



การวิเคราะห์พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติสำหรับวัสดุ PLA และ ABS โดยใช้วิธี CCD

นายทัตพงศ์ ลี้มหลาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การวิเคราะห์พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติสำหรับวัสดุ PLA และ ABS โดยใช้วิธี CCD

นายทัตพงศ์ ลิ่มหลาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงงานวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การวิเคราะห์พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติสำหรับวัสดุ PLA และ ABS โดยใช้วิธี CCD

โดย นายพัตพงศ์ ลี้มหลาย

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทรวีวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา อุบลทิพย์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทธ์พิมล สุวรรณกาญจน์)

ชื่อ : นายทัตพงศ์ ลิ้มหลาย
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การวิเคราะห์พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติสำหรับ
วัสดุ PLA และ ABS โดยใช้วิธี CCD
สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ได้รับความนิยมอย่างมากในการขึ้นรูปชิ้นส่วนเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการผลิต เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปทรงซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ในกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์ชิ้นส่วนด้วยวัสดุ PLA และ ABS ได้แก่ ความหนาชั้น (LH), ความเร็วในการพิมพ์ (SP), อุณหภูมิหัวฉีด (TP) และความหนาผนัง (TW) ด้วยการออกแบบการทดลองวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) เพื่อควบคุมค่าพิคัดความเผื่อให้อยู่ในค่าพิคัดที่กำหนด โดยใช้ชิ้นส่วนกรณีศึกษาคือ สลักฟันแบบมีบ่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าพิคัดความเผื่อ 20.008 มม. ถึง 20.021 มม. และค่าพิคัดความเผื่อ 19.947 มม. ถึง 19.980 มม. ส่วนความยาวของสลักมีค่าพิคัดความเผื่อ 50.00 ถึง 50.10 มม. ผลลัพธ์การปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการพิมพ์ชิ้นส่วนด้วยวัสดุ PLA พบว่าขนาดของชิ้นส่วน มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าพิคัดที่กำหนด 0.065 มม. สำหรับวัสดุ ABS พบว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมช่วยให้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในค่าพิคัดที่กำหนด ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนที่มีคุณภาพตามข้อกำหนด และเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ควรพักเครื่องพิมพ์อย่างน้อย 10 นาทีก่อนการพิมพ์ครั้งต่อไป

(มีจำนวนทั้งสิ้น 168 หน้า)

คำสำคัญ : กระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อ พารามิเตอร์กระบวนการการพิมพ์ ความคลาดเคลื่อน
ขนาด ความหนาของชั้น ความเร็วในการพิมพ์ อุณหภูมิหัวฉีด ความหนาผนัง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Tattapong Limlay
Thesis Title : Analysis of FDM-3D printing process parameters for
PLA and ABS by CCD method
Major Field : Mechanical Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Wannalak Laotaweesub
Academic Year : 2024

ABSTRACT

The Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing process is widely used for prototyping in manufacturing due to its ability to produce complex parts quickly and at a low cost. This research aims to analyze the effects of parameters for the Fused Deposition Modeling Process and analyze the appropriate parameter values for printing parts with PLA and ABS materials are layer thickness (LH), printing speed (SP), nozzle temperature (TP), and wall thickness (TW) with the central component design (CCD) method of experiments. to control the tolerance value to be within Fit & Tolerance using the case study parts are shoulder pins with diameter tolerances of 20.008 mm to 20.021 mm and tolerances of 19.947 mm to 19.980 mm. The length of the pin has tolerances of 50.00 to 50.10 mm. The results of parameter optimization for printing parts with PLA material showed that the part size had a tolerance greater than the specified tolerance coordinate value at 0.065 mm. For ABS material, parameter optimization helped keep the dimensional deviation within the specified tolerance, making it applicable for producing high-quality parts that meet the required specifications. To achieve the best results, allowing the printer to rest for at least 10 minutes before the next print is recommended.

(Total 168 Pages)

Keywords: Additive Manufacturing, Process printing, Dimensional error, layer thickness, printing speed, Extrusion temperature, Wall thickness

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ CIT-2022-GRAD-19 ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการสำเร็จล่วงตามวัตถุประสงค์ ทั้งนี้ผู้วิจัยยังได้รับความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ให้ข้อคิด ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี อันเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยอย่างยิ่ง ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างมาก จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ทำนนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความสนับสนุนด้านการเงินและกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยในการศึกษาต่อครั้งนี้ ที่ศึกษาด้วยกันและไม่ได้ศึกษาด้วยกันที่คอยให้คำแนะนำและกำลังใจ ในยามที่ต้องการเสมอมา อีกทั้งพี่ ๆ เจ้าหน้าที่ที่ช่วยในการติดต่อประสานงานในเรื่องการเรียนให้ผ่านไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลที่กล่าวมาเป็นอย่างยิ่ง

ทัตพงศ์ ล้มหลาย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญรูปภาพ(ต่อ).....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM).....	5
2.2 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติ	12
2.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)	14
2.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	35
3.2 การจัดเตรียมการทดลองสำหรับวัสดุ PLA	38
3.3 การออกแบบการทดลองแบบ (CCD) และเก็บข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุ PLA.....	45

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA และหาการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ PLA.....	55
3.5 การตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ PLA	85
3.6 การจัดเตรียมการทดลองสำหรับวัสดุ ABS.....	88
3.7 การออกแบบการทดลองแบบ (CCD) และเก็บข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุ ABS.....	97
บทที่ 4 ผลการวิจัย	101
4.1 ผลลัพธ์การเก็บค่าตอบสนองจากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์	101
4.2 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	102
4.3 การตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	118
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	126
5.1 สรุปผลการวิจัย	126
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	128
บรรณานุกรม.....	129
ภาคผนวก ก แบบของชิ้นงานทดสอบ และชิ้นส่วนกรณีศึกษา.....	134
ภาคผนวก ข การตั้งค่าข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab.....	138
ภาคผนวก ค ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เผยแพร่.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	168

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1	พารามิเตอร์เริ่มต้นที่แนะนำโดยเครื่องพิมพ์สามมิติ	3
ตารางที่ 2-1	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติ	12
ตารางที่ 2-2	คุณสมบัติของวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) (Tomy Muringayil, 2022)	13
ตารางที่ 2-3	คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (M. Samykano, 2019)	14
ตารางที่ 2-4	ตัวอย่างการออกแบบการทดลองด้วย CCD กรณีศึกษา 3 ปัจจัย	20
ตารางที่ 2-5	ตัวอย่างการออกแบบการทดลองด้วย BBD กรณีศึกษา 3 ปัจจัย	24
ตารางที่ 2-6	สรุปการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table)	27
ตารางที่ 2-7	งานที่วิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
ตารางที่ 3-1	คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC 3040 V.2022	42
ตารางที่ 3-2	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาในขั้นตอนการดำเนินงาน	44
ตารางที่ 3-3	ค่าพารามิเตอร์ที่แนะนำโดยโปรแกรม Ultimaker Cura	44
ตารางที่ 3-4	ตัวอย่างจำนวนการทดลองในหนึ่งชุดด้วยโปรแกรม Minitab สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA	47
ตารางที่ 3-5	ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และขนาดความยาวของชิ้นส่วนทดสอบ (PLA) ที่ 1	50
ตารางที่ 3-6	ผลสรุปการจัดเตรียมการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA	54
ตารางที่ 3-7	สรุปตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	55
ตารางที่ 3-8	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ Degrees of Freedom (df) ทั้งหมด	59
ตารางที่ 3-9	ผลการคำนวณค่า Degrees of Freedom ในตารางค่าความแปรปรวน (ANOVA)	60
ตารางที่ 3-10	ตัวอย่างข้อมูลจากตารางที่ 3-4 ที่ใช้ในการคำนวณหาค่า $Y_{predicted}$	62
ตารางที่ 3-11	ผลลัพธ์การคำนวณค่า $Y_{predicted}$ ทั้งหมดด้วยสมการถดถอย (Regression Model)	63
ตารางที่ 3-12	ผลลัพธ์การคำนวณหาค่า SSM	68
ตารางที่ 3-13	ผลการคำนวณหาค่า Adj SSM ทุกปัจจัยสำหรับวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)	68
ตารางที่ 3-14	ผลการคำนวณหาค่า Adj SS ทั้งหมดในตารางความแปรปรวน (ANOVA)	69
ตารางที่ 3-15	ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA	71
ตารางที่ 3-16	ตารางแจกแจงค่าวิกฤตแบบ t - Distribution	74
ตารางที่ 3-17	ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA	79
ตารางที่ 3-18	สรุปเป้าหมาย (Goal) ค่าตอบสนอง	83
ตารางที่ 3-19	ผลลัพธ์การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA	84

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 3-20 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบที่ 1 (PLA) เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์	85
ตารางที่ 3-21 ผลลัพธ์การวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ (PLA) ที่ 1	86
ตารางที่ 3-22 ผลลัพธ์การวัดขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ (PLA) ที่ 2 ที่ตั้งค่าด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์	88
ตารางที่ 3-23 คุณสมบัติของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X.....	91
ตารางที่ 3-24 ค่าพารามิเตอร์ตามเริ่มต้นที่ได้รับจากโปรแกรม MakerBot Cloud Print	93
ตารางที่ 3-25 ผลลัพธ์การวัดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่พิมพ์ตามค่าเริ่มต้นของโปรแกรม MakerBot Cloud Print	95
ตารางที่ 3-26 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับพิจารณาผลกระทบที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด ..	96
ตารางที่ 3-27 ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องในการพิจารณา	96
ตารางที่ 3-28 ตัวอย่างการจัดจำนวนการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab.	98
ตารางที่ 3-29 ผลสรุปการจัดเตรียมข้อมูลในการทดลองสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS.....	100
ตารางที่ 4-1 ผลลัพธ์การวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ทั้งหมด 15 ชิ้น	101
ตารางที่ 4-2 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS.....	104
ตารางที่ 4-3 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	109
ตารางที่ 4-4 สรุปผลลัพธ์การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS.....	117
ตารางที่ 4-5 ผลการวัดขนาดของชิ้นส่วนทดสอบที่พิมพ์ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	120
ตารางที่ 4-6 คุณสมบัติของเครื่องพิมพ์รุ่น P25-2626G Standard	121
ตารางที่ 4-7 ผลการวัดขนาดชิ้นส่วนด้วยค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่แนะนำโดยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard โดยใช้ชิ้นส่วนทดสอบ ABS	123
ตารางที่ 4-8 ผลการวัดขนาดชิ้นส่วนที่ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	125

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1	ขั้นตอนการผลิตด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (Xinchang Zhang, 2021)	6
ภาพที่ 2-2	ตัวอย่าง CAD model (ก) CAD model ของเบาะรถยนต์ (ข) CAD model ที่มีความละเอียดผิวสูง (ค) CAD model ที่มีความละเอียดผิวต่ำ (Xinchang Zhang, 2021)	7
ภาพที่ 2-3	การแสดงผลแผนผังของกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Przemysław Sieminski, 2021)	8
ภาพที่ 2-4	ลักษณะชิ้นส่วนที่ถูกพิมพ์ด้วยกระบวนการ และวัสดุรองรับส่วนโครงสร้าง (Przemysław Sieminski, 2021)	9
ภาพที่ 2-5	แสดงลักษณะทิศทางการวางชิ้นส่วน (Arup Dey, 2019)	10
ภาพที่ 2-6	โครงสร้างภายใน (ก) แบบ linear (ข) แบบ diamond (ค) แบบ Hexagonal	10
ภาพที่ 2-7	ลักษณะของทิศทางของโครงสร้างภายใน (Raster orientation) (Arup Dey, 2019)	11
ภาพที่ 2-8	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการที่สนใจ	15
ภาพที่ 2-9	หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง	16
ภาพที่ 2-10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองและปัจจัยแบบพื้นผิวตอบสนอง	17
ภาพที่ 2-11	ลักษณะกราฟ Contour Plot	18
ภาพที่ 2-12	วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง (Sequential Procedure) ..	19
ภาพที่ 2-13	แสดงขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสม	19
ภาพที่ 2-14	โมเดลจำลองการออกแบบการทดลอง Central composite design ในกรณี $k = 3$	21
ภาพที่ 2-15	การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Circumscribed, CCC	22
ภาพที่ 2-16	การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Inscribed, CCI	22
ภาพที่ 2-17	การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Face Centered, CCF	23
ภาพที่ 2-18	โมเดลจำลองการออกแบบการทดลอง Box – Behnken Design ในกรณี $k = 3$	25
ภาพที่ 3-1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
ภาพที่ 3-2	ลักษณะพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	36
ภาพที่ 3-3	ตัวอย่างความหนาชั้น (ก) ความหนาของชั้นที่ 0.2 มม. (ข) ความหนาของชั้นที่ 0.4 มม.	37
ภาพที่ 3-4	ตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดช่องว่างระหว่างชั้นจากการปรับความเร็วในการพิมพ์ต่ำเกินไป	37
ภาพที่ 3-5	ตัวอย่างความหนาผนัง (ก) ความหนาของผนังที่ 1 มม. (ข) ความหนาของผนังที่ 3 มม.	38
ภาพที่ 3-6	ชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA) คือชิ้นส่วนทรงกระบอก	39
ภาพที่ 3-7	ชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) คือชิ้นส่วนกรณีศึกษา “สลักทรงกระบอกแบบมีป่า”	40
ภาพที่ 3-8	หน้าต่างโปรแกรม Ultimaker Cura	41

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3-9 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC3040v.2022.....	42
ภาพที่ 3-10 เส้นใยวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA)	43
ภาพที่ 3-11 ลักษณะของพารามิเตอร์โครงสร้างภายในแบบตาราง (Grid)	44
ภาพที่ 3-12 ผลลัพธ์การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab	46
ภาพที่ 3-13 แสดงตัวอย่างเครื่องพิมพ์สามมิติขณะกำลังขึ้นรูปชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA)	48
ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA).....	49
ภาพที่ 3-15 เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) รุ่น TMT322006	50
ภาพที่ 3-16 ตัวอย่างตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และความยาว (L)	50
ภาพที่ 3-17 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วน PLA	73
ภาพที่ 3-18 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วน PLA.....	74
ภาพที่ 3-19 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วน PLA.....	75
ภาพที่ 3-20 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาวทดสอบ (L) สำหรับชิ้นส่วน PLA	80
ภาพที่ 3-21 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วน PLA	80
ภาพที่ 3-22 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วน PLA.....	81
ภาพที่ 3-23 ผลลัพธ์กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA.....	83
ภาพที่ 3-24 ขนาดชิ้นทดสอบที่ 1 (PLA) ที่ใช้ตรวจสอบ	85
ภาพที่ 3-25 ตัวอย่างชิ้นส่วนทดสอบที่พิมพ์ด้วย (ก) ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์ และ (ข) ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นโดย โปรแกรม Ultimaker Cura	86
ภาพที่ 3-26 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่กำหนดค่าพิถีพิถันเพื่อ	87
ภาพที่ 3-27 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS กรณีที่ 1 กำหนดค่าพิถีพิถันของขนาดไปทางบวก.....	89
ภาพที่ 3-28 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS กรณีที่ 2 กำหนดค่าพิถีพิถันของขนาดไปทางลบ	90
ภาพที่ 3-29 ตัวอย่างโมเดลสามมิติชิ้นส่วนทดสอบ ABS	90

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 3-30 (ก) เครื่องพิมพ์รุ่น MakerBot Method X (ข) เส้นใยพลาสติก ABS	91
ภาพที่ 3-31 เว็บไซต์ MakerBot Cloud Print สำหรับการตั้งค่า	92
ภาพที่ 3-32 การตั้งค่าพื้นฐานในโปรแกรม MakerBot Cloud Print.....	93
ภาพที่ 3-33 ลักษณะชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่พิมพ์ตามค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมด 5 ชิ้น	94
ภาพที่ 3-34 ผลลัพธ์การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab	97
ภาพที่ 3-35 ตัวอย่างชิ้นส่วนทดสอบ ABS ทั้งหมด 15 ชิ้น.....	99
ภาพที่ 3-36 ตัวอย่างการวัดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ รุ่น Sylvac S-Cal PRO	99
ภาพที่ 4-1 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	105
ภาพที่ 4-2 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS.....	106
ภาพที่ 4-3 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วมที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	107
ภาพที่ 4-4 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว	111
ภาพที่ 4-5 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยวที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	112
ภาพที่ 4-6 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วมที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว	113
ภาพที่ 4-7 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS กรณีที่ 1 กำหนดให้ค่าพิสัยความเผื่อไปทางบวก.....	115
ภาพที่ 4-8 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS กรณีที่ 2 กำหนดให้ค่าพิสัยความเผื่อไปทางลบ.....	115
ภาพที่ 4-9 ผลลัพธ์กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกรณีที่ต้องการให้ค่าพิสัยความเผื่อไปทางบวกสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	116
ภาพที่ 4-10 ผลลัพธ์กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกรณีที่ต้องการให้ค่าพิสัยความเผื่อไปทางลบสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	117
ภาพที่ 4-11 ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS (ก) ค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางบวก (ข) ค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางลบ.....	119
ภาพที่ 4-12 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard.....	122

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4-13 ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS (ก) ค่าพิสัยความถี่ของขนาดไปทางบวก (ข) ค่าพิสัยความถี่ของขนาดไปทางลบ.....	124
ภาพที่ ก-1 ชิ้นส่วนทดสอบ.....	135
ภาพที่ ก-2 ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ 1	136
ภาพที่ ก-3 ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ 2	137
ภาพที่ ข-1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design).....	139
ภาพที่ ข-2 การตั้งค่าในส่วนของ Create Response Surface Design.....	140
ภาพที่ ข-3 การตั้งค่าในส่วนของ Designs.....	141
ภาพที่ ข-4 การตั้งค่าในส่วนของ Factors.....	142
ภาพที่ ข-5 การตั้งค่าในส่วนของ Options.....	143
ภาพที่ ข-6 ผลการออกแบบการทดลอง.....	144
ภาพที่ ข-7 การนำค่าตอบสนองลงในตารางเพื่อเริ่มวิเคราะห์ผล.....	145
ภาพที่ ข-8 การเริ่มต้นการวิเคราะห์ผลกระทบพารามิเตอร์.....	146
ภาพที่ ข-9 การกำหนดค่า Response.....	146
ภาพที่ ข-10 ผลลัพธ์การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง (D).....	147
ภาพที่ ข-11 ผลลัพธ์การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง(L).....	148
ภาพที่ ค-1.....	150
ภาพที่ ค-2.	151
ภาพที่ ค-3.....	152
ภาพที่ ค-4.....	152
ภาพที่ ค-5.....	153
ภาพที่ ค-6.....	154
ภาพที่ ค-7.....	155
ภาพที่ ค-8.....	156
ภาพที่ ค-9.....	157
ภาพที่ ค-10.....	158
ภาพที่ ค-11.....	159

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ค-12.....	160
ภาพที่ ค-13.....	161
ภาพที่ ค-14.....	162
ภาพที่ ค-15.....	163
ภาพที่ ค-16.....	163
ภาพที่ ค-17.....	164
ภาพที่ ค-18.....	165



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) เป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมวัสดุลงบนฐานพิมพ์ทีละชั้นต่อชั้นจนกลายเป็นวัตถุสามมิติ ในปัจจุบันกระบวนการนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตเครื่องมือแพทย์ อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร และอุตสาหกรรมเครื่องบิน เป็นต้น เพื่อใช้สร้างต้นแบบในการตรวจสอบรูปร่าง ลักษณะการประกอบชิ้นส่วน และหน้าที่การทำงานของชิ้นส่วนประกอบ กระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุมีการพัฒนากระบวนการพิมพ์สามมิติแบบใหม่ เพื่อให้ชิ้นส่วนมีคุณภาพมากขึ้น เช่น กระบวนการฉายรังสี (Stereolithography, SLA) กระบวนการละลายวัสดุด้วยเลเซอร์ (Selective Laser Sintering, SLS) เป็นต้น

กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM) เป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างชิ้นส่วนน้อยที่สุดในกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (AM) และสามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ในเวลาอันสั้น โดยไม่ต้องเตรียมแม่พิมพ์หรือเครื่องมือเพิ่มเติม แต่ในขณะเดียวกันชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการนี้มีคุณภาพต่ำที่สุด เนื่องจากการหลอมละลายวัสดุต้องใช้ความร้อน ทำให้เกิดความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนเกิดความคลาดเคลื่อนจากการหดตัวของวัสดุ ปัจจุบันอุตสาหกรรมทั่วไปได้พยายามนำชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้มาใช้ทดแทนชิ้นส่วนประกอบที่มีอยู่ เช่น ข้อต่อหมุนในส่วนของระบบหุ่นยนต์ หรือแขนกล, ข้อต่อในส่วนของอวัยวะเทียม และชิ้นส่วนสลักฟันในงานอุตสาหกรรมแม่พิมพ์โลหะ ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้มีการเปลี่ยนชิ้นส่วนอยู่บ่อยครั้ง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ต้องการผลิตชิ้นส่วนเพื่อใช้ทดแทนชิ้นส่วนเครื่องจักรในอุตสาหกรรม โดยใช้ชิ้นส่วนกรณีศึกษาคือ สลักฟันมีบ่า มีหน้าที่ช่วยรองรับแรงกระแทก และช่วยควบคุมตำแหน่ง ในขณะที่แม่พิมพ์ขึ้นรูป เป็นชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำของขนาด และความเที่ยงตรงในการประกอบสูง จากการวิเคราะห์ปัญหาพบว่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยเฉพาะความคลาดเคลื่อนของขนาดที่เกิดจากการกำหนดพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์ที่ไม่เหมาะสม

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้วิเคราะห์ผลกระทบ และหาค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนหลักพิมพ์สำหรับชิ้นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์เป็นชิ้นส่วนกรณีศึกษา และออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) โดยพิจารณาพารามิเตอร์กระบวนการทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาชั้น ความเร็วของหัวฉีด อุณหภูมิหัวฉีด และความหนาผนัง โดยมีจุดมุ่งหมายคือการสร้างชิ้นส่วนกรณีศึกษาให้มีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดอยู่ในค่าพิสัยทางบวกและค่าพิสัยทางลบตามแบบที่กำหนด โดยการวัดชิ้นส่วนทดสอบ ด้วยเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์ ได้แก่

1.3.1.1 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC 3040 V2022 มีพื้นที่ในการพิมพ์อยู่ที่ 300 x 300 x 300 มม.

1.3.1.2 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X มีพื้นที่ในการพิมพ์อยู่ที่ 152 x 190 x 196 มม. มีค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องพิมพ์สามมิติอยู่ที่ ± 0.2 มม.

1.3.1.3 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard มีพื้นที่ในการพิมพ์อยู่ที่ 126 x 126 x 126 มม. มีค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องพิมพ์สามมิติอยู่ที่ ± 0.05 มม.

1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์คือ วัสดุเส้น PLA และ ABS ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มม.

1.3.3 ชิ้นส่วนทดสอบที่ใช้เป็นกรณีศึกษาคือ สลักพิมพ์มาตรฐานแบบมีบ่า ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 20 มม. ซึ่งมีค่าพิสัยความเผื่อในทางบวกที่ $\varnothing 20^{+0.021}_{+0.008}$ มม. และค่าพิสัยความเผื่อในทางลบที่ $\varnothing 20^{-0.020}_{-0.053}$ มม. ส่วนความยาวมีค่าพิสัยความเผื่อที่ $50^{+0.100}_0$ มม.

1.3.4 พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติ สำหรับระดับค่าเริ่มต้นตามที่แนะนำโดยเครื่องพิมพ์สามมิติ แสดงดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 พารามิเตอร์เริ่มต้นที่แนะนำโดยเครื่องพิมพ์สามมิติ

พารามิเตอร์เริ่มต้น	ระดับของพารามิเตอร์
ความหนาชั้น	0.2
ความเร็วในการพิมพ์	60
ความหนาผนัง	1
อุณหภูมิหัวฉีด	สำหรับวัสดุ PLA = 200°C / สำหรับวัสดุ ABS = 260°C
อุณหภูมิฐานพิมพ์	สำหรับวัสดุ PLA = 60°C / สำหรับวัสดุ ABS = 90°C
อัตราการไหล	100%
ความหนาแน่น	20%
โครงสร้างภายใน	Grid

1.3.5 วิธีการออกแบบการทดลองคือวิธีส่วนประสมกลาง (Central Copositive Design) โดยใช้รูปแบบของ Face Central หรือ CCF ซึ่งจะมีค่า α เท่ากับ 1 เนื่องจากผู้วิจัยได้มีใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธี 2^k และผลลัพธ์ค่า Curvature หรือค่าที่แสดงค่าผลตอบสนองมีแนวโน้มลักษณะเป็นเส้นโค้ง พบว่ามีค่านัยสำคัญทางสถิติต่อค่าความคลาดเคลื่อนขนาดชั้นส่วน ดังนั้นจึงใช้วิธีการออกแบบเป็น CCD โดยใช้รูปแบบ CCF เนื่องจากสามารถใช้ข้อมูลเดิมวิเคราะห์ทางสถิติได้ และสามารถจำกัดระดับของพารามิเตอร์ให้อยู่ในขีดจำกัดที่กำหนด (Montgomery, 2019)

1.3.6 ไม่มีการสร้างซัพพอร์ตรองรับชิ้นส่วนในกระบวนการพิมพ์ เนื่องจากลักษณะของชิ้นส่วนไม่จำเป็นต้องมีซัพพอร์ตในการรองรับ และช่วยลดการเสียเนื้อของวัสดุในขณะที่ทำการแยกวัสดุซัพพอร์ตออกจากชิ้นส่วน

1.3.7 การยึดเกาะชิ้นส่วนกับโต๊ะขึ้นรูปในกระบวนการพิมพ์สามมิติ ความร้อนของโต๊ะขึ้นรูปถูกใช้ในการยึดเกาะชิ้นส่วนแทนการใช้กาว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงผลกระทบที่สำคัญของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วน

1.4.2 ได้รับการตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์ เพื่อสร้างชิ้นส่วนให้มีขนาดอยู่ในค่าพิสัยที่กำหนด

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 จัดเตรียมการทดลองสำหรับวัสดุ PLA
- 1.5.3 ออกแบบการทดลองแบบ (CCD) และเก็บข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุ PLA
- 1.5.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ PLA
- 1.5.5 การตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ PLA
- 1.5.6 จัดเตรียมการทดลองสำหรับวัสดุ ABS
- 1.5.7 ออกแบบการทดลองแบบ (CCD) และเก็บข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุ ABS
- 1.5.8 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ ABS
- 1.5.9 การตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ ABS
- 1.5.10 วนสอบของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ ABS



บทที่ 2

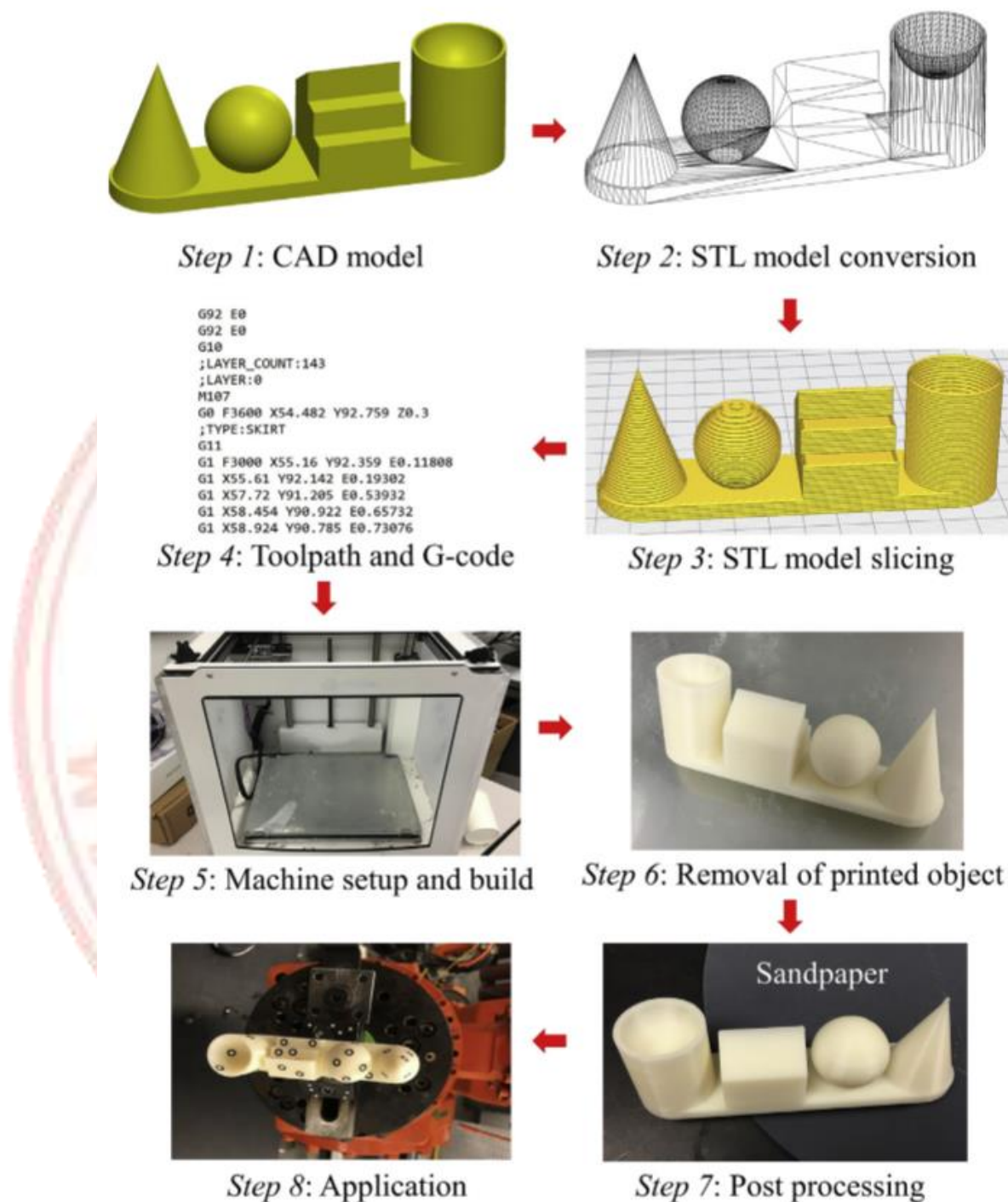
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้นำมาใช้กับงานวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 2.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM)
- 2.2 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติ
- 2.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)
- 2.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM)

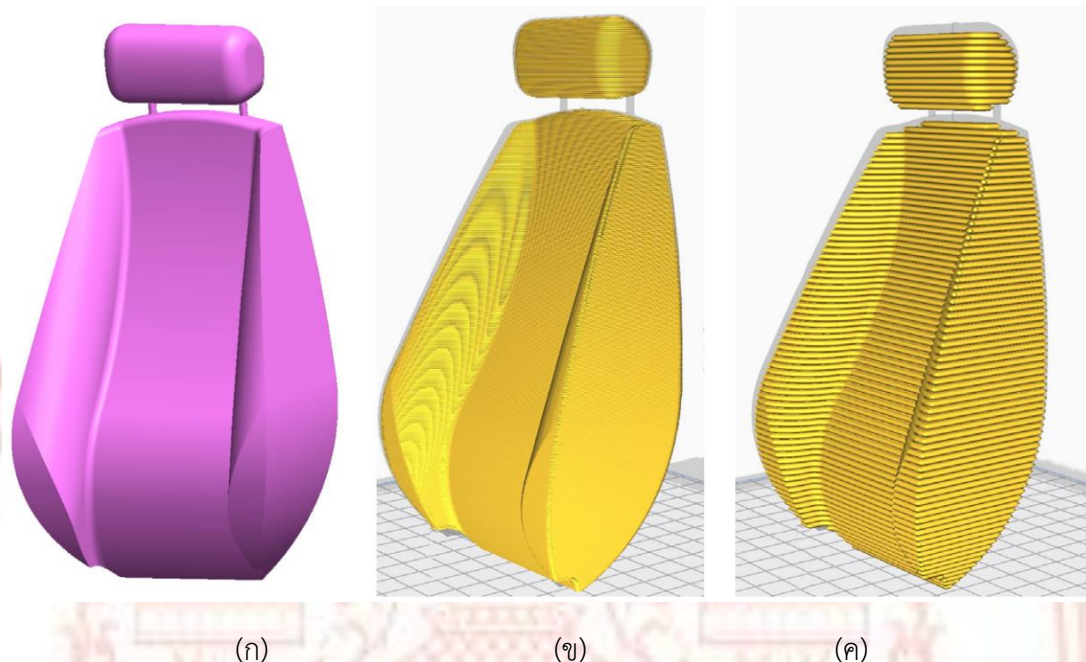
Xinchang Zhang (2021) ได้กล่าวว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ หรือที่เรียกกันว่าการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างวัตถุสามมิติจากโมเดลสามมิติ (Computer-Aided Design, CAD) โดยการเพิ่มวัสดุพลาสติกลงบนฐานพิมพ์ทีละชั้น (Layer-By-Layer) จนเกิดเป็นวัตถุสามมิติ ซึ่งกระบวนการนี้มีต้นกำเนิดเมื่อปี 1980 โดย Hideo Kodama จากสถาบันงานวิจัยนาโกยา ได้สาธิตการสร้างวัตถุของแข็ง และต่อมา Ciraud เป็นคนแรกที่ได้แนะนำการใช้ผงวัสดุในการขึ้นรูปโดยใช้การอบ ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนากระบวนการนี้อย่างรวดเร็ว และได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างหลากหลาย กระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุแตกต่างจากกระบวนการผลิตแบบทั่วไป เช่น การตัดเฉือน การกัด การกลึง การหล่อ และการตี เป็นต้น ซึ่งต้องมีการตัดเนื้อวัสดุออกจากก้อนวัสดุหรือฉีควัสดุลงในแม่พิมพ์ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จำเป็นต้องมีการเตรียมการที่ซับซ้อน เช่น การตัดเฉือนด้วยคอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข (CNC) ซึ่งต้องมีการเลือกเครื่องมือที่เหมาะสมในการตัดเฉือน เพื่อให้รูปร่างที่ต้องการ และต้องมีความละเอียดในการตั้งค่าการเดินเครื่องเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการชนระหว่างการทำงาน ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (AM) ซึ่งไม่ต้องเตรียมการที่ซับซ้อน และไม่ต้องมีเครื่องมือเพิ่มเติมในการผลิต ช่วยให้การสึกหรอของเครื่องมือที่ใช้ลดลง นอกจากนี้กระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุยังมีความยืดหยุ่นในการออกแบบชิ้นส่วนได้อย่างอิสระ สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยหลักการทำงานด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (AM) ซึ่งมีขั้นตอนในการผลิตดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 ขั้นตอนการผลิตด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (Xinchang Zhang, 2021)

จากภาพที่ 2-1 ขั้นตอนแรกคือการสร้างโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรมขึ้นรูปที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน เช่น Solid Works และ AutoCAD เป็นต้น จากนั้นทำการแปลงไฟล์ที่สร้างเป็นนามสกุลไฟล์ STL (standard tessellation language) ซึ่งสามารถกำหนดความละเอียดของชิ้นส่วนที่ต้องการได้จากการตั้งค่าการเซฟไฟล์ ต่อมาเป็นการสร้าง G-Code สำหรับการพิมพ์ชิ้นส่วน โดยสามารถสร้างได้จาก

โปรแกรมของเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการสร้าง ซึ่งขั้นตอนนี้มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นขั้นตอนการกำหนดความละเอียดของชิ้นส่วน จากการกำหนดพารามิเตอร์ดังภาพที่ 2-2 คือตัวอย่างการกำหนดความละเอียด และความหนาของชิ้นส่วน



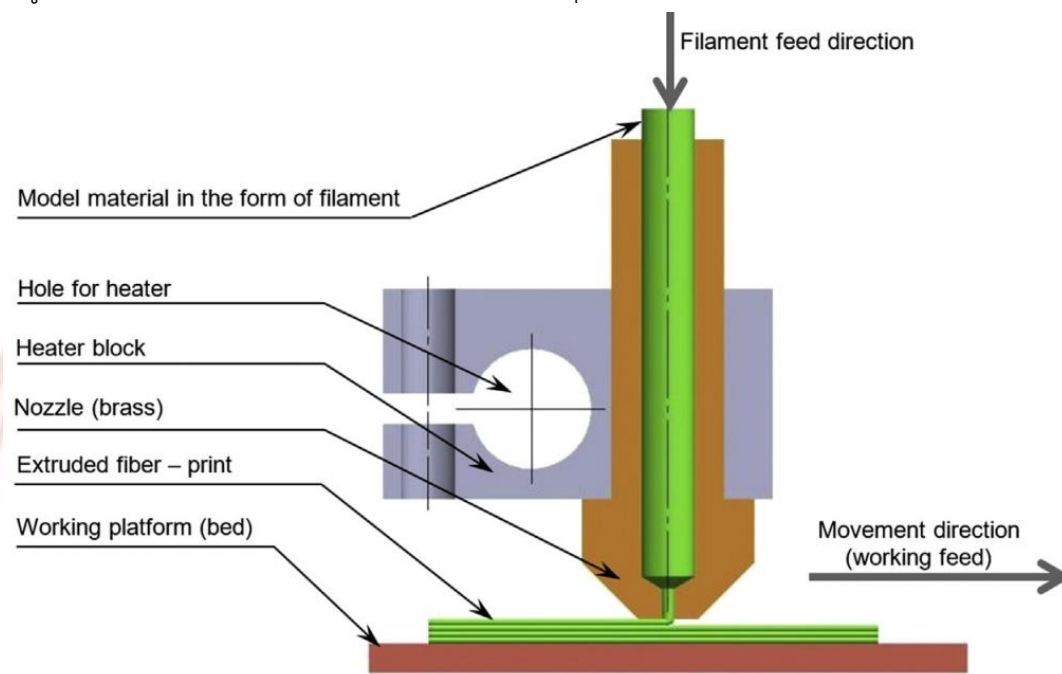
ภาพที่ 2-2 ตัวอย่าง CAD model (ก) CAD model ของเบาะรถยนต์ (ข) CAD model ที่มีความละเอียดผิวสูง (ค) CAD model ที่มีความละเอียดผิวต่ำ (Xinchang Zhang, 2021)

หลังจากสร้าง G-Code สำหรับพิมพ์ ต่อมาคือการนำ G-Code ส่งเครื่องพิมพ์ทำการสร้างชิ้นส่วนตามที่ต้องการ จนถึงขั้นตอนสุดท้ายจะได้ชิ้นส่วนสามมิติที่เสร็จสมบูรณ์ ในปัจจุบันมีการพัฒนากระบวนการพิมพ์อย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วน ให้มีความแม่นยำมากขึ้น ได้แก่ กระบวนการพิมพ์แบบฉายรังสียูวี (Stereolithography, SLA) กระบวนการพิมพ์แบบละลายวัสดุด้วยเลเซอร์ (Selective Laser sintering, SLS) และกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.1.1 กระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM)

Przemysław Sieminski (2021) ได้กล่าวว่ากระบวนการแบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling) หรือที่เรียกกันย่อ ๆ ว่า FDM เป็นหนึ่งในกระบวนการขึ้นรูปแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) โดยนำวัสดุเพิ่มทีละชั้นต่อชั้นจนเกิดเป็นวัตถุสามมิติ โดยหลักการของกระบวนการนี้คือ การทำความร้อนที่หัวฉีดที่อุณหภูมิตามประเภทของวัสดุพลาสติกที่ใช้ เช่น ABS และ PLA เพื่อหลอมละลายวัสดุที่เป็นเส้นใยพลาสติก ดังภาพที่ 2-3 เป็นการแสดงลักษณะการทำงาน ซึ่งเส้นใยพลาสติกจะถูกป้อนจากด้านบนผ่านหัวฉีด และฉีดลงบนฐานขึ้นรูปที่มีการทำความร้อนที่เหมาะสม ในระบบการเคลื่อนที่จะมีมอเตอร์ที่เน้นการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงทั้ง 2 แกนใน

ทิศทางแนวแกน X และ Y ส่วนโตะขึ้นรูปจะเคลื่อนในแนวตั้งทิศทางแนวแกน Z เมื่อฉีดเนื้อวัสดุลงบนโตะขึ้นรูปชั้นแรกเสร็จสิ้น หัวฉีดจะเคลื่อนที่ลงตามความหนาของชั้นที่มีการกำหนด และทำการฉีดขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องในลักษณะเดียวกันจนเกิดเป็นวัตถุสามมิติ



ภาพที่ 2-3 การแสดงแผนผังของกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Przemysław Sieminski, 2021)

ในกรณีที่ชิ้นส่วนมีรูปร่างซับซ้อน วัสดุซัพพอร์ตจะถูกใช้เพื่อรองรับส่วนโครงสร้างที่ยื่นออกมา ในระหว่างกระบวนการ วัสดุซัพพอร์ตช่วยในการรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างของชิ้นส่วนจนกว่าจะมีความแข็งแรงก่อนที่วัสดุซัพพอร์ตจะถูกเอาออกโดยการแกะออก หรือทำการละลายโดยใช้ตัวทำละลายเหมาะสมกับวัสดุ ดังแสดงภาพที่ 2-4 แต่ข้อเสียของการใช้วัสดุซัพพอร์ต คือในขั้นตอนการนำวัสดุซัพพอร์ตออกจากตัวชิ้นส่วน อาจเกิดการดึงเนื้อวัสดุที่เป็นชิ้นส่วน ทำให้ชิ้นส่วนอาจมีการเสียรูปได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาลักษณะของชิ้นส่วนที่พิมพ์ก่อนทำการขึ้นรูป เพื่อลดการใช้วัสดุซัพพอร์ตที่ไม่จำเป็น



ภาพที่ 2-4 ลักษณะชิ้นส่วนที่ถูกพิมพ์ด้วยกระบวนการ และวัสดุรองรับส่วนโครงสร้าง
(Przemysław Sieminski, 2021)

2.1.2 ตัวแปรพารามิเตอร์ของกระบวนการแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM)

Arup Dey (2019) ได้กล่าวว่าในการพิมพ์ชิ้นส่วนสามมิติให้มีคุณภาพ นักวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปทางด้านวัสดุผสมที่ช่วยให้คุณภาพของชิ้นส่วนดีขึ้น แต่ก็ต้องมีการใช้ต้นทุนในการผลิตวัสดุใหม่สูง และต้องมีเครื่องมือเฉพาะในการวิจัย ดังนั้นบางงานวิจัยจึงเลือกศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์กระบวนการที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นส่วน โดยพิจารณาจากการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของชิ้นส่วนที่ต้องการ แต่การปรับพารามิเตอร์มีความซับซ้อนอย่างมาก เนื่องจากมีพารามิเตอร์จำนวนมากที่ส่งผลต่อคุณสมบัติชิ้นส่วนที่แตกต่างกัน นั่นจึงเป็นสิ่งที่ทำให้การปรับพารามิเตอร์เป็นเรื่องที่ยากอย่างมาก ดังนั้นจึงอธิบายพารามิเตอร์หลัก ๆ ที่ส่งผลอย่างต่อคุณภาพของชิ้นส่วนดังต่อไปนี้

2.1.2.1 ช่องว่างภายใน (Air gap) คือช่องว่างระหว่างแรสเตอร์สองตัวที่อยู่กันบนชั้นเลเยอร์ และเมื่อแรสเตอร์สองตัว มีการทับซ้อนกันจะมีค่าเป็นลบ

2.1.2.2 ทิศทางการวางชิ้นส่วน (Build orientation) คือการกำหนดแนวในการวางชิ้นส่วนตามแนวแกน x Y และ Z เพื่อให้เครื่องพิมพ์สร้างชิ้นส่วนตามที่เรากำหนดดังแสดงภาพที่ 2-5

2.1.2.3 อุณหภูมิหัวฉีด (Extrusion temperature) คือการกำหนดอุณหภูมิเพื่อให้เส้นใยพลาสติกหลอมละลาย ในการกำหนดขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ด้วย

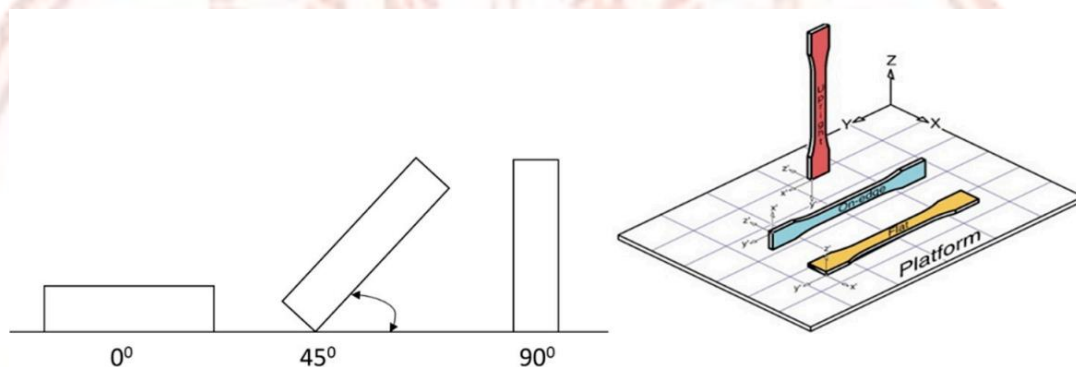
2.1.2.4 ความหนาแน่นภายใน (Infill density) คือการกำหนดปริมาณพื้นที่ด้านในของชิ้นส่วน ซึ่งความแข็งแรง และน้ำหนักของชิ้นส่วนขึ้นอยู่กับความหนาแน่น

2.1.2.5 โครงสร้างภายใน (Infill pattern) คือโครงสร้างด้านในชั้นส่วนที่สร้างขึ้นเพื่อลดปริมาณของวัสดุ แต่ยังสามารถขึ้นรูปชิ้นส่วนได้ ซึ่งโครงสร้างภายในมีหลายแบบดังแสดงภาพที่ 2-6 เช่น Hexagonal, diamond และ linear เป็นต้น

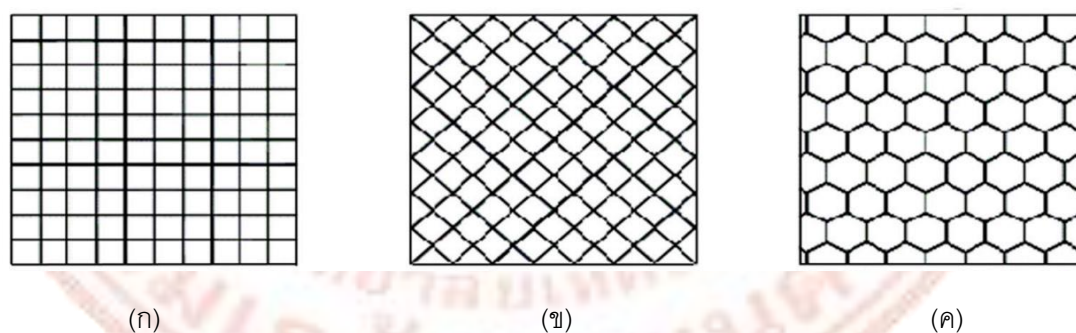
2.1.2.6 ความหนาชั้น (Layer thickness) คือความหนาของชั้นเลเยอร์ในแนวแกน Z และความหนาชั้นส่งผลต่อความหยابของผิว และเวลาในการพิมพ์ชิ้นส่วน

2.1.2.7 ความเร็วของหัวฉีด (Print speed) คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวฉีด ในขณะที่พิมพ์ชิ้นส่วน โดยเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ Y

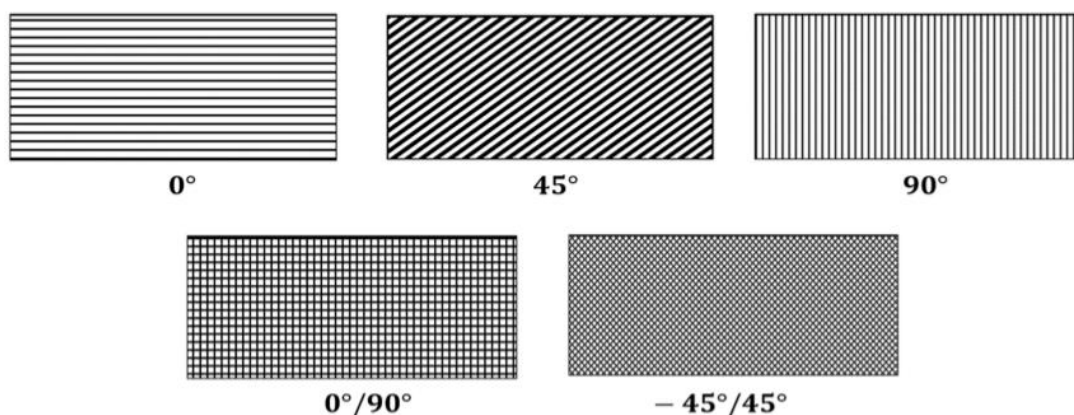
2.1.2.8 ทิศทางของโครงสร้างภายใน (Raster orientation) คือทิศทางของโครงสร้างภายในระนาบแกน X ดังแสดงภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-5 แสดงลักษณะทิศทางการวางชิ้นส่วน (Arup Dey, 2019)



ภาพที่ 2-6 โครงสร้างภายใน (ก) แบบ linear (ข) แบบ diamond (ค) แบบ Hexagonal (Arup Dey, 2019)



ภาพที่ 2-7 ลักษณะของทิศทางของโครงสร้างภายใน (Raster orientation) (Arup Dey, 2019)

2.1.3 การพิจารณาคุณสมบัติของชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (FDM)

ชิ้นส่วนที่ผลิตโดยใช้กระบวนการแบบ FDM คุณสมบัติของชิ้นส่วนที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ความแข็งแรงของบางประเภท เช่น ความต้านทานแรงดึง แรงดัดงอ หรือแรงกระแทก และความแม่นยำของขนาด ตลอดจนด้านทางเศรษฐกิจ เช่น เวลาในการผลิต และวัสดุที่ใช้ ซึ่งสามารถกำหนดโดยพารามิเตอร์ที่กล่าวถึงข้างต้น ส่งผลได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม คุณสมบัติที่น่าพิจารณาจะแสดงดังต่อไปนี้

2.1.3.1 ความแม่นยำของขนาด (Dimensional Accuracy) เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญอย่างมากในการนำไปใช้งาน หรือใช้ในระบบกลไกที่มีการประกอบกันหลายชิ้น ซึ่งมีความจำเป็นหลาย ๆ งานวิจัยมีการศึกษาแล้วพบว่าหาต้องการชิ้นส่วนที่มีความแม่นยำมาก ต้องปรับความหนาชั้นให้น้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยกระบวนการนี้มีขนาดเล็กกว่าแบบที่กำหนด เนื่องจากการหดตัวของความร้อน

2.1.3.2 ความหยาบของผิว (Surface Roughness) เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญในเรื่องของความสวยงาม และช่วยในเรื่องของความแม่นยำในการสัมผัสกันระหว่างผิวสองชิ้นส่วน ซึ่งลักษณะผิวที่เกิดขึ้นเมื่อขึ้นรูปชิ้นส่วนด้วยกระบวนการนี้ จะมีลักษณะเป็นร่องฟันปลา หรือมีลักษณะเป็นบันไดเมื่อชิ้นส่วนมี การเอียง ซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปชิ้นส่วนเป็นชั้น จากสรุปงานวิจัยพบว่าความหนาชั้นช่วยให้ผิวชิ้นส่วนมีความละเอียดมากขึ้น นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิของหัวฉีดและความเร็วในการพิมพ์ส่งผลต่อความหยาบของผิวชิ้นส่วนอีกด้วย

2.1.3.3 คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญในเรื่องของความแข็งแรงของชิ้นส่วน เป็นสิ่งที่กำหนดว่าชิ้นส่วนสามารถนำมาใช้งานจริงได้หรือไม่ มีการ

ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลหลายแบบ เช่นการทดสอบแรงดึง แรงอัด และแรงดัดงอ โดยความหนาแน่นภายใน และโครงสร้างภายในส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลโดยตรง

2.2 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติ

วัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) เป็นวัสดุพลาสติกซึ่งในปัจจุบันมีวัสดุจำนวนมากที่สามารถใช้กับกระบวนการพิมพ์สามมิติ ได้แก่ วัสดุพอลิแลคติกแอซิด (PLA), วัสดุอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS), วัสดุโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (PETG) และวัสดุพอลิเอไมด์ (PA) เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะมีคุณสมบัติ ราคา และประสิทธิภาพการใช้งานของชิ้นส่วนที่แตกต่างกัน วัสดุแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติ

Material	Platform Temperature (°C)	Print Temperature (°C)
PLA	60	210
ABS	100 – 110	240
Nylon 618	115	240
High-Impact Polystyrene	90 – 100	240
Polyethylene terephthalate	80	210 – 250
Polycarbonate	90 - 100	270

วัสดุทั่วไปที่นิยมใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 วัสดุหลักคือ วัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) และ วัสดุอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) ดังต่อไปนี้

2.2.1 วัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA)

Tomy Muringayil Joseph, Anoop Kallingal และ Akshay Maniyeri Suresh (2022) วัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า PLA เป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สูงขึ้นจากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น แป้ง ข้าวโพด และอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันนี้ได้รับความสนใจให้เป็นวัสดุทดแทนแทนการใช้วัสดุที่สร้างขึ้นด้วยปิโตรเลียมแบบดั้งเดิม วัสดุสามารถกำหนดคุณสมบัติทางกลได้ ตั้งแต่เป็นวัสดุที่อ่อนนุ่มและยืดหยุ่นไม่จนถึงวัสดุที่แข็งและมีความแข็งแรงสูง ได้จากการผสมวัสดุอื่น ๆ ที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติแข็งแรงขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้กับงานบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ แทนการใช้วัสดุในปัจจุบัน ซึ่งคุณสมบัติของ PLA แบบไม่มีส่วนผสม และอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติ จะแสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติของวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) (Tomy Muringayil, 2022)

Properties	Values	Units
Density	1.25	g/cm ³
Feed rate	2.247-2.67	m/sec
Flexural modulus	345-450	MPa
Fracture elongation	10-100	%
Glass transition temperature	54-56	°C
Melting point	120-170	°C
Rockwell hardness	88	-
Shear modulus	2.4	GPa
Specific heat	1800	J/Kg °k
Tensile modulus	3.5	GPa
Tensile strength	52	MPa
Thermal conductivity	0.13	W/M°k
Thermal diffusivity	0.056	m ² /sec
Viscosity	0.265-0.467	M Ps-s

วัสดุชนิดนี้นิยมใช้กันอย่างมาก สำหรับการพิมพ์สามมิติ เนื่องจากมีราคาที่ถูก และมีการหดตัวของน้อยมากอยู่ที่ 0.3-0.5 %

2.2.2 วัสดุอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)

M. Samykano (2019) ได้กล่าวว่าวัสดุอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า ABS เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกที่สร้างขึ้นโดยการทำปฏิกิริยาจากโมโนเมอร์ทั้งหมด 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วยอะครีโลไนไตรล์ประมาณ 15-30 % โพลิบิวทาไดอีนประมาณ 5-30% และสไตรีนประมาณ 45-75% ซึ่งส่วนประกอบทั้ง 3 นั้นจะส่งผลต่อพลาสติกที่ผลิตออกมา โดยสไตรีนทำให้พลาสติกมันเงา สวยงาม ตัดแต่งรูปได้ง่าย, อะครีโลไนไตรล์ทำให้พลาสติกทนความร้อนและสารเคมี สุดท้ายโพลิบิวทาไดอีนทำให้เนื้อพลาสติกทนต่อแรงกระแทก ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่สำคัญของวัสดุนี้คือ ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ทนอุณหภูมิได้ดี ขึ้นรูปขึ้นส่วนได้ง่าย แต่ข้อเสียของวัสดุนี้คือ เสียรูปได้ง่ายเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง และเย็นตัวช้า หากขึ้นรูปแล้วทำให้อุณหภูมิลดลงเร็วเกินไปอาจทำให้ชิ้นส่วนหดตัวลงและเกิดการเสียรูปได้ โดยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (M. Samykano, 2019)

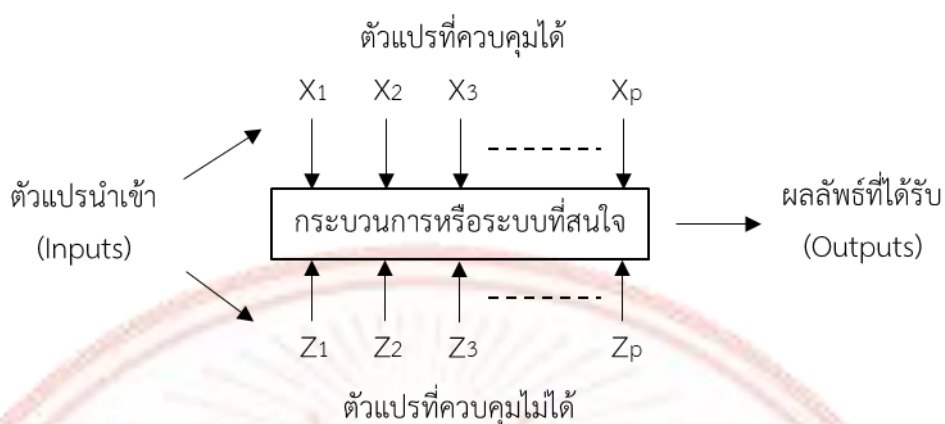
ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (M. Samykano, 2019)

Properties	Value
Density [g/cm ³]	1.05
Linear Mold Shrinkage [cm/cm]	0.0064
Melt Flow [g/10 min]	9.3
Hardness	110
Tensile Modulus [GPa]	2.4
Specific Heat [J/g-K]	2.0
Thermal Conductivity [W/m-K]	0.15
Thermal Diffusivity [10 ⁻³ cm ² /s]	1.4
Glass Temperature [°C]	110
Processing Temperature [°C]	240
Surface Tension [dyne/cm]	30

วัสดุชนิดนี้นิยมใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนสามมิติอย่างมาก เนื่องจากมีราคาที่ถูก ขึ้นรูปได้ง่าย มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี มีความต้านทานต่ออุณหภูมิที่สูง แต่ข้อเสียคือมีการหดตัวของค่อนข้างมากอยู่ที่ 0.5-1.5% (ประสงค์ ก้านแก้ว, 2561)

2.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

Bradley Jones และ Douglas C. Montgomery (2019) ได้กล่าวว่าการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) มีความสำคัญในการช่วยในคุณภาพในด้านต่าง ๆ นั้นดียิ่งขึ้น และยังผลักดันให้กลุ่มผู้ผลิตต่าง ๆ มีความสามารถในการแข่งขันทางการค้าในระดับสากลได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งการออกแบบการทดลองคือ การทดลองแบบครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปร (Input Variables) ในกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อให้สามารถอธิบายสาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ต้องการได้ (Output or Response) โดยตัวแปรเหล่านั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factor) หรือตัวแปรที่ออกแบบได้ (Design Variables or Factor) และตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable or Noise Variables) ดังแสดงภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการที่สนใจ

โดยหลักแล้วตัวแปรที่ควบคุมและตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ มักขึ้นอยู่กับกระบวนการที่สนใจ ตัวอย่างเช่น ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ มักเกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมทั่วไปในธรรมชาติ ได้แก่ ลม อุณหภูมิภายนอก ความชื้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้เรียกว่าตัวแปรรบกวน (Noise Variables) ตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่ยากในการควบคุม เนื่องจากในการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้เช่น วัสดุที่ใช้ เครื่องจักร อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ เป็นต้น โดยทุกกระบวนการสามารถกำหนดเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ผล ซึ่งสามารถสรุปในการออกแบบการทดลองดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง

ดังนั้นในการออกแบบการทดลองจึงเป็นส่วนที่สำคัญอย่างมากสำหรับกระบวนการในด้านการกำหนดพารามิเตอร์ หรือการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการ เช่นกระบวนการผลิตน้ำอัดลม ในการกำหนดส่วนผสมเพื่อให้ได้รสชาติที่เหมาะสม หรือการกำหนดความเร็วของสายพาน เพื่อลดการสูญเสียในขณะบรรจุให้น้อยที่สุด เป็นต้น ในทางวิศวกรรมจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า การออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter Design) ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองนั้นมีหลายวิธีในการออกแบบ แต่ละวิธีจะมีวิธีการออกแบบในลักษณะที่แตกต่างกันในด้านคุณภาพ หรือปริมาณของผลลัพธ์ที่สนใจ ได้แก่ การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (2k Factorial Design) การออกแบบการทดลองทางทากูชิ (Taguchi Design) และวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เป็นต้น

2.3.1 วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

Angela Dean, Daniel Voss และ Danel Draguljić (2017) วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า RSM เป็นการรวบรวมเทคนิคทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลอง เพื่อวิเคราะห์ปัญหาค่าตอบสนองที่ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรหลายตัว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้ค่าตอบสนองมีค่าที่เหมาะสม เช่น y คือ

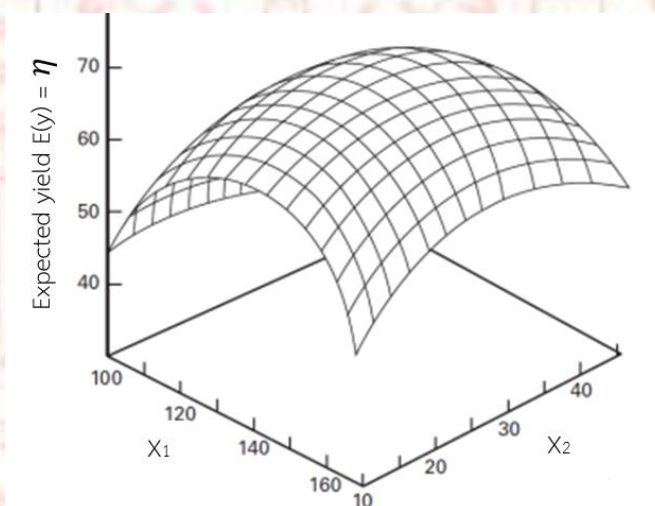
ค่าตอบสนอง (Response) ที่ต้องการ และปัจจัยที่ต้องการพิจารณาคือ X_1 และ X_2 ดังนั้นจึงเขียนในรูปของสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองกับปัจจัย ดังสมการที่ 2-1

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2-1)$$

โดย ε คือค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ส่งผลต่อค่าผลตอบสนอง y ถ้าแสดงถึงความคาดหวังการตอบสนองโดย $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ดังสมการที่ 2-2

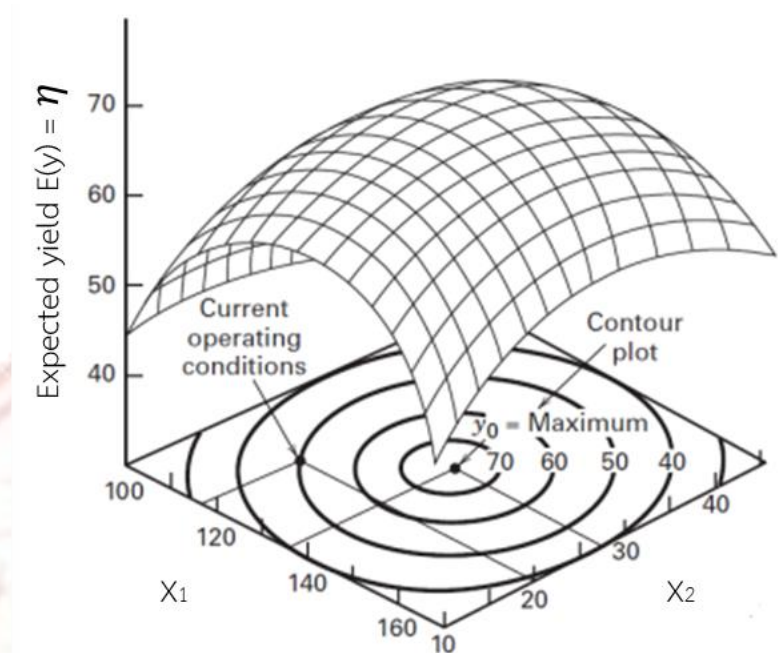
$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2-2)$$

จากภาพที่ 2-10 เป็นการแสดงลักษณะของกราฟพื้นผิวตอบสนอง โดยในกระบวนการมีปัจจัย 2 ปัจจัยที่ถูกพล็อตกราฟในแนวนอน X และ Y ด้วยระดับของแต่ละปัจจัย และค่าตอบสนองจะถูกแสดงเป็นลักษณะพื้นผิวที่อยู่เหนือกราฟของระดับปัจจัยเพื่อช่วยให้เห็นภาพรูปร่างของพื้นผิวตอบสนอง



ภาพที่ 2-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองและปัจจัยแบบพื้นผิวตอบสนอง

ภาพที่ 2-11 เป็นการแสดงลักษณะของกราฟเส้นระดับ (Contour) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยเส้นระดับที่มีค่าตอบสนองจะพล็อตลงในระนาบของปัจจัยทั้ง X_1 และ X_2 โดยจะสอดคล้องกับความสูงของพื้นผิวและกำหนดสี่ระดับช่วงในแตกต่างกัน



ภาพที่ 2-11 ลักษณะกราฟ Contour Plot

ส่วนใหญ่ปัญหาหลักของวิธีพื้นผิวตอบสนองคือ การไม่ทราบถึงรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองและปัจจัย ดังนั้นขั้นตอนแรกคือการค้นหาความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันระหว่างค่าตอบสนอง และปัจจัย โดยปกติแล้วจะใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 1 (first-order model) ดังสมการที่ 2-3

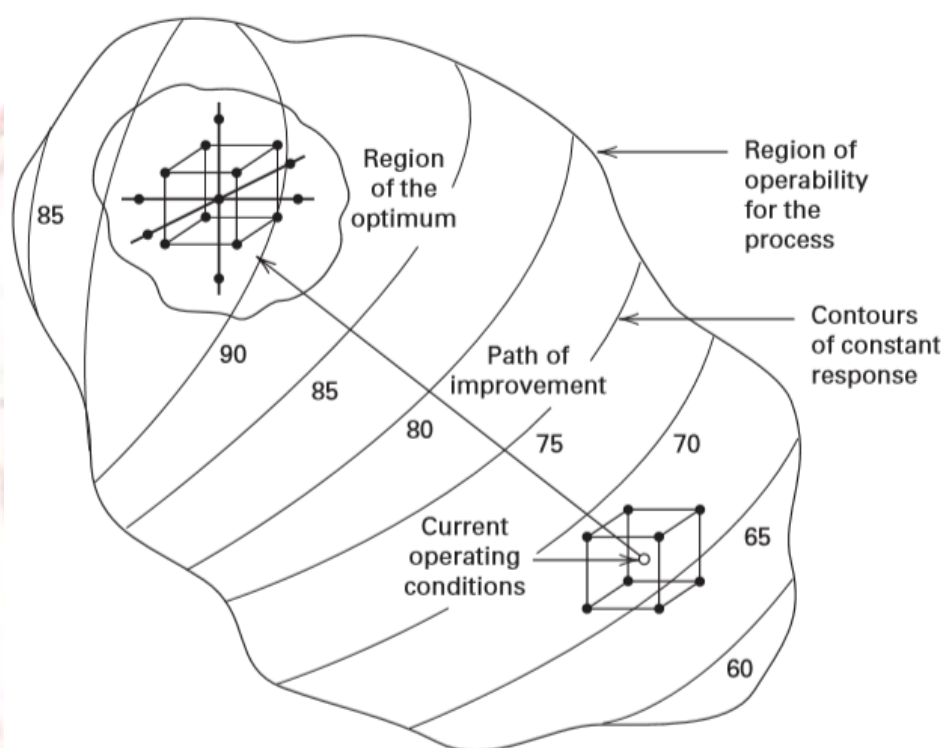
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (2-3)$$

โดยที่ y คือตัวแปรตามที่น่าสนใจ, x คือตัวแปรอิสระ, β_0 คือค่าคงที่, β_1 คือค่าสัมประสิทธิ์ของ x และ ε คือค่าความผิดพลาด หากกรณีพื้นผิวมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง (Curvature) เกี่ยวข้องในระบบจะใช้รูปแบบสมการลำดับที่ 2 (second-order model) ดังสมการที่ 2-4 ค่าสัมประสิทธิ์ของ x

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (2-4)$$

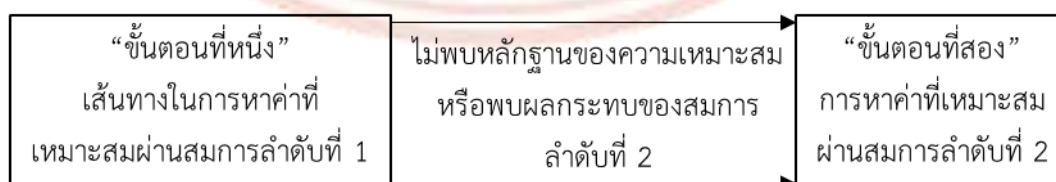
โดยมีสัมประสิทธิ์ของรูปแบบของสมการลำดับที่ 2 เป็นโมเดลที่แสดงรูปแบบสมการถดถอย (Regression model) ใช้ในการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (independent variables) และตัวแปรตาม (dependent variable) ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) แสดงลักษณะเป็นกราฟ Main Effect, Quadratic Terms และ Interaction Terms และวิธีพื้นผิวตอบสนองผลตอบสนองเป็นขั้นตอนเป็นลำดับ (Sequential procedure) ซึ่งก็คือจากปกติการทำงานในสภาพปัจจุบันเป็นจุดที่อยู่ห่างจากจุดที่มีความเหมาะสมในพื้นที่ผิวตอบสนอง เพื่อให้มีการเคลื่อนเข้าใกล้จุดที่เหมาะสมอย่างรวดเร็ว สามารถใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 1 ในการประมาณค่าก่อน และใช้รูปแบบสมการลำดับที่ 2 เพื่อให้เข้าใกล้บริเวณที่

เหมาะสมที่สุดของพื้นผิว ดังรูปภาพที่ 2-12 จะเห็นว่าการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองนั้นคือการไต่ขึ้นไปสู่จุดสูงสุดของเนินเขาแสดงถึงจุดตอบสนองสูงสุด แต่ถ้าค่าตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดคือค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดเป็นการแสดงถึงการลงไปสู่หุบเขา ดังนั้นจุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองก็คือการหาปัจจัยที่ดีที่สุด สำหรับค่าตอบสนองที่ดีที่สุด หรือเพื่อที่จะหาระดับของปัจจัยที่จะทำให้ค่าตอบสนองให้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ



ภาพที่ 2-12 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง (Sequential Procedure)

โดยปกติแล้วผลทุกค่าไม่จำเป็นต้องใช้สมการลำดับที่ 2 ในการหาคำตอบ ซึ่งปกติจะถูกใช้เพื่อหาคำตอบเมื่อขั้นตอนถูกหยุดในกรณีที่ไม่สามารถปรับปรุงค่าผลตอบสนองได้อีก โดยแสดงรูปแบบการหาค่าที่เหมาะสมทั้งสองส่วนดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 แสดงขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสม

ซึ่งวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) แบ่งวิธีการออกแบบการทดลองหลัก ๆ สองวิธีได้แก่

2.3.1.1 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) Sarwar Beg และ Ziyaur Rahman (2021) ได้กล่าวว่าวิธีนี้เป็นการทดลองตั้งแต่ 3 ปัจจัย ถึง 10 ปัจจัย ด้วยระดับการทดลอง 3 - 5 ระดับ ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ $(+\alpha, +1, 0, -1, -\alpha)$ กล่าวคือ จะปรับตัวแปรที่ต้องการพิจารณาตัวแปรละ 3 ค่า แต่จะมีการปรับปัจจัยแบบผสมผสาน (Full Combination) หรือ Full Factorial $2k$ โดยเลือกจำนวนการทดลองเพียงบางตัว หรือการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือเหมาะในการศึกษาสมการลำดับที่ 2 (Second Order Model) กรณีใช้ศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ มีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากมีค่าให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า โดยวิธีสามารถแยกทดลองเป็นส่วน ๆ ได้ตามลำดับ คือ การทำการทดลองส่วนของ $2k$ Factorial เพื่อออกแบบการทดลองส่วน Factorial Point และจุดศูนย์กลาง (Center Point) ก่อน จากนั้นสร้างสมการเชิงเส้นตรงสำหรับปัจจัยที่มี 2 ระดับ ถ้าสมการในรูปไม่อยู่ในลักษณะเชิงเส้นตรง จึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกนเส้น (Axial Point) จะได้สมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 ในรูปแบบเชิงเส้นโค้ง หรือ Quadratic Model ซึ่งสมการที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแสดงดังสมการที่ 2-5

$$CCD = 2k + 2k + \text{Center} \quad (2-5)$$

โดยที่ k คือจำนวนปัจจัย หรือพารามิเตอร์ที่ต้องการพิจารณา ซึ่งตัวอย่างการออกแบบการทดลองด้วย Central Composite Design กรณีที่มีการศึกษา 3 ปัจจัย และกำหนดค่ากลาง 1 ค่า แสดงดังตารางที่ 2-4

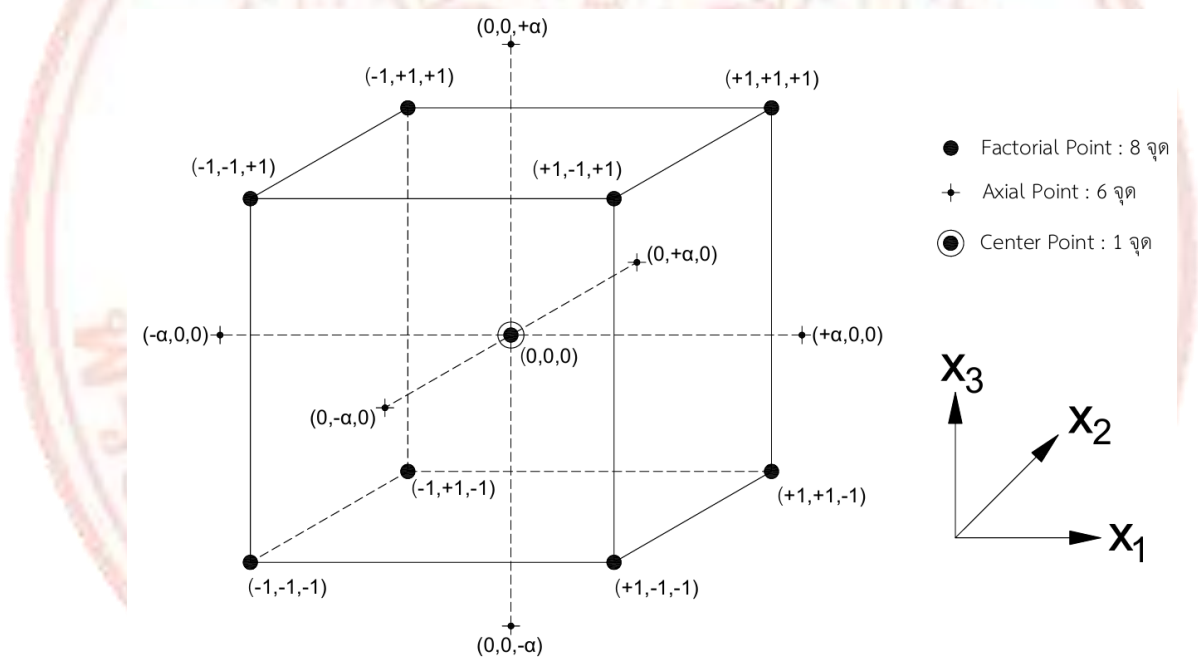
ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองด้วย CCD กรณีศึกษา 3 ปัจจัย

Run	X1	X2	X3	Point Type
1	-1	-1	-1	Factorial Point
2	-1	-1	+1	Factorial Point
3	-1	+1	-1	Factorial Point
4	-1	+1	+1	Factorial Point
5	+1	-1	-1	Factorial Point
6	+1	-1	+1	Factorial Point
7	+1	+1	-1	Factorial Point
8	+1	+1	+1	Factorial Point
9	0	0	0	Center Point
10	$+\alpha$	0	0	Axial Point
11	$-\alpha$	0	0	Axial Point

ตารางที่ 2-4 (ต่อ)

Run	X1	X2	X3	Point Type
12	0	$+\alpha$	0	Axial Point
13	0	$-\alpha$	0	Axial Point
14	0	0	$+\alpha$	Axial Point
15	0	0	$-\alpha$	Axial Point

จากผลการออกแบบการทดลองกรณีจำนวนปัจจัย $k = 3$ โดยที่แถวที่ 1 ถึง 8 เป็นส่วนของการออกแบบการทดลองโดยใช้หลักของ $2k$ factorial Design ส่วนแถวที่ 9 คือส่วนจุดศูนย์กลางของออกแบบ $(0,0,0)$ และแถวที่ 10 ถึง 15 คือจำนวนจุดในแนวแกนรูปแบบของการออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้แสดงเป็นโมเดลจำลองดังภาพที่ 2-14

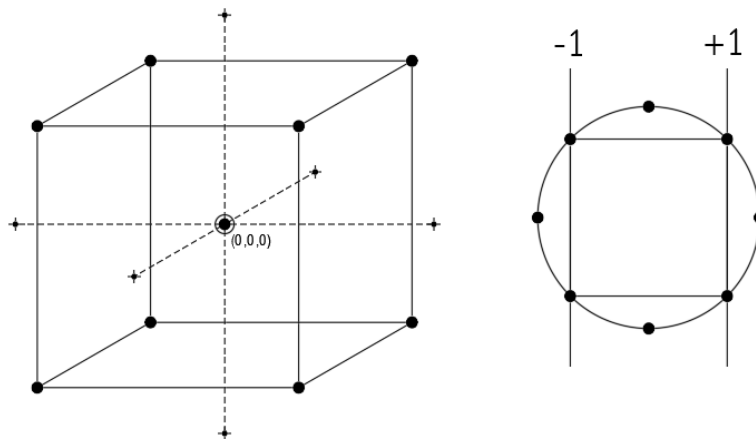


ภาพที่ 2-14 โมเดลจำลองการออกแบบการทดลอง Central composite design ในกรณี $k = 3$

ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่ Factorial Points ซึ่งจะเป็นการนำเอา Full Factorial $2k$ มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง ส่วน Axial Points เป็นการปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่เป็นค่าคงที่ และให้ค่าตัวแปรอื่นอยู่ที่ค่ากลาง หรือค่า 0 และ Center Points เป็นการปรับค่าตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง หรือค่า 0 โดยการออกแบบการทดลองด้วย CCD สามารถออกแบบได้ทั้งหมด 3 รูปแบบแสดงดังนี้

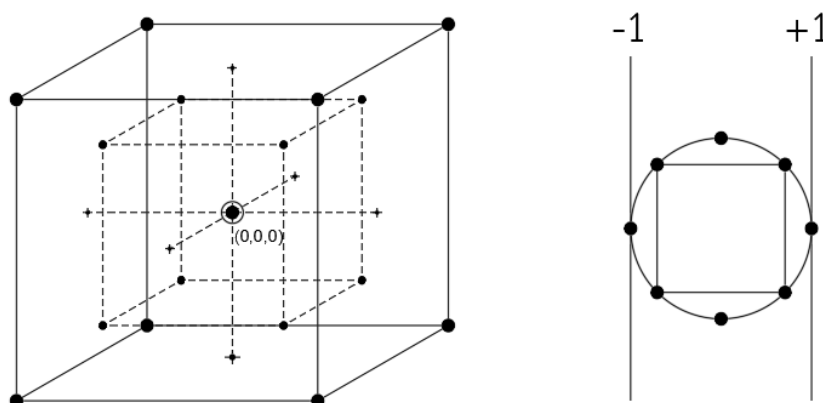
2.3.1.1.1 การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Circumscribed, CCC คือการออกแบบ CCD แบบดั้งเดิมโดยทดสอบทั้ง 5 ระดับ จุดขอบของขอบเขต หรือเรียกว่า (Factorial Point) คือ -1 และ +1 จุดนอกขอบเขตที่ห่างจากจุดศูนย์กลาง หรือ

เรียกว่า (Axial Point) คือ $-\alpha$ และ $+\alpha$ สอดคล้องจุดศูนย์กลาง (Center Point) รูปแบบของ CCC มีข้อดีคือสามารถคาดการณ์ค่าที่แม่นยำ ครอบคลุมช่วงการทดลองกว้าง รูปแบบแสดงดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-15 การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Circumscribed, CCC

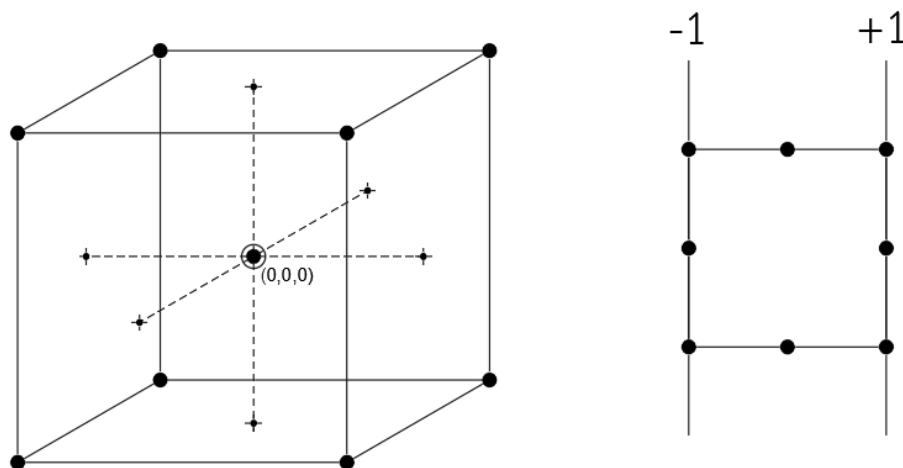
2.3.1.1.2 การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Inscribed, CCI คือการออกแบบการทดลองแบบมีขีดจำกัด หรือมีขอบเขตในการทดลองที่จำกัด มีช่วงของการทดลองที่แคบโดยทดลองทั้ง 5 ระดับเช่นเดียวกัน เพียงแต่อยู่ขอบเขตที่กำหนดไว้เท่านั้น ข้อดีของ CCI คือมีจำนวนการทดลองน้อยกว่ามีความปลอดภัยมากกว่า แต่ข้อเสียคือมีพื้นที่ในการพิจารณาที่แคบ ทำให้ความแม่นยำในการคาดการณ์ลดลง หากปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองมีลักษณะเชิงเส้นตรง สำหรับ CCI เพียงพอแล้ว และไม่เหมาะสมกับลักษณะเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Term) เนื่องจากในการทดลองสำหรับ Quadratic Term จำเป็นต้องกระจายข้อมูลกว้างเพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะโค้ง (Curvature) ได้อย่างแม่นยำ รูปแบบแสดงดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Inscribed, CCI

2.3.1.1.3 การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Face Centered, CCF มีลักษณะการออกแบบเหมือนกันกับ CCC เพียงแต่รูปแบบนี้จะมีจำกัดขอบเขต

เหมือนกับ CCI มีทดลองทั้ง 5 ระดับเช่นเดียวกัน มีความแม่นยำในการคาดการณ์น้อยกว่า CCC แต่เมื่อเทียบกับ CCI จะมีค่าที่ดีกว่า สามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะโค้ง (Curvature) ดีกว่า รูปแบบแสดงดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 การออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ Face Centered, CCF

2.3.1.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box – Behnken (Box – Behnken Design) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้สำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ ได้แก่ +1, 0, -1 ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ โดยจะใช้หลักการของ $2k$ Factorial ผสมกับจุดศูนย์กลาง (Center Point) รวมเข้ากับ Box – Behnken Design ดังสมการที่ 2-6 โดยที่ k คือจำนวนปัจจัย Box และ Behnken ซึ่งข้อดีของวิธีคือสามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบในเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor Inter-actions) ข้อเสียคือมีจำนวนการทดลองมาก และไม่สามารถลดลงได้ ไม่ว่าจะศึกษาผลกระทบเกินกว่าผลกระทบเชิงเส้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามีจำนวนมากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป

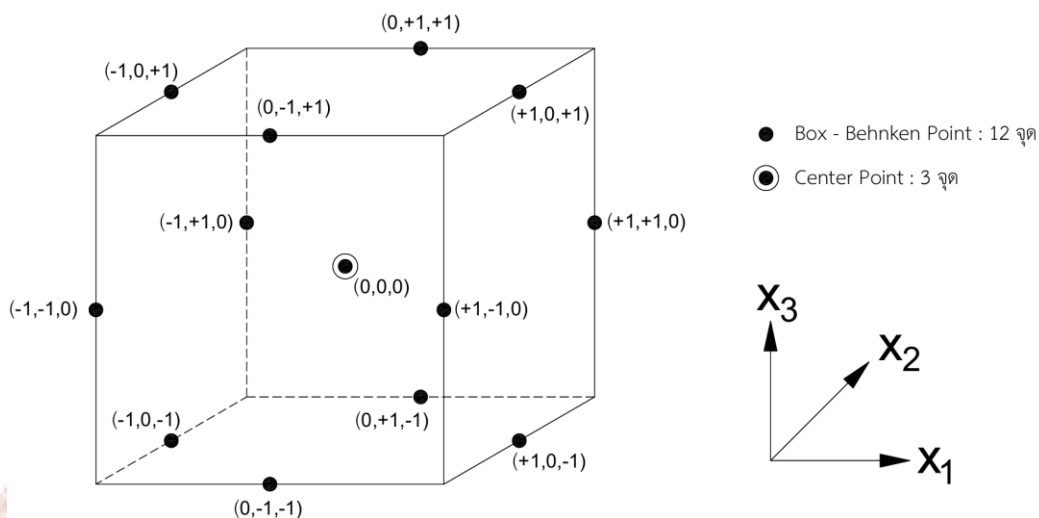
$$BBC = 2k(k-1) + C0 \quad (2-6)$$

โดยที่ k คือจำนวนปัจจัย Box และ Behnken ซึ่งข้อดีของวิธีคือสามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบในเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย (2-Factor Inter-actions) ข้อเสียคือมีจำนวนการทดลองมาก และไม่สามารถลดลงได้ ไม่ว่าจะศึกษาผลกระทบเกินกว่าผลกระทบเชิงเส้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามีจำนวนมากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งตัวอย่างการออกแบบการทดลองด้วย Central Composite Design กรณีที่มีการศึกษา 3 ปัจจัย และกำหนดค่ากลาง 1 ค่าแสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองด้วย BBD กรณีศึกษา 3 ปัจจัย

Run	X1	X2	X3
1	-1	-1	0
2	-1	+1	0
3	+1	-1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	+1
11	0	-1	-1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

จากผลการออกแบบการทดลองกรณีจำนวนปัจจัย $k = 3$ โดยที่แถวที่ 1 ถึง 2 เป็นส่วนของการออกแบบการทดลองโดยใช้หลักของ Box - Behnken ส่วนแถวที่ 13 ถึง 15 คือส่วนจุดศูนย์กลางของออกแบบ $(0,0,0)$ ทั้งหมด 3 แสดงเป็นโมเดลจำลองดังภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 โมเดลจำลองการออกแบบการทดลอง Box – Behnken Design ในกรณี $k = 3$

2.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

2.4.1 การหาค่าความเหมาะสมของข้อมูล (Model Summary) หรือค่า R-squared เป็นค่าสถิติที่ใช้วัดแบบจำลองสมการถดถอย (Regression Model) เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมของข้อมูลที่ทำกรวิเคราะห์ ออกมาเป็นค่า R^2 (Coefficient of Determination) โดยการคำนวณแสดงดังสมการที่ 2-7

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (2-7)$$

โดยที่ R^2 = ค่าระดับความเหมาะสมของข้อมูล

SS_{res} = ผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงของ Y กับค่าที่โมเดลสมการถดถอยทำนาย

SS_{tot} = ผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงของ Y กับค่าเฉลี่ยของ $\bar{Y}$

ซึ่งผลรวมของผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงของ Y กับค่าที่โมเดลสมการถดถอยทำนาย (SS_{res}) ถูกคำนวณด้วยสมการที่ 2-8 และผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงของ Y กับค่าเฉลี่ยของ $\bar{Y}$ (SS_{tot}) ถูกคำนวณด้วยสมการที่ 2-9 ตามลำดับ

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2 \quad (2-8)$$

โดยที่ Y = ค่าจริงของตัวแปรตาม

$\hat{Y}$ = ค่าที่โมเดลสมการถดถอยทำนาย

n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (2-9)$$

โดยที่	Y	=	ค่าจริงของตัวแปรตาม
	$\bar{Y}$	=	ค่าเฉลี่ยของ Y
	n	=	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง (Response หรือ y) ที่สนใจศึกษา หรือปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Output) ในการคำนวณค่าแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดได้แก่ ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-Groups Variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-Groups Variance) เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ของกลุ่ม หรือปัจจัยต่าง ๆ มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามที่มีนัยสำคัญ โดยแบ่งการส่วนของคำนวณดังต่อไปนี้

2.4.2.1 สมการคำนวณสำหรับ Degree of Freedom (df) เป็นสมการคำนวณที่ช่วยในการประเมินค่าความแปรปรวนในการวิเคราะห์ ANOVA และใช้ในการกำหนดตาราง F เพื่อใช้ทดสอบสมมติฐาน ดังสมการที่ 2-10 สมการที่ 2-11 และสมการที่ 2-12 ตามลำดับ

$$df_{\text{Between}} = k - 1 \quad (2-10)$$

$$df_{\text{within}} = N - k \quad (2-11)$$

$$df_{\text{Total}} = N - 1 \quad (2-12)$$

โดยที่	k	=	จำนวนกลุ่มของตัวแปร
	N	=	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.4.2.2 สมการสำหรับการคำนวณผลรวมทั้งหมด (Sum of Squares Total, SST) คือการนำผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงของ Y กับค่าเฉลี่ยของ $\bar{Y}$ (SS_{tot}) โดยใช้สมการที่ 2-13

$$SS_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (2-13)$$

2.4.2.3 สมการสำหรับการคำนวณผลรวมความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-Groups Variance) โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มกับค่าเฉลี่ย ดังสมการที่ 2-14

$$SS_{\text{Between}} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2 \quad (2-14)$$

โดยที่	k	=	จำนวนกลุ่มปัจจัย
	n_j	=	จำนวนข้อมูลในกลุ่มที่ j
	$\bar{Y}_j$	=	ค่าเฉลี่ยของกลุ่ม j

2.4.2.4 สมการสำหรับการคำนวณผลรวมความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-Groups Variance) โดยใช้ค่าแต่ละตัวภายในกลุ่มเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของกลุ่ม ดังสมการที่ 2-15

$$SS_{Within} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2 \quad (2-15)$$

โดยที่ Y_{ij} = ค่าของข้อมูลในกลุ่ม j และตำแหน่งของ i

2.4.2.5 สมการการคำนวณหา Mean Square (MS) ใช้ในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนในแต่ละส่วน เพื่อเปรียบเทียบความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม และภายในกลุ่ม ดังสมการที่ 2-16 และสมการที่ 2-17

$$MS_{Between} = \frac{SS_{Between}}{df_{Between}} \quad (2-16)$$

$$MS_{Within} = \frac{SS_{Within}}{df_{Within}} \quad (2-17)$$

2.4.2.6 สมการการคำนวณสำหรับหาค่า F-ratio (F-Statistic) เป็นการคำนวณเพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มปัจจัยต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยเปรียบเทียบค่าจากตาราง F ดังสมการที่ 2-18

$$F\text{-ratio} = \frac{MS_{Between}}{MS_{Within}} \quad (2-18)$$

โดยภาพรวมของสมการการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA จึงมีการสรุปแสดงดังตารางที่ 2-6 ซึ่งอยู่รูปแบบ ANOVA Table

ตารางที่ 2-6 สรุปการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Table)

Source of Variation	Degree of Freedom (df)	Sum of Square (SS)	Mean Square (MS)	F-Test
Between Sample (Level)	k-1	SSB	$MSB = \frac{SSB}{k-1}$	$\frac{MSB}{MSW}$
Within Sample (Error)	n-k	SSW	$MSW = \frac{SSW}{n-k}$	
ผลรวม	n-1	SST		

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือการศึกษาและพิจารณาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนทดสอบที่ผลิตด้วยกระบวนการพิมพ์แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) เพื่อใช้เป็นอ้างอิงในการเลือกพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อชิ้นส่วนมากที่สุด ดังแสดงตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 งานที่วิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่องานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Effect of part features on dimensional accuracy of fdm model Mohd Nizam Sudin, Shamsul Anuar Shamsudin และ Mohd Azman Abdullah. (2016)	- ขนาดของรู - ขนาดของร่อง - ขนาดทรงกระบอก - ขนาดทรงกลม	-
Optimization of process parameters of FDM part for minimizing its dimensional inaccuracy Azhar Equbal et al. (2017)	- องศาภายใน - ช่องว่างระหว่างเส้นใย - ความกว้างของเส้นใย	Central Composite Design
Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling Shahrain Mahmood et al. (2018)	- อุณหภูมิห้องพิมพ์ - ความหนาชั้น - อุณหภูมิหัวฉีด - อุณหภูมิฐาน - จำนวนชั้นผนัง - โครงสร้างภายใน - ความหนาแน่นภายใน - ความเร็วในการพิมพ์	Taguchi Methodology
Studies on the effect of part geometry and process parameter on the dimensional deviation of additive manufactured part using ABS material Jayashuriya et al. (2022)	- ความหนาแน่นภายใน - ความเร็วพิมพ์ - ความหนาชั้น - ความหนาของผนังชั้น	Taguchi Methodology

ตารางที่ 2-7 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Study on optimization of 3D printing parameters Junhui Wu. (2018)	- ความหนาชั้น	-
Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing : Ahmed Elkaseer et al. (2020)	- ความหนาแน่นภายใน - ความหนาชั้น - ความเร็วในการพิมพ์ - อุณหภูมิหัวฉีด - มุมเอียง	Taguchi Methodology
On the application of grey Taguchi method for benchmarking the dimensional accuracy of the PLA fused filament fabrication process: Kyriaki Evangelia Aslani et al. (2020)	- จำนวนชั้นผนัง - อุณหภูมิหัวฉีด - อัตราไหล - โครงสร้างภายใน	Taguchi Methodology
Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors: Muammel M. Hanon et al. (2021)	- ทิศทางการพิมพ์ - องศาภายใน - ความหนาของชั้น - สีของเส้นใย	-
Effect of Printing Parameters on Dimensional Error, Surface Roughness and Porosity of FFF Printed Parts with Grid Structure: Irene Buj-Corral et al. (2021)	- ความหนาชั้น - อุณหภูมิฉีด - ความเร็วพิมพ์ - อัตราไหล	2k Factorial Design
Optimization of 3D Printing Parameters Using the Taguchi Method to Improve Dimensional Precision : Martinus Bagus Wicaksono และ Felix Krisna Aji Nugraha (2022)	- อุณหภูมิหัวฉีด - อุณหภูมิโต๊ะ - ความหนาแน่นภายใน - ความหนาชั้น - ความเร็วในการพิมพ์	Taguchi Methodology

ตารางที่ 2-7 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Roadmap: Numerical-Experimental Investigation and Optimization of 3D-Printed Parts Using Response Surface Methodology: Hamid Reza Vanaei et al. (2022)	- อุณหภูมิการไหล - อุณหภูมิโต๊ะ - ความเร็วในการพิมพ์	Response Surface Methodology
Parametric Optimization of FDM Process for Improving Mechanical Strengths Using Taguchi Method and Response Surface Method: A Comparative Investigation : Ge Gao และ Fan Xu (2022)	- อุณหภูมิหัวฉีด - ความหนาชั้น - ความกว้างของชั้น - ความเร็วในการพิมพ์	Central Composite Design
Optimization of FFF Processing Parameters to improve geometrical accuracy and mechanical behavior of polyamide 6 using grey relational analysis (GRA): Zohreh Shakeri, Khaled Benfriha และ Nader Zirak (2021)	- อุณหภูมิโต๊ะ - อุณหภูมิหัวฉีด - ความหนาของชั้น - ความเร็วในการพิมพ์	Taguchi Methodology
Comparative study about dimensional accuracy and form errors of FFF printed spur gears using PLA and Nylon: Irene Buj-Corral, Enrique Ernesto Zayas (2022)	- ลักษณะของเฟือง - วัสดุที่ใช้	-
Product Development and its Comparative Analysis by SLA, SLS and FDM Rapid Prototyping Processes: Choudhari C M และ Patil V D (2016)	- กระบวนการพิมพ์	-
Design and Fabrication of industrial Components Using 3D Printing: T. Sathish, M.D. Vijayakumar, Anshumaan Krishnan Ayyangar (2018)	- ชิ้นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน	-

ตารางที่ 2-7 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Research on Shape and Dimensional Accuracy of FDM Produced Parts: J Beniak, PKrižan, L Šooš1, and M Matúš (2018)	- ความหนาชั้น - ความเร็วในการพิมพ์	-
Analyzing the Impact of print Parameters on Dimensional Variation of ABS specimens printed using Fused Deposition Modelling (FDM): Krishna Mohan Agarwal, Pritish Shubham, Dinesh Bhatia et al. (2022)	- ความหนาผนัง - ความหนาแน่นภายใน - อุณหภูมิฐานพิมพ์ - ความเร็วในการพิมพ์ - ความหนาชั้น - อุณหภูมิหัวฉีด	Central Composite Design
Multi-objective optimization and prediction of surface roughness and printing time in FFF printed ABS polymer: Arivazhagan Selvam, Suresh Mayilswamy, Ruban Whenish et al. (2022)	- อุณหภูมิหัวฉีด - ความหนาชั้น - ความเร็วในการพิมพ์	Response Surface Methodology
Parametric Modeling and Optimization of Dimensional Error and Surface Roughness of Fused Deposition Modeling Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Parts: Prithu Mishra, Shruti Sood, Vipra Bharadwaj, Aryan Aggarwal และ Pradeep Khanna (2023)	- อุณหภูมิหัวฉีด - ความหนาชั้น - ความเร็วในการพิมพ์ - ความกว้างภายใน	Response Surface Methodology

ตารางที่ 2-7 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Investigating the effect of motor micro-stepping on the geometric tolerances of Fused Filament Fabrication printed parts: Baltej Singh Rupal, Kamalakannan Ramadass, Ahmed Jawad Qureshi (2020)	- ขนาดของชิ้นส่วน - ความละเอียดไฟล์ STL - Micro-Stepping - วัสดุ	Taguchi Methodology
An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM: J Kacmarcik, D Spahic, K Varda, E Porca และ N Zaimovic-Uzunovic (2018)	- เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น ZEN3D และ Ultimaker 2+	-
Investigation on Effect Abs Filament Extrusion Process Temperature for Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing: Aziq Fikri Mohd Razi และ Khairu Kamarudin (2022)	- อุณหภูมิหัวฉีด - ความเร็วในการพิมพ์	-
Multi-Optimization of Empirical Models for The Material Extrusion Process: Schuravi N. Mallian, Boppana V. Chowdary (2020)	- มุมองศาภายใน - ความหนาชั้น - ทิศทางการวางชิ้นส่วน - ความกว้างช่องว่างภายใน	Response Surface Methodology
Optimizing multiple process parameters in fused deposition modeling with particle swarm optimization: Arup Dey, David Hoffman, Nita Yodo (2019)	- ความหนาชั้น - ทิศทางการวาง - ความหนาแน่นภายใน - อุณหภูมิหัวฉีด	Central Composite Design

ตารางที่ 2-7 (ต่อ)

ชื่องานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Evaluation of the Dimensional Accuracy of 3D-Printed Anatomical Mandibular Models Using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ Printing Technology: Bilal Msallem, Neha Sharma, Shuaishuai Cao et al. (2020)	- เครื่องพิมพ์สามมิติ ได้แก่ FFF, SLA, SLS, MJ และ BJ	-
Comparative Study about Dimensional Accuracy and Surface Finish of Constant-Breadth Cams Manufactured by FFF and CNC Milling: Enrique E. Zayas-Figueras และ Irene Buj-Corra (2023)	- กระบวนการผลิตชิ้นส่วน	-
Modeling of the Influence of Input AM Parameters on Dimensional Error and Form Errors in PLA Parts Printed with FFF Technology: Carmelo J. Luis-Pérez, Irene Buj-Corral และ Xavier Sánchez-Casas (2021)	- อุณหภูมิหัวฉีด - ความหนาชั้น - ความเร็วในการพิมพ์ - อัตราการไหลของหัวฉีด	Response Surface Methodology

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

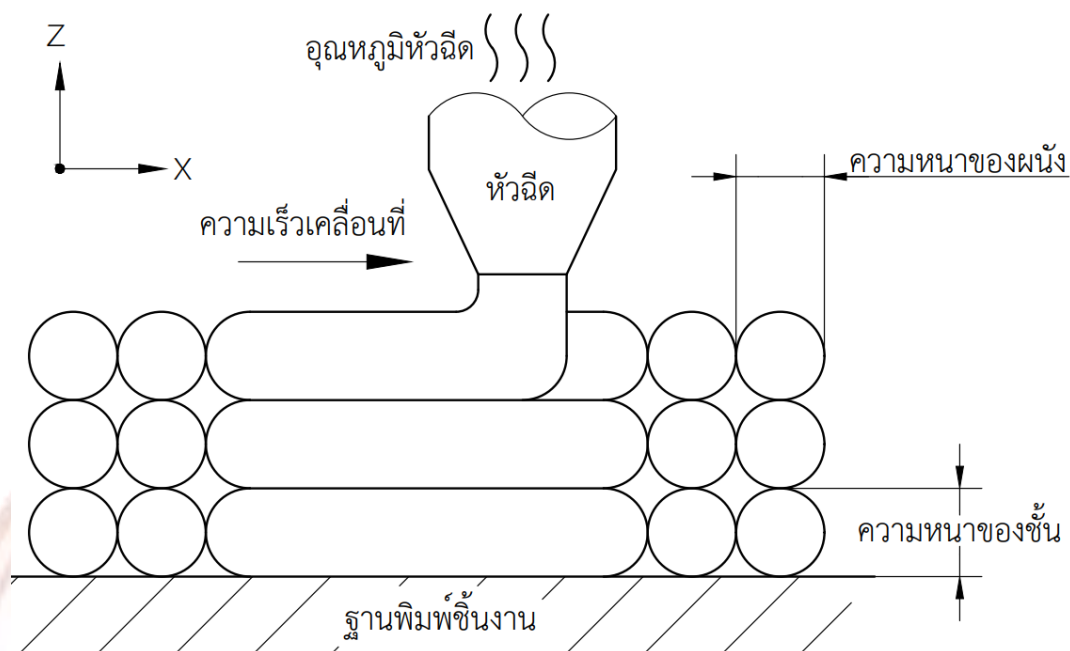
ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยเพื่อหาผลกระทบที่สำคัญของพารามิเตอร์ และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

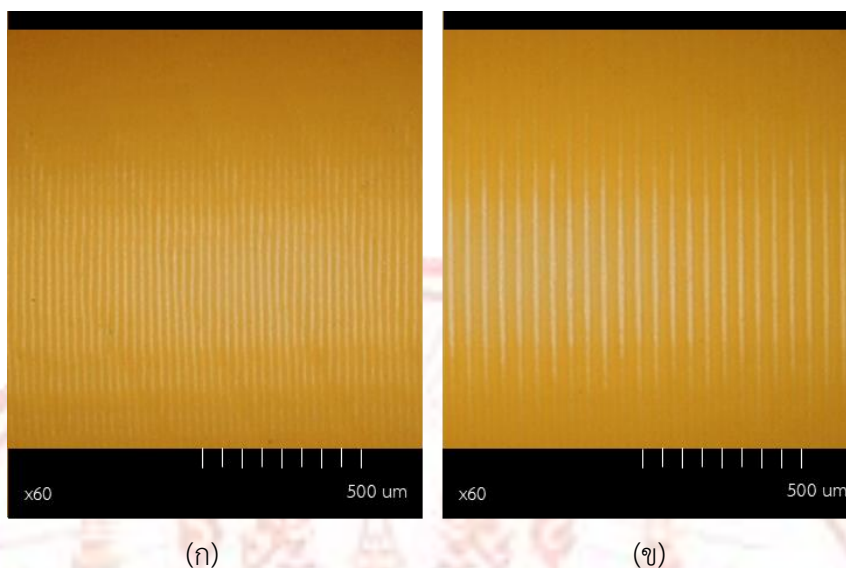
3.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตั้งค่าในการพิมพ์ชิ้นส่วนในกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM) มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากการปรับหรือการตั้งค่าพารามิเตอร์จะส่งผลต่อคุณสมบัติของชิ้นส่วนที่พิมพ์ โดยเฉพาะความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน หากปรับค่าพารามิเตอร์ในการพิมพ์ที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดได้ นอกจากนี้การปรับพารามิเตอร์เพื่อปรับคุณภาพของชิ้นส่วน ไม่ได้เป็นการปรับที่เครื่องพิมพ์สามมิติโดยตรง เช่น สเตปมอเตอร์ ความแม่นยำในการเคลื่อนที่ และขนาดหัวฉีดเป็นต้น แต่เป็นการควบคุมเงื่อนไขการพิมพ์ให้เหมาะสม เช่น การปรับความหนาชั้น คือการปรับจำนวนชั้นของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูป และการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม เพื่อลดการสั่นสะเทือนในขณะทำการพิมพ์ การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทำให้กระบวนการพิมพ์เกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมที่ดี ช่วยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นต่อชิ้นงาน ส่งผลให้ชิ้นงานที่พิมพ์ออกมามีขนาดแม่นยำ และละเอียดกว่าค่าความละเอียดมาตรฐานของเครื่องพิมพ์สามมิติ และคุณสมบัติของความแม่นยำของขนาดชิ้นส่วน เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่มีผลต่อการประกอบชิ้นส่วนประกอบอย่างมาก การทำให้ชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยกระบวนการนี้มีขนาดที่แม่นยำจึงเป็นเรื่องที่ยากอย่างมาก เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดความคลาดเคลื่อนขนาดได้ เช่น ความร้อนที่ใช้ในการพิมพ์ทำให้ชิ้นส่วนมีการหดตัวเนื่องจากวัสดุเป็นพลาสติก การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการพิมพ์ที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของขนาด และรูปร่างของชิ้นส่วนได้ง่าย ดังนั้นการกำหนด และควบคุมพารามิเตอร์ให้เหมาะสมจึงเป็นส่วนที่มีความสำคัญในการลดความคลาดเคลื่อนของขนาด ช่วยให้ชิ้นส่วนมีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสืบค้นข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และตั้งสมมุติฐานพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM) ในการกำหนดพารามิเตอร์ถูกตั้งสมมุติฐานตามอ้างอิงผลลัพธ์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 โดยได้รวบรวมพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนในกระบวนการพิมพ์ FDM โดยเฉพาะ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ถูกสรุปและนำเสนอแสดงตารางที่ 2-4 เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเลือกพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดของชิ้นส่วนมากที่สุด จากการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาของชั้น, ความเร็วในการพิมพ์ อุณหภูมิหัวฉีด และความหนาของผนังชั้น ดังแสดงภาพที่ 3-2



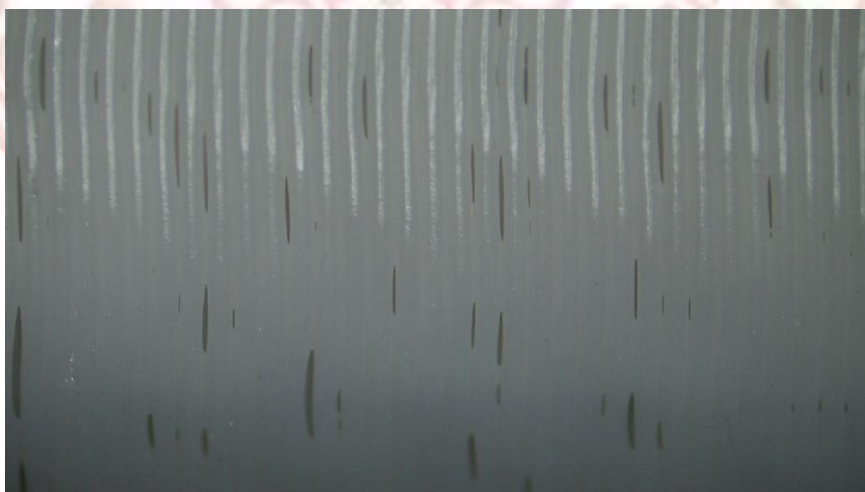
ภาพที่ 3-2 ลักษณะพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ความหนาของชั้น (Layer Thickness, LH) เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการพิมพ์ด้วยกระบวนการแบบ FDM เนื่องจากการปรับพารามิเตอร์นี้จะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพพื้นผิวและความแม่นยำของขนาดชิ้นส่วน จากภาพที่ 3-2 ความหนาของชั้นคือระยะห่างระหว่างชั้นวัสดุที่พิมพ์แบบชั้นต่อชั้น (Layer by Layer) ซึ่งเกิดจากการฉีดวัสดุลงบนฐานพิมพ์ชิ้นส่วน ความหนาชั้นที่น้อยจะส่งผลให้จำนวนชั้นในการพิมพ์มากขึ้น ทำให้เวลาในการพิมพ์ชิ้นส่วนนานขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังส่งผลต่อลักษณะของพื้นผิวชิ้นส่วน ยิ่งความหนาชั้นน้อยลงยิ่งทำให้ผิวละเอียดยิ่งขึ้น แต่ส่งผลให้เวลาในการพิมพ์เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน และยังทำให้ชิ้นส่วนที่พิมพ์เกิดความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้ขนาดชิ้นส่วนเกิดการหดตัวหลังจากพิมพ์ชิ้นส่วนเสร็จ ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนเพิ่มมากขึ้น และขนาดของชิ้นส่วนเปลี่ยนแปลงไปจากขนาดที่กำหนด โดยลักษณะของผิวชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยความหนาที่ต่างกันแสดงดังภาพที่ 3-3 (ก) และภาพที่ 3-3 (ข)



ภาพที่ 3-3 ตัวอย่างความหนาชั้น (ก) ความหนาของชั้นที่ 0.2 มม. (ข) ความหนาของชั้นที่ 0.4 มม.

