



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

สมบัติของพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่ผ่านกระบวนการเติมแต่งเพื่อผลิตเส้นพลาสติกสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

Properties of recycled polypropylene has undergone an additive process to produce plastic filament for 3D printers.

พัชรวิทย์ ศิริไพบูลย์ทรัพย์¹ สุภัทรา หมูป่ารัง¹ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร¹ พัชระ กัญจนกาญจน์² จิตติ หมอรัक्षा³
วรรณนิสา นุชคุ้ม^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิจังหวัดนนทบุรี

³ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการ และเทคโนโลยี วิทยาเขตจันทบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

Phatthawit Siripaiboonsub¹ Supatthra Muparang¹ Jittiwat Nithikarnjanatharn¹ Patchara Kanjanakarn²
Thiti Mhoraksa³ Wannisa Nutkhum^{1*}

¹ Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Muang, Nakorn Ratchasima 30000

² Tool and Die Technology Center (TDTC), Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi

³ Department of Industrial Engineering, Establishment Project Faculty of Integrated Engineering and Technology, Chanthaburi Campus, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi, 22210

* Corresponding author.

E-mail: Wannisa.nu@rmuti.ac.th; Telephone: 092 8534148

วันที่รับบทความ 1 พฤษภาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 22 มิถุนายน; วันที่ตอบรับบทความ 20 ตุลาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ เส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงกับเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สำหรับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ โดยใช้การเติมแต่งสารเรืองแสง 3 สัดส่วน ได้แก่ ร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 แสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง มอดูลัสความยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ความแข็งแรงดัดขึ้นรูป พบว่าเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 ส่งผลให้การพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ สมบูรณ์แบบ และเมื่อเติมสารเรืองแสงในปริมาณที่มากส่งผลให้เกิดความเหนียวของพอลิเมอร์ ทำให้ความต้านทานแรงดึง และดัดขึ้นรูปลดลง ในทางกลับกัน สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงไม่มีผลต่อ มอดูลัสความยืดหยุ่น ความแข็งแรง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว และเมื่อวิเคราะห์การทดสอบทางกายภาพ พบว่าลักษณะการฉีกขาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึง แสดงให้เห็นถึงลักษณะความหนาแน่นของชิ้นการพิมพ์ขึ้นรูป ซึ่งมีความสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การยืดตัว จากการทดสอบความวาวแสงของเส้นพลาสติกทั้ง 4 ชนิด พบว่ามีความยาวคลื่นที่ใช้การกระตุ้นใกล้เคียงกัน ในช่วง 509 นาโนเมตร ซึ่งการเติมสารเรืองแสงในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นพลาสติกมีลักษณะวาวแสงเพิ่มขึ้น แต่ลักษณะกราฟความวาวแสงของสัดส่วนการเติมร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงมีความสว่าง ไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ

สารเรืองแสง พอลิแลคติกแอซิด การพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ โพลีโพรพิลีน

Abstract

This research was performed to compare the mechanical and physical properties of polylactic acid plastic strands with fluorescent agent additives with recycled polypropylene plastic strands mixed with polylactid acid, and fluorescent additives for 3D molding process. Three proportions of fluorescent agent additives were used: 0.3%, 0.5% and 1%. The results showed that the tensile strength, modulus of elasticity, percentage of elongation, hardness, flow index, of recycled polypropylene strands mixed with polylactid acid and 0.3% fluorescence agent ratio were optimal, resulting in favorable plastic filaments for 3D printer molding. The addition of large quantities of fluorescent agent resulted in polymer viscosity, which decreased the tensile strength and the flow index of the product. Modulus of elasticity, hardness and elongation percentage were found to have tear characteristics in the tensile test specimen, demonstrating the density characteristics of the molding layer, which corresponded to the elongation percentage. The luster results of all 4 types of plastic strands indicated an excitation wavelength in the 509 nm range, which increased with an increase in the amount of fluorescent agent as a result, the plastic line was shinier. However, the luminosity curves of 0.3%, 0.5% and 1% filling proportions showed that the luminescence proportions were brighter but not significantly different.

Keywords

fluorescent, polylactic acid, 3D printing, Polypropylene

1. คำนำ

ปัจจุบันการดำเนินธุรกิจที่ต้องเผชิญกับการแข่งขันตลอดเวลา สิ่งที่ทำให้องค์กรคงความสามารถในการแข่งขันอยู่ได้อย่างยั่งยืน คือ การรับมือกับปัญหาใหม่ ๆ และการปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ [1] การสร้างเทคโนโลยีต้นแบบที่รวดเร็วช่วยให้มนุษย์สร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้ทันเวลามากขึ้นภายใต้ราคาที่เหมาะสม ปัจจุบันนวัตกรรมทางเทคโนโลยีการพิมพ์ได้รับการพัฒนาจากเทคโนโลยีการพิมพ์ธรรมดาเป็นแบบการพิมพ์ลักษณะสามมิติ (3D Printing) [2] ปี ค.ศ. 2020 มีการพัฒนาเทคโนโลยี 3D Printing ให้มีราคาถูกลงแต่คุณภาพสูงขึ้น [3] มีความก้าวหน้าในงานต้นแบบ งานสิ่งประดิษฐ์ ของเล่นเด็ก วัสดุอุปกรณ์ของใช้ และผลิตชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรม จึงสามารถเพิ่มศักยภาพการผลิตชิ้นงานต้นแบบ [4] ในปี ค.ศ. 2019 พบว่าเทคโนโลยี 3D Printing มีมูลค่า 11,335 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และในอนาคตจะมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีอยู่ที่ร้อยละ 15 และกลุ่มเป้าหมายหลัก ได้แก่ ผู้ผลิตชิ้นงานต้นแบบและผู้ผลิตสินค้าจำนวนมากและจะเป็นเครื่องพิมพ์พลาสติกเป็นหลัก [5] ดังนั้นเทคโนโลยีการพิมพ์ 3D Printing มีบทบาทสำคัญต่อการสร้างความก้าวหน้าให้กับประเทศไทยในการผลิต การพัฒนาของเทคโนโลยี 3D Printing สามารถออกแบบชิ้นงานต้นแบบและดำเนินการผลิตด้วย

ระยะเวลารวดเร็วและได้งานต้นแบบถูกต้องตามที่ต้องการ [6] ควบคู่ไปกับการพัฒนาประสิทธิภาพของเทคโนโลยีเพื่อให้ผู้ประกอบการเข้าถึงได้

การผลิตชิ้นงานจากกระบวนการ 3D Printing สามารถเลือกใช้เส้นพลาสติกได้หลากหลายชนิด แต่ชนิดที่เป็นที่นิยมมาก คือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid:PLA) [7] ด้วยคุณสมบัติที่เด่นต่างจากชนิดอื่น ๆ ทั้งการขึ้นรูปได้ดี ไม่มีกลิ่นไม่เป็นพิษและไม่ระคายเคือง ขณะการพิมพ์ อีกทั้งยังเป็นเส้นพลาสติกที่ผลิตมาจากวัสดุที่มาจากธรรมชาติ [8-9] ศักยภาพของ PLA สามารถผสมผสานเข้ากับสารเติมแต่งได้ดี ซึ่งสมบัติทางกลถือว่ามีความสำคัญอย่างมาก สำหรับการเลือกวัสดุไปใช้ให้เหมาะสมกับงานได้อย่างถูกต้อง และปลอดภัย นอกจากนี้ยังใช้ค่าต่าง ๆ ของสมบัติทางกลนี้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือเครื่องจักรให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์การออกแบบโดยไม่เกิดการเสียหายภายใต้แรงกระทำในสภาวะงานนั้น ๆ อีกด้วย

โดยงานวิจัย A.Ebrahimzade [10] ศึกษาคุณ ลักษณะ และสมบัติการเรืองแสงของสารเรืองแสงโพลีโพรพิลีนกับแร่เอิร์ธสตรอนเทียมอลูมิเนียมไนไฟเบอร์และเส้นใยโพลีโพรพิลีน (Polypropylene:PP) เรืองแสง เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มแสงของเส้นด้ายจากแหล่งกำเนิดแสงและเวลาเปิดใช้งานที่แตกต่าง

กัน พบว่าความเข้มแสงลดลงในเวลา 30 นาที ในลักษณะการทดสอบการเรืองแสงคล้ายกัน แต่ต้นทุนในการผลิต PLA สูง และ Stefani R. และคณะ [11] ศึกษาสมบัติการเรืองแสงของแบเรียมอะลูมิเนียม เจือยูโรเปียมและเจอร์มาเนียมโพสเฟอไรต์ ในอุณหภูมิและความเข้มแสงต่างกัน พบว่าการปลดปล่อยพลังงานเพิ่มขึ้นช่วงเวลาการสลายตัวของการเรืองแสงมีค่ายาวนานมากขึ้นกว่าผลิตภัณฑ์เรืองแสงเดิมที่ไม่มีการเจือร่วมในลักษณะเดียวกัน Xiao L. และคณะ [12] และคณะศึกษาผลของกระบวนการผสมสารตั้งต้นที่ส่งผลต่อการเรืองแสงของสตรอนเทียมอะลูมิเนียมเจือยูโรเปียมและเจอร์มาเนียมโพสเฟอไรต์ พบว่าผงวัสดุจะปลดปล่อยพลังงานสูงสุดที่ความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร ในทางตรงกันข้ามพิชญ์ ฐวัชพันธ์ [13] ศึกษาสมบัติการเรืองแสงและความแข็งแรงของยางที่ผสมสารเรืองแสงในน้ำยางคอมปาวด์ 4 สูตร ผสมกับสารเรืองแสงในปริมาณที่แตกต่างกัน ทดสอบความเข้มของการเรืองแสงและทดสอบความแข็งแรงพบว่า การผสมสารเรืองแสงร้อยละ 20 ให้ค่าความเข้มของการเรืองแสงสูงสุด การนำพลาสติกที่มีการผสมสารต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ก่อนนำมาใช้งานต้องผ่านการศึกษาคูสมบัติทางกลและทางกายภาพ และยังไม่พบงานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของเส้นพลาสติกเรืองแสง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิค (Fused Deposition Modeling : FDM) โดยใช้พลาสติก พอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง และเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง กับเส้นพลาสติกเรืองแสงบริสุทธิ์และสามารถนำไปใช้ผลิตเส้นพลาสติกที่ใช้กับการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ เพื่อให้ชิ้นงานสามารถเรืองแสง โดยมีต้นทุนที่ต่ำ

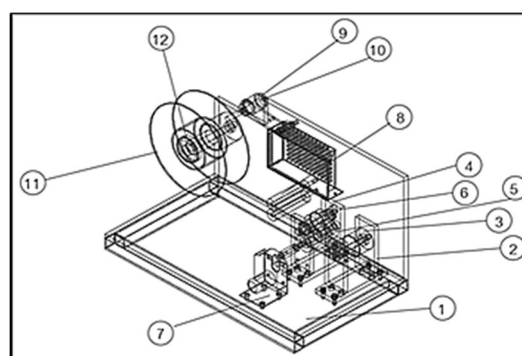
2. การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ วัตถุที่ใช้สำหรับการวิจัย อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ดำเนินงานวิจัย การสร้างชิ้นงานต้นแบบรวดเร็วด้วยกรรมวิธี FDM การออกแบบชิ้นงาน ทดสอบ การทดสอบสมบัติทางกล และการวิเคราะห์ผลการทดลอง [14]

2.1 การผลิตเส้นพลาสติก

2.1.1 ผสมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลร้อยละ 30 และพอลิแลคติกแอซิดร้อยละ 70 เติมแต่งสารเรืองแสง รุ่น Ulatimate Glow สีเขียว โดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) โดยใช้อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ดำเนินการเติมแต่งสารเรืองแสง 3 สัดส่วน ได้แก่ร้อยละ 0.3 0.5 และ 1

