

การออกแบบปฏิบัติการเพื่อเรียนรู้การพิมพ์สามมิติเทคนิคเฟดตีเอ็ม Workshop Design for FDM Technique 3D Printing Learning

จารุตรม คุณานพดล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย

*ผู้รับผิดชอบบทความ

Jarut Kunanoppadol

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,
Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand

*Corresponding author: kunanoppadol_j@su.ac.th

Received: September 12, 2024 / Revised: October 1, 2024 / Accepted: October 9, 2024

บทคัดย่อ

การให้ผู้เรียนเข้าร่วมประสบการณ์การเรียนรู้แบบใช้ปฏิบัติการเป็นฐานที่ครอบคลุมและเป็นระบบฝึกฝนเทคนิคการพิมพ์สามมิติและพัฒนาทักษะที่สำคัญที่จำเป็นกับแนวทางการผลิตที่ยั่งยืน บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการออกแบบปฏิบัติการเพื่อเรียนรู้การพิมพ์สามมิติเทคนิคเฟดตีเอ็ม เมื่อผู้เรียนได้ผ่าน 11 กิจกรรมการเรียนรู้แบบใช้ปฏิบัติการเป็นฐาน ประกอบด้วย การทดสอบอุณหภูมิของหัวฉีด การไหลของหัวฉีด ความเร็วในการพิมพ์ การดึงกลับ การทดลองพิมพ์รู สะพาน ผนังบาง ส่วนยื่น พิกัดความเผื่อ จุตรองรับ และโมเดลเรือ ผู้เรียนจะสามารถหาการตั้งค่าการพิมพ์และการออกแบบที่เหมาะสมได้ ปฏิบัติการนี้ใช้เครื่องพิมพ์ยี่ห้อ ELEGOO รุ่น NEPTUNE 4 PRO ใช้วัสดุในการพิมพ์เป็นพีแอลเอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร และใช้โปรแกรมคิวราสำหรับการตั้งค่าการพิมพ์และสร้างไฟล์จีโค้ด สื่อการเรียนรู้เป็นแบบผสมคือมีทั้งคู่มือปฏิบัติการและคลิปวิดีโอที่เผยแพร่ทางยูทูป

คำสำคัญ: การพิมพ์สามมิติ; เทคนิคเฟดตีเอ็ม; อุตสาหกรรม 4.0

Abstract

Engaging learners in a comprehensive and systematic workshop-based learning experience masters 3D printing techniques and develops critical skills essential for sustainable manufacturing practices. This article aims to present the workshop for learning FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing. After completing these 11 lab-based learning activities, consisting of the tests of nozzle temperature, nozzle flow, printing speed, retraction, the printing tests of hole, bridge, thin wall, overhang, and benchy, learners will be able to determine appropriate printing parameter settings and design parameters. These workshops use the ELEGOO NEPTUNE 4 PRO printer, 1.75 mm diameter PLA (Polylactic Acid) printing material, and the CURA software for print settings and G-code file generation. The learning materials are in mixed format, including both a laboratory manual and video clips published on YouTube.

Keywords: 3D printing; Fused deposition modelling; Industry 4.0

1. บทนำ

การพิมพ์สามมิติ (3D printing) เป็นส่วนประกอบสำคัญของการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (rapid prototyping) ซึ่งองค์ประกอบหลักอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรม 4.0 (Industry 4.0 หรือ I4.0) (Flores et al., 2020) ในยุคอุตสาหกรรม 4.0 บริษัทผู้ผลิตต้องมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนตามความต้องการที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของลูกค้า ผู้ใช้งาน หรือตลาด (Xu et al., 2021) กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตต้องมีความยืดหยุ่นทั้งรูปแบบสินค้าที่ผลิตและปริมาณการผลิต (Alcácer & Cruz-Machado, 2019) เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมีบทบาทในด้านการผลิตจำนวนน้อย ความสามารถในการปรับเปลี่ยนตามความต้องการของลูกค้า และการลดขั้นตอนในกระบวนการผลิต (Alafaghani et al., 2017; Tofail et al., 2018; Yadav et al., 2021) ชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์สามมิติมีพัฒนาการจากการเป็นแค่ชิ้นงานแนวคิด (conceptual design) ไปสู่การเป็นชิ้นงานต้นแบบ (prototype) จนถึงเป็นการผลิตเพื่อขายแล้ว (Cooper, 2016; Cooper & Sommer, 2018) เทคโนโลยีการผลิตแบบเร่งด่วนสามารถลดเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ลงได้ร้อยละ 30 ถึง 50 (Wang et al., 2007) นอกจากนี้การพิมพ์สามมิตียังช่วยลดของเสียในกระบวนการผลิตเพื่อใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบให้มีประสิทธิภาพอย่างสูงสุด (Tofail et al., 2018)

กระบวนการพิมพ์สามมิติในเชิงพาณิชย์ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1980 หรือ พ.ศ. 2523 (Shahrubudin et al., 2019) การพิมพ์สามมิติ การผลิตแบบเติมเนื้อ (Additive manufacturing หรือ AM) หรือเทคโนโลยีการสร้างชิ้นงานแบบดิจิทัล (digital fabrication technology) เปลี่ยนแบบสามมิติ (3D CAD) ให้เป็นไฟล์ STL (stereolithography) แล้วสร้างเนื้อของชิ้นงานทีละชั้น (layer) จากล่างขึ้นบน การผลิตแบบเติมเนื้อดีกว่าการผลิตแบบเอาเนื้อออก (subtractive manufacturing หรือ SM) เช่น (1) สามารถสร้างชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้โดยไม่ต้องเครื่องมือหรือกระบวนการเพิ่ม (2) สามารถสร้างชิ้นงานที่มีรายละเอียดภายในของชิ้นงานได้โดยไม่ต้องสร้างแยกชิ้นแล้วนำมาประกอบกันในภายหลัง และ (3) สามารถสร้างชิ้นงานที่มีความเบาได้เนื่องจากสามารถทำให้เกิดความโปร่งภายในชิ้นงาน เป็นต้น (Tofail et al., 2018) การผลิตแบบเติมเนื้อสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ใช้วัสดุพื้นฐานแบบผง แบบของเหลว และแบบของแข็ง มาตรฐาน ASTM F2792 ได้แบ่งประเภทของเทคนิคการพิมพ์สามมิติออกเป็น 9 กลุ่ม (Shahrubudin et al., 2019; Tanveer et al., 2022)

การขึ้นรูปแบบเอฟดีเอ็ม (FDM หรือ fused deposition modelling) เป็นเทคนิคที่มีส่วนแบ่งการตลาดสูงที่สุด (ร้อยละ 37) อยู่ในกลุ่มใช้วัสดุพื้นฐานแบบของเหลวและใช้เทคนิคการฉีด (Extrusion) เทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบฉีดเส้นถูกพัฒนาโดยบริษัท Stratasys Inc. ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 หรือ พ.ศ. 2533 (Patil et al., 2021) หลังจากหมดช่วงของสิทธิบัตรเครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้เทคโนโลยีเดียวกันถูกเรียกว่าเอฟเอฟเอฟ (FFF หรือ fused filament fabrication) เพื่อป้องกันปัญหาด้านลิขสิทธิ์ เทคนิคเอฟดีเอ็มและเอฟเอฟเอฟ คือ การดันเส้นโพลีเมอร์ผ่านหัวฉีดที่มีอุณหภูมิสูงเพื่อให้วัสดุมีสถานะกึ่งของเหลว



และต้นผ่านหัวฉีดขนาดเล็กที่เคลื่อนที่เพื่อสร้างรูปร่างของชิ้นงานทีละชั้น ลักษณะการเคลื่อนที่ของหัวฉีดจะขึ้นกับชนิดของเครื่องพิมพ์ เช่น เครื่องพิมพ์แบบพิกัดคาร์ทีเซียน แบบพิกัดโพลาาร์ และแบบพิกัดเดลต้า (Alafaghani & Qattawi, 2018; Suteja & Soesanti, 2020) เครื่องพิมพ์สามมิติแบบพิกัดคาร์ทีเซียนหรือพิกัด XYZ เป็นแบบที่ถูกใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีราคาต่ำที่สุด (Tanveer et al., 2022)

การพิมพ์สามมิติสนับสนุนกระบวนการออกแบบเพื่อสร้างต้นแบบได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น สนับสนุนกระบวนการผลิตให้สามารถสร้างชิ้นงานรูปแบบใหม่ที่ไม่สามารถผลิตได้ด้วยเทคโนโลยีเดิมและยังสามารถลดวัสดุเหลือใช้ลง และสนับสนุนกระบวนการให้บริการที่เพิ่มความยืดหยุ่นของสินค้าและสามารถปรับตามความต้องการของลูกค้าได้ (Mitchell et al., 2018) มันจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อากาศยาน ยานยนต์ อาหาร การแพทย์และสุขภาพ สถาปัตยกรรมและการก่อสร้าง สิ่งทอและแฟชั่น ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น (Shahrubudin et al., 2019) การพิมพ์สามมิติได้วิวัฒนาการจากการผลิตสินค้าต้นแบบมาสู่การผลิตสินค้าจริง (lab to fab) (Tofail et al., 2018) โรงงานผลิตถูกเปลี่ยนจากสายการผลิตที่มีหลายขั้นตอนและต้องใช้หลายเครื่องจักรมาสู่โรงงานที่สามารถผลิตได้โดยตรงจากกระบวนการเดียว (fab lab) นอกจากนี้ ยังสามารถเคลื่อนย้ายไปผลิตในสถานที่ต่าง ๆ ได้ (mobile fab lab) (Pei, 2014)