3.1.2 ความเร็วในการพิมพ์ (Print Speed, SP) อัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวฉีดขณะทำการฉีดวัสดุลงบนฐานพิมพ์ระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นส่วนในอัตราการป้อนวัสดุคงที่ ความเร็วในการพิมพ์ส่งผลโดยตรงต่อ รูปร่าง ขนาดของชิ้นส่วน และเวลาในการพิมพ์ หากความเร็วในการพิมพ์สูงขึ้นทำให้เวลาในการพิมพ์ขึ้นส่วนเร็วขึ้น แต่ส่งผลหัวฉีดเคลื่อนที่เร็วเกินไปทำให้วัสดุที่ปล่อยออกมาไม่เต็มที่ทำให้ชิ้นส่วนที่พิมพ์มีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ หรือวัสดุที่ปล่อยออกมามีเวลาในการเย็นตัวไม่ทัน ส่งผลต่อการเกิดความร้อนสะสมทำให้ชิ้นส่วนเกิดการเสียรูป และขนาดของชิ้นส่วนแตกต่างไปจากที่กำหนด ในทางกลับกันหากความเร็วต่ำเกินไป อาจทำให้วัสดุเย็นตัวเร็วเกินไปจนหัวฉีดระหว่างชั้นไม่สามารถยึดติดกันได้ ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้น ทำให้ชิ้นส่วนเสียรูป และเกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน ดังแสดงภาพที่ 3-4 ตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดช่องว่างระหว่างชั้น



ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างชิ้นส่วนที่เกิดช่องว่างระหว่างชั้นจากการปรับความเร็วในการพิมพ์ต่ำเกินไป

3.1.3 อุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle Temperature, TP) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน การปรับอุณหภูมิหัวฉีดขึ้นอยู่กับเส้นใยวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนสามมิติ เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลายเส้นใยวัสดุโดยเฉพาะ และวัสดุแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ทำให้การปรับอุณหภูมิหัวฉีดให้เหมาะสมมีการเปลี่ยนแปลงทุกครั้ง ซึ่งผลกระทบของอุณหภูมิหัวฉีดหากต่ำเกินไปอาจทำให้วัสดุที่ฉีดออกมาไม่สมบูรณ์ อาจทำให้อัตราการไหลออกมาไม่สม่ำเสมอ หรือหากอุณหภูมิสูงเกินไปทำให้วัสดุเกิดการไหลเกินอัตราการไหลที่กำหนด ทำให้ชิ้นส่วนอาจเกิดขนาดที่ใหญ่กว่าที่กำหนด

3.1.4 ความหนาของผนังชิ้น (Wall Thickness, WT) คือความหนาของโครงสร้างพื้นผิวล้อมรอบชิ้นส่วนในระนาบ XY ซึ่งเป็นตัวกำหนดความแข็งแรง รูปร่าง และความหนาแน่นของชิ้นส่วน นอกจากนี้การปรับความหนาของผนังที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ขนาดของชิ้นส่วนเกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดที่กำหนด และการปรับความหนาของผนังที่หนาเกินไปอาจทำให้วัสดุสะสมในบริเวณนั้นมากเกินไป ส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนใหญ่กว่าขนาดที่กำหนด ในทางกลับกัน หากความหนาของผนังบางเกินไป อาจทำให้ชิ้นส่วนเกิดการหดตัวหลังจากพิมพ์ได้ ซึ่งทำให้ขนาดของชิ้นส่วนเล็กลง และส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน นอกจากนี้การตั้งค่าความหนาผนังที่ไม่สม่ำเสมอ อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในบางบริเวณของชิ้นงาน ซึ่งลักษณะของความหนาผนังชิ้นส่วนแสดงดังภาพที่ 3-5 (ก) และภาพที่ 3-5 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-5 ตัวอย่างความหนาผนัง (ก) ความหนาของผนังที่ 1 มม. (ข) ความหนาของผนังที่ 3 มม.

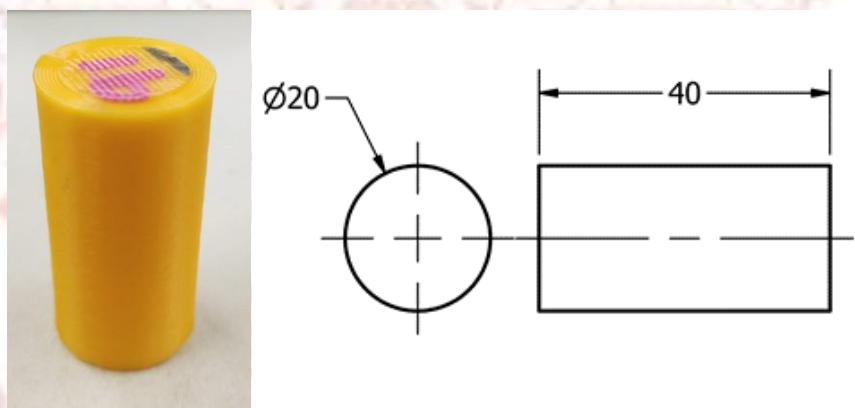
3.2 การเตรียมการทดลองสำหรับวัสดุ PLA

ขั้นตอนการเตรียมการทดลองสำหรับชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยวัสดุ PLA โดยการกำหนดขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ คุณสมบัติของเครื่องพิมพ์สามมิติ และระดับของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความ

คลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และความยาว (L) และหาการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM) ให้ขนาดชิ้นส่วนอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อที่กำหนด ซึ่งขั้นตอนการจัดเตรียมถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้

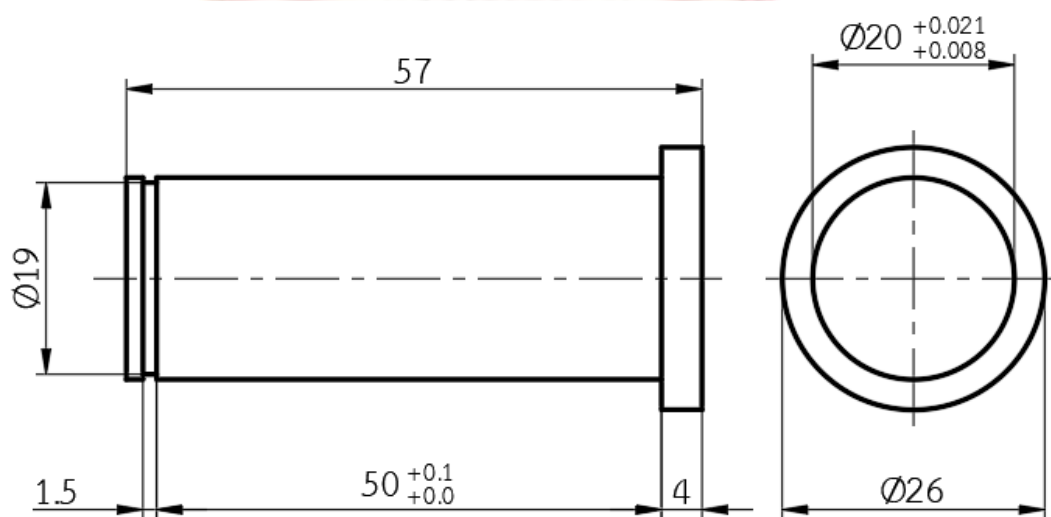
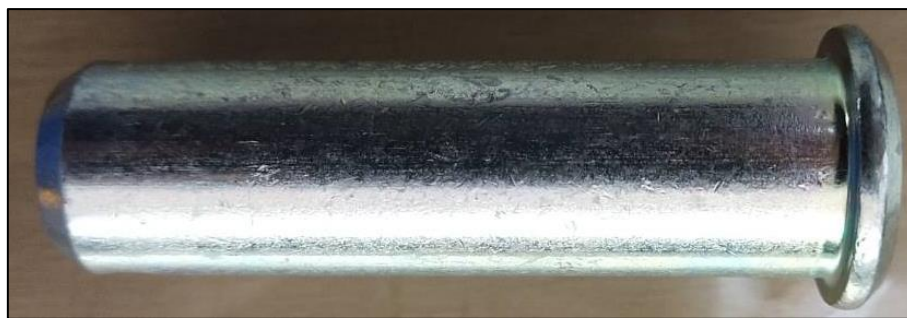
3.2.1 การจัดเตรียมขนาดของชิ้นส่วนทดสอบสำหรับวัสดุ PLA

ขั้นตอนการจัดเตรียมชิ้นส่วนทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ที่ส่งผลต่อชิ้นส่วนประกอบที่ต้องการความแม่นยำสูง เพื่อให้ชิ้นส่วนสามารถประกอบกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงกำหนดให้ชิ้นส่วนทดสอบมีทั้งหมด 2 รูปแบบได้แก่ ชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA) คือชิ้นส่วนทรงกระบอกแสดงดังภาพที่ 3-6 กำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นส่วน 20 มิลลิเมตร และ ความยาว 40 มิลลิเมตร ใช้สำหรับทดสอบผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติ เนื่องจากมีลักษณะขึ้นรูปได้ง่าย ลดเวลาในการพิมพ์ให้น้อยลง ลดความซับซ้อนของรูปร่าง และลดการสร้างวัสดุซัพพอร์ตให้กับชิ้นส่วนในการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ



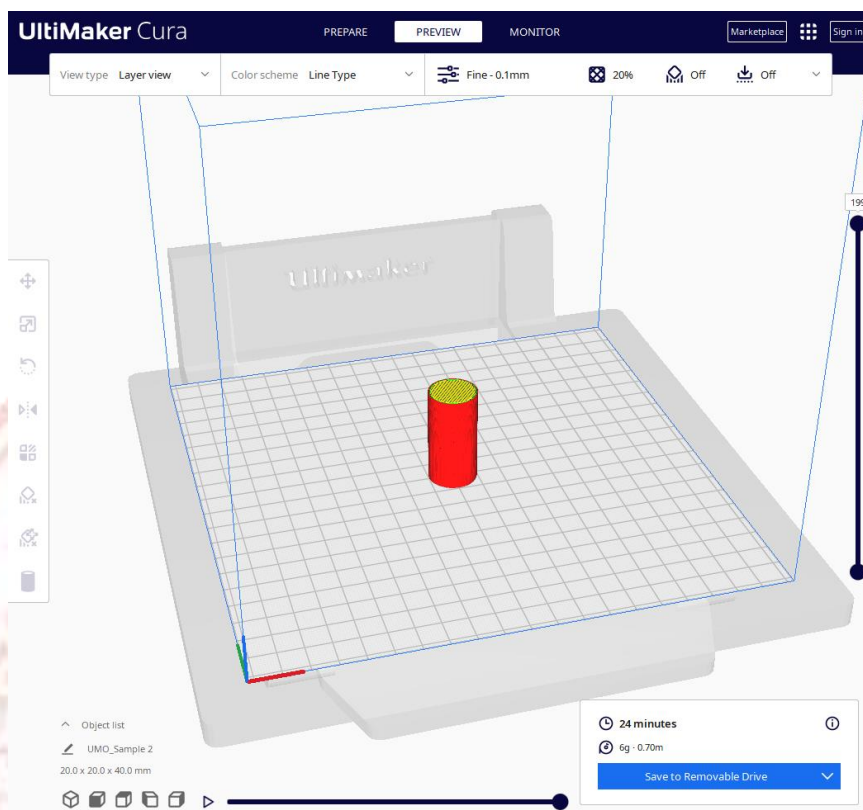
ภาพที่ 3-6 ชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA) คือชิ้นส่วนทรงกระบอก

ชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) คือชิ้นส่วนกรณีศึกษา “สลักทรงกระบอกแบบมีป่า” เป็นชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานแม่พิมพ์โลหะ มีหน้าที่ช่วยควบคุมตำแหน่งในการขึ้นรูป และช่วยรองรับแรงกระแทกในขณะขึ้นรูปโลหะ เพื่อไม่ให้เกิดการสึกหรอของแม่พิมพ์ ดังแสดงภาพที่ 3-7 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. มีความยาว 57 มม. และวัสดุของชิ้นส่วนคือ S45C ใช้สำหรับตรวจสอบประสิทธิภาพของชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเทียบกับค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น



ภาพที่ 3-7 ชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) คือชิ้นส่วนกรณีศึกษา “สลักทรงกระบอกแบบมีบ่า”

จากนั้นสร้างโมเดลชิ้นส่วนทดสอบให้อยู่ในรูปแบบของโมเดลสามมิติ (3D Model) ด้วยโปรแกรม Solid Work ซึ่งเป็นโปรแกรมออกแบบโมเดลสามมิติ (CAD) ที่มีความซับซ้อนได้ดี และบันทึกโมเดลสามมิติที่เป็นไฟล์นามสกุล STL (Standard Triangle Language) โดยรูปแบบของไฟล์นี้เป็นเพียงข้อมูลพื้นผิว หรือ รูปร่างทางเรขาคณิตที่มีความลึกตื้นของพื้นผิวเท่านั้น นิยมใช้สำหรับในกระบวนการขึ้นรูปสามมิติโดยเฉพาะ โดยที่ข้อมูลของรูปทรงและพื้นผิวของโมเดลจะมีละเอียดและแม่นยำอย่างมาก รวมถึงขนาดของชิ้นส่วนที่ต้องการ จากนั้นนำไฟล์ที่ได้รับเข้าสู่โปรแกรม Ultimaker Cura เพื่อใช้สร้างข้อมูลจากไฟล์ข้อมูล STL ให้เป็นชุดคำสั่งโค้ด หรือข้อมูลไฟล์ G-code สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติในการพิมพ์ชิ้นส่วนสามมิติ ดังแสดงภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 หน้าต่างโปรแกรม Ultimaker Cura

3.2.2 คุณสมบัติของเครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ PLA

เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบคือ เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC3040V.2022 มีพื้นที่ในการพิมพ์ 300 x 300 x 300 มิลลิเมตร มีหัวฉีดในการขึ้นรูปหนึ่งหัว สามารถทำความร้อนสูงสุด 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงภาพที่ 3-9 ลักษณะเครื่องพิมพ์สามมิติเป็นกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM) เนื่องจากเครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้เป็นเครื่องสั่งผลิตตามท้องตลาด ทำให้เครื่องพิมพ์สามมิติไม่มีค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์ ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC 3040 V.2022 แสดงดังตารางที่ 3-1

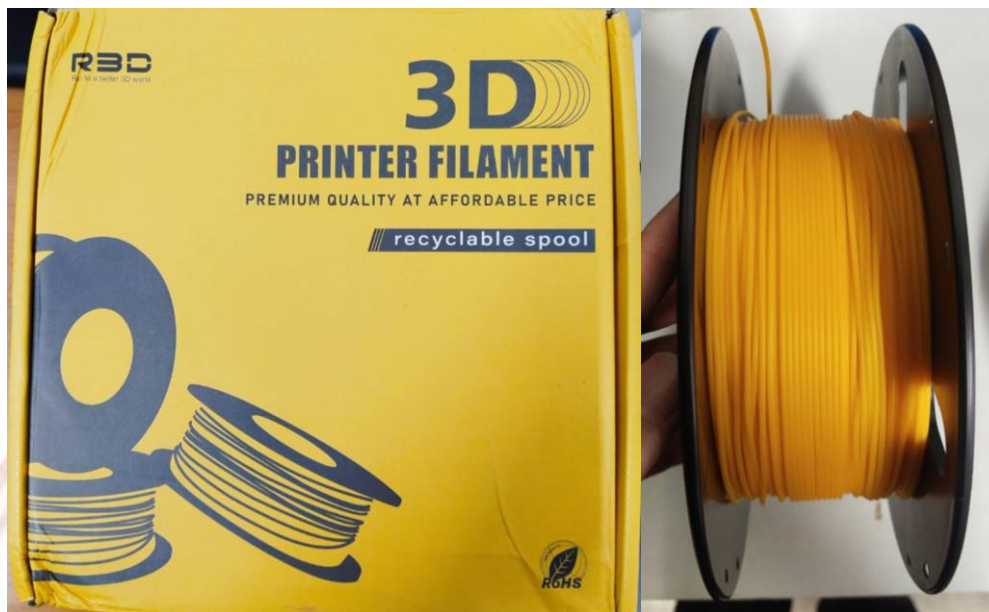


ภาพที่ 3-9 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC3040V.2022

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทั่วไปของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC 3040 V.2022

Model	BBC3040V.2022
Build Volume	300 x 300 x 300 mm (Single nozzle)
Machine size	500 x 550 x 800 mm
Supported Material	PLA/ABS/Nylon/PETG
Filament Diameter	1.75 mm
Nozzle Diameter	0.4 mm (สามารถเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 0.2/0.3/0.5/0.6/0.8/1.0mm)
Layer Thickness	0.1-0.4 mm
Print Speed	20-200 mm/s
Printing Method	USB Cable / Flash Drive
Heating Parameters	Nozzle Temperature 300 °C / Bed Temperature 110 °C

วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ คือวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เป็นวัสดุชีวภาพ และเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนสามมิติ วัสดุชนิดนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่มีการผลิตจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ส่วนประกอบข้าวโพด ธัญพืช มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และมีราคาถูก ตัวอย่างเส้นใยที่ใช้แสดงดังภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 เส้นใยวัสดุพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA)

3.2.3 ระดับของพารามิเตอร์กระบวนการที่ใช้ในงานวิจัย

การพิจารณาระดับของพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ ถูกตั้งสมมุติฐานจากการสืบค้นข้อมูลของผลลัพธ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 เพื่อกำหนดพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM) ที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วน PLA และพิจารณาระดับของพารามิเตอร์ตามข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

3.2.3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน PLA ถูกกำหนดระดับทั้งหมด 3 ระดับคือ ค่าต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด โดยพิจารณาตามข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ทั้งหมด ซึ่งระดับของความหนาชั้น (Layer Thickness, LH) พิจารณาตามข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์สามมิติที่สามารถพิมพ์ชิ้นส่วนได้ ส่วนระดับของความเร็วในการพิมพ์ (Print Speed, SP) พิจารณาตามค่ามาตรฐานที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย ส่วนระดับของความหนาผนัง (Wall Thickness, TW) พิจารณาตามข้อจำกัดของขนาดชิ้นส่วนทดสอบ เนื่องจากภายในของชิ้นส่วนมีลักษณะเป็นโครงสร้าง การปรับให้ความหนาผนังมากกว่า 3 มม. ส่งผลให้โครงสร้างด้านในหายไป ทำให้ชิ้นส่วนมีลักษณะเป็นท่อกลอง และสุดท้ายระดับของอุณหภูมิหัวฉีด (Nozzle Temperature, TP) พิจารณาตามวัสดุที่ใช้ ดังแสดงตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาในขั้นตอนการดำเนินงาน

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด
ความหนาชั้น (LH)	0.2 มม.	0.3 มม.	0.4 มม.
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	20 มม. /วินาที	40 มม. /วินาที	60 มม. /วินาที
อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	190°C	200°C	210°C
ความหนาผนัง (TW)	1 มม.	2 มม.	3 มม.

3.2.3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เกี่ยวข้องในการพิจารณาในขั้นตอนการดำเนินงาน

ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ จะถูกเรียกว่าค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น เนื่องจากเป็นค่ามาตรฐานในการพิมพ์ชิ้นส่วนพื้นฐาน หรือค่าเริ่มต้นที่แนะนำโดยโปรแกรม Ultimaker Cura ดังตารางที่ 3-3 และลักษณะของโครงสร้างภายในกำหนดให้มีความหนาแน่นที่ 20 เปอร์เซนต์ มีลักษณะโครงสร้างแบบตาราง (Grid) แสดงดังภาพที่ 3-11

ตารางที่ 3-3 ค่าพารามิเตอร์คงที่ที่แนะนำโดยโปรแกรม Ultimaker Cura

พารามิเตอร์	ระดับ
วัสดุ	PLA
ความหนาแน่น	20%
อุณหภูมิโต๊ะขึ้นรูป	60°C
อัตราไหล	100%
โครงสร้างภายใน	Grid



ภาพที่ 3-11 ลักษณะของพารามิเตอร์โครงสร้างภายในแบบตาราง (Grid)

3.3 การออกแบบการทดลองแบบ (CCD) และเก็บข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุ PLA

ขั้นตอนนี้คือ การออกแบบแผนการทดลองออกเป็นจำนวนการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนระดับของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทุกวิถีทางของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยใช้วิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการถดถอยลำดับที่ 2 (Second-Order Regression Model) ดังสมการที่ 3-1

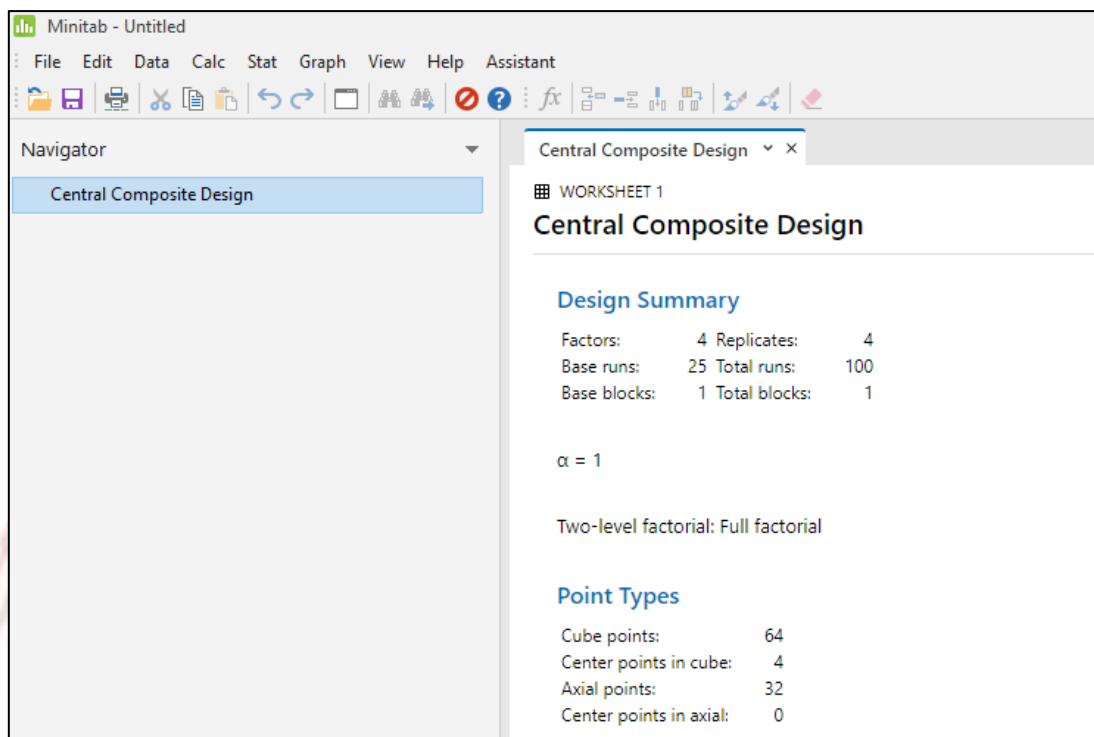
$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad (3-1)$$

โดยที่ y คือค่าตอบสนองที่สนใจ β_1x_1 และ β_2x_2 คือตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าตอบสนองในลักษณะเชิงเส้น $\beta_{11}x_1^2$ และ $\beta_{22}x_2^2$ คือตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าตอบสนองในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น $\beta_{12}x_1x_2$ คือตัวแปรเชิงปฏิสัมพันธ์ที่แสดงผลร่วมกันของตัวแปร 2 ตัว และ ε คือค่าความผิดพลาด

การออกแบบด้วยวิธีนี้ให้ความสำคัญทุกระดับของพารามิเตอร์ และค่าตอบสนองที่สนใจ จึงมีประสิทธิภาพในการทดลองที่เหมาะสมกับพารามิเตอร์หลายตัวพร้อมกัน และยังมีความยืดหยุ่นในการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลอง และยังช่วยลดจำนวนการทดลองลง ดังนั้นในการออกแบบการทดลองจะใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถออกแบบ และวิเคราะห์ทางสถิติได้หลากหลายวิธี รวมถึงวิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) โดยที่การกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ตามตารางที่ 3-2 โดยขั้นตอนการออกแบบการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

3.3.1 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) โดยใช้โปรแกรม Minitab ผลลัพธ์ที่ได้รับคือแผนการทดลองทั้งหมด 100 ขึ้น มีการทำซ้ำทั้งหมด 4 ครั้ง ดังนั้นจึงแบ่งออกเป็น 4 ชุด ชุดละ 25 ขึ้นส่วนทดสอบ โดยที่ Cube points = 64 คือจำนวนขึ้นส่วนที่ออกแบบด้วย 2k Factorial ทั้งหมด 64 ขึ้นส่วน, Center points in cube = 4 คือจำนวนขึ้นส่วนกำหนดเป็นค่ากลางทั้งหมด 4 ค่า เนื่องจากการทำซ้ำทั้งหมด 4 ครั้ง, Axial points = 32 คือจำนวนขึ้นส่วนที่มีการปรับตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเป็นค่าคงที่ หรือ $\alpha = 1$ โดยที่ตัวแปรอื่นเป็นค่ากลาง หรือค่า 0 ทั้งหมด ดังแสดงภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 ผลลัพธ์การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

โดยมีวิธีการคำนวณการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) เพื่อหาจำนวน

ชิ้นส่วนทดสอบดังสมการที่ 3-2

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$CCD = 2^k + 2k + \text{Center} \quad (3-2)$$

กำหนดให้

CCD = วิธีการออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง

k = จำนวนปัจจัย หรือพารามิเตอร์ที่พิจารณา

Center = จำนวนค่ากลางที่พิจารณา หรือจุดศูนย์กลาง (Center Point)

แทนค่า

$$CCD = 2^4 + (2 \times 4) + 1$$

$$CCD = 25 \text{ จำนวนการทดลอง}$$

ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมด 25 ชิ้น ซึ่งในแต่ละชิ้นส่วนจะมีการปรับพารามิเตอร์ในการตั้ง

ค่าที่แตกต่างกันตามวิธีการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ครอบคลุมผลลัพธ์ที่ได้ให้มีความแม่นยำมาก

ขึ้นดังแสดงตารางที่ 3-4

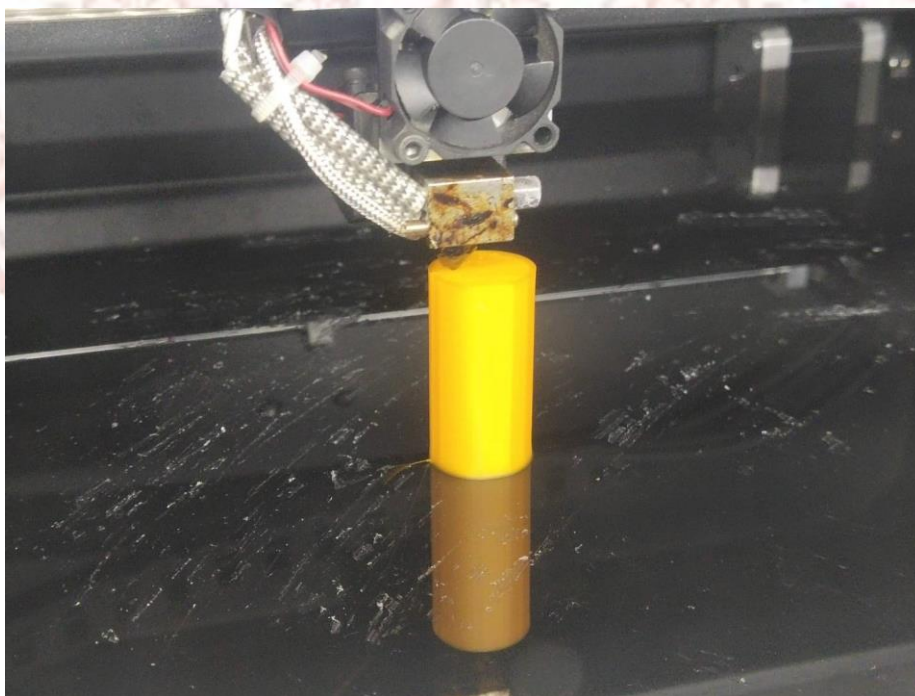
ตารางที่ 3-4 ตัวอย่างจำนวนการทดลองในหนึ่งชุดด้วยโปรแกรม Minitab สำหรับขั้นตอนทดสอบ PLA

จำนวน การทดลอง	ความหนาชั้น (LH)		ความเร็วในการพิมพ์ (SP)		ความหนาผนัง (TW)		อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	
	Actual Value	Coded Level	Actual Value	Coded Level	Actual Value	Coded Level	Actual Value	Coded Level
1	0.2	-1	20	-1	1	-1	190	-1
2	0.4	+1	20	-1	1	-1	190	-1
3	0.2	-1	60	+1	1	-1	190	-1
4	0.4	+1	60	+1	1	-1	190	-1
5	0.2	-1	20	-1	1	-1	210	+1
6	0.4	+1	20	-1	1	-1	210	+1
7	0.2	-1	60	+1	1	-1	210	+1
8	0.4	+1	60	+1	1	-1	210	+1
9	0.2	-1	20	-1	3	+1	190	-1
10	0.4	+1	20	-1	3	+1	190	-1
11	0.2	-1	60	+1	3	+1	190	-1
12	0.4	+1	60	+1	3	+1	190	-1
13	0.2	-1	20	-1	3	+1	210	+1
14	0.4	+1	20	-1	3	+1	210	+1
15	0.2	-1	60	+1	3	+1	210	+1
16	0.4	+1	60	+1	3	+1	210	+1
17	0.2	$-\alpha$	40	0	2	0	200	0
18	0.4	$+\alpha$	40	0	2	0	200	0
19	0.3	0	20	$-\alpha$	2	0	200	0
20	0.3	0	60	$+\alpha$	2	0	200	0
21	0.3	0	40	0	2	0	190	$-\alpha$
22	0.3	0	40	0	2	0	210	$+\alpha$
23	0.3	0	40	0	1	$-\alpha$	200	0
24	0.3	0	40	0	3	$+\alpha$	200	0
25	0.3	0	40	0	2	0	200	0

จากตารางที่ 3-4 ค่าปัจจัยจริง (Actual Value) คือค่าตัวเลขที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนระดับของพารามิเตอร์ของกระบวนการพิมพ์จริง ส่วนระดับปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Coded Level) เป็นค่าตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติเท่านั้น เนื่องจากการออกแบบกำหนดค่า $\alpha = 1$ ทำให้ชิ้นส่วนเลขที่ 17 ถึง 24 ค่าระดับของพารามิเตอร์ที่ $+\alpha$ และ $-\alpha$ จะเท่ากับ +1 และ -1 หรือมีค่าเท่ากับค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของระดับพารามิเตอร์ นอกจากนี้ในการทดลองผู้วิจัยต้องการทำซ้ำทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความแม่นยำมากขึ้น ทำให้จำนวนในการทดลองเพิ่มขึ้นทั้งหมด 100 ชิ้นส่วน

3.3.2 การสร้างชิ้นส่วนทดสอบ PLA

ขั้นตอนการสร้างชิ้นส่วนทดสอบ PLA โดยกำหนดชิ้นส่วนทดสอบที่ใช้คือ ชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 ดังแสดงภาพที่ 3-6 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 20 มม. และมีความยาวที่ 40 มม. สร้างด้วยเส้นใยวัสดุ PLA ซึ่งในการสร้างชิ้นส่วนทดสอบจำเป็นต้องสร้างข้อมูล G-Code ของชิ้นส่วนทดสอบของแต่ละการทดลองทั้งหมด 25 ชิ้นส่วน โดยกำหนดพารามิเตอร์ตามแผนการทดลองดังตารางที่ 3-4 ด้วยโปรแกรม Ultimaker Cura ข้อมูลจะถูกถ่ายโอนไปยังเครื่องพิมพ์ด้วย SD-Card เพื่อสั่งพิมพ์ชิ้นส่วนตามแผนการทดลองทั้งหมด 100 ชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (Fused Deposition Modeling, FDM) โดยในการพิมพ์แต่ละครั้งต้องพิมพ์ชิ้นส่วนเพียง 1 ชิ้นต่อครั้งเท่านั้น ดังภาพที่ 3-13 แสดงเครื่องพิมพ์สามมิติขณะกำลังขึ้นรูปชิ้นส่วน ผลลัพธ์ที่ได้จากการพิมพ์ชิ้นส่วนแสดงดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-13 แสดงตัวอย่างเครื่องพิมพ์สามมิติขณะกำลังขึ้นรูปชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA)



ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA)

3.3.3 การเก็บค่าตอบสนองด้วยเครื่องมือวัดเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper)

ขั้นตอนการเก็บผลค่าตอบสนองของชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA) กำหนดให้ค่าตอบสนองที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และขนาดความยาว (L) ของชิ้นส่วนทดสอบ โดยวัดขนาดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) รุ่น TMT322006 ที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร โดยจะทำการวัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งหมด 3 จุด และขนาดความยาวทั้งหมด 3 จุด แสดงดังภาพที่ 3-15 และภาพที่ 3-16

$$\text{Mean } (\bar{X}) = \frac{\sum X}{n} \quad (3-3)$$

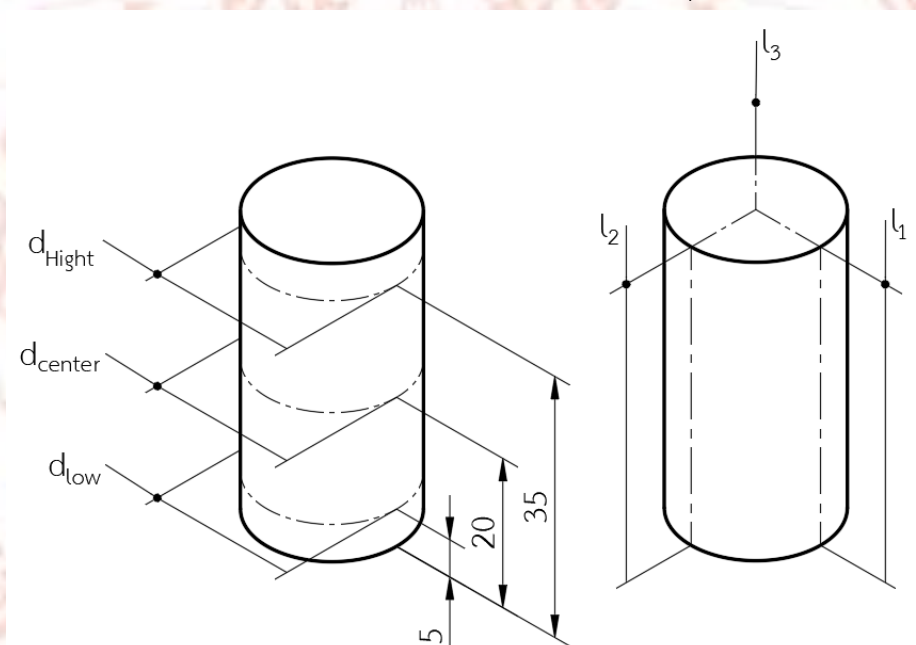
โดยที่

$\bar{X}$	= ค่าเฉลี่ยของ X
X	= ข้อมูลทั้งหมด
n	= จำนวนข้อมูล

ตัวอย่างการวัดขนาดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) จากนั้นทำคำนวณหาค่าเฉลี่ยของขนาดชิ้นส่วนโดยใช้สมการที่ 3-3 เพื่อนำข้อมูลที่ได้รับมาวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงตารางที่ 3-5



ภาพที่ 3-15 เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) รุ่น TMT322006



ภาพที่ 3-16 ตัวอย่างตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และความยาว (L)

ตารางที่ 3-5 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และขนาดความยาวของชิ้นส่วนทดสอบ (PLA) ที่ 1

ชิ้นที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)				ขนาดความยาว (L)			
	d_{low}	d_{center}	d_{Hight}	D	l_1	l_2	l_2	L
1	19.91	19.88	19.93	19.91	40.01	40.03	40.00	40.01
2	19.92	19.91	19.87	19.90	40.01	39.90	39.92	39.94
3	19.71	19.72	19.74	19.72	40.02	40.04	40.01	40.03
4	19.66	19.57	19.59	19.61	39.85	39.85	39.79	39.83
5	19.87	19.84	19.82	19.85	39.99	40.01	39.99	40.00

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

ชั้นที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)				ขนาดความยาว (L)			
	d _{low}	d _{Center}	d _{Hight}	D	l ₁	l ₂	l ₂	L
6	19.80	19.83	19.79	19.81	39.96	39.87	39.94	39.92
7	19.63	19.64	19.67	19.65	40.01	40.00	40.01	40.01
8	19.58	19.55	19.59	19.57	39.76	39.76	39.77	39.76
9	19.92	19.79	19.69	19.80	40.01	39.99	40.01	40.00
10	19.88	19.89	19.85	19.87	39.83	39.87	39.80	39.83
11	19.64	19.67	19.65	19.65	39.97	39.95	39.96	39.96
12	19.90	19.76	19.59	19.75	39.85	39.79	39.83	39.83
13	19.75	19.69	19.70	19.71	39.98	39.98	39.97	39.98
14	20.05	19.97	20.04	20.02	39.77	39.76	39.76	39.76
15	19.63	19.49	19.46	19.52	39.96	39.95	39.95	39.96
16	19.42	19.47	19.44	19.44	39.74	39.62	39.76	39.71
17	19.88	19.86	19.82	19.85	40.00	40.04	40.05	40.03
18	19.71	19.68	19.75	19.71	39.75	39.76	39.75	39.75
19	19.93	19.94	19.88	19.91	39.78	39.77	39.83	39.80
20	19.75	19.67	19.59	19.67	39.71	39.76	39.77	39.75
21	19.75	19.80	19.82	19.79	39.75	39.73	39.79	39.76
22	19.89	19.81	19.74	19.81	39.76	39.76	39.74	39.75
23	19.77	19.69	19.67	19.71	39.74	39.76	39.74	39.74
24	19.75	19.74	19.83	19.77	39.76	39.76	39.78	39.77
25	19.82	19.78	19.80	19.80	39.80	39.78	39.76	39.78
26	19.79	19.82	19.79	19.80	39.98	39.99	39.98	39.98
27	19.89	19.92	19.91	19.91	39.78	39.79	39.81	39.79
28	19.73	19.65	19.57	19.65	39.95	39.99	39.98	39.97
29	19.77	19.72	19.69	19.72	39.71	39.77	39.78	39.75
30	19.86	19.81	19.80	19.82	39.93	39.93	40.00	39.95
31	19.79	19.81	19.78	19.79	39.79	39.80	39.78	39.79
32	19.66	19.65	19.64	19.65	39.98	39.93	39.93	39.95

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

ชั้นที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)				ขนาดความยาว (L)			
	d _{low}	d _{Center}	d _{High}	D	l ₁	l ₂	l ₂	L
33	19.58	19.51	19.50	19.53	39.69	39.78	39.75	39.74
34	19.81	19.84	19.82	19.82	39.96	39.98	39.95	39.96
35	19.88	19.85	19.90	19.88	39.84	39.81	39.93	39.86
36	19.62	19.54	19.45	19.54	39.93	40.02	39.98	39.98
37	19.66	19.70	19.66	19.67	39.69	39.71	39.67	39.69
38	19.78	19.79	19.72	19.76	39.91	39.89	39.88	39.89
39	20.13	20.05	20.03	20.07	39.67	39.66	39.73	39.69
40	19.48	19.44	19.46	19.46	39.84	39.85	39.83	39.84
41	19.49	19.43	19.75	19.55	39.61	39.66	39.59	39.62
42	19.70	19.73	19.72	19.72	39.96	39.94	39.92	39.94
43	19.79	19.75	19.84	19.79	39.73	39.83	39.74	39.77
44	19.92	19.82	19.87	19.87	39.78	39.82	39.71	39.77
45	19.68	19.60	19.71	19.66	39.68	39.69	39.74	39.70
46	19.78	19.82	19.84	19.81	39.68	39.68	39.72	39.69
47	19.79	19.74	19.71	19.75	39.64	39.67	39.64	39.65
48	19.61	19.60	19.57	19.59	39.70	39.69	39.65	39.68
49	19.75	19.68	19.71	19.71	39.70	39.69	39.71	39.70
50	19.72	19.72	19.71	19.72	39.67	39.62	39.65	39.65
51	19.77	19.80	19.74	19.77	39.91	39.91	39.90	39.91
52	19.79	19.81	19.78	19.79	39.76	39.83	39.79	39.79
53	19.56	19.48	19.90	19.65	39.92	39.91	39.91	39.92
54	19.75	19.73	19.73	19.74	39.65	39.71	39.70	39.69
55	19.79	19.79	19.80	19.79	39.85	39.87	39.86	39.86
56	19.79	19.78	19.80	19.79	39.73	39.71	39.74	39.73
57	19.74	19.73	19.67	19.71	39.89	39.92	39.90	39.90
58	19.61	19.58	19.64	19.61	39.74	39.75	39.68	39.73
59	19.71	19.68	19.71	19.70	39.87	39.88	39.89	39.88

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

ชั้นที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)				ขนาดความยาว (L)			
	d _{low}	d _{Center}	d _{Hight}	D	l ₁	l ₂	l ₂	L
60	20.05	19.99	19.91	19.98	39.73	39.71	39.78	39.74
61	19.61	19.64	19.50	19.58	39.96	39.90	39.93	39.93
62	19.65	19.60	19.64	19.63	39.71	39.78	39.71	39.73
63	19.79	19.75	19.65	19.73	39.88	39.87	39.87	39.87
64	20.11	20.03	19.93	20.02	39.76	39.78	39.81	39.78
65	19.58	19.59	19.64	19.60	39.91	39.88	39.90	39.90
66	19.61	19.69	19.68	19.66	39.79	39.85	39.67	39.77
67	19.78	19.83	19.79	19.80	39.92	39.96	39.94	39.94
68	19.88	19.89	19.80	19.85	39.73	39.77	39.74	39.74
69	20.12	20.02	19.88	20.01	39.76	39.72	39.72	39.73
70	19.60	19.62	19.73	19.65	39.73	39.73	39.76	39.74
71	19.85	19.82	19.83	19.83	39.71	39.72	39.79	39.74
72	19.70	19.72	19.77	19.73	39.72	39.69	39.68	39.70
73	19.67	19.67	19.65	19.67	39.69	39.74	39.74	39.72
74	19.64	19.70	19.71	19.68	39.70	39.69	39.70	39.70
75	19.74	19.78	19.84	19.79	39.69	39.69	39.69	39.69
76	19.88	19.86	19.68	19.80	39.93	39.92	39.94	39.93
77	19.77	19.75	19.79	19.77	39.77	39.76	39.73	39.75
78	19.60	19.54	19.57	19.57	39.93	39.93	39.96	39.94
79	19.64	19.63	19.60	19.63	39.76	39.70	39.74	39.74
80	19.89	19.95	19.92	19.92	39.90	39.91	39.89	39.90
81	19.85	19.86	19.82	19.85	39.67	39.68	39.70	39.68
82	19.68	19.68	19.65	19.67	39.87	39.88	39.88	39.87
83	19.66	19.60	19.59	19.62	39.65	39.64	39.64	39.64
84	19.93	19.89	19.68	19.83	39.90	39.90	39.90	39.90
85	20.11	20.14	20.02	20.09	39.80	39.74	39.71	39.75
86	19.60	19.64	19.61	19.62	39.91	39.94	39.90	39.92

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

ชั้นที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)				ขนาดความยาว (L)			
	d_{low}	d_{Center}	d_{High}	D	l_1	l_2	l_3	L
87	19.91	19.71	19.58	19.73	39.69	39.74	39.65	39.69
88	19.85	19.86	19.84	19.85	39.90	39.90	39.88	39.89
89	20.01	20.03	20.00	20.02	39.73	39.72	39.74	39.73
90	19.59	19.58	19.60	19.59	39.90	39.91	39.92	39.91
91	19.69	19.61	19.54	19.61	39.66	39.66	39.70	39.67
92	19.80	19.75	19.67	19.74	39.91	39.90	39.94	39.92
93	19.94	19.92	19.89	19.91	39.70	39.72	39.60	39.68
94	20.04	20.06	19.93	20.01	39.71	39.75	39.72	39.72
95	19.72	19.73	19.75	19.74	39.72	39.69	39.72	39.71
96	19.90	19.87	19.84	19.87	39.74	39.76	39.76	39.75
97	19.83	19.81	19.84	19.83	39.71	39.72	39.77	39.73
98	19.79	19.79	19.82	19.80	39.70	39.68	39.69	39.69
99	19.80	19.79	19.79	19.79	39.75	39.83	39.82	39.80
100	19.86	19.85	19.80	19.84	39.74	39.72	39.69	39.72
	$\bar{Y}$ ของ D			19.755	$\bar{Y}$ ของ L			39.811

ผลจากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA) ดังแสดงตารางที่ 3-5 คือค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) = 19.755 มม. และค่าขนาดความยาว (L) = 39.811 มม. จากนั้นข้อมูลที่ได้รับนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนทดสอบมากที่สุด

ตารางที่ 3-6 ผลสรุปการจัดเตรียมการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA

ข้อมูลในการทดลองสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA	
ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ	- ชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดที่ 20 มม. และความยาว 40 มม. - ชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดที่ 26 มม. และความยาว 57 มม.
เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้	รุ่น BBC 3040 V.2022
วัสดุที่ใช้	เส้นพลาสติก PLA

ตารางที่ 3-6 (ต่อ)

ข้อมูลในการทดลองสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA	
พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับพิจารณา	-ความหนาชั้น (LH) -ความเร็วในการพิมพ์ (SP) -อุณหภูมิหัวฉีด (TP) -ความหนาผนัง (TW)
ค่าตอบสนองที่สนใจ	-ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) -ขนาดความยาว (L)

ดังแสดงตารางที่ 3-6 ชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 20 มม. และความยาว 40 มม. ส่วนชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 26 มม. และความยาว 57 มม. ที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC 3040 V.2022 โดยพิจารณาพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) อุณหภูมิหัวฉีด (TP) และความหนาผนัง (TW) ส่วนค่าตอบสนองที่สนใจ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และขนาดความยาว (L)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA และหาการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ PLA

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ คือการนำค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) = 19.755 มม. และขนาดความยาว (L) = 39.811 มม. ที่ได้รับจากตารางที่ 3-5 มาวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการทั้ง 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) อุณหภูมิหัวฉีด (TP) และความหนาผนัง (TW) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนทดสอบโดยใช้โปรแกรม Minitab เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการการวิเคราะห์ทางสถิติในกรณีที่มีข้อมูลจำนวนมาก โดยสรุปตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตัวแปรอิสระ หรือพารามิเตอร์ (X)	ตัวแปรตาม หรือ ค่าตอบสนอง (Y)
LH = ความหนาชั้น SP = ความเร็วในการพิมพ์ TP = อุณหภูมิหัวฉีด TW = ความหนาผนัง	D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นส่วนทดสอบ L = ขนาดความยาวของชิ้นส่วนทดสอบ

วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ วิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) โดยกำหนดรูปแบบสมการถดถอยคือ สมการถดถอยลำดับที่ 2 (Second-Order Regression Model) เพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์ดังแสดงสมการที่ 3-4

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 - \beta_2 X_2 - \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 - \beta_{44} X_4^2 - \beta_{12} (X_1 X_2) - \beta_{13} (X_1 X_3) + \beta_{14} (X_1 X_4) - \beta_{23} (X_2 X_3) - \beta_{24} (X_2 X_4) - \beta_{34} (X_3 X_4) \quad (3-4)$$

กำหนดให้	Y	= ค่าตอบสนองของความคลาดเคลื่อนของขนาด (D) และ (L)
	β_0	= ค่าคงที่ของขนาด (D) และ (L) เมื่อทุกค่ามีค่าเท่ากับ 0
	$\beta_1 X_1$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาชั้น (LH)
	$\beta_2 X_2$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วในการพิมพ์ (SP)
	$\beta_3 X_3$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิหัวฉีด (TP)
	$\beta_4 X_4$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาผนัง (TW)
	$\beta_{11} X_1^2$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาชั้นกำลังสอง (LH ²)
	$\beta_{33} X_3^2$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วในการพิมพ์กำลังสอง (SP ²)
	$\beta_{44} X_4^2$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาผนังกำลังสอง (TW ²)
	$\beta_{12} (X_1 X_2)$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาชั้น (LH) กับความเร็วในการพิมพ์ (SP)
	$\beta_{13} (X_1 X_3)$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาชั้น (LH) กับอุณหภูมิหัวฉีด (TP)
	$\beta_{14} (X_1 X_4)$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาชั้น (LH) กับความหนาผนัง (TW)
	$\beta_{23} (X_2 X_3)$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วในการพิมพ์ (SP) กับอุณหภูมิหัวฉีด (TP)
	$\beta_{24} (X_2 X_4)$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วในการพิมพ์ (SP) กับความหนาผนัง (TW)
	$\beta_{34} (X_3 X_4)$	= ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิหัวฉีด (TP) กับความหนาผนัง (TW)

ดังสมการที่แสดงเป็นรูปแบบสมการถดถอยที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งผลลัพธ์การวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 ผลลัพธ์ กำหนดให้ค่าความเหมาะสมของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องมากกว่า 80% ขึ้นไป หากมีค่าน้อยกว่า 80% หมายความว่าข้อมูลที่ได้รับไม่มีความน่าเชื่อถือเพียงพอ ต้องทำการแก้ไขโดยการเพิ่มจำนวนการทดลอง หรือปรับปรุงวิธีการเก็บข้อมูลให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น เพื่อเพิ่มค่าความเหมาะสมของข้อมูลให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ส่วนผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ถูกกำหนดให้ระดับนัยสำคัญ (p-value) ของแต่ละพารามิเตอร์คือ 0.05 หากระดับนัยสำคัญ (p-value) ของพารามิเตอร์มีค่าน้อยกว่า 0.05 พารามิเตอร์นั้นจะถือว่ามีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดขึ้นส่วนทดสอบแสดงผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