2.2.2 ดึงเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง โดยใช้อุปกรณ์ดึงเส้นพลาสติกเพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 ± 0.05 มม. สำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ [15] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์ดึงเส้นพลาสติก [15]

จากการดึงเส้นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับเส้นต้นแบบที่เป็นพอลิแลคติกแอซิดตามท้องตลาด แสดงลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะเส้นพลาสติกใช้สำหรับการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ

จากกระบวนการดึงเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง [16] พบว่าสัดส่วนร้อยละ 0.5 และ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดไม่คงที่ ซึ่งมีขนาดระหว่าง 1.74 ถึง 1.76 มม. เนื่องจากการกระจายตัวของสารเรืองแสงไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ขนาดของเส้นพลาสติกไม่สม่ำเสมอ [17] แต่ในทางตรงกันข้ามสัดส่วนร้อยละ 0.3 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง และเส้นสม่ำเสมอความคล้ายคลึงกับ PLA ต้นแบบ

2.2 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สำหรับการดำเนินงาน

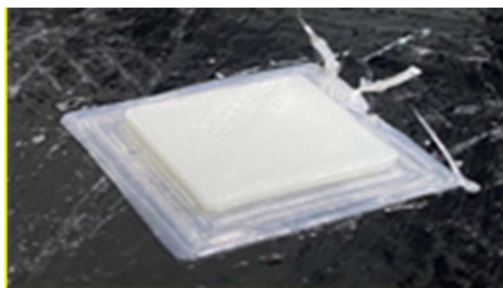
เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น Delta Kossel Rostock MicroMake โปรแกรมสำเร็จรูป โปรแกรม Flash Print เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D เครื่องวัดการวาวแสงสารละลายเคมี (Fluorescence Spectrophotometer) เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง

2.3 การออกแบบชิ้นงานทดสอบ

สร้างชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM 638 Type V และชิ้นงานสำหรับส่องผิวชิ้นงาน ขนาดกว้าง 15 มม. ยาว 15 มม.หนา 3 มม. จากนั้นแปลงข้อมูล(file) แบบ STL ซึ่งเป็น รูปแบบ (format) ของข้อมูล(file) เป็นมาตรฐานสำหรับการนำข้อมูลไปสร้างชิ้นงานดังรูปที่ 3 เพื่อทดสอบสมบัติทางกลและการฉีกขาด และรูปที่4 เพื่อส่องผิวชิ้นงานและการเรียงตัวของชั้นพลาสติกดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงใช้เพื่อสร้างชิ้นงาน 3 มิติ



รูปที่ 4 ลักษณะชิ้นงานสำหรับส่องผิวชิ้นงาน

2.4 การสร้างชิ้นงานต้นแบบรวดเร็วด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM)

ดำเนินการนำเข้าข้อมูล (import file) ชิ้นงาน 3 มิติ เข้าสู่โปรแกรม Flash Print เพื่อการสร้างชิ้นงานต้นแบบ โดยใช้โปรแกรม Flash Print แบ่งชิ้นงาน 3 มิติ และดำเนินการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการสร้างชิ้นงานต้นแบบคือ อุณหภูมิหัวฉีดพลาสติก โดยการตั้งค่าอุณหภูมิหัวฉีด 230 °C อุณหภูมิฐานพิมพ์ 80 °C การฉีดเติมเต็มเนื้อพลาสติกร้อยละ 100

2.5 การทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบทางสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบแรงดึงของวัสดุ (Tensile Properties) [15] การทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ตามมาตรฐาน ASTM D2240

การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Index : MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 การทดสอบความวาวแสง (Fluorescence Spectrophotometer) ตามแบบมาตรฐาน 2 in 1 (Option) จากนั้นกระตุ้นแสงที่ความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต 4 ระดับ ได้แก่ 300 350 450 และ 500 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นความยาวคลื่นที่พบได้ทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบลักษณะความแตกต่างของความวาวแสงผิวชิ้นงานเมื่อได้รับการกระตุ้น จากการพิมพ์ชิ้นรูป 3 มิติ

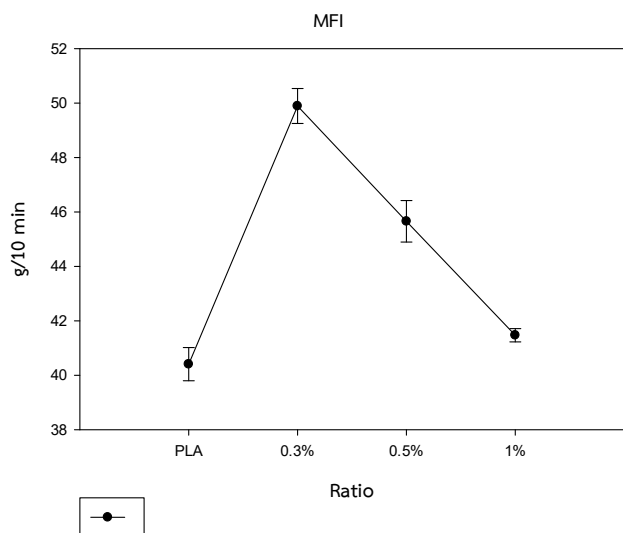
3. ผลการทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบสมบัติทางกล และทางกายภาพแสดงผลดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล

ผลการทดสอบค่าดัชนีการไหลของพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง เฉลี่ย 40.408 กรัมต่อ10 นาที และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 โดยเฉลี่ย 49.896 กรัมต่อ10 นาที 45.660 กรัมต่อ10 นาที และ 41.472 กรัมต่อ10 นาที เห็นว่าค่าดัชนีการไหลสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 มีค่าดัชนีการไหลดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถการยืดตัวได้ดีแต่ในทางกลับกันเมื่อมีการเพิ่มสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 1 ส่งผลให้มีค่าดัชนีการไหลใกล้เคียงกับเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสาร

เรืองแสง เนื่องจากสารเรืองแสงมีคุณสมบัติเป็นผงขนาดเล็กไม่สามารถละลายน้ำได้ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดความหนืด โดยกราฟที่แสดงแกน X คือเส้นต้นแบบ สูตรเส้นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 ตามลำดับแกน Y คือ ดัชนีการไหลของของเหลว และส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลลดลงดังรูปที่ 5

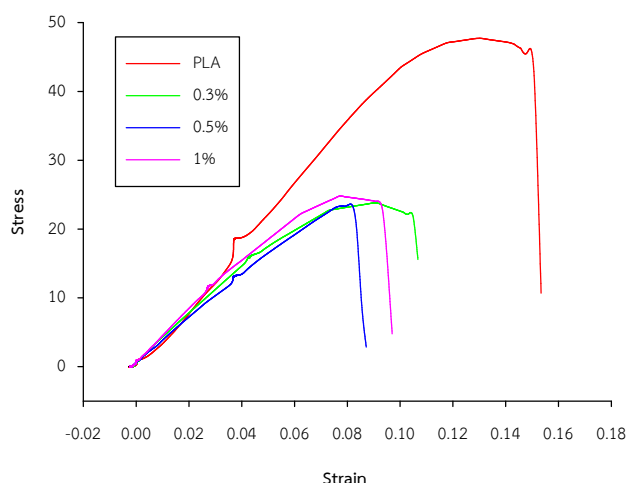


รูปที่ 5 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึง

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อเติมสารเรืองแสงน้อยทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลมีค่ามากกว่าสูตรที่เติมสารเรืองแสงมาก

3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

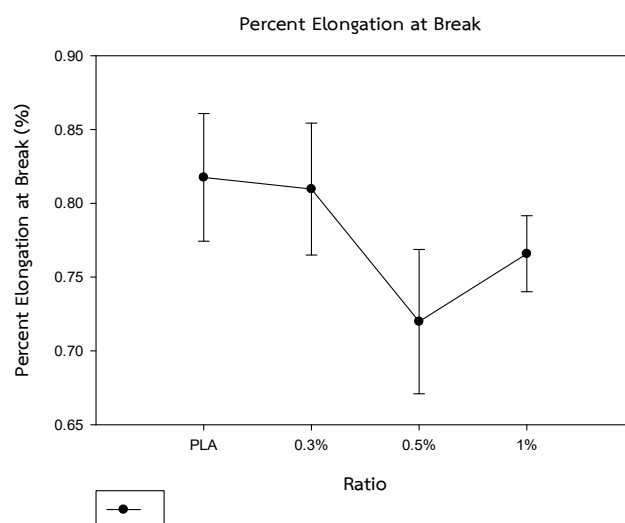
3.2.1 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain) ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain)

จากรูปที่ 6 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงาน เห็นได้ว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานที่สัดส่วนการผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง มีค่าความสัมพันธ์มากที่สุด แต่เมื่อมีการเติมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 ส่งผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดลดน้อยลง

3.2.2 ผลการทดสอบความยืดหยุ่นแสดงให้เห็นถึงความสามารถของสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 สำหรับการยืดตัวได้มากกว่าสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงอื่น ๆ บ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะกราฟเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบโดยกราฟที่แสดงแกน X คือความเครียด(stress) แกน Y คือ ความเค้น(strain) ดังรูปที่ 7

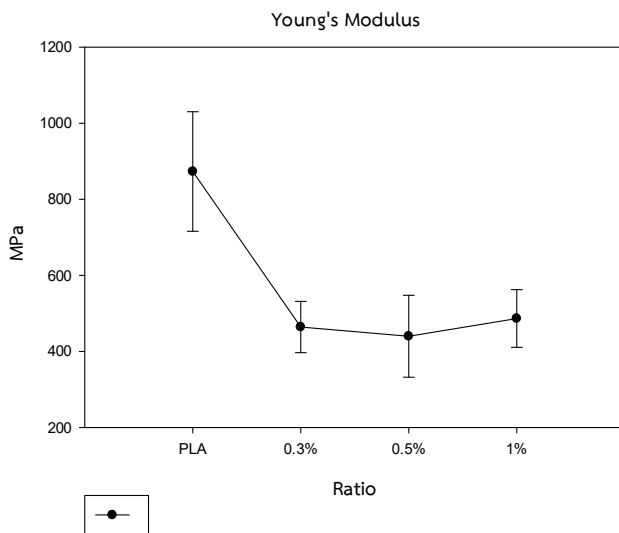


รูปที่ 7 ลักษณะชิ้นงานทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

จากกราฟเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ของพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง มีค่าโดยเฉลี่ยร้อยละ 0.817 และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวชิ้นงานลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 0.809 0.719 และ 0.765 เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวพบว่าที่สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงเส้นต้นแบบและส่วนผสมร้อยละ 0.3 ความสามารถยืดตัวดีต่างกับสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.5 และ 1 ที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อย แต่

ในทางตรงกันข้าม ร้อยละ 0.5 มีค่าลดลงมากกว่า 0.1 แต่พบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1

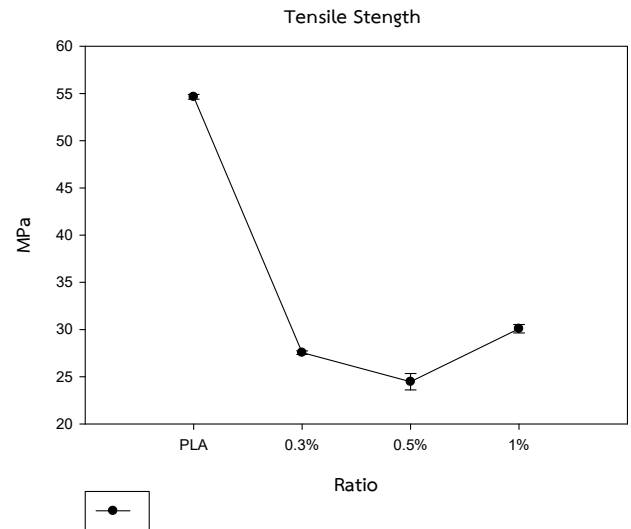
3.2.3 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus) เส้นพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง เฉลี่ย 873.304 เมกะปาสคาล และเส้นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 โดยเฉลี่ย 464.138 เมกะปาสคาล 439.950 เมกะปาสคาล และ 486.552 เมกะปาสคาล พบว่าเส้นพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง มีความยืดหยุ่นสูงกว่าเส้นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมกับพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงอยู่ร้อยละ 46.92 เนื่องจากการเติมเส้นพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลที่มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นที่น้อย และสารเรืองแสงทำให้การยืดตัวของพอลิเมอร์ลดน้อยลง



รูปที่ 8 ลักษณะชิ้นงานทดสอบมอดูลัสความยืดหยุ่น

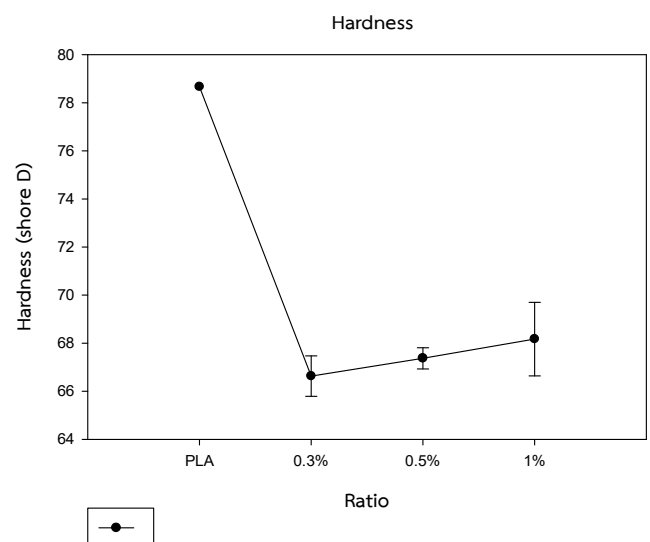
3.2.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) พอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงที่เป็นเส้นต้นแบบพบว่าความต้านทานแรงดึง เฉลี่ย 54.6588 เมกะปาสคาล และผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 โดยเฉลี่ย 27.5572 เมกะปาสคาล 24.4752 เมกะปาสคาล และ 30.0818 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากกราฟพบว่า พอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง ความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงกว่า เนื่องจากการเติมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผ่านการใช้งาน

มาแล้วทำให้การยืดเกาะของพอลิเมอร์ลดน้อยลง ดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับผลทดสอบมอดูลัสความยืดหยุ่น



รูปที่ 9 ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึง

3.2.4 ผลการทดสอบความแข็งของพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง 78.667 Shore D และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 ค่าความแข็งเฉลี่ย 66.630 Shore D 67.370 Shore D และ 68.170 Shore D พบว่าเมื่อเติมสารเรืองแสงเพิ่มขึ้น สมบัติความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเรืองแสงไม่ละลายในน้ำ ทำให้มีปริมาณใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ สอดคล้องกับมอดูลัสความยืดหยุ่น และแรงดึง แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ลักษณะชิ้นงานทดสอบความแข็ง

จากสมบัติทางกลที่ทำการทดสอบได้แก่ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เปอร์เซ็นต์การยืดตัวค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ความต้านทานแรงดึง และการทดสอบความแข็ง พบว่าสัดส่วนร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 มีค่าลดลงจากเส้นต้นแบบ เนื่องจากอิทธิพลการเติมแต่งของสารเรืองแสง แต่ปริมาณการเติมไม่มีผลต่อค่าสมบัติทางกล ดังนั้นจึงต้องพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพเพิ่มเติม เพื่อดูลักษณะการฉีกขาด และชั้นการเรียงตัวของพลาสติกกว่าสัดส่วนไหนสามารถนำไปผลิตเส้นสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ดีที่สุด

3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

3.3.1 ลักษณะชิ้นงานหลังการฉีกขาด เป็นลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึง ซึ่งแสดงให้เห็นถึง ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะการขาดตัวทางกายภาพ

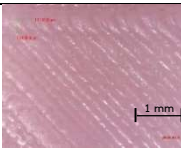
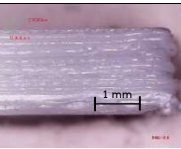
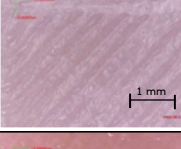
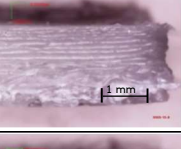
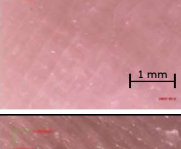
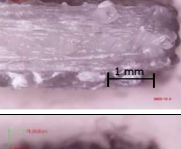
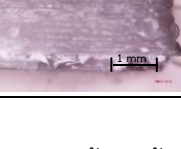
ชนิด	ชิ้นงาน
PLA ต้นแบบ	
PLA+PP+ 0.3 %	
PLA+PP+ 0.5%	
PLA+PP+ 1%	

จากกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง พบว่าการขึ้นรูปชิ้นงานมีลักษณะสมบูรณ์แบบตามมาตรฐาน ผิวชิ้นงานสม่ำเสมอ เรียบเนียน ลักษณะสีชิ้นงานทดสอบขาวขุ่น เนื่องจากเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง ไม่ผ่านการใช้งาน ส่งผลให้ลักษณะสีผิวชิ้นงานขาว และไม่มีสิ่งเจือปน เมื่อเทียบกับลักษณะชิ้นงานจากเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 พบว่าลักษณะชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล มีลักษณะการขึ้นรูปชิ้นงานสมบูรณ์ แต่ลักษณะผิวชิ้นงานที่ไม่เรียบเนียนเนื่องจากเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสม พอลิแลคติก

แอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง เย็นตัวเร็วกว่าเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง ส่งผลให้ความหนาแน่นของเส้นพลาสติกน้อยลง และจากลักษณะชิ้นงาน หลังการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกลสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.5 ชิ้นงานมีลักษณะความหนาแน่นน้อยกว่าชิ้นงานสมบัติทางกลสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 และ 1 ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อยที่สุด สอดคล้องกับกราฟเปอร์เซ็นต์การยืดตัวดังรูปที่ 7

3.3.2 ลักษณะผิวของชิ้นงานและการจัดเรียงตัวของชั้นพลาสติก เป็นลักษณะซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพชิ้นงานของผิวและการจัดเรียงตัว ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะผิวของชิ้นงานและการจัดเรียงตัวของชั้นพลาสติก

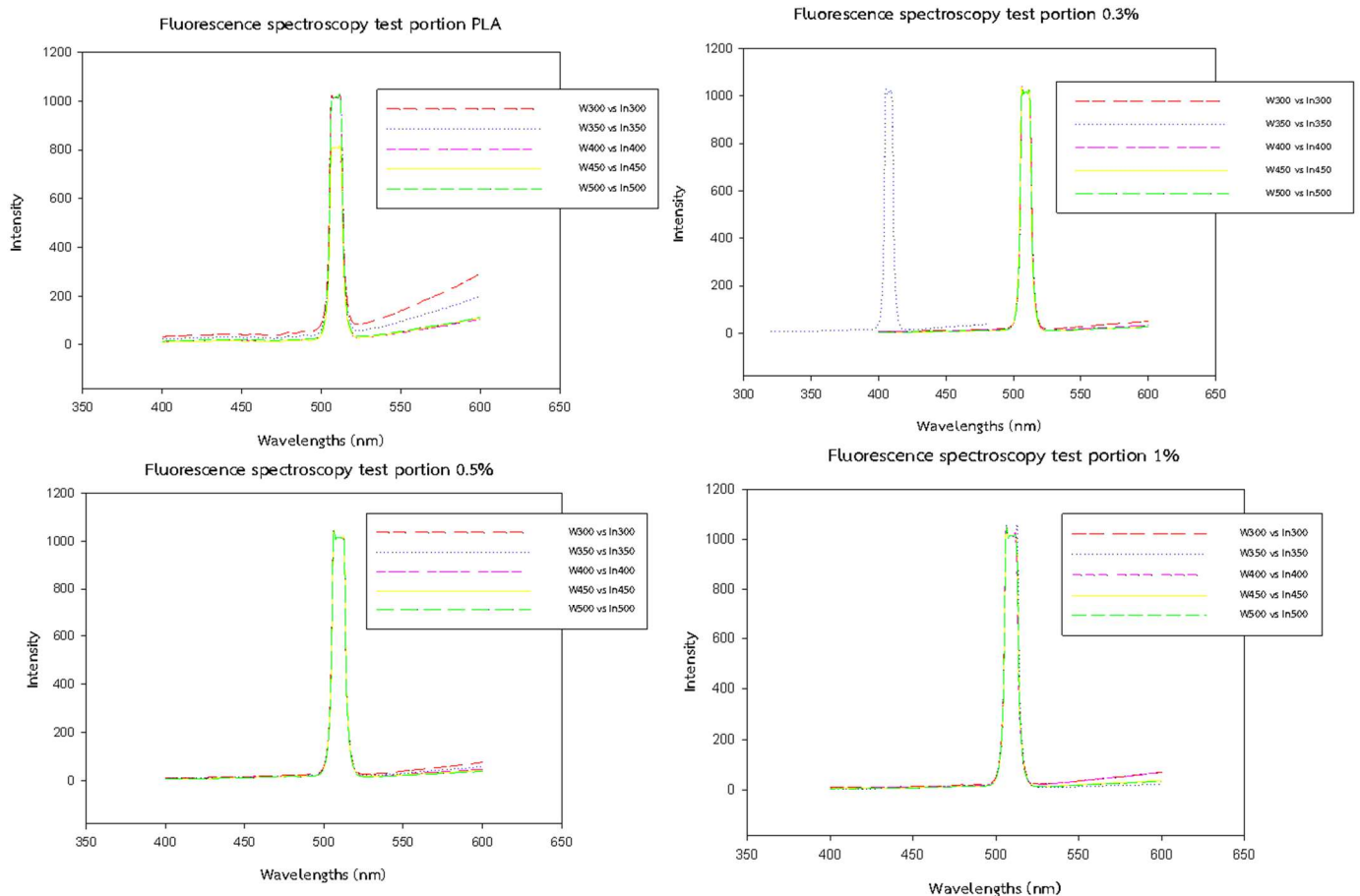
ชนิด	ชิ้นงาน	
	ด้านหน้า	ด้านข้าง
PLA ต้นแบบ		
PLA+PP+ 0.3 %		
PLA+PP+ 0.5%		
PLA+PP+ 1%		

จากการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับส่องพื้นผิวชิ้นงานจากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ พบว่าการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานจากเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง การพิมพ์มีลักษณะพื้นผิวเรียบเนียน เส้นพลาสติกจากการพิมพ์มีความตรง และการแข็งตัวของชิ้นงานใช้เวลามากกว่า เส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง ลักษณะการยึดติดฐานพิมพ์ มีลักษณะยึดติดฐานพิมพ์แน่นกว่าเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง เนื่องจากเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง

คติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง ไม่ผ่านการใช้งาน ส่งผลให้ความสามารถการยึดติดฐานพิมพ์แน่นกว่าเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงจากการพิมพ์ขึ้นรูปขึ้นงานสำหรับส่องผิวชิ้นงานจากเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 สัดส่วน ร้อยละ 0.5 และสัดส่วนร้อยละ 1 พบว่าลักษณะพื้นผิวการเรียงตัวของพลาสติกน้อยกว่าเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงตามลำดับ และจากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปขึ้นงานจากเส้นพลาสติกโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 สัดส่วนร้อยละ 0.5 และสัดส่วนร้อยละ 1 มีความโค้งตัวออกจากฐานพิมพ์ เนื่องจากการแข็งตัวของพลาสติกตามลำดับการเติมสารเรืองแสง

