

การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการแบบ FDM ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อน  
ของขนาดชิ้นส่วน ABS โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง  
Optimization of FDM Process Parameters on Dimensional Error of  
ABS Parts by Response Surface Methodology

ทัตพงษ์ ลิ้มหลาย<sup>1\*</sup> และวรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์<sup>1</sup>

Tattapong Limlay<sup>1\*</sup> and Wannalak Laotaweesub<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

\*Corresponding author: s6503017810067@email.kmutnb.ac.th

Received: July 20, 2024

Revised: September 20, 2024

Accepted: September 27, 2024

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling--FDM) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน ABS ให้อยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่กำหนด โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาได้แก่ ความหนาชั้น ความเร็วของหัวฉีด และความหนาของผนัง จากนั้นทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (central composite design) โดยเก็บค่าตอบสนองจากการวัดขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ผลลัพธ์จากการตั้งค่าตามค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์ คือ ความหนาชั้นอยู่ที่ 0.3485 mm ความเร็วในการพิมพ์อยู่ที่ 20 mm/s และความหนาผนังชั้นอยู่ที่ 2.4949 mm และในกระบวนการพิมพ์ควรพักเครื่องพิมพ์อย่างน้อย 10 นาที หลังจากพิมพ์ชิ้นส่วนเสร็จ ส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาอยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่กำหนด

**คำสำคัญ:** กระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อ ความหนาของชั้น ความเร็วในการพิมพ์ ความหนาผนัง วิธีส่วนประสมกลาง

## Abstract

This research aims to determine optimal parameters for the Fused Deposition Modeling--FDM process to reduce the dimensional tolerance of ABS parts within the specified tolerance range. The parameters considered include layer thickness, print speed, and wall thickness. The experimental design was then performed using the Central Composite Design method, with response values collected by measuring the dimensions of the study parts using a Vernier caliper. The results from setting the printing process parameters are a layer thickness of 0.3485 mm, a printing speed of 20 mm/s, and a wall thickness of 2.4949 mm. After completing the print, the printer should be rested for at least 10 minutes. This results in the dimensions of the case study parts falling within the specified tolerance.

**Keywords:** additive manufacturing, layer thickness, printing speed, wall thickness, central composite design



## บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing--AM) เป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมวัสดุลงบนฐานพิมพ์บนชั้นต่อชั้น จนเกิดเป็นวัตถุสามมิติ โดยใช้โมเดลสามมิติ (CAD model) สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมการที่ซับซ้อน หรือเครื่องมือเพิ่มเติม เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม เช่น การตัดเนื้อวัสดุ หรือการฉีควัสดุลงในแม่พิมพ์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการเตรียมขั้นตอนการขึ้นรูปอย่างละเอียด เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน (Zhang, 2021) ซึ่งกระบวนการนี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ โดยกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling--FDM) เป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ โดยการหลอมละลายเส้นใยวัสดุด้วยความร้อนที่หัวฉีด และฉีดวัสดุลงบนฐานพิมพ์เป็นชั้นต่อชั้น กระบวนการนี้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ ดังนั้นจึงนิยมใช้กันอย่างมากในอุตสาหกรรม (Sieminski, 2021) ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ใช้กระบวนการพิมพ์แบบ FDM ในการพัฒนาชิ้นส่วนเพื่อทดแทน หรือใช้เพื่อจำลองหน้าที่การทำงาน (Cali & Calian, 2012) จากการศึกษาชิ้นส่วนข้อต่อมือเทียมด้วยกระบวนการผลิตแบบ FDM เพื่อพัฒนา

ให้สามารถผลิตข้อต่อเทียมโดยไม่ต้องประกอบชิ้นส่วน ในขณะเดียวกันได้มีงานวิจัยพัฒนาชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมเพื่อใช้ทดแทนชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยผลิตด้วยกระบวนการแบบ FDM (Sathish & Vijaya-kumar, 2018) จากการศึกษาพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยกระบวนการพิมพ์แบบ FDM เป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การประกอบชิ้นส่วน ทำให้ชิ้นส่วนที่ผลิตมีความแม่นยำน้อย จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์ที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วน ดังตาราง 1

จากตาราง 1 แสดงผลจากการสืบค้นข้อมูลจากงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งพบว่า ส่วนใหญ่ศึกษาเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อชิ้นงานที่มีลักษณะสี่เหลี่ยม เช่น (Sood et al, 2009) การใช้ชิ้นงานสี่เหลี่ยมขนาด 80x10x4 mm ในการทดสอบพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อขนาดของชิ้นงานโดยใช้วิธีทากูชิ พบว่า การปรับพารามิเตอร์ทั้งหมดลดลง ยกเว้นช่องว่างภายในช่วยเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานได้ (Equbal et al, 2017) การใช้ชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม ในการศึกษาพารามิเตอร์เดียวกันโดยใช้การทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design--CCD) พบว่า ผลลัพธ์มีความใกล้เคียงกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็น

ทรงกระบอก เช่น (Sudin et al., 2016) การใช้ชิ้นส่วนที่มีรูปทรงทั่วไปรวมถึงทรงกระบอก ในการศึกษาเกี่ยวกับขนาดชิ้นงานที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองพบว่า ถ้าชิ้นส่วนที่พิมพ์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกและรู จะมีค่าความแม่นยำน้อยมาก ซึ่งหากต้องการให้ชิ้นส่วนมีความแม่นยำต้องลดขนาดที่คลาดเคลื่อนไป เพื่อให้ชิ้นส่วนแม่นยำ และ (Wu, 2018) การใช้ชิ้นส่วนทรงกระบอกในการศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด พบว่าความหนาชั้นน้อยลงส่งผลให้คุณภาพของชิ้นงานดีขึ้น แต่เวลาในการพิมพ์ที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจในการนำชิ้นส่วนประกอบมาใช้จริงน้อยมาก เนื่องจากมีชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยกระบวนการนี้มีข้อบกพร่องจำนวนมาก ทำให้การนำชิ้นงานมากใช้จริงจึงเป็นเรื่องยากอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำชิ้นส่วนประกอบที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมทั่วไป เป็นกรณีศึกษาในการทดลอง นอกจากนี้จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการใช้วิธีการออกแบบการทดลองหลัก ๆ สองวิธี ได้แก่ วิธีส่วนประสมกลาง (CCD) และวิธีทาคุชิ (Taguchi L27) เนื่องจากสองวิธีเป็นวิธีที่ใช้จำนวนการทดลองน้อยเมื่อเทียบกับวิธีแบบ Full Factorial Design (Raymond, 2009) ซึ่งได้มีงานวิจัยที่มีการเปรียบเทียบวิธีการทั้งสองวิธี เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการทดลอง (Gao et al., 2022) จากการสืบค้นพบว่าวิธีทาคุชิ (Taguchi L27) มีจำนวนการทดลองน้อยกว่าวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แต่จากการหาค่าความเหมาะสม วิธีส่วนประสมกลาง (CCD) ได้ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีทาคุชิ เนื่องจากวิธีทาคุชิจะตัดการทดลองที่ไม่จำเป็นออกเพื่อลดจำนวนการทดลองที่ไม่จำเป็น ทำให้บางครั้งอาจพลาดผลลัพธ์ที่ดีที่สุดไป ซึ่งในทางกลับกันวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) จะวิเคราะห์ปัจจัยทุกระดับที่มีความซับซ้อนได้ดี ทำให้มีการใช้จำนวนการทดลองและเวลามากขึ้น และส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ในการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนขนาดจากงานวิจัยของ (Dey & Yodo, 2019) จากการศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ทั้งหมดที่มีผลต่อชิ้นส่วนที่พิมพ์ ได้แก่ ช่องว่างภายใน (gap) ทิศทางการวาง อุณหภูมิ หัวฉีด ความหนาแน่นภายใน ความหนาชั้น ความเร็วใน

การพิมพ์และความหนาผนัง เป็นต้น โดยรวบรวมงานวิจัยที่มีการศึกษาตามผลกระทบต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรง ความหยابผิว และความคลาดเคลื่อนขนาดที่ส่งผลต่อชิ้นส่วน แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีจำนวนมาก จากงานวิจัยดังตาราง 1 พบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความหนาชั้น คือ พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการพิมพ์ด้วยกระบวนการแบบ FDM เนื่องจากส่งผลกระทบต่อคุณภาพพื้นผิว และความแม่นยำของขนาดชิ้นส่วน ยิ่งความหนาชั้นน้อยลงยิ่งทำให้ผิวละเอียดยิ่งขึ้น แต่ในทางตรงข้ามกันส่งผลให้เวลาในการพิมพ์เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน และนอกจากนี้ยังทำให้เกิดความร้อนสะสม ส่งผลให้ขนาดชิ้นงานเกิดการหดตัวหลังจากการพิมพ์ และทำให้ขนาดของชิ้นส่วนเกิดเปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์ความเร็วในการพิมพ์ คือ อัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ขณะทำการฉีดวัสดุลงบนฐานพิมพ์ระหว่างการพิมพ์ชิ้นส่วน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อ รูปร่างขนาดของชิ้นส่วน หากความเร็วในการพิมพ์สูงเกินไป อาจส่งผลหัวฉีดปล่อยวัสดุเร็วจนทำให้ชิ้นส่วนที่พิมพ์มีเวลาในการเย็นตัวไม่ทัน อาจส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดการเสียรูป หรือขนาดของชิ้นส่วนแตกต่างไปจากที่กำหนด และพารามิเตอร์ความหนาผนัง คือ ความหนาชั้นของโครงสร้างพื้นผิวล้อมรอบชิ้นส่วนในระนาบ XY ซึ่งการปรับความหนาของผนังที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ขนาดของชิ้นส่วนเกิดความคลาดเคลื่อนจากขนาดที่กำหนด โดยความหนาของผนังที่หนาเกินไป อาจทำให้วัสดุสะสมในบริเวณนั้นมากเกินไป ส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนใหญ่กว่าขนาดที่กำหนด ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน ซึ่งทั้ง 3 พารามิเตอร์มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพิมพ์แบบ FDM โดยพิจารณาพารามิเตอร์ 3 พารามิเตอร์ คือ ความหนาชั้น ความเร็วในการพิมพ์ และความหนาผนัง เพื่อปรับระดับของพารามิเตอร์ในการพิมพ์ให้ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่มีขนาดอยู่ในช่วงของขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่กำหนด

## ตาราง 1

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Sood et al. (2009)	- ความกว้างของเส้นใย - ช่องว่างระหว่างเส้นใย	- ทิศทางการพิมพ์ - ความหนาชั้น วิธีทาคุชิ (Taguchi L27)
Sudin et al. (2016)	- ขนาดทรงกระบอก - ขนาดทรงกลม	- ขนาดของรู - ขนาดของร่อง -
Equbal et al. (2017)	- ช่องว่างระหว่างเส้นใย - ความกว้างของเส้นใย	-  องศาภายใน วิธีส่วนประกอบกลาง (CCD)
Mahmood et al. (2018)	- อุณหภูมิห้องพิมพ์ - ความหนาแน่นภายใน	- อุณหภูมิหัวฉีด - จำนวนชั้นผนัง วิธีทาคุชิ (Taguchi L27)
Wu. (2018)	- ความหนาชั้น	-
Buj-Corral et al. (2022)	- วัสดุ	-
Jayashuriya et al. (2022)	- ความหนาแน่นภายใน - ความหนาของผนังชั้น	- ความเร็วพิมพ์ - ความหนาชั้น วิธีทาคุชิ (Taguchi L9)
Elkaseer et al. (2020)	- ความหนาแน่นภายใน - ความเร็วในการพิมพ์ - อุณหภูมิหัวฉีด	- มุมเอียง - ความหนาชั้น วิธีทาคุชิ (Taguchi L50)
Aslani et al. (2020)	- อัตราไหล - โครงสร้างภายใน	- จำนวนชั้นผนัง - อุณหภูมิหัวฉีด วิธีทาคุชิ (Taguchi L9)
Hanon et al. (2021)	-  องศาโครงสร้างภายใน - ความหนาของชั้น	- ทิศทางการพิมพ์ - สีของเส้นใย -
Shakeri et al. (2021)	- ความหนาของชั้น - ความเร็วในการพิมพ์	- อุณหภูมิโต๊ะ - อุณหภูมิหัวฉีด วิธีทาคุชิ (Taguchi L9)
Buj-Corral et al. (2021)	- ความหนาชั้น - อุณหภูมิฉีด	- ความเร็วพิมพ์ - อัตราไหล 2-level full factorial design
Wicaksono et al. (2022)	- อุณหภูมิหัวฉีด - อุณหภูมิโต๊ะ - ความเร็วในการพิมพ์	- ความหนาแน่น - ความหนาชั้น วิธีทาคุชิ (Taguchi L25)
Vanaei et al. (2022)	- อุณหภูมิการไหล - ความเร็วในการพิมพ์	- อุณหภูมิโต๊ะ วิธีส่วนประกอบกลาง (CCD)
Gao et al. (2022)	- ความกว้างของชั้น - ความเร็วในการพิมพ์	- อุณหภูมิหัวฉีด - ความหนาชั้น วิธีส่วนประกอบกลาง (CCD)/วิธีทาคุชิ (Taguchi L27)

ตาราง 1 (ต่อ)

งานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Dey & Yodo (2019)	- ช่องว่างภายใน - ทิศทางการวาง - อุณหภูมิหัวฉีด - ความหนาแน่นภายใน - โครงสร้างภายใน	- ความหนาชั้น - ความหนาผนัง - ความเร็วพิมพ์ - องศาโครงสร้าง - ความหนาโครงสร้าง

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. การจัดเตรียมชิ้นส่วนกรณีศึกษา

ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้เป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมที่นิยมใช้กับงานแม่พิมพ์โลหะ ซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุมตำแหน่งในการขึ้นรูปชิ้นงาน และช่วยรองรับแม่พิมพ์ไม่ให้เกิดการสึกหรอ คือ สลักแบบมีป่า เป็นชิ้นส่วนกรณีศึกษา ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 25 mm และมีความยาวอยู่ที่ 57 mm วัสดุของชิ้นส่วน คือ S45C โดยกำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อนของขนาดที่ยอมรับได้แสดงดังภาพ 1 จากนั้นทำการสร้างเป็นโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรม SolidWorks เพื่อเซฟเป็นไฟล์ STL และนำมาแปลงเป็นข้อมูล G-code สำหรับสั่งพิมพ์ชิ้นส่วนบนเครื่องพิมพ์สามมิติ

2. การตรวจสอบชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ตามค่าเริ่มต้นของเครื่องพิมพ์

ขั้นตอนนี้คือการสร้างชิ้นส่วนกรณีศึกษา โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ในการพิมพ์เป็นค่าเริ่มต้นของเครื่องพิมพ์รุ่น MakerBot Method X เพื่อตรวจสอบปัญหาของชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยกระบวนการแบบ FDM โดยวัดขนาดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียคราลิปเปอร์ (Vernier Caliper) ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องพิมพ์มีพื้นที่ในการพิมพ์ชิ้นส่วนอยู่ที่ 152x190x196 mm เป็นระบบสองหัวฉีด ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ±0.2 mm และวัสดุที่ใช้คือ อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-

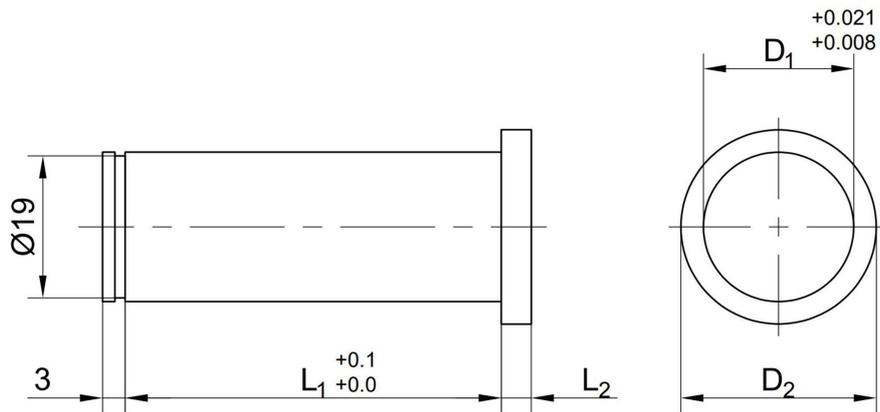
Butadiene-Styrene--ABS) ซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างมากในการนำมาพิมพ์ชิ้นส่วนสามมิติ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ โดยตัวอย่างชิ้นส่วนที่พิมพ์แสดงดังภาพ 2

จากผลลัพธ์ที่ได้รับดังตาราง 2 การตรวจสอบชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นจากโปรแกรม MakerBot Method X จากการวัดพบว่า ขนาดของชิ้นส่วนทั้งหมดไม่อยู่ในช่วงของขอบเขตคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงปรับปรุงคุณภาพของชิ้นส่วนด้วยการปรับระดับของพารามิเตอร์ เพื่อให้ขนาดอยู่ในช่วงของค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

3. การกำหนดพารามิเตอร์ และการสร้างชิ้นส่วนกรณีศึกษา

การพิจารณาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษา ถูกพิจารณาจากงานวิจัยที่สืบค้นเกี่ยวกับระดับพารามิเตอร์ที่มีอยู่ในกระบวนการทั้งหมดตามตาราง 1 และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จึงสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณา แสดงดังตาราง 3

ลักษณะของพารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยคือ ความหนาชั้น ความเร็วในการพิมพ์ และความหนาผนัง โดยลักษณะของพารามิเตอร์แสดงดังภาพ 3 และพารามิเตอร์อื่น ๆ ถูกตั้งค่าตามค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นแสดงดังตาราง 2



ภาพ 1 ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษา



ภาพ 2 ลักษณะชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ตามค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

## ตาราง 2

ผลลัพธ์จากการวัดชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตั้งค่าตามค่าเริ่มต้นของโปรแกรม MakerBot Method X

ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ตามค่า Default ที่แนะนำจากโปรแกรม MakerBot ( $\pm 0.2$ mm): ABS					
LH = 0.2 mm      PS = 55 mm/s      TW = 1 mm					
ครั้งที่	ขนาดชิ้นส่วนกรณีศึกษา				
	$D_1 = \phi 20^{+0.021}_{+0.008}$ mm	$L_1 = 50^{+0.100}_0$ mm	$D_2 = \phi 26$ mm	$L_2 = 4$ mm	
	20.008	20.021	50.000	50.100	
1	20.089		50.257	26.125	4.166
2	20.106		50.275	26.164	4.296
3	20.101		50.266	26.115	4.226
4	20.085		50.213	26.176	4.265
5	20.116		50.293	26.117	4.173

ตาราง 3

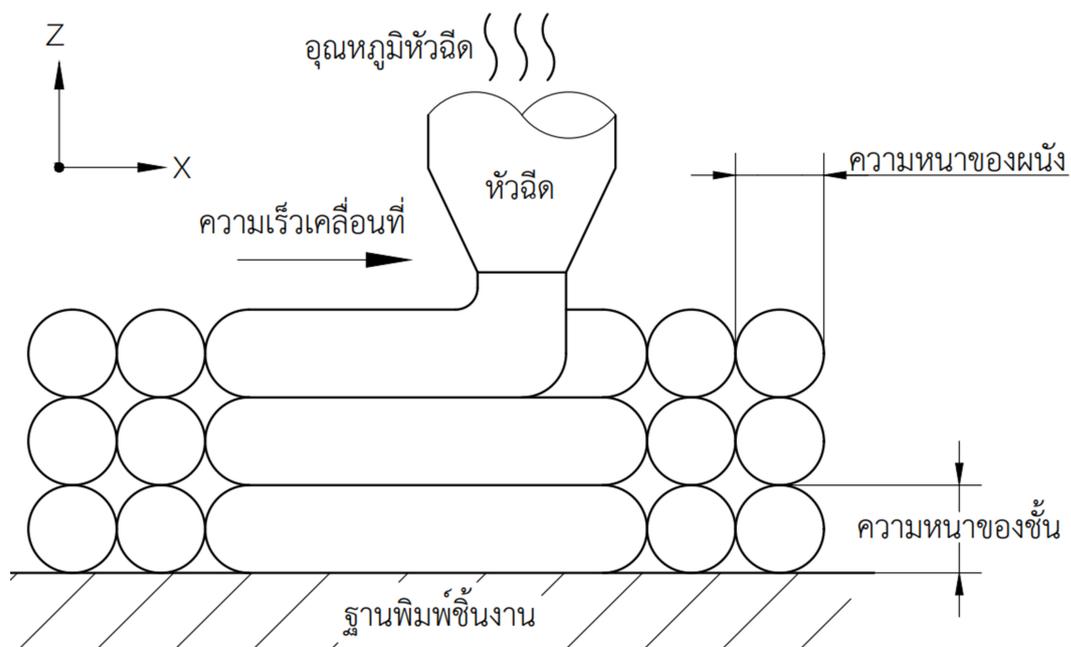
พารามิเตอร์ที่ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	ระดับ	
	ต่ำสุด	สูงสุด
ความหนาชั้น (LH)	0.1 mm	0.4 mm
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	20 mm/s	60 mm/s
ความหนาผนังชั้น (WT)	1 mm	3 mm

ตาราง 4

ค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์เริ่มต้น

พารามิเตอร์	ระดับ
วัสดุ	ABS
ความหนาแน่น	20%
อุณหภูมิหัวฉีด	260°C
อุณหภูมิโต๊ะขึ้นรูป	90°C
อัตราไหล	100%
โครงสร้างภายใน	Grid



ภาพ 3 ลักษณะพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 4. การออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design--CCD)

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design--CCD) ถูกใช้ในการพิจารณาผลกระทบของพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวิธีนี้ให้ความสำคัญทุกระดับของพารามิเตอร์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการทดลองที่มีพารามิเตอร์หลายตัว และมีความยืดหยุ่นในการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ดี โดยใช้โปรแกรม Minitab19 ในการวิเคราะห์ กำหนดให้ Cube Point=8 Center point in cube=1 Axial Point=6 ซึ่งได้จำนวนการทดลองทั้ง 15 การทดลอง แสดงดังตาราง 5

จากนั้นทำการสร้างชิ้นส่วนกรณีศึกษา โดยการพิมพ์ชิ้นส่วนทั้งหมด 15 ชิ้น และกำหนดระดับของพารามิเตอร์ในการพิมพ์ตามแผนการออกแบบการทดลอง ซึ่งลักษณะของชิ้นส่วนกรณีศึกษาแสดงดังภาพ 4

#### 5. การเก็บค่าตอบสนอง

การเก็บข้อมูลค่าตอบสนองในงานวิจัยนี้ ดำเนินการโดยพิจารณาค่าตอบสนองจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter--D) และความยาว (Length--L) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา โดยวัดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) รุ่น Sylvac S-Cal PRO ที่มีความแม่นยำสูงสุด 0.001 mm ดังภาพ 5

ขั้นตอนการวัดชิ้นส่วนจะวัดทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดชิ้นส่วนกรณีศึกษา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้รับทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการพิมพ์ชิ้นส่วนกรณีศึกษาให้อยู่ในช่วงของขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่กำหนด

#### ตาราง 5

ตัวอย่างการจัดจำนวนการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

จำนวน	ความหนาชั้น (LH)	ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	ความหนาผนัง (WT)
1	0.10	20	1
2	0.40	20	1
3	0.10	60	1
4	0.40	60	1
5	0.10	20	3
6	0.40	20	3
7	0.10	60	3
8	0.40	60	3
9	0.10	40	2
10	0.40	40	2
11	0.25	20	2
12	0.25	60	2
13	0.25	40	1
14	0.25	40	3
15	0.25	40	2



ภาพ 4 ตัวอย่างชิ้นส่วนกรณีศึกษาทั้ง 15 ชิ้น



ภาพ 5 ตัวอย่างการวัดขนาดของชิ้นส่วน ABS

### ผลลัพธ์ของงานวิจัย

#### 1. ผลลัพธ์การวิเคราะห์ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter-D)

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter--D) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา จะแสดงในรูปแบบของสมการถดถอย ดังสมการที่ 1 และระดับความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้รับหรือ ค่า R-squared อยู่ที่ 96.70%

$$D = 19.113 + 5.349 (LH) + 0.00486 (SP) + 0.045 (WT) - 7.86(LH \times LH) + 0.000082(SP \times SP) - 0.0077 (WT \times WT) + 0.00253 (LH \times SP) + 0.019 (LH \times WT) - 0.00143 (SP \times WT) \quad (1)$$

ดังแสดงตาราง 6 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยกำหนดให้ระดับนัยสำคัญอยู่ที่ 0.05 พบว่า พารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) คือ ความหนาชั้น (LH) ความหนาชั้นกำลังสอง (LH2) เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่า P-value มากกว่า 0.05 คือ พารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญ หรือมีนัยสำคัญน้อยมาก

จากตาราง 6 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยกำหนดให้ระดับนัยสำคัญอยู่ที่ 0.05 พบว่า พารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) คือ ความหนาชั้น (LH) ความหนาชั้นกำลังสอง (LH2) เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่า P-value มากกว่า 0.05 คือ พารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญ หรือมีนัยสำคัญน้อยมาก

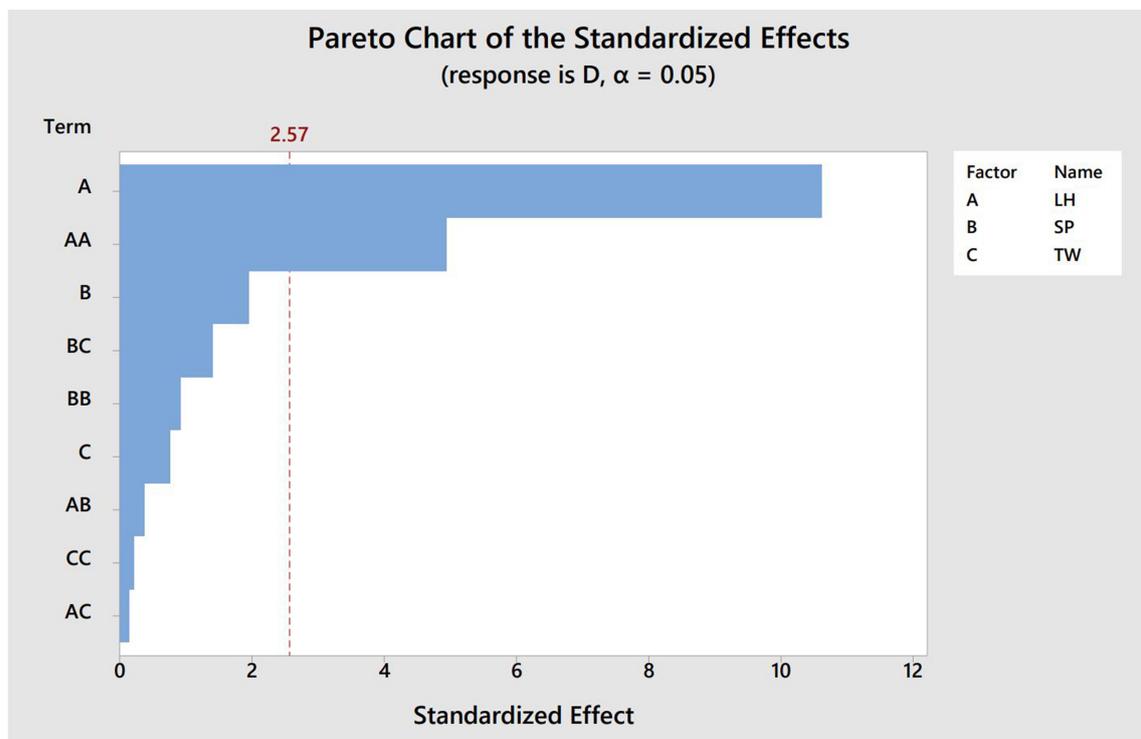
จากภาพ 6 แผนภูมิพารेटอ (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) กำหนดให้เส้นประแนวนอนสีแดงที่ระดับ 2.57 แสดงถึงค่าเกณฑ์นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 หากพารามิเตอร์เกินค่าเกณฑ์นี้ หมายความว่านัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งพบว่า

พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ ความหนาของชั้น (LH) รองลงมาคือ ความหนาของชั้นกำลังสอง (LH<sup>2</sup>) ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีระดับน้อยกว่าเกณฑ์ คือ พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญน้อย