การพิมพ์สามมิติเหมาะกับการผลิตสินค้าที่มีมูลค่าสูงในปริมาณน้อยเนื่องจากสามารถลดขั้นตอนการผลิตลงและไม่ต้องการประโยชน์จากการผลิตในปริมาณมาก (economy of scale) ความยืดหยุ่นในการผลิตทำให้สามารถปรับเปลี่ยนรายละเอียดของสินค้าตามความต้องการเฉพาะของลูกค้าได้ กระบวนการผลิตและเครื่องจักรจำนวนมากถูกลดทอนลง บุคลากรที่มีความสามารถหลากหลายและครอบคลุมขอบเขตของงานทั้งในด้านกระบวนการทำงาน ได้แก่ การออกแบบ วิเคราะห์และผลิต รวมทั้งด้านเทคโนโลยี เช่น โปรแกรมออกแบบและเทคนิคการพิมพ์สามมิติแบบต่าง ๆ จึงเป็นที่ต้องการ (Tofail et al., 2018) อย่างไรก็ตาม ภาคอุตสาหกรรมยังเผชิญกับสภาวะขาดแคลนบุคลากรที่มีความรู้และทักษะด้านการพิมพ์สามมิติ (Prashar et al., 2023) ดังนั้น การเพิ่มความรู้และทักษะด้านการพิมพ์สามมิติจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการผลิตในยุคอุตสาหกรรม 4.0

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอรายละเอียดของปฏิบัติ “การพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิคเอฟดีเอ็ม” เพื่อให้ผู้เรียน¹ มีความรู้ ความเข้าใจ ทักษะ และประสบการณ์ และสามารถนำไปใช้ต่อยอดในอนาคต ผู้เขียนได้กำหนดผลลัพธ์การเรียนรู้ที่คาดหวัง (expected learning outcomes หรือ ELOs) ของปฏิบัติการนี้ว่าเมื่อผู้เรียนได้เรียนรู้ผ่าน 11 กิจกรรมการเรียนรู้แบบใช้ปฏิบัติการเป็นฐาน (workshop-based learning) จะสามารถทำสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ได้ ELO1 ทดสอบหาการ ตั้งค่าการพิมพ์ที่เหมาะสมภายใต้สภาวะของการพิมพ์ ประกอบด้วย 4 ปฏิบัติการ ได้แก่ (1) การทดสอบอุณหภูมิของหัวฉีด (2) การทดสอบการไหลของหัวฉีด (3) การทดสอบความเร็วในการพิมพ์ และ (4) การทดสอบการดึงกลับ และ ELO2 ทดสอบหาค่าการออกแบบที่เหมาะสม ประกอบด้วย 6 ปฏิบัติการ ได้แก่ (5) การทดลองพิมพ์รู (6) การทดลองพิมพ์สะพาน (7) การทดลองพิมพ์ผนังบาง (8) การทดลองพิมพ์ส่วนยื่น (9) การทดลองพิมพ์พิกัดความเผื่อ (10) การทดลองพิมพ์จุดรองรับ และ (11) การทดลองพิมพ์โมเดลเรือ เป็นการพิจารณาภาพรวมของการพิมพ์

2. การพิมพ์สามมิติ เทคนิคเอฟดีเอ็ม

2.1 เครื่องพิมพ์สามมิติ

ปฏิบัติการนี้ใช้เครื่องพิมพ์สามมิติยี่ห้อ ELEGOO รุ่น NEPTUNE 4 PRO โดยมีรายละเอียดเชิงเทคนิค ดังนี้ (1) สามารถพิมพ์ชิ้นงานขนาด 225 x 225 x 265 มิลลิเมตร (2) มีความละเอียด ± 1 มิลลิเมตร (3) ขนาดหัวฉีดที่ให้มี 0.4 มิลลิเมตร (4) ความเร็วในการพิมพ์ 30 ถึง 500 มิลลิเมตรต่อวินาที (5) งานได้ในอุณหภูมิ 5-40 องศาเซลเซียส (6) ทำอุณหภูมิหัวฉีดได้สูงสุด 300 องศาเซลเซียส (7) ทำอุณหภูมิฐานพิมพ์ได้สูงสุด 110 องศาเซลเซียส (8) ใช้คู่กับโปรแกรมคิวรา (9) รองรับไฟล์ STL และ OBJ (10) รับและส่งไฟล์ด้วย USB-A หรือสาย LAN (11) ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 100-120 โวลท์ และ 220-240 โวลท์ และ (12) ไฟฟ้ากระแสตรงภายในเครื่อง 24 โวลท์ (ELEGOO, 2024)

¹ ผู้เรียนเป้าหมาย เช่น นักศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิต รวมถึงบุคคลทั่วไปที่สนใจงานด้านการพิมพ์สามมิติ

2.2 โปรแกรมคิวรา

โปรแกรมคิวรา (CURA) ที่ใช้ในปฏิบัติการเป็นเวอร์ชัน 5.6.0 โปรแกรมถูกพัฒนาโดยบริษัทอัลติเมคเกอร์ (Ultimaker) เป็นฟรีแวร์ สามารถใช้กับเครื่องพิมพ์ที่หลากหลาย และใช้งานได้กับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ แมคอินทอช และ ลินุกซ์ เมื่อดาวน์โหลดและติดตั้งลงในคอมพิวเตอร์หรือแล็ปท็อปแล้วให้ทำการเพิ่มเครื่องพิมพ์ ดังนี้ (1) กดลูกศรชี้ลงตรงชื่อเครื่องพิมพ์ แล้วกด Add printer (2) เลือก Non UltiMaker Printer เพื่อเลือกเครื่องพิมพ์ยี่ห้ออื่น ๆ (3) เลือกเครื่องพิมพ์ตรง Add a non-network printer และเลือกยี่ห้อ ELEGOO เลือกรุ่น ELEGOO NEPTUNE 3 Pro แล้วกด Add จะเห็นชื่อเครื่องพิมพ์ที่เพิ่มเข้าไป ปิดหน้าต่างนี้ไปก่อน (4) ติดตั้งส่วนเสริม (plug-in) เพิ่มเพื่อใช้ในการทำปฏิบัติการ โดยกดที่ Marketplace แล้วพิมพ์ calibration ในช่องค้นหา (5) ติดตั้ง Calibration Shapes ลงในโปรแกรม (6) เมื่อติดตั้งแล้วโปรแกรมจะถามให้ทำการปิดโปรแกรม และ (7) เปิดโปรแกรมใหม่จะพบส่วนเสริมที่ติดตั้งลงไปจะอยู่ในแถบ Extensions แล้ว

2.3 วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์

วัสดุโพลีเมอร์ที่ใช้ในงานพิมพ์เอฟดีเอ็มจะเรียกว่าฟิลาเมนต์ (Filament) โดยถูกจัดมาเป็นลักษณะเส้น ขนาดที่นิยมใช้งานมาก คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร งานพิมพ์ด้วยเทคนิคเอฟดีเอ็มสามารถใช้วัสดุโพลีเมอร์ได้หลายประเภท เช่น ABS (acrylonitrile butadiene styrene), ASA (acrylonitrile styrene acrylate), Nylon 12, PC (polycarbonate), PPSF/PPSU (polyphenylsulfone), PEI (polyetherimide หรือ ULTEM), PLA (polylactic acid), TPU (thermoplastic polyurethane), PEEK (polyether ether ketone), และ PETG (polyethylene terephthalate glycol) เป็นต้น (Lee et al., 2017; Yadav et al., 2021) วัสดุพีแอลเอเป็นวัสดุที่นิยมใช้งานมากที่สุดเพราะ (1) ใช้อุณหภูมิการพิมพ์ไม่สูงทำให้สามารถใช้กับเครื่องพิมพ์ทั่วไปได้และไม่เปลืองพลังงานไฟฟ้า (2) มีน้ำหนักเบา (3) มีกลิ่นเหม็นและไอสารพิษในระดับต่ำ (4) การหดตัวเมื่อเย็นตัวน้อยทำให้ไม่ต้องมีระบบให้ความร้อนที่ฐานพิมพ์และไม่ต้องควบคุมอุณหภูมิบริเวณรอบเครื่องพิมพ์ (5) ชิ้นงานสามารถใช้ในที่อุณหภูมิสูงได้เนื่องจากวัสดุจะเกิดการบิดตัวที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส (6) เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมมาจากวัสดุธรรมชาติ เช่น กากอ้อย แกนข้าวโพด รากมันสำปะหลัง เป็นต้น เส้นใยจากธรรมชาติมีส่วนเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล สามารถย่อยสลายได้ และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย (Aloyaydi et al., 2020; Johnson & French, 2018; Lubombo & Huneault, 2018; Rodríguez-Panes et al., 2018; Singh et al., 2020; Suteja & Soesanti, 2020; Tao et al., 2019) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้รายงานค่าคุณสมบัติเชิงกลของพีแอลเอเอาไว้ดังตาราง 1 (Chacón et al., 2017; Kołodziej et al., 2019)

ตาราง 1

คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุพีแอลเอ

คุณสมบัติเชิงกล	Kołodziej et al. (2019)	Chacón et al. (2017)	หน่วย
Density	1.24		g/cm ³
Elastic modulus	3500		MPa
Shear modulus	1287		MPa
Poisson's ratio	0.36		--
Yield strength	70	15.5 - 72.2	MPa
Tensile modulus		2.02 - 3.55	GPa
Flexural strength	106	52 - 115.1	MPa
Flexural modulus		2.392 - 4.930	GPa
Elongation	7	0.5 - 9.2	%