3.4 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา

ผลการทดสอบความวาวแสง แสดงผลดังรูปที่ 11 จากผลการทดสอบความวาวแสงของเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง และเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง ความยาวคลื่นแสงสำหรับการกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุด โดยประมาณ 509 นาโนเมตร พบว่าลักษณะทุกกราฟที่ถูกตัดขาด แสดงให้เห็นถึงพลังงานการกระตุ้นที่มาก ส่งผลให้ไม่สามารถแสดงจุดสูงสุดได้ [33] และลักษณะจุดปลายของกราฟเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง ที่มีลักษณะแนวโน้มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดคลื่นใหม่ จากลักษณะเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 มีลักษณะกราฟ 2 เท่า เนื่องจากการคายพลังงานมาสู่พื้น ทำให้เกิดคลื่นพลังงานอีกครั้ง และจากการเติมสารเรืองแสงในสัดส่วนต่าง ๆ ส่งผลให้ค่าความวาวแสงเพิ่มขึ้น แต่ไม่อยู่ในระนาบใกล้เคียงกัน



รูปที่ 11 ผลการทดสอบความวาวแสงเส้นพลาสติก

4. การอภิปรายผลการวิจัย

ผลการผลิตเส้นพลาสติก สำหรับการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ จากการเติมพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ส่งผลให้ลักษณะของเส้นพลาสติก มีความสม่ำเสมอน้อยกว่าเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด เนื่องจากพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผ่านการใช้งานแล้ว มีสิ่งปนเปื้อน ทำให้เกิดการอุดตันของหัวฉีดเครื่องอัดรีด และการอัดขึ้นรูปเส้นพลาสติกบิดเบี้ยว ซึ่งทำให้เกิดการบกพร่องของกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน คลายกับกระบวนการผลิตเส้นพลาสติกสำหรับการพิมพ์ขึ้นรูป [15] [17-18] ซึ่งมีการผลิตเส้นพลาสติกจากพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล

จากการส่องกล้องพบว่าลักษณะการบิดเบี้ยวเกิดจากสิ่งปนเปื้อน สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน และเมื่อมีส่วนผสมของสารเรืองแสง ที่มีสมบัติแข็งไม่ละลายในน้ำ จึงทำให้เส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเติมสารเรืองแสง สามารถทรงตัวการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานที่มีคุณภาพเหมือนต้นแบบได้อย่างสมบูรณ์ [19] ซึ่งจากการเติมสารเรืองแสงในสัดส่วนร้อยละ 0.3 มีลักษณะการยึดตัวดีที่สุดเนื่องจากพอลิเมอร์มีลักษณะการยึดเกาะกันหนาแน่นสอดคล้องกับกราฟเปอร์เซ็นต์การยึด ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของชั้นพอลิเมอร์จากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป ดังตารางที่ 4.3 ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยึดตัวใกล้เคียงกับชิ้นงานจากเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวและส่งผลให้มีค่าดัชนีการไหลของพลาสติกสูง แต่ในทางกลับกันพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมีคุณสมบัติแข็งตัวเร็ว การเติมสารเรืองแสงในปริมาณที่มากทำให้กระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปไม่ติดฐานพิมพ์ และส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะโก่งตัวของชิ้นงาน อีกทั้งให้ความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสความยืดหยุ่น ความแข็งเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน [20] แต่สัดส่วนการเติมสารเรืองแสง ไม่มีผลต่อต้านทานแรงดึง และดัชนีการไหลของเส้นพลาสติกอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อดำเนินการทดสอบทางกายภาพพบว่าความวาวแสงในสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงร้อยละ 0.3 0.5 และ 1 พบว่าเมื่อเติมสารเรืองแสงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เส้นพลาสติกมีลักษณะวาวแสงเพิ่มขึ้น แต่ลักษณะกราฟความวาวแสง แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนการเติมสารเรืองแสงมีความสว่าง ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในระดับเดียวกัน คือ 509 นาโนเมตร

[21] และจากลักษณะเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนการเติมร้อยละ 0.3 มีความคล้ายเส้นพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 สัดส่วน นำไปสู่การเลือกพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ โดยใช้ปัจจัยที่ดีที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิการพิมพ์ขึ้นรูป 230 °C อัตราการป้อน 70 มม.ต่อวินาที และปริมาณความหนาแน่นร้อยละ 100 พบว่าเมื่อเลือกใช้อัตราการป้อนต่ำจะส่งผลให้ชิ้นงานขึ้นรูปสมบูรณ์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ รัชพัฒน์ [15] ทดลองการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบจากเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดผสมกับพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล โดยใช้อัตราป้อน 40 มม.ต่อวินาที ขึ้นรูปได้สมบูรณ์ แต่ชิ้นงานต้นแบบของไม่มีสี อีกทั้งอยู่ในสถานะเดียวเปรียบเทียบกับชิ้นงานต้นแบบจากเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง พบว่าการใช้อัตราป้อนที่เร็วกว่า สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกัน สามารถมองเห็นได้ในสถานะมีแสงและไม่มีแสง และยังสามารถลดต้นทุนการผลิตเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงได้ด้วย

5. สรุปผลการวิจัย

การผลิตเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง 3 สัดส่วน พบว่า

5.1 สัดส่วนการเติมสารเรืองแสงที่มีคุณสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกันทั้ง 3 สัดส่วน แต่สัดส่วนร้อยละ 0.3 มีความสามารถสำหรับการยึดตัวสูงกว่า 2 สัดส่วน และ มีความคล้ายทางกายภาพเส้นพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง โดยสังเกตได้จากการฉีกขาด และการเรียงตัวของชั้นพลาสติกด้านข้าง และเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 สัดส่วน