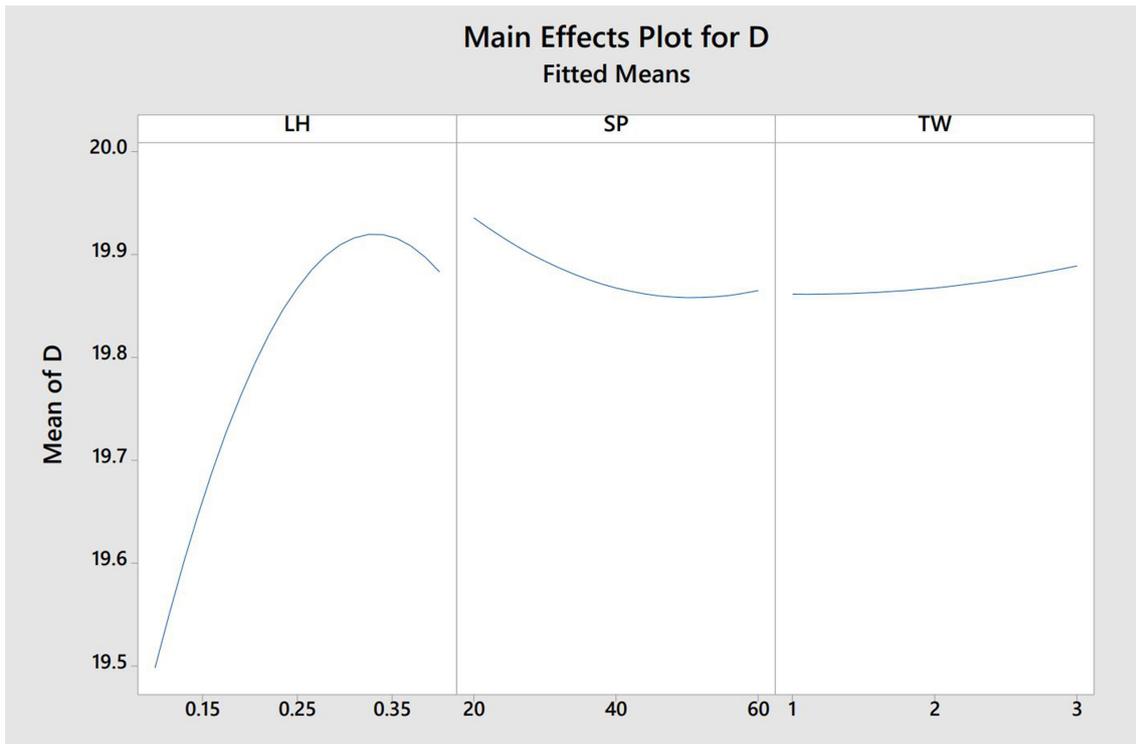
### ตาราง 6

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

พารามิเตอร์	DF	Adj SS	F-Value	P-Value
ความหนาชั้น	1	0.370049	112.61	0.000
ความเร็วในการพิมพ์	1	0.012461	3.79	0.109
ความหนาผนังชั้น	1	0.001886	0.57	0.483
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น	1	0.080341	24.45	0.004
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์	1	0.002785	0.85	0.400
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น	1	0.000154	0.05	0.837
ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์	1	0.000460	0.14	0.724
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง	1	0.000064	0.02	0.894
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง	1	0.006536	1.99	0.218
Error	5	0.016431	-	-
Total	14	0.497362	-	-



ภาพ 6 แผนภูมิพารेटอ (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter--D)



ภาพ 7 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (main effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากภาพ 7 ผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (main effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (DE) พบว่า ชั้นส่วนส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าขนาดที่กำหนด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง=20 มม.) โดยแนวโน้มของความหนาชั้น (LH) ยิ่งมากยิ่งขึ้นทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เข้าใกล้ขนาดที่กำหนด ( $\varnothing 20$ ) มากขึ้นก่อนที่จะลดลงเล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (WT) ยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดชั้นส่วนเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (interaction) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) จากตาราง 6 พบว่า การปรับพารามิเตอร์ร่วมกันไม่ส่งผลหรือส่งผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

## 2. ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลความคลาดเคลื่อนขนาดความยาวของชิ้นส่วนกรณีศึกษา (Length--L)

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (Length--L) ของชิ้นส่วนกรณีศึกษา จะแสดงในรูปแบบของสมการถดถอย ดังสมการที่ 2 และระดับความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้รับหรือ ค่า R-squared อยู่ที่ 87.52%

$$L = 49.744 + 0.310 (LH) + 0.00828 (SP) + 0.098 (WT) + 0.21 (LH \times LH) - 0.000002 (SP \times SP) + 0.0156 (WT \times WT) - 0.01172 (LH \times SP) - 0.0917 (LH \times WT) - 0.002587 (SP \times WT) \quad (2)$$

จากตาราง 7 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยกำหนดให้ระดับนัยสำคัญอยู่ที่ 0.05 พบว่า พารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) คือ ความหนาชั้น (LH) ความหนาผนัง (WT) และความเร็วในการพิมพ์  $\times$  ความหนาผนัง (SP $\times$ WT) เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่า P-value มากกว่า 0.05 คือพารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญ หรือมีนัยสำคัญน้อยมาก

จากภาพ 8 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) พบว่า พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ การปรับความเร็วในการพิมพ์  $\times$  ความหนาผนัง (SP $\times$ WT) พร้อมกัน รองลงมา คือ ความหนาชั้น (LH) และความหนาผนัง (WT) ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีระดับน้อยกว่าเกณฑ์ คือพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญน้อยมาก

จากภาพ 9 ผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (main effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) พบว่า ขนาดของชิ้นส่วนส่วนใหญ่มี

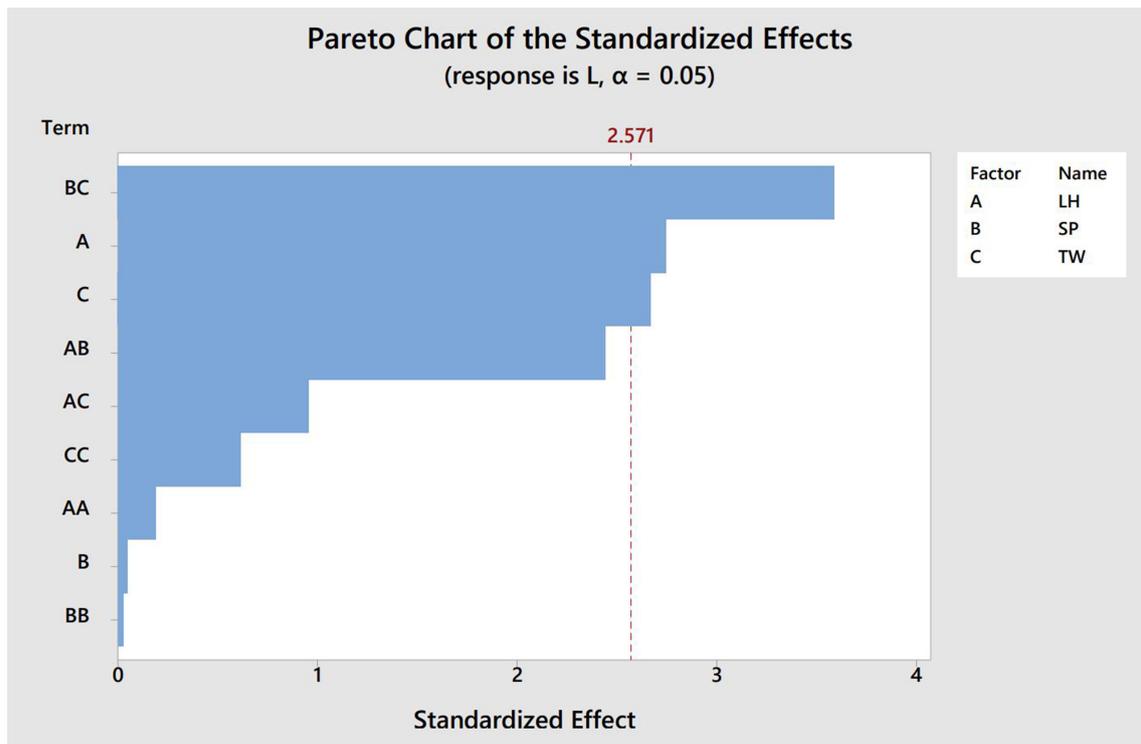
ขนาดมากกว่าขนาดที่กำหนด (ความยาว=50 มม.) โดย  
 แนวโน้มของความหนาชั้น (LH) ยิ่งมากทำให้ขนาดความ  
 ยาวเข้าใกล้ขนาดที่กำหนด ในตรงข้ามกันความหนาผนัง  
 ยิ่งลดลงยิ่งเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดมากขึ้น แต่ความเร็ว  
 ในการพิมพ์ (SP) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่วน  
 ผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (interaction)  
 ดังแสดงภาพ 10 ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด

ความยาว (L) พบว่า แนวโน้มที่มีความสำคัญ คือ ความเร็ว  
 ในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SPxWT) ซึ่งแนวโน้มได้  
 แสดงให้เห็นว่าการปรับสองพารามิเตอร์พร้อมกันโดยการ  
 ปรับให้ความหนาผนัง และความเร็วลดลง ส่งผลให้ขนาด  
 เข้าใกล้ขนาดที่กำหนดมากขึ้น ส่วนพารามิเตอร์ที่มีความ  
 สำคัญน้อยมาก คือ ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์  
 (LHxSP) และความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LHxWT)

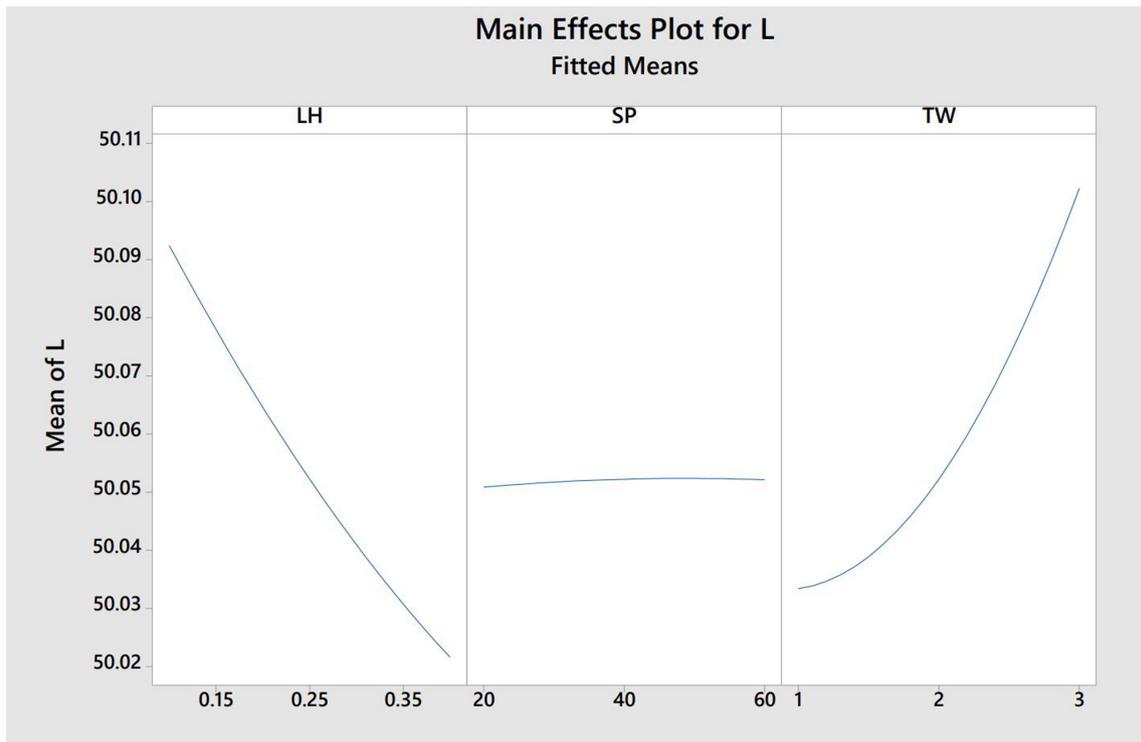
### ตาราง 7

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

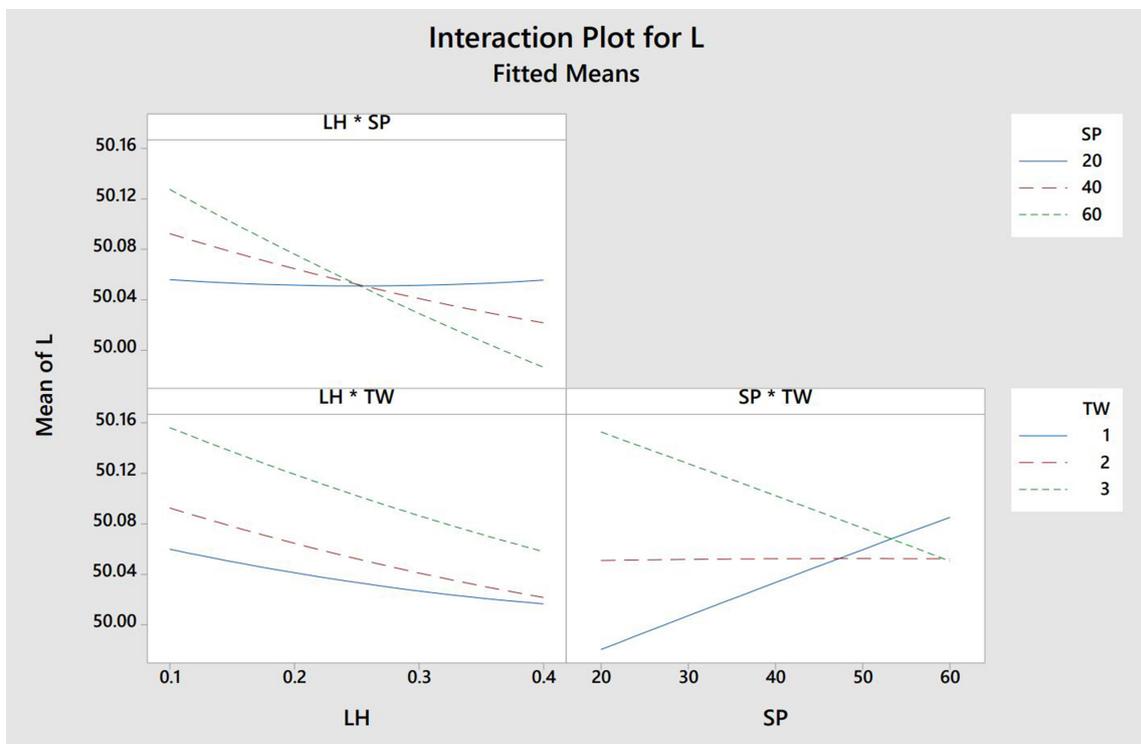
พารามิเตอร์	DF	Adj SS	F-Value	P-Value
ความหนาชั้น	1	0.012532	7.54	0.041
ความเร็วในการพิมพ์	1	0.000004	0.00	0.963
ความหนาผนังชั้น	1	0.011857	7.13	0.044
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น	1	0.000059	0.04	0.858
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์	1	0.000001	0.00	0.978
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น	1	0.000627	0.38	0.566
ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์	1	0.009894	5.95	0.059
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง	1	0.001512	0.91	0.384
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง	1	0.021424	12.89	0.016
Error	5	0.008312	-	-
Total	14	0.066585	-	-



ภาพ 8 แผนภูมิพารेटโต้ (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (Length--L)



ภาพ 9 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยวที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว



ภาพ 10 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วมที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว

### 3. ผลลัพธ์การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ กระบวนการพิมพ์

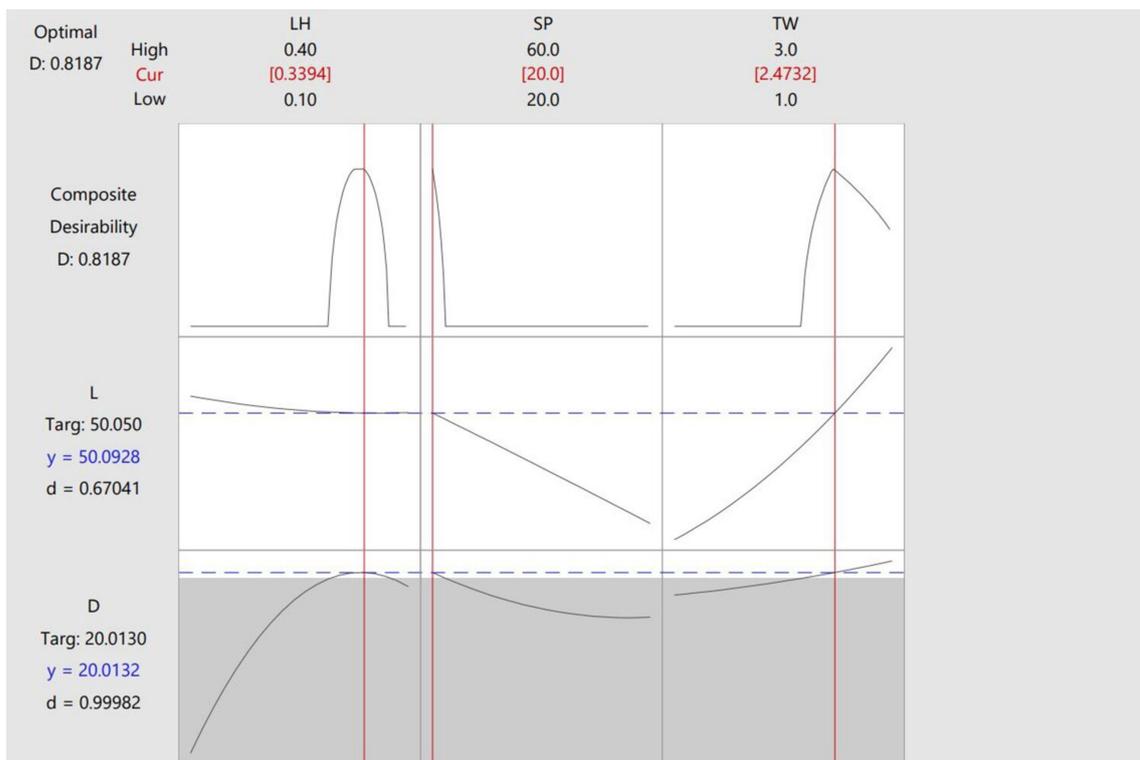
ผลลัพธ์การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ กระบวนการพิมพ์ชิ้นงาน กำหนดให้จุดมุ่งหมาย คือ ทำให้ ขนาดชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่มีขนาดอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่กำหนด โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ ซึ่งผลลัพธ์แสดงดังภาพ 11

จากภาพ 11 พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่แนะนำโดยผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab คือ ความหนาชั้นอยู่ที่ 0.3394 mm ความเร็วในการพิมพ์อยู่ที่ 20 mm/s และความหนาผนังชั้นอยู่ที่ 2.4732 mm โดยผลลัพธ์ ค่าตอบสนองที่ได้รับ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง=20.0132 mm และความยาว=50.0928 mm ส่วนผลลัพธ์ค่าความพึงพอใจ (composite desirability) โดยรวมของสภาวะที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ 0.8187 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ 1 หมายความว่า ข้อมูลมีความแม่นยำในการวิเคราะห์

### 4. การตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในการวิเคราะห์ทางสถิติ

การตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอในการวิเคราะห์ทางสถิติ คือการตรวจสอบผลลัพธ์การวัดขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์ ให้ขนาดของชิ้นส่วนอยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่กำหนดดังแสดงตาราง 8

จากตาราง 8 ผลลัพธ์จากการวัดชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์พบว่าชิ้นส่วนส่วนใหญ่มีขนาดคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงขอบเขตที่กำหนด ยกเว้นชิ้นส่วนที่ 4 ที่มีขนาดความยาวเกินขอบเขตที่กำหนดเล็กน้อย



ภาพ 11 ผลลัพธ์กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ตาราง 8

ผลลัพธ์การวัดขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์

ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์					
LH = 0.3485 mm      PS = 20 mm/s      TW = 2.4747 mm					
ครั้งที่	ขนาดชิ้นส่วนกรณีศึกษา				
	$D_1 = \phi 20^{+0.021}_{+0.008}$ mm		$L_1 = 50^{+0.100}_0$ mm		
	$D_2 = \phi 26$ mm	$L_2 = 4$ mm			
	20.008	20.021	50.000	50.100	
1	20.009		50.079	26.106	4.009
2	20.014		50.068	26.136	4.055
3	20.017		50.046	26.153	4.048
4	20.018		50.124	26.123	4.026
5	20.009		50.079	26.168	4.010
6	20.014		50.091	26.064	3.976
7	20.011		50.085	26.119	4.016
8	20.019		50.092	26.102	4.021
9	20.015		50.089	26.068	4.052
10	20.018		50.081	26.032	4.020

สรุปผลการทดสอบและการอภิปราย

จากสรุปผลของงานวิจัยพบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนกรณีศึกษามากที่สุด คือ ความหนาชั้น (LH) ทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชิ้นส่วนอย่างชัดเจน โดยที่การปรับความหนาชั้น (LH) เพิ่มขึ้นช่วยให้ขนาดของชิ้นส่วนเข้าใกล้ขนาดตามที่กำหนดมากยิ่งขึ้น ซึ่งการปรับความหนาชั้นน้อยลง ทำให้จำนวนชั้นในการขึ้นรูปมีมากขึ้น และทำให้เกิดความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดการหดตัวจนเกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนได้ ส่วนความหนาผนัง (WT) ส่งผลโดยตรงต่อความยาวของชิ้นส่วน ยิ่งปรับความหนาผนังลดลงทำให้ขนาดเข้าใกล้ขนาดตามที่กำหนดมากขึ้น

จากสรุปผลการหาค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์ พบว่า ค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ในโปรแกรม Minitab คือ ความหนาชั้นอยู่ที่ 0.3394 mm ความเร็วในการพิมพ์อยู่ที่ 20 mm/s และความหนาผนังชั้นอยู่ที่ 2.4732 mm โดย

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดชิ้นส่วน พบว่า ชิ้นส่วนกรณีศึกษาทั้งหมด 10 ชิ้น มีเพียง 1 ชิ้นที่มีขนาดความยาวเกินขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่กำหนด ดังนั้นเพื่อให้การพิมพ์ชิ้นส่วนกรณีศึกษามีขนาดอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ตามข้อกำหนดของเครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในการทดลองต้องพักเครื่องพิมพ์อย่างน้อย 10 นาที หลังจากพิมพ์ชิ้นงานเสร็จทุกครั้ง เนื่องจากภายในเครื่องพิมพ์มีความร้อนสะสมภายใน อาจส่งผลกระทบต่อขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาได้ และการนำค่าที่ได้รับจากการวิเคราะห์ไปใช้งานจริงในการตั้งค่าเครื่องพิมพ์สามมิติที่เหมาะสม คือ ความหนาชั้นที่ 0.339 mm ความเร็วในการพิมพ์ที่ 20 mm/s และความหนาผนังที่ 2.473 mm เนื่องจากในการตั้งค่ากับเครื่องพิมพ์สามมิติสามารถกำหนดได้เพียงทศนิยม 3 ตำแหน่งเท่านั้น สรุปได้ว่า การปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมช่วยให้ชิ้นส่วนกรณีศึกษามีขนาดอยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อนของขนาดที่กำหนด และสามารถนำชิ้นส่วนมาทดแทนชิ้นส่วนมาตรฐานในอุตสาหกรรมได้ ซึ่งในอนาคตงานวิจัยนี้สามารถ

พัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ค่าตอบสนองเกี่ยวกับรูปร่างรูปทรงของชิ้นส่วน (GD&T) และความหลากหลายของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติ เพื่อให้ชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ CIT-2022-GRAD-19



## References

- Aslani, K. E., Kitsakis, K., & Kechagias, J. D. (2020). On the application of grey Taguchi method for benchmarking the dimensional accuracy of the PLA fused filament fabrication process. *Sciences*, 2, 1016. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2823-z>
- Buj-Corral, I., Bagheri, A., & Sivatte-Adroer, M. (2021). Effect of Printing Parameters on Dimensional Error, Surface Roughness and Porosity of FFF Printed Parts with Grid Structure. *Polymer*, 13, 1213. <https://doi.org/10.3390/polym13081213>
- Buj-Corral, I., & Zayas-Figueras, E. E. (2023) “Comparative study about dimensional accuracy and form errors of FFF printed spur gears using PLA and Nylon. *Polymer Testing*, 117, 107862. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107862>
- Choudhari, C.M., & Patil, V. D. (2016) “Product Development and its Comparative Analysis by SLA, SLS and FDM Rapid Prototyping Processes. *Materials Science and Engineering*, 149, 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012009>
- Calì, J., Calian, D. A., Amati, C., & Kleinberger, R. (2012). 3D-Printing of Non - Assembly, Articulated Models. *ACM Transactions on Graphics*, 31(6), 130. <https://doi.org/10.1145/2366145.236614>
- Dey, A., & Yodo, N. (2019) A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3, 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030064>
- Elkaseer, A., Schneider, S., & Scholz, S. G. (2020). Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing. *Sciences*, 10, 2899. <https://doi.org/10.3390/app10082899>
- Equbal, A., Soon, A. K., & Razzaq, A. (2017). Optimization of process parameters of FDM part for minimizing its dimensional inaccuracy. *International Journal of Mechanical and Production*, 7(2), 57-66. <https://bit.ly/42bclXc>
- Hanon, M. M., Zsidai, L., & Ma, Q. (2021). Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors. *Materials Today: Proceedings*, 42, 3089-3096. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1246>

- Gautam, J., & Aravinth, N. (2022). Studies on the effect of part geometry and process parameter on the dimensional deviation of additive manufactured part using ABS material. *Progress in Additive Manufacturing. Progress in Additive Manufacturing*, 6, 1183-1193. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00292-9>
- Gao, G., & Xu, F. (2022). Parametric optimization of FDM process for improving mechanical strengths using Taguchi method and response surface method: A comparative investigation. *Machines*, 10, 750. <https://doi.org/10.3390/machines10090750>
- Qureshi, S. M., & Talamona, D. (2018). Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling. *Additive Manufacturing*, 21, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.009>
- Raymond, M. (2009) Experimental Designs for Fitting Response Surfaces – I. In W. A. Shewhart & S. S. Wilks (Eds.), *Response Surface Methodology* (pp. 281-348). United States: Wiley
- Shakeri, Z., Benfriha, K., & Zirak, N. (2021). Optimization of FFF Processing Parameters to Improve Geometrical Accuracy and Mechanical Behavior of Polyamide 6 Using Grey Relational Analysis (GRA). *ISSI Scientific Reports Series*, 2021, 1-29. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1118150/v1>
- Sieminski, P. (2021). Chapter 2 - Introduction to fused deposition modeling. In J. Pou, A. Riveiro & J. P. Davim (Eds), *Additive manufacturing* (pp. 217-275). Netherlands: Elsevier
- Solomon, J., & Gunasekaran, S. (2020). A review on the various processing parameters in FDM. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 509-514. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.484>
- Sood, A. K., & Mahapatra, O. (2009). Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials and Design*, 30, 4243-4252. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.030>
- Sudin, M. N., Shamsudin, S. A., & Abdullah, M. A. (2016). Effect of part features on dimensional accuracy of FDM model. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(13), 8067-8072. [https://www.arpnjournals.org/jeas/research\\_papers/rp\\_2016/jeas\\_0716\\_4564.pdf](https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_0716_4564.pdf)
- Suthat Na Ayutthaya, P., & Luangpaiboon, P. (2551). *Design and analysis of experiments*. Bangkok: Top publishing house (in Thai)
- Vanaei, H. R., Khellad, S., & Tcharkhtchi, A. (2022). Roadmap: Numerical-experimental investigation and optimization of 3D-printed parts using response surface methodology. *Materials*, 15, 7193. <https://doi.org/10.3390/ma15207193>
- Vijayakumar, S., & Ayyangar, A. K. (2018) Design and fabrication of industrial components using 3D printing. *Materials Today: Proceedings*, 5, 14489-14498. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.03.036>

- Wicaksono, M. B., & Nugraha, F. A. N. (2022) "Optimization of 3D printing parameters using the Taguchi method to improve dimensional precision. *Additive Manufacturing*, 12(2), 70-75. <https://doi.org/10.35134/jitekin.v12i2.72>
- Wu, J. (2018) Study on optimization of 3D printing parameters. *Materials Science and Engineering*, 392, 062050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/6/062050>
- Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y. (2018). A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*, 4, 729–742. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
- Zadpoor, A. A., & Malda, J. (2016). Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues and Organs. *Biomedical Engineering*, 45, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1719-y>.
- Zhang, X., & Liou, F. (2021) Chapter 1 - Introduction to additive manufacturing. In J. Pou, A. Riveiro, & J. P. Davim (Eds), *Additive manufacturing* (pp. 1-31). Netherlands: Elsevier