ที่มา. ผู้เขียนสร้างเอง



2.4 ตัวแปรที่มักพบในงานวิจัยด้านการพิมพ์สามมิติ

ตัวแปรอิสระที่มักพบในงานวิจัยด้านการพิมพ์สามมิติ เช่น ทิศทางการพิมพ์ (build orientation) ความหนาของชั้นการพิมพ์ (layer thickness) ขนาดของเส้นการพิมพ์ (raster width) ความหนาแน่นภายใน (infill density) รูปแบบภายใน (infill pattern) อุณหภูมิของหัวฉีด (nozzle temperature) ความเร็วในการพิมพ์ (printing speed) อัตราการป้อนหรือการไหล (feed rate หรือ flow) การชักกลับ (retraction) เป็นต้น ส่วนตัวแปรตามที่มักพบในงานวิจัยด้านการพิมพ์สามมิติ เช่น คุณภาพของพื้นผิว (surface quality) ความแม่นยำเชิงรูปทรง (geometric accuracy) คุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ระยะเวลาในการพิมพ์ (build time) ค่าใช้จ่ายในการพิมพ์ (overall manufacturing cost) เป็นต้น (Chacón et al., 2017; Fernandez-Vicente et al., 2016)

คุณภาพของพื้นผิว ประกอบด้วย (1) ความแข็งของพื้นผิว (surface hardness) ทดสอบด้วยการทดสอบของชอร์ (shore hardness test, type D) (Munprom & Limtasiri, 2019) (2) ความขรุขระของผิว (surface roughness หรือ Ra) สามารถวัดด้วยเครื่องมือ เช่น ยี่ห้อมิทโทโย (Mitutoyo) โดยทำตามมาตรฐาน ISO 1997 (Ahmad et al., 2020; Patil et al., 2021; Pulipaka et al., 2023; Raykar et al., 2015; Tzeng et al., 2009; Yang et al., 2016) (3) คุณภาพของการพิมพ์ที่ใช้การประเมินจากสายตาโดยสามารถใช้ระดับการให้คะแนนเชิงตัวเลข (numerical rating scale หรือ NRS) ไลเคิร์ต สเกลห้าค่า (Five-point Likert scale) การจับคู่เปรียบเทียบ (pairwise comparison) การเรียงลำดับ (ranking) เป็นต้น

คุณสมบัติเชิงกล ประกอบด้วย (1) การทดสอบการดึง (tensile test) (Ahmad et al., 2020; Alafaghani & Qattawi, 2018; Alafaghani et al., 2017; Chacón et al., 2017; Farbman & McCoy, 2016; Fernandez-Vicente et al., 2016; Johnson & French, 2018; Lubombo & Huneault, 2018; Pulipaka et al., 2023; Rodríguez-Panes et al., 2018) (2) การทดสอบการกด (compression test) (Aloyaydi et al., 2020; De Marzi et al., 2023; Lee et al., 2007; Ma et al., 2021; Singh et al., 2020; Tao et al., 2019; Yadav et al., 2021) (3) การทดสอบการดัด (bending test) (Kotodziej et al., 2019) และ (4) การทดสอบการกระแทก (impact test) (Mishra et al., 2021) เป็นต้น

ความแม่นยำเชิงขนาด (dimensional accuracy) สามารถคำนวณได้จากสมการ 1 (Bi & Liang, 2011) โดยที่คือ ความแม่นยำเชิงขนาด มีหน่วยเป็นระยะที่วัด เช่น มิลลิเมตร โดยค่าน้อยหมายถึงมีความแม่นยำสูง, และ คือ ระยะที่วัดตามแกน XYZ ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์หรือไมโครมิเตอร์, และ คือ ระยะตามแบบ เมื่อพิจารณาสมการ 1 จะเห็นว่า มันเป็นการคำนวณความคลาดเคลื่อนรวมตามหลักการเวกเตอร์สามมิติ นอกจากนี้ ความแม่นยำเชิงขนาดยังสามารถคำนวณได้จากสมการ 2 (Yang et al., 2016) ซึ่งเป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยแบบเลขคณิตของความคลาดเคลื่อนในสามแกนโดยได้ค่าเป็นทศนิยมที่แปลงเป็นร้อยละได้ โดยค่าน้อยหมายถึงมีความแม่นยำสูง

$$A = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2} \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{3} \left(\frac{|x - x_c|}{x_c} + \frac{|y - y_c|}{y_c} + \frac{|z - z_c|}{z_c} \right) \quad (2)$$

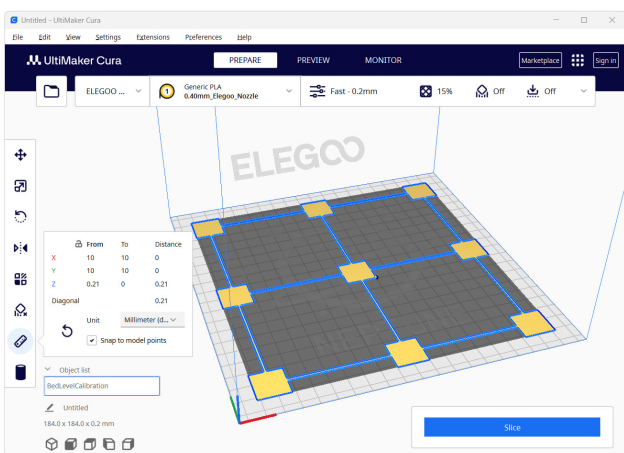
เนื่องจากบทความนี้เป็นปฏิบัติการเพื่อเพิ่มความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ในการพิมพ์สามมิติโดยยังไม่ใช่งานวิจัย ดังนั้น ให้ผู้เรียนพิจารณาผลของการพิมพ์ในด้านคุณภาพของการพิมพ์โดยใช้การประเมินจากสายตา เพื่อเลือกการ ตั้งค่าการพิมพ์ที่เหมาะสมจากปฏิบัติการต่าง ๆ ตามลำดับ

2.5 การตั้งค่าระดับฐานพิมพ์

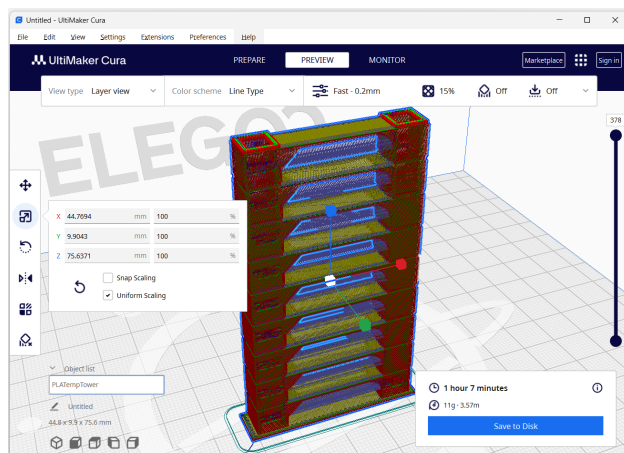
หลังจากประกอบเครื่องพิมพ์ตามคู่มือแล้ว ให้เราตั้งระดับฐานพิมพ์ตามคู่มือของเครื่องพิมพ์ (ELEGOO, 2024) เมื่อปรับระดับฐานพิมพ์แล้ว ให้พิมพ์ชิ้นงานทดสอบ ดังนี้ (1) ที่โปรแกรมคิวร่า กด Extension เลือก Part for calibration แล้วเลือก Add Bed

Level Calibration ชิ้นงานมีลักษณะเป็นการพิมพ์ชั้นเดียวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั่วฐานพิมพ์จำนวน 9 ตำแหน่ง ดังภาพ 1 (ก) เราสามารถตรวจสอบระยะของไฟล์ STL ที่เราสั่งพิมพ์ได้โดยติดตั้งส่วนขยายชื่อ “Measure Tool” จากการวัดพบว่า ชิ้นงานในไฟล์ STL มีความหนาเท่ากับ 0.21 มิลลิเมตร (2) ตั้งค่า Profile เป็น Fast และเลือก Build Plate Adhesion Type เป็น None แล้วกด Slice (3) แล้วกด Preview เพื่อตรวจสอบว่าเป็นการพิมพ์หนึ่งชั้น (4) บันทึกไฟล์ลงไดรฟ์แล้วนำไปพิมพ์

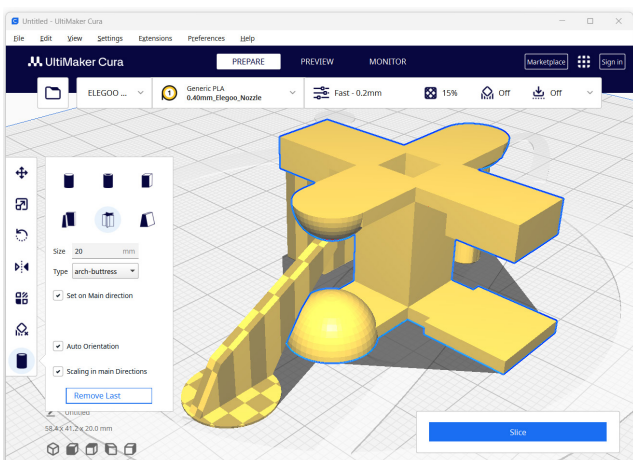
ตรวจสอบผลผลิตของการพิมพ์โดยพิจารณา 2 ประเด็น ได้แก่ (1) ลักษณะการพิมพ์เหมือนกันทุกตำแหน่งหรือไม่ กรณีที่ฐานพิมพ์ไม่ได้รับระดับ หรือฐานพิมพ์เกิดการโค้งหรือยุบ ลักษณะชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะแตกต่างกัน เช่น จุดที่สูงจะได้ชิ้นงานบาง เพราะระยะห่างระหว่างหัวฉีดและฐานพิมพ์น้อย ส่วนจุดที่ต่ำจะได้ชิ้นงานหนาเพราะระยะห่างระหว่างหัวฉีดและฐานพิมพ์น้อยมาก เครื่องพิมพ์ที่ใช้งานอยู่นั้นมีฟังก์ชันปรับระดับฐานพิมพ์แบบอัตโนมัติจึงไม่พบปัญหาฐานพิมพ์ไม่ได้รับระดับ แต่ผู้อ่านสามารถนำวิธีนี้ไปปรับใช้กับเครื่องพิมพ์ที่ไม่มีฟังก์ชันปรับระดับฐานพิมพ์แบบอัตโนมัติได้ และ (2) ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและฐาน โดยไปปรับการพิมพ์แบบ Fast จะมีค่าความสูงของชั้น (layer height) เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร หากเราตั้งระยะห่างระหว่างหัวฉีดและฐานพิมพ์น้อยเกินไป จะได้ชิ้นงานที่หนาน้อยกว่า 0.2 มิลลิเมตร แต่ถ้าเราตั้งระยะห่างระหว่างหัวฉีดและฐานพิมพ์มากเกินไป จะได้ชิ้นงานที่มีลักษณะไม่เรียบ ดังนั้น เราต้องการชิ้นงานที่มีลักษณะผิวเรียบและมีความหนาใกล้เคียงกับความสูง 0.2 มิลลิเมตร เราสามารถทดสอบความหนาด้วยไดอัลเกจ (dial gauge) หรือใช้แผ่นเรียบมาวางบนผิวบนแล้วใช้ฟิลเลอร์เกจ (filler gauge) วัดระยะช่องว่างก็พอได้



(ก) การทดสอบระดับฐานพิมพ์



(ข) การปรับสเกลความสูงของชิ้นงาน



(ค) การใช้จุดรองรับแบบกำหนดเอง



(ง) คลิปสอนในยูทูป

ภาพ 1 ภาพหน้าจอโปรแกรมคิวราและคิวอาร์โค้ดไปยังคลิปสอน

ที่มี. ผู้เขียนจับภาพหน้าจอ



3. การเรียนรู้จากการลงมือทำ²

การเรียนรู้จากการลงมือทำเป็นส่วนหนึ่งของทฤษฎีการเรียนรู้จากประสบการณ์ โดยมีวัฏจักรการเรียนรู้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ ประสบการณ์ที่เป็นรูปธรรม การสะท้อนคิดจากการสังเกต การสร้างแนวคิดที่เป็นนามธรรม และการทดลองปฏิบัติ (Kolb & Kolb, 2005, 2009) ผู้เขียนได้นำหลักการนี้มาใช้ออกแบบการเรียนรู้ด้านการพิมพ์สามมิติผ่านกิจกรรมเชิงปฏิบัติการโดยใช้คู่กับการเรียนรู้โดยให้ผลลัพธ์เป็นฐานเพื่อกำหนดผลลัพธ์การเรียนรู้ของกลุ่มปฏิบัติการ (Keenan, 2013; Voutetaki & Thomoglou, 2024)

3.1 การทดสอบอุณหภูมิของหัวฉีด

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาอุณหภูมิของหัวฉีด (nozzle temperature) ที่เหมาะสมกับสภาวะของการพิมพ์ โดยพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความแม่นยำเชิงขนาดและคุณภาพของการพิมพ์ เราจะทำการพิมพ์หอคอยอุณหภูมิ (temperature tower) ทำดังนี้ (1) ในโปรแกรมคิวรา กดแถบ Extension ทด Part for calibration เลือกร Add a PLA Temp Tower เป็นหอคอยเพื่อพิมพ์ชิ้นงานด้วยอุณหภูมิหัวฉีดเท่ากับ 220 องศาเซลเซียส แล้วลดลงทีละ 5 องศาเซลเซียส จนถึง 180 องศาเซลเซียส (2) ตั้งค่า Profile เป็น Fast ตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt แล้วกด Slice เพื่อตัดชิ้นงานและกด Preview เพื่อดูผลก่อนพิมพ์ (3) จำนวนชั้นของส่วนฐาน³ $B_1 = 4$ ชั้น จำนวนชั้นทั้งหมด $T_1 = 378$ ชั้น และจำนวนค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยน $N = 9$ ค่า (4) คำนวณจำนวนชั้นในแต่ละค่าอุณหภูมิ $L_1 = (T - B) / N = (378 - 4) / 9 = 41.55$ ชั้นต่อค่าอุณหภูมิ จะเห็นว่าเป็นเลขไม่ลงตัว ถ้าเราใช้วิธีปัดทศนิยมเลยอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในชั้นบนได้ ดังนั้น เราควรปรับขนาดของชิ้นงานก่อน (5) กำหนดให้จำนวนชั้นของแต่ละอุณหภูมิเป็นเลขจำนวนเต็ม เช่น $L_2 = 42$ ชั้น จะได้จำนวนชั้นรวมใหม่ $T_2 = (42 \times 9) + 4 = 382$ คิดเป็นสูงกว่าเดิม $T_2 / T_1 = 382 / 378 = 1.0106$ เท่า หรือ 101.06% (6) คลิกซ้ายที่ชิ้นงานและกด Scale ดังภาพ 1 (ข) เอาเครื่องหมายถูกตรง Uniform Scaling ออก แล้วแก้ไขค่าเฉพาะแกน Z เป็น 101.06% (7) กด Slice อีกครั้ง และกด Preview (8) คราวนี้ชิ้นงานมีจำนวนชั้นของส่วนฐาน $B_2 = 4$ ชั้น จำนวนชั้นทั้งหมด $T_2 = 382$ ชั้น จำนวนค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยน $N = 9$ ค่า จำนวนชั้นที่พิมพ์ในแต่ละค่าอุณหภูมิ $L_2 = (382 - 4) / 9 = 42$ ชั้นต่อค่าอุณหภูมิซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม

เราต้องไปตั้งค่าการพิมพ์ให้สามารถเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของหัวฉีดตามจำนวนชั้นของการพิมพ์ ดังนี้ (1) กดแถบ Extensions กด Post Processing และกด Modify G-code เพื่อปรับแต่งจีโค้ด (2) กด Add a script แล้วเลือก Temp Fan Tower (3) ตั้งค่า Starting Temperature เป็น 220 องศาเซลเซียส ตั้งค่า Temperature Increment เป็น -5 องศาเซลเซียส ตั้งค่า Change Layer เป็น 42 ชั้น ตั้งค่า Change Layer Offset เป็น 4 ชั้น ไม่ต้องกดเครื่องหมายถูกที่ Activate Fan Tower แล้วกด Close (4) กด Slice อีกครั้ง จะได้จีโค้ดที่มีการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิแล้ว (5) เอาไฟล์ไปพิมพ์ทดสอบ (6) เมื่อไม่ใช้งานสคริปแล้วให้ลบออกด้วย ไม่เช่นนั้น โปรแกรมจะใช้สคริปนี้กับการพิมพ์ครั้งต่อไป (7) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุปอุณหภูมิของหัวฉีดที่เหมาะสมที่สุด⁴

3.2 การทดสอบการไหลของหัวฉีด

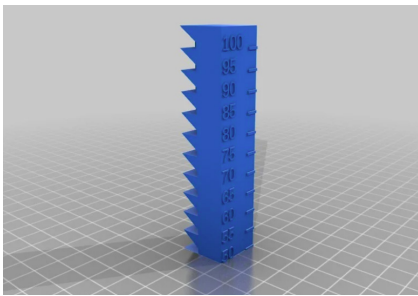
ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาการไหลของหัวฉีด (flow) ที่เหมาะสมกับสภาวะของการพิมพ์โดยพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความแม่นยำเชิงขนาดและคุณภาพของการพิมพ์ การไหลของหัวฉีดและความเร็วในการพิมพ์มีผลต่อความคลาดเคลื่อนเชิงมิติ (dimensional error) ของชิ้นงาน (Panda et al., 2017) เราทดสอบโดยการพิมพ์หอคอยการไหล (flow tower) ดังนี้ (1) เปิดชิ้นงาน Part for calibration ชื่อ Flow Tower Test ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงค่าการไหลจำนวน $N = 11$ ค่า จากร้อยละ 90 ถึงร้อยละ 110 โดยเปลี่ยนแปลงทีละร้อยละ 2 (2) ตั้งค่าอุณหภูมิหัวฉีดตามผลการปฏิบัติการก่อนหน้า (3) ตั้งค่า Profile เป็น Fast ตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt และกด Slice แล้วดูผลก่อนพิมพ์ (4) จำนวน

² เพื่อให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ได้โดยสะดวก ผู้สอนได้จัดทำคลิปบรรยายและอัปโหลดเอาไว้ในยูทูปด้วย ดังภาพ 1 (ง)

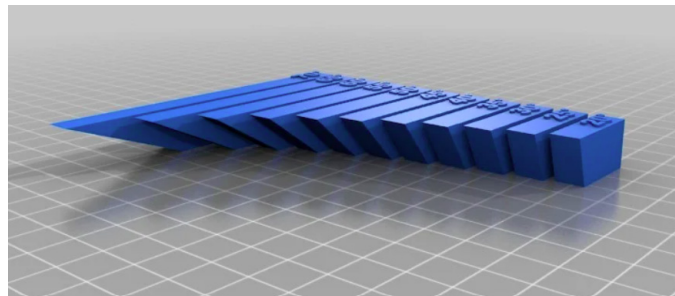
³ เราสามารถเลื่อนแถบด้านขวาขึ้นลงเพื่อดูชั้นของการพิมพ์หรือกดปุ่มขึ้นลงเพื่อดูทีละชั้นได้

⁴ ผู้เขียนพิจารณาเลือกอุณหภูมิหัวฉีดเท่ากับ 195 องศาเซลเซียส

ของส่วนฐาน $B_1 = 2$ ชั้น จำนวนชั้นทั้งหมด $T_1 = 439$ ชั้น คำนวณจำนวนชั้นในแต่ละค่า $L_1 = (439 - 2) / 11 = 39.73$ ชั้น (5) กำหนดจำนวนชั้นของแต่ละค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม เช่น $L_2 = 40$ ชั้น คำนวณจำนวนชั้นรวมใหม่ $T_2 = 40 \times 11 + 2 = 442$ (6) ปรับสัดส่วนความสูงของชิ้นงานเป็น $442 / 439 \times 100 = 100.68\%$ แล้วลองกด Slice อีกครั้ง ได้จำนวนชั้นต่าง ๆ ตามที่คำนวณเอาไว้ (7) เพิ่มสคริป Flow Tower โดยตั้งค่า Starting value เป็น 110.0% ตั้งค่า Value Increment เป็น -2.0% ตั้งค่า Change Layer เป็น 40 ชั้น ตั้งค่า Change Layer Offset เป็น 2 ชั้น ทำเครื่องหมายถูกที่ Display details on LCD แล้วกด Close (8) กด Slice อีกครั้งจะได้จีโค้ดที่มีการเปลี่ยนค่าการไหล (9) เอาไฟล์ไปพิมพ์ทดสอบ และ (10) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุปการไหลของหัวฉีดที่เหมาะสมที่สุด⁵



(ก) ชิ้นงานทดสอบการไหล



(ข) ชิ้นงานทดสอบการยื่น

ภาพ 2 ไฟล์เอสทีแอลที่สามารถดาวน์โหลดมาใช้ได้ฟรี

ที่มา. www.thingiverse.com⁶

3.3 การทดสอบความเร็วในการพิมพ์

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาความเร็วในการพิมพ์ (printing speed) ที่เหมาะสมกับสถานะของการพิมพ์โดยพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความแม่นยำเชิงขนาดและคุณภาพของการพิมพ์ ความเร็วในการพิมพ์ที่ช้าเกินไปจะทำให้ความร้อนจากหัวฉีดถ่ายเทไปยังชั้นที่พิมพ์ไว้ก่อนหน้าส่งผลให้คุณภาพผิวของชิ้นงานลดลง (Yang et al., 2016) เราทดสอบโดยการพิมพ์หอคอยความเร็ว (speed tower) ซึ่งในโปรแกรมคิวราไม่มี เราสามารถดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ Thingiverse.com โดยค้นหาโมเดลชื่อ Speed calibration tower ดังภาพ 2 (ก) ชิ้นงานเป็นหอคอยสำหรับพิมพ์ด้วยความเร็ว 50 ถึง 100 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยเพิ่มชั้นทีละ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที รวมจำนวนค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลง $N = 11$ ค่า ทำการตั้งค่า ดังนี้ (1) ตั้งค่าอุณหภูมิหัวฉีดและการไหลตามผลการปฏิบัติการก่อนหน้าโดยเปิดการตั้งค่าแบบ Expert แล้วตั้งค่า Flow ในหัวข้อ Material (2) ตั้งค่า Profile เป็น Fast ตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt และกด Slice แล้วดูผลก่อนพิมพ์ (3) จำนวนชั้นรวม $T_1 = 440$ ชั้น ไม่มีส่วนฐาน คำนวณจำนวนชั้นของแต่ละค่าเท่ากับ $L_1 = 440 / 11 = 44$ ชั้น เป็นเลขจำนวนเต็มอยู่แล้ว ดังนั้น ไม่ต้องปรับสัดส่วนชิ้นงาน (4) เรียกใช้สคริปใน Post Processing Modify G-code โดยเรียกใช้สคริป Speed Tower แล้วเลือก Command เป็น Speed ตั้งค่า Starting value เป็น 50.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ตั้งค่า Value Increment เป็น 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ตั้งค่า Change Layer เป็น 44 ชั้น ตั้งค่า Change Layer Offset เป็น 0 ชั้น ทำเครื่องหมายถูกที่ Display details on LCD แล้วกด Close (5) กด Slice จะได้จีโค้ดที่มีการเปลี่ยนค่าความเร็วในการพิมพ์ (6) เอาไฟล์ไปพิมพ์ทดสอบ และ (7) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุปความเร็วในการพิมพ์ที่เหมาะสมที่สุด⁷

⁵ ผู้เขียนพิจารณาเลือกการไหลเท่ากับ 94%

⁶ บทความนี้ได้นำรูปจากเอกสารอ้างอิงดังกล่าวมาใช้ประกอบการเรียนการสอนจำนวน 1 รูป

⁷ ผู้เขียนพิจารณาเลือกความเร็วในการพิมพ์เท่ากับ 75 มิลลิเมตรต่อวินาที



3.4 การทดสอบการดึงกลับ

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาการดึงกลับ (retraction) ที่เหมาะสมกับสภาวะของการพิมพ์โดยพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความแม่นยำเชิงขนาดและคุณภาพของการพิมพ์ เราทดสอบโดยการพิมพ์หอการดึงกลับ (retraction tower) ดังนี้ (1) เปิดชิ้นงาน Part for calibration ชื่อ Retraction Tower หอคอยมีการเปลี่ยนแปลงค่าการไหลจำนวน $N = 5$ ค่า จาก 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนแปลงทีละ 1 (2) ตั้งค่าอุณหภูมิหัวฉีด การไหล และความเร็วในการพิมพ์ตามผลของปฏิบัติการก่อนหน้า (3) ตั้งค่า Profile เป็น Fast ตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt แล้วกด Slice เพื่อดูผลก่อนพิมพ์ (4) จำนวนชั้นรวม $T_1 = 197$ ชั้น จำนวนชั้นของส่วนฐาน $B_1 = 4$ ชั้น คำนวณจำนวนชั้นของแต่ละค่า $L_1 = (197 - 4) / 5 = 38.6$ ชั้น (5) กำหนดจำนวนชั้นต่อค่าให้เป็นเลขจำนวนเต็ม เช่น $L_2 = 38$ ชั้น⁸ แล้วคำนวณจำนวนชั้นรวมใหม่ $T_2 = (38 \times 5) + 4 = 194$ ชั้น (6) ปรับสัดส่วนความสูงของชิ้นงาน $194 / 197 \times 100 = 98.48\%$ แล้วลองกด Slice อีกครั้ง ได้จำนวนชั้นต่าง ๆ ตามที่คำนวณเอาไว้ (7) เพิ่มสคริป Retract Tower โดยตั้งค่า Command เป็น Distance ตั้งค่า Starting value เป็น 1.0 มิลลิเมตร ตั้งค่า Value Increment เป็น 1.0 มิลลิเมตร ตั้งค่า Change Layer เป็น 38 ชั้น ตั้งค่า Change Layer Offset เป็น 4 ชั้น ทำเครื่องหมายถูกที่ Display details on LCD แล้วกด Close (8) กด Slice อีกครั้ง จะได้จีโค้ดที่มีการเปลี่ยนค่าการดึงกลับ (9) เอาไฟล์ไปพิมพ์ทดสอบ และ (10) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุปการดึงกลับที่เหมาะสมที่สุด⁹

3.5 การทดลองพิมพ์รู

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองพิมพ์รูขนาดต่าง ๆ แล้วพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความแม่นยำเชิงขนาดและคุณภาพของการพิมพ์ ดังนี้ (1) เปิดชิ้นงาน Part for calibration ชื่อ Hole test ออกมา ชิ้นงานเป็นลักษณะวงกลม 15 รูที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1 ถึง 15 มิลลิเมตร (2) ตั้งค่าอุณหภูมิหัวฉีด การไหล ความเร็วในการพิมพ์ และการดึงกลับตามผลของปฏิบัติการก่อนหน้า (3) ปฏิบัติการนี้จะลองเปลี่ยนโปรไฟล์ของการพิมพ์หลาย ๆ แบบ ได้แก่ (3.1) Extra fast 0.3 mm (3.2) Fast 0.2 mm (3.3) Normal 0.15 mm และ (3.4) Fine 0.1 mm โดยตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt ตอนเปลี่ยนโปรไฟล์ให้กด Keep Change เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิหัวฉีด การไหล ความเร็วในการพิมพ์ และการดึงกลับเอาไว้ ความสูงของชั้นการพิมพ์ (layer height) มีผลต่อคุณภาพของพื้นผิวของชิ้นงาน ระยะเวลาในการพิมพ์ และคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ความสูงของชั้นการพิมพ์ที่แตกต่างกันต้องการขนาดของหัวฉีด อุณหภูมิของหัวฉีด และความเร็วของการพิมพ์ที่แตกต่างกันด้วย (Mishra et al., 2021; Tao et al., 2019) ดังนั้น หากพิมพ์ที่โปรไฟล์อื่น ๆ ก็ควรทดสอบเพื่อหาการตั้งค่าที่เหมาะสมด้วย (4) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุปเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยที่สุด¹⁰ ที่ควรออกแบบของโปรไฟล์การพิมพ์ต่าง ๆ

3.6 การทดลองพิมพ์สะพาน

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองพิมพ์สะพานระยะต่าง ๆ แล้วพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความแม่นยำเชิงขนาดและคุณภาพของการพิมพ์ ทำดังนี้ (1) เปิดชิ้นงาน Part for calibration ชื่อ Bridge test ออกมา ชิ้นงานเป็นลักษณะสะพานจำนวน 10 อัน โดยมีระยะ 10, 14, 19, 23, 28, 32, 37, 41, 46, และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ (2) ตั้งค่าอุณหภูมิ การไหล ความเร็วในการพิมพ์ และการดึงกลับที่เหมาะสมที่สุดตามค่าที่ได้จากการทดสอบมาในปฏิบัติการก่อนหน้า (3) พิมพ์ชิ้นงานทุกโปรไฟล์ และ (4) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุประยะสะพานมากที่สุด¹¹ ที่ควรออกแบบของโปรไฟล์การพิมพ์ต่าง ๆ

⁸ ผู้เขียนได้ลองปิดชิ้นเป็น 39 ชั้นและ 40 ชั้นแล้วไม่ได้ค่าตามที่ต้องการจึงทดลองปิดทศนิยมลงเป็น 38 ชั้น และได้ผลที่ดีกว่า

⁹ ผู้เขียนพิจารณาเลือกระยะการดึงกลับเท่ากับ 1 มิลลิเมตร

¹⁰ ผู้เขียนพิจารณาว่าสามารถพิมพ์รูได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 7 มิลลิเมตรเพื่อให้มีลักษณะกลม หากเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่านี้จะสังเกตความบิดเบี้ยวได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนั้นยังพบว่า โปรไฟล์การพิมพ์ไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดที่สามารถพิมพ์ได้กลมเนื่องจากโปรไฟล์เป็นการเปลี่ยนความหนาของชั้นการพิมพ์

¹¹ ผู้เขียนพิจารณาว่าที่โปรไฟล์ Fast สามารถพิมพ์ระยะสะพานได้ไม่เกิน 37 มิลลิเมตร ส่วนโปรไฟล์อื่น ๆ สามารถพิมพ์ระยะสะพานได้ไม่เกิน

32 มิลลิเมตร พบการเกิดเส้นใยขึ้นในโปรไฟล์ Normal และ Fine อาจเป็นเพราะค่าตัวแปรของการพิมพ์ที่ตั้งเอาไว้มาจากการทดสอบด้วยโปรแกรม Fast มาทั้งหมด

3.7 การทดลองพิมพ์ผนังบาง

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองพิมพ์ผนังบางขนาดต่าง ๆ แล้วพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความแม่นยำเชิงขนาดและคุณภาพของการพิมพ์ ทำดังนี้ (1) เปิดชิ้นงาน Part for calibration ชื่อ Thin Wall Test ชิ้นงานมีลักษณะเป็นผนังบางจำนวน 4 ชั้น ขนาด 0.35, 0.5, 0.8, และ 1.0 มิลลิเมตร (2) ตั้งค่าอุณหภูมิ การไหล ความเร็วในการพิมพ์ และการดึงกลับที่เหมาะสมที่สุดตามค่าที่ได้จากการทดสอบมาปฏิบัติการก่อนหน้า (3) ตั้งค่า Profile เป็น Fast ตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt แล้วกด Slice และดูผลก่อนพิมพ์ (4) ตามทฤษฎี ชิ้นงานมีผนังที่บางที่สุดมีขนาด 0.35 มิลลิเมตร ซึ่งเล็กกว่าขนาดหัวฉีด 0.4 มิลลิเมตร จะไม่สามารถพิมพ์ได้ แต่กรณีนี้ยังสามารถพิมพ์ได้ (5) ลองปรับสัดส่วนของชิ้นงานเป็น 90% โดยทำเครื่องหมายถูกที่ Uniform Scaling ด้วย จะทำให้ความหนาของผนังบางเท่ากับ 0.315, 0.45, 0.72, และ 0.9 มิลลิเมตร แล้วกด Slice อีกครั้ง และดูผลก่อนพิมพ์ พบว่าผนังที่บางที่สุดไม่สามารถพิมพ์ได้แล้ว (6) กรณีที่ต้องการพิมพ์ผนังที่บางกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด ให้เปิดการตั้งค่าแบบ Expert แล้วทำเครื่องหมายถูกที่ Print Thin Walls แล้วกด Slice อีกครั้ง (7) ปฏิบัติการนี้จะวิเคราะห์ผลของทิศทางการจัดวางชิ้นงานด้วยโดยกด Rotate และทำเครื่องหมายถูกที่ Snap Rotation แล้วหมุนชิ้นงานรอบแกน Z ไปทิศทางตามเข็มนาฬิกาเท่ากับ 15, 30, และ 45 องศา ตามลำดับ ทิศทางการจัดวางชิ้นงาน (Build direction หรือ Build orientation) คือ ลักษณะการจัดวางชิ้นงานลงบนฐานการพิมพ์ ส่วนมุมของเส้นพิมพ์ (raster angle) คือ ทิศทางของเส้นการฉีดวัสดุพิมพ์ ทั้งทิศทางการจัดวางชิ้นงานและมุมของเส้นพิมพ์ส่งผลต่อคุณภาพของการพิมพ์และคุณสมบัติเชิงกล (Lee et al., 2007) (8) พิมพ์ชิ้นงานทั้งหมด และ (9) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุปผนังบางสุดที่ควรออกแบบของทิศทางการจัดวางชิ้นงานแบบต่าง ๆ

3.8 การทดลองพิมพ์ส่วนยื่น

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองพิมพ์ส่วนยื่น (overhang) มุมต่าง ๆ แล้วพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความแม่นยำเชิงขนาดและคุณภาพของการพิมพ์ ทำดังนี้ (1) เปิดชิ้นงาน Part for calibration ชื่อ Overhang test ออกมา ชิ้นงานเป็นลักษณะยื่นทำมุม 40, 50, 60, 70, และ 80 องศา กับแนวตั้ง ตามลำดับ (2) ตั้งค่าอุณหภูมิ การไหล ความเร็วในการพิมพ์ และการดึงกลับที่เหมาะสมที่สุดตามค่าที่ได้จากการทดสอบมาในปฏิบัติการก่อนหน้า (3) ตั้งค่า Profile เป็น Fast ตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt และเอาเครื่องหมายถูกที่ Generate Support ออกด้วย (4) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุปมุมยื่นมากที่สุดที่ควรออกแบบ¹²

ชิ้นงาน Overhang test นี้มีลักษณะยื่นแบบบาง ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนของการพิมพ์อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของชิ้นก่อนหน้าได้ จากการค้นหาชิ้นงานทดสอบในเว็บไซต์ 'Thingiverse' พบว่า มีชิ้นงานทดสอบส่วนยื่นที่น่าสนใจอีก เช่น Massive Overhang Test ดังภาพ 2 (ข) ชิ้นงานเป็นการทดสอบการยื่นที่มุมเอียงตั้งแต่ 20 องศาจนถึง 70 องศา โดยเปลี่ยนแปลงมุมเอียงทีละ 5 องศา เปลี่ยนค่ามุมเกิดตามแนวราบของชิ้นงาน ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อกัน ให้ลดสัดส่วนชิ้นงานลงเหลือ 50% แล้วทดสอบพิมพ์ส่วนยื่น แล้ววิเคราะห์ผลการพิมพ์¹³

3.9 การทดลองพิมพ์พิถีพิถันความเผื่อ

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองพิมพ์พิถีพิถันความเผื่อ (tolerance) ค่าต่าง ๆ แล้วพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์จากความสามารถในการขยับได้ ทำดังนี้ (1) เปิดชิ้นงาน Part for calibration ชื่อ Tolerance test ออกมา ชิ้นงานมีลักษณะเป็นสลักและรูทรงกระบอก (cylinder pin and hole) จำนวน 5 ชุดโดยมีพิถีพิถันความเผื่อ (tolerance) เท่ากับ 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, และ 0.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ (2) ตั้งค่าอุณหภูมิ การไหล ความเร็วในการพิมพ์ และการดึงกลับที่เหมาะสมที่สุดตามค่าที่ได้จากการทดสอบมาในปฏิบัติการก่อนหน้า (3) ตั้งค่า Profile เป็น Fast ตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt (4) พิจารณาผลผลิตของการพิมพ์เพื่อสรุปพิถีพิถันความเผื่อที่ควรออกแบบ¹⁴

¹² ผู้เขียนพิจารณาว่าสามารถพิมพ์ส่วนยื่นได้มากที่สุดเท่ากับ 60 องศา

¹³ ผู้เขียนพิจารณาว่าสามารถพิมพ์ส่วนยื่นได้มากที่สุดเท่ากับ 50 องศา

¹⁴ ผู้เขียนพิจารณาว่าสามารถพิมพ์พิถีพิถันความเผื่อได้ไม่น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร



3.10 การทดลองพิมพ์จตุรรองรับ

ปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองพิมพ์จตุรรองรับ (support test) แบบต่าง ๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงาน เราต้องติดตั้งส่วนเสริม (plug-in) ลงไปในโปรแกรมคิวรา่เพิ่ม ดังนี้ (1) กด Marketplace แล้วพิมพ์ “support” ในช่องค้นหา (2) ติดตั้งส่วนเสริมชื่อ Cylindric Custom Support ลงในโปรแกรมคิวรา่ (3) ปิดและเปิดโปรแกรมเพื่อให้ส่วนเสริมพร้อมใช้งาน เราทำทดลองพิมพ์จตุรรองรับ ดังนี้ (1) เปิดชิ้นงาน Part for calibration ชื่อ Support test ออกมา ชิ้นงานมีส่วนยื่นหลายจุดที่ต้องการจตุรรองรับในการพิมพ์ (2) ตั้งค่า Profile เป็น Fast ตั้งค่า Build Plate Adhesion Type เป็น Skirt (3) ทำเครื่องหมายถูกที่ Generate Support และเลือก Support Structure เป็น Normal แล้วกด Slice เพื่อดูผลก่อนพิมพ์ จะเห็นว่าจตุรรองรับแบบทั่วไปที่อยู่ในโปรแกรม จะมีบางส่วนที่อยู่บนชิ้นงานด้วย กรณีแบบนี้ เราจะลองใช้จตุรรองรับแบบกำหนดเอง (custom support) ทำดังนี้ (1) คลิกซ้ายที่ชิ้นงาน (2) กด Custom Support Cylinder ตั้งค่า Type เป็น arch-buttress¹⁵ ตั้งค่า Size เป็น 20 และทำเครื่องหมายถูกทุกช่อง (4) คลิกซ้ายที่จุดล่างสุดของส่วนที่ยื่นที่มีชิ้นส่วนที่อยู่ด้านใต้ ดังภาพ 1 (ค) จะได้จตุรรองรับที่ยื่นออกไปนอกชิ้นงาน โดยเราสามารถย้ายหรือหมุนจตุรรองรับนี้ได้เหมือนเป็นวัตถุ (5) เอาเครื่องหมายถูกที่ Generate Support ออก (6) ทำเครื่องหมายถูกที่ Z Hop When Retracted ด้วยเพื่อยกแกน Z เมื่อมีการย้ายตำแหน่งพิมพ์ (7) กด Slice เพื่อเห็นชิ้นงาน แล้วกด Preview เพื่อดูผลก่อนพิมพ์ จะเห็นว่าจตุรรองรับแบบกำหนดเองจะมีลักษณะการพิมพ์แตกต่างจากชิ้นงานเพื่อให้สามารถแกะออกภายหลังการพิมพ์ได้สะดวก แล้ว (8) ทดสอบพิมพ์

3.11 การทดลองพิมพ์โมเดลเรือ

โมเดลเรือหรือ Benchy¹⁶ เป็นโมเดลมาตรฐานที่นิยมใช้ทดสอบการพิมพ์สามมิติเนื่องจากสามารถพิจารณาได้หลายตัวแปรโดยมีหัวข้อพิจารณา ดังนี้ (1) พิจารณาคุณภาพโดยรวม ได้แก่ (1.1) เส้นใย อาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิของหัวฉีด การดึงกลับ ความสะอาดของหัวฉีด การอุดตันของวัสดุพิมพ์ และคุณสมบัติของวัสดุพิมพ์ เป็นต้น (1.2) ชั้นของการพิมพ์ไม่คงที่ มักมีสาเหตุมาจากปัญหาเชิงกล (mechanical issue) เช่น การตั้งสายพานไม่ดี แกน Z ทำงานไม่ดี การดันเส้นไม่สม่ำเสมอ แรงกดของตัวดันเส้น เป็นต้น (2) พิจารณาด้านข้างลำเรือ ได้แก่ (2.1) เม็ดส่วนเกินที่ผิว อาจมีสาเหตุได้หลากหลาย เช่น การไหล การดึงกลับ อุณหภูมิของหัวฉีด ความเร็วในการพิมพ์ และการพัดลม (2.2) ชั้นของการพิมพ์บางอย่างชัดเจน อาจมีสาเหตุมาจาก การดันเส้นไม่เพียงพอ เกิดการลื่นไถลของตัวดันเส้น ตั้งค่าอุณหภูมิของหัวฉีดไม่เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้พิมพ์ หัวฉีดอุดตัน เป็นต้น (2.3) เกิดรูปแบบซ้ำ ๆ เช่น ลายเส้นแนวตั้ง ลายคลื่น ลายเกล็ดปลา เป็นต้น อาจมีสาเหตุมาจากชิ้นส่วน กลไก หรือสายพานหลวม ความเร็วในการพิมพ์ เป็นต้น (3) พิจารณาผิวท้องเรือ ได้แก่ (3.1) เห็นแนวเส้นชัดเจน อาจมีสาเหตุมาจากระยะห่างระหว่างหัวฉีดและฐานพิมพ์มากเกินไป ตั้งค่าอุณหภูมิของหัวฉีดต่ำเกินไป หรือตั้งค่าการไหลของชั้นแรก (initial layer flow) ในโปรแกรมน้อยเกินไป (3.2) เห็นตัวหนังสือไม่ชัด อาจมีสาเหตุมาจากระยะห่างระหว่างหัวฉีดและฐานพิมพ์น้อยเกินไป หรือตั้งค่าการไหลของชั้นแรกในโปรแกรมมากเกินไป ตั้งค่าอุณหภูมิของหัวฉีดหรือฐานสูงเกินไป เป็นต้น (3.3) ชั้นฐานบาน (elephant's foot) คือ ชั้นฐานกว้างกว่าชั้นที่อยู่ด้านบนไปอีกหนึ่งชั้น อาจมีสาเหตุมาจากการตั้งค่าอุณหภูมิของหัวฉีดหรือฐานสูงเกินไป (4) พิจารณาตาดฟ้าเรือ ได้แก่ (4.1) ขอบบนของหน้าตาดก อาจมีสาเหตุมาจากชิ้นงานแข็งตัวไม่ทัน เช่น พัดลมไม่แรงพอ ความเร็วในการพิมพ์สูงเกินไป หรือตั้งค่าอุณหภูมิของหัวฉีดสูงเกินไป เป็นต้น (4.2) มุมของตาดฟ้าเรือไม่คม อาจมีสาเหตุมาจากความเร็วในการพิมพ์สูงเกินไป หรือการตั้งค่าความเร่ง (acceleration) และการเปลี่ยนแปลงความเร่ง (jerk) ในโปรแกรม (4.3) ปล่องควันไม่กลม อาจมีสาเหตุมาจากความสะอาดของวัสดุพิมพ์ และความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ (4.4) ปล่องควันไม่ตรง อาจมีสาเหตุมาจากการชิ้นงานแข็งตัวไม่ทันเช่นกัน (5) พิจารณาค่ามิติต่าง ๆ ได้แก่ (5.1) ระยะยาวสุดจากหน้าเรือจนถึงท้ายเรือเท่ากับ 60 มิลลิเมตร (5.2) ความกว้างสุดของเรือเท่ากับ 31 มิลลิเมตร (5.3) ความสูงจากฐานถึงปลายปล่องควันเท่ากับ 48 มิลลิเมตร โดยความคลาดเคลื่อนตามแนวแกน XY อาจมีสาเหตุมาจากความตึงของสายพาน ความหลวมของชิ้นส่วนและ

¹⁵ ในโปรแกรมคิวรา่เวอร์ชันที่ใช้มีจตุรรองรับแบบ Custom support อีกหลายแบบให้ลองใช้งานและยังปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้

¹⁶ สามารถดาวน์โหลดได้ฟรีจากเว็บไซต์ที่มีไฟล์ STL เช่น www.thingiverse.com และ www.all3dp.com เป็นต้น

การประกอบ หรือค่าการหมุนของเสต็ปมอเตอร์ที่ควบคุมแกน XY เป็นต้น ส่วนความคลาดเคลื่อนในแนวแกน Z เกิดได้หลายสาเหตุ ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ในแกน Z เช่น การหมุนของมอเตอร์ควบคุมแกน Z ความหลวมของแกน Z เป็นต้น หรือการตั้งค่าการพิมพ์ เช่น ชี้นงานแข็งตัวไม่ทัน หรือการตั้งระยะห่างระหว่างหัวฉีดและฐานพิมพ์น้อยเกินไป เป็นต้น

4. บทสรุป

เมื่อผ่านการเรียนรู้จากการลงมือทำ ผู้เรียนจะสามารถทดสอบหาการตั้งค่าที่เหมาะสมได้ และสามารถทราบค่าของการออกแบบที่เหมาะสมได้ ความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ที่ได้รับ สามารถเอาไปประยุกต์ใช้ต่อในงานออกแบบ สร้างต้นแบบ หรือสร้างผลิตภัณฑ์ได้ อย่างไรก็ตาม ปฏิบัติการที่อยู่ในบทความนี้ ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับระยะเวลาเรียน ระดับของอุปกรณ์ และระดับของผู้เรียน การทดสอบที่นั่นเป็นการทดสอบเพื่อพิจารณาทีละตัวแปรไปตามลำดับ ในความเป็นจริง การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหนึ่งย่อมส่งผลต่อตัวแปรอื่น ๆ ด้วย และยังมีเทคนิคการหาสภาวะที่เหมาะสม (optimization) แบบอื่น ๆ ที่สามารถพิจารณาหลายตัวแปรได้พร้อมกัน เช่น วิธีทาคุชิ (Taguchi method) เป็นต้น (Kumar et al., 2021; Taguchi, 1995) นอกจากนี้ ยังมีวิธีการพิจารณาผลผลิตของการพิมพ์หลายปัจจัยพร้อมกันโดยใช้การวิเคราะห์เชิงปริมาณ เช่น เทคนิคจีอาร์เอ (GRA หรือ gray relational analysis) เป็นต้น (Çaydaş & Hasçalık, 2008; Julong, 1989; Raykar et al., 2015) ทั้งสองเทคนิคนี้มักถูกนำมาใช้ร่วมกันในการหาสภาวะที่เหมาะสมทางการผลิต (Pawade & Joshi, 2011; Wang et al., 2007) ตัวอย่างเช่น ทำการวิจัยเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิหัวฉีด ความเร็วในการพิมพ์ และค่าการดึงกลับที่มีผลต่อคุณภาพการพิมพ์ทั้งในด้านความแม่นยำ คุณภาพผิว และความแข็งแรงไปพร้อมกัน โดยใช้วิธีทาคุชิออกแบบการทดลองและใช้เทคนิคจีอาร์เอเพื่อพิจารณาผลลัพธ์หลายปัจจัย เป็นต้น นอกจากนี้ ในโปรแกรมควิร่ายยังมีการตั้งค่าอื่น ๆ อีกมากมายให้ผู้ใช้งานได้ทดสอบและเรียนรู้กันไม่รู้จบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนการจัดทำบทความวิชาการและการจัดการเรียนการสอนในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณกองบรรณาธิการของวารสารรามคำแหง ฉบับบัณฑิตวิทยาลัย และผู้พิจารณาบทความทุกท่านสำหรับความคิดเห็นและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงบทความ

6. เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, M. N., Ab Rahman, M. H., Maidin, N. A., Osman, M. H., Wahid, M. K., Mohamed Saiful Firdaus, H., & Abd Aziz, N. A. (2020). Optimization on surface roughness of fused deposition modelling (FDM) 3D printed parts using taguchi approach. In *Symposium on Intelligent Manufacturing and Mechatronics (SIMM)* (230-243). Melaka : Malaysia..
- Alafaghani, A. a., & Qattawi, A. (2018). Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 164-174.
- Alafaghani, A. a., Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791-803.
- Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the industry 4.0: a literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering science and technology, an international journal*, 22(3), 899-919.
- Aloyaydi, B., Sivasankaran, S., & Mustafa, A. (2020). Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid. *Polymer Testing*, 87, 106557.



- Bi, S., & Liang, J. (2011). Robotic drilling system for titanium structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(5), 767-774.
- Çaydaş, U., & Hasçalık, A. (2008). Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics. *Optics and Laser Technology*, 40(7), 987-994.
- Chacón, J., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, 124, 143-157.
- Cooper, R. G. (2016). Agile–Stage–Gate hybrids: the next stage for product development blending Agile and Stage–Gate methods can provide flexibility, speed, and improved communication in new-product development. *Research-Technology Management*, 59(1), 21-29.
- Cooper, R. G., & Sommer, A. F. (2018). Agile–Stage–Gate for manufacturers: changing the way new products are developed integrating Agile project management methods into a Stage–Gate system offers both opportunities and challenges. *Research-Technology Management*, 61(2), 17-26.
- De Marzi, A., Vibrante, M., Bottin, M., & Franchin, G. (2023). Development of robot assisted hybrid additive manufacturing technology for the freeform fabrication of lattice structures. *Additive Manufacturing*, 66, 103456.
- ELEGOO. (2024). *Use Manual for NEPTUNE 4 Pro 3D Printer V1.5*. Retrieved June 1, 2024, from www.elegoo.com
 ำรงรูปแบบสัอือเล็คทรอนิกส์
- Farbman, D., & McCoy, C. (2016). Materials testing of 3D printed ABS and PLA samples to guide mechanical design. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, V002T01A015. American Society of Mechanical Engineers.
- Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D printing and additive manufacturing*, 3(3), 183-192.
- Flores, E., Xu, X., & Lu, Y. (2020). Human Capital 4.0: a workforce competence typology for Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 687-703.
- Johnson, G. A., & French, J. J. (2018). Evaluation of infill effect on mechanical properties of consumer 3D printing materials. *Advances in Technology Innovation*, 3(4), 179.
- Julong, D. (1989). Introduction to grey system theory. *Journal of Grey System*, 1(1), 1-24.
- Keenan, D. S. (2013). Experiential learning and outcome-based education: a bridge too far within the current education and training paradigm. *Journal of Applied Learning Technology*, 3(2), 20.
- Kolb, A. Y., & Kolb, D. A. (2005). Learning styles and learning spaces: enhancing experiential learning in higher education. *Academy of management Learning & education*, 4(2), 193-212.
- Kolb, A. Y., & Kolb, D. A. (2009). Experiential learning theory: a dynamic, holistic approach to management learning, education and development. *The SAGE handbook of management learning, education and development*, 7(2), 42-68.
- Kołodziej, A., Żur, P., & Borek, W. (2019). Influence of 3D-printing parameters on mechanical properties of PLA defined in the static bending test. *European Journal of Engineering Science and Technology*, 2(1), 65-70.

- Kumar, R., Banga, H. K., Kumar, R., Singh, S., Singh, S., Scutaru, M. -L., & Pruncu, C. I. (2021). Ergonomic evaluation of workstation design using taguchi experimental approach: a case of an automotive industry. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 15, 481-498.
- Lee, C., Kim, S., Kim, H., & Ahn, S. -H. (2007). Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of materials processing technology*, 187, 627-630.
- Lee, J. -Y., An, J., & Chua, C. K. (2017). Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied materials today*, 7, 120-133.
- Lubombo, C., & Huneault, M. A. (2018). Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. *Materials Today Communications*, 17, 214-228.
- Ma, Q., Rejab, M., Kumar, A. P., Fu, H., Kumar, N. M., & Tang, J. (2021). Effect of infill pattern, density and material type of 3D printed cubic structure under quasi-static loading. *Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(19), 4254-4272.
- Mishra, P. K., Senthil, P., Adarsh, S., & Anoop, M. (2021). An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts. *Composites Communications*, 24, 100605.
- Mitchell, A., Lafont, U., Hołyńska, M., & Semprimoschnig, C. (2018). Additive manufacturing-a review of 4D printing and future applications. *Additive Manufacturing*, 24, 606-626.
- Munprom, R., & Limtasiri, S. (2019). Optimization of stereolithographic 3D printing parameters using Taguchi method for improvement in mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1768-1773.
- Panda, B. N., Shankhwar, K., Garg, A., & Jian, Z. (2017). Performance evaluation of warping characteristic of fused deposition modelling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 1799-1811.
- Patil, P., Singh, D., Raykar, S. J., & Bhamu, J. (2021). Multi-objective optimization of process parameters of fused deposition modeling (FDM) for printing polylactic acid (PLA) polymer components. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4880-4885.
- Pawade, R. S., & Joshi, S. S. (2011). Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(1), 47.
- Pei, E. (2014). 4D printing—revolution or fad? *Assembly Automation*, 34(2), 123-127.
- Prashar, G., Vasudev, H., & Bhuddhi, D. (2023). Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(5), 2221-2235.
- Pulipaka, A., Gide, K. M., Beheshti, A., & Bagheri, Z. S. (2023). Effect of 3D printing process parameters on surface and mechanical properties of FFF-printed PEEK. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 368-386.
- Raykar, S., D'Addona, D., & Mane, A. (2015). Multi-objective optimization of high speed turning of Al 7075 using grey relational analysis. *Procedia CIRP*, 33, 293-298.
- Rodríguez-Panes, A., Claver, J., & Camacho, A. M. (2018). The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis. *Materials*, 11(8), 1333.



- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296.
- Singh, R., Kumar, R., Singh, M., & Preet, P. (2020). On compressive and morphological features of 3D printed almond skin powder reinforced PLA matrix. *Materials Research Express*, 7(2), 025311.
- Suteja, T., & Soesanti, A. (2020). Mechanical properties of 3D printed polylactic acid product for various infill design parameters: a review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569(4), 042010
- Taguchi, G. (1995). Quality engineering (Taguchi methods) for the development of electronic circuit technology. *IEEE transactions on reliability*, 44(2), 225-229.
- Tanveer, M. Q., Mishra, G., Mishra, S., & Sharma, R. (2022). Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed parts-a current review. *Materials Today: Proceedings*, 62, 100-108.
- Tao, Y., Pan, L., Liu, D., & Li, P. (2019). A case study: mechanical modeling optimization of cellular structure fabricated using wood flour-filled polylactic acid composites with fused deposition modeling. *Composite Structures*, 216, 360-365.
- 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. *Materials today*, 21(1), 22-37.
- Tzeng, C.-J., Lin, Y.-H., Yang, Y.-K., & Jeng, M.-C. (2009). Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. *Journal of materials processing technology*, 209(6), 2753-2759.
- Voutetaki, M. E., & Thomoglou, A. K. (2024). Experiential learning in architectural engineering school through the hands-on workshop: practically without calculations. *AIP Conference Proceedings*,
- Wang, C., Chung, Lin., T. W., & Hu, S. S. (2007). Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. *Rapid prototyping journal*, 13(5), 304-315.
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530-535.
- Yadav, P., Sahai, A., & Sharma, R. S. (2021). Strength and surface characteristics of FDM-based 3D printed PLA parts for multiple infill design patterns. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 102, 197-207.
- Yang, Y., Chen, Y., Wei, Y., & Li, Y. (2016). 3D printing of shape memory polymer for functional part fabrication. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, 2079-2095.