5.2 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลระหว่างเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงกับเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง พบว่าเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงคุณสมบัติทางกลสูงกว่าเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง เนื่องจากเส้นพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลผสมพอลิแลคติกแอซิด

เติมแต่งสารเรืองแสง ผ่านการใช้งานมาแล้วส่งผลให้คุณสมบัติทางกลลดลง

5.3 ในเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสงมีความยาวคลื่นแสงที่เหมาะสมในช่วงอัลตราไวโอเล็ตสำหรับการกระตุ้นมีค่าใกล้เคียงกับเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดเติมแต่งสารเรืองแสง สัดส่วนการเติมร้อยละ 0.3

จากเหตุผลที่กล่าวมาสัดส่วนการเติมแต่งร้อยละ 0.3 เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเส้นเพื่อใช้สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำวิจัยขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดารารัตน์ ทาทอง. ผลกระทบจากเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติต้นทุนต่ำต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในงานอุตสาหกรรม [วิทยานิพนธ์]. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาการบริหารเทคโนโลยี. วิทยาลัยนวัตกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2559.
- [2] ไทยโฮมทาวน์. ต่อยอดเทคโนโลยี 3D Printing ในวงการก่อสร้างด้วยนวัตกรรม 3D Cement Extrusion Printing. เข้าถึงได้จาก: <https://www.thaihometown.com/> [เข้าถึงเมื่อ 25 กันยายน 2564]
- [3] ประชาชาติธุรกิจ. printing พริกโลกอุตสาหกรรม 3D printing พริกโลกอุตสาหกรรม. เข้าถึงได้จาก: <https://www.prachachat.net/> [เข้าถึงเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2564].
- [4] ญัฐนิช ตันมานะศิริ. 3D Printing: เทคโนโลยีแห่งโอกาส. เข้าถึงได้จาก: <https://www.i-am-maker.com/> [เข้าถึงเมื่อ 15 ธันวาคม 2564]
- [5] M Report. 3D Printing: เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล. เข้าถึงได้จาก: <https://www.mreport.co.th/> [เข้าถึงเมื่อ 19 พฤศจิกายน 2564]
- [6] วรพร ชูส่งแสง. 3D Printing: เทคโนโลยีของโลกยุคใหม่. เข้าถึงได้จาก: <https://www.petromat.org/> [เข้าถึงเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2564]
- [7] Lu Y, Jiaguang M, Tao XUE. Effect of 3D printing process parameters on tensile strength of PLA specimen. *Plastics Industry*. 201; 49(05):73-77.
- [8] Lay M, Thajudin NLN, Hamid ZAA, Rusli A, Abdullah MK, Shuib RK. Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 176:(107341).
- [9] Liang S. *Preparation and Research of Polylactic Acid Composite Material for Ecological Vehicle [Dissertation]*. Jilin University. 2021.
- [10] Ebrahimzade A, Mojtahedi MRM, Rahbar RS. Study on characteristics and afterglow properties of luminous polypropylene/ rare earth strontium aluminate fiber. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2017;2017(28): 8167.
- [11] Stefani R, Rodrigues LCV, Carvalho CAA, Felinto MCFC, Brito HF, Lastusaari M, Holsa J. Persistent luminescence of Eu^{2+} and Dy^{3+} doped barium aluminate ($\text{BaAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$) materials. *Optical Materials*. 2009; 31(12): 1815 – 1818.
- [12] Xiao L. Meng S. Junying Z. Tianm W. Effect of mixing process on the luminescent properties of $\text{SrAl}_2\text{O}_4\text{:Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ long afterglow phosphors. *Journal of Rare Earths*. 2010; 28(1): 150-152.
- [13] พิษณุ ดนู ธวัชพันธุ์. ผลของสารเรืองแสงต่อการเรืองแสงและความแข็งแรงของยางที่ผลิตจากน้ำยาง คอมปาวด์. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัย สุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 7. 24.พฤศจิกายน. 2560. ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา. 2560.
- [14] Khwankae, T. Nilpanan W, Muparang S, Mayai A, Nutkhum W, Nitthikarnjanatharn J. Plastic strand production with recycled polypropylene and polylactic acid for 3D molding processes. *The 6th Rajamangala and Management Technology Conference, 2021*. 2021.
- [15] Sartsoongnem R, Nitthikarnjanatharn J. Study of melting temperature, feed rate and temperature used in 3D printing with Polypropylene used in the

fused deposition modeling process. *Academic conference Engineering Science Technology and Architecture. 9th. September 7. 2018 at 50th Anniversary Thai-German Technical Building, Khon Kaen (Building 18), Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Khon Kaen Province. 2018.*

- [16] จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร, สุภัทรา หมู่ป่าร้าง. *ส่วนผสมการผลิตเส้นสำหรับการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ. กรมทรัพย์สินทางปัญญา. อนุสิทธิบัตรเลขที่ 2303000987.*
- [17] Antoniac L, Popescu D, Zapciu A, Antoniac A, Miculescu F, Moldovan H. Magnesium filled Polylactic acid (PLA) material for filament based 3D printing. *Materials.* 2019; 12(5):719.
- [18] Abdelhaleem AMM. Mechanical properties of recycled Polypropylene mixed with glass fibers. *International Journal of Advanced Materials Research.* 2016; 2(4):72-79.
- [19] Arrigo R, Battegazzore D, Bernagozzi G, Cravero F, Pedraza DNR, Frache A. Recycled PP for 3D printing: material and processing optimization through design of experiment. *Applied Sciences.* 2022; 12(21): 10840.
- [20] Li B, Zhang M, Lu O, Zhang B, Miao Z, Li L, et al. Application and development of modern 3D printing technology in the field of orthopedics. *BioMed Research International.* 2022; 2022: 8759060
- [21] Buggakupta W. Glowing ceramic. *Ceramics Journal* 2010. 2010; 34: 72-75.