.th/content/6114/151>. Access on January 10, 2021. (in Thai)