

การศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูป พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอิน-สไตรีน (ABS) ด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติ

Investigation and Optimization of Printing Parameters of 3D-Printed ABS-Based parts

^{1*} นัยยุนาถ นนทะภาพ, ^{2#} นพพล สมเศรษฐ์ และ ^{3#} ณัฐ ธานุมมณฑล

^{1,2,3} ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทางการทหารและอากาศยาน โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

^{1*} Naiyunard Nontapaph, ^{2#} Noppon Somsesta and ^{3#} Nat Tanumonthon

^{1,2,3} Military and Aerospace Material Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy

*naiyunard@rtaf.mi.th, #noppon_soms@rtaf.mi.th, #nat.meng@yahoo.com

Received : September 27, 2023

Revised : November 24, 2023

Accepted : November 26, 2023

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ การศึกษาผลกระทบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรจากเครื่องพิมพ์สามมิติ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละตัวแปรสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงาน ผ่านการศึกษาพื้นฐานวิทยา ดัชนีความเป็นผลึก สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ อุณหภูมิหัวฉีดที่อุณหภูมิ 240°C , 250°C และ 260°C และเปอร์เซ็นต์ของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่างที่ 25%, 50%, 75% และ 100% วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป คือ พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอิน-สไตรีน (ABS) การวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงาน 5 ประเภท คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องทดสอบแรงดึง เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกล และ เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อน ผลการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิหัวฉีดสูงจะทำให้เนื้อพลาสติกของแต่ละชั้นหลอมเชื่อมติดกันและโครงสร้างภายในมีความเป็นระเบียบมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้ค่ามอดูลัสการยึดเหนี่ยวสูงขึ้นส่งผลให้วัสดุมีความคงรูปมากขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ในด้านเสถียรภาพทางความร้อนนั้น การปรับตัวแปรทั้งสองไม่ส่งผลกระทบใด ๆ กล่าวคือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการสลายตัว

คำสำคัญ: เครื่องพิมพ์สามมิติ, พอลิอะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอิน-สไตรีน, สมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน

Abstract

Recently, 3D printers have rapidly expanded and played an important role in the fabrication of composite materials because they are able to design complex and durable aerospace component structures. The objective of this research is to study the effects of printing or processing parameters on 3D printers and find the most appropriate values that provide the best properties for three-dimensional modeling. In this work, the ABS filament was used as a precursor for the 3D printing process, and a study on the effect of nozzle temperature (240°C, 250°C, and 260°C) and infill density (25%, 50%, 75%, and 100%) on morphology, crystallinity index, mechanical properties, and thermal properties was performed. The 3D-printed parts were then characterized using scanning electron microscopes (SEM), universal testing machines (UTM), X-ray diffraction analyzers (XRD), thermal mechanical analyzers (DMA), and thermogravimetric analyzers (TGA). The experimental results showed that at higher nozzle temperatures, the adhesion between the layers improved and the air voids were smaller. These led to an increment in the molecular orientation. In addition, the higher printing temperature can enhance the storage modulus, which makes the part harder to dislocate. The results also indicated that the tensile strength of 3D-printed parts increased with increasing infill density. Nevertheless, these two parameters had no effect on thermal stability since the decomposition temperature did not change even when the processing condition was adjusted.

Keywords: 3D printing, Polyacrylonitrile-butadiene-styrene, Mechanical properties, Thermal properties

1. บทนำ

ในปัจจุบันกองทัพอากาศให้ความสำคัญในด้านการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนของอากาศยานเป็นอย่างมาก เพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีอากาศยานแก่องค์กรและลดการนำเข้าวัสดุราคาแพงจากต่างประเทศ รวมไปถึงเสริมสร้างศักยภาพในการปฏิบัติการกิจต่าง ๆ ด้วยเช่นกัน ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิตได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเอาไปใช้เป็นส่วนประกอบของพาหนะ เช่น จักรยานยนต์ รถยนต์ เรือ อากาศยาน ดาวเทียม ฯลฯ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตนั้นมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงกว่าโลหะ อีกทั้งยังทนต่อการกัดกร่อนสูงเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยโดยส่วนใหญ่จึงเน้นไปทางการศึกษาวัสดุประเภทคอมโพสิต ซึ่งวัสดุที่ใช้งานในอุตสาหกรรมอากาศยานนั้นจำเป็นต้องมีทั้งความแข็งแรงสูงและความสามารถในการคงตัวได้ดีภายใต้ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงเสียดทานขณะทำการบินที่บริเวณพื้นผิวโครงสร้างโดยมีอุณหภูมิที่เกิดขึ้น 120°C ที่ความเร็ว 2.2 เท่าของความเร็วเสียง [1] หากสามารถลดน้ำหนักได้ก็จะส่งผลดีต่ออากาศยานในแง่ของสมรรถนะที่จะสูงขึ้นหากมวลรวมเบาลง และยังเอื้อประโยชน์ในแง่ของการลดการใช้เชื้อเพลิงด้วยเช่นกัน โดยชิ้นส่วนอากาศยานเหล่านี้หลักจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วนั้น จะต้องนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติทั้งด้านสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน เนื่องจากอากาศยานนั้นจะถูกใช้ในสภาพแวดล้อมหรือภูมิประเทศที่แตกต่างกันออกไป จึงทำให้ต้องมีการออกแบบและขึ้นรูปส่วนประกอบที่มีลักษณะและสมบัติที่ต่างกันอย่างไปตามการใช้งาน การขึ้นรูปวัสดุทางอากาศยานนั้น ณ ปัจจุบันมีอยู่หลากหลายวิธีการ โดยในปัจจุบันนี้การใช้เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์สามมิติเริ่มเข้ามามีบทบาทในการขึ้นรูปชิ้นส่วนอากาศยานมากขึ้นเนื่องจากสามารถขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิตที่โครงสร้างซับซ้อน แม่นยำ และแข็งแรงทนทาน เช่น โครงสร้างแบบแซนด์วิช โครงสร้างแบบรวงผึ้ง อีกทั้งยังมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปที่น้อยเมื่อเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปของคอมโพสิตวิธีการอื่นๆ [2]

เทคโนโลยีการขึ้นรูปโดยเครื่องพิมพ์สามมิตินั้นพัฒนาไปอย่างรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับในอดีต เทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างและออกแบบโครงสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ในเชิงพาณิชย์อุตสาหกรรม เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องประดับ ชิ้นส่วนยานยนต์ ของใช้ในชีวิตประจำวัน รวมไปถึงชิ้นส่วนอากาศยาน เป็นต้น [3] โดยหลักการการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิตินั้น ผู้ใช้ต้องเขียนแบบจากซอฟต์แวร์ Computer-Aided Design (CAD) จากนั้นส่งโมเดลที่ออกแบบไปทำการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติโดยการผลิตแบบชั้นต่อชั้น (Layer by Layer) เพื่อให้ได้แบบที่ต้องการ [4]

เนื่องด้วยค่าตัวแปรของเครื่องพิมพ์สามมิติมีหลายค่าตัวแปร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ ของ เครื่องพิมพ์สามมิติ นั้นจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูป ทั้งด้านคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติเชิงความร้อน [5] ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจจะไม่สามารถใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ ซึ่งนับเป็นความท้าทายของคณะผู้วิจัย ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการขึ้นรูปชิ้นงานจากพอลิอะครีโลไนไตรล์-บิวเทไดอิน-สไตรีน (ABS) ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรสองชนิดของเครื่องพิมพ์สามมิติ คือ อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle temperature; 240°C , 250°C และ 260°C) และปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่าง (Infill Density; 25%, 50%, 75% และ 100%) ต่อลักษณะพื้นฐานวิทยา ค่าดัชนีความเป็นผลึก สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนของชิ้นส่วนอากาศยาน

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบสามมิติ โดยทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิหัวฉีดและปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่าง

2.2 การศึกษาและทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยา ค่าดัชนีความเป็นผลึก สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมได้

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2018 Wu และ Junhui [6] ศึกษาหาค่าความสูงของชั้นเลเยอร์ในการพิมพ์แบบสามมิติที่ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ ความสิ้นเปลืองของวัสดุ และความแม่นยำในการพิมพ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยผู้ทำวิจัยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติรุ่น Raise3D N2plus อุณหภูมิหัวฉีดถูกตั้งไว้ที่ 210°C วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์คือพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยผลการวิจัยพบว่าที่ความสูงของชั้นเลเยอร์เท่ากับ 0.14 มม. นั้น ใช้เวลาในการพิมพ์และมีความสิ้นเปลืองของวัสดุน้อย และมีความแม่นยำในการพิมพ์ที่สุด

ในปี ค.ศ. 2022 Fontana L และคณะผู้วิจัย [7] ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการพิมพ์สามมิติที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของวัสดุ PLA โดยตัวแปรของการพิมพ์สามมิติคือความสูงของชั้นพิมพ์และเปอร์เซ็นต์การเติมสาร ผลการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นมีความสำคัญมากกว่าเปอร์เซ็นต์การเติมสารสำหรับความต้านทานแรงดึงของผลิตภัณฑ์ PLA นอกจากนี้ยังมีการเสนอแบบจำลองการถดถอยเพื่อให้ผู้ใช้สามารถทำนายความต้านทานแรงดึงสูงสุดของผลิตภัณฑ์ PLA โดยขึ้นอยู่กับค่าของพารามิเตอร์ทั้งสองที่ได้จากการศึกษา

ในปี ค.ศ. 2018 Coppola และคณะผู้วิจัย [8] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์สามมิติโดยใช้วัสดุนาโนคอมโพสิต (PLA/ดินเหนียว) และใช้เครื่อง TGA DMA และ DSC ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในส่วนของผลการวิจัยพบว่า การจัดแนวเมตริกซ์ อุณหภูมิการพิมพ์ และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

4. การดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรจากเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยตัวแปรที่ทำการปรับเปลี่ยนมี 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิหัวฉีด และปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่าง โดยที่อุณหภูมิหัวฉีดในการศึกษาครั้งนี้คือ ที่อุณหภูมิ 240°C , 250°C และ 260°C ส่วนปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่างจากแม่พิมพ์คือ 25%, 50%, 75% และ 100% ตามลำดับ และเรียกชิ้นงานที่เตรียมได้ด้วยชื่อย่อ 240F25, 240F50, 240F75, 240F100, 250F25, 250F50, 250F75, 250F100, 260F25, 260F50, 260F75 และ 260F100 โดยตัวเลขข้างหน้าอ้างอิงตามอุณหภูมิหัวฉีดและตัวเลขข้างหลังอ้างอิงตามปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติก

ในส่วนของตัวอย่างชิ้นงานทั้งหมดในการวิจัยครั้งนี้ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (Bambu Lab, X1 Carbon, China) และวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปคือเส้นใยของพอลิอะคริโลไนไครล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene; ABS, Raise3D, U.S.A.) โดยกำหนดความเร็วในการพิมพ์ 200 มม.ต่อวินาที อุณหภูมิฐานรองพิมพ์ 100°C ความหนาของชั้นพิมพ์ 2 มม. ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงาน 5 ประเภท คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine; UTM) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Analysis; XRD) เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกล (Dynamic Mechanical Analysis; DMA) และ เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA)

4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาพื้นผิวหรือลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานทำการโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Carl Zeiss, Auriga, Germany) โดยตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดึงจนขาดเป็นสองท่อนมาแล้ว จากนั้นนำเอาไปอบไอน้ำของทองก่อนการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนต่อไป ซึ่งเป็นการศึกษาภาพถ่ายแนวขวางของชิ้นงาน ณ บริเวณที่เกิดการร้าวจากการทดสอบความทนต่อแรงดึง โดยทำการศึกษาที่กำลังขยาย 30 เท่า

4.2 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (LLOYD, LD10, England) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 638 ตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติจะมีรูปร่างเป็นกระดูกหมา (Dog Bone Shape) ที่มีความหนา 3.2 มม. ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ขนาดหัวกดขนาด 10 กิโลนิวตัน และมีอัตราเร็วในการดึงที่ 10 มม.ต่อนาที โดยจะใช้ชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นงานต่อการทดสอบแต่ละสูตรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร และนำไปแปลงเป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบเพื่อให้ผลการทดสอบมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

4.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างผลึก รวมไปถึงดัชนีความเป็นผลึกทำการศึกษาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (Bruker, AXS D8, Germany) โดยมุมการเลี้ยวเบน อยู่ในค่าระหว่าง 5° C ถึง 40° C ด้วยอัตราสแกน 2° C ต่อนาที ซึ่งผู้วิจัยกำหนดชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติให้เป็นรูปร่างทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. และความสูง 2 มม. ก่อนการวิเคราะห์ทำการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจัดเก็บไว้ในตู้เก็บความชื้นเพื่อรอทดสอบ

4.4 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกล

เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกล (DMA) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ ทำให้สามารถทราบค่ามอดุลัสจืดเก็บและมอดุลัสสูญเสียโดยการกำหนดแรงที่มากระทำต่อชิ้นงานในลักษณะเป็นคาบ [9] การทดลองนี้ใช้เครื่อง Mettler Toledo Model DMA 1 ในการทดลองโดยผู้วิจัยกำหนดขนาดชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติให้มีความยาว ความกว้าง และความหนา คือ 10.65 มม. x 12.19 มม. x 2.10 มม. จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์เพื่อหาค่ามอดุลัสการจืดเก็บต่ออุณหภูมิชิ้นงานด้วยเครื่อง DMA ซึ่งกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้น 35° C อุณหภูมิสิ้นสุดที่ 150° C อัตราการให้ความร้อนของเครื่องคือ 5° C ต่อนาที ค่าแอมพลิจูดที่ 20 ไมโครเมตร และความถี่ที่ 1 เฮิรตซ์ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ในรูปแบบแผนภูมิเชิงเส้น

4.5 เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อน

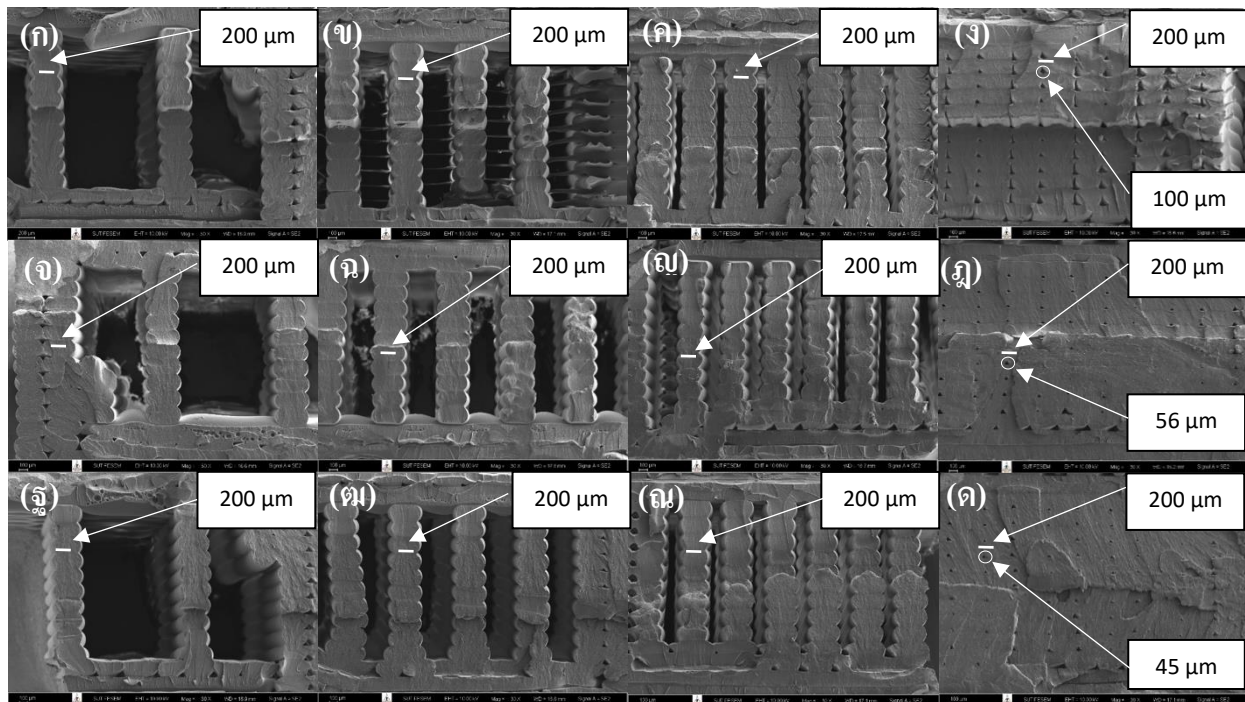
เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อนเป็นเครื่องมือวัดเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักระหว่างการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอย่างต่อเนื่อง [10] การทดลองนี้ใช้เครื่อง Mettler Toledo Model TGA/DSC1 ในการทดลองโดยชิ้นงานที่ใช้การทดลองคือ ABS น้ำหนักประมาณ 5-10 มก. ซึ่งชิ้นงานจะได้รับความร้อนจาก TGA ด้วยอัตราความร้อน 10° C ต่อนาที เนื่องจากเป็นอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมสำหรับ ABS [11] จนถึงอุณหภูมิที่ 500° C จากนั้นปล่อยอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ในรูปแบบแผนภูมิเชิงเส้น

5. ผลการวิจัย

5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่าง (240F25-100 250F25-100 และ 260F25-100) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยลักษณะพื้นผิวและรายละเอียดต่าง ๆ ดังรูปที่ 1 พบว่า ในทุกอุณหภูมิหัวฉีด 240° C, 250° C และ 260° C มีลักษณะแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกมากขึ้นช่องว่างของเนื้อพลาสติกจะลดลงตามสัดส่วนตั้งแต่ 25, 50, 75 และที่ความหนาแน่น 100% จะสังเกตได้ว่าพื้นผิวของชิ้นงานจะมีช่องว่างปรากฏอยู่น้อยมาก อย่างไรก็ตามหากทำการพิจารณาภาพถ่ายอย่างละเอียดจะเห็นช่องว่างขนาดเล็กที่ไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยจะพบได้เมื่อทำการตรวจสอบตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น และมักจะถูกเรียกว่าช่องว่างอากาศ (Air voids) [12] ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ในขณะที่อุณหภูมิหัวฉีดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อขนาดของช่องว่างเหล่านี้ โดยพบว่าช่องว่างมีขนาดเล็กลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีขนาดช่องว่างเฉลี่ยเท่ากับ 94, 62

และ 47 ไมโครเมตร ตามลำดับภาพ (ง), (ญ) และ (ค) เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เนื้อพลาสติกของแต่ละชั้นหลอมเชื่อมติดกันได้ดีขึ้น จึงทำให้ช่องว่างอากาศของชิ้นงานที่ทำการพิมพ์โดยใช้อุณหภูมิหัวฉีด 260°C มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 240°C และ 250°C ตามลำดับ เมื่อช่องว่างขนาดเล็กลงทำให้ชิ้นงานมีสมบัติการคงทนต่อการเปลี่ยนรูปสูงขึ้น เนื่องจากช่องว่างอากาศถือเป็นความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ (Voids Defect) การที่ช่องว่างมีขนาดเล็กลงนั้น ส่งผลให้ความไม่สมบูรณ์ของวัสดุน้อยลงตาม ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถสังเกตได้ที่ปริมาณสัดส่วนความหนาแน่น 100% เท่านั้น โดยที่ความหนาแน่น 25%, 50% และ 75% จะไม่สามารถสังเกตความแตกต่างของขนาดช่องว่างได้ชัดเจน เนื่องจากมีที่ว่างที่เกิดจากปริมาณเนื้อพลาสติกที่ยังไม่เต็มแม่พิมพ์



รูปที่ 1 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวอย่าง

โดยที่ : (ก) 240F25 (ข) 240F50 (ค) 240F75 (ง) 240F100 (จ) 250F25 (ฉ) 250F50
(ญ) 250F75 (ฎ) 250F100 (ฐ) 260F25 (ฒ) 260F50 (ณ) 250F75 (ด) 250F100

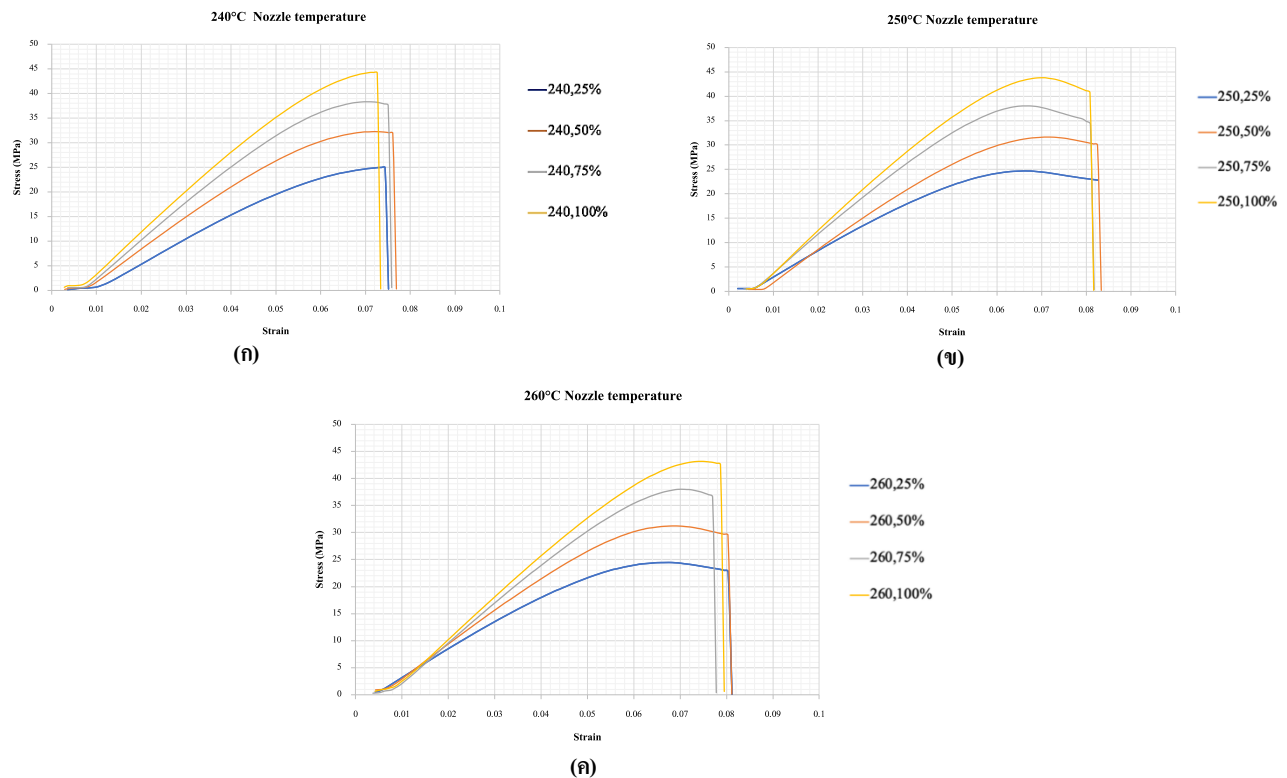
5.2 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์

ความทนต่อแรงดึง ระยะยืด และน้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงาน เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความทนต่อแรงดึง ระยะยืด และน้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงาน

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)	ระยะยืด	น้ำหนัก (กรัม)
240F25	25.33	9.02	26.85
240F50	31.96	8.26	32.35
240F75	38.23	7.87	38.11
240F100	44.73	8.47	43.47
250F25	24.25	7.88	26.85
250F50	31.46	9.23	32.35
250F75	38.11	8.25	38.11
250F100	43.72	8.12	43.47
260F25	24.47	8.28	26.85
260F50	31.47	9.02	32.35
260F75	37.83	8.63	38.11
260F100	43.09	9.01	43.47

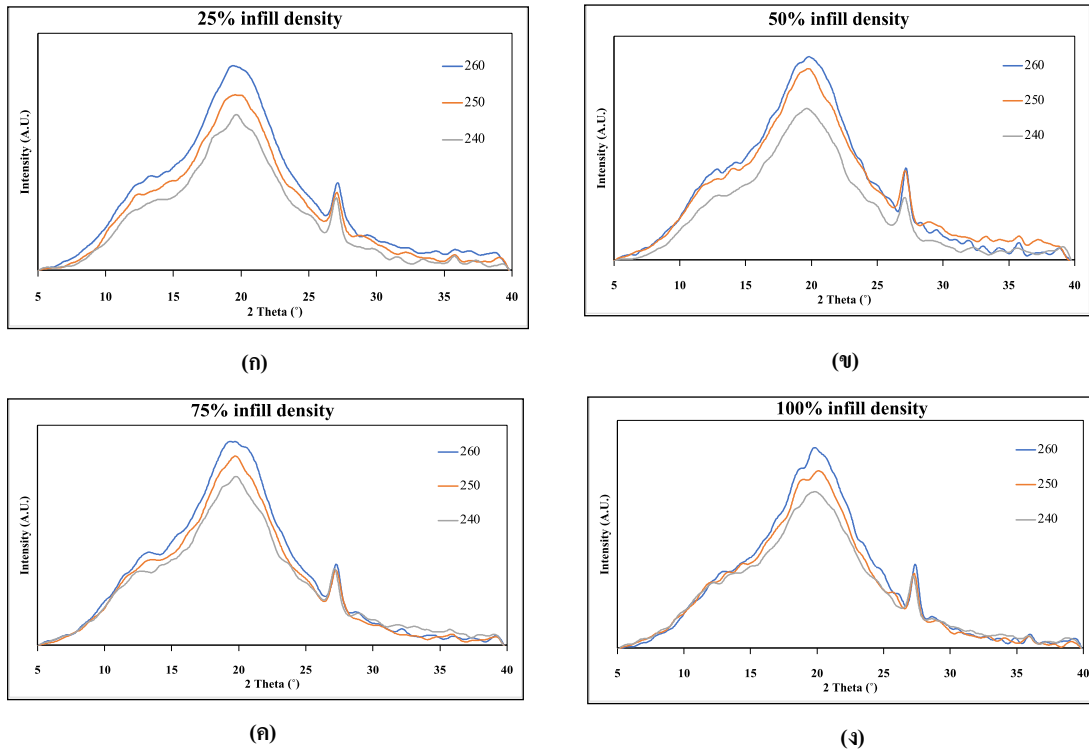
การศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานผ่านการทดสอบความทนแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ โดยรูปที่ 2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของชิ้นงานในแต่ละอุณหภูมิหัวฉีด จากผลการทดสอบพบว่าความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นมากขึ้น [13] และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันสำหรับทุกอุณหภูมิหัวฉีด ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการมีช่องว่างภายในชิ้นงานลดลงเมื่อปริมาณความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แต่ในส่วนของคุณค่าความเครียดหรือระยะยืดของชิ้นงานนั้นพบว่า เปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นส่งผลต่อค่าความยืดเพียงเล็กน้อย โดยค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืดของชิ้นตัวอย่าง (240F25-100, 250F25-100 และ 260F25-100) จะถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 1 นอกจากนี้ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างขึ้นอยู่กับความหนาแน่นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของตัวอย่างที่อุณหภูมิหัวฉีด
(ก) 240°C (ข) 250°C (ค) 260°C

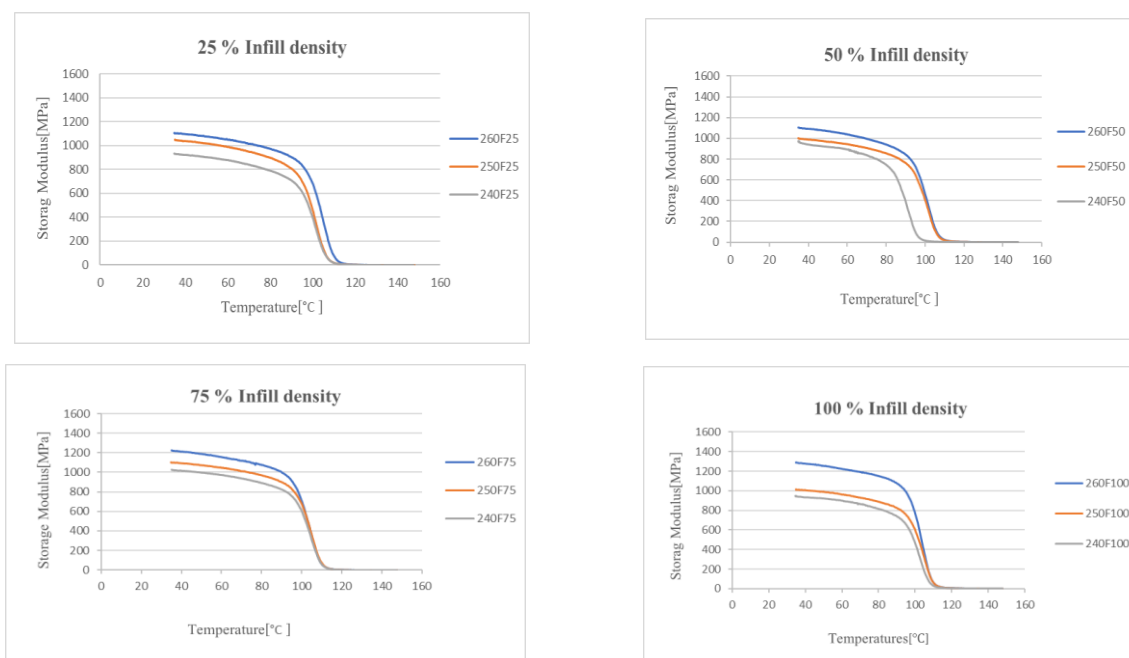
5.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์โครงสร้างและดัชนีความเป็นผลึกของชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ หรือ XRD นั้น ทำให้ทราบถึงลักษณะผลึกหรือความเป็นระเบียบของโครงสร้างภายในวัสดุได้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่จะส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน โดยรูปที่ 3 ได้แสดงค่าความหนาแน่นของการเลี้ยวเบนของชิ้นตัวอย่าง พบว่า มีความหนาแน่นของการเลี้ยวเบนสูงขึ้นบริเวณ โดยรอบจุด 19.7° ซึ่งเป็นการแสดงถึงลักษณะเฉพาะของ ABS และค่านี้ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Zulfi และ คณะ [14] โดยในทุกเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นนั้นจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิของหัวฉีดมีผลต่อความสูงของการเลี้ยวเบน ยิ่งอุณหภูมิของหัวฉีดมีค่าสูงขึ้น ความหนาแน่นของการเลี้ยวเบนก็สูงขึ้นตาม ซึ่งการสูงขึ้นนี้บ่งบอกถึงลักษณะ โครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบ ที่มากขึ้น และการที่วัสดุใด ๆ มีโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบสูงขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้นตามเช่นกัน [13]



รูปที่ 3 ความหนาแน่นของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่องค์าแตกต่างกันของตัวอย่างที่ปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่างจากแม่พิมพ์
(ก) 25% (ข) 50% (ค) 75% (ง) 100%

5.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงกล

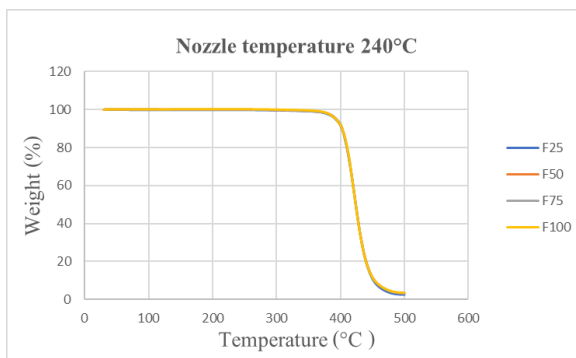


รูปที่ 4 มอดูลัสการจذبเก็บของตัวอย่างที่ปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่างจากแม่พิมพ์
(ก) 25% (ข) 50% (ค) 75% (ง) 100%

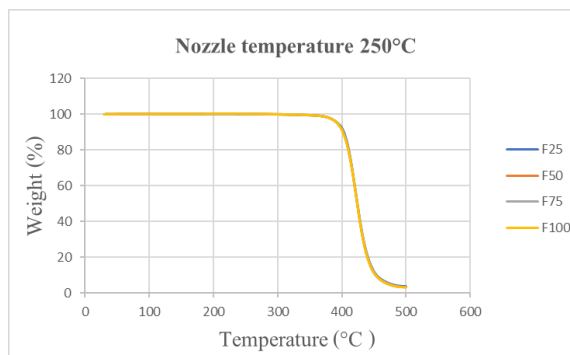
จากแผนภูมิเชิงเส้นทั้ง 4 แผนภูมิที่แสดงในรูปที่ 4 ข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าอุณหภูมิหัวฉีดของเครื่องพิมพ์สามมิตินี้ส่งผลต่อมอดูลัสการจذبเก็บของชิ้นงาน เช่น ณ อุณหภูมิที่ 80 °C ที่ 75% ของปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติก และอุณหภูมิหัวฉีดที่ 240 °C, 250 °C และ 260 °C มีค่ามอดูลัสการจذبเก็บ 891.95, 971.29 และ 1071.36 เมกะปาสคาลตามลำดับ โดยค่ามอดูลัสการจذبเก็บนั้นจะมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิหัวฉีดของเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งวัสดุที่มีค่ามอดูลัสการจذبเก็บมากนั้นจะมีความสามารถในการคงรูปและแข็งแรงได้มากกว่าวัสดุที่มีค่ามอดูลัสการจذبเก็บที่น้อยกว่า [15] [16] และผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทดสอบด้วย SEM และ XRD โดยการทดสอบด้วยเทคนิค SEM นั้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหัวฉีดมีผลต่อขนาดช่องว่างในเนื้อของวัสดุ ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดของช่องว่างอากาศเล็กลง จึงทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปได้ยากขึ้น [17] ส่วนการทดสอบแบบ XRD ถ้าอุณหภูมิหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ยังสูงขึ้น ยิ่งทำให้ความหนาแน่นของการเลี้ยวเบนสูงขึ้นตามแสดงถึงความเป็นระเบียบของโครงสร้างที่มากขึ้น จึงมีผลให้วัสดุคงทนต่อการเปลี่ยนรูปมากขึ้น [18]

5.5 เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อน

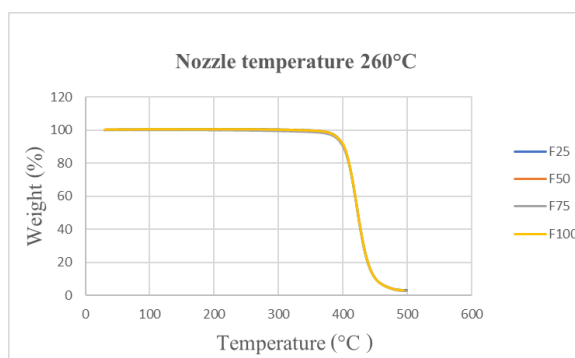
ผลการทดสอบด้วย TGA นั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อทดสอบเสถียรภาพและหาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนต่อชิ้นงานตัวอย่าง โดยจากแผนภูมิในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหัวฉีดและปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่แตกต่างกันออกไป ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของ ABS โดยผลการทดลองทุกผลมีค่าใกล้เคียงกันมากหรืออาจจะเท่ากันในบางตัว กล่าวคือ ชิ้นตัวอย่างจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C ซึ่งเป็นเพราะ ABS ที่ใช้ในงานวิจัยเป็น ABS ชนิดเดียวกันทั้งหมด จึงทำให้มีค่าความเสถียรภาพทางความร้อนที่เท่ากัน ดังนั้นอุณหภูมิการสลายตัวจึงมีค่าใกล้เคียงกัน [19]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 ร้อยละน้ำหนักที่อุณหภูมิแตกต่างกันของตัวอย่างที่อุณหภูมิหัวฉีด

(ก) 240°C (ข) 250°C (ค) 260°C

6. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของกระทบของอุณหภูมิหัวฉีดและปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่างต่อสมบัติของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากเส้นใยพอลิเอทรีโกลไนด์-ไตรล-บิวตะไดอิน-สไตรีน (ABS) ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยพบว่า ชิ้นงานที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในทางอากาศยานคือชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิหัวฉีดที่ 260°C และมีปริมาณความหนาแน่นของเนื้อสาร 100% จากการตรวจสอบลักษณะสันฐานวิทยา พบว่าเมื่อปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกมีสัดส่วนที่มากขึ้น ช่องว่างของเนื้อพลาสติกก็จะลดน้อยลง ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของหัวฉีดที่สูงขึ้นส่งผลให้แต่ละชั้นหลอมเชื่อมติดกันได้มากขึ้น โดยสังเกตได้จากช่องว่างอากาศที่เล็กลง จึงทำให้โครงสร้างภายในมีความเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่ามอดูลัสการจับเก็บเพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการคงรูปได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามผลของการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนบ่งชี้ว่าการปรับเปลี่ยนตัวแปรทั้งสองตัวนั้น ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นตัวอย่างที่เตรียมได้

7. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยการศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเอทรีโคโนไครล์-บิวตะไดอิน-สไตรีน (ABS) ด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิตินี้ ทำการศึกษาตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติอยู่สองตัว คือ อุณหภูมิหัวฉีด และปริมาณความหนาแน่นของเนื้อพลาสติกที่เติมลงในช่องว่าง นอกจากการวิเคราะห์สองตัวแปรนี้แล้วยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์อีก เช่น ความหนาของชั้นพิมพ์ ลักษณะรูปร่าง ความเร็วในการพิมพ์ องศาของการซ้อนทับระหว่างชั้นพิมพ์ ฯลฯ รวมไปถึงการศึกษาในด้านความคุ้มค่าด้านงบประมาณ การกำหนดค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติเพียงพอต่อการใช้งาน การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักและความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งถือว่าเป็นสิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากขึ้นและสุดท้ายจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ในที่สุด

8. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาและวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเอทรีโคโนไครล์-บิวตะไดอิน-สไตรีน (ABS) ด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติ สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดีด้วยคำแนะนำของ คุณ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทางการทหารและอากาศยาน โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยและสถานที่สำหรับการทดลองกรรมสรรพุทธหารอากาศที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ และขอขอบคุณ น.ท. รศ. โชคชัย แจ่มอำพร ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำทางวิชาการต่าง ๆ ในช่วงตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] National Research Council. (1996). Accelerated Aging of Materials and Structures: The Effects of Long-Term Elevated-Temperature Exposure. Washington, DC: The National Academies Press.
- [2] Choudhari, C.J., Thakare, P.S. & Sahu, S.K. (2021). **3D printing of composite sandwich structures for aerospace applications**. In High-performance composite structures: additive manufacturing and processing. Singapore: Springer Singapore.
- [3] Shahrubudin, N., Lee, T.C., & Ramlan, R.J.P.M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*. 35: 1286-1296.
- [4] Tofail, S.A., Koumoulos, E.P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materialstoday*. 21(1): 22-37.
- [5] Fernandes, J., Deus, A.M., Reis, L., Vaz, M.F., & Leite, M. (2018). Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA. 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (547-552). Singapore.
- [6] Wu, J. (2018). Study on optimization of 3D printing parameters. In IOP conference series: materials science and engineering. China.
- [7] Fontana, L., Minetola, P., Iuliano, L., Rifuggiato, S., Khandpur, M.S., & Stiuso, V. (2022). An investigation of the influence of 3d printing parameters on the tensile strength of PLA material. *Materialstoday*. 57: 657-663.
- [8] Coppola, B., Cappetti, N., Di Maio, L., Scarfato, P., & Incarnato, L. (2018). 3D printing of PLA/clay nanocomposites: Influence of printing temperature on printed samples properties. *Materials*. 11(10): 1947.
- [9] Xu, X., & Gupta, N. (2018). Determining elastic modulus from dynamic mechanical analysis: a general model based on loss modulus data. *Materialia*. 4: 221-226.

- [10] Rajisha, K.R., Deepa, B., Pothan, L.A., & Thomas, S. (2011). Thermomechanical and spectroscopic characterization of natural fibre composites. *Interface engineering of natural fibre composites for maximum performance*. 2011: 241-274.
- [11] De Oliveira, G.C., Pereira, L.C., Silva, A.L., Semaan, F.S., Castilho, M., & Ponzio, E.A. (2018). Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) composite electrode for the simultaneous determination of vitamins B 2 and B 6 in pharmaceutical samples. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 22: 1607-1619.
- [12] Mulliken, A.D., & Boyce, M.C. (2006). Mechanics of the rate-dependent elastic-plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates. *International journal of solids and structures*. 43(5): 1331-1356.
- [13] Feiyang, H., & Muhammad, K., (2021). Effects of Printing Parameters on the Fatigue Behaviour of 3D-Printed ABS under Dynamic Thermo-Mechanical Loads. *Polymers*. 13: 2362.
- [14] Akmal, Z., Dian, A.H., Muhammad, M.M., Ferry, I., & Khairurrijal, K. (2019). The synthesis of nanofiber membranes from acrylonitrile butadiene styrene (ABS) waste using electrospinning for use as air filtration media. *Royal Society of Chemistry*. 9(53): 30741-30751.
- [15] Zin, M.H., Abdan, K., & Norizan, M.N. (2019). The effect of different fiber loading on flexural and thermal properties of banana/pineapple leaf (PALF)/glass hybrid composite. In *Structural health monitoring of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. 2019: 1-17
- [16] Campbell, F.C. (2008). **Elements of Metallurgy and Engineering Alloys**.
- [17] Podsiadly, B., Skalski, A., Rozpiórski, W., & Sloma, M. (2021). Are We Able to Print Components as Strong as Injection Molded Comparing the Properties of 3D Printed and Injection Module Components Made from ABS Thermoplastic. *Applied sciences*. 11(15): 6946.
- [18] Martineau, P.M., Gaukroger, M.P., Guy, K.B., Lawson, S.C., Twitchen, D.J., Friel, I., Hansen, J.O., Summerton, G.C., Addison, T.P.G., & Burns, R. (2009). High crystalline quality single crystal chemical vapour deposition diamond. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 21(36).
- [19] Parker, G. (2001). **Encyclopedia of materials: science and technology**.