3.4.1 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วน PLA

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ข้อมูลถูกแสดงออกมาในรูปแบบของสมการถดถอย (Regression Model) โดยแทนค่าตัวเลขลงในสมการที่ 3-4 จะได้ผลลัพธ์แสดงดังสมการที่ 3-5 เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ X_1 = ความหนาชั้น (LH) X_2 = ความเร็วในการพิมพ์ (SP) X_3 = อุณหภูมิหัวฉีด (TP) และ X_4 = ความหนาผนัง (TW) กับค่าตอบสนอง (Y) = ความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) โดยมีระดับความเหมาะสมของข้อมูลหรือ R^2 คือ 80.21% นั้นหมายความว่าข้อมูลทั้งหมดมีความน่าเชื่อถือ

$$D = 19.7955 + 0.02941(LH) - 0.11927(SP) - 0.01407(TP) + 0.00572(TW) + 0.0012(LH \times LH) + 0.0179(SP \times SP) + 0.0061(TP \times TP) - 0.0808(TW \times TW) - 0.02251(LH \times SP) - 0.00927(LH \times TP) + 0.03938(LH \times TW) - 0.01834(SP \times TP) - 0.02437(SP \times TW) - 0.00341(TP \times TW) \quad (3-5)$$

โดยที่ D คือค่าตอบสนอง (ความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) LH คือความหนาชั้น SP คือความเร็วในการพิมพ์ TP คืออุณหภูมิหัวฉีด และ TW คือความหนาผนัง ซึ่งอธิบายสมการออกมาดังนี้

3.4.1.1 ค่า 19.7955 คือค่าคงที่ของ D เมื่อทุกตัวแปรเป็น 0

3.4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear terms) กรณีที่ตัวแปรอื่นคงที่

3.4.1.2.1 ค่า 0.02941(LH): การเพิ่มขึ้นของ LH ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D เพิ่มขึ้น 0.02941 หน่วย

3.4.1.2.2 ค่า -0.11927(SP) : การเพิ่มขึ้นของ SP ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D ลดลง 0.11927 หน่วย

3.4.1.2.3 ค่า -0.01407(TP) : การเพิ่มขึ้นของ TP ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D ลดลง 0.01407 หน่วย

3.4.1.2.4 ค่า 0.00572(TW) : การเพิ่มขึ้นของ TW ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D เพิ่มขึ้น 0.00572 หน่วย

3.4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง (Quadratic terms)

3.4.1.3.1 ค่า 0.0012(LH* LH) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ LH น้อยมากแสดงว่าแนวโน้มของ D มีลักษณะเส้นโค้งน้อยมาก

3.4.1.3.2 ค่า 0.0179(SP* SP) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ SP^2 มีแสดงถึงค่าแนวโน้มของ D มีลักษณะเส้นโค้งน้อยมาก

3.4.1.3.3 ค่า 0.0061(TP* TP) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ TP^2 มีค่าน้อยแสดงว่าแนวโน้มของ D มีลักษณะเส้นโค้งน้อยมาก

3.4.1.3.4 ค่า $-0.0808(TW*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ TW^2 มีค่าติดลบและมีค่ามากที่สุดแสดงว่าหากเพิ่ม TW แนวโน้มของ D มีลักษณะเส้นโค้งในทิศทางลดลง

3.4.1.4 ผลของปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่มีผลต่อค่า D

3.4.1.4.1 ค่า $-0.02251(LH*SP)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*SP$ มีค่าติดลบแสดงว่าหากเพิ่มพร้อมกันส่งผลให้ค่า D ลดลง

3.4.1.4.2 ค่า $-0.00927(LH*TP)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*TP$ มีค่าติดลบแสดงว่าหากเพิ่มพร้อมกันส่งผลให้ค่า D ลดลงเพียงเล็กน้อย

3.4.1.4.3 ค่า $0.03938(LH*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*TP$ มีค่าบวกแสดงว่าหากเพิ่มพร้อมกันส่งผลให้ค่า D เพิ่มขึ้นอย่างมาก

3.4.1.4.4 ค่า $-0.01834(SP*TP)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $SP*TP$ มีค่าติดลบแสดงว่าหากเพิ่มพร้อมกันมีผลต่อค่า D ลดลง

3.4.1.4.5 ค่า $-0.02437(SP*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $SP*TW$ มีค่าติดลบแสดงว่าหากเพิ่มพร้อมกันส่งผลให้ค่า D ลดลง

3.4.1.4.6 ค่า $-0.00341(TP*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $TP*TW$ มีค่าน้อยมากแสดงว่าหากเพิ่มพร้อมกันมีผลต่อค่า D น้อยมาก

ส่วนผลลัพธ์การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ทั้งหมด 3 รูปแบบได้แก่ รูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) คือความสัมพันธ์ 2 ตัวแปร ระหว่างพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง โดยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่รูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Square) มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สม่ำเสมอ และมีความซับซ้อน ส่วนรูปแบบสุดท้ายคือรูปแบบความสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) คือรูปแบบความสัมพันธ์โดยมีตัวแปรร่วม 2 ตัว ที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง 1 ตัว โดยวิธีการคำนวณหาความแปรปรวน (ANOVA) มีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

3.4.1.5 การคำนวณหาค่า Degrees of Freedom (df) สำหรับ Central Composite Design (CCD) ที่มีปัจจัย 4 พารามิเตอร์

Degrees of Freedom (df) คือ จำนวนค่าทางสถิติที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวน (ANOVA) และสมการถดถอย (Regression) ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน และหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Squares, MS) ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณถูกการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) และทำซ้ำทั้งหมด 4 ครั้ง โดยแสดงข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ Degrees of Freedom (df) ทั้งหมด

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ Degrees of Freedom (df)	
ปัจจัย หรือพารามิเตอร์ (Factor, k)	4
จำนวนจุดแฟกทอเรียล (Factorial Points, 2^k)	64
จำนวนจุดแกนกลาง (Axial Points, $2k$)	32
จำนวนจุดศูนย์กลาง (Center Points)	4

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้รับคำนวณหาค่า Degrees of Freedom (df) สำหรับแต่ละรูปแบบความสัมพันธ์ได้แก่ รูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) รูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Square) และรูปแบบความสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) รวมถึงค่า df สำหรับค่าความผิดพลาด (Error) ค่า df สำหรับผลรวม (Total) โดยมีขั้นตอนดังนี้

คำนวณค่าหาข้อมูลทั้งหมด (N) โดยใช้สมการที่ 3-6

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$\begin{aligned}
 N &= \text{Factorial Points} + \text{Axial Points} + \text{Center Points} \quad (3-6) \\
 \text{กำหนด } N &= \text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด} \\
 \text{Factorial Points} &= \text{จำนวนจุดแฟกทอเรียล} \\
 \text{Axial Points} &= \text{จำนวนจุดแกนกลาง} \\
 \text{Center Points} &= \text{จำนวนจุดศูนย์กลาง} \\
 \text{แทนค่า } N &= 64 + 32 + 4 \\
 &= 100
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจำนวนข้อมูลทั้งหมด (N) ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 100 โดยที่รูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) มีพารามิเตอร์ หรือปัจจัย (k) ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ดังนั้นค่า Degrees of Freedom (df_L) สำหรับ Linear มีค่าเท่ากับ 4 รูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Square) มีพารามิเตอร์ หรือปัจจัย (k) ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ มีค่า Degrees of Freedom (df_S) สำหรับ Square มีค่าเท่ากับ 4 และรูปแบบความสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) ต้องใช้สมการที่ 3-7 เพื่อคำนวณหาค่า Degrees of Freedom (df) สำหรับ 2-Way Interaction

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$\begin{aligned}
 df_L &= \frac{k(k-1)}{2} \quad (3-7) \\
 \text{โดยที่ } k &= \text{จำนวนพารามิเตอร์} \\
 \text{แทนค่า } df_L &= \frac{4(4-1)}{2} \\
 df_L &= 6
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า Degrees of Freedom (df) สำหรับ 2-Way Interaction มีค่าเท่ากับ 6
ค่า Degrees of Freedom (df_E) สำหรับค่าคงที่ (Intercept) มีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากมีค่าเพียงค่าเดียวที่มีอยู่ในสมการ

ค่า Degrees of Freedom (df_E) สำหรับค่าความผิดพลาด (Error) ต้องใช้สมการที่ 3-8

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$df_E = N - (df_L + df_S + df_I) \quad (3-8)$$

โดยที่ df_E = Degrees of Freedom สำหรับค่าความผิดพลาด (Error)

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

df_L = Degrees of Freedom สำหรับ Linear

df_S = Degrees of Freedom สำหรับ Square

df_I = Degrees of Freedom สำหรับ 2-Way Interaction

แทนค่า $df_E = 100 - (4 + 6 + 4 + 1)$

$$df_E = 85$$

ค่า Degrees of Freedom (df_T) สำหรับผลรวม (Total) ต้องใช้สมการที่ 3-9

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$df_T = N - 1 \quad (3-9)$$

โดยที่ df_T = Degrees of Freedom สำหรับผลรวม (Total)

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

แทนค่า $df_T = 100 - 1$

$$df_T = 99$$

ตารางที่ 3-9 ผลการคำนวณค่า Degrees of Freedom ในตารางค่าความแปรปรวน (ANOVA)

พารามิเตอร์	df
Linear	4
ความหนาชั้น (LH)	1
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	1
อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	1
ความหนาผนังชั้น (TW)	1
Square	4
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น (LH^2)	1
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์ (SP^2)	1

ตารางที่ 3-9 (ต่อ)

พารามิเตอร์	df
อุณหภูมิหัวฉีด x อุณหภูมิหัวฉีด (TP^2)	1
ความหนาแน่นชั้น x ความหนาแน่นชั้น (TW^2)	1
2-Way Interaction	6
ความหนาแน่นชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LH x SP)	1
ความหนาแน่นชั้น x อุณหภูมิหัวฉีด (LH x TP)	1
ความหนาแน่นชั้น x ความหนาแน่น (LH x TW)	1
ความเร็วในการพิมพ์ x อุณหภูมิหัวฉีด (SP x TP)	1
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาแน่น (SP x TW)	1
อุณหภูมิหัวฉีด x ความหนาแน่น (TP x TW)	1
Error	85
Total	99

จากตารางที่ 3-9 คือผลลัพธ์ของการคำนวณค่า Degrees of Freedom ทั้งหมด ซึ่งในแต่ละผลลัพธ์ของค่า df ของแต่ละรูปแบบสัมพันธ์จะมีจำนวนของพารามิเตอร์ตามจำนวนของค่า df ที่คำนวณออกมาตามที่แสดงข้างต้น

3.4.1.6 การคำนวณหาผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares, SS) คือค่าที่ใช้วัดค่าความแปรปรวนของข้อมูลทางสถิติ โดยใช้หลักการหาผลรวมกำลังสองของค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่คาดการณ์ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญในตารางค่าความแปรปรวน (ANOVA) และสมการถดถอย (Regression Model) การคำนวณหาผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares, SS) จะคำนวณหาทุกปัจจัยที่แสดงดังตารางที่ 3-8 โดยมีวิธีการคำนวณแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้

3.4.1.6.1 การคำนวณผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Squares, Adj SST) โดยใช้สมการที่ 3-10 จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$\text{Adj SST} = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (3-10)$$

กำหนดให้

Y_i = ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ทั้ง 100 ชิ้น

$\bar{Y}$ = ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)

แทนค่า

$$\text{Adj SST} = (19.91 - 19.755)^2 + (19.90 - 19.755)^2 + (19.72 - 19.755)^2 + (19.61 - 19.755)^2 + \dots + (19.84 - 19.755)^2$$

$$\text{Adj SST} = 1.7370$$

ค่า Y_i คือค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ที่ได้จากการวัดขนาดชิ้นส่วน (D) ทั้ง 100 ชิ้น ดังตารางที่ 5 และค่า $\bar{Y}$ คือค่าเฉลี่ยทั้งหมด จากนั้นนำค่าที่ได้รับแทนลงในสมการที่ 3-9 แต่เนื่องจากในการคำนวณมีจำนวนค่า Y_i มากเกินไปทำให้การคำนวณเพื่อพิสูจน์สมการแสดงไม่สมบูรณ์ ดังนั้นสรุปผลรวมกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Squares, SST) มีค่าเท่ากับ 1.7370

3.4.1.6.2 การคำนวณหาผลรวมกำลังสองของโมเดล (Regression Sum of Squares ,SSR) เป็นการหาผลรวมของโมเดลแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) รูปแบบความสัมพันธ์กำลังสอง (Square) และรูปแบบความสัมพันธ์สองทาง (2 Way - Interaction) เพื่อหาความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่คาดการณ์ โดยใช้สมการที่ 3-11

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$\text{SSR} = \sum (Y_i - Y_{\text{predicted}})^2 \quad (3-11)$$

กำหนดให้ SSR = ผลรวมกำลังสองของโมเดล

Y_i = ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ทั้ง 100 ชิ้น

$Y_{\text{predicted}}$ = ค่าที่คาดการณ์ด้วยสมการถดถอย (Regression Model)

ซึ่งค่า $Y_{\text{predicted}}$ คือค่าที่ได้จากการคาดการณ์จากสมการถดถอย (Regression Model) โดยการคำนวณด้วยตัวเลข +1 0 -1 จากตารางการออกแบบการทดลองตารางที่ 3-4 แทนค่าลงในสมการถดถอย (Regression Model) ที่แสดงดังสมการที่ 3-2 ซึ่งได้มีการยกตัวอย่างโดยการดึงข้อมูลจากตารางที่ 3-4 บางส่วนมาคำนวณเพื่อแสดงวิธีการคำนวณดังตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 ตัวอย่างข้อมูลจากตารางที่ 3-4 ที่ใช้ในการคำนวณหา $Y_{\text{predicted}}$

No	LH	SP	TP	TW	LH ²	SP ²	TP ²	TW ²	LH*SP	LH*TP	LH*TW	SP*TP	SP*TW	TP*TW
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	+1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
3	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1

จากนั้นนำข้อมูลดังตารางข้างต้นแทนลงในสมการถดถอย (Regression Model) เพื่อหาค่าคาดการณ์เพื่อใช้คำนวณหาผลรวมกำลังสองของโมเดลดังนี้

แทนค่าสมการ แถวที่ 1 : $Y_{\text{predicted}} (D_{\text{row1}}) = 19.7955 + 0.02941(-1) - 0.11927(-1) - 0.01407(-1) + 0.00572(-1) + 0.0012(1) + 0.0179(1) + 0.0061(1) - 0.0808(1) - 0.02251(1) - 0.00927(1) + 0.03938(1) - 0.01834(1) - 0.02437(1) - 0.00341(1)$

$$Y_{\text{predicted}} (D_{\text{row1}}) = \underline{19.79959}$$

แทนค่าสมการแถวที่ 2 : $Y_{\text{predicted}}(D_{\text{row}2}) = 19.7955 + 0.02941(1) - 0.11927(-1) - 0.01407(-1) + 0.00572(-1) + 0.0012(1) + 0.0179(1) + 0.0061(1) - 0.0808(1) - 0.02251(-1) - 0.00927(1) + 0.03938(1) - 0.01834(-1) - 0.02437(-1) - 0.00341(1)$

$$Y_{\text{predicted}}(D_{\text{row}2}) = \underline{19.84321}$$

แทนค่าสมการแถวที่ 3 : $Y_{\text{predicted}}(D_{\text{row}3}) = 19.7955 + 0.02941(-1) - 0.11927(1) - 0.01407(-1) + 0.00572(-1) + 0.0012(1) + 0.0179(1) + 0.0061(1) - 0.0808(1) - 0.02251(-1) - 0.00927(-1) + 0.03938(-1) - 0.01834(1) - 0.02437(1) - 0.00341(1)$

$$Y_{\text{predicted}}(D_{\text{row}3}) = \underline{19.69149}$$

จากผลการคำนวณที่แสดงเป็นเพียงส่วนหนึ่งของตารางที่ 3-4 เท่านั้น เนื่องจากข้อมูลในการทดลองมีทั้งหมด 100 ชิ้น ในการคำนวณหา $Y_{\text{predicted}}(D)$ ต้องคำนวณทั้งหมด ดังนั้นจึงสรุปผลการคำนวณทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3-9 เป็นผลลัพธ์การนำข้อมูลแทนค่าลงในสมการถดถอย โดยที่ LH คือความหนาชั้น SP คือความเร็วในการพิมพ์ TP คืออุณหภูมิหัวฉีด และ TW คือความหนาผนัง ส่วนผลจากการเก็บข้อมูล ค่า $Y_i(D)$ คือข้อมูลที่ได้รับจริง หรือค่าที่วัดขนาดของชิ้นส่วน และค่า $Y_{\text{predicted}}(D)$ คือค่าคาดการณ์จากผลลัพธ์ด้วยการคำนวณด้วยสมการถดถอยตามตัวอย่างการคำนวณข้างต้น

ตารางที่ 3-11 ผลลัพธ์การคำนวณค่า $Y_{\text{predicted}}$ ทั้งหมดด้วยสมการถดถอย (Regression Model)

จำนวน	LH	SP	TP	TW	$Y_i(D)$	$Y_{\text{predicted}}(D)$
1	-1	-1	-1	-1	19.91	19.79959
2	+1	-1	-1	-1	19.90	19.84321
3	-1	+1	-1	-1	19.72	19.69149
4	+1	+1	-1	-1	19.61	19.64507
5	-1	-1	+1	-1	19.85	19.83349
6	+1	-1	+1	-1	19.81	19.84003
7	-1	+1	+1	-1	19.65	19.65203
8	+1	+1	+1	-1	19.57	19.56853
9	-1	-1	-1	+1	19.80	19.78783
10	+1	-1	-1	+1	19.87	19.98897
11	-1	+1	-1	+1	19.65	19.58225
12	+1	+1	-1	+1	19.75	19.69335
13	-1	-1	+1	+1	19.71	19.80809

ตารางที่ 3-11 (ต่อ)

จำนวน	LH	SP	TP	TW	Y_i (D)	$Y_{\text{predicted}}$ (D)
14	+1	-1	+1	+1	20.02	19.97215
15	-1	+1	+1	+1	19.52	19.52915
16	+1	+1	+1	+1	19.44	19.60317
17	-1	0	0	0	19.85	19.76729
18	+1	0	0	0	19.71	19.82611
19	0	-1	0	0	19.91	19.93267
20	0	+1	0	0	19.67	19.69413
21	0	0	-1	0	19.79	19.81567
22	0	0	+1	0	19.81	19.78753
23	0	0	0	-1	19.71	19.70898
24	0	0	0	+1	19.77	19.72042
25	0	0	0	0	19.80	19.79550
26	-1	-1	-1	-1	19.80	19.79959
27	+1	-1	-1	-1	19.91	19.84321
28	-1	+1	-1	-1	19.65	19.69149
29	+1	+1	-1	-1	19.72	19.64507
30	-1	-1	+1	-1	19.82	19.83349
31	+1	-1	+1	-1	19.79	19.84003
32	-1	+1	+1	-1	19.65	19.65203
33	+1	+1	+1	-1	19.53	19.56853
34	-1	-1	-1	+1	19.82	19.78783
35	+1	-1	-1	+1	19.88	19.98897
36	-1	+1	-1	+1	19.54	19.58225
37	+1	+1	-1	+1	19.67	19.69335
38	-1	-1	+1	+1	19.76	19.80809
39	+1	-1	+1	+1	20.07	19.97215
40	-1	+1	+1	+1	19.46	19.52915
41	+1	+1	+1	+1	19.55	19.60317

ตารางที่ 3-11 (ต่อ)

จำนวน	LH	SP	TP	TW	Y_i (D)	$Y_{\text{predicted}}$ (D)
42	-1	0	0	0	19.72	19.76729
43	+1	0	0	0	19.79	19.82611
44	0	-1	0	0	19.87	19.93267
45	0	+1	0	0	19.66	19.69413
46	0	0	-1	0	19.81	19.81567
47	0	0	+1	0	19.75	19.78753
48	0	0	0	-1	19.59	19.70898
49	0	0	0	+1	19.71	19.72042
50	0	0	0	0	19.72	19.79550
51	-1	-1	-1	-1	19.77	19.79959
52	+1	-1	-1	-1	19.79	19.84321
53	-1	+1	-1	-1	19.65	19.69149
54	+1	+1	-1	-1	19.74	19.64507
55	-1	-1	+1	-1	19.79	19.83349
56	+1	-1	+1	-1	19.79	19.84003
57	-1	+1	+1	-1	19.71	19.65203
58	+1	+1	+1	-1	19.61	19.56853
59	-1	-1	-1	+1	19.70	19.78783
60	+1	-1	-1	+1	19.98	19.98897
61	-1	+1	-1	+1	19.58	19.58225
62	+1	+1	-1	+1	19.63	19.69335
63	-1	-1	+1	+1	19.73	19.80809
64	+1	-1	+1	+1	20.02	19.97215
65	-1	+1	+1	+1	19.60	19.52915
66	+1	+1	+1	+1	19.66	19.60317
67	-1	0	0	0	19.80	19.76729
68	+1	0	0	0	19.85	19.82611
69	0	-1	0	0	20.01	19.93267

ตารางที่ 3-11 (ต่อ)

จำนวน	LH	SP	TP	TW	Y_i (D)	$Y_{\text{predicted}}$ (D)
70	0	+1	0	0	19.65	19.69413
71	0	0	-1	0	19.83	19.81567
72	0	0	+1	0	19.73	19.78753
73	0	0	0	-1	19.67	19.70898
74	0	0	0	+1	19.68	19.72042
75	0	0	0	0	19.79	19.79550
76	-1	-1	-1	-1	19.80	19.79959
77	+1	-1	-1	-1	19.77	19.84321
78	-1	+1	-1	-1	19.57	19.69149
79	+1	+1	-1	-1	19.63	19.64507
80	-1	-1	+1	-1	19.92	19.83349
81	+1	-1	+1	-1	19.85	19.84003
82	-1	+1	+1	-1	19.67	19.65203
83	+1	+1	+1	-1	19.62	19.56853
84	-1	-1	-1	+1	19.83	19.78783
85	+1	-1	-1	+1	20.09	19.98897
86	-1	+1	-1	+1	19.62	19.58225
87	+1	+1	-1	+1	19.73	19.69335
88	-1	-1	+1	+1	19.85	19.80809
89	+1	-1	+1	+1	20.02	19.97215
90	-1	+1	+1	+1	19.59	19.52915
91	+1	+1	+1	+1	19.61	19.60317
92	-1	0	0	0	19.74	19.76729
93	+1	0	0	0	19.91	19.82611
94	0	-1	0	0	20.01	19.93267
95	0	+1	0	0	19.74	19.69413
96	0	0	-1	0	19.87	19.81567
97	0	0	+1	0	19.83	19.78753

ตารางที่ 3-11 (ต่อ)

จำนวน	LH	SP	TP	TW	$Y_i(D)$	$Y_{predicted}(D)$
98	0	0	0	-1	19.80	19.70898
99	0	0	0	+1	19.79	19.72042
100	0	0	0	0	19.84	19.79550

จากตารางที่ 3-11 นำข้อมูลของค่า $Y_i(D)$ และค่า $Y_{predicted}(D)$ คำนวณหาผลรวมกำลังสองของโมเดล (Regression Sum of Squares ,SSR) โดยใช้สมการที่ 3-11

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$SSR = \sum (Y_i(D) - Y_{predicted}(D))^2 \quad (3-11)$$

$$\text{แทนค่า SSR} = (19.91-19.79959)^2 + (19.90-19.84321)^2 + (19.72-19.69149)^2 + (19.61-19.64507)^2 + \dots + (19.84-19.79550)^2$$

$$SSR = 0.34382$$

ดังนั้นผลสรุปของผลรวมกำลังสองของโมเดลเท่ากับ 0.34382 ซึ่งผลรวมกำลังสองของโมเดลที่แสดง คือผลรวมแสดงความแตกต่างระหว่างค่าจริง และค่าที่คาดการณ์ที่ได้รับจากสมการถดถอย (Regression Model) แบบเต็มรูปแบบ โดยคำนวณตามลำดับของตัวแปรที่เพิ่มเข้าไปในสมการเท่านั้น หากต้องการคำนวณโดยพิจารณาผลของทุกตัวแปรในโมเดลสมการถดถอย ต้องคำนวณหาค่า Adjusted Sum of Squares (Adj SS) ของแต่ละรูปแบบความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ โดยการนำค่า SSR ที่ได้รับมาคำนวณคำนวณหาค่า Adj SS ด้วยสมการที่ 3-12

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$Adj SS_x = SSR (\text{Reduced } x) - SSR \quad (3-12)$$

โดยที่ $Adj SS_x$ = ค่าที่ใช้วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

SSR = ผลรวมกำลังสองของโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

SSR (Reduced x) = ผลรวมกำลังสองของโมเดลกรณีตัดปัจจัย x ออกจากสมการ

โดยการการคำนวณหา Adj SS เพื่อคำนวณหาความแปรปรวนของปัจจัยที่ต้องการ โดยมีตัวอย่างการคำนวณ ได้แก่ การคำนวณหาค่า Adj SS ของ LH ซึ่งต้องหาค่า $Y_{predicted}(D)$ ทั้ง 100 จักรณที่ตัด LH ($0.02941 \times LH$) ออกจากสมการถดถอยก่อน (Regression Model) ดังแสดงสมการที่ 3-13 ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการถดถอยแบบลดรูป (reduced) ที่ตัดปัจจัย LH ออกจากสมการ

$$Y_{predicted}(D) = 19.7955 - 0.11927(SP) - 0.01407(TP) + 0.00572(TW) + 0.0012(LH \times LH) + 0.0179(SP \times SP) + 0.0061(TP \times TP) - 0.0808(TW \times TW) - 0.02251(LH \times SP) - 0.00927(LH \times TP) + 0.03938(LH \times TW) - 0.01834(SP \times TP) - 0.02437(SP \times TW) - 0.00341(TP \times TW) \quad (3-13)$$

หลังจากคำนวณหาค่า $Y_{\text{predicted}} (D)$ ด้วยสมการถดถอยแบบลดรูปกรณีที่ตัด LH ออกจากสมการถดถอย จากนั้นคำนวณหา Adj SS ของ LH โดยใช้สมการที่ 3-10 คำนวณใหม่อีกครั้ง ซึ่งผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 3-12 จากนั้นคำนวณค่า Adjusted Sum of Squares (Adj SS) ของ LH โดยแทนค่า SSR (Reduced LH) และ SSR ลงในสมการที่ 3-12

ตารางที่ 3-12 ผลลัพธ์การคำนวณหาค่า SSM

สมการถดถอย (Regression Model)	ผลลัพธ์การคำนวณ
SSR	0.34382
SSR (Reduced LH)	0.40610

โดยที่ $\text{Adj SS}_{\text{LH}} = \text{SSR (Reduced LH)} - \text{SSM} \quad (3-12)$

แทนค่า $\text{Adj SS}_{\text{LH}} = 0.40610 - 0.34382$

$\text{Adj SS}_{\text{LH}} = 0.06228$

ดังนั้นผลลัพธ์ที่แสดงเป็นค่าตัวเลขของ $\text{Adj SS}_{\text{LH}}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.06228 ส่วนปัจจัยอื่นๆ ใช้วิธีเดียวกันเพียงตัดปัจจัยที่ต้องการหาค่า Adj SS ออกจากสมการถดถอยออกก่อน ซึ่งผลลัพธ์จะถูกแสดงดังตารางที่ 3-13 เป็นผลการคำนวณหาค่า Adj SS ทุกปัจจัย โดยแบ่งแยกเป็นกลุ่ม 3 รูปแบบ

ตารางที่ 3-13 ผลการคำนวณหาค่า Adj SSM ทุกปัจจัยสำหรับวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

พารามิเตอร์	Adj SS
ความหนาชั้น (LH)	0.06228
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	1.02414
อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	0.01425
ความหนาผนังชั้น (TW)	0.00235
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น (LH^2)	0.00001
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์ (SP^2)	0.00327
อุณหภูมิหัวฉีด x อุณหภูมิหัวฉีด (TP^2)	0.00037
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น (TW^2)	0.06649
ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ ($\text{LH} \times \text{SP}$)	0.03242
ความหนาชั้น x อุณหภูมิหัวฉีด ($\text{LH} \times \text{TP}$)	0.00550
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง ($\text{LH} \times \text{TW}$)	0.09923
ความเร็วในการพิมพ์ x อุณหภูมิหัวฉีด ($\text{SP} \times \text{TP}$)	0.02154
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง ($\text{SP} \times \text{TW}$)	0.03801
อุณหภูมิหัวฉีด x ความหนาผนัง ($\text{TP} \times \text{TW}$)	0.00074

ตารางที่ 3-13 (ต่อ)

พารามิเตอร์	Adj SS
Adj SSR _(All)	1.39318

3.4.1.6.3 การหาผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน (Error Sum of Squares, SSE) หรือค่า Error เพื่อใช้ในการวัดค่าความแปรปรวนที่วัดค่าไม่ได้ ยิ่งค่า SSE มีค่าต่ำนั้น หมายความว่าโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลได้ดี การคำนวณหาค่า SSR จะใช้สมการที่ 3-14

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$\text{Adj SSE} = \text{Adj SST} - \text{Adj SSR}_{(All)} \quad (3-14)$$

กำหนดให้ Adj SSE = ผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน (SSR) หรือค่า Error

Adj SST = ผลรวมกำลังสองของทั้งหมด

Adj SSR = ผลรวมกำลังสองของโมเดลทุกปัจจัย

แทนค่า Adj SSE = 1.7370 - 1.39318

$$\text{Adj SSE} = 0.34382$$

ดังนั้นผลรวมของความคลาดเคลื่อน (Adj SSE) หรือค่า Error มีค่าเท่ากับ 0.34382 โดยสรุปผลดังตารางที่ 3-14

ตารางที่ 3-14 ผลการคำนวณหาค่า Adj SS ทั้งหมดในตารางความแปรปรวน (ANOVA)

พารามิเตอร์	df	Adj SS
Linear	4	1.10303
ความหนาชั้น (LH)	1	0.06228
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	1	1.02414
อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	1	0.01425
ความหนาผนังชั้น (TW)	1	0.00235
Square	4	0.09271
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น (LH ²)	1	0.00001
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์ (SP ²)	1	0.00327
อุณหภูมิหัวฉีด x อุณหภูมิหัวฉีด (TP ²)	1	0.00037
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น (TW ²)	1	0.06649
2-Way Interaction	6	0.19744
ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LH x SP)	1	0.03242
ความหนาชั้น x อุณหภูมิหัวฉีด (LH x TP)	1	0.00550

ตารางที่ 3-14 (ต่อ)

พารามิเตอร์	df	Adj SS
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW)	1	0.09923
ความเร็วในการพิมพ์ x อุณหภูมิหัวฉีด (SP x TP)	1	0.02154
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW)	1	0.03801
อุณหภูมิหัวฉีด x ความหนาผนัง (TP x TW)	1	0.00074
Error	85	0.34382
Total	99	1.73700

3.4.1.7 การคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square, Adj MS) ของค่าความแปรปรวนของปัจจัยในแต่ละส่วน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้สมการที่ 3-15

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$\text{Adj MS} = \frac{\text{Adj SS}}{\text{df}} \quad (3-15)$$

กำหนดให้

- Adj MS = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความแปรปรวนของปัจจัยในแต่ละส่วน
- Adj SS = ผลรวมกำลังสองของค่าความแปรปรวนของปัจจัยในแต่ละส่วน
- df = จำนวนค่าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ Mean Square of Regression (MSR) สำหรับทุกปัจจัยตามโมเดลสมการถดถอย และ Mean Square of Error (MSE) สำหรับค่าความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ ตัวอย่างเช่น MSR ของ linear มีค่า Adj SS เท่ากับ 1.10303 และมีค่า df เท่ากับ 4

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าลงในสมการที่ 3-15} \quad \text{Adj MSR}_{\text{Linear}} &= \frac{1.10303}{4} \\ \text{Adj MSR}_{\text{Linear}} &= 0.27576 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของ Linear ($\text{Adj MSR}_{\text{Linear}}$) มีค่าเท่ากับ 0.27576 ส่วนค่าอื่นๆ สามารถคำนวณได้วิธีเดียวกัน

3.4.1.8 การคำนวณค่าสถิติ (F-Value) สำหรับใช้ในการอธิบายในความแปรปรวน (ANOVA) มีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยใช้สมการที่ 3-16

จากสูตร (Montgomery, 2019)

$$\text{F-Value} = \frac{\text{MSR}}{\text{MSE}} \quad (3-16)$$

กำหนดให้

- F-Value = ค่าสถิติสำหรับการอธิบายในความแปรปรวน (ANOVA)

MSR = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของโมเดลสมการถดถอย (Resression)

MSE = ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error)

ตัวอย่างเช่นการหาค่า F-Value ของ Linear โดยมีค่าเฉลี่ยกำลังสองของโมเดลสมการถดถอย (Mean Square of Resression) ของ Linear มีค่าเท่ากับ 0.27576 และค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean Square of Error) มีค่าเท่ากับ 0.00404

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าลงในสมการที่ 3-16} \quad F\text{-Value} &= \frac{0.27576}{0.00404} \\ F\text{-Value} &= 68.17 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า F-Value ของ Linear มีค่าเท่ากับ 68.17 ซึ่งผลลัพธ์ที่แสดงเป็นส่วนหนึ่งของผลการคำนวณค่าความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทำการพิสูจน์สมการที่ใช้ในการคำนวณตรงตามผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ที่ได้รับจากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 3-15 กำหนดให้ระดับนัยสำคัญของค่า P-Value มากกว่า 0.05 นั้นหมายความว่าความปัจจัย หรือพารามิเตอร์ กระบวนการพิมพ์สามมิติมีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)

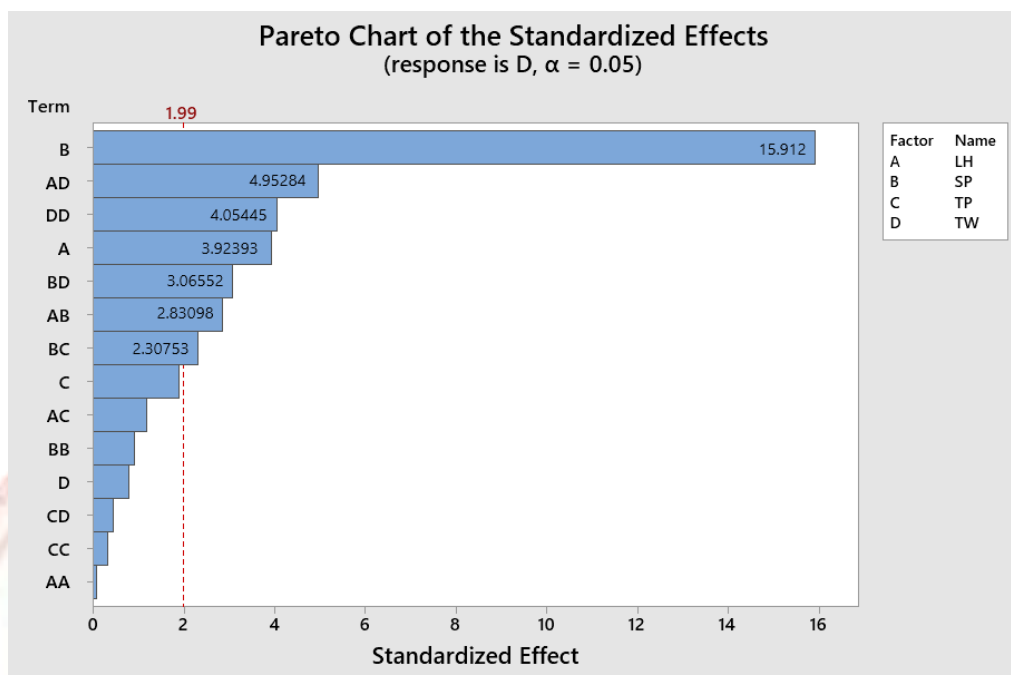
ตารางที่ 3-15 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA

พารามิเตอร์	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Linear	4	1.10303	0.27576	68.17	0.000
ความหนาชั้น (LH)	1	0.06228	0.06228	15.40	0.000
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	1	1.02414	1.02414	253.19	0.000
อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	1	0.01425	0.01425	3.52	0.064
ความหนาผนังชั้น (TW)	1	0.00235	0.00235	0.58	0.448
Square	4	0.09271	0.02318	5.73	0.000
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น (LH ²)	1	0.00001	0.00001	0.00	0.953
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์ (SP ²)	1	0.00327	0.00327	0.81	0.371
อุณหภูมิหัวฉีด x อุณหภูมิหัวฉีด (TP ²)	1	0.00037	0.00037	0.09	0.762
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น (TW ²)	1	0.06649	0.06649	16.44	0.000
2-Way Interaction	6	0.19744	0.03291	8.14	0.000
ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LH x SP)	1	0.03242	0.03242	8.01	0.006
ความหนาชั้น x อุณหภูมิหัวฉีด (LH x TP)	1	0.00550	0.00550	1.36	0.247
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW)	1	0.09923	0.09923	24.53	0.000

ตารางที่ 3-15 (ต่อ)

พารามิเตอร์	df	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW)	1	0.09923	0.09923	24.53	0.000
ความเร็วในการพิมพ์ x อุณหภูมิหัวฉีด (SP x TP)	1	0.02154	0.02154	5.32	0.023
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW)	1	0.03801	0.03801	9.40	0.003
อุณหภูมิหัวฉีด x ความหนาผนัง (TP x TW)	1	0.00074	0.00074	0.18	0.669
Error	85	0.34382	0.00404	-	-
Total	99	1.73700	-	-	-

จากตารางที่ 3-15 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 และความเร็วในการพิมพ์ (SP) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Square) ได้แก่ ความหนาผนังกำลังสอง (WT^2) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) ได้แก่ ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LH x SP) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.006 ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ความเร็วในการพิมพ์ x อุณหภูมิหัวฉีด (SP x TP) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.023 และความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.003 เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เหลือนี้มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ทำให้พารามิเตอร์เหล่านี้มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่า P-value มากกว่า 0.05 คือพารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญ หรือมีนัยสำคัญน้อยมาก ซึ่งผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ANOVA จะสัมพันธ์กันกับแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ดังแสดงภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วน PLA

ซึ่งแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ใช้อธิบายควบคู่กับค่า ANOVA เพื่อช่วยให้เห็นถึงเห็นระดับความสำคัญของพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) แล้วมากที่สุด โดยกำหนดให้เส้นประแนวนอนสีแดงที่ระดับ 1.99 คือเกณฑ์นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($\alpha = 0.05$) หมายความว่าสามารถยอมให้ผิดพลาดได้ 5% ซึ่งได้จากการนำค่า df ของ Error ตามตารางที่ 3-16 มีค่าเท่ากับ 85 เทียบกับตารางแจกแจงค่าวิกฤตแบบ t - Distribution แสดงดังตารางที่ 3-8 ในการอธิบายผลลัพธ์หาค่า Standardized Effect ของพารามิเตอร์เกินค่าเกณฑ์ 1.99 หมายความว่านัยสำคัญทางสถิติ โดยค่า Standardized Effect คำนวณได้จากสมการที่ 3-17

$$\text{Standardized Effect} = \sqrt{F\text{-Value}} \quad (3-17)$$

เมื่อ F-Value = ค่าที่ได้จากตาราง ANOVA ของตัวแปร

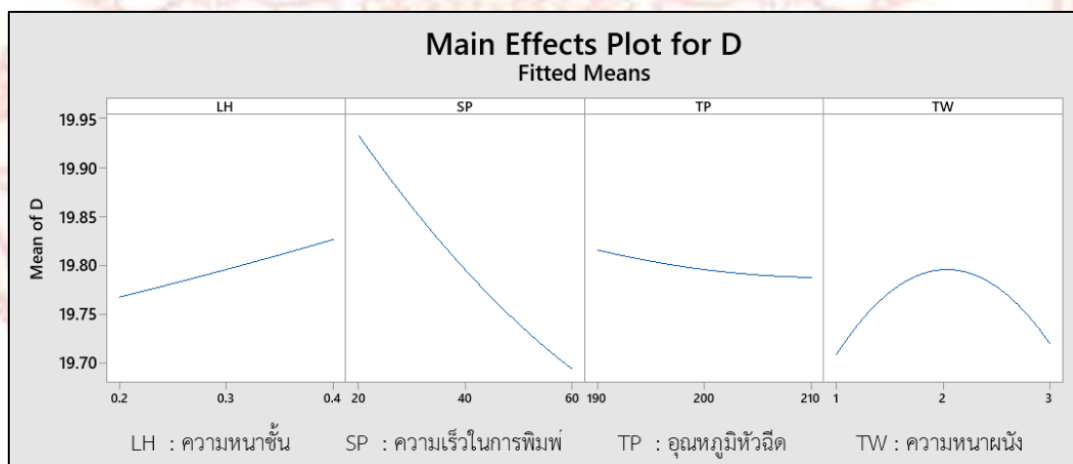
โดยที่ F-Value ของ SP = 253.19

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad \text{Standardized Effect, SP} &= \sqrt{253.19} \\ &= 15.912 \end{aligned}$$

จากผลลัพธ์การคำนวณหาค่า Standardized Effect, SP พบว่า B หรือความเร็วในการพิมพ์ (SP) มีความสำคัญมากที่สุด 15.912 รองลงมาคือ AD หรือ ความหนาชั้น (LH) กับความหนาผนัง (TW) 4.953 ตามลำดับ และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบน้อยที่สุดคือ ความหนาชั้นกำลังสอง (LH^2) 0.059 และอุณหภูมิหัวฉีดกำลังสอง (TP^2) 0.304 แสดงดังภาพที่ 3-17

ตารางที่ 3-16 ตารางแจกแจงค่าวิกฤตแบบ t - Distribution

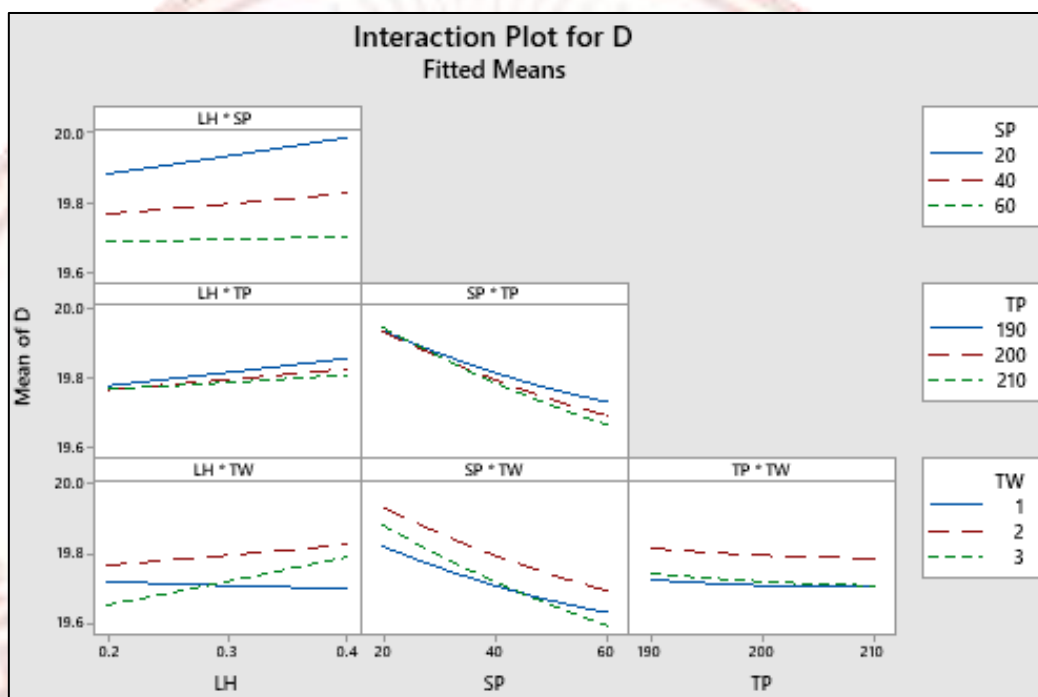
	0.1	0.05	0.025	0.02	0.015	0.01	0.005	0.0025	0.0005
Df	0.2	0.1	0.05	0.04	0.03	0.2	0.01	0.005	0.001
75	1.2929	1.6654	1.9921	2.0901	2.2122	2.3771	2.6430	2.8924	3.4249
76	1.2928	1.6652	1.9917	2.0896	2.2116	2.3764	2.6421	2.8913	3.4232
77	1.2926	1.6649	1.9913	2.0891	2.2110	2.3758	2.6412	2.8902	3.4214
78	1.2925	1.6646	1.9908	2.0887	2.2105	2.3751	2.6403	2.8891	3.4197
79	1.2924	1.6644	1.9905	2.0882	2.2100	2.3745	2.6395	2.8880	3.4180
80	1.2921	1.6641	1.9901	2.0878	2.2095	2.3739	2.6387	2.8870	3.4164
81	1.2921	1.6639	1.9897	2.0873	2.2090	2.3733	2.6379	2.8860	3.4148
82	1.2920	1.6636	1.9893	2.0869	2.2085	2.3727	2.6371	2.8850	3.4132
83	1.2918	1.6634	1.9890	2.0865	2.2080	2.3721	2.6364	2.8840	3.4116
84	1.2918	1.6632	1.9886	2.0861	2.2076	2.3716	2.6356	2.8831	3.4101
85	1.2916	1.6630	1.9883	2.0857	2.2071	2.3710	2.6349	2.8822	3.4086



ภาพที่ 3-18 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วน PLA

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ได้จากการนำสมการถดถอย (Regression Model) ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ดังสมการที่ 3-2 แสดงออกมาเป็นรูปแบบของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และค่าตอบสนอง ดังแสดงภาพที่ 3-18 พบว่าจากกราฟแนวแกน Y ได้แสดงให้เห็นถึงช่วงของขนาดชิ้นส่วนมีขนาดเล็กกว่าขนาดที่กำหนด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 20 มม.) จากผลลัพธ์ของ

กราฟที่แสดง พบว่าการปรับความหนาชั้น (LH) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดเล็กน้อย ส่วนการปรับความเร็วในการพิมพ์ (SP) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบลดลงน้อยกว่าขนาดที่กำหนดอย่างมาก ส่วนการปรับอุณหภูมิหัวฉีด (TP) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนลดลงน้อยกว่าขนาดที่กำหนดเล็กน้อย และการปรับความหนาผนัง (WT) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดที่ระดับหนึ่งก่อนที่จะลดลงเป็นลักษณะตัวยูคว่ำ



ภาพที่ 3-19 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วน PLA

สำหรับผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) หรือการปรับพารามิเตอร์ 2 ตัวที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ได้จากการนำสมการถดถอย (Regression Model) ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ดังสมการที่ 3-4 แสดงออกมาเป็นรูปแบบของสัมพันธพารามิเตอร์ 2 ตัวแปรออกมาเป็นกราฟเส้น ดังแสดงภาพที่ 3-19 โดยอธิบายแนวโน้มของกราฟที่แสดงดังต่อไปนี้

ความหนาชั้น $\times$ ความเร็วในการพิมพ์ (LH $\times$ SP): การปรับความเร็วในการพิมพ์ (SP) ในแต่ละระดับ (20 40 และ 60) พบว่ามีความชันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อปรับระดับความหนาชั้น (LH) และส่งผลให้ค่า D มีการเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากันในแต่ละระดับ

ความหนาชั้น $\times$ อุณหภูมิหัวฉีด (LH $\times$ TP): การปรับอุณหภูมิหัวฉีด (TP) ในแต่ละระดับพบว่ามีความชันแตกต่างกันหรือตัดกันเล็กน้อย เมื่อปรับเปลี่ยนระดับความหนาชั้น (LH)

ความหนาขึ้น x ความหนาผนัง (LH x TW): การปรับความผนัง (TW) ในแต่ละระดับพบว่ามีความชันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อปรับระดับความหนาขึ้น (LH) และส่งผลให้ค่า D มีการเปลี่ยนแปลงไม่เท่ากันในแต่ละระดับ หากต้องการควบคุมค่า D ให้คงที่ ควรปรับ LH และ TW พร้อมกัน

ความเร็วในการพิมพ์ x อุณหภูมิหัวฉีด (SP x TP): การปรับเปลี่ยนความเร็วการพิมพ์ (SP) มีการเปลี่ยนแปลงของของค่า D อย่างชัดเจน และมีความชันความแตกต่างเพียงเล็กน้อย เมื่อปรับระดับอุณหภูมิหัวฉีด (TP) และส่งผลให้ขนาด (D) ของชิ้นส่วนเพิ่มเล็กน้อย

ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW): การปรับความหนาผนัง (TW) ในแต่ละระดับพบว่า มีความชันที่แตกต่าง และมีการตัดกันอย่างชัดเจน เมื่อปรับระดับความเร็วในการพิมพ์ (SP) หากต้องการปรับความเร็วในการพิมพ์ควรพิจารณาความหนาผนัง (TW) ใช้ที่ระดับไหน

อุณหภูมิหัวฉีด x ความหนาผนัง (TP x TW): การปรับความหนาผนังในแต่ละระดับพบว่า แนวโน้มเส้นค่อนข้างขนาดกัน หรือแทบไม่เกิดความชันเมื่อปรับเปลี่ยนอุณหภูมิหัวฉีด (TP) ทุกระดับ

จากการสรุปผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) พบว่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญมากที่สุดคือความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง ซึ่งการปรับเพิ่มขึ้นผลลัพธ์ที่แสดงเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลบเหมือนกัน แต่ลักษณะของแนวโน้มต่างกัน โดยที่ความเร็วในการพิมพ์ (SP) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ แต่สำหรับความหนาผนัง (TW) มีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะของเส้นโค้งในลักษณะทิศทางเพิ่มขึ้นที่ระยะหนึ่งก่อนที่จะลดลง ส่วนความหนาขึ้น (LH) มีนัยสำคัญต่อขนาดเช่นกัน แต่ผลลัพธ์ที่แสดงเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางบวก ยกเว้นอุณหภูมิหัวฉีดที่พบว่าไม่มีนัยสำคัญต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) แต่แนวโน้มที่แสดงพบว่าการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนในแง่ของการปรับพารามิเตอร์ร่วม 2 ตัวแปรพบว่าพารามิเตอร์ร่วมที่มีนัยสำคัญคือ LH*SP, LH*TW, SP*TP และ SP*TW เนื่องจากพารามิเตอร์ร่วมเหล่านี้ เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หนึ่งส่งผลให้แนวโน้มของอีกพารามิเตอร์หนึ่งเปลี่ยน ส่วนพารามิเตอร์ร่วมที่ไม่มีนัยสำคัญ LH*TP และ TP*TW สามารถปรับแยกกันได้เพราะไม่มีผลต่อกัน จากผลการสรุปการเปลี่ยนแปลงระดับของ SP หรือความเร็วในการพิมพ์ มีผลต่อพารามิเตอร์หลายตัวทำให้ในการปรับต้องวิเคราะห์ระดับที่มีความเหมาะสมสำหรับความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)

3.4.2 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ (PLA)

จากผลลัพธ์การวิเคราะห์ข้อมูลออกมาในรูปแบบของสมการถดถอย (Regression Model) โดยแทนค่าตัวเลขลงในสมการที่ 3-4 จะได้ผลลัพธ์แสดงดังสมการที่ 3-18 เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ X_1 = ความหนาขึ้น (LH) X_2 = ความเร็วในการพิมพ์ (SP) X_3 = อุณหภูมิหัวฉีด (TP) และ X_4 = ความหนาผนัง (TW) กับค่าตอบสนอง (Y) =

ความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) โดยมีระดับความเหมาะสมของข้อมูล คือ 80.79% นั้นหมายความว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ

$$L = 39.7256 - 0.09228(LH) - 0.01442(SP) - 0.01902(TP) - 0.00915(TW) + 0.1174(LH* LH) + 0.0116(SP* SP) - 0.0063(TP* TP) - 0.0038(TW* TW) - 0.01567(LH* SP) - 0.00221(LH* TP) - 0.00101(LH* TW) - 0.00022(SP* TP) + 0.00068(SP* TW) - 0.00226(TP* TW) \quad (3-18)$$

โดยที่ L คือค่าตอบสนอง (ความคลาดเคลื่อนของขนาดยาว) LH คือความหนาชั้น SP คือความเร็วในการพิมพ์ TP คืออุณหภูมิหัวฉีด และ TW คือความหนาผนัง ซึ่งอธิบายสมการออกมาดังนี้

3.4.2.1 ค่า 39.7256 คือค่าคงที่ของ D เมื่อทุกตัวแปรที่มีค่าเป็น 0

3.4.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear terms) กรณีที่ตัวแปรอื่นคงที่

3.4.2.2.1 ค่า - 0.09228(LH): การเพิ่มขึ้นของ LH ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D ลดลง 0.09228 หน่วย

3.4.2.2.2 ค่า - 0.01442(SP): การเพิ่มขึ้นของ SP ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D ลดลง 0.01442 หน่วย

3.4.2.2.3 ค่า - 0.01902(TP): การเพิ่มขึ้นของ TP ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D ลดลง 0.01902 หน่วย

3.4.2.2.4 ค่า - 0.00915(TW): การเพิ่มขึ้นของ TW ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D เพิ่มขึ้น 0.00915หน่วย

3.4.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง (Quadratic terms)

3.4.2.3.1 ค่า 0.1174(LH*LH): ค่าสัมประสิทธิ์ของ LH แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปทางบวกต่อค่า D มีลักษณะเป็นเส้นโค้งอย่างมาก

3.4.2.3.2 ค่า 0.0116(SP*SP): ค่าสัมประสิทธิ์ของ SP^2 แสดงถึงค่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปทางบวกต่อค่า D มีลักษณะเส้นโค้ง

3.4.2.3.3 ค่า -0.0063(TP*TP): ค่าสัมประสิทธิ์ของ TP^2 แสดงถึงค่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปทางลบต่อค่า D มีลักษณะเส้นโค้งน้อยมาก

3.4.2.3.4 ค่า -0.0038(TW*TW): ค่าสัมประสิทธิ์ของ TW^2 แสดงถึงค่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปทางลบต่อค่า D มีลักษณะเส้นโค้งน้อยมาก

3.4.2.4 ผลของปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่มีผลต่อค่า D

3.4.2.4.1 ค่า -0.01567(LH*SP): ค่าสัมประสิทธิ์ของ LH*SP แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพร้อมกัน ส่งผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ D ไปในทางทิศทางลบเพียงเล็กน้อย

3.4.2.4.2 ค่า $-0.00221(LH*TP)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*TP$ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพร้อมกัน ส่งผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ D ไปในทางทิศทางลบเพียงเล็กน้อยอย่างมาก

3.4.2.4.3 ค่า $-0.00101(LH*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*TP$ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพร้อมกัน ส่งผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ D ไปในทางทิศทางลบเพียงเล็กน้อยอย่างมาก

3.4.2.4.4 ค่า $-0.00022(SP*TP)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $SP*TP$ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพร้อมกัน ส่งผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ D ไปในทางทิศทางลบเพียงเล็กน้อยอย่างมาก

3.4.2.4.5 ค่า $-0.00068(SP*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $SP*TW$ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพร้อมกัน ส่งผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ D ไปในทางทิศทางลบเพียงเล็กน้อยอย่างมาก

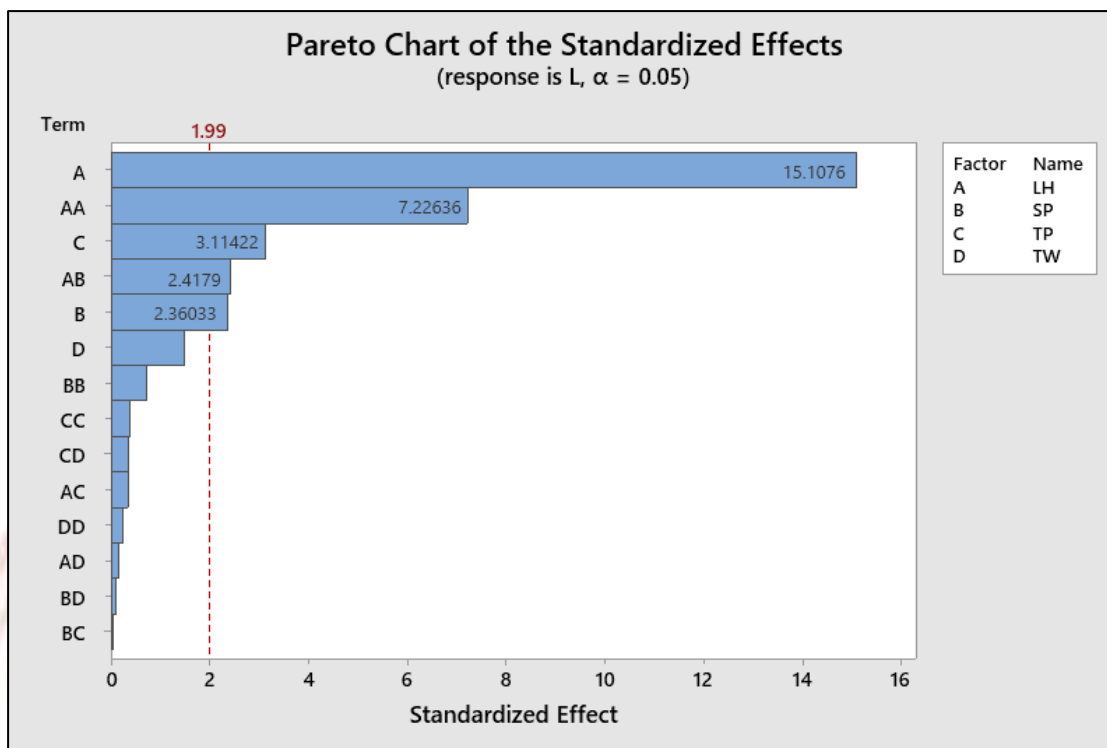
3.4.2.4.6 ค่า $-0.00226(TP*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $TP*TW$ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพร้อมกัน ส่งผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ D ไปในทางทิศทางลบเพียงเล็กน้อยอย่างมาก

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) กำหนดให้ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ดังแสดงตารางที่ 3-17 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) คือ ความหนาชั้น (LH) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ความเร็วในการพิมพ์ (SP) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.021 และอุณหภูมิหัวฉีด (TP) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.003 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Square) คือ ความหนาชั้นกำลังสอง (LH^2) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) คือ ความหนาชั้น $\times$ ความเร็วในการพิมพ์ ($LH \times SP$) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.018 เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เหล่านี้นี้มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ทำให้พารามิเตอร์เหล่านี้มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่า P-value มากกว่า 0.05 คือพารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญ หรือมีนัยสำคัญน้อยมากซึ่งผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ANOVA จะสัมพันธ์กันกับแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ดังแสดงภาพที่ 3-22

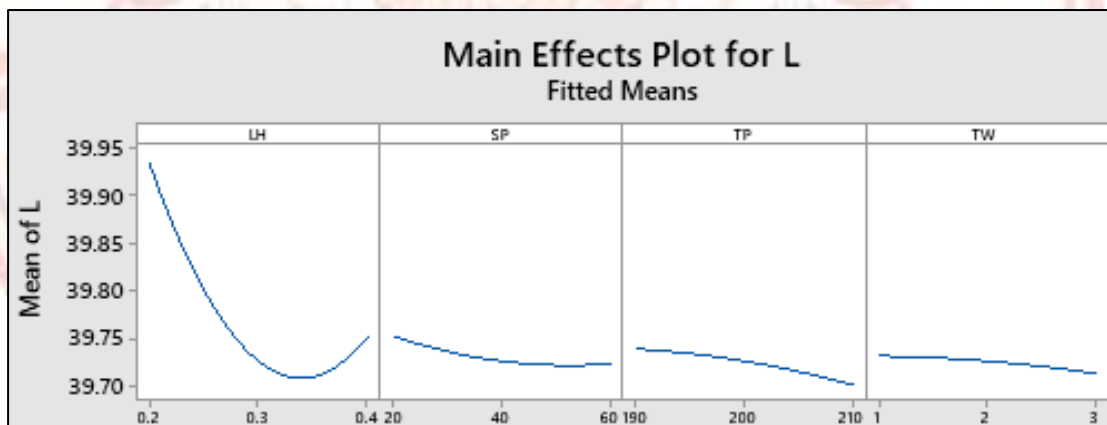
ตารางที่ 3-17 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA

พารามิเตอร์	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Linear	4	0.66023	0.165058	61.44	0.000
ความหนาชั้น (LH)	1	0.61319	0.613186	228.24	0.000
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	1	0.01497	0.014967	5.57	0.021
อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	1	0.02606	0.026055	9.70	0.003
ความหนาผนังชั้น (TW)	1	0.00602	0.006023	2.24	0.138
Square	4	0.28351	0.070878	26.38	0.000
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น (LH ²)	1	0.14029	0.140294	52.22	0.000
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์ (SP ²)	1	0.00137	0.001366	0.51	0.478
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น (TW ²)	1	0.00040	0.000398	0.15	0.701
อุณหภูมิหัวฉีด x อุณหภูมิหัวฉีด (TP ²)	1	0.00015	0.000147	0.05	0.815
2-Way Interaction	6	0.01644	0.002741	1.02	0.418
ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LH x SP)	1	0.01571	0.015706	5.85	0.018
ความหนาชั้น x อุณหภูมิหัวฉีด (LH x TP)	1	0.00031	0.000313	0.12	0.734
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW)	1	0.00006	0.000065	0.02	0.877
ความเร็วในการพิมพ์ x อุณหภูมิหัวฉีด (SP x TP)	1	0.00000	0.000003	0.00	0.974
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW)	1	0.00003	0.000030	0.01	0.917
อุณหภูมิหัวฉีด x ความหนาผนัง (TP x TW)	1	0.00033	0.000326	0.12	0.728
Error	85	0.22836	0.002687	-	-
Total	99	1.18855	-	-	-

ซึ่งแผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) แสดงระดับความสำคัญของพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) จากผลลัพธ์พบว่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ ความหนาของชั้น (LH) มีค่า Standardized Effect = 15.1076 และพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบ น้อยที่สุดคือ ความเร็วในการพิมพ์ x อุณหภูมิหัวฉีด (SP x TP) ดังแสดงภาพที่ 3-20



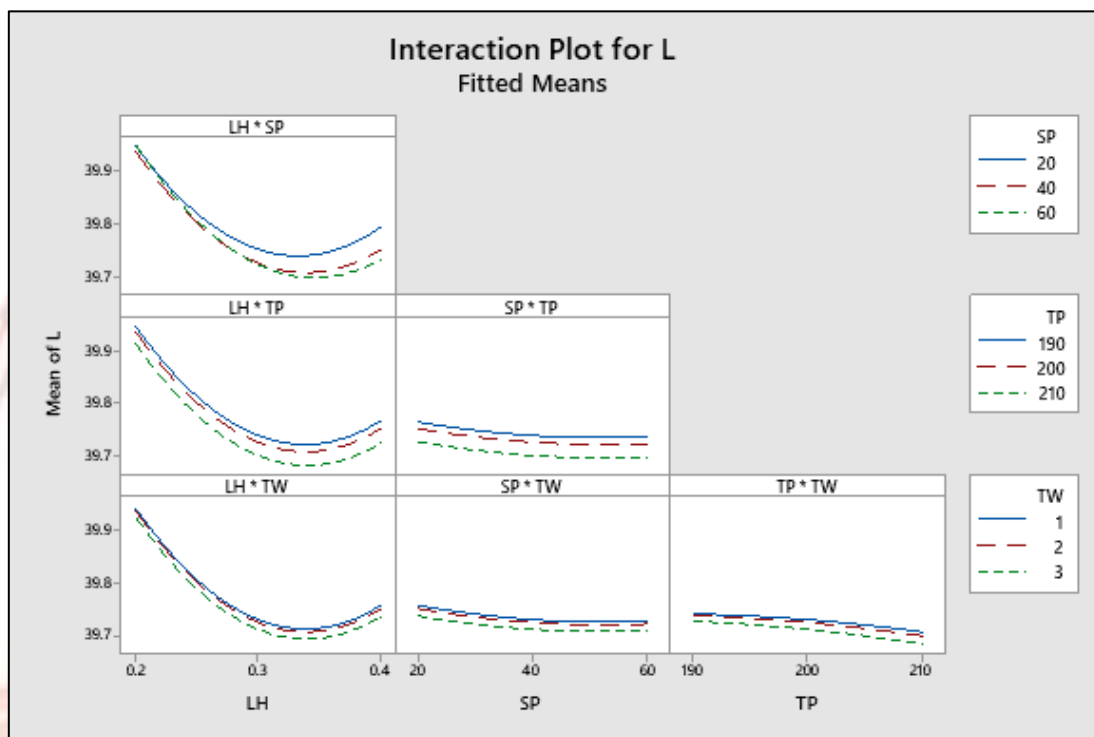
ภาพที่ 3-20 แผนภูมิพารेटอ (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาวทดสอบ (L) สำหรับชิ้นส่วน PLA



ภาพที่ 3-21 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วน PLA

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ได้จากการนำสมการถดถอย (Regression Model) ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ดังสมการที่ 3-17 แสดงออกมาเป็นรูปแบบของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าตอบสนอง ดังแสดงภาพที่ 3-21 พบว่าจากกราฟแนวนอน Y ช่วงขนาดของชิ้นส่วนส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าขนาดที่กำหนด (ขนาดยาว = 40 มม.) จากกราฟที่แสดงให้เห็นพบว่าการปรับความหนาชิ้น (LH) เพิ่มขึ้นส่งผลให้แนวโน้มของขนาด (L) ของชิ้นส่วนทดสอบลดน้อยลงกว่าขนาดที่กำหนด

อย่างมาก ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเร็วในการพิมพ์ (SP) อุณหภูมิหัวฉีด (TP) และความหนาผนัง (WT) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาด (L) ของชิ้นส่วนทดสอบลดลงน้อยกว่าขนาดที่กำหนดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากกราฟที่ได้แสดงให้เห็นมีเพียงความหนาชั้นเท่านั้นที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนขนาดความยาว (L) อย่างชัดเจน



ภาพที่ 3-22 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วน PLA

สำหรับผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) หรือการปรับพารามิเตอร์ 2 ตัวที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาวของชิ้นส่วนทดสอบ (Length , L) ได้จากการนำค่าวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA แสดงออกมาเป็นรูปแบบของกราฟเส้น ดังแสดงภาพที่ 3-22 ซึ่งแสดงลักษณะดังนี้

ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LH x SP): การปรับความหนาชั้น (LH) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าขนาด (L) ของชิ้นส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใกล้เคียงขนาดที่กำหนดอย่างมาก ตามการปรับความเร็วในการพิมพ์ (SP) ที่ค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีผลกระทบต่อความยาว (L) อย่างชัดเจน

ความหนาชั้น x อุณหภูมิหัวฉีด (LH x TP): การปรับความหนาชั้น (LH) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าขนาด (L) ของชิ้นส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใกล้เคียงขนาดที่กำหนดอย่างมาก ตามการปรับอุณหภูมิหัวฉีด (TP) ที่ต่ำที่สุด

ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW): การปรับความหนาชั้น (LH) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าขนาด (L) ของชิ้นส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใกล้เคียงขนาดที่กำหนดอย่างมาก และการปรับความหนาผนัง

(TW) ส่งผลต่อขนาดความยาว (L) ของชิ้นส่วนต่างกันเล็กน้อย โดยที่ระดับที่ 1 มีขนาดความยาวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ความเร็วในการพิมพ์ $\times$ อุณหภูมิหัวฉีด (SP $\times$ TP): การปรับเปลี่ยนความเร็วในการพิมพ์ (SP) และอุณหภูมิหัวฉีด (TP) ส่งผลต่อขนาด (L) ของชิ้นส่วนน้อยอย่างมาก เนื่องจากกราฟได้แสดงในลักษณะแนวราบ ทำให้แสดงถึงความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ความเร็วในการพิมพ์ $\times$ ความหนาผนัง (SP $\times$ TW): การปรับเปลี่ยนความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) ส่งผลต่อขนาด (L) ของชิ้นส่วนน้อยอย่างมาก เนื่องจากกราฟได้แสดงในลักษณะแนวราบ ทำให้แสดงถึงความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

อุณหภูมิหัวฉีด $\times$ ความหนาผนัง (TP $\times$ TW): การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิหัวฉีด (TP) และความหนาผนัง (TW) ส่งผลต่อขนาด (L) ของชิ้นส่วนน้อยอย่างมาก เนื่องจากกราฟได้แสดงในลักษณะแนวราบ ทำให้แสดงถึงความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) พบว่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญมากที่สุดคือความหนาชิ้น (LH) ซึ่งการปรับเปลี่ยนระดับความหนาชิ้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลลัพธ์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลงก่อนที่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความเร็วในการพิมพ์ และอุณหภูมิหัวฉีด แม้ว่าจะมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่แนวโน้มที่แสดงพบว่าการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ยกเว้นความหนาผนังที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแต่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลบในลักษณะเดียวกันกับความเร็วในการพิมพ์ (SP) และอุณหภูมิหัวฉีด (TP) ส่วนในแง่ของการปรับพารามิเตอร์ร่วม 2 ตัวแปรพบว่าพารามิเตอร์ร่วมที่มีนัยสำคัญคือความหนาชิ้นและความเร็วในการพิมพ์ (LH*SP) เท่านั้น เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะความโค้งที่ไม่ขนานกัน ทำให้การปรับเปลี่ยนส่งผลต่อกันและกัน แต่ในกรณีพารามิเตอร์ร่วมที่ไม่มีนัยสำคัญพบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันแต่ที่ขนานกันในแต่ละระดับมีผลกระทบต่อผลลัพธ์ (L) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

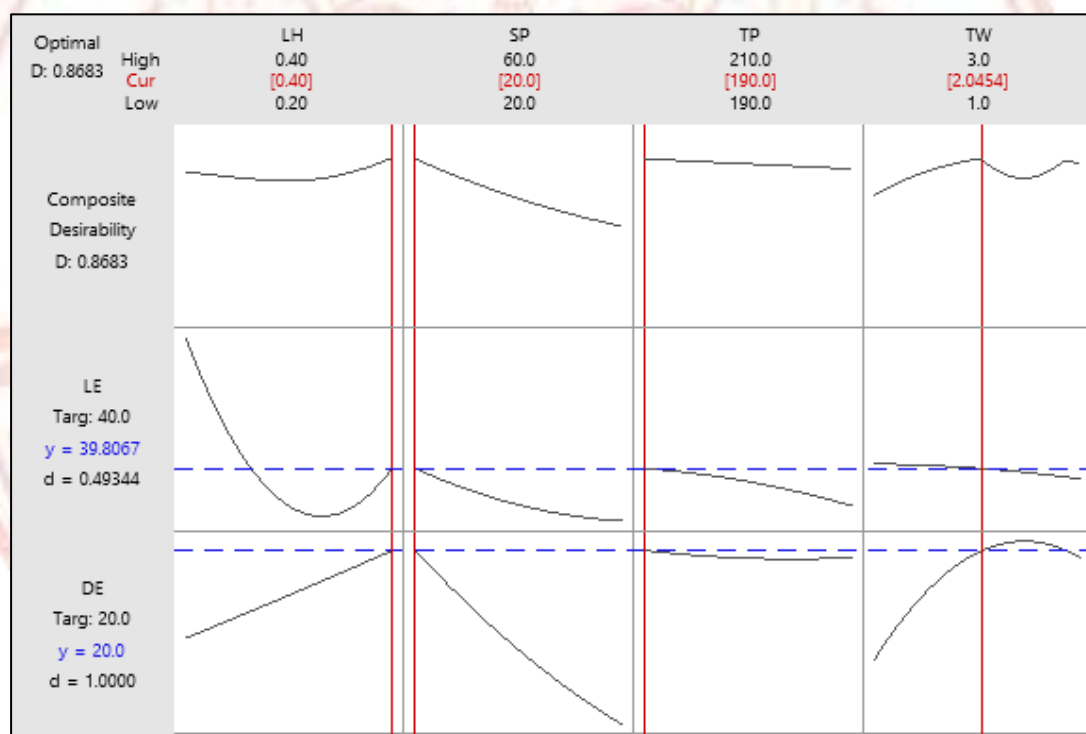
3.4.3 ผลลัพธ์การหาค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนทดสอบ PLA

ผลลัพธ์การหาค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ PLA ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ต้องการให้ขนาดชิ้นส่วนทดสอบมีความคลาดเคลื่อนของขนาดน้อยที่สุด หรือขนาดของชิ้นส่วนใกล้เคียงกับขนาดที่กำหนดมากที่สุด โดยใช้วิธี Response Optimization ด้วยโปรแกรม Minitab เป็นวิธีที่ใช้หลักการของการวิเคราะห์หลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) โดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เพื่อช่วยให้ได้ค่าที่ดีที่สุดจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง (Response) โดยแปลงค่าตอบสนองเป็นค่าความพึงพอใจ (Desirability) ที่มีช่วงค่าระหว่าง 0 ถึง 1 สูตรในการกำหนดฟังก์ชัน

ความพึงพอใจ (Desirability Function) เนื่องจากการคำนวณเพื่อหาค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์นั้นมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงใช้โปรแกรม Minitab เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ค่าความเหมาะสม โดยกำหนดเป้าหมาย (Goal) ของค่าตอบสนองคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. และความยาว 40 มม. ตามขนาดของชิ้นส่วนทดสอบแสดงดังตารางที่ 3-18 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3-25

ตารางที่ 3-18 สรุปเป้าหมาย (Goal) ค่าตอบสนอง

ค่าตอบสนองที่สนใจ	เป้าหมาย (Goal)
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)	Target (20)
ขนาดความยาว (L)	Target (40)



ภาพที่ 3-23 ผลลัพธ์กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA

จากภาพที่ 3-23 ได้แสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ด้านบนของกราฟแสดงแนวโน้ม เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วนน้อยที่สุด หรือใกล้เคียงกับขนาดที่กำหนดมากที่สุด โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่แนะนำ (ตัวอักษรสีแดง) คือ ความหนาชั้น 0.40 มม. ความเร็วในการพิมพ์ 20 มม./วินาที อุณหภูมิหัวฉีด 190°C และความหนาผนังชั้น 2.045 มม. ผลลัพธ์ค่าตอบสนองที่ได้รับ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.000 มม. และความยาว 39.8067 มม. ส่วนผลลัพธ์ค่า

ความพึงพอใจ (Composite Desirability) โดยรวมของสถานะที่เหมาะสมนั้น 0.8683 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ 1 หมายความว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่แนะนำเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด โดยสรุปผลลัพธ์ออกมาดังตารางที่ 3-19

ตารางที่ 3-19 ผลลัพธ์การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA

ผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	
พารามิเตอร์ที่เหมาะสม	ระดับ
ความหนาชั้น (LH)	0.4 มม.
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	20 มม./วินาที
อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	190°C
ความหนาผนัง (TW)	2.045 มม.
ค่าตอบสนองที่คาดหวัง	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่คาดว่าจะได้รับ (D)	20.000 มม.
ขนาดความยาวที่คาดว่าจะได้รับ (L)	39.8067 มม.
ระดับความพึงพอใจ (Composite Desirability)	0.8683

3.4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

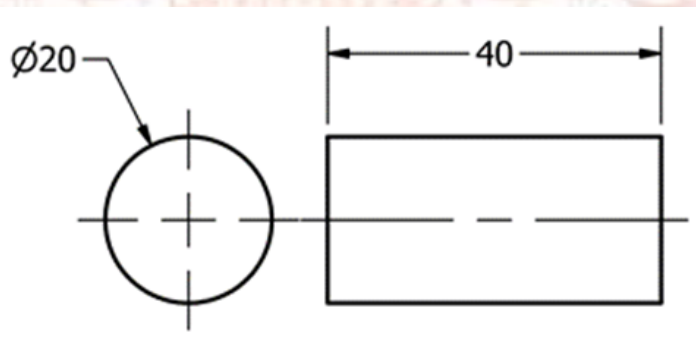
จากผลสรุปการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) อุณหภูมิหัวฉีด (TP) ความหนาผนัง (TW) ต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) พบว่าความเร็วในการพิมพ์ (SP) มีผลกระทบมากที่สุด เนื่องจากการเปลี่ยนของระดับพารามิเตอร์ไปที่ค่าต่ำสุดส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดลดลงอย่างมาก แต่ควรปรับพารามิเตอร์ร่วมกับความหนาชั้น และความหนาผนัง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของพารามิเตอร์เหล่านี้ มีผลกระทบร่วมกันต่อการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ส่วนผลการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) พบว่าความหนาชั้น (LH) มีผลกระทบมากที่สุด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของพารามิเตอร์ไปที่ค่าต่ำที่สุดส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดลดลงอย่างมาก และสุดท้ายจากผลการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิหัวฉีดมีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนน้อยมาก และการเปลี่ยนแปลงระดับของอุณหภูมิไม่ส่งผลใด ๆ ต่อพารามิเตอร์ทั้งหมด ส่วนผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่คาดหวัง พบว่าความหนาชั้น (LH) 0.4 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที อุณหภูมิหัวฉีด (TP) 190°C และความหนาผนัง (TW) 2.045 มม.

3.5 การตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ PLA

ขั้นตอนนี้คือการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 และชิ้นส่วนที่ 2 ที่พิมพ์ด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) โดยใช้วัสดุ PLA และวัดผลชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 ด้วยการปรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพิมพ์ตามผลลัพธ์ดังตารางที่ 3-19 เปรียบเทียบกับพารามิเตอร์เริ่มต้นที่แนะนำโดยเครื่องพิมพ์สามมิติ ส่วนชิ้นส่วนที่ 2 วัดผลโดยการปรับค่าพารามิเตอร์เหมาะสมเพื่อเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนทดสอบ โดยแบ่งผลลัพธ์การตรวจสอบดังต่อไปนี้

3.5.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA)

ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลลัพธ์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 ที่พิมพ์ด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) โดยปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์ทางสถิติเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 20 มม. และความยาวที่ 40 มม. ดังภาพที่ 3-24 โดยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่แนะนำโดยโปรแกรม Ultimaker Cura กำหนดให้จำนวนชิ้นส่วนทดสอบสำหรับการเปรียบเทียบผลชิ้นละ 5 ชิ้นส่วน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ชุด แสดงดังตารางที่ 3-20



ภาพที่ 3-24 ขนาดชิ้นทดสอบที่ 1 (PLA) ที่ใช้ตรวจสอบ

ตารางที่ 3-20 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบที่ 1 (PLA) เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ตามค่าที่แนะนำ โดยโปรแกรม Ultimaker Cura	ค่าความเหมาะสมของ พารามิเตอร์ตามผลการวิเคราะห์
ความหนาชั้น (LH)	0.2	0.4
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	60	20
อุณหภูมิหัวฉีด (TP)	200	190
ความหนาผนัง (TW)	1	2.0454



ภาพที่ 3-25 ตัวอย่างชิ้นส่วนทดสอบที่พิมพ์ด้วย (ก) ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์ และ (ข) ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นโดย โปรแกรม Ultimaker Cura

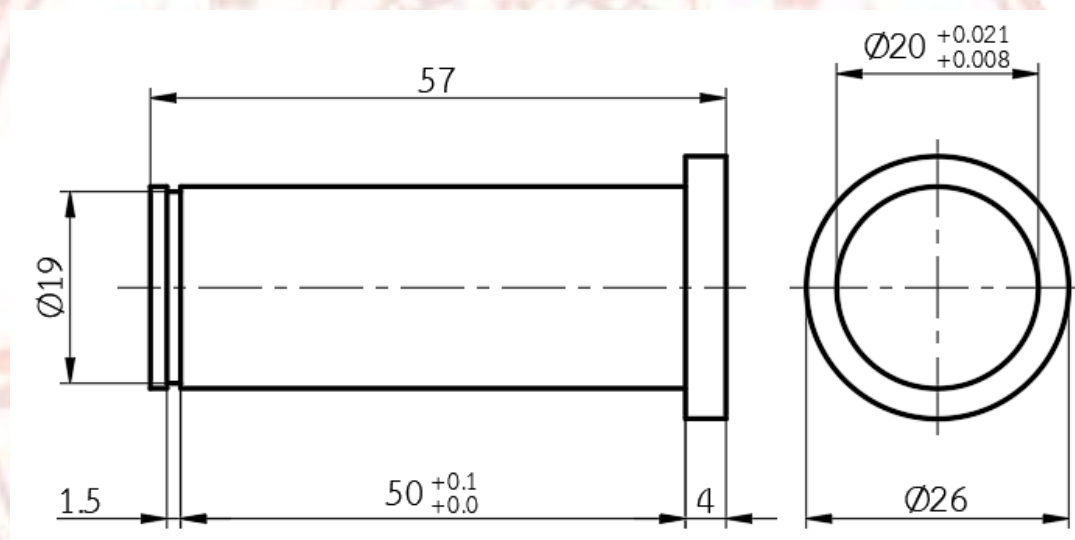
ตารางที่ 3-21 ผลลัพธ์การวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ (PLA) ที่ 1

จำนวนการทดลอง	ชิ้นงานที่สร้างจากค่าเริ่มต้นที่แนะนำ โดยโปรแกรม Ultimaker Cura		ชิ้นงานที่สร้างจากค่าที่เหมาะสม ที่ได้จากการวิเคราะห์	
	D	L	D	L
1	19.85	39.89	20.05	39.95
2	19.83	39.87	20.14	39.95
3	19.84	39.90	20.06	39.97
4	19.81	39.91	20.11	39.91
5	19.74	39.90	20.11	39.96
ค่าเฉลี่ย	19.82	39.90	20.09	39.95
ผลต่าง	0.18	0.10	0.09	0.05

จากผลลัพธ์ดังตารางที่ 3-21 วัดผลโดยการเปรียบเทียบชิ้นส่วนทดสอบด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เทียบกับชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA) ด้วยการตั้งค่าด้วยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น พบว่าขนาดของชิ้นส่วนทดสอบที่ตั้งค่าด้วยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (20 มม.) ไปทางค่าลบที่ค่าเฉลี่ย 19.82 มม. โดยผลต่างเท่ากับ 0.18 มม. และมีค่าความคลาดเคลื่อนของความยาว (40 มม.) ไปทางค่าลบที่ค่าเฉลี่ย 39.90 มม. โดยมีผลต่างเท่ากับ 0.10 มม. เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนทดสอบที่ตั้งค่าด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่มีความคลาดเคลื่อนของขนาดไปทางบวกที่ค่าเฉลี่ย 20.09 มม. โดยมีผลต่างเท่ากับ 0.09 มม. และมีค่าความคลาดเคลื่อนของความยาวไปทางค่าลบที่ค่าเฉลี่ย 39.95 มม. โดยมีผลต่างเท่ากับ 0.05 มม. จากสรุปผลชิ้นส่วนทดสอบที่ 1 (PLA) ที่พิมพ์ด้วยการตั้งค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ตามผลการวิเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนทดสอบที่พิมพ์ด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่แนะนำโดยโปรแกรม Ultimaker Cura

3.5.2 การพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนที่กำหนด

ขั้นตอนการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ โดยการนำชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) เพื่อวิเคราะห์ชิ้นส่วนประกอบที่มีการกำหนดค่าพิสัยความเผื่อ กำหนดให้ชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) เป็นชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมงานแม่พิมพ์โลหะ คือสลักทรงกระบอกแบบมีบ่า มีหน้าที่ในการควบคุมตำแหน่งในการขึ้นรูป และช่วยรองรับแรงกระแทกในขณะที่ขึ้นรูปโลหะไม่ให้เกิดการสึกหรอของแม่พิมพ์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. มีความยาว 57 มม. ดังแสดงภาพที่ 3-26 ซึ่งในแบบมีการกำหนดค่าพิสัยความเผื่อ ขนาดได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. อยู่ในช่วงของค่าพิสัยความเผื่อ 20.008 ถึง 20.021 มม. และความยาว 50 มม. อยู่ในช่วงของค่าพิสัยความเผื่อ 50.00 ถึง 50.10 มม.



ภาพที่ 3-26 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่กำหนดค่าพิสัยความเผื่อ

โดยขั้นตอนการวัดผลจะทำการพิมพ์ชิ้นส่วนทั้งหมด 5 ชิ้นส่วนโดยตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งหมด และเก็บค่าตอบสนอง หรือขนาดของชิ้นส่วนจากการวัดขนาดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ $\text{Ø}20^{+0.021}_{+0.008}$ มม. และความยาว (L) เท่ากับ $50^{+0.100}_0$ มม. ดังแสดงตารางที่ 3-15

ตารางที่ 3-22 ผลลัพธ์การวัดขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ (PLA) ที่ 2 ที่ตั้งค่าด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์

ชิ้นส่วนทดสอบ PLA ที่พิมพ์ด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์ : PLA LH = 0.4 มม. PS = 20 มม. /วินาที TP = 190 °C TW = 2.0454 มม.					
ครั้งที่	ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ PLA				
	$D_1 = \varnothing 20^{+0.021}_{+0.008}$ มม.		$L_1 = 50^{+0.100}_0$ มม.		$D_2 =$
	20.008	20.021	50.000	50.100	$\varnothing 26$ มม. $L_2 =$ 4 มม.
1	20.05		50.05		25.96 4.12
2	20.09		50.05		25.85 4.17
3	20.10		50.03		25.93 4.21
4	20.06		50.04		25.83 4.11
5	20.13		50.08		25.89 4.13
ค่าเฉลี่ยโดยรวม	20.09		50.05		25.89 4.15

จากผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_1) และความยาว (L_1) ของชิ้นส่วนทดสอบที่ 2 (PLA) ที่ตั้งค่าด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้แก่ ความหนาชั้น (LH) 0.4 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที อุณหภูมิหัวฉีด (TP) 190°C และความหนาผนัง (TW) 2.045 มม. ตรวจสอบผลลัพธ์ทั้งหมด 5 ชิ้นส่วน พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_1) ที่ค่าเฉลี่ยโดยรวม 20.09 มม. มีขนาดมากกว่าค่าพิสัยความเผื่อในช่วง 20.008 มม. ถึง 20.021 มม. ผลต่างที่ 0.069 มม. แต่ขนาดความยาว (L_1) ที่ค่าเฉลี่ยโดยรวม 50.05 มม. มีขนาดอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อในช่วง 50.000 มม. ถึง 50.100 มม. ผลสรุปการทดลองพบว่าชิ้นส่วนที่พิมพ์ด้วยวัสดุ PLA โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ไม่สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนของขนาดให้อยู่ในค่าพิสัยความเผื่อที่กำหนดได้ จึงทำการทดลองด้วยชิ้นส่วนทดสอบโดยใช้วัสดุ ABS ในครั้งต่อไป

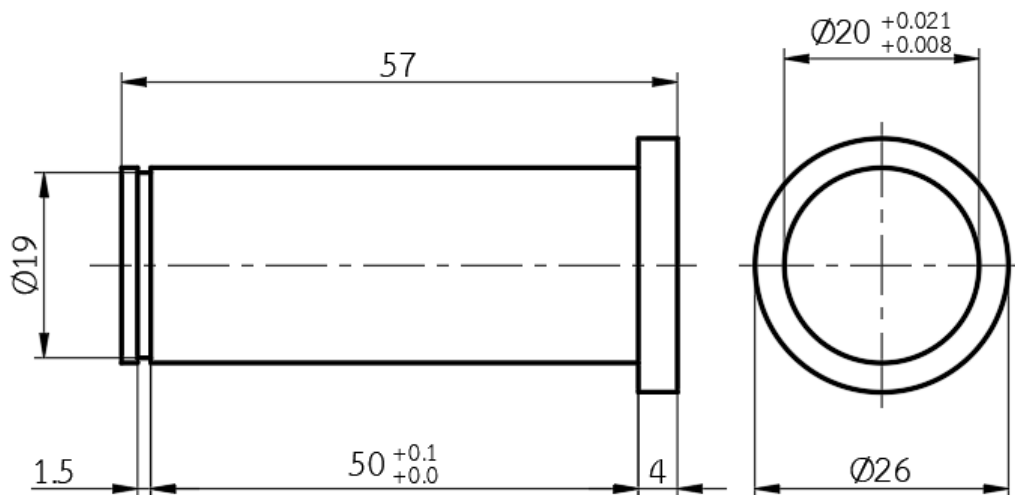
3.6 การจัดเตรียมการทดลองสำหรับวัสดุ ABS

ขั้นตอนนี้คือการทดสอบด้วยชิ้นส่วนทดสอบ ABS โดยมีขั้นตอนการจัดเตรียมวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

3.6.1 การจัดเตรียมชิ้นส่วนทดสอบ ABS

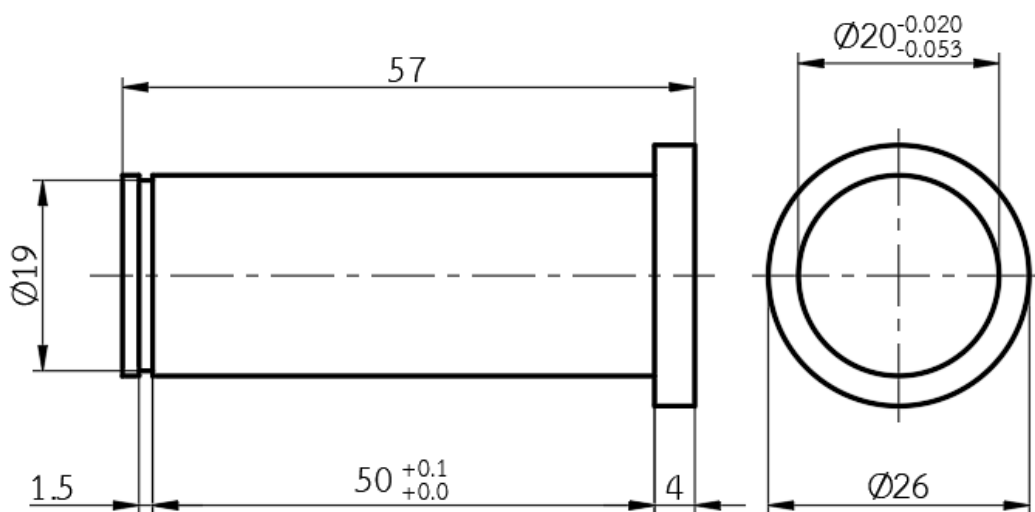
ขั้นตอนนี้คือการจัดเตรียมชิ้นส่วนทดสอบโดยวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ คือต้องการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ และหาการตั้งค่าที่

เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) เพื่อให้ชิ้นส่วนมีขนาดอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อที่กำหนด โดยกำหนดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ดังแสดงภาพที่ 3-29 และภาพที่ 3-30 แบ่งออกทั้งหมด 2 กรณี คือกรณีที่ 1 ชิ้นส่วนที่มีค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางบวก ($\text{Ø}20^{+0.021}_{+0.008}$) ซึ่งชิ้นส่วนจะถูกผลิตให้มีขนาดที่เกินจากขนาดมาตรฐานที่กำหนด (Oversize) โดยให้อยู่ในค่าพิสัยความเผื่อที่ยอมรับได้ ดังแสดงภาพที่ 3-27

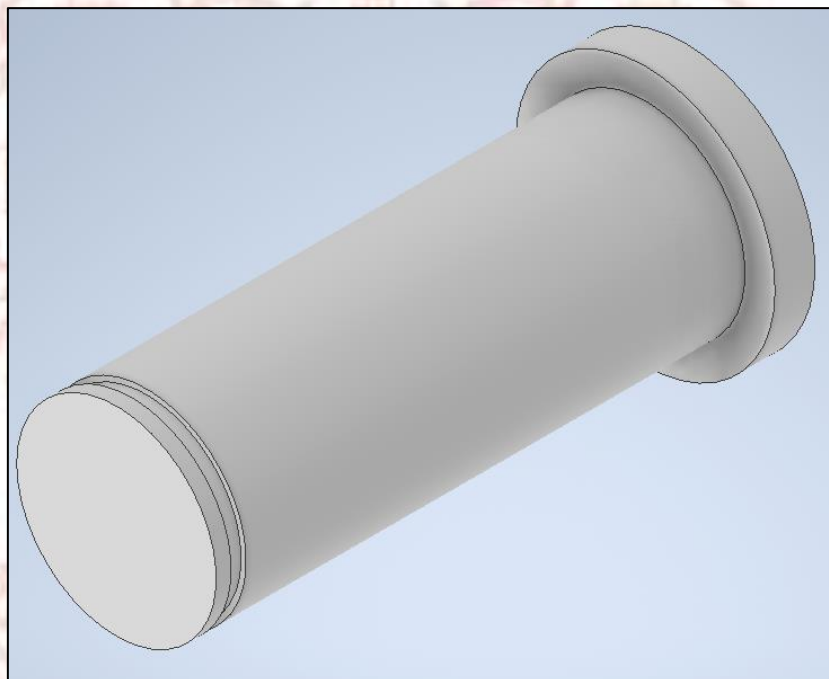


ภาพที่ 3-27 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS กรณีที่ 1 กำหนดค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางบวก

กรณีที่ 2 ชิ้นส่วนที่มีค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางลบ ($\text{Ø}20^{-0.020}_{-0.053}$) ซึ่งชิ้นส่วนจะถูกผลิตให้มีขนาดที่เล็กกว่าขนาดมาตรฐานที่กำหนด (Undersize) โดยให้อยู่ในพิสัยความเผื่อที่ยอมรับได้ ดังแสดงภาพที่ 3-28 ซึ่งลักษณะโมเดลสามมิติ (3D Model) ของชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่ใช้สำหรับการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-29



ภาพที่ 3-28 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS กรณีที่ 2 กำหนดค่าพิสัยของความเผื่อของขนาดไปทางลบ



ภาพที่ 3-29 ตัวอย่างโมเดลสามมิติชิ้นส่วนทดสอบ ABS

3.6.2 การจัดเตรียมเครื่องพิมพ์สามมิติสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

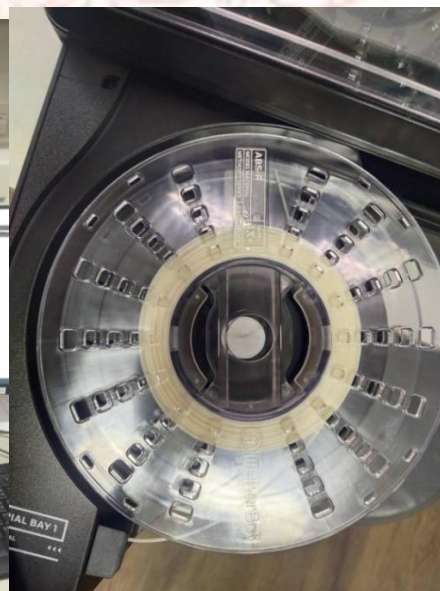
เนื่องจากการทดลองก่อนหน้านี้แสดงผลลัพธ์ไม่ตรงตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ จึงต้องทำการปรับเปลี่ยนเครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้เป็นเครื่องพิมพ์รุ่น MakerBot Method X ดังแสดงภาพที่ 3-30 ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องพิมพ์มีพื้นที่ในการพิมพ์ชิ้นส่วน 152 x 190 x 196 มม. เป็นระบบสองหัวฉีดช่วยให้สามารถพิมพ์ชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ เช่น การพิมพ์ชิ้นส่วนที่ต้องการการรองรับ (Support) หรืองานที่ต้องการใช้วัสดุหลายชนิดในการพิมพ์ชิ้นเดียว นอกจากนี้เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่นนี้มีการกำหนดค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์ ± 0.2 มม. ดังตารางที่ 3-23

ตารางที่ 3-23 คุณสมบัติของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X

Model	MakerBot Method X
Build Volume	152 x 190 x 196 mm (Double nozzle)
Machine size	437 x 413 x 649 mm
Equipment Quality	29.5 kg
Supported Material	PLA/ABS/Carbon Fiber/Nylon/PETG
Filament Diameter	1.75 mm
Nozzle Diameter	0.4 mm (สามารถเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 0.2/0.3/0.5/0.6/0.8/1.0mm)
Layer Thickness	0.02-0.4 mm
Print Speed	20-200 mm/s
Printing Method	USB Cable / Flash Drive
Printing Accuracy	± 0.2 mm
Power Supply	AC100/240V, 8.14A - 3.4A, 50/60Hz
Heating Parameters	Nozzle Temperature 260 °C / Bed Temperature 110 °C



(ก)



(ข)

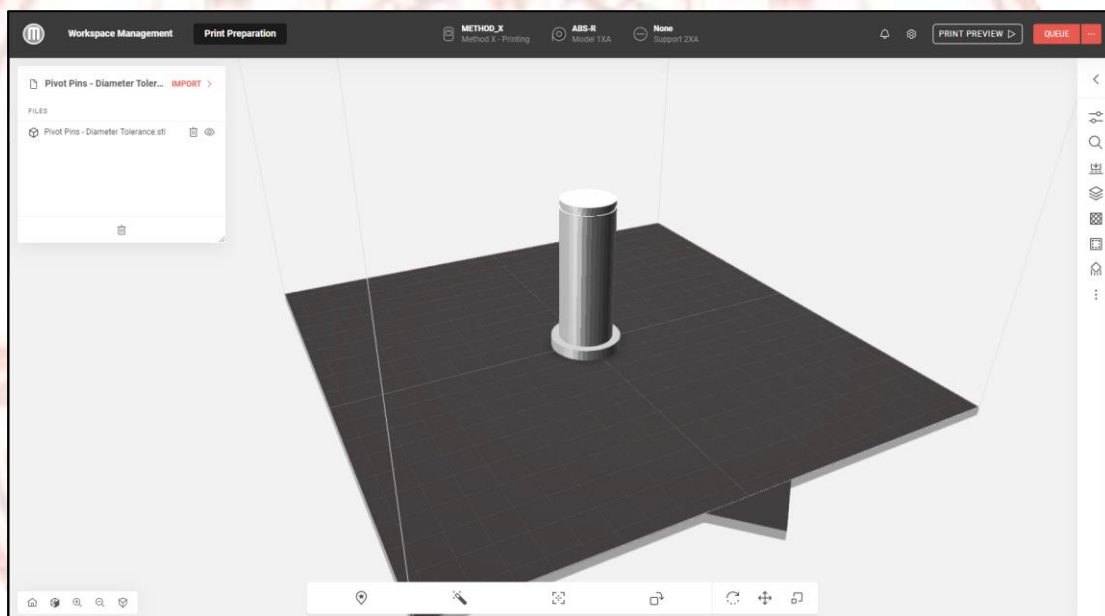
ภาพที่ 3-30 (ก) เครื่องพิมพ์รุ่น MakerBot Method X (ข) เส้นใยพลาสติก ABS

ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนเครื่องพิมพ์สามมิติส่งผลให้วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วนมีการปรับเปลี่ยนตามคุณลักษณะของเครื่องพิมพ์สามมิติ เนื่องจากเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่นนี้มีข้อจำกัดในเรื่องการปรับเปลี่ยนการใช้วัสดุ ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยจึงทำการปรับเปลี่ยนเป็นวัสดุ อะครีโลไนไตรล์-บิวทา

ไดอิน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) ซึ่งเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้ในการพิมพ์สามมิติเหมือนกันเช่นกัน เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ขึ้นรูปได้ง่าย มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และมีความต้านทานต่ออุณหภูมิที่สูง ในการดำเนินการในขั้นตอนถัดไป

3.6.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X

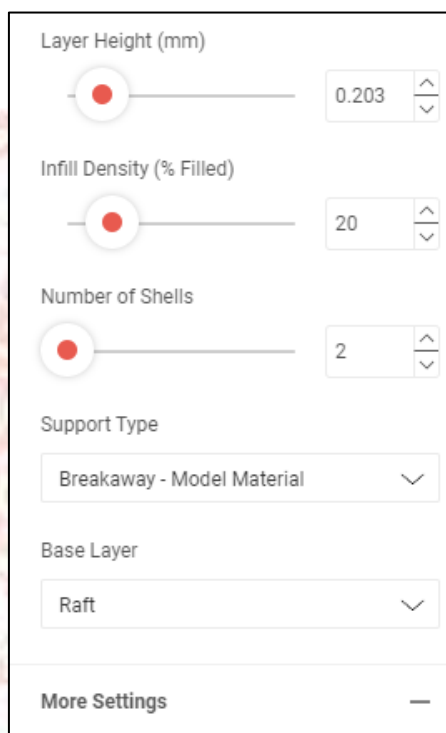
การทดสอบสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้มีค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติที่ ± 0.2 มม. ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องพิมพ์สามมิติเบื้องต้นก่อน ขั้นตอนแรกคือการสร้างชิ้นส่วนทดสอบโดยการนำรูปแบบโมเดลสามมิติของชิ้นส่วนหรือไฟล์นามสกุล STL เข้าสู่เว็บไซต์ MakerBot Cloud Print สำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติ เพื่อนำโมเดลสามมิติเป็นข้อมูลสำหรับการพิมพ์ชิ้นส่วน ลักษณะหน้าตาเว็บไซต์ที่ใช้ดังแสดงภาพที่ 3-31



ภาพที่ 3-31 เว็บไซต์ MakerBot Cloud Print สำหรับการตั้งค่า

ในขั้นตอนการเริ่มต้นการพิมพ์ชิ้นส่วนสามมิติ (3D model) หลังจากนำโมเดลเข้าสู่โปรแกรม MakerBot Cloud Print หรือ Slicing โปรแกรมจะมีการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการพิมพ์ โดยพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถตั้งค่าโดยการปรับที่แถบเมนูด้านขวาของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 3-32 จะเป็นการแสดงแถบการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกตั้งค่าเป็นค่าเริ่มต้น ค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นถูกแสดงอย่างละเอียดดังตารางที่ 3-14 โดยในการพิมพ์ครั้งแรกผู้วิจัยจะไม่ทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ใด ๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของพารามิเตอร์เริ่มต้น และเครื่องพิมพ์สามมิติก่อน ยกเว้นในส่วนประเภทของซัพพอร์ต (Support Type) ซึ่งเป็นส่วนของการสร้างวัสดุซัพพอร์ตเพื่อสร้างโครงสร้างชั่วคราวในการรองรับชิ้นส่วนที่ซับซ้อน เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนเสียรูปในระหว่างการพิมพ์อย่างไรก็ตาม เนื่องจากชิ้นส่วนทดสอบ ABS ในงานวิจัยนี้มีลักษณะที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ไม่

จำเป็นต้องสร้างซัพพอร์ตในการพิมพ์ ดังนั้นจึงเลือกประเภทซัพพอร์ตเป็น “Breakaway – Model Material” ซึ่งหมายความว่าในกรณีนี้ โปรแกรมจะใช้วัสดุ ABS เพียงอย่างเดียวในการพิมพ์ โดยไม่สร้างซัพพอร์ตขึ้นมา



Layer Height (mm)

0.203

Infill Density (% Filled)

20

Number of Shells

2

Support Type

Breakaway - Model Material

Base Layer

Raft

More Settings

ภาพที่ 3-32 การตั้งค่าพื้นฐานในโปรแกรม MakerBot Cloud Print

ตารางที่ 3-24 ค่าพารามิเตอร์ตามเริ่มต้นที่ได้รับจากโปรแกรม MakerBot Cloud Print

พารามิเตอร์	ระดับ
วัสดุ	ABS
ความหนาชั้น	0.2 มม.
ความเร็วในการพิมพ์	55 มม./วินาที
ความหนาผนัง	1 มม.
ความหนาแน่น	20%
อุณหภูมิหัวฉีด	260°C
อุณหภูมิโต๊ะขึ้นรูป	90°C
อัตราไหล	100%
โครงสร้างภายใน	Grid

หลังจากทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3-24 เรียบร้อยเสร็จแล้ว ทำการสั่งพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้นส่วน โดยในการพิมพ์แต่ละครั้งต้องพิมพ์ชิ้นส่วนเพียง 1 ชิ้นต่อครั้งเท่านั้น จากนั้นนำชิ้นส่วนทดสอบที่ได้รับไปทำการวัดขนาดของชิ้นส่วน เพื่อตรวจสอบและประเมินความคลาดเคลื่อนของขนาด โดยลักษณะของชิ้นส่วนทดสอบ ABS ทั้งหมด 5 ชิ้นส่วนแสดงดังภาพที่ 3-33



ภาพที่ 3-33 ลักษณะชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่พิมพ์ตามค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมด 5 ชิ้น

หลังจากพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ ABS ทั้ง 5 ชิ้นส่วนเสร็จสิ้น ผู้วิจัยทำการเก็บผลด้วยการวัดขนาดชิ้นส่วน เพื่อตรวจสอบขนาดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นที่พิมพ์ โดยกระบวนการนี้เริ่มจากการวัดขนาดของชิ้นส่วน ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และความยาวของชิ้นส่วน (L) เป็นค่าตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยทำการวัดขนาดทั้งหมด 3 ครั้ง ด้วยเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) ที่มีความละเอียดในการวัด 0.001 มม. ผลลัพธ์ที่ได้รับจะถูกตรวจสอบประสิทธิภาพของชิ้นส่วนด้วยการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติ ± 0.2 มม. ผลลัพธ์ที่ได้รับทั้งหมดจะถูกแสดงดังตารางที่ 3-25

ตารางที่ 3-25 ผลลัพธ์การวัดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่พิมพ์ตามค่าเริ่มต้นของโปรแกรม MakerBot Cloud Print

ชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่พิมพ์ตามค่าเริ่มต้นที่แนะนำจากโปรแกรม MakerBot Cloud Print ค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์ ± 0.2 มม. : ABS LH = 0.2 มม. PS = 55 มม. /วินาที TW = 1 มม.					
ครั้งที่	ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS				
	$D_1 = \varnothing 20^{+0.021}_{+0.008}$ มม.		$L_1 = 50^{+0.100}_0$ มม.		$D_2 = \varnothing 26$ มม.
	20.008	20.021	50.000	50.100	
1	20.089		50.257		26.125
2	20.106		50.275		26.164
3	20.101		50.266		26.115
4	20.085		50.213		26.176
5	20.116		50.293		26.117
ค่าเฉลี่ย	20.099		50.261		26.139

ผลการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วนที่ได้รับจากการวัดทั้งหมด 5 ชิ้นส่วน แสดงดังตารางที่ 3-25 เมื่อเทียบกับค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติที่กำหนด (± 0.2 มม.) พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มีค่าเฉลี่ยโดยรวม ($D_1 = 20.099$ มม.) และ ($D_2 = 26.139$ มม.) อยู่ในค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติที่กำหนด แต่ขนาดความยาวมีค่าเฉลี่ยโดยรวม ($L_1 = 50.261$ มม.) และ ($L_2 = 4.225$ มม.) พบว่ามีขนาดเกินค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติ อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ต้องอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไปทางบวก ($\varnothing 20^{+0.021}_{+0.008}$) และต้องอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางลบ ($\varnothing 20^{-0.020}_{-0.053}$) และความยาวมีค่าพิสัยความเผื่อของขนาด ($50^{+0.100}_0$) จากผลลัพธ์ดังตารางที่ 3-25 พบว่าขนาดของชิ้นส่วนมีขนาดเกินค่าพิสัยที่กำหนดไปทางบวก อยู่ในช่วง 20.008 มม. ถึง 20.021 มม.

3.6.4 การกำหนดระดับของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ขั้นตอนการพิจารณาเลือกกระดับของพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนในการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ ABS เนื่องจากผลการทดลองชิ้นส่วนทดสอบ PLA พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบที่สำคัญน้อยที่สุด คืออุณหภูมิหัวฉีด (TP) ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ไม่จำเป็นจะถูกตัดออก เพื่อลดจำนวนในการ

ทดลองให้น้อย และเพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุดเท่านั้น ดังนั้นการกำหนดพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

3.6.4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนถูกกำหนดเป็นระดับค่า โดยแบ่งออกทั้งหมด 3 ระดับคือ ค่าต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด โดยพิจารณาตามข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ทั้งหมด โดยสรุประดับของพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3-26 โดยความหนาชั้น (LH) 0.1 ถึง 0.4 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 ถึง 60 มม. / วินาที และความหนาของผนัง (TW) 1 ถึง 3 มม.

ตารางที่ 3-26 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับพิจารณาผลกระทบที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด

พารามิเตอร์	ค่าต่ำที่สุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด
ความหนาชั้น (LH)	0.1 มม.	0.3 มม.	0.4 มม.
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	20 มม. /วินาที	40 มม. /วินาที	60 มม. /วินาที
ความหนาผนัง (TW)	1 มม.	2 มม.	3 มม.

3.6.4.2 ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ สำหรับในการพิมพ์ชิ้นส่วน ที่ไม่เกี่ยวข้องในการพิจารณาในงานวิจัย

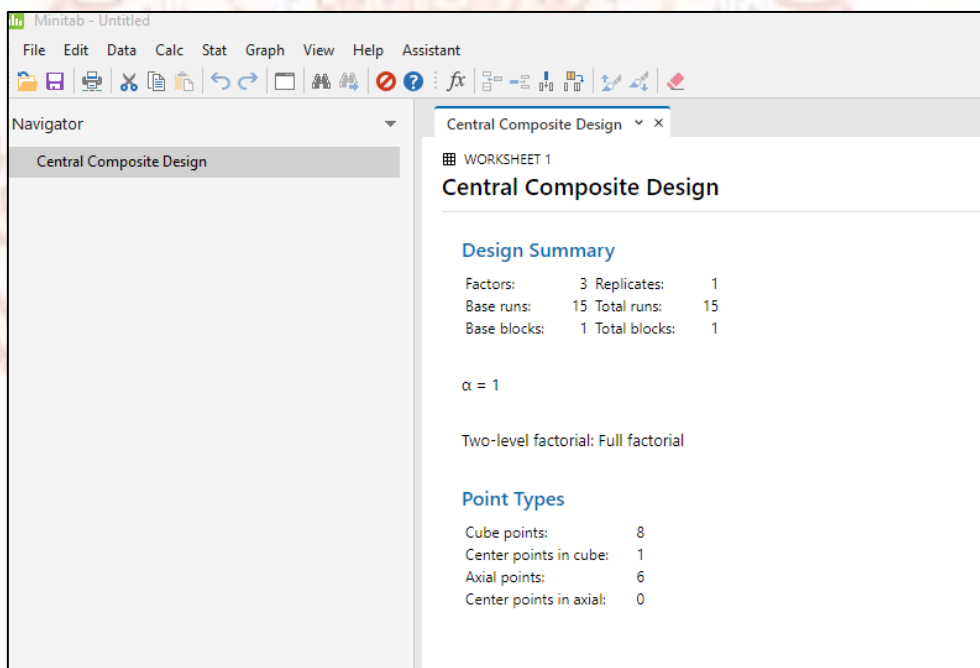
ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ จะถูกเรียกว่าค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น เนื่องจากเป็นค่ามาตรฐานในการพิมพ์ชิ้นส่วนพื้นฐาน หรือค่าที่แนะนำโดยโปรแกรม MakerBot Cloud Print ดังตารางที่ 3-2 ยกเว้นคุณสมบัติของหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างชิ้นส่วนจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นส่วน วัสดุที่ใช้ในการทดสอบคือวัสดุ ABS ซึ่งมีจุดหลอมเหลวของวัสดุ 260°C และลักษณะของโครงสร้างภายในกำหนดให้มีความหนาแน่นที่ 20 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะโครงสร้างแบบตาราง (Grid) กำหนดอุณหภูมิของโต๊ะขึ้นรูป 90°C แสดงดังตารางที่ 3-27

ตารางที่ 3-27 ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องในการพิจารณา

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

3.7 การออกแบบการทดลองแบบ (CCD) และเก็บข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุ ABS

3.7.1 ขั้นตอนการออกแบบแผนการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง Central Composite Design, CCD) เพื่อออกแบบการทดลองเป็นจำนวนการทดลองด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน การพิจารณาพารามิเตอร์ในการพิมพ์สามมิติทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) แสดงดังตารางที่ 3-26 จากการทดสอบสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเส้นโค้ง (Quadratic) อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นรูปแบบของ CCD ที่ใช้เพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์คือรูปแบบของ Face Centered หรือ CCF ซึ่งจะมีค่า $\alpha = 1$ เนื่องจาก CCF สามารถวิเคราะห์แนวโน้มที่มีลักษณะเส้นโค้งได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับ Inscribed หรือ CCI แม้ว่าวิธีนี้มีช่วงการทดลองที่แคบกว่า แต่ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเส้นโค้ง (Quadratic) ไม่ดีเท่ารูปแบบ CCF ผลลัพธ์ที่ได้รับคือแผนการออกแบบการทดลอง โดยแสดงผลลัพธ์คือ Cube points = 8, Center points in cube = 1, Axial points = 6 ดังแสดงภาพที่ 3-34 ซึ่งจำนวนของชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่ต้องทำการพิมพ์มีทั้งหมด 15 ชิ้น โดยในแต่ละชิ้นส่วนจะมีการปรับพารามิเตอร์ในการตั้งค่าที่แตกต่างกัน เพื่อให้ครอบคลุมผลลัพธ์ที่ได้ให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยสรุปผลลัพธ์ของแผนการทดลองทั้ง 15 ชิ้นส่วนการทดลองดังแสดงตารางที่ 3-21



ภาพที่ 3-34 ผลลัพธ์การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

ตารางที่ 3-28 ตัวอย่างการจัดจำนวนการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab.

จำนวน	ความหนาชั้น (LH)		ความเร็วในการพิมพ์ (SP)		ความหนาผนัง (WT)	
	Actual Value	Coded Level	Actual Value	Coded Level	Actual Value	Coded Level
1	0.10	-1	20	-1	1	-1
2	0.40	+2	20	-1	1	-1
3	0.10	-1	60	+1	1	-1
4	0.40	+1	60	+1	1	-1
5	0.10	-1	20	-1	3	+1
6	0.40	+1	20	-1	3	+1
7	0.10	-1	60	+1	3	+1
8	0.40	+1	60	+1	3	+1
9	0.10	- α	40	0	2	0
10	0.40	+ α	40	0	2	0
11	0.25	0	20	- α	2	0
12	0.25	0	60	+ α	2	0
13	0.25	0	40	0	1	- α
14	0.25	0	40	0	3	+ α
15	0.25	0	40	0	2	0

เนื่องจากในการออกแบบกำหนดค่า $\alpha = 1$ ทำให้ชิ้นส่วนแถวที่ 9 ถึง 14 ค่าระดับของพารามิเตอร์ที่ $+\alpha$ และ $-\alpha$ จะเท่ากับ +1 และ -1 หรือมีค่าเท่ากับค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของระดับพารามิเตอร์ที่กำหนด

3.7.2 การสร้างชิ้นส่วนด้วยแผนการทดลองทั้ง 15 ชิ้น โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X ด้วยกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ในการกำหนดพารามิเตอร์จะถูกกำหนดตามแผนการทดลองดังตารางที่ 3-28 ด้วยโปรแกรม MakerBot Cloud Print ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ ABS แสดงดังภาพที่ 3-35



ภาพที่ 3-35 ตัวอย่างชิ้นส่วนทดสอบ ABS ทั้งหมด 15 ชิ้น

3.7.3 การจัดเก็บค่าสนองจากการวัดชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ในการเก็บผลค่าตอบสนองของชิ้นงานทดสอบจะกำหนดให้ค่าตอบสนองคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และขนาดความยาว (L) ของชิ้นส่วนทดสอบ ABS โดยการวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) รุ่น Sylvac S-Cal PRO ที่มีความแม่นยำสูงสุด 0.001 มม. ดังแสดงภาพที่ 3-36 ซึ่งการวัดชิ้นส่วนด้วยเครื่องมือวัดทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้งดังแสดงภาพที่ 3-18 ตามการวัดแบบการทดลองครั้งแรก



ภาพที่ 3-36 ตัวอย่างการวัดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ รุ่น Sylvac S-Cal PRO

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ คือการนำข้อมูลที่ได้รับจากการวัดขนาดชิ้นส่วน สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการและหาการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ ABS ให้มีขนาดอยู่ในค่าปกติ

ความเผื่อที่กำหนด โดยกำหนดให้ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และ L คือความยาวของชิ้นส่วน
สรุปผลการจัดเตรียมข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS เพื่อให้ได้
ข้อมูลนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลาย
ลายเส้นใย (FDM) โดยผลลัพธ์จะแสดงดังตารางที่ 3-29

ตารางที่ 3-29 ผลสรุปการจัดเตรียมข้อมูลในการทดลองสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ข้อมูลในการทดลองสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS	
ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 26 มม. และความยาว 57 มม.
เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้	รุ่น MakerBot Method X
วัสดุที่ใช้	เส้นพลาสติก ABS
พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับพิจารณา	-ความหนาชั้น (LH) -ความเร็วในการพิมพ์ (SP) -ความหนาผนัง (TW)
ค่าตอบสนองที่สนใจ	-ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) -ขนาดความยาว (L)

จากตารางที่ 3-29 ชิ้นส่วนทดสอบ ABS มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุด 26 มม. และความยาว 57 มม. ที่พิมพ์ชิ้นส่วนตามแบบแผนการทดลองโดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X โดยใช้วัสดุเส้นใย ABS และเก็บค่าตอบสนองที่สนใจจากการวัดขนาดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และขนาดความยาว (L) ซึ่งผลลัพธ์จะถูกวิเคราะห์ผลกระทบและการหาการตั้งค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายลายเส้นใย (FDM)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากผลลัพธ์การทดลอง และวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ชิ้นส่วนมีขนาดอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อกำหนดทั้ง 2 กรณีคือพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางบวก และค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางลบ ทำการทดลองตามขั้นตอนการดำเนินงานในบทที่ 3 บทนี้ จะนำเสนอผลลัพธ์ของการดำเนินงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

4.1 ผลลัพธ์การเก็บค่าตอบสนองจากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์

ผลลัพธ์ที่ได้รับจากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ในการวัดขนาดชิ้นส่วนค่าที่ได้รับคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และขนาดความยาว (L) ของชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (Vernier Caliper) ที่มีความแม่นยำสูงสุด 0.001 มม. และทำการวัดขนาดทั้งหมด 3 ครั้ง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลลัพธ์การวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ทั้งหมด 15 ชิ้น

ชิ้นที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)				ขนาดความยาว (L)			
	D _{low}	D _{Center}	D _{Hight}	D	L ₁	L ₂	L ₂	L
1	19.537	19.574	19.562	19.558	49.989	49.992	49.985	49.989
2	19.955	19.944	19.948	19.949	49.963	49.957	49.961	49.960
3	19.513	19.498	19.535	19.515	50.116	50.121	50.113	50.117
4	19.924	19.909	19.898	19.910	50.053	50.058	50.051	50.054
5	19.581	19.586	19.643	19.603	50.151	50.144	50.156	50.150
6	20.018	20.026	20.008	20.017	50.174	50.177	50.169	50.173
7	19.452	19.494	19.496	19.481	50.183	50.172	50.178	50.178
8	19.835	19.810	19.846	19.830	49.954	49.948	49.959	49.954
9	19.488	19.472	19.534	19.498	50.091	50.089	50.085	50.088

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

ชั้นที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)				ขนาดความยาว (L)			
	D _{low}	D _{Center}	D _{Hight}	D	L ₁	L ₂	L ₂	L
10	19.871	19.851	19.893	19.872	50.024	50.034	50.021	50.026
11	19.878	19.892	19.857	19.876	50.063	50.069	50.058	50.063
12	19.909	19.915	19.916	19.913	50.045	50.041	50.035	50.040
13	19.834	19.785	19.782	19.800	50.062	50.066	50.063	50.064
14	19.942	19.912	19.961	19.938	50.071	50.069	50.078	50.073
15	19.897	19.886	19.892	19.892	50.047	50.055	50.051	50.051

ผลจากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ค่า D และค่า L ดังแสดงตารางที่ 4-1 คือค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และค่าขนาดความยาว (L) จากนั้นข้อมูลที่ได้รับนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab

4.2 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS เพื่อหาการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน แสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

จากผลลัพธ์การวิเคราะห์ข้อมูลออกมาในรูปแบบของสมการถดถอย (Regression Model) แสดงดังสมการที่ 4-1 เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ กับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม คือความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) โดยมีระดับความเหมาะสมของข้อมูลหรือ R^2 คือ 96.70% นั้นหมายความว่าข้อมูลทั้งหมดมีความน่าเชื่อถือ

$$D = 19.8676 + 0.1924(LH) - 0.0353(SP) + 0.0137(TW) - 0.1768(LH \times LH) + 0.0329(SP \times SP) + 0.0077(TW \times TW) - 0.0076(LH \times SP) - 0.028(LH \times TW) - 0.0286(SP \times TW) \quad (4-1)$$

โดยที่ D คือค่าตอบสนอง (ความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) LH คือความหนาชั้น SP คือความเร็วในการพิมพ์ TP คืออุณหภูมิหัวฉีด และ TW คือความหนาผนัง ซึ่งอธิบายสมการออกมาดังนี้

4.2.1.1 ค่า 19.8676 คือค่าคงที่ของ D เมื่อทุกตัวแปรมีค่าเป็น 0

4.2.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear terms) กรณีที่ตัวแปรอื่นคงที่

4.2.1.2.1 ค่า 0.1924(LH): การเพิ่มขึ้นของ LH ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D เพิ่มขึ้น 0.1924 หน่วย

4.2.1.2.2 ค่า -0.0353(SP) : การเพิ่มขึ้นของ SP ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D ลดลง 0.0353 หน่วย

4.2.1.2.3 ค่า 0.0137(TW) : การเพิ่มขึ้นของ TP ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า D เพิ่มขึ้น 0.0137 หน่วย

4.2.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง (Quadratic terms)

4.2.1.3.1 ค่า -0.1768(LH*LH) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ LH^2 แสดงถึงความสัมพันธ์ต่อค่า D มีลักษณะเส้นโค้งไปในทิศทางค่าลบอย่างมาก

4.2.1.3.2 ค่า 0.0329(SP*SP) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ SP^2 แสดงถึงความสัมพันธ์ต่อค่า D มีลักษณะเส้นโค้งไปในทิศทางค่าบวกเพียงเล็กน้อย

4.2.1.3.3 ค่า -0.0808(TW*TW) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ TW^2 แสดงถึงความสัมพันธ์ต่อค่า D มีลักษณะเส้นโค้งไปในทิศทางค่าลบ

4.2.1.4 ผลของปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่มีผลต่อค่า D

4.2.1.4.1 ค่า -0.0076(LH*SP) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*SP$ มีค่าน้อยมากและติดลบแสดงว่าการเพิ่มระดับพร้อมกันส่งผลต่อค่า D ไปในทิศทางค่าลบ เพียงเล็กน้อย

4.2.1.4.2 ค่า -0.0028(LH*TW) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*TP$ มีค่าน้อยมากและติดลบแสดงว่าการเพิ่มระดับพร้อมกันส่งผลต่อค่า D ไปในทิศทางค่าลบ เพียงเล็กน้อย

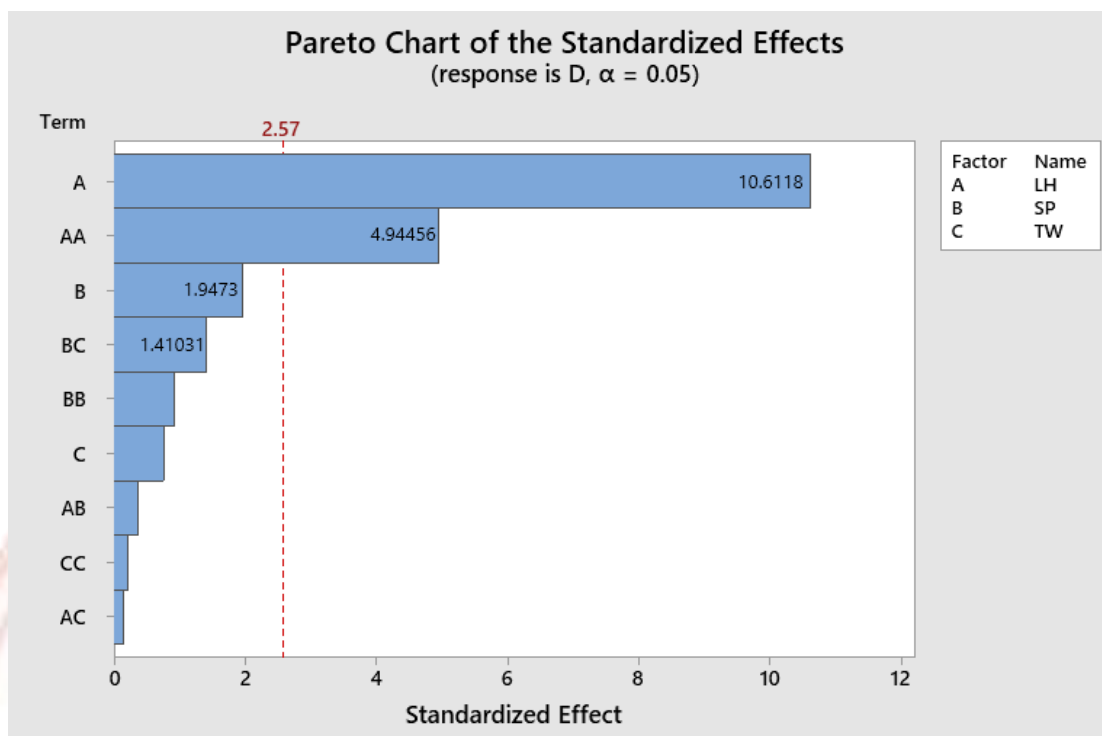
4.2.1.4.3 ค่า -0.0286(SP*TW) : ค่าสัมประสิทธิ์ของ $SP*TW$ มีค่าติดลบ แสดงว่าการเพิ่มระดับพร้อมกันส่งผลต่อค่า D ไปในทิศทางค่าลบ

ส่วนผลลัพธ์การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) แสดงดังตารางที่ 4.2 กำหนดให้ระดับนัยสำคัญมากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-2 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

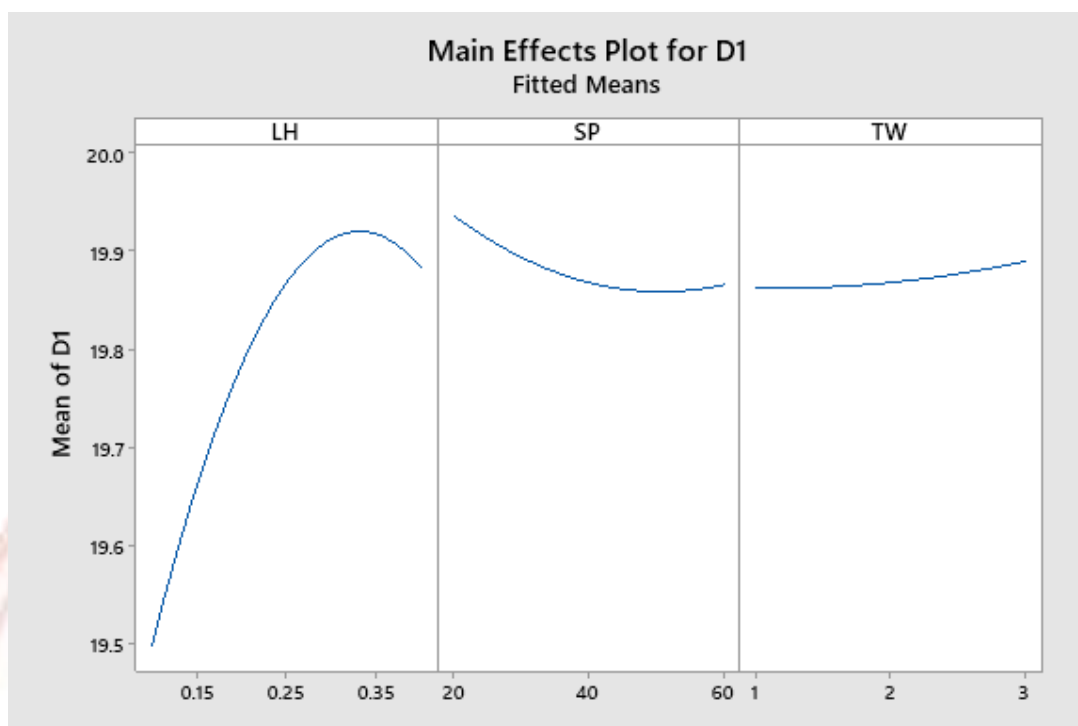
พารามิเตอร์	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Linear	3	0.384396	0.128132	16.26	0.003
ความหนาชั้น (LH)	1	0.370049	0.370049	112.61	0.000
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	1	0.012461	0.012461	3.79	0.109
ความหนาผนังชั้น (TW)	1	0.001886	0.001886	0.57	0.483
Square	3	0.089475	0.029825	9.08	0.018
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น (LH ²)	1	0.080341	0.080341	24.45	0.004
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์ (SP ²)	1	0.002785	0.002785	0.85	0.400
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น (TW ²)	1	0.000154	0.000154	0.05	0.837
2-Way Interaction	3	0.007060	0.002353	0.72	0.583
ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LH x SP)	1	0.000460	0.000460	0.14	0.724
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW)	1	0.000064	0.000064	0.02	0.894
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW)	1	0.006536	0.006536	1.99	0.218
Error	5	0.016431	0.003286	-	-
Total	14	0.497362		-	-

จากตารางที่ 4-2 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) คือ ความหนาชั้น (LH) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Square) คือ ความหนาชั้นกำลังสอง (LH²) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.004 เนื่องจากพารามิเตอร์ที่เหล่านี้มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ทำให้พารามิเตอร์เหล่านี้มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ส่วนพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) มีค่า P-Value ของกลุ่มเท่ากับ 0.583 ซึ่งค่ามากกว่า 0.05 ความว่าการปรับพารามิเตอร์รวมไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)



ภาพที่ 4-1 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

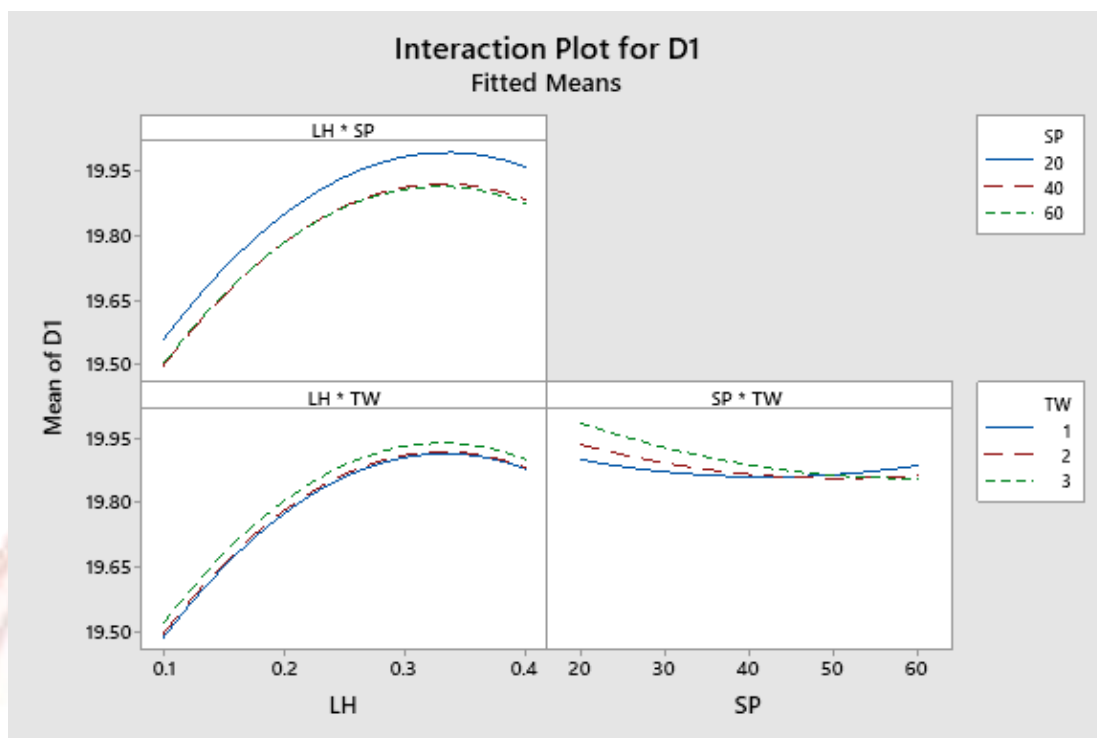
แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter, D) ซึ่งแสดงถึงความสำคัญของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อ DE ช่วยให้เห็นถึงพารามิเตอร์ใดที่มีผลกระทบมากที่สุดและ พารามิเตอร์ใดมีผลกระทบน้อยที่สุดได้อย่างชัดเจนโดยกำหนดให้เส้นประแนวนอนสีแดงที่ระดับ 2.57 แสดงถึงค่าเกณฑ์นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($\alpha = 0.05$) ซึ่งได้จากการนำค่า df ของ Error มีค่าเท่ากับ 5 เมื่อเทียบกับตารางแจกแจงค่าวิกฤตแบบ t – Distribution ซึ่งหาค่า Standardized Effect ของพารามิเตอร์เกินค่าเกณฑ์ 2.57 หมายความว่านัยสำคัญทางสถิติ จากผลลัพธ์พบว่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ ความหนาของชั้น (LH) 10.6118 รองลงมาคือ ความหนาของชั้นกำลังสอง (LH²) 4.94456 ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีระดับน้อยกว่าเกณฑ์ คือพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญน้อยมากแสดงดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-2 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ได้จากการนำสมการถดถอย (Regression Model) ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ดังสมการที่ 4-1 แสดงออกมาเป็นรูปแบบของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าตอบสนอง ดังแสดงภาพที่ 4-2 พบว่าจากกราฟแนวแกน Y ได้แสดงให้เห็นถึงช่วงของขนาดชิ้นส่วนส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าขนาดที่กำหนด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 20 มม.) จากกราฟที่แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของความหนาชั้น (LH) ยิ่งมากยิ่งขึ้นทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เข้าใกล้ขนาดที่กำหนด ($\phi 20$) มากขึ้นก่อนที่จะลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ความหนาชั้น (SP) และความหนาผนัง (TW) ยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดชิ้นส่วนเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-1 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) หรือ 2-Way Interaction ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_1) การปรับพารามิเตอร์ร่วมกันไม่ส่งผลหรือส่งผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังแสดงภาพที่ 4-3 แสดงให้เห็นถึง การปรับความหนาชั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกับพารามิเตอร์อื่น ๆ ให้ผลลัพธ์ที่แนวโน้มเดียวกัน ยกเว้นความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) ที่ปรับพร้อมกันส่งผลเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 4-3 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วมที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

สำหรับผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) หรือการปรับพารามิเตอร์ 2 ตัวที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_1) ได้จากการนำสมการถดถอย (Regression Model) ที่ได้รับจากการวิเคราะห์ดังสมการที่ 4-1 แสดงออกมาเป็นรูปแบบของสัมพันธพารามิเตอร์ 2 ตัวแปรออกมาเป็นกราฟเส้น ดังแสดงภาพที่ 4-3 พบว่าพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) หรือ 2-Way Interaction ไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_1) การปรับพารามิเตอร์ร่วม หรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยอธิบายแนวโน้มของกราฟที่แสดงดังต่อไปนี้

ความหนาชั้น $\times$ ความเร็วในการพิมพ์ (LH $\times$ SP): การปรับความเร็วในการพิมพ์ (SP) ในแต่ละระดับ (20 40 และ 60) พบว่ามีความชันที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย หรือขนานกันอย่างชัดเจนเมื่อปรับระดับความหนาชั้น (LH) ดังนั้นการปรับพร้อมกันไม่ส่งผลต่อกันและกัน ต่อค่า D_1

ความหนาชั้น $\times$ ความหนาผนัง (LH $\times$ TW): การปรับความหนาผนัง (TW) ในแต่ละระดับพบว่ามีความชันที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย หรือขนานกันอย่างชัดเจนเมื่อปรับระดับความหนาชั้น (LH) ดังนั้นการปรับพร้อมกันไม่ส่งผลต่อกันและกัน ต่อค่า D_1

ความเร็วในการพิมพ์ $\times$ ความหนาผนัง (SP $\times$ TW): การปรับความหนาผนัง (TW) ในแต่ละระดับพบว่า มีความชันที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และมีแนวโน้มของเส้นตัดกัน เมื่อปรับระดับความเร็วในการพิมพ์ (SP) แต่การเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ค่า D_1 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากการสรุปผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการทั้ง 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_1) พบว่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญมากที่สุดคือ ความหนาชั้น (LH) ซึ่งการปรับระดับเพิ่มขึ้นผลลัพธ์ที่แสดงเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางบวกอย่างมาก ก่อนที่แนวโน้มจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไปในทิศทางลบในลักษณะเส้นโค้งตามผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ ความหนาชั้น $\times$ ความหนาชั้น (LH^2) ที่มีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด ส่วนความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) พบว่าไม่มีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อน ซึ่งแนวโน้มของผลลัพธ์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และในแง่ของการปรับพารามิเตอร์ร่วม 2 ตัวแปรพบว่าพารามิเตอร์ร่วมทั้งหมดไม่มีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด

4.2.2 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

จากผลลัพธ์การวิเคราะห์ข้อมูลออกมาในรูปแบบของสมการถดถอย (Regression Model) แสดงดังสมการที่ 4-2 เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ กับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม คือความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) โดยมีระดับความเหมาะสมของข้อมูลคือ 87.52% นั้นหมายความว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ

$$L = 50.0522 - 0.0354(LH) + 0.0006(SP) + 0.0344(WT) + 0.0048(LH \times LH) - 0.0007(SP \times SP) + 0.0156(WT \times WT) - 0.0352(LH \times SP) - 0.0137(LH \times WT) - 0.0517(SP \times WT) \quad (4-2)$$

โดยที่ L คือค่าตอบสนอง (ความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว) LH คือความหนาชั้น SP คือความเร็วในการพิมพ์ และ TW คือความหนาผนัง ซึ่งอธิบายสมการออกมาดังนี้

4.2.2.1 ค่า 50.0522 คือค่าคงที่ของ L เมื่อทุกตัวแปรมีค่าเป็น 0

4.2.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear terms) กรณีที่ตัวแปรอื่นคงที่

4.2.2.2.1 ค่า $-0.0354(LH)$: การเพิ่มขึ้นของ LH ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า L ลดลง 0.0354 หน่วย

4.2.2.2.2 ค่า $0.0006(SP)$: การเพิ่มขึ้นของ SP ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า L เพิ่มขึ้น 0.0006 หน่วย

4.2.2.2.3 ค่า $0.0344(TW)$: การเพิ่มขึ้นของ TW ที่ 1 หน่วย ทำให้ค่า L เพิ่มขึ้น 0.0344หน่วย

4.2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสอง (Quadratic terms)

4.2.2.3.1 ค่า $0.0048(LH \times LH)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ LH^2 แสดงถึงความสัมพันธ์ต่อค่า L มีลักษณะเส้นโค้งไปในทิศทางบวกเพียงเล็กน้อย

4.2.2.3.2 ค่า $-0.0007(SP*SP)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ SP^2 แสดงถึงความสัมพันธ์ต่อค่า L มีลักษณะเส้นโค้งไปในทิศทางลบน้อยมาก หรือเป็นเส้นตรง

4.2.2.3.3 ค่า $0.0156(TW*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ TW^2 แสดงถึงความสัมพันธ์ต่อค่า L มีลักษณะเส้นโค้งไปในทิศทางบวก

4.2.2.4 ผลของปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ที่มีผลต่อค่า L

4.2.2.4.1 ค่า $-0.0352(LH*SP)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*SP$ มีค่าติดลบแสดงว่าการเพิ่มระดับพร้อมกันส่งผลต่อค่า L ไปในทิศทางค่าลบ

4.2.2.4.2 ค่า $-0.0137(LH*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $LH*TP$ มีค่าติดลบแสดงว่าการเพิ่มระดับพร้อมกันส่งผลต่อค่า L ไปในทิศทางค่าลบ

4.2.2.4.3 ค่า $-0.0517(SP*TW)$: ค่าสัมประสิทธิ์ของ $SP*TW$ มีค่าติดลบแสดงว่าการเพิ่มระดับพร้อมกันส่งผลต่อค่า L ไปในทิศทางค่าลบอย่างมาก

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) กำหนดให้ระดับนัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ดังแสดงตารางที่ 4-3

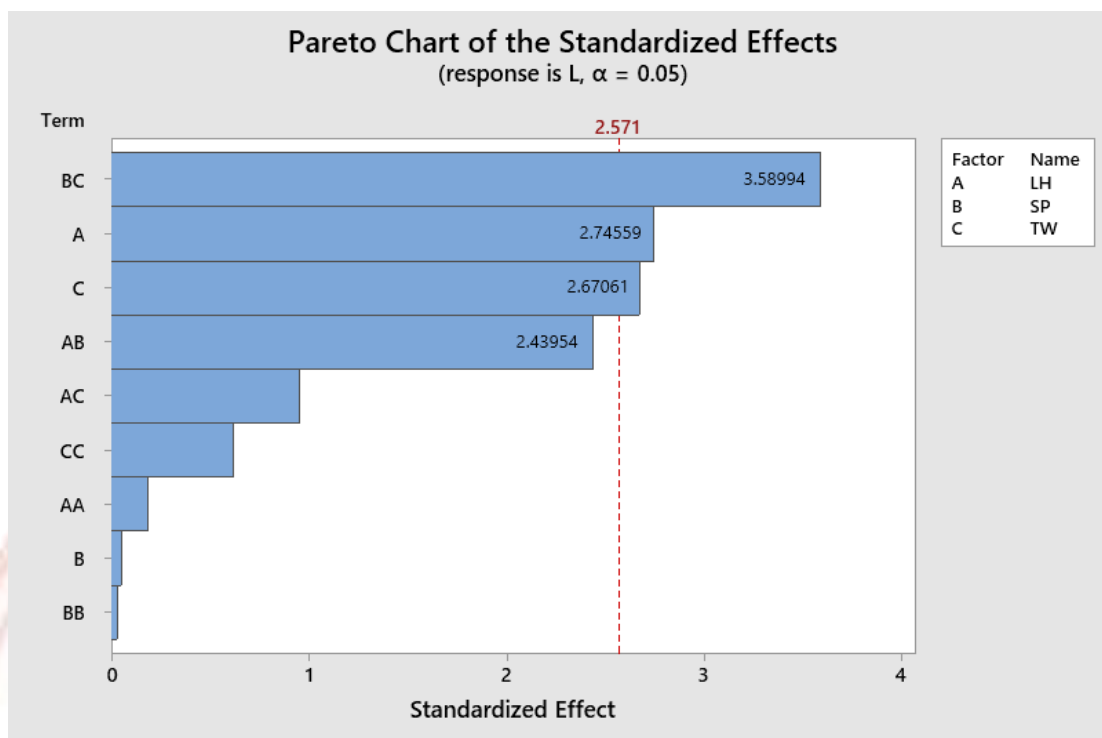
ตารางที่ 4-3 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

พารามิเตอร์	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Linear	3	0.024392	0.008131	4.89	0.060
ความหนาชั้น (LH)	1	0.012532	0.012532	7.54	0.041
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	1	0.000004	0.000004	0.00	0.963
ความหนาผนังชั้น (TW)	1	0.011857	0.011857	7.13	0.044
Square	3	0.001050	0.000350	0.21	0.885
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น (LH^2)	1	0.000059	0.000059	0.04	0.858
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์ (SP^2)	1	0.000001	0.000001	0.00	0.978
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น (TW^2)	1	0.000627	0.000627	0.38	0.566
2-Way Interaction	3	0.032831	0.010944	6.58	0.035
ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ ($LH \times SP$)	1	0.009894	0.009894	5.95	0.059

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

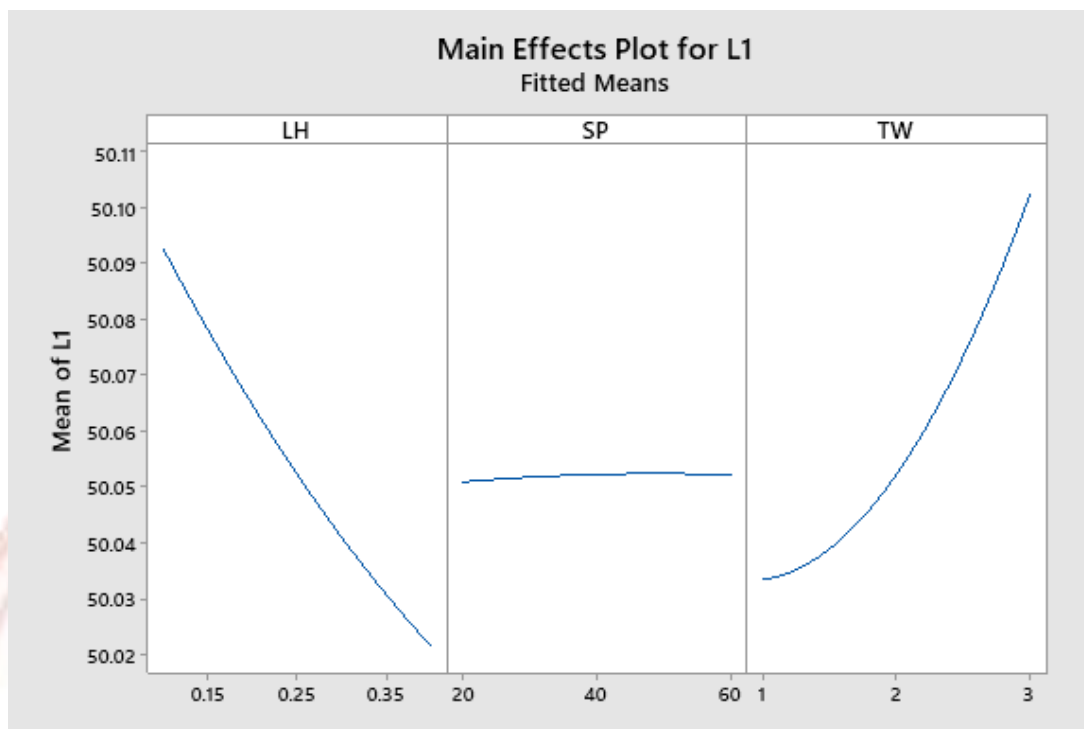
พารามิเตอร์	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW)	1	0.001512	0.001512	0.91	0.384
ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW)	1	0.021424	0.021424	12.89	0.016
Error	5	0.008312	0.001662	-	-
Total	14	0.066585	-	-	-

จากตารางที่ 4-3 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear) คือ ความหนาชั้น (LH) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.041 และความหนาผนัง (TW) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.044 ยกเว้นความเร็วในการพิมพ์ที่ไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.963 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ที่กำหนด ส่วนพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Square) พบว่าไม่มีพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value ของกลุ่ม (Square) มีค่าเท่ากับ 0.885 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 และส่วนพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) คือ ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW) มีค่า P-Value เท่ากับ 0.016 ในขณะเดียวกันพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง คือพารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หรือมีความสำคัญน้อยมาก



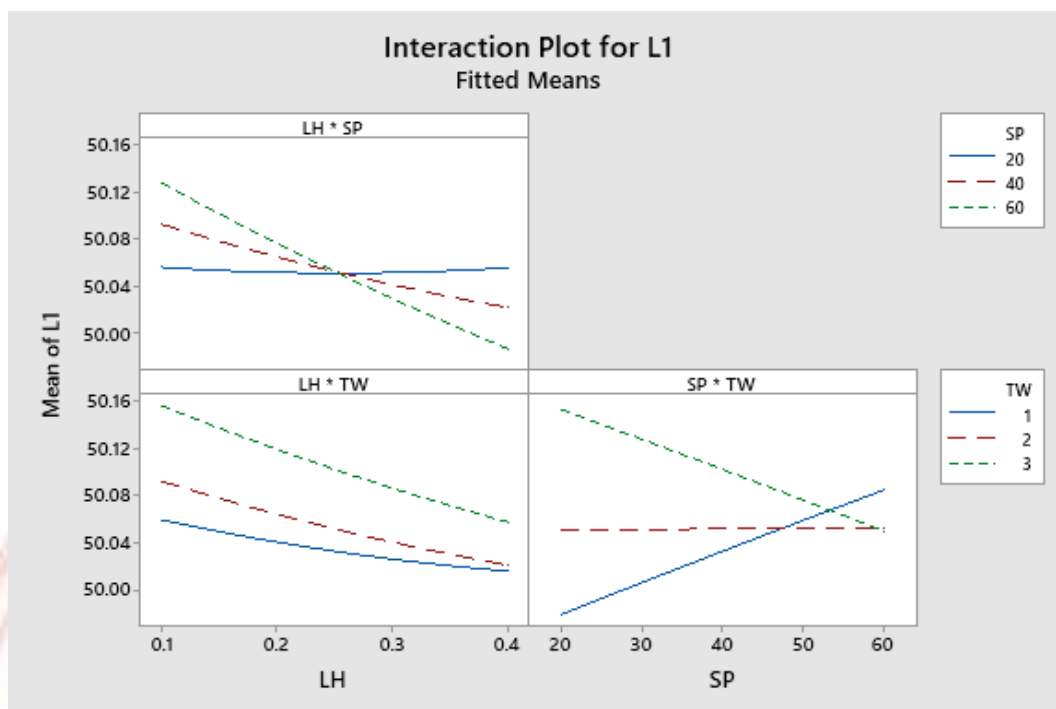
ภาพที่ 4-4 แผนภูมิพารโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

แผนภูมิพารโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ซึ่งแสดงถึงความสำคัญของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อขนาดความยาว (L) ช่วยให้เห็นถึงพารามิเตอร์ใดที่มีผลกระทบมากที่สุดและ พารามิเตอร์ใดมีผลกระทบน้อยที่สุดได้อย่างชัดเจน โดยกำหนดให้เส้นประแนวนอนสีแดงที่ระดับ 2.571 แสดงถึงค่าเกณฑ์ที่ใช้ันัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($\alpha = 0.05$)) ซึ่งได้จากการนำค่า df ของ Error มีค่าเท่ากับ 5 เมื่อเทียบกับตารางแจกแจงค่าวิกฤตแบบ t – Distribution ซึ่งหากค่า Standardized Effect ของพารามิเตอร์เกินค่าเกณฑ์ 2.57 หมายความว่ามีความนัยสำคัญทางสถิติ จากผลลัพธ์พบว่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x WT) มีค่า Standardized Effect เท่ากับ 3.58994 รองลงมาคือ ความหนาชั้น (LH) 2.74559 และความหนาผนัง (WT) 2.67061 ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีระดับน้อยกว่าเกณฑ์ คือพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญน้อยมากแสดงดังภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-5 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยวที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (Main Effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ได้จากการนำสมการถดถอย (Regression Model) ที่ได้รับการวิเคราะห์ดังสมการที่ 4-1 แสดงออกมาเป็นรูปแบบของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และค่าตอบสนอง ดังแสดงภาพที่ 4-5 พบว่าจากกราฟแนวแกน Y ได้แสดงให้เห็นถึงช่วงของขนาดของชิ้นส่วนส่วนใหญ่มีขนาดมากกว่าขนาดที่กำหนด (ความยาว = 50 มม.) โดยที่แนวโน้มของความหนาชั้น (LH) ยิ่งมากทำให้ขนาดความยาวเข้าใกล้ขนาดที่กำหนด ในตรงข้ามกันความหนาผนังยังลดลงยิ่งเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดมากขึ้น แต่ความเร็วในการพิมพ์ (SP) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยแสดงดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-6 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วมที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

สำหรับผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (Interaction) หรือการปรับพารามิเตอร์ 2 ตัวที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) ได้จากการนำสมการถดถอย (Regression Model) ที่ได้รับการวิเคราะห์ดังสมการที่ 4-2 แสดงออกมาเป็นรูปแบบของสัมพันธ์พารามิเตอร์ 2 ตัวแปรออกมาเป็นกราฟเส้น ดังแสดงภาพที่ 4-6 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีแนวโน้มที่สำคัญ โดยอธิบายแนวโน้มของกราฟที่แสดงดังต่อไปนี้

ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LH x SP): การปรับความเร็วในการพิมพ์ (SP) ในแต่ละระดับ (20 40 และ 60) พบว่ามีความชันที่แตกต่างกันอย่างมาก และมีการตัดกันอย่างชัดเจนในแต่ละระดับ เมื่อปรับระดับความหนาชั้น (LH) ดังนั้นการปรับพร้อมกันจึงส่งผลต่อกันและกันต่อค่า (L)

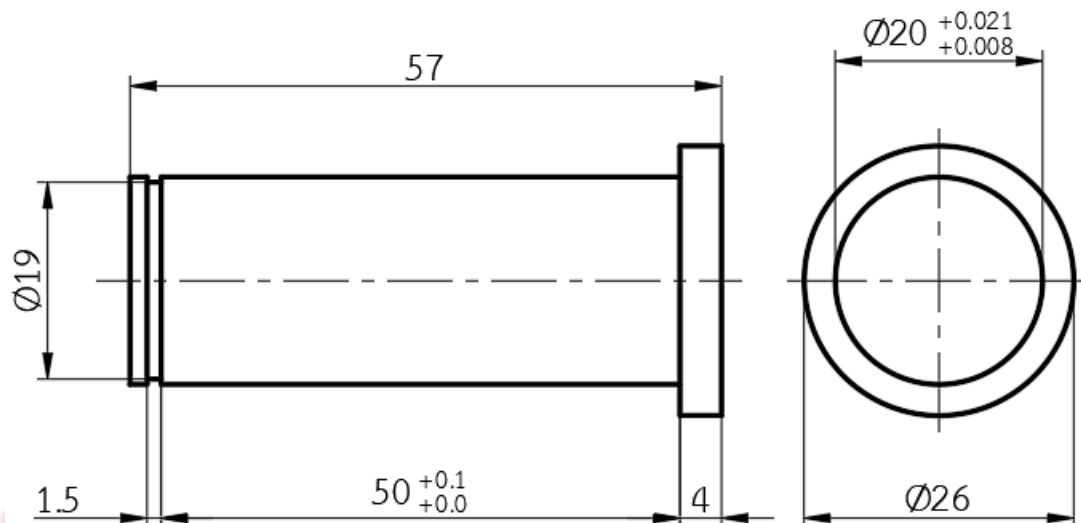
ความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LH x TW): การปรับความหนาผนัง (TW) ในแต่ละระดับพบว่ามีความชันที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อปรับระดับความหนาชั้น (LH) ดังนั้นการปรับพร้อมกันส่งผลต่อกันและกันต่อค่า (L) เล็กน้อย

ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SP x TW): การปรับความหนาผนัง (TW) ในแต่ละระดับ พบว่ามีความชันที่แตกต่างกันอย่างมาก และมีการตัดกันอย่างชัดเจนในแต่ละระดับเมื่อปรับระดับความเร็วในการพิมพ์ (SP) ดังนั้นการปรับพร้อมกันส่งผลต่อกันและกันต่อค่า (L) อย่างมาก

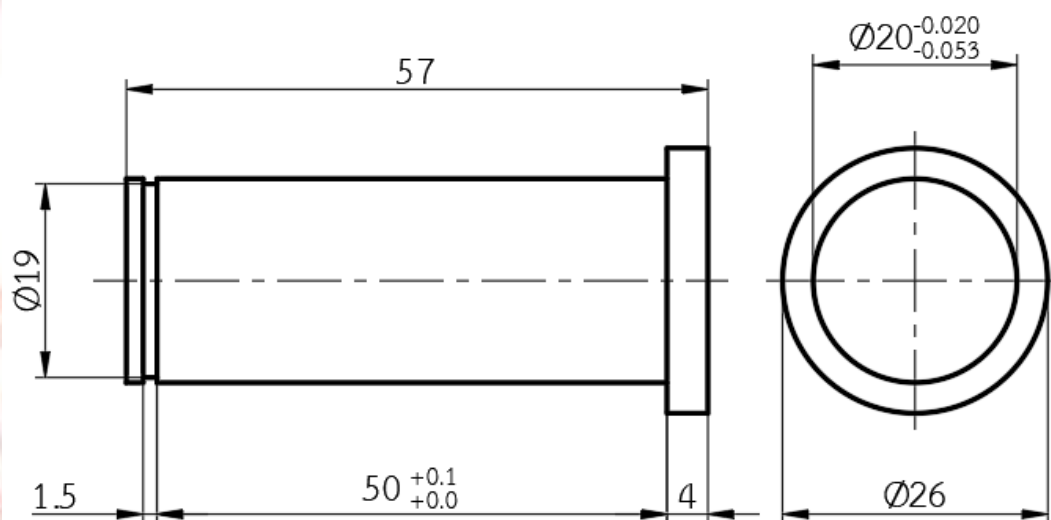
จากการสรุปผลลัพธ์การวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการทั้ง 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) พบว่าพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญมากที่สุดคือ ความเร็วในการพิมพ์ $\times$ ความหนาผนัง (SP $\times$ TW) พบว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด แม้ว่าความเร็วในการพิมพ์ (SP) จะไม่มีนัยสำคัญ แต่การปรับร่วมกับความหนาผนัง (TW) มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์มีนัยสำคัญอย่างมาก ในการปรับในแต่ละระดับได้ให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อปรับความหนาผนัง (TW) ต่อมาความหนาชั้น (LH) ซึ่งการปรับระดับเพิ่มขึ้นผลลัพธ์ที่แสดงเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลบอย่างมาก ส่งผลให้ขนาดชิ้นส่วนมีความคลาดเคลื่อนของความยาว (L) ลดลง แต่ในขณะเดียวกันความหนาผนัง (TW) การปรับระดับเพิ่มขึ้นผลลัพธ์ที่แสดงเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางบวกอย่างมาก ส่งผลให้ขนาดชิ้นส่วนมีความคลาดเคลื่อนของความยาว (L) เพิ่มขึ้นอย่างมาก และความเร็วในการพิมพ์ (SP) พบว่าไม่มีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด ซึ่งแนวโน้มของผลลัพธ์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.2.3 ผลลัพธ์การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ผลลัพธ์การหาค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ ABS โดยการใช้วิธี Response Optimization ด้วยโปรแกรม Minitab และกำหนดให้จุดมุ่งหมายของการหาค่าพารามิเตอร์กระบวนการที่เหมาะสมคือ ชิ้นส่วนทดสอบ ABS มีขนาดอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อที่กำหนด โดยแบ่งผลลัพธ์ที่ได้รับออกเป็น 2 กรณี ได้แก่กรณีที่ 1 ชิ้นส่วนที่มีค่าพิสัยความเผื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ไปทางบวกในช่วง $(\varnothing 20^{+0.021}_{+0.008})$ และความยาว (L) ที่ $(50^{+0.100}_0)$ ดังแสดงภาพที่ 4-7 ส่วนกรณีที่ 2 ชิ้นส่วนที่มีพิสัยความเผื่อของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ไปทางลบในช่วง $(\varnothing 20^{-0.020}_{-0.053})$ และความยาว (L) ที่ $(50^{+0.100}_0)$ ดังแสดงภาพที่ 4-8

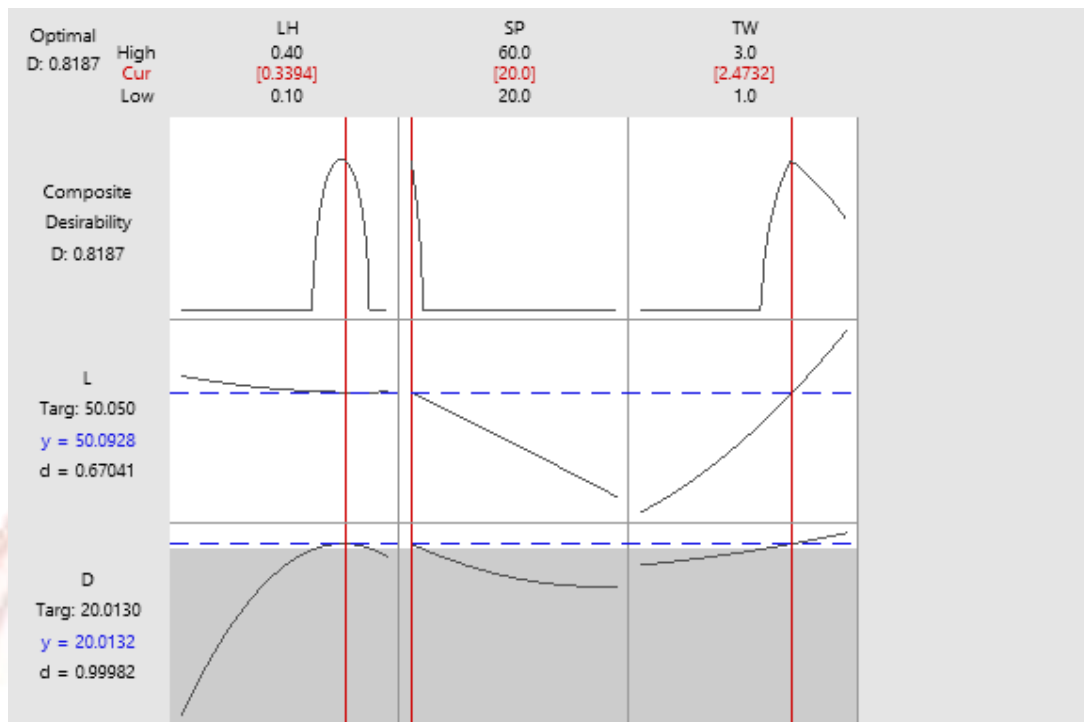


ภาพที่ 4-7 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS กรณีที่ 1 กำหนดให้ค่าพิสัยความเผื่อไปทางบวก



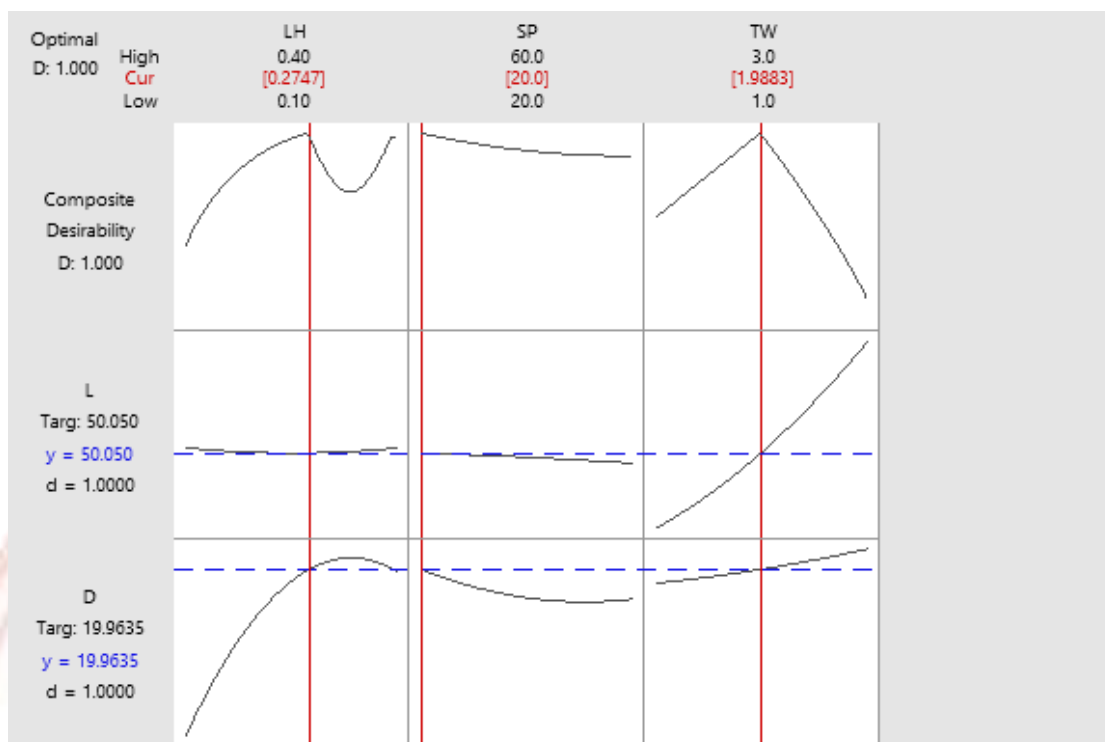
ภาพที่ 4-8 ขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS กรณีที่ 2 กำหนดให้ค่าพิสัยความเผื่อไปทางลบ

จากผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้ง 2 กรณี พบว่าชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) อยู่ในค่าพิสัยความเผื่อ 20.008 มม. ถึง 20.021 มม. และมีขนาดความยาว (L) ที่ 50.000 มม. ถึง 50.100 มม. ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้รับจากการวิเคราะห์คือ ความหนาชั้น (LH) 0.3394 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที และความหนาผนังชั้น (TW) 2.4732 มม. โดยผลลัพธ์ค่าตอบสนองที่ได้รับคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 20.0132 มม. และความยาว = 50.0928 มม. ส่วนผลลัพธ์ค่าความพึงพอใจ (Composite Desirability) โดยรวมของสภาวะที่เหมาะสมเท่ากับ 0.8187 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ 1 หมายความว่า ข้อมูลมีความแม่นยำในการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 ผลลัพธ์กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกรณีที่ต้องการให้ค่าพิกัดความเผื่อไปทางบวกสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) อยู่ในค่าพิกัดความเผื่อที่ 19.947 มม. ถึง 19.980 มม. และมีขนาดความยาว (L) ที่ 50.000 มม. ถึง 50.100 มม. ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้รับการวิเคราะห์คือ ความหนาชั้น (LH) 0.2747 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที และความหนาผนังชั้น (TW) 1.9883 มม. โดยผลลัพธ์ค่าตอบสนองที่ได้รับคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 19.9635 มม. และความยาว = 50.050 มม. ส่วนผลลัพธ์ค่าความพึงพอใจ (Composite Desirability) โดยรวมของสถานะที่เหมาะสมนั้นเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าข้อมูลมีความแม่นยำในการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-10 ผลลัพธ์กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกรณีที่ต้องการให้ค่าพิกัดความเผื่อไปทางลบสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

จากผลลัพธ์ที่ได้รับค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์ทั้งสองกรณีจะถูกนำมาใช้ในการตั้งค่ากับเครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสรุปผลการหาค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4-4 เพื่อทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของขนาดของชิ้นส่วนกรณี เพื่อให้ขนาดอยู่ในค่าพิกัดความเผื่อที่กำหนด และเพื่อให้วิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 4-4 สรุปผลลัพธ์การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม		
ผลลัพธ์	กรณีที่มีค่าพิกัดความเผื่อทางบวก	กรณีที่มีค่าพิกัดความเผื่อทางลบ
พารามิเตอร์ที่เหมาะสม	ระดับ	
ความหนาชั้น (LH)	0.3394 มม.	0.2747 มม.
ความเร็วในการพิมพ์ (SP)	20 มม./วินาที	20 มม./วินาที
ความหนาผนัง (TW)	2.473 มม.	1.988 มม.
ค่าตอบสนองที่คาดคะเน	ผลลัพธ์ที่คาดคะเน	
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่คาดว่าจะได้รับ (D)	20.0132 มม.	19.9635

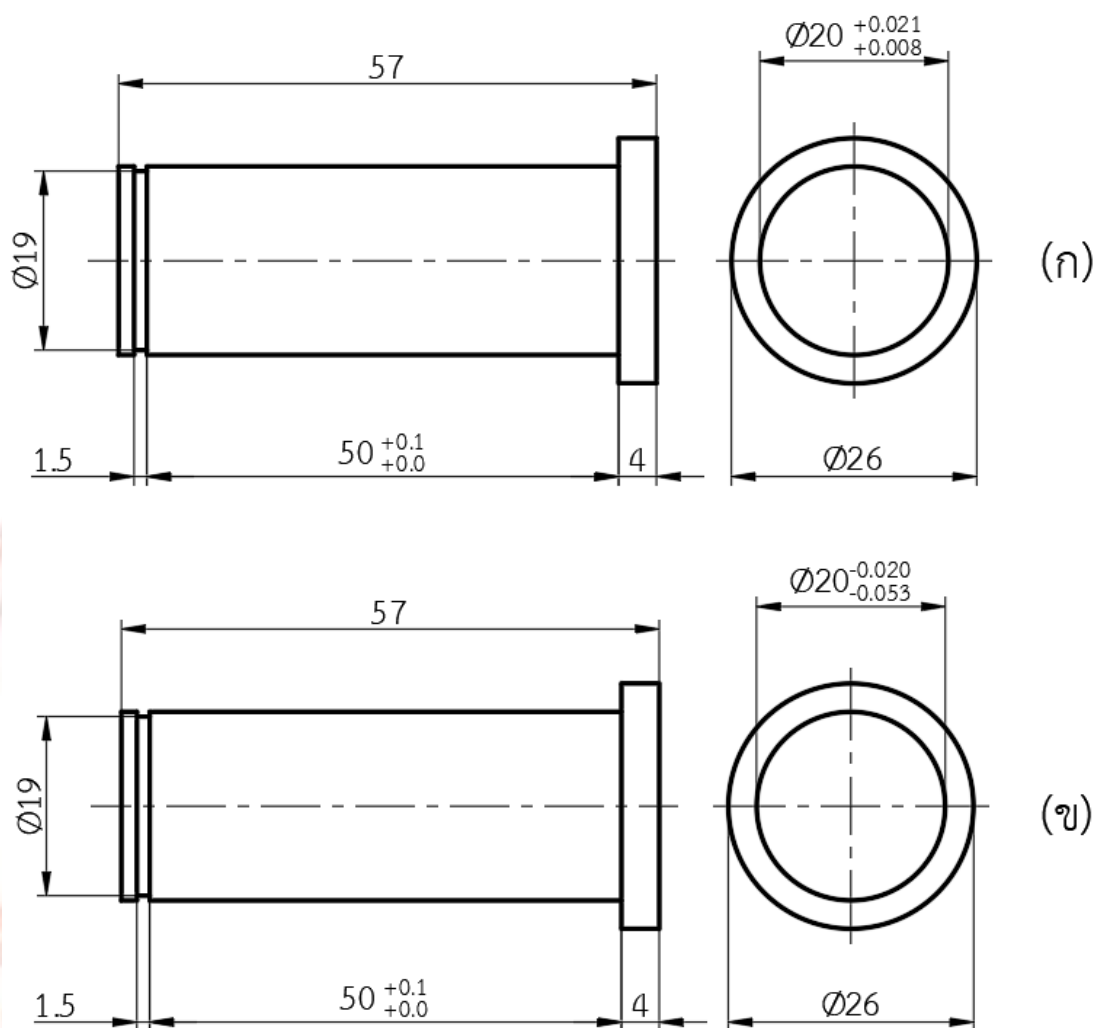
ตารางที่ 4-4 (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม		
ผลลัพธ์	กรณีที่มีค่าพิสัยความเผื่อทางบวก	กรณีที่มีค่าพิสัยความเผื่อทางลบ
ขนาดความยาวที่คาดว่าจะได้รับ (L)	50.0928 มม.	50.0500
ระดับความพึงพอใจ (Composite Desirability)	0.8187	1

สรุปผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมพบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับขึ้นส่วนทดสอบ ABS ที่ต้องการให้ขนาดมีค่าพิสัยความเผื่อไปทางบวกอยู่ในช่วง 20.008 มม. ถึง 20.021 มม. ควรปรับพารามิเตอร์ความหนาชั้น (LH) 0.339 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที และความหนาผนังชั้น (TW) 2.473 มม. หากต้องการให้ขนาดมีค่าพิสัยความเผื่อไปทางลบอยู่ในช่วง 19.947 มม. ถึง 19.980 มม. ควรปรับพารามิเตอร์ความหนาชั้น (LH) 0.274 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที และความหนาผนังชั้น (TW) 1.988 มม.

4.3 การตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับขึ้นส่วนทดสอบ ABS

ผลลัพธ์ในการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับขึ้นส่วนทดสอบ ABS โดยการตรวจสอบผลลัพธ์จากการวัดขนาดขึ้นส่วนทดสอบ ABS ดังแสดงภาพที่ 4-11 พิมพ์ด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4-4 ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X โดยใช้วัสดุที่พิมพ์คือ ABS โดยการตรวจสอบประสิทธิภาพคือ การพิมพ์ขึ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งหมด 20 ชิ้นส่วน โดยแบ่งออกเป็นสองกรณี กรณีละ 10 ชิ้นส่วน ได้แก่ ชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อทางบวก และสำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อทางลบ จากนั้นทำการวัดขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) โดยผลลัพธ์ที่ได้รับแสดงดังตารางที่ 4-5



ภาพที่ 4-11 ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS (ก) ค่าพิถีความเผื่อของขนาดไปทางบวก (ข) ค่าพิถีความเผื่อของขนาดไปทางลบ

ผลลัพธ์จากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ในกรณีที่ขนาดอยู่ในค่าพิถีความเผื่อทางบวก ในช่วง 20.008 มม. ถึง 20.021 มม. โดยการพิมพ์ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่าชิ้นส่วนทั้งหมดมีขนาดอยู่ในค่าพิถีที่กำหนด ยกเว้นชิ้นส่วนที่ 4 ที่มีขนาดความยาวเกินค่าพิถีความเผื่อที่กำหนดโดยค่าผลต่างเท่ากับ 0.024 มม. ส่วนผลลัพธ์จากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ในกรณีที่ขนาดอยู่ในค่าพิถีความเผื่อทางลบในช่วง 19.947 มม. ถึง 19.980 มม. โดยการพิมพ์ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่าชิ้นส่วนทั้งหมดมีขนาดอยู่ในค่าพิถีที่กำหนด ยกเว้นชิ้นส่วนที่ 2 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าค่าพิถีที่กำหนด โดยค่าผลต่างเท่ากับ 0.026 มม. ดังแสดงตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลการวัดขนาดของชิ้นส่วนทดสอบที่พิมพ์ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ
สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์								
เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้				MakerBot Method X				
วัสดุที่ใช้พิมพ์ชิ้นส่วน				วัสดุเส้นใย ABS				
ครั้งที่	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบที่มีค่าพิกัดความเผื่อทางบวก				ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบที่มีค่าพิกัดความเผื่อทางลบ			
	ความหนาชั้น (LH) : 0.339 มม.				ความหนาชั้น (LH) : 0.274 มม.			
	ความเร็วในการพิมพ์ (SP) : 20 มม./วินาที				ความเร็วในการพิมพ์ (SP) : 20 มม./วินาที			
	ความหนาผนัง (TW) : 2.473 มม.				ความหนาผนัง (TW) : 1.988 มม.			
	ผลการวัดขนาดชิ้นส่วน							
	D ₁ =Ø20 ^{+0.021} _{+0.008} มม.		L ₁ = 50 ^{+0.100} ₀ มม.		D ₁ =Ø20 ^{-0.200} _{-0.053} มม.		L ₁ = 50 ^{+0.100} ₀ มม.	
	20.008	20.021	50.000	50.100	19.947	19.980	50.000	50.100
1	20.009		50.079		19.963		50.007	
2	20.014		50.068		19.921		50.044	
3	20.017		50.046		19.968		50.004	
4	20.018		50.124		19.953		50.052	
5	20.009		50.079		19.976		50.029	
6	20.014		50.091		19.962		50.019	
7	20.011		50.085		19.973		50.021	
8	20.019		50.092		19.962		50.017	
9	20.015		50.089		19.975		50.041	
10	20.018		50.081		19.964		50.049	

ผลสรุปการตรวจสอบการวัดขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ABS โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบที่มีค่าพิถีพิถันความเผื่อไปทางบวกในช่วง 20.008 มม. ถึง 20.021 มม. ได้แก่ความหนาชั้น (LH) ที่ 0.339 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) ที่ 20 มม./วินาที และความหนาผนัง (TW) ที่ 2.473 มม. และสำหรับชิ้นส่วนทดสอบที่มีค่าพิถีพิถันความเผื่อทางลบในช่วง 19.947 มม. ถึง 19.980 มม. ได้แก่ความหนาชั้น (LH) ที่ 0.274 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) ที่ 20 มม./วินาที และความหนาผนัง (TW) ที่ 1.988

มม. ที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์รุ่น MakerBot Method X พบว่าการปรับพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมช่วยให้ชิ้นส่วนมีขนาดอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อทั้งทางบวกและทางลบทั้งหมด

4.4 การยืนยันผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่นอื่น ๆ สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ขั้นตอนการยืนยันผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่นอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้กับเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่นอื่นได้หรือไม่ จึงมีการทดสอบเพิ่มเติมโดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ P25-2626G Standard ดังแสดงภาพที่ 4-12 ซึ่งมีพื้นที่ในการพิมพ์ 260 x 260 x 260 มม. เครื่องพิมพ์สามมิติมีค่าความละเอียด ± 0.05 มม. ผลลัพธ์จากการตรวจสอบจะช่วยยืนยันว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้รับสามารถนำไปใช้กับเครื่องพิมพ์รุ่นอื่นได้ โดยรายละเอียดคุณสมบัติของเครื่องพิมพ์แสดงไว้ใน ตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 คุณสมบัติของเครื่องพิมพ์รุ่น P25-2626G Standard

Model	P25-2626G Standard
Build Volume	260 x 260 x 260 มม. (single nozzle)
Machine size	450 x 425 x 560 มม.
Package size	526 x 500 x 628 มม.
Equipment Quality	20.5 kg
Supported Material	PLA/ABS/TPU/WOOD/Carbon Fiber/Nylon/PETG
Filament Diameter	1.75 มม.
Nozzle Diameter	0.4 มม. (สามารถเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 0.2/0.3/0.5/0.6/0.8/1.0 มม.)
Layer Thickness	0.1-0.4 มม.
Print Speed	20-200 มม. /วินาที
Printing Method	TF Card / USB Cable
Printing Accuracy	± 0.05 มม.
Heating Parameters	Nozzle Temperature 260 °C / Bed Temperature 110 °C
Interaction Mode	3.5-inch color touch screen



ภาพที่ 4-12 เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard

ก่อนที่จะทำการตรวจสอบผลลัพธ์เพื่อยืนยันว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้รับสามารถนำไปใช้กับเครื่องพิมพ์รุ่นอื่นได้ จำเป็นต้องประเมินประสิทธิภาพของเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในการทดสอบสามารถพิมพ์ชิ้นส่วนอยู่ในค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์ที่กำหนด เพื่อให้การตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีความน่าเชื่อถือ

4.4.1 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard โดยใช้ชิ้นส่วนทดสอบ ABS

การตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard โดยการพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ ABS ดังแสดงภาพที่ 4-11 ด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ที่ตั้งค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์เป็นค่าเริ่มต้นที่แนะนำโดยเครื่องพิมพ์สามมิติ ทั้งหมด 5 ชิ้นส่วน เพื่อตรวจสอบชิ้นส่วนทดสอบมีขนาดอยู่ในค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติที่กำหนดหรือไม่ ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 4-7

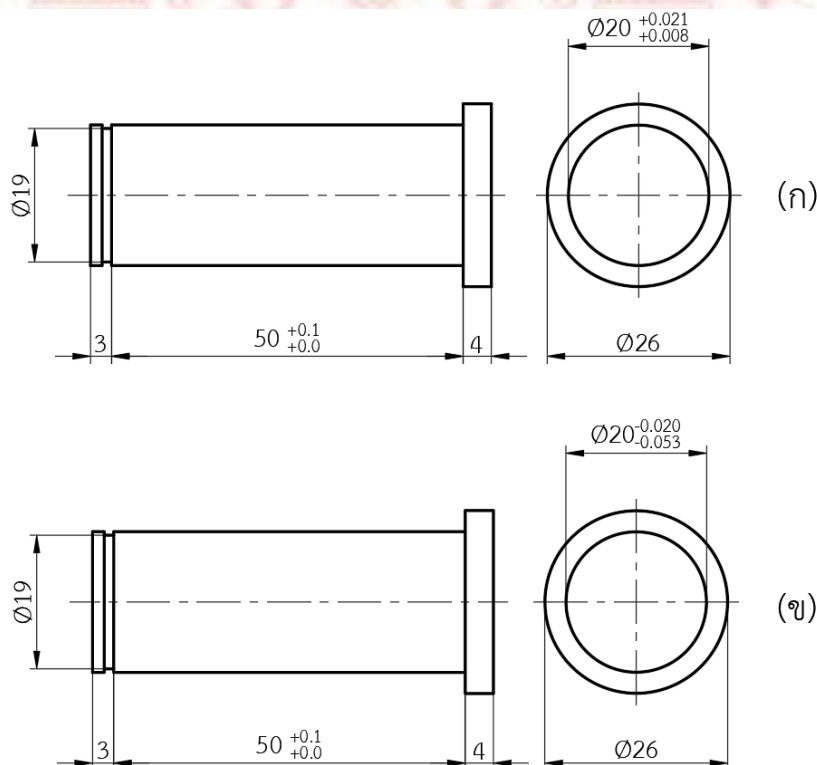
ตารางที่ 4-7 ผลการวัดขนาดชิ้นส่วนด้วยค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ตามที่แนะนำโดยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard โดยใช้ชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard				
ค่าความละเอียด	± 0.05 มม.			
วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์	เส้นใย ABS			
พารามิเตอร์	ระดับ			
วัสดุ	ABS			
ความหนาชั้น	0.28 มม.			
ความเร็วในการพิมพ์	60 มม./วินาที			
ความหนาผนัง	0.8 มม.			
ความหนาแน่น	20%			
อุณหภูมิหัวฉีด	260°C			
อุณหภูมิโต๊ะขึ้นรูป	90°C			
อัตราไหล	100%			
โครงสร้างภายใน	Grid			
ครั้งที่	ผลการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS			
	$D = \varnothing 20_{-0.053}^{-0.200}$ มม.		$L = 50_{0}^{+0.100}$ มม.	
	19.947	19.980	50.000	50.100
1	19.921		50.005	
2	19.924		50.026	
3	19.942		50.046	
4	19.933		50.010	
5	19.938		49.978	

จากผลลัพธ์ที่แสดงดังตารางที่ 4-7 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของชิ้นส่วนทดสอบ ABS ทั้งหมดเกินค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติ ± 0.05 มม. ทั้งหมด แต่ความยาวของชิ้นส่วน (L) ทั้งหมดอยู่ในค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์สามมิติที่ระบุ ผลสรุปแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard มีค่าความคลาดเคลื่อนขนาดไปทางค่าลบหรือ น้อยกว่าขนาดที่กำหนดในแบบค่อนข้างมาก ดังนั้นขั้นตอนถัดไปคือ การนำค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ได้รับจากการวิเคราะห์มาตั้งค่ากับเครื่องพิมพ์รุ่นนี้ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชิ้นส่วนทดสอบ ABS

4.4.2 การตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard

ผลลัพธ์การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS โดยการตรวจสอบผลลัพธ์จากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ดังแสดงภาพที่ 4-13 พิมพ์ด้วยกระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard โดยการตรวจสอบประสิทธิภาพคือ การพิมพ์ชิ้นส่วนทดสอบ ABS ด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งหมด 20 ชิ้นส่วน โดยแบ่งออกเป็นสองกรณี กรณีละ 10 ชิ้นส่วน ได้แก่ ชิ้นส่วนทดสอบที่ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อทางบวก และสำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อทางลบ จากนั้นทำการวัดขนาดของชิ้นส่วนทดสอบด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) โดยผลลัพธ์ที่ได้รับจะถูกวิเคราะห์เพื่อยืนยันผลลัพธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้งานกับเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่นอื่นหรือไม่ ดังแสดงตารางที่ 4-8



ภาพที่ 4-13 ขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS (ก) ค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางบวก (ข) ค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางลบ

ตารางที่ 4-8 ผลการวัดขนาดชิ้นส่วนที่ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS

ค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์							
เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้			P25-2626G Standard				
วัสดุที่ใช้พิมพ์ชิ้นส่วน			วัสดุเส้นใย ABS				
ครั้งที่	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบที่มีค่าพิกัตตความเผื่อทางบวก				ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนทดสอบที่มีค่าพิกัตตความเผื่อทางลบ		
	ความหนาชั้น (LH) : 0.339 มม.				ความหนาชั้น (LH) : 0.274 มม.		
	ความเร็วในการพิมพ์ (SP) : 20 มม./วินาที				ความเร็วในการพิมพ์ (SP) : 20 มม./วินาที		
	ความหนาผนัง (TW) : 2.473 มม.				ความหนาผนัง (TW) : 1.988 มม.		
	ผลการวัดขนาดชิ้นส่วน						
	D ₁ =Ø20 ^{+0.021} _{+0.008} มม.		L ₁ = 50 ^{+0.100} ₀ มม.		D ₁ =Ø20 ^{-0.020} _{-0.053} มม.		L ₁ = 50 ^{+0.100} ₀ มม.
	20.008	20.021	50.000	50.100	19.947	19.980	50.000
1	20.016		50.088		19.973		50.077
2	20.009		50.020		19.956		50.062
3	20.015		50.093		19.978		50.008
4	20.011		50.074		19.961		50.028
5	20.019		50.093		19.963		50.044
6	20.015		50.042		19.954		50.012
7	20.011		50.087		19.958		50.081
8	20.020		50.093		19.965		50.016
9	20.016		50.096		19.955		50.047
10	20.012		50.018		19.972		50.021

จากตารางที่ 4-8 ผลจากการวัดขนาดชิ้นส่วนทดสอบ ABS ที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard ด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สรุปได้ว่าชิ้นส่วนทดสอบที่มีค่าพิสัยความเผื่อของขนาดที่ 20.008 ถึง 20.021 มม. ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) 0.339 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที และความหนาผนัง (TW) 2.473 มม. ส่วนชิ้นส่วนทดสอบที่มีค่าพิสัยความเผื่อของขนาดที่ 19.947 ถึง 19.980 มม. ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) 0.274 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที และความหนาผนัง (TW) 1.988 มม. พบว่าชิ้นส่วนทั้งหมดมีขนาดอยู่ในช่วงค่าพิสัยความเผื่อที่กำหนดทั้งหมดเมื่อตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลของการดำเนินการวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ คือการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ และหาการตั้งค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) เพื่อให้ได้รับชิ้นส่วนที่มีขนาดอยู่ในค่าพิสัยที่กำหนดทั้ง 2 กรณีคือชิ้นส่วนที่มีค่าพิสัยของความเผื่อของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\varnothing 20^{+0.021}_{+0.008}$ มม. และความยาว $50^{+0.100}_0$ มม. กับชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\varnothing 20^{-0.020}_{-0.053}$ มม. และความยาว $50^{+0.100}_0$ มม. ที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC 3040 V.2022 สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA และเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X สำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) รูปแบบคือ Face Canted ที่มีค่า $\alpha = 1$ และเก็บค่าตอบสนองจากการวัดขนาดชิ้นส่วนด้วยเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ที่มีความละเอียดอยู่ที่ 0.001 มม. และทำการตรวจสอบประสิทธิภาพเพื่อยืนยันผลลัพธ์ของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยเครื่องพิมพ์รุ่น P25-2626G Standard ผลลัพธ์การสรุปผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ผลสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ PLA คือผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) อุณหภูมิหัวฉีด (TP) และความหนาผนัง (TW) ที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนทดสอบที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น BBC3040V.2022 พบว่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ที่มีผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) มากที่สุด คือ ความเร็วในการพิมพ์ (SP) และ ความหนาผนัง (TW) ส่วนพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์ที่มีผลกระทบต่อขนาดความยาว (L) มากที่สุด คือ ความหนาชั้น (LH) แต่อุณหภูมิหัวฉีด (TP) พบว่าไม่มีผลกระทบหรือมีผลกระทบน้อยมากต่อขนาดของชิ้นส่วนทดสอบ ส่วนผลลัพธ์การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมพบว่าเมื่อปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมช่วยให้ขนาดของชิ้นส่วนมีค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) และขนาดความยาว (L) ลดความคลาดเคลื่อนจริง แต่จากการทดสอบพบว่าขนาด

ของชิ้นส่วนทั้งหมดไม่อยู่ในค่าพิสัยความเผื่อของขนาดที่กำหนดทั้งในกรณีที่ค่าพิสัยความเผื่อไปทางบวก และค่าพิสัยความเผื่อไปทางลบ

ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลสำหรับชิ้นส่วนทดสอบ ABS คือการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ได้แก่ ความหนาชั้น (LH) ความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น MakerBot Method X ที่มีค่าความละเอียดของเครื่องพิมพ์ ± 0.02 และวัสดุที่ใช้คือ ABS ผลจากการวิเคราะห์พบว่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) มากที่สุดคือ ความหนาชั้น (LH) โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงและเชิงกำลังสองที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่พารามิเตอร์อื่น เช่น ความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) มีผลน้อยกว่า ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) พบว่าความหนาชั้น (LH) และความหนาผนัง (TW) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการปรับร่วมกันระหว่างความเร็วในการพิมพ์ (SP) และความหนาผนัง (TW) ที่มีผลกระทบมากที่สุดในการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนของความยาว (L)

ผลลัพธ์การตั้งค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติแบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) และการยืนยันผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนที่มีค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางบวกในช่วง 20.008 ถึง 20.021 มม. คือความหนาชั้น (LH) 0.339 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที และความหนาผนัง (TW) 2.473 มม. ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชิ้นส่วนที่มีค่าพิสัยความเผื่อของขนาดไปทางลบในช่วง 19.947 ถึง 19.980 มม. คือความหนาชั้น (LH) 0.275 มม. ความเร็วในการพิมพ์ (SP) 20 มม./วินาที และความหนาผนัง (TW) 1.988 มม. ซึ่งผลลัพธ์จากการตั้งค่าพบว่าชิ้นส่วนที่ทำการตรวจสอบทั้งหมดอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อที่กำหนด และทำการยืนยันผลลัพธ์ของการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพิมพ์สามมิติทั้ง 2 กรณี โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น P25-2626G Standard พบว่าชิ้นส่วนทดสอบทั้งหมดอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อที่กำหนด ดังนั้นผลสรุปการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมช่วยให้ความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของชิ้นส่วนกรณีศึกษาอยู่ในค่าพิสัยความเผื่อที่กำหนดทั้ง 2 กรณี โดยมีข้อกำหนดในการพิมพ์ชิ้นส่วนด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติสำหรับกระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) ควรพักเครื่องพิมพ์อย่างน้อย 10 นาที หลังจากพิมพ์ชิ้นส่วนเสร็จ จากผลการวิจัยสามารถนำค่าพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์แบบหลอมละลายเส้นใย (FDM) มาประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์รุ่นอื่น ๆ เพื่อนำมาใช้ทดแทนชิ้นส่วนที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การทดลองในงานวิจัยนี้สามารถนำมาปรับใช้ในการทดสอบหรือวิเคราะห์กับชิ้นส่วนที่มีรูปร่างรูปทรงซับซ้อนมากขึ้น และมีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลายตำแหน่ง เพื่อให้ได้รับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตั้งค่ากับเครื่องพิมพ์สามมิติที่แม่นยำมากขึ้น

5.2.2 สำหรับชิ้นส่วนมีรูปร่างรูปทรงที่มีความซับซ้อน หรือชิ้นส่วนที่ต้องการควบคุมความคลาดเคลื่อนของรูปร่างหลายรูปร่างรูปทรง (GD&T) แนะนำให้ใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูง เช่น เครื่องวัดพิกัดสามแกน (CMM) เพื่อให้ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นส่วนมีความถูกต้อง

5.2.3 การนำวิธีการหาค่าความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเปรียบเทียบกับวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (multi-criteria decision-making) ได้แก่ AHP (Analytic Hierarchy Process) และ TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) เป็นต้น เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการพิมพ์ชิ้นส่วน

5.2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 มม. และมีความยาวอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 มม. เท่านั้น หากต้องการช่วงที่ใหญ่กว่า ต้องมีการทดสอบเพิ่มเติมเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามขนาดชิ้นส่วนที่ต้องการ

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

ประสงค์ ก้านแก้ว (2561) “ศึกษาหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวของพลาสติกอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอิน สไตรีน โดยยึดตามมาตรฐาน ASTM D955 Standard Test Method” วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 12 ฉบับที่ 2

ภาษาอังกฤษ

- Amir A. Zadpoor and Jos Malda. (2016) “Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, And Organs.” Biomedical Engineering. DOI: 10.1007/s10439-016-1719-y.
- Choudhari and Patil. (2016) “Product Development and its Comparative Analysis by SLA, SLS and FDM Rapid Prototyping Processes.” Materials Science and Engineering 149 012009.
- Mohd Nizam Sudin, Shamsul Anuar Shamsudin and Mohd Azman Abdullah. (2016) “Effect of part features on dimensional accuracy of fdm model.” Engineering and Applied Sciences. Vol. 11, NO. 13.
- Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery and Christine M. Anderson-Cook (2016) “Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 4th Edition” ISBN: 978-1-118-91601-8
- Sathish, Vijayakumar and Anshumaan Krishnan Ayyangar. (2018) “Design and Fabrication of Industrial Components Using 3D Printing.” Materials Today: Proceedings 5 14489–14498.
- Angela Dean, Daniel Voss and Danel Draguljić (2017). ” Design and Analysis of Experiments: Chapter Response Surface Methodology” Springer Nature Textbook
- Azhar Eqbal, Anoop Kumar Soon and Abdul Razzaq. (2017) “Optimization of process parameters of FDM part for minimizing its dimensional inaccuracy.” International Journal of Mechanical and Production. Vol. 7, Issue 2.
- Junhui Wu. (2018) “Study on optimization of 3D printing parameters” Materials Science and Engineering 392 062050.

- J Beniak, PKrižan, L Šooš1, and M Matúš (2018) “Research on Shape and Dimensional Accuracy of FDM Produced Parts” *Materials Science and Engineering* 501 (2019) 012030
- J Kacmarcik, D Spahic, K Varda, E Porca and N Zaimovic-Uzunovic (2018) “An investigation of geometrical accuracy of desktop 3D printers using CMM” *Materials Science and Engineering* 393 012085
- Qian Yan, Hanhua Dong, Jin Su, Jianhua Han, Bo Song, Qingsong Wei and Yusheng Shi (2018) “A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications.” *Engineering* 4 729–742.
- Shahrain Mahmood, Qureshi and Didier Talamona. (2018) “Taguchi based process Optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling.” *Additive Manufacturing* 21 183-190.
- Arup Dey and Nita Yodo. (2019) “A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics.” *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 3, 64. ISSN: 2504-4494.
- Arup Dey, David Hoffman and Nita Yodo (2019) “Optimizing multiple process parameters in fused deposition modeling with particle swarm optimization” *Interactive Design and Manufacturing* 14:393–405
- Douglas C. Montgomery (2019) “Design and Analysis of Experiments, 10th Edition” *General & Introductory Industrial Engineering*. ISBN: 978-1-119-49244-3
- M. Samykano, S.K. Selvamani, K. Kadirgama. (2019) “Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters” *Volume 102*, pages 2779–2796
- Ahmed Elkaseer, Stella Schneider and Steffen G. Scholz. (2020) “Experiment - Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing.” *Sciences* 10, 2899.
- Bradley Jones and Douglas C. Montgomery (2020). “Design of Experiments: A Modern Approach.” ISBN 1119611237, 9781119611233.
- Bilal Msallem, Neha Sharma and Shuaishuai Cao et al. (2020) “Evaluation of the Dimensional Accuracy of 3D-Printed Anatomical Mandibular Models Using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ Printing Technology” *Clinical Medicine* 9, 817

- Baltej Singh Rupal, Kamalakannan Ramadass, Ahmed Jawad Qureshi (2020) "Investigating the effect of motor micro-stepping on the geometric tolerances of Fused Filament Fabrication printed parts" *Additive Design and Manufacturing Systems Procedia CIRP* 92, 9–14
- Kyriaki Evangelia Aslani, Konstantinos Kitsakis and John D. Kechagias. (2020) "On the application of grey Taguchi method for benchmarking the dimensional accuracy of the PLA fused filament fabrication process." *Sciences* 2:1016.
- Schuravi N. Mallian and Boppana V. Chowdary (2020) "Multi-Optimization of Empirical Models for The Material Extrusion Process" *Multi-Optimization of Empirical Models for The Material Extrusion Process*
- Carmelo J. Luis-Pérez, Irene Buj-Corral และ Xavier Sánchez-Casas (2021) "Modeling of the Influence of Input AM Parameters on Dimensional Error and Form Errors in PLA Parts Printed with FFF Technology" *Polymers* 13, 4152
- Irene Buj-Corral, Ali Bagheri and Maurici Sivatte-Adroer. (2021) "Effect of Printing Parameters on Dimensional Error, Surface Roughness and Porosity of FFF Printed Parts with Grid Structure." *Polymer* 13, 1213.
- Muammal M. Hanon, László Zsidai and Qianjin Ma. (2021) "Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors." *Materials Today: Proceedings* 42 3089-3096.
- Przemysław Sieminski. (2021) "Chapter 2 - Introduction to fused deposition modeling." In *Additive Manufacturing*. ISBN 978-0-12-818411-0. Pages 217-275.
- Sarwar Beg and Ziyaur Rahman (2021). "Design of Experiments for Pharmaceutical Product Development: Chapter Central Composite Designs and Their Applications in Pharmaceutical Product Development" *Basics and Fundamental Principles*. DOI: 10.1007/978-981-33-4717-5_6
- Xinchang Zhang and Frank Liou.b (2021) "Chapter 1 - Introduction to additive manufacturing." In *Additive Manufacturing*. ISBN 978-0-12-818411-0. Pages 1-31.
- Zohreh Shakeri, Khaled Benfriha and Nader Zirak. (2021) "Optimization of FFF Processing Parameters to Improve Geometrical Accuracy and Mechanical Behavior of Polyamide 6 Using Grey Relational Analysis (GRA)." *Additive Manufacturing*.

- Arivazhagan Selvam, Suresh Mayilswamy, Ruban Whenish et al. (2022) “multi-objective optimization and prediction of surface roughness and printing time in FFF printed ABS polymer” *Scientific Reports* 12:16887
- Aziq Fikri Mohd Razi and Khairu Kamarudin (2022) “Investigation on Effect of Abs Filament Extrusion Process Temperature for Fused Filament Fabrication (FFF) 3D Printing” *Progress in Engineering Application and Technology* Vol. 3 No. 1, 703-711
- Tomy Muringayil Joseph, Anoop Kallingal and Akshay Maniyeri Suresh (2022) “3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities” *Advanced Manufacturing Technology* (2023) 125:1015–1035
- Enrique E. Zayas-Figueras and Irene Buj-Corra (2023) “Comparative Study about Dimensional Accuracy and Surface Finish of Constant-Breadth Cams Manufactured by FFF and CNC Milling” *Micromachines*, 14, 377.
- Ge Gao and Fan Xu. (2022) “Parametric Optimization of FDM Process for Improving Mechanical Strengths Using Taguchi Method and Response Surface Method: A Comparative Investigation.” *Machines* 10, 750.
- Hamid Reza Vanaei, Sofiane Khellad and Abbas Tcharkhtchi. (2022) “Roadmap : Numerical-Experimental Investigation and Optimization of 3D-Printed Parts Using Response Surface Methodology.” *Materials* 15, 7193.
- Irene Buj-Corral and Enrique Ernesto Zayas-Figueras. (2022) “Comparative study about dimensional accuracy and form errors of FFF printed spur gears using PLA and Nylon.” *Polymer Testing* 117, 107862.
- Jayashuriya, Gautam and Nithish Aravinth. (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*.
- Krishna Mohan Agarwal, Pritish Shubham, Dinesh Bhatia et al. (2022) “Analyzing the Impact of print Parameters on Dimensional Variation of ABS specimens printed using Fused Deposition Modelling (FDM)” *Sensors International* Volume 3100149

Martinus Bagus Wicaksono and Felix Krisna Aji Nugraha. (2022) “Optimization of 3D Printing Parameters Using the Taguchi Method to Improve Dimensional Precision.” Additive Manufacturing. Vol. 12 No. 2.

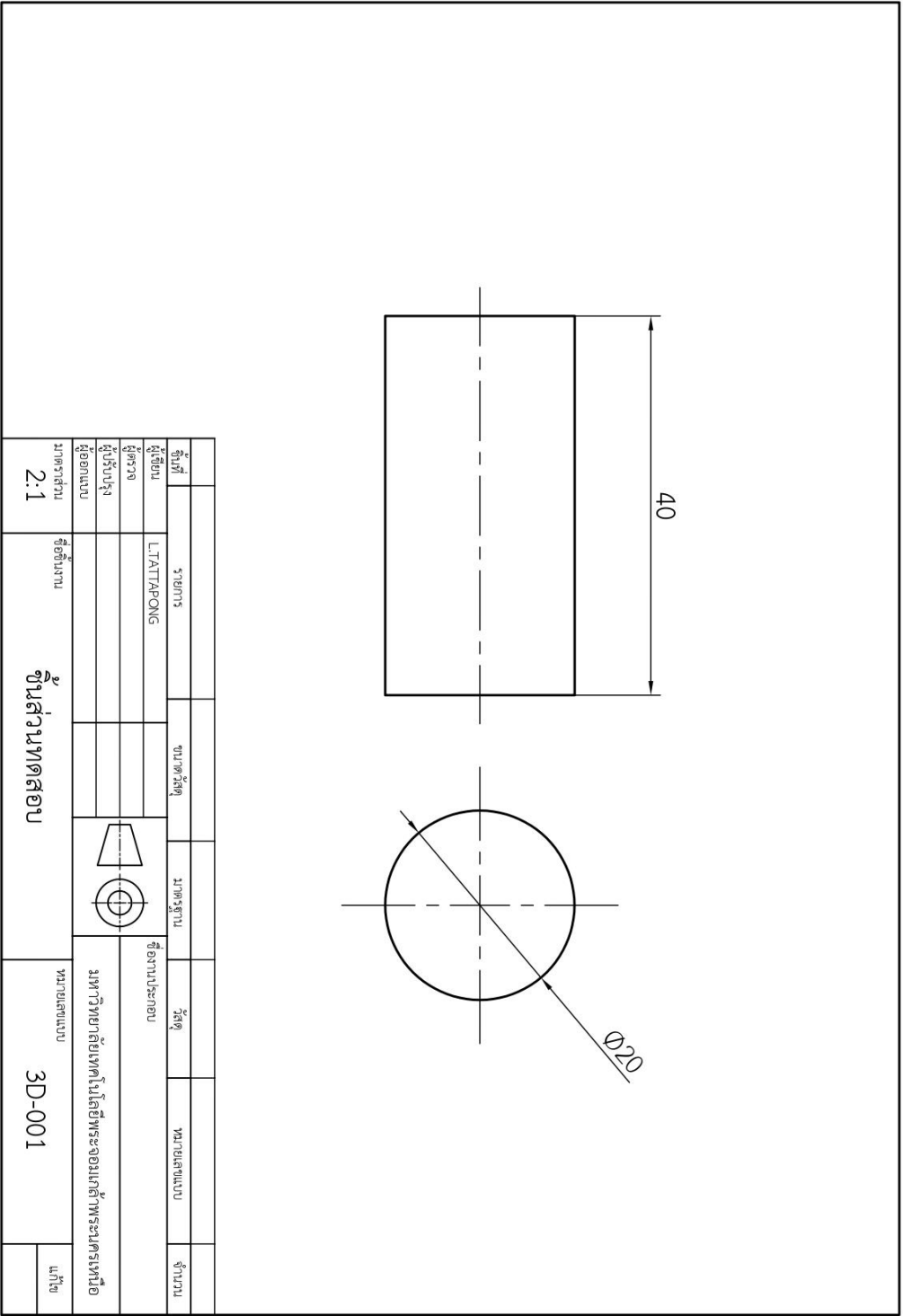
Prithu Mishra, Shruti Sood, Vipra Bharadwaj, Aryan Aggarwal และ Pradeep Khanna (2023) “Parametric Modeling and Optimization of Dimensional Error and Surface Roughness of Fused Deposition Modeling Printed Polyethylene Terephthalate Glycol Parts” Polymers, 15, 546



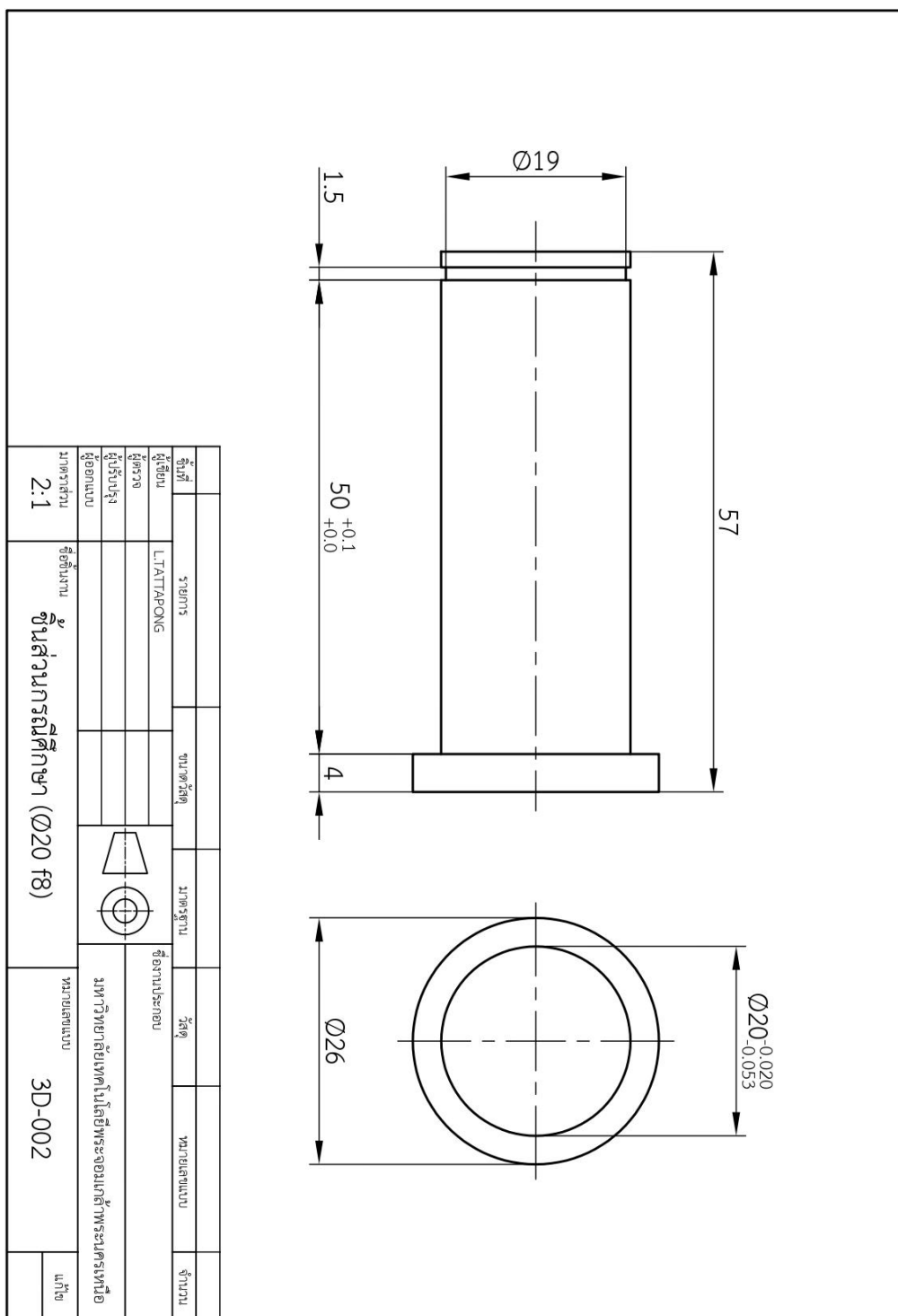


ภาคผนวก ก

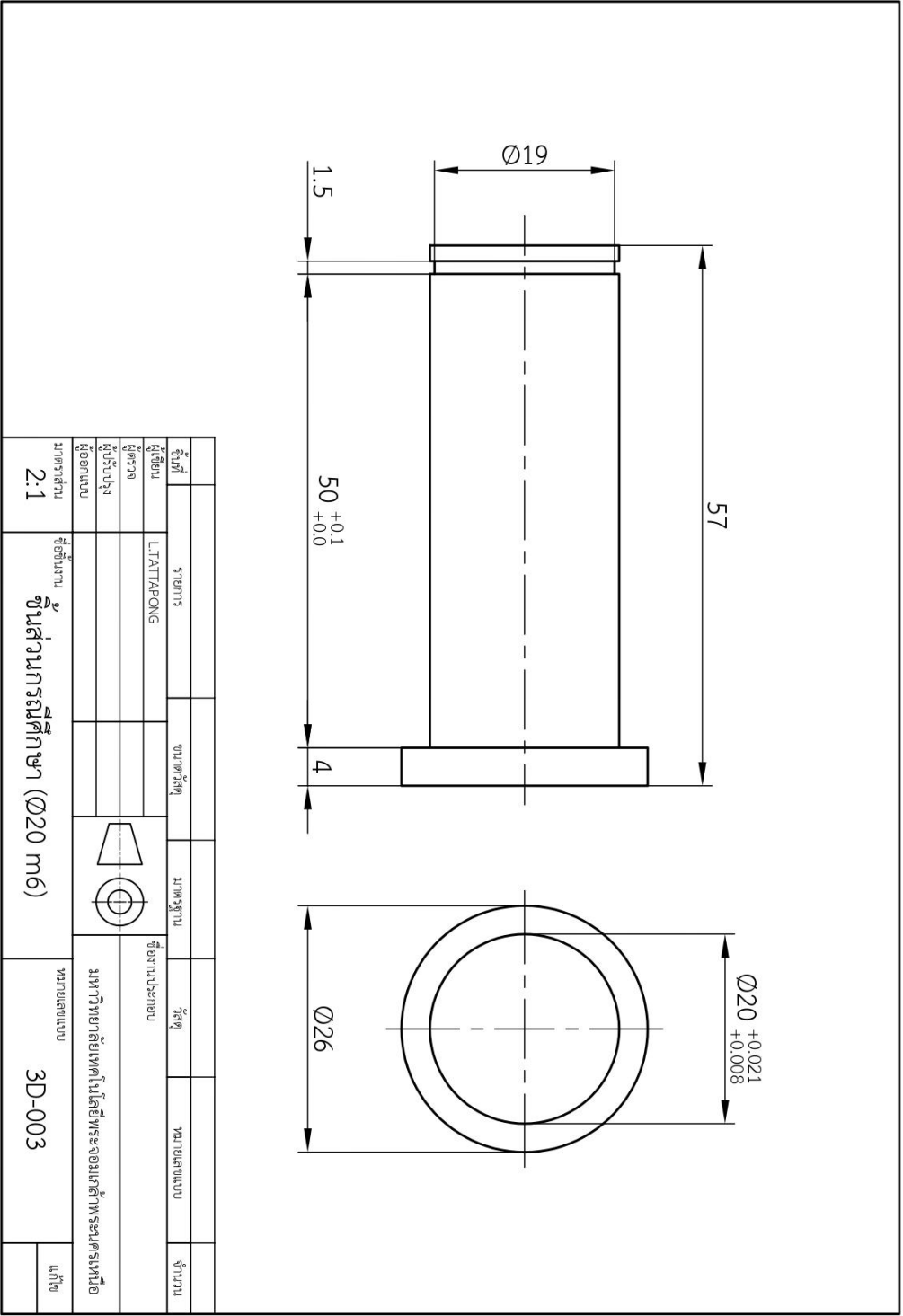
แบบของชิ้นงานทดสอบ และชิ้นส่วนกรณีศึกษา



ภาพที่ ก-1 ชิ้นส่วนทดสอบ



ภาพที่ ก-2 ชิ้นส่วนกรณีศึกษากรณีที่ 1



ภาพที่ ก-3 ชิ้นส่วนกรณีศึกษากรณีที่ 2

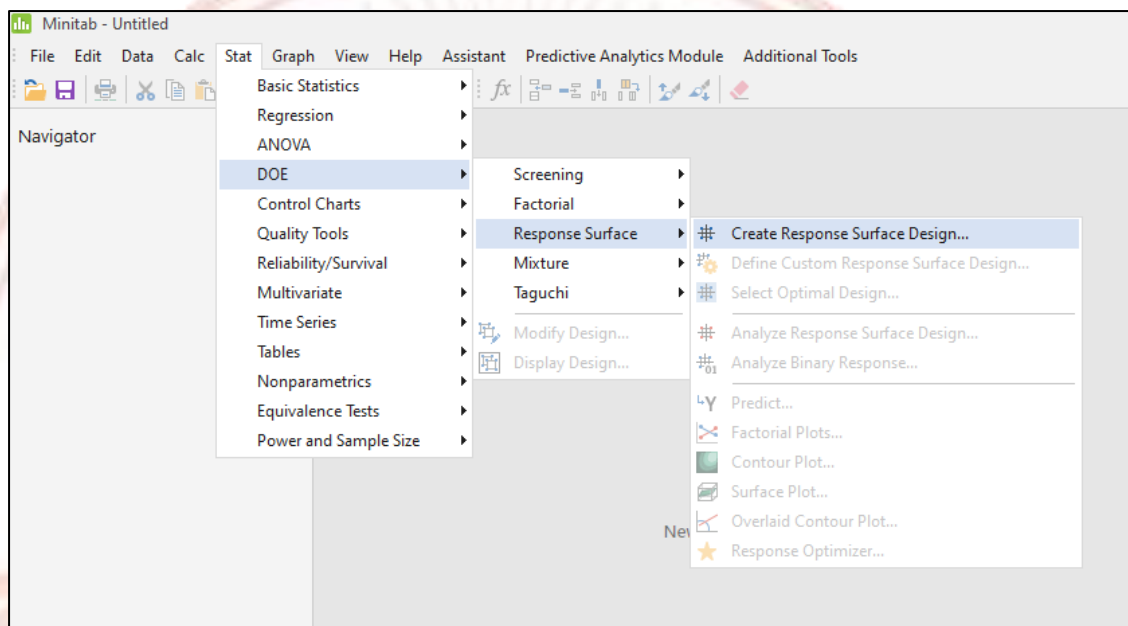


ภาคผนวก ข

การตั้งค่าข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

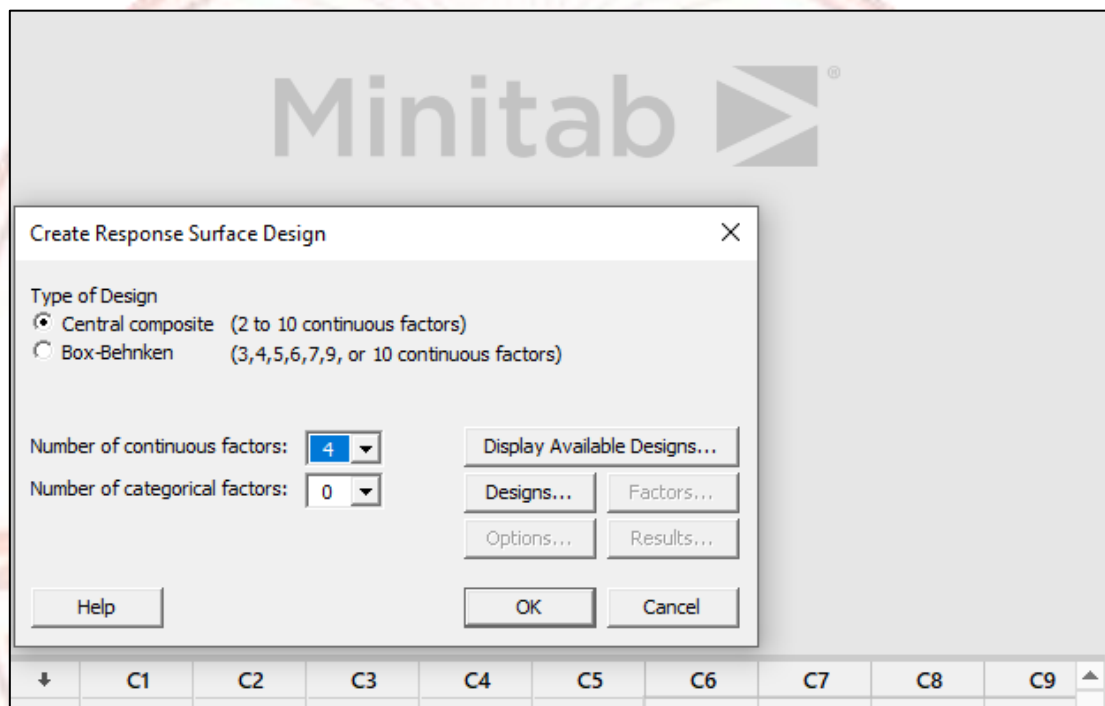
การตั้งค่าข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab

ขั้นแรกในการออกแบบการทดลองด้วย Minitab คือการสร้างจำนวนการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) โดยเริ่มที่ (Stat > DOE > Response Surface > Create Response Surface Design...) ดังแสดงภาพที่ ข-1



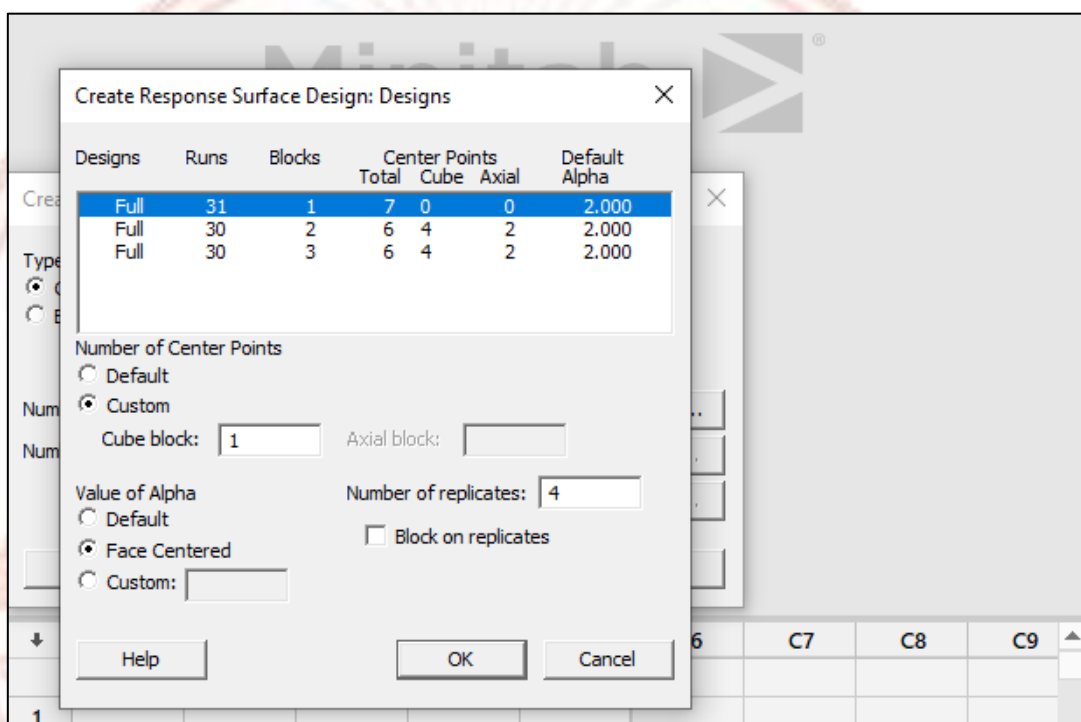
ภาพที่ ข-1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (Central Composite Design)

ขั้นแรกต่อไป คือการกำหนดประเภทของการออกแบบการทดลอง (Type of Design) โดยในกรณีนี้จะเลือกประเภท "Central Composite Design" ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงปริมาณ และเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการที่มีหลายปัจจัย จากนั้นการกำหนดปัจจัย หรือพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณา (Number of Continuous Factors) กำหนดให้เป็น 4 ตามจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ ดังแสดงภาพที่ ข-2



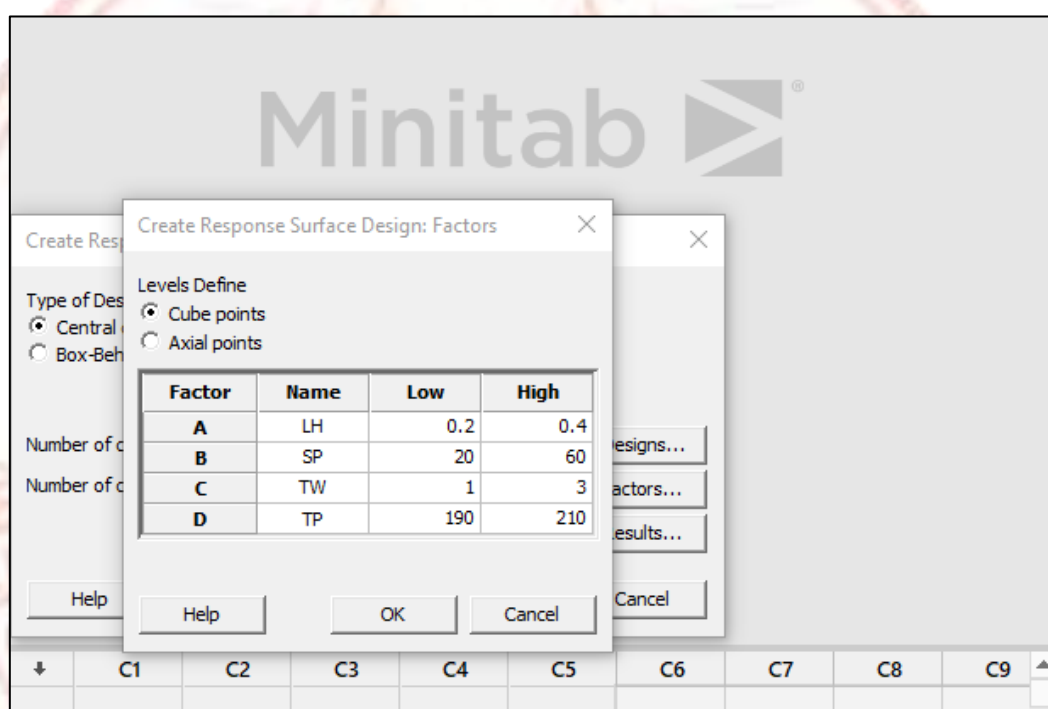
ภาพที่ ข-2 การตั้งค่าในส่วนของ Create Response Surface Design

ขั้นตอนถัดไปหัวข้อการออกแบบ (Designs) กำหนดให้จำนวนค่ากลาง (Number of Center Points) ซึ่งเป็นจุดที่กำหนดระดับของพารามิเตอร์ทุกตัวอยู่ในระดับค่ากลาง ให้กำหนดเป็น (Custom) เปลี่ยนตัวเลขเป็น 1 เพื่อกำหนดค่ากลาง 1 ค่า จากนั้นกำหนดในส่วนของค่า (Value of Alpha) ซึ่งเป็นการกำหนดระยะห่างของจุดในการทดลองให้อยู่ในขอบเขตค่าพารามิเตอร์ที่ระดับสูงและต่ำ โดยกำหนดเป็น Face-Centered (CCF) หรือมีค่า $\alpha = 1$ กำหนดจำนวนในการทำซ้ำ (Number of replicates) ให้มีการทำซ้ำ 4 ครั้ง ดังแสดงภาพที่ ข-3



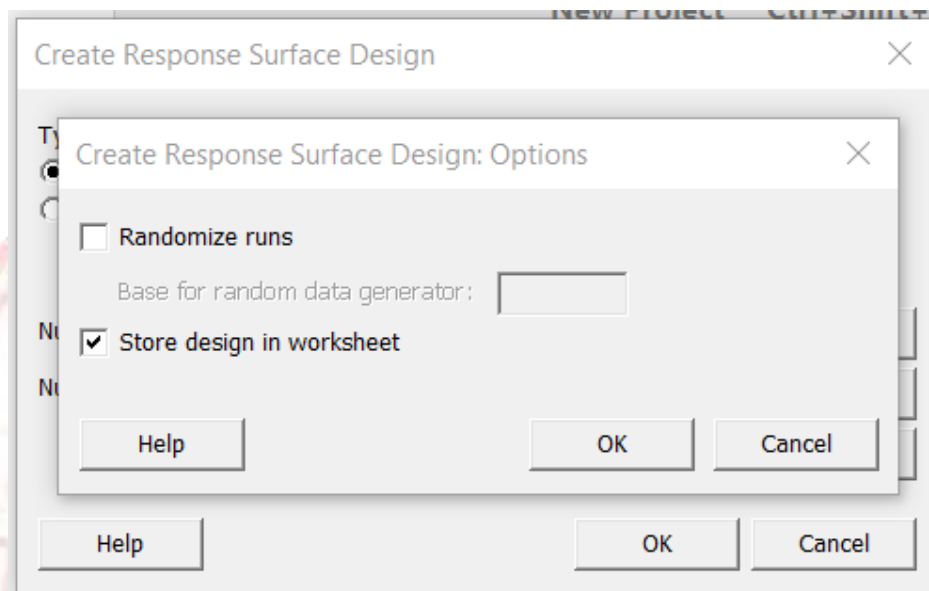
ภาพที่ ข-3 การตั้งค่าในส่วนของ Designs

ขั้นตอนถัดไปในส่วนของปัจจัย หรือ พารามิเตอร์ (Factor) จะถูกกำหนดตามพารามิเตอร์ที่กำหนดตามค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-1 โดยที่ ค่า Low กำหนดให้ความหนาชั้น คือ 0.2 มม. ส่วนความเร็วในการพิมพ์ คือ SP 20 มม./วินาที ส่วนความหนาผนัง คือ 1 มม. และอุณหภูมิหัวฉีด คือ 190 องศาเซลเซียส ส่วนที่ค่า High กำหนดให้ความหนาชั้น คือ 0.4 มม. ส่วนความเร็วในการพิมพ์ คือ SP 60 มม./วินาที ส่วนความหนาผนัง คือ 3 มม. และอุณหภูมิหัวฉีด คือ 210 องศาเซลเซียส ดังแสดงภาพที่ ข-4



ภาพที่ ข-4 การตั้งค่าในส่วนของ Factors

ขั้นตอนถัดไปการกำหนดในส่วนของ (Options...) ให้นำเครื่องหมายถูกในหัวข้อ (Randomize run) ออกไป เพื่อให้ในการออกแบบการทดลองเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ หากติ๊กเครื่องหมายถูก ลำดับของการทดลองจะถูกสุ่ม ดังแสดงภาพที่ ข-5



ภาพที่ ข-5 การตั้งค่าในส่วนของ Options

จากนั้นกด OK เพื่อทำการวิเคราะห์ผลออกมาเป็นจำนวนการทดลองทั้งหมด 100 ขึ้นดังแสดงภาพที่ ข-6

Central Composite Design

Design Summary

Factors: 4 Replicates: 4
 Base runs: 25 Total runs: 100
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

$\alpha = 1$

Two-level factorial: Full factorial

Point Types

Cube points: 64
 Center points in cube: 4
 Axial points: 32
 Center points in axial: 0

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	LH	SP	TP	TW		
1	1	1	1	1	0.2	20	190	1		
2	2	2	1	1	0.4	20	190	1		
3	3	3	1	1	0.2	40	190	1		
4	4	4	1	1	0.4	40	190	1		
5	5	5	1	1	0.2	20	210	1		
6	6	6	1	1	0.4	20	210	1		
7	7	7	1	1	0.2	40	210	1		
8	8	8	1	1	0.4	40	210	1		
9	9	9	1	1	0.2	20	190	3		
10	10	10	1	1	0.4	20	190	3		
11	11	11	1	1	0.2	40	190	3		
12	12	12	1	1	0.4	40	190	3		
13	13	13	1	1	0.2	20	210	3		
14	14	14	1	1	0.4	20	210	3		
15	15	15	1	1	0.2	40	210	3		
16	16	16	1	1	0.4	40	210	3		
17	17	17	-1	1	0.2	30	200	2		
18	18	18	-1	1	0.4	30	200	2		

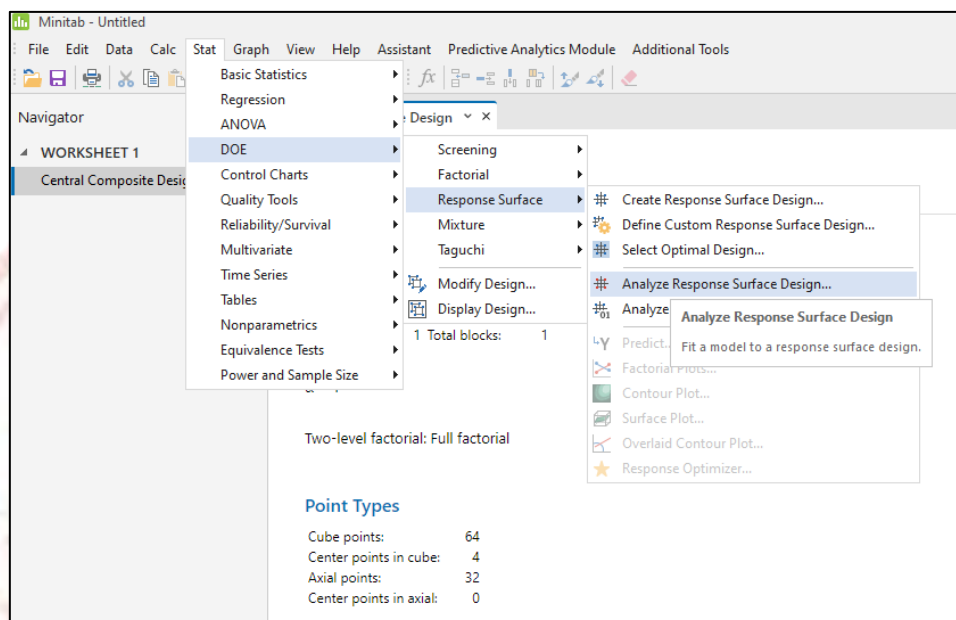
ภาพที่ ข-6 ผลการออกแบบการทดลอง

หลังจากนั้นนำค่าตอบสนอง D และ L ที่เก็บมาจากการวัดขนาดชิ้นส่วนทั้งหมด 100 ชิ้น ลงในตารางคอลัมน์ที่ C9 และ C5 ดังแสดงภาพที่ ข-7

Central Composite Design										
↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	LH	SP	TP	TW	D	L
1	1	1	1	1	0.2	20	190	1	19.91	40.01
2	2	2	1	1	0.4	20	190	1	19.90	39.94
3	3	3	1	1	0.2	40	190	1	19.72	40.03
4	4	4	1	1	0.4	40	190	1	19.61	39.83
5	5	5	1	1	0.2	20	210	1	19.85	40.00
6	6	6	1	1	0.4	20	210	1	19.81	39.92
7	7	7	1	1	0.2	40	210	1	19.65	40.01
8	8	8	1	1	0.4	40	210	1	19.57	39.76
9	9	9	1	1	0.2	20	190	3	19.80	40.00
10	10	10	1	1	0.4	20	190	3	19.87	39.83
11	11	11	1	1	0.2	40	190	3	19.65	39.96
12	12	12	1	1	0.4	40	190	3	19.75	39.83
13	13	13	1	1	0.2	20	210	3	19.71	39.98
14	14	14	1	1	0.4	20	210	3	20.02	39.76
15	15	15	1	1	0.2	40	210	3	19.52	39.96
16	16	16	1	1	0.4	40	210	3	19.44	39.71
17	17	17	-1	1	0.2	30	200	2	19.85	40.03
18	18	18	-1	1	0.4	30	200	2	19.71	39.75
19	19	19	-1	1	0.3	20	200	2	19.91	39.80
20	20	20	-1	1	0.3	40	200	2	19.67	39.75
21	21	21	-1	1	0.3	30	190	2	19.79	39.76
22	22	22	-1	1	0.3	30	210	2	19.81	39.75
23	23	23	-1	1	0.3	30	200	1	19.71	39.74
24	24	24	-1	1	0.3	30	200	3	19.77	39.77
25	25	25	0	1	0.3	30	200	2	19.80	39.78
26	26	26	1	1	0.2	20	190	1	19.80	39.98
27	27	27	1	1	0.4	20	190	1	19.91	39.79
28	28	28	1	1	0.2	40	190	1	19.65	39.97
29	29	29	1	1	0.4	40	190	1	19.72	39.75
30	30	30	1	1	0.2	20	210	1	19.82	39.95
31	31	31	1	1	0.4	20	210	1	19.79	39.79
32	32	32	1	1	0.2	40	210	1	19.65	39.95
33	33	33	1	1	0.4	40	210	1	19.53	39.74
34	34	34	1	1	0.2	20	190	1	19.83	39.86

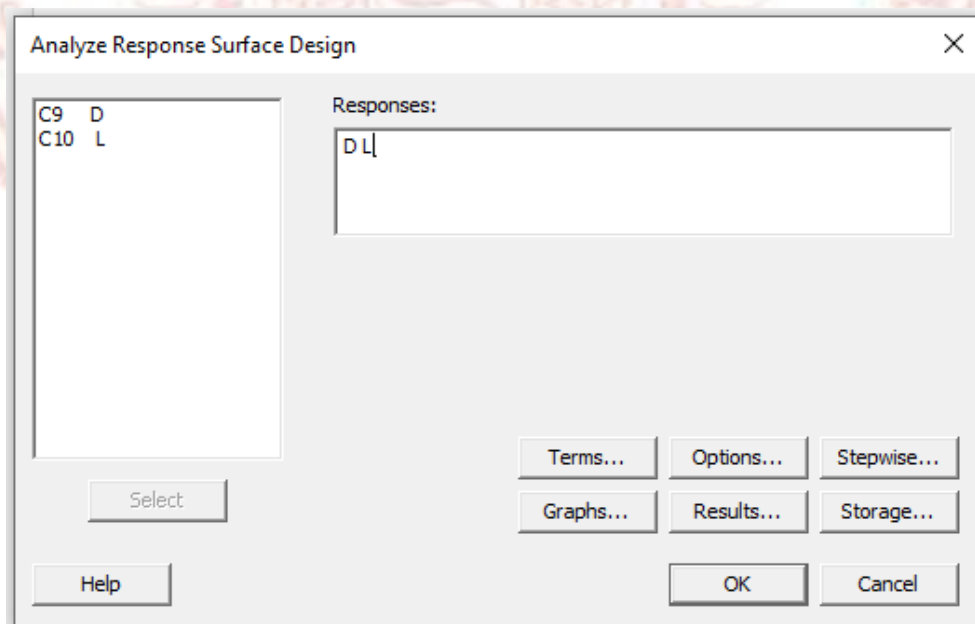
ภาพที่ ข-7 การนำค่าตอบสนองลงในตารางเพื่อเริ่มวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนถัดไปคือการเริ่มวิเคราะห์ผลกระทบพารามิเตอร์ โดยเริ่มที่ (Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design..) เพื่อเริ่มการวิเคราะห์ดังแสดงภาพที่ ข-8



ภาพที่ ข-8 การเริ่มต้นการวิเคราะห์ผลกระทบพารามิเตอร์

ขั้นตอนถัดไปคือการเพิ่มคอลัมน์ C9 และ C10 ซึ่งเป็นค่าตอบสนองลงในช่อง Responses เพื่อกำหนดดังแสดงภาพที่ ข-9 จากนั้นกด Ok เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลออกมา



ภาพที่ ข-9 การกำหนดค่า Response

จากผลลัพธ์ที่แสดงเป็นการคำนวณผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ Model Summary Analysis of Variance (ANOVA) และ Regression Equation in Uncoded Unit ดังแสดงภาพที่ ข-10 และภาพที่ ข-11 เป็นผลลัพธ์การวิเคราะห์ ทั้ง 2 ค่าตอบสนอง

Response Surface Regression: D versus LH, SP, TP, TW

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0635999	80.21%	76.95%	72.37%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	1.39318	0.09951	24.60	0.000
Linear	4	1.10303	0.27576	68.17	0.000
LH	1	0.06228	0.06228	15.40	0.000
SP	1	1.02414	1.02414	253.19	0.000
TP	1	0.01425	0.01425	3.52	0.064
TW	1	0.00235	0.00235	0.58	0.448
Square	4	0.09271	0.02318	5.73	0.000
LH*LH	1	0.00001	0.00001	0.00	0.953
SP*SP	1	0.00327	0.00327	0.81	0.371
TP*TP	1	0.00037	0.00037	0.09	0.762
TW*TW	1	0.06649	0.06649	16.44	0.000
2-Way Interaction	6	0.19744	0.03291	8.14	0.000
LH*SP	1	0.03242	0.03242	8.01	0.006
LH*TP	1	0.00550	0.00550	1.36	0.247
LH*TW	1	0.09923	0.09923	24.53	0.000
SP*TP	1	0.02154	0.02154	5.32	0.023
SP*TW	1	0.03801	0.03801	9.40	0.003
TP*TW	1	0.00074	0.00074	0.18	0.669
Error	85	0.34382	0.00404		
Lack-of-Fit	10	0.05958	0.00596	1.57	0.132
Pure Error	75	0.28424	0.00379		
Total	99	1.73700			

Regression Equation in Uncoded Units

$$D = 20.70 + 1.96 \text{ LH} + 0.0256 \text{ SP} - 0.0167 \text{ TP} + 0.352 \text{ TW} + 0.12 \text{ LH}*\text{LH} + 0.000179 \text{ SP}*\text{SP} + 0.000061 \text{ TP}*\text{TP} - 0.0808 \text{ TW}*\text{TW} - 0.02251 \text{ LH}*\text{SP} - 0.00927 \text{ LH}*\text{TP} + 0.3938 \text{ LH}*\text{TW} - 0.000183 \text{ SP}*\text{TP} - 0.002437 \text{ SP}*\text{TW} - 0.000341 \text{ TP}*\text{TW}$$

ภาพที่ ข-10 ผลลัพธ์การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง (D)

Response Surface Regression: L versus LH, SP, TP, TW

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0518322	80.79%	77.62%	73.13%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	0.96019	0.068585	25.53	0.000
Linear	4	0.66023	0.165058	61.44	0.000
LH	1	0.61319	0.613186	228.24	0.000
SP	1	0.01497	0.014967	5.57	0.021
TP	1	0.02606	0.026055	9.70	0.003
TW	1	0.00602	0.006023	2.24	0.138
Square	4	0.28351	0.070878	26.38	0.000
LH*LH	1	0.14029	0.140294	52.22	0.000
SP*SP	1	0.00137	0.001366	0.51	0.478
TP*TP	1	0.00040	0.000398	0.15	0.701
TW*TW	1	0.00015	0.000147	0.05	0.815
2-Way Interaction	6	0.01644	0.002741	1.02	0.418
LH*SP	1	0.01571	0.015706	5.85	0.018
LH*TP	1	0.00031	0.000313	0.12	0.734
LH*TW	1	0.00006	0.000065	0.02	0.877
SP*TP	1	0.00000	0.000003	0.00	0.974
SP*TW	1	0.00003	0.000030	0.01	0.917
TP*TW	1	0.00033	0.000326	0.12	0.728
Error	85	0.22836	0.002687		
Lack-of-Fit	10	0.01096	0.001096	0.38	0.953
Pure Error	75	0.21740	0.002899		
Total	99	1.18855			

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 L = & 38.71 - 7.03 \text{ LH} - 0.0034 \text{ SP} + 0.0243 \text{ TP} + 0.052 \text{ TW} + 11.74 \text{ LH*LH} + 0.000116 \text{ SP*SP} \\
 & - 0.000063 \text{ TP*TP} - 0.0038 \text{ TW*TW} - 0.01567 \text{ LH*SP} - 0.00221 \text{ LH*TP} - 0.0101 \text{ LH*TW} \\
 & - 0.000002 \text{ SP*TP} + 0.000068 \text{ SP*TW} - 0.000226 \text{ TP*TW}
 \end{aligned}$$

ภาพที่ ข-11 ผลลัพธ์การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าตอบสนอง (L)



ภาคผนวก ค

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เผยแพร่

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

ทัตพงศ์ ลิ้มหลาย^{1*} และวรรณลักษณ์ เหล่าทวีทรัพย์¹
Tattapong Limlay^{1*} and Wannalak Laotaweesub¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Department 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 พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์ ความคลาดเคลื่อนของขนาด 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, process printing, dimensional error, layer thickness, printing speed, wall thickness, central composite design



บทนำ

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

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

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

ทรงกระบอก เช่น (Sudin et al., 2016) การใช้ชิ้นส่วนที่มีรูปทรงทั่วไป รวมถึงทรงกระบอก ในการศึกษาเกี่ยวกับขนาดชิ้นงานที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองพบว่า ถ้าชิ้นส่วนที่พิมพ์มีลักษณะเป็นทรงกระบอก และรู จะมีความแม่นยำน้อยมาก ซึ่งหากต้องการให้ชิ้นส่วนมีความแม่นยำต้องลดขนาดของความคลาดเคลื่อนไป เพื่อให้ชิ้นส่วนแม่นยำ และ (Wu, 2018) การใช้ชิ้นส่วนทรงกระบอกในการศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด พบว่าความหนาชั้นน้อยลงส่งผลให้คุณภาพของชิ้นงานดีขึ้น แต่เวลาในการพิมพ์ที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น จากการศึกษาทางวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจในการนำชิ้นส่วนประกอบมาใช้จริงน้อยมาก เนื่องจากมีชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยกระบวนการนี้ข้อบกพร่องจำนวนมาก ทำให้การนำชิ้นงานมากใช้จริงจึงเป็นเรื่องยากอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำชิ้นส่วนประกอบที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมทั่วไป เป็นกรณีศึกษาในการทดลอง นอกจากนี้จากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า 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) แต่จากการหาความเหมาะสม วิธีส่วนประสมกลาง (CCD) ได้ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีทาคุชิ เนื่องจากวิธีทาคุชิจะคัดการทดลองที่ไม่จำเป็นออกเพื่อลดจำนวนการทดลองที่ไม่จำเป็น ทำให้บางครั้งอาจพลาดผลลัพธ์ที่ดีที่สุดไป ซึ่งในทางกลับกันวิธีส่วนประสมกลาง (CCD) จะวิเคราะห์ปัจจัยทุกระดับที่มีความซับซ้อนได้ดี ทำให้มีการใช้จำนวนการทดลอง และเวลามากขึ้น และส่งผลต่อผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ในการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนขนาดจากงานวิจัยของ (Dey & Yodo, 2019) จากการศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ทั้งหมดที่มีผลต่อชิ้นส่วนที่พิมพ์ ได้แก่ ช่องว่างภายใน (gap) ทิศทางการวาง อุณหภูมิหัวฉีด ความหนาแน่นภายใน ความหนาชั้น ความเร็วใน

การพิมพ์ และความหนาผนัง เป็นต้น โดยรวบรวมงานวิจัยที่มีการศึกษาตามผลกระทบต่าง ๆ เช่น ความแข็งแรง ความหนาผิว และความคลาดเคลื่อนขนาดที่ส่งผลต่อชิ้นส่วน แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีจำนวนมาก จากงานวิจัยดังตารางที่ 1 พบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ความหนาชั้น คือ พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการพิมพ์ด้วยกระบวนการแบบ FDM เนื่องจากส่งผลกระทบต่อคุณภาพพื้นผิว และความแม่นยำของขนาดชิ้นส่วน ยิ่งความหนาชั้นน้อยลงยิ่งทำให้ผิวละเอียดยิ่งขึ้น แต่ในตรงข้ามกันส่งผลให้เวลาในการพิมพ์เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน และนอกจากนี้ยังทำให้เกิดความร้อนสะสม ส่งผลให้ขนาดชิ้นงานเกิดการหดตัวหลังจากการพิมพ์ และทำให้ขนาดของชิ้นส่วนเกิดเปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์ความเร็วในการพิมพ์ คือ อัตราความเร็วในการเคลื่อนที่ขณะทำการฉีดวัสดุลงบนฐานพิมพ์ระหว่างการพิมพ์ชิ้นส่วน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อ รูปร่างขนาดของชิ้นส่วน หากความเร็วในการพิมพ์สูงเกินไป อาจส่งผลหัวฉีดปล่อยวัสดุเร็วจนทำให้ชิ้นส่วนที่พิมพ์มีเวลาในการเย็นตัวไม่ทัน อาจส่งผลให้ชิ้นส่วนเกิดการเสียรูป หรือขนาดของชิ้นส่วนแตกต่างไปจากที่กำหนด และพารามิเตอร์ความหนาผนัง คือ ความหนาชั้นของโครงสร้างพื้นผิวล้อมรอบชิ้นส่วนในระนาบ XY ซึ่งการปรับความหนาของผนังที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ขนาดของชิ้นส่วนเกิดความคลาดเคลื่อนขนาดที่กำหนด โดยความหนาของผนังที่หนาเกินไป อาจทำให้วัสดุสะสมในบริเวณนั้นมากเกินไป ส่งผลให้ขนาดของชิ้นส่วนใหญ่กว่าขนาดที่กำหนด ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดของชิ้นส่วน ซึ่งทั้ง 3 พารามิเตอร์มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพิมพ์แบบ FDM โดยพิจารณาพารามิเตอร์ 3 พารามิเตอร์ คือ ความหนาชั้น ความเร็วในการพิมพ์ และความหนาผนัง เพื่อปรับระดับของพารามิเตอร์ในการพิมพ์ให้ชิ้นส่วนกรณีศึกษามีขนาดอยู่ในช่วงของขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่กำหนด

ตาราง 1

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	พารามิเตอร์	วิธีการทดลอง
Sood et al. (2009)	- ความกว้างของเส้นใย - ช่องว่างระหว่างเส้นใย	- ทิศทางการพิมพ์ - ความหนาชั้น (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 (Taguchi L27)
Wu. (2018)	- ความหนาชั้น	-
Buj-Corral et al. (2022)	- วัสดุ	-
Jayashuriya et al. (2022)	- ความหนาแน่นภายใน - ความหนาของผนังชั้น	- ความเร็วพิมพ์ - ความหนาชั้น (Taguchi L9)
Elkaseer et al. (2020)	- ความหนาแน่นภายใน - ความเร็วในการพิมพ์ - อุณหภูมิหัวฉีด	- มุมเอียง - ความหนาชั้น (Taguchi L50)
Aslani et al. (2020)	- อัตราไหล - โครงสร้างภายใน	- จำนวนชั้นผนัง - อุณหภูมิหัวฉีด (Taguchi L9)
Hanon et al. (2021)	- องศาโครงสร้างภายใน - ความหนาของชั้น	- ทิศทางการพิมพ์ - สีของเส้นใย -
Shakeri et al. (2021)	- ความหนาของชั้น - ความเร็วในการพิมพ์	- อุณหภูมิโต๊ะ - อุณหภูมิหัวฉีด (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 - อุณหภูมิห้อง (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 สลักแบบมีบ่า เป็นชิ้นส่วนกรณีศึกษา ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 25 mm และมีความยาวอยู่ที่ 57 mm วัสดุของชิ้นส่วน คือ S45C โดยกำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อนของขนาดที่ยอมรับได้แสดงดังภาพ 1 จากนั้นทำการสร้างเป็นโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรม SolidWorks เพื่อเซฟเป็นไฟล์ STL และนำมาแปลงเป็นข้อมูล G-code สำหรับสั่งพิมพ์ชิ้นส่วนบนเครื่องพิมพ์สามมิติ

2. การตรวจสอบชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ตามเริ่มต้นของเครื่องพิมพ์

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

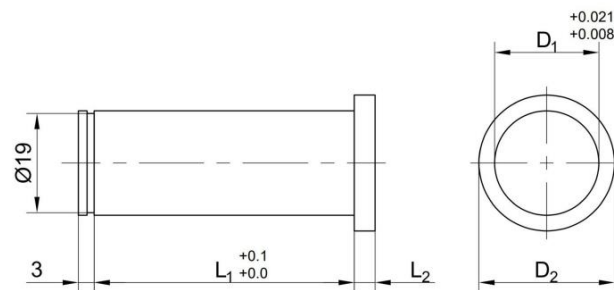
Butadiene-Styrene--ABS) ซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมใช้กันอย่างมากในการนำมาพิมพ์ชิ้นส่วนสามมิติ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ โดยตัวอย่างชิ้นส่วนที่พิมพ์แสดงดังภาพ 2

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



ภาพ 1 ขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษา



ภาพ 2 ลักษณะชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ตามค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

ตาราง 2

ผลลัพธ์จากการวัดชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่ตั้งค่าตามค่าเริ่มต้นของโปรแกรม MakerBot Method X

ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ตามค่า Default ที่แนะนำจากโปรแกรม MakerBot (±0.2 mm): ABS					
ครั้งที่	LH = 0.2 mm		PS = 55 mm/s		TW = 1 mm
	ขนาดชิ้นส่วนกรณีศึกษา				
	$D_1 = \phi 12^{+0.021}_{+0.008}$ mm		$L_1 = 50^{+0.100}_0$ mm	$D_2 = \phi 23$ mm	$L_2 = 4$ mm
	20.008	20.021	50.000	50.100	
1		20.089		50.257	
2		20.106		50.275	
3		20.101		50.266	
4		20.085		50.213	
5		20.116		50.293	

ตาราง 3

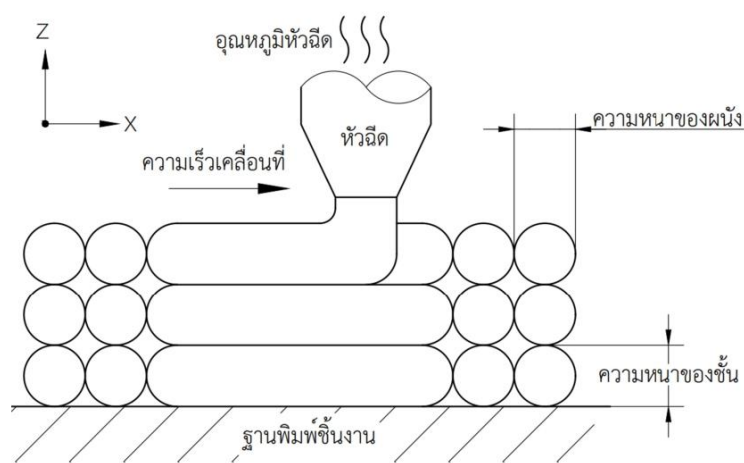
พารามิเตอร์ที่ในงานวิจัยนี้

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 โดยวัดชิ้นส่วนด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) รุ่น Sylvac S-Cal PRO ที่มีความแม่นยำสูงสุด 0.001 mm ดังภาพ 5

ขั้นตอนการวัดชิ้นส่วนจะวัดทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดชิ้นส่วนกรณีศึกษา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้รับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม 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

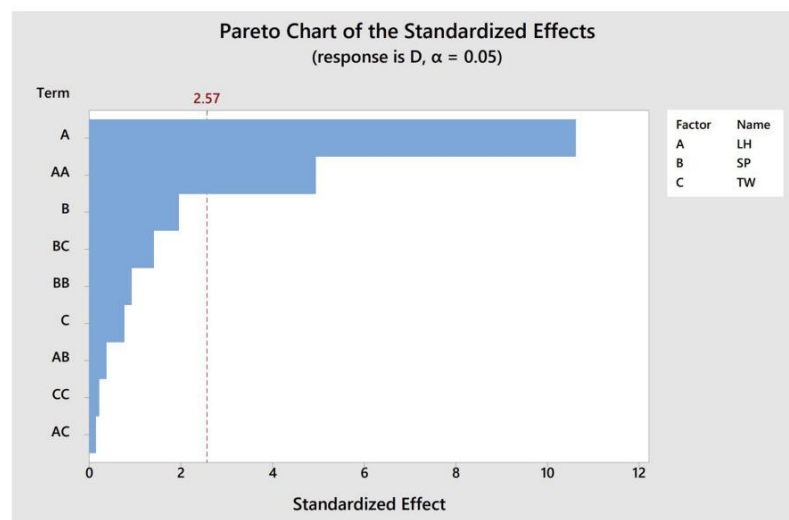
จากภาพ 6 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) กำหนดให้เส้นประแนวนอนสีแดงที่ระดับ 2.57 แสดงถึงค่าเกณฑ์ที่สำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 หากพารามิเตอร์เกินค่าเกณฑ์นี้ หมายความว่ามีความสำคัญทางสถิติ ซึ่งพบว่า

พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ ความหนาของชั้น (LH) รองลงมาคือ ความหนาของชั้นกำลังสอง (LH²) ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีระดับน้อยกว่าเกณฑ์ คือ พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญน้อย

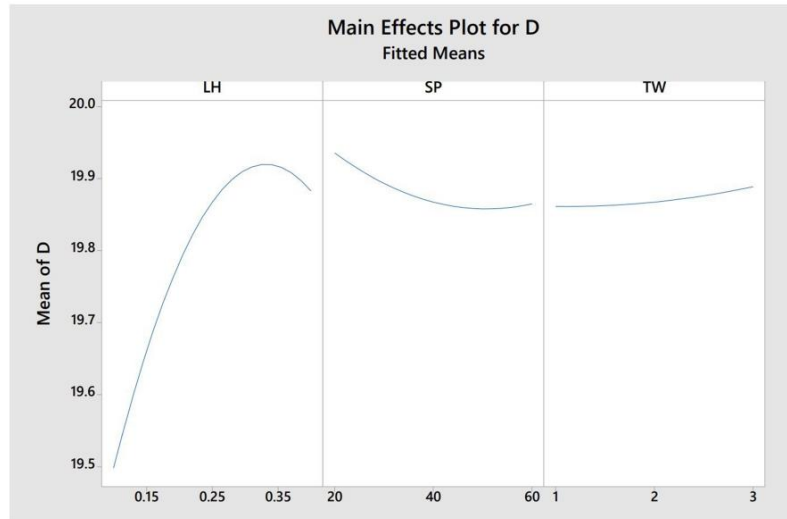
ตาราง 6

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 แผนภูมิพาเรโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter--D)



ภาพ 7 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (main effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากภาพ 7 ผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยว (main effects) ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (DE) พบว่า ขึ้นส่วนส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าขนาดที่กำหนด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง=20 มม.) โดยแนวโน้มของความหนาขึ้น (LH) ยิ่งมากยิ่งขึ้นทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข้าใกล้ขนาดที่กำหนด ($\phi 20$) มากขึ้นก่อนที่จะลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ความหนาแน่น (WT) ยิ่งเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดขึ้นส่วนเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

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 ความหนาขึ้น (LH) ความหนาแน่น (WT) และความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาแน่น (SPxWT) เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ส่วนพารามิเตอร์ที่มีค่า P-value มากกว่า 0.05 คือพารามิเตอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญ หรือมีนัยสำคัญน้อยมาก

จากภาพ 8 แผนภูมิพารโต (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (L) พบว่า พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ การปรับความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาแน่น (SPxWT) พร้อมกัน รองลงมา คือ ความหนาขึ้น (LH) และความหนาแน่น (WT) ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์ที่มีระดับน้อยกว่าเกณฑ์ คือพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญน้อยมาก

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

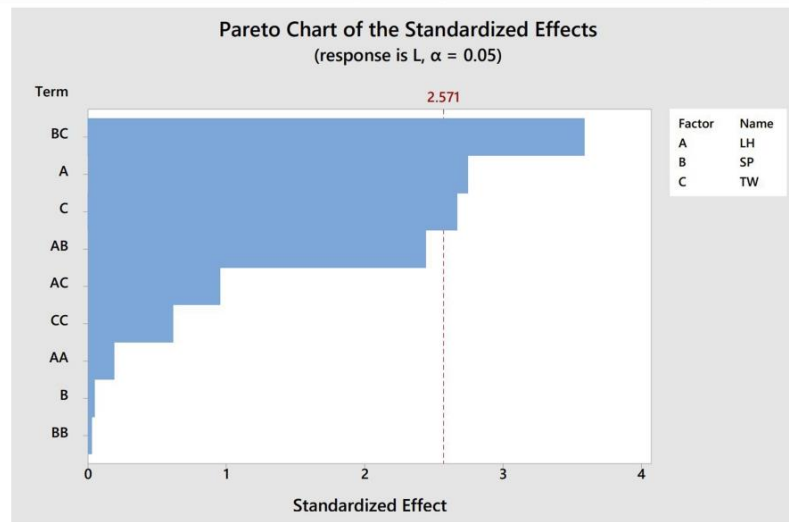
ขนาดมากกว่าขนาดที่กำหนด (ความยาว=50 มม.) โดยแนวโน้มของความหนาชั้น (LH) ยิ่งมากทำให้ขนาดความยาวเข้าใกล้ขนาดที่กำหนด ในตรงข้ามกับความหนาผนัง ยิ่งลดลงยิ่งเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดมากขึ้น แต่ความเร็วในการพิมพ์ (SP) มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่วนผลลัพธ์ของผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วม (interaction) ดังแสดงภาพ 10 ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาด

ความยาว (L) พบว่า แนวโน้มที่มีความสำคัญ คือ ความเร็วในการพิมพ์ x ความหนาผนัง (SPxWT) ซึ่งแนวโน้มได้แสดงให้เห็นว่าการปรับสองพารามิเตอร์พร้อมกันโดยการปรับให้ความหนาผนัง และความเร็วลดลง ส่งผลให้ขนาดเข้าใกล้ขนาดที่กำหนดมากขึ้น ส่วนพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญน้อยมาก คือ ความหนาชั้น x ความเร็วในการพิมพ์ (LHxSP) และความหนาชั้น x ความหนาผนัง (LHxWT)

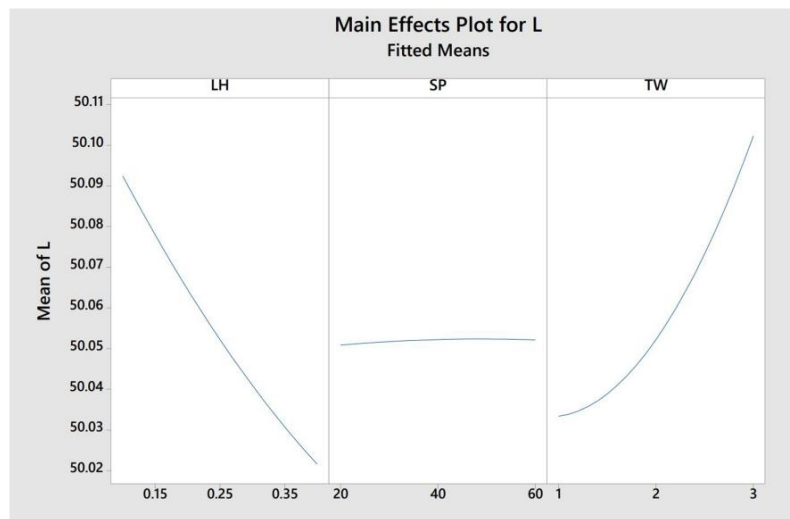
ตาราง 7

ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

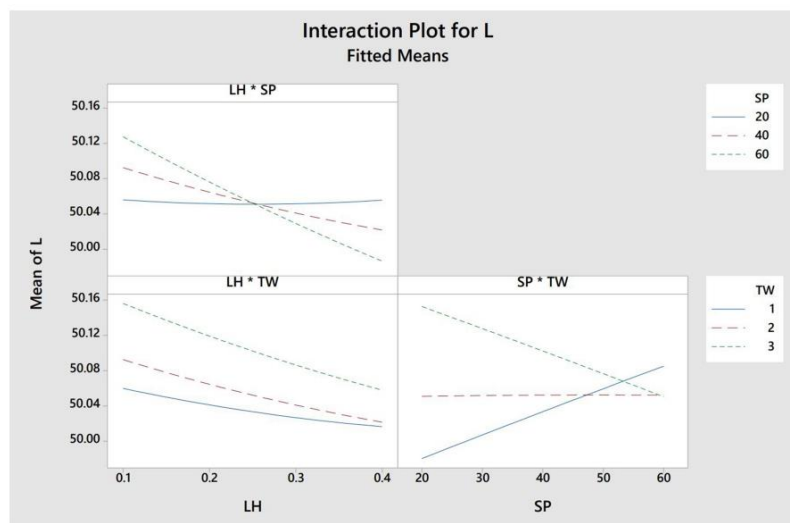
พารามิเตอร์	DF	Adj SS	F-Value	P-Value
ความหนาชั้น	1	0.012532	7.54	0.041
ความเร็วในการพิมพ์	1	0.000004	0.00	0.963
ความหนาผนังชั้น	1	0.011857	7.13	0.044
ความหนาชั้น x ความหนาชั้น	1	0.000059	0.04	0.858
ความเร็วในการพิมพ์ x ความเร็วในการพิมพ์	1	0.000001	0.00	0.978
ความหนาผนังชั้น x ความหนาผนังชั้น	1	0.000627	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 แผนภูมิพารेट (Parato Chart) ของความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว (Length--L)



ภาพ 9 ผลกระทบของพารามิเตอร์เดี่ยวที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว



ภาพ 10 ผลกระทบของพารามิเตอร์ร่วมที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดความยาว

3. ผลลัพธ์การหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์

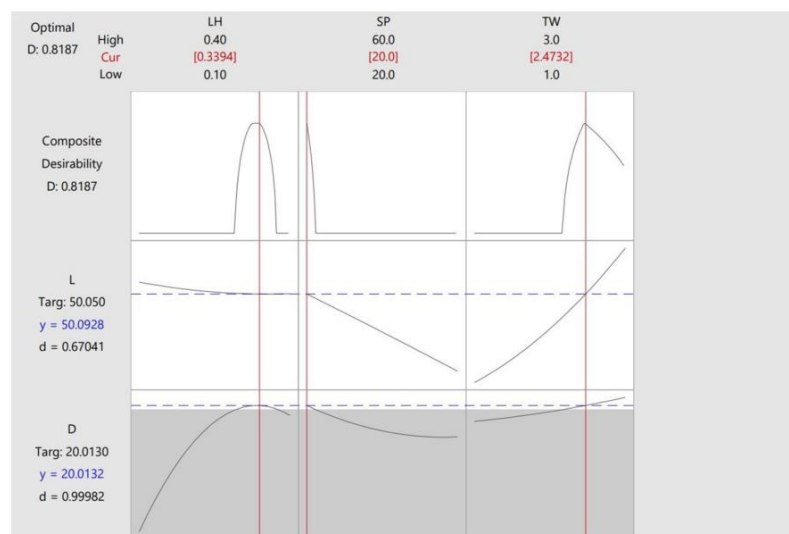
ผลลัพธ์การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพิมพ์ชิ้นงาน กำหนดให้จุดมุ่งหมาย คือ ทำให้ขนาดชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่มีขนาดอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่กำหนด โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ ซึ่งผลลัพธ์แสดงดังภาพ 11

จากภาพ 11 พบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่แนะนำโดยผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab คือ ความหนาชั้นอยู่ที่ 0.3394 mm ความเร็วในการพิมพ์อยู่ที่ 20 mm/s และความหนาผนังชั้นอยู่ที่ 2.4732 mm โดยผลลัพธ์ค่าตอบสนองที่ได้รับ 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

ครั้งที่	ชิ้นส่วนกรณีศึกษาที่พิมพ์ด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามผลการวิเคราะห์					
	LH = 0.3485 mm		PS = 20 mm/s	TW = 2.4747 mm		
	ขนาดชิ้นส่วนกรณีศึกษา					
	$D_1 = \phi 12^{+0.021}_{+0.008}$ mm		$L_1 = 50^{+0.100}_0$ mm	$D_2 = \phi 23$ 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 พารามิเตอร์ที่ส่งต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นส่วนกรณีศึกษามากที่สุดคือ 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 อาจส่งผลต่อขนาดของชิ้นส่วนกรณีศึกษาได้ และการนำค่าที่ได้รับจากการวิเคราะห์ไปใช้งานจริงในการตั้งค่าเครื่องพิมพ์สามมิติที่เหมาะสม คือ ความหนาชั้นที่ 0.339 mm ความเร็วในการพิมพ์ที่ 20 mm/s และความหนาผนังที่ 2.473 mm เนื่องจากในการตั้งค่ากับเครื่องพิมพ์สามมิติสามารถกำหนดได้เพียงทศนิยม 3 ตำแหน่งเท่านั้นสรุปได้ว่า การปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมช่วยให้ชิ้นส่วนกรณีศึกษามีขนาดอยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อนของขนาดที่กำหนด และสามารถนำชิ้นส่วนมาทดแทนชิ้นส่วนมาตรฐานในอุตสาหกรรมได้ซึ่งในอนาคตงานวิจัยนี้สามารถ

พัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ค่าตอบสนองเกี่ยวกับ
รูปร่างรูปทรงของชิ้นส่วน (GD&T) และความหลากหลาย
ของวัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์สามมิติ เพื่อให้ชิ้นส่วนที่
พิมพ์ด้วยกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ 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., & Razaq, 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*, *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
- 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



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายทัตพงศ์ ลิ้มหลาย
ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์สามมิติสำหรับวัสดุ PLA และ ABS โดยใช้วิธี CCD
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล (MMET)
ประวัติ	ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม 2540 สถานที่เกิด อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการเป็นบุตรคนที่ 1 ในจำนวนพี่ 2 คน ของนายกำจัด ลิ้มหลาย และนางสาววิภาดา งามนา ที่อยู่ปัจจุบัน เลขที่ 1279/518 หมู่ 6 ต.ท้ายบ้านใหม่ อ.เมืองสมุทรปราการ จ.สมุทรปราการ 10280 ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาเขียนแบบเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรปราการ จ.สมุทรปราการ ปี พ.ศ.2559 และ สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาเขียนแบบเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคสมุทรปราการ จ.สมุทรปราการ ปี พ.ศ.2561 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมการออกแบบและผลิตเครื่องจักรกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี พ.ศ. 2564