

อัตราการป้อนและปริมาณวัสดุที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีดในกระบวนการ

Fused Deposition Modeling



นายเกรียงศักดิ์ มาศนอก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**FEED RATE AND VOLUME OF MATERIAL EFFECTS
IN FUSED DEPOSITION MODELING NOZZLE WEAR**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

อัตราการใช้และปริมาณวัสดุที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีดในกระบวนการ
Fused Deposition Modeling

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. พงษ์ชัย จิตตะมัย)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. ปภากร พิทยชาวล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

กรรมการ



(อ. ดร. จงกล ศรีธร)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เกรียงศักดิ์ มาศนอก : อัตราการป้อนและปริมาณวัสดุที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีดใน
กระบวนการ Fused Deposition Modeling (FEED RATE AND VOLUME OF
MATERIAL EFFECTS IN FUSED DEPOSITION MODELING NOZZLE WEAR)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล, 116 หน้า.

เทคโนโลยี Fused deposition modeling (FDM) เป็นเทคโนโลยีที่เติบโตอย่างรวดเร็ว
เนื่องจากสามารถสร้างชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เทคโนโลยี FDM แบบดั้งเดิมใช้ได้เฉพาะ
พลาสติกเท่านั้นในการสร้างชิ้นงาน แต่เทคโนโลยี FDM สมัยใหม่สามารถสร้างชิ้นงานจากวัสดุ
ผสมได้ เช่นพลาสติก PLA ผสมผงทองแดง เหล็ก หรือสแตนเลสสตีล ซึ่งผงวัสดุเหล่านี้เป็นสาเหตุ
ให้เกิดการสึกหรอในหัวฉีดของเครื่อง FDM การสึกหรอของหัวฉีดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ใน
การศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่ปัจจัยสำคัญ 2 ปัจจัยคือ อัตราการป้อนและปริมาณของวัสดุ โดยศึกษาการ
ผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีแบบ FDM ใช้วัสดุผสมระหว่างพลาสติก PLA กับ ผงสแตนเลสสตีล ใน
การวิจัยจะทำการทดลองตามทฤษฎีการออกแบบการทดลองเพื่อหาอัตราการป้อนและปริมาณวัสดุ
ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีดในกระบวนการ FDM ผลการทดลองพบว่าอัตราการป้อน ปริมาณ
ของวัสดุ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของอัตราการป้อนและปริมาณของวัสดุ มีอิทธิพลต่อการสึก
หรอของหัวฉีดอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณอัตราการสึก
หรอของหัวฉีดในกระบวนการ FDM ได้

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา เกรียงศักดิ์ มาศนอก
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ปภากร

KRIENGSAK MASNOK : FEED RATE AND VOLUME OF MATERIAL

EFFECTS IN FUSED DEPOSITION MODELING NOZZLE WEAR. THESIS

ADVISOR : ASST. PROF. PHAPAKORN PITAYACHAVAL, Ph.D., 116 PP.

RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGY/FUSED DEPOSITION MODELING/
COMPOSITE MATERIAL FILAMENT

Fused deposition modeling (FDM) is a fast growing technology due to its ability to build functional parts having complex geometrical shape. For traditional FDM build part base on thermoplastic, However the modern FDM can construct by using composite material filaments such as poly lactic acid (PLA) filled bronze, iron or stainless steel in which these materials cause nozzle wear. The wear of the nozzle depends on many process variables. This research study on two process parameters included feed rate and volume of material. Experiment was conducted by using standard nozzle fitted with FDM machine and printed PLA stainless steel filled material, then nozzle wear was investigated by digital microscope. Experimental analysis has been carried out by using design of experiments (DOE) technique in order to determine the effect of parameters on the FDM nozzle wear. The results showed that feed rate and volume of material are significant factor on the FDM nozzle wear. In addition, the results of this study can be established wear rate equation for estimating FDM nozzle wear rate.

School of Industrial Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature กฤษณ์ศักดิ์ มั่นคง

Advisor's Signature ปณณพกร พิตายาวัล

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาและความเมตตาอย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชาวล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้โอกาสในการศึกษา ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ คอยดูแลด้วยความเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งยัง ช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความ พยายามของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์ อาจารย์ ดร.จงกล ศรีธร และอาจารย์ ดร.นรา สมัตถภาพงส์ ที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ในด้านวิชาการ และด้านศีลธรรมจรรยา ทำให้ ผู้วิจัยสามารถดำเนินชีวิตได้ในทางที่ถูกต้อง

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาและทำวิจัย ทำให้นี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้ความรัก ความอบอุ่น ความเข้าใจ และความทุ่มเทในการอุปการะเลี้ยงดู ตลอดจนเป็นกำลังใจที่ดีและแรงผลักดันจนทำให้ ประสบผลสำเร็จในชีวิต

เกรียงศักดิ์ มาสนอก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 หลักการทำงาน องค์ประกอบ ประเภท และวัสดุที่ใช้ในการผลิตของเครื่อง ผลิตชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM).....	10
2.1.1 การทำงานทั่วไปของเครื่องผลิตงาน 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling.....	10
2.2 ปัญหาคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการผลิตด้วยเครื่องผลิตชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM).....	19
2.3 เครื่องจักร เครื่องมือ และซอฟต์แวร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง.....	21
2.3.1 เครื่องกัด (Milling machine).....	21
2.3.2 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscope).....	23
2.3.3 ซอฟต์แวร์วิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ Minitab.....	24
2.3.4 ซอฟต์แวร์ Cura.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5 ซอฟต์แวร์ Solid work	30
2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)	31
2.5 การทบทวนวรรณกรรม	43
3 วิธีการดำเนินงาน	47
3.1 การออกแบบการทดลอง	48
3.1.1 การออกแบบการทดลอง	48
3.1.2 ออกแบบชิ้นงานทดลองในโปรแกรม Solid work	53
3.2 การเตรียมการทดลอง	54
3.2.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม Cura	54
3.2.2 เครื่องพิมพ์งาน และการตั้งค่าเครื่องพิมพ์งาน 3 มิติ	
แบบ Fused Deposition Modeling (FDM)	56
3.3 การทดลอง	58
3.3.1 การพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์งาน 3 มิติ	
แบบ Fused Deposition Modeling (FDM)	58
3.3.2 การผ่าแนวตัดขวางหัวฉีด (Nozzle)	62
3.4 การวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง	64
3.4.1 การวัดขนาดหัวฉีด (Nozzle Diameter) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล	64
3.4.2 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง	65
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	66
4.1 ผลการทดลอง	66
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	67
4.2.1 อิทธิพลของอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ	
(volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear)	
ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM)	67
4.3 อัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate)	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปผล	85
5.1	สรุปผลการวิจัย	85
5.1.1	อิทธิพลของอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM)	85
5.1.2	อัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate)	85
5.2	ประโยชน์ที่จะได้รับ	86
5.3	ข้อเสนอแนะในการวิจัยในอนาคต	86
	รายการอ้างอิง	87
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ภาพและขนาดของหัวฉีดในแต่ละระดับของปัจจัย	90
	ภาคผนวก ข. ค่าคงที่สำหรับแผนภูมิควบคุม (Factor for control chart)	98
	ภาคผนวก ค. ตาราง Percentage point of the F Distribution	101
	ภาคผนวก ง. รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	103
	ประวัติผู้เขียน	116

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	แสดงกระบวนการสร้างต้นแบบรวดเร็ว.....	2
1.2	แสดงการแบ่งประเภทของเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว.....	4
1.3	แสดงค่า Flow velocity ที่บริเวณหัวฉีด (Nozzle).....	5
1.4	แสดงภาพชิ้นงานที่เกิด Defect แบบ Fracture Surface.....	6
1.5	แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุ (Cause) ผลกระทบ (Effect) และปัญหา (Problem) ของกรรมวิธี FDM.....	7
2.1	แสดงกระบวนการทำงานของกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM).....	11
2.2	แสดงองค์ประกอบของเครื่องผลิตงาน 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM).....	13
2.3	แสดงองค์ประกอบของชุดหัวฉีดของเครื่องผลิตงาน 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM).....	14
2.4	ประเภทของเครื่อง FDM.....	15
2.5	แสดงประเภทของเครื่อง FDM.....	16
2.6	แสดงแผนภูมิการแบ่งประเภทการเสียหายของชิ้นงานในกระบวนการ FDM.....	19
2.7	แสดงการเสียหายประเภท Surface Defects ลักษณะการเสียหายชนิด Staircase effect.....	20
2.8	แสดงการเสียหายประเภท Internal Defects ลักษณะการเสียหายชนิด Inter Road Defect.....	21
2.9	แสดงการเสียหายประเภท FDC Feed Stock ลักษณะการเสียหายชนิด Fracture Surface.....	21
2.10	เครื่องกัด (Milling machine).....	23
2.11	กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscope).....	23
2.12	ภาพรวมของโปรแกรม Minitab.....	25
2.13	ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม Minitab.....	27
2.14	ภาพรวมของโปรแกรม Cura.....	29
2.15	โปรแกรม Solid Work.....	30
2.16	ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ.....	31
2.17	ตาราง ANOVA จากโปรแกรม Minitab.....	41
2.18	กราฟต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	แสดงภาพรวมของการดำเนินงาน.....47
3.2	แสดงการออกแบบชิ้นงานทดลองโดยโปรแกรม Solid Work.....54
3.3	แสดงชิ้นงานทดลอง 3 มิติ โดยเครื่อง FDM.....54
3.4	โปรแกรม Cura.....56
3.5	แสดงการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรม Cura.....56
3.6	เครื่องพิมพ์งาน 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling (FDM).....57
3.7	แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนหัวฉีด (Nozzle).....58
3.8	แสดงการปรับระดับชุดหัวฉีดโดยใช้กระดาษแข็ง.....58
3.9	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการพิมพ์งานตามแผนการทดลอง.....60
3.10	แสดงการดำเนินการพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling (FDM).....61
3.11	หน้าจอแสดงสถานะการทำงานของเครื่องพิมพ์.....61
3.12	หน้าต่างโปรแกรมสำหรับคำสั่งพิมพ์งาน.....62
3.13	หัวฉีด (Nozzle) ที่ใช้ในงานวิจัย.....63
3.14	ลักษณะการผ่าแนวตัดขวาง (Cross section cutting).....63
3.15	หัวฉีด (Nozzle) ที่ได้จากการผ่าแนวตัดขวาง.....64
3.16	แสดงการวัดขนาดโดยโปรแกรมของกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล.....65
4.1	แสดงตาราง ANOVA ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....67
4.2	กราฟแสดงขนาดของหัวฉีดกับระดับปัจจัยของปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย.....70
4.3	กราฟแสดงขนาดของหัวฉีดกับระดับปัจจัยของอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณวัสดุ (Volume of material) และอัตราการป้อน (Feed rate).....70
4.4	กราฟแสดงขนาดของหัวฉีดกับระดับปัจจัยของอิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการป้อน (Feed rate) และปริมาณวัสดุ (Volume of material).....71
4.5	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของขนาดหัวฉีด (Nozzle diameter).....72
4.6	แผนภูมิค่าควบคุมพิสัย.....73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 หัวฉีด (Nozzle) ที่ยังไม่ผ่านการพิมพ์งาน.....	74
4.8 หัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการพิมพ์งานด้วยวัสดุผสม.....	74
4.9 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ อัตราการป้อน (Feed rate).....	75
4.10 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material).....	76
4.11 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 25 mm/s.....	77
4.12 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 50 mm/s.....	78
4.13 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 75 mm/s.....	78
4.14 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 100 mm/s.....	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของเส้นวัสดุที่ใช้ในการผลิตงาน 3 มิติ ด้วยกระบวนการ FDM.....	18
2.2 ตารางANOVAสำหรับกรณี 2 ปัจจัย (AและB) ของอิทธิพลคงที่ (Fixed Effects Model).....	40
3.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.2 ตารางแสดงข้อมูลจากการทดลอง.....	49
3.3 ตารางแผนการทดลอง.....	50
3.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ในการทำงานของเครื่อง FDM.....	55
4.1 ขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter).....	66
4.2 ตารางวิเคราะห์ ANOVA.....	68
4.3 ตารางแสดงผลการทดลองเฉลี่ย ($\bar{D}$) ของขนาดของหัวฉีด.....	75
4.4 ตารางค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (e).....	82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

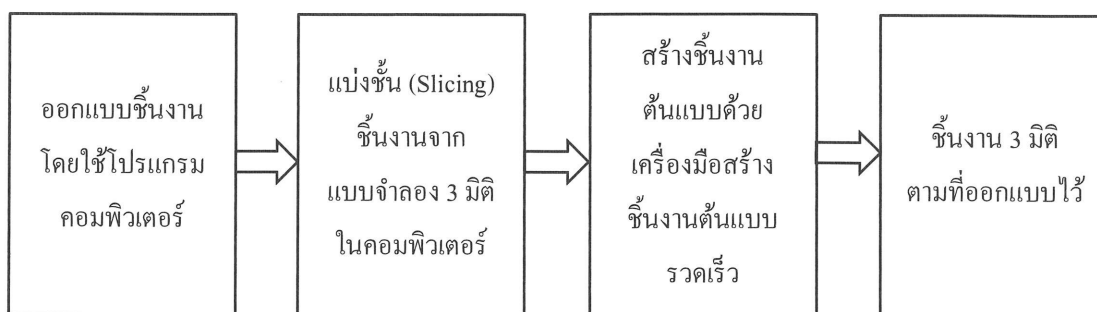
A	=	สัญลักษณ์ในการทดลองแทนอัตราการป้อน
B	=	สัญลักษณ์ในการทดลองแทนปริมาณวัสดุ
mm.	=	มิลลิเมตร
g	=	กรัม
mm/s	=	มิลลิเมตรต่อวินาที
D_0	=	ขนาดของหัวฉีดก่อนพิมพ์ชิ้นงาน
D_1	=	ขนาดของหัวฉีดหลังพิมพ์ชิ้นงาน
$\bar{D}$	=	ขนาดของหัวฉีดเฉลี่ย
C_F	=	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองอัตราการป้อน
C_V	=	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองปริมาณวัสดุ
m_F	=	อิทธิพลของอัตราการป้อน
m_V	=	อิทธิพลของปริมาณวัสดุ
F	=	อัตราการป้อน
V	=	ปริมาณวัสดุ
e	=	ค่าความคลาดเคลื่อนการทดลอง
FDM	=	Fused Deposition Modeling
ABS	=	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene
PLA	=	Poly Lactic Acid
SPLA	=	Stainless steel-Poly Lactic Acid
G-Code	=	รูปแบบภาษาของเครื่องจักร
STL	=	StereoLithography
DOE	=	Design of experiment
H_0	=	สมมติฐานหลัก
H_1	=	สมมติฐานรอง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ (Product Design and Development Process) เป็นกระบวนการที่มุ่งเน้นต่อการตอบสนองความต้องการของลูกค้า กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่หรือปรับปรุงผลิตภัณฑ์เดิมที่มีอยู่แล้ว ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะการแข่งขันที่สูงขึ้นในตลาดปัจจุบัน ผู้ผลิตจึงต้องคิดค้นและออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่เป็นที่ต้องการของตลาด ในกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์นั้น ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานต้นแบบ (Prototype) ถือว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การสร้างชิ้นงานต้นแบบคือการเชื่อมโยงแนวความคิด (Conceptual Design) ของนักออกแบบให้ออกมาเป็นชิ้นงานจริง วัตถุประสงค์ของการสร้างชิ้นงานต้นแบบมิใช่เพียงแค่การสร้างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกแบบให้เป็นชิ้นงานจริงเท่านั้น แต่ยังสามารถนำเอาชิ้นงานต้นแบบมาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและหน้าที่การใช้งานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในบางครั้งการปรับเปลี่ยนรูปแบบลักษณะของตัวผลิตภัณฑ์อาจเกิดขึ้นหลายครั้งในระหว่างกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ จากอดีตนั้นการสร้างชิ้นงานต้นแบบถือว่าเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาค่อนข้างมาก ยกตัวอย่างเช่น การสร้างชิ้นงานต้นแบบด้วยวิธีการสร้างแม่พิมพ์ ถ้าหากมีการแก้ไขผลิตภัณฑ์จะต้องมีการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาใหม่ จึงส่งผลให้ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานต้นแบบต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น (จันทร์เด่นดวง, 2543) จากปัญหาดังกล่าวจึงทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ในการสร้างชิ้นงานต้นแบบขึ้น คือเทคโนโลยีการเพิ่มเข้า (Additive technology) ซึ่งเป็นการสร้างชิ้นงานต้นแบบโดยการเติมเนื้อวัสดุเข้าเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ วิธีการที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างกว้างขวางคือการสร้างชิ้นงานต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototype, RP) ซึ่งเป็นการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ 3 มิติ (3D CAD model) ที่ได้จากการออกแบบทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วสร้างชิ้นงานต้นแบบในรูปแบบชั้น โดยจะเป็นการสร้างชิ้นงานทีละชั้น (Layer By Layer) จนได้เป็นรูปร่างชิ้นงานที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ทำให้สามารถตรวจพบความผิดพลาดในการออกแบบได้เร็วขึ้น และแก้ไขรูปแบบลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้สะดวกขึ้น (พิทยชาติ & เป้าทอง, 2556)



รูปที่ 1.1 แสดงกระบวนการสร้างต้นแบบรวดเร็ว

เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วสามารถแบ่งได้เป็นได้เป็น 3 ประเภทตามวัตถุดิบ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (วรวิทย์, ทรงคุณ, & ปริญญา, 2549) คือ วัตถุดิบแบบของแข็ง วัตถุดิบแบบของเหลว และวัตถุดิบที่เป็นผง โดยมีกรรมวิธี ดังต่อไปนี้

กรรมวิธี Laminated Object Manufacturing (LOM)

กรรมวิธีนี้ใช้วัตถุดิบแบบของแข็ง พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1985 โดย Michael Feygin หลักการทำงานของ LOM คือการใช้ลำแสงเลเซอร์อินฟราเรดที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2 laser) ตัดกระดาษตามเส้นรอบรูปของชิ้นงานทีละชั้น หลังจากตัดด้วยเลเซอร์แต่ละชั้นจะมีลูกกลิ้งร้อน (Heated bonding roller) กลิ้งทับแผ่นกระดาษดังกล่าวด้วยแรงกด เพื่อให้โพลีเอทิลีนบนกระดาษชั้นบนเปลี่ยนสภาพเป็นกาวยึดติดกับกระดาษชั้นล่าง หลังจากนั้นแผ่นชิ้นงานจะถูกเลื่อนต่ำลงเท่ากับความหนาของกระดาษ และกระดาษแผ่นใหม่จะถูกดึงมาวางเพื่อทำงานชั้นต่อไป

กรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM)

กรรมวิธีนี้ใช้วัตถุดิบแบบของแข็ง พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1988 โดย Scott Crump โดยใช้เส้นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นวัสดุที่ใช้สร้างต้นแบบ การทำงานจะเริ่มจากการออกแบบชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยคอมพิวเตอร์และแปลงไฟล์นามสกุล .STL แล้ว ไฟล์จะถูกแบ่งออกเป็นชั้น ๆ ตามภาคตัดขวางในแนวนอน เส้นวัสดุจะถูกดันเข้าสู่หัวฉีด (Nozzle) และจะถูกหลอมด้วยความร้อน จากนั้นจะถูกฉีดผ่านหัวฉีดโดยจะฉีดลงบนแท่นฐานรองรับชิ้นงานตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อทำงานเสร็จในแต่ละชั้น (layer) แท่นฐานรองรับชิ้นงานจะถูกเลื่อนต่ำลงเท่ากับความหนาของชั้น จากนั้นก็จะเริ่มทำงานใหม่ในชั้นต่อไป

กรรมวิธี Stereo Lithography Apparatus (SLA)

กรรมวิธีนี้ใช้วัตถุดิบแบบของเหลว พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1984 โดย Charles Hull และ Ray Freed หลักการทำงานของ SLA เริ่มจากการจุ่มแท่นรองรับชิ้นงานลงในอ่างบรรจุเรซินเหลวที่ไวต่อแสง (Photopolymer) โดยให้เรซินเหลวท่วมแท่นรองรับชิ้นงานสูงเท่ากับความหนาของ

ภาคตัดขวาง จากนั้นจะฉายลำแสงเลเซอร์อัลตราไวโอเลต (Ultra violet laser) ลงบนเรซินเหลวตามขอบของชิ้นงานก่อนและตามด้วยบริเวณของเนื้อชิ้นงาน ซึ่งบริเวณของเรซินที่ถูกฉายจะแข็งตัวขึ้น และแท่นรองจะเลื่อนต่ำลงเพื่อเริ่มทำงานในขั้นต่อไป

Solid Ground Curing (SGC)

กรรมวิธีนี้ใช้วัสดุตั้งต้นแบบของเหลว พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1984 โดยบริษัท Cubital, Ltd., มีหลักการทำงานคล้ายกับกรรมวิธี SLA จะแตกต่างกันที่กรรมวิธี SLA จะใช้ลำแสงเลเซอร์ แต่กรรมวิธีนี้จะใช้แสงอัลตราไวโอเลต (Ultra violet)

กรรมวิธี Selective Laser Sintering (SLS)

กรรมวิธีนี้ใช้วัสดุตั้งต้นแบบผง พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1986 โดย Carl Deckard มหาวิทยาลัย Texas Austin หลักการทำงานคือการใช้ลำแสงเลเซอร์อินฟราเรดที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2 laser) หลอมวัสดุผงให้เป็นรูปร่างชิ้นงาน วัสดุผงที่เก็บไว้ในกระบอกสูบจะถูกเพิ่มอุณหภูมิ แล้วถูกกลิ้งลงมายังกระบอกสูบที่ใช้สร้างชิ้นงาน ซึ่งถูกกลิ้งจะเกลี่ยทับผงวัสดุเป็นชั้นบาง ๆ สม่ำเสมอ จากนั้นจะฉายแสงเลเซอร์ลงบนผงวัสดุเพื่อหลอมอนุภาคผงวัสดุให้ติดกัน ในการทำงานขั้นต่อไปถูกสูบจะเลื่อนสูงขึ้นเริ่มทำงานในขั้นต่อไป

กรรมวิธี Electron Beam Melting (EBM)

กรรมวิธีนี้ใช้วัสดุตั้งต้นแบบผง พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1987 โดย Bill Masters โดยใช้หลักการเดียวกันกับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ต (ink-jet) วัสดุที่ใช้เป็นผงเทอร์โมพลาสติก หลักการทำงานเริ่มจากการหลอมผงพลาสติกให้เป็นของเหลวแล้วเชื่อมต่อกับหัวพ่น หัวพ่นจะใช้พ่นส่วนที่เป็นชิ้นงาน หัวพ่นนี้จะหยดวัสดุเหลวลงบนแท่นรองชิ้นงาน และจะแข็งตัวทันทีเมื่อสัมผัสกับแท่นรองชิ้นงาน เมื่อพ่นเสร็จในแต่ละชั้นจะใช้หัวกัดทำการกัดผิวหน้าให้ได้ความหนาสม่ำเสมอ เศษวัสดุจะถูกกำจัดออกโดยการเป่าลม ซึ่งจะทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ชิ้นงานสมบูรณ์

กรรมวิธี Three-Dimensional Printing (3DP)

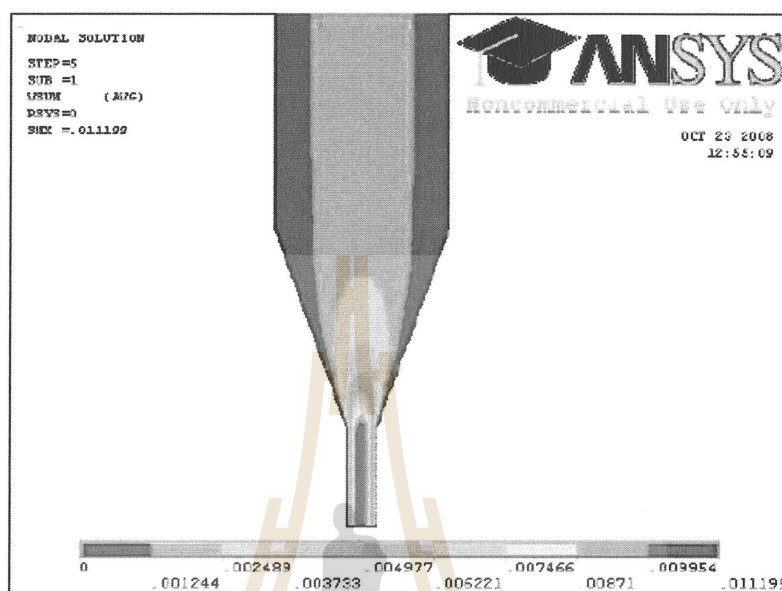
กรรมวิธีนี้ใช้วัสดุตั้งต้นแบบผง พัฒนาขึ้นโดย Massachusetts Institute of Technology (MIT) หลักการทำงานคล้ายกับ กรรมวิธี SLS เพียงแต่เปลี่ยนจากการใช้ลำแสงเลเซอร์มาเป็นการใช้หัวพ่นอิงค์เจ็ต ซึ่งจะพ่นสารยึดติดเหลวหรือกาวลงบนวัสดุผง ทำให้ผงวัสดุยึดติดกันตามแบบชิ้นงานที่ได้ออกแบบไว้ หัวพ่นจะมีหลายรูซึ่งสามารถควบคุมตำแหน่งการพ่นได้ หัวพ่นจะทำการพ่นตามภาคตัดขวาง เมื่อทำงานเสร็จในแต่ละชั้นถูกสูบจะเลื่อนลงเท่ากับความหนาของชั้น หลังจากได้ชิ้นงานสมบูรณ์ วัสดุผงที่ไม่โดนผงกาวจะถูกกำจัดออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 1.2 แสดงการแบ่งประเภทของเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว

ในปัจจุบันกรรมวิธีการสร้างต้นแบบรวดเร็วถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การสร้างชิ้นงานต้นแบบในงานอุตสาหกรรมการผลิต การสร้างชิ้นงานต้นแบบในงานสถาปัตยกรรม การสร้างชิ้นงานต้นแบบในอุตสาหกรรมเครื่องมือและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น (Chua C. K. et.al.,2010) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM) เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตชิ้นงานต้นแบบที่ต่ำเมื่อเทียบกับกรรมวิธีแบบอื่น (Lopez and Wright, 2002) จึงทำให้กรรมวิธี FDM มีพัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง มีเทคนิคและวิธีการที่ซับซ้อนขึ้นเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความหลากหลายและตอบสนองต่อความต้องการผู้ใช้งาน ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ ขึ้นมาใช้กันมากขึ้น ซึ่งแต่เดิมนั้นวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก เช่น ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene), PLA (Poly-Lactic Acid) และโพลิฟีนิลซัลโฟนาฟอสโฟริลเลต (Polyphenylene Sulfone) วัสดุเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดในการตอบสนองต่อความต้องการที่หลากหลาย ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุผสม (Composite Material) ขึ้นมาใช้กัน โดยมีการผสมวัสดุอื่น ๆ เพิ่มเข้าไป เช่น ผงเหล็ก (Iron), ผงทองแดง (Bronze) หรือ ผงปูน (Limestone) ลงในพลาสติก ทั้งนี้ก็เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการผสมวัสดุอื่น ๆ เพิ่มเข้าไปทำให้หัวฉีด (Nozzle) เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่ปลายทางออกของหัวฉีดจะมีค่าความเร็วของการไหล (Flow velocity) ที่สูงมาก ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะฉีดเส้นพลาสติกออกมาให้มีขนาดเส้นที่เล็ก (Mostafa Nikzad et.al.,2009) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของ Mostafa Nikzad (Mostafa Nikzad et.al., 2009) พบว่า ค่าความเร็วของการไหลบริเวณปลายทางออกจะมีค่าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมผงโลหะเข้าไปในเส้นพลาสติก ก็จะทำให้อนุภาคของผงเหล็ก (Metal particle) เกิดการเสียดสีกับบริเวณผิว

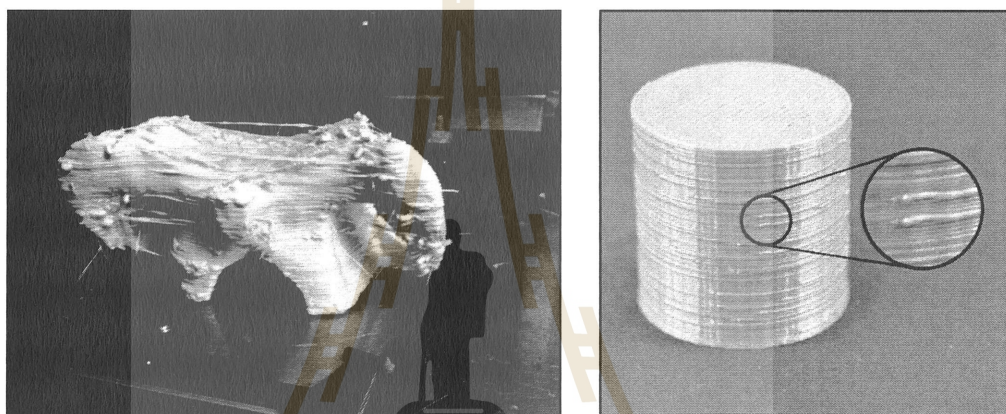
ของหัวฉีดจนเกิดการสึกหรอขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับการใช้เส้นวัสดุที่เป็นพลาสติกที่ไม่ผสมผงโลหะ



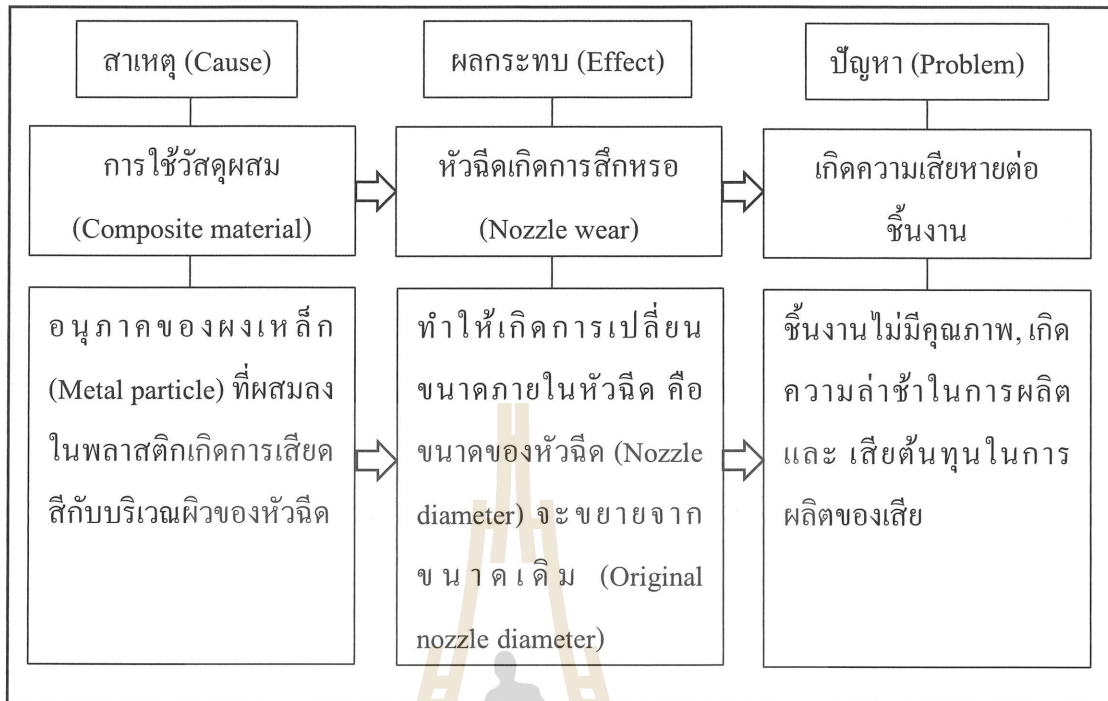
รูปที่ 1.3 แสดงค่า Flow velocity ที่บริเวณหัวฉีด (Nozzle) ที่มา: Mostafa Nikzad et.al., 2009

การสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดภายในของหัวฉีด คือขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter) จะขยายจากขนาดเดิม (Original diameter) ซึ่งมีผลมาจากค่าความเร็วของการไหล (Flow velocity) บริเวณปลายทางออกซึ่งมีค่าสูงจึงทำให้อนุภาคของผงเหล็ก (Metal particle) เกิดการเสียดสีกับบริเวณผิวของหัวฉีด อย่างไรก็ตามค่าความเร็วของการไหล มีความสัมพันธ์กับอัตราการป้อน (Feed Rate) เนื่องจากอัตราการป้อนจะเป็นตัวกำหนดค่าความเร็วของการไหล อัตราการป้อนคืออัตราระหว่างปริมาณวัสดุที่ถูกป้อนเข้าสู่หัวฉีดกับเวลา มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนให้สูงขึ้นค่าความเร็วของการไหล ก็จะสูงมากขึ้นตามไปด้วย (H. S. Ramanath, 2008) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานก็มีส่วนทำให้เกิดการสึกหรอได้เช่นกัน คือเมื่อหัวฉีดผ่านการใช้งานด้วยการฉีดวัสดุในปริมาณที่มาก หัวฉีดก็จะมีการสึกหรอที่มากตามไปด้วย (H. Brooks, 2012) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้วัสดุผสมจะพบการสึกหรอเกิดขึ้นเร็วกว่าการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยวัสดุพลาสติกอย่างเห็นได้ชัด (Mostafa Nikzad et.al., 2011) การสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นการสึกหรอที่ไม่สามารถสังเกตได้โดยตรง (Unobservable) เนื่องจากการสึกหรอนั้นจะเกิดขึ้นภายในหัวฉีด จะสังเกตได้ว่าการสึกหรอเกิดขึ้นก็เมื่อชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์งานเกิดความเสียหาย (Defect Product) การเสียหายนั้นจะมีลักษณะ

พิเศษที่เรียกว่า การเสียหายแบบ Fracture Surface (R.Van Weeren et.al., 2007) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งถือเป็นปัญหาสำคัญมากในการผลิตชิ้นงานจากวัสดุผสมด้วยกรรมวิธี FDM เนื่องจากผู้ใช้งานไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าชิ้นงานที่กำลังจะผลิตนั้นจะเกิดความเสียหายหรือไม่ และจะเกิดขึ้นเมื่อใด เมื่อชิ้นงานเกิดความเสียหายจะทำให้เกิดความล่าช้าในการผลิต เสียต้นทุนในการผลิตของเสีย จึงถือเป็นปัญหาด้านคุณภาพ และด้านต้นทุนอย่างหนึ่งของการใช้กรรมวิธีแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) ในการผลิตชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุ (Cause) ผลกระทบ (Effect) และปัญหา (Problem) ได้ดังรูป 1.5



รูปที่ 1.4 แสดงภาพชิ้นงานที่เกิด Defect แบบ Fracture Surface ที่มา: <http://3dprinting-blog.com/660-print-quality-troubleshooting-guide-by-simplify3d/>



รูปที่ 1.5 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุ (Cause) ผลกระทบ (Effect) และ
ปัญหา (Problem) ของกรรมวิธี FDM

จากอดีตในการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีแบบ FDM ผู้ใช้งานไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าชิ้นงานที่กำลังจะผลิตนั้นจะเกิดความเสียหายจากการสึกหรอของหัวฉีดหรือไม่ และจะเกิดขึ้นเมื่อใด เนื่องจากการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับหัวฉีดเป็นการสึกหรอที่ไม่สามารถสังเกตได้โดยตรง (Unobservable) จะสังเกตได้ว่ามีการสึกหรอเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นงานที่ผลิตได้นั้นตรวจพบความเสียหาย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (Volume of material) ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) เพื่อประมาณการสึกหรอของหัวฉีด โดยศึกษาการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) ใช้วัสดุผสมระหว่างพลาสติก PLA กับ ผงสเตนเลสสตีล (Stainless steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกผสมคือ 1.75 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด (Nozzle diameter) คือ 0.4 มม. ซึ่งในการวิจัยจะทำการทดลองตามปัจจัยและระดับปัจจัยที่สนใจนั้นคือ อัตราการป้อน (Feed Rate) และ ปริมาณของวัสดุ (Volume of material) จากนั้นจะทำการผ่าแนวตัดขวางหัวฉีด เพื่อทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ของหัวฉีดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้กล้อง

จุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) แล้วจึงวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวนทางสถิติ (Two-Way ANOVA) ด้วยโปรแกรม Minitab และวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate) ผลจากการวิจัยจะทำให้สามารถคาดการณ์การสึกหรอที่จะเกิดขึ้นกับหัวฉีดในการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีแบบ FDM ได้ ด้วยการคำนวณอัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (Volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยมีขอบเขตดังนี้

1.3.1 ชิ้นงานต้นแบบขึ้นรูปใช้เครื่องผลิตชิ้นงาน 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) รุ่น Inventor – 3D (ของ Innovation Experiment Co., Ltd.)

1.3.2 ชิ้นงานต้นแบบขึ้นรูปโดยใช้เส้นวัสดุ PLA ผสมผงสแตนเลสสตีล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มม.

1.3.3 ชิ้นงานต้นแบบขึ้นรูปโดยใช้หัวฉีด (Nozzle) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 มม.

1.3.4 สร้างชิ้นงานต้นแบบจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (3D CAD model) ด้วยโปรแกรม CURA และนำเข้าแบบจำลองไฟล์ G-Code นามสกุล .STL

1.3.5 ปัจจัยในการทดลอง 2 ปัจจัย เป็นตัวแปรต้น คือ

1.3.5.1 อัตราการป้อน (Feed rate) ที่ระดับ 25 mm/s 50mm/s 75mm/s และ 100 mm/s

1.3.5.2 ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ที่ระดับ 125 กรัม 250 กรัม 375 กรัม และ 500 กรัม

1.3.6 ตัวแปรตาม 1 ตัวแปร คือ

1.3.6.1 ขนาดของหัวฉีดที่ผ่านการใช้งาน (Nozzle diameter after print)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถวิเคราะห์การสึกหรอของหัวฉีดได้ด้วยการคำนวณอัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate) ทำให้ผู้ใช้งานสามารถคาดการณ์การสึกหรอที่จะเกิดขึ้นกับหัวฉีดในการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีแบบ FDM ได้ ซึ่งจะลดปัญหาการผลิตชิ้นงานเสียที่เกิดจากความเสียหายจากการ

สิทธิของหัวหน้า และลดต้นทุนในการผลิตของเสีย ที่จากเดิมนั้นไม่สามารถคาดการณ์และสังเกต
ได้



บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้นำเสนอวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องซึ่งจะประกอบด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับหลักการทำงาน องค์ประกอบ ประเภท และวัสดุที่ใช้ในการผลิตของเครื่องผลิตชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM), คุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการผลิตด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM), เครื่องมือและซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง และทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

2.1 หลักการทำงาน องค์ประกอบ ประเภท และวัสดุที่ใช้ในการผลิตของเครื่องผลิตชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM)

2.1.1 การทำงานทั่วไปของเครื่องผลิตงาน 3 มิติ ด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling

กรรมวิธีนี้พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1988 โดย Scott Crump การทำงานจะเริ่มจากการออกแบบชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยคอมพิวเตอร์และแปลงไฟล์นามสกุล .STL แล้ว ไฟล์จะถูกแบ่งออกเป็นชั้น ๆ ตามภาคตัดขวางในแนวนอน เส้นวัสดุ จะถูกดันเข้าสู่หัวฉีด (Nozzle) และจะถูกหลอมด้วยความร้อน จากนั้นจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด โดยจะฉีดลงบนแท่นฐานรองชิ้นงานตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อทำงานเสร็จในแต่ละชั้น (layer) แท่นฐานรองชิ้นงานจะถูกเลื่อนต่ำลงเท่ากับความหนาของชั้น จากนั้นก็จะเริ่มทำงานใหม่ในชั้นต่อไป ข้อดีของกรรมวิธีนี้คือสามารถใช้วัสดุได้หลากหลาย เป็นวิธีที่ประหยัด ไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดชิ้นงาน และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีผิวบางหรือชิ้นงานที่มีความเป็นโพรงได้ แต่ข้อเสียคือ จำเป็นต้องสร้างโครงสร้างค้ำยัน (Support structure) ซึ่งนับเป็นต้นทุนอย่างหนึ่งในการผลิตชิ้นงาน

กรรมวิธีการผลิตชิ้นงาน 3 มิติ แบบ FDM จะใช้วัสดุในการผลิตชิ้นงานเป็นเส้นพลาสติก (Plastic filament) หรือเส้นพลาสติกผสม (Composite material filament) ในการผลิตชิ้นงาน จะเริ่มตั้งแต่การออกแบบชิ้นงานในคอมพิวเตอร์ (Computer Aided Design, CAD) และได้ไฟล์ชิ้นงานในนามสกุล StereoLithography หรือ .STL จากนั้นจะใช้โปรแกรมเพื่อทำการแบ่งชั้น

ชิ้นงาน (Slicing) ออกเป็นชั้นบาง ๆ (Layer) แล้วตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไฟล์ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเป็นไฟล์คำสั่ง GCode (Machine language format) โดยโปรแกรมสำหรับการสร้าง GCode นั้นมีให้เลือกใช้งานหลากหลาย เช่น Cura, Simplify3D, MakerWare, Slic3r, Repetier เป็นต้น เมื่อดำเนินการแล้วเสร็จจึงป้อนไฟล์เข้าสู่เครื่อง FDM เพื่อทำการผลิตชิ้นงาน 3 มิติต่อไป ดังแสดงในรูป 2.1 หลักการทำงานของกรรมวิธี FDM คือการ ฉีดและวาดเส้นพลาสติกออกมาเป็นวัตถุ ส่วนของหัวฉีด (Nozzle) ทำหน้าที่ฉีดเส้นพลาสติกออกมา ส่วนของหัวฉีดจะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับการทำงานของเครื่องซีเอ็นซี (CNC) ซึ่งมีการระบุพิกัดเป็น แนวแกน X, Y และ Z โดยที่หัวฉีดจะมีฮีทเตอร์ทำความร้อนให้ถึงจุดที่เส้นพลาสติกที่มีสถานะเป็นของแข็งละลายและเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวแล้วจึงฉีดผ่านหัวฉีดออกมา มีมอเตอร์สำหรับควบคุมหัวฉีด และฐานพิมพ์ให้เคลื่อนที่ ซึ่งโดยปกติจะใช้มอเตอร์ 4 ตัวในการควบคุมการทำงานคือ 3 ตัวสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z และ 1 ตัวสำหรับควบคุมการป้อนวัสดุเข้าหัวฉีด การพิมพ์งานจะพิมพ์ไปที่ละชั้นจนออกมาเป็นชิ้นงานขึ้นรูป เครื่องจะรับได้เฉพาะไฟล์งานในคำสั่ง GCode ที่ผ่านการแบ่งชั้นชิ้นงานและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาแล้วเท่านั้น





รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการทำงานของกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM)

2.1.1.1 องค์ประกอบหลักของเครื่องผลิตงาน 3 มิติแบบ Fused Deposition

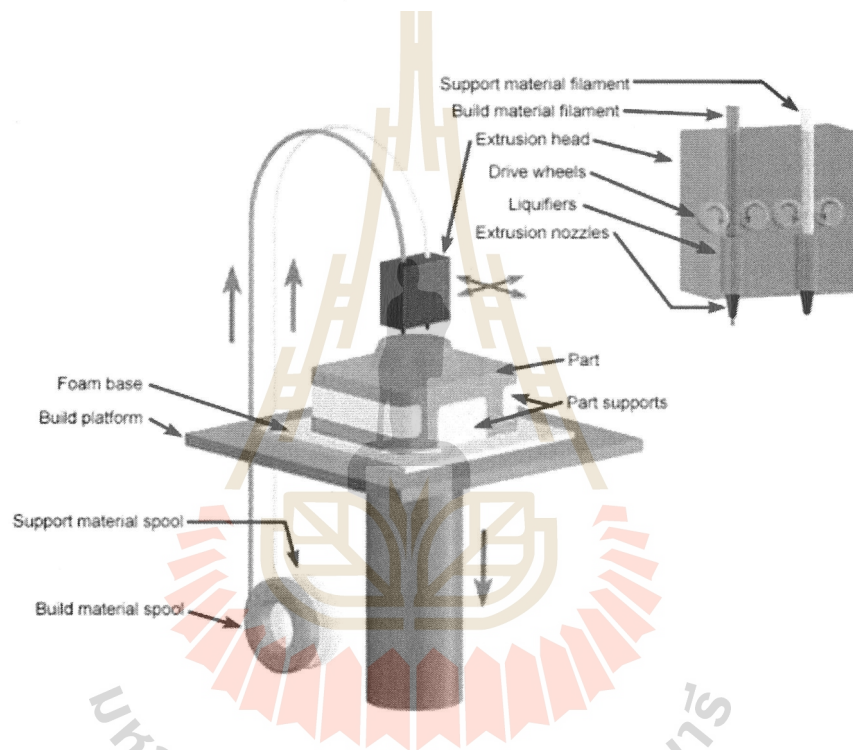
Modeling

องค์ประกอบหลักของเครื่อง FDM ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดง

ในรูป 2.2

- เส้นวัสดุสำหรับฉีดส่วนรองรับ (Support material filament)
- เส้นวัสดุสำหรับฉีดชิ้นงาน (Build material filament)
- หัวป้อนวัสดุ (Extrusion head)
- ล้อขับเคลื่อนวัสดุ (Drive wheels)
- ฉนวนกันความร้อน (Liquefiers)

- หัวฉีด (Extrusion nozzle)
- แผ่นรองฐาน (Foam base)
- โครงสร้างหลักของฐานรองรับชิ้นงาน (Build platform)
- ม้วนของวัสดุสำหรับฉีดส่วนรองรับ (Support material spool)
- ม้วนของวัสดุสำหรับฉีดชิ้นงาน (Build material spool)
- ชิ้นงาน (Part)
- ส่วนของวัสดุที่รองรับชิ้นงาน (Part support)



รูปที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของเครื่องผลิตงาน 3 มิติแบบ Fused Deposition

Modeling (FDM) (ปริญญา และคณะ, 2551)

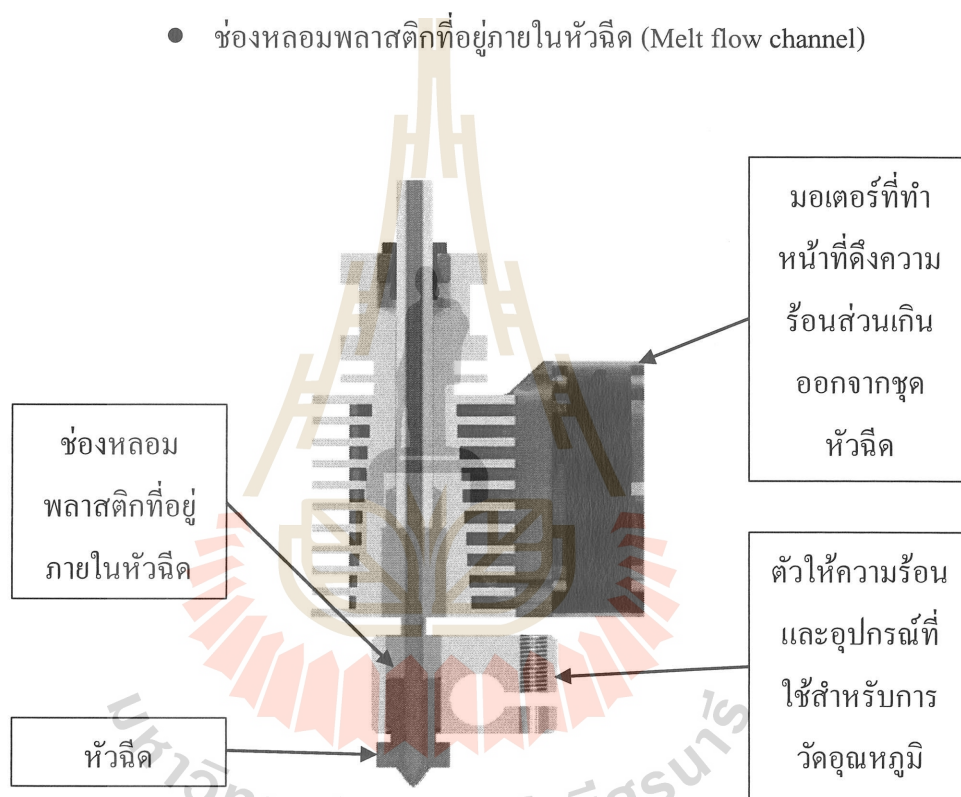
2.1.1.2 องค์ประกอบของชุดหัวฉีดของเครื่องผลิตงาน 3 มิติแบบ Fused

Deposition Modeling (FDM)

ชุดหัวฉีดนับเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งของเครื่อง FDM เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำหน้าที่หลอมเส้นวัสดุเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน โดยทั่วไปชุดหัวฉีดของเครื่อง FDM จะมีแค่ชุดเดียว แต่ในเครื่องบางรุ่นจะมีชุดหัวฉีด 2 ชุด โดยหัวฉีดแต่ละชุดจะทำหน้าที่แยกกัน คือ 1 ชุดใช้สำหรับ

การสร้างชิ้นงาน และอีก 1 ชุดใช้สำหรับการสร้างโครงสร้างค้ำยัน ซึ่งองค์ประกอบหลักของชุดหัวฉีดของเครื่อง FDM จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ แสดงในรูป 2.3

- มอเตอร์ที่ทำหน้าที่ดึงความร้อนส่วนเกินออกจากชุดหัวฉีด (Fan motor) เป็นส่วนสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิของการทำงานให้คงที่
- หัวฉีด (Nozzle) ทำหน้าที่ฉีดเส้นวัสดุ
- ตัวให้ความร้อนและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิ (Liquefier with heater and thermocouples)
- ช่องหลอมพลาสติกที่อยู่ภายในหัวฉีด (Melt flow channel)



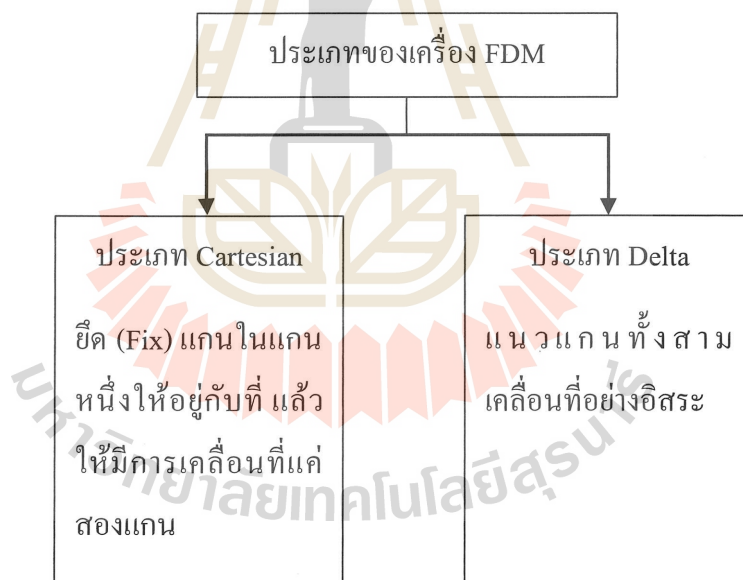
รูปที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบของชุดหัวฉีดของเครื่องผลิตงาน 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM)

2.1.1.3 ประเภทของเครื่องผลิตชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM)

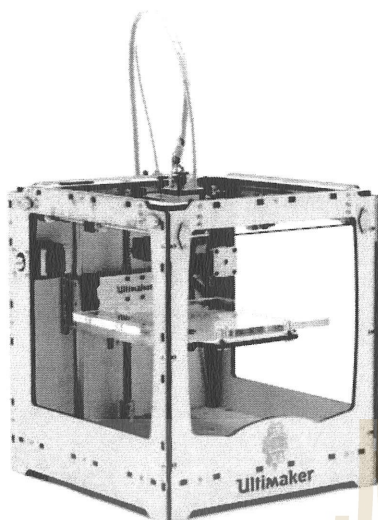
โดยทั่วไปแล้วเครื่อง FDM จะมีการแบ่งประเภทออกเป็น 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของแนวแกน ดังนี้

1. **ประเภท Cartesian** เป็นเครื่องผลิตชิ้นงานที่พบเห็นทั่วไปในท้องตลาด เครื่องจะทำงานโดยการยึด (Fix) แกนในแกนหนึ่งให้อยู่กับที่ แล้วให้มีการเคลื่อนที่เฉพาะหัวฉีด ตัวอย่างที่พบเห็นได้ง่ายที่สุดคือยี่ห้อ MakerBot หรือ Ultimaker มีการยึดการเคลื่อนที่ของหัวฉีดในแกน X และ Y เท่านั้น คือวิ่งได้ซ้ายขวาและหน้าหลัง ส่วนฐานพิมพ์นั้นจะเคลื่อนที่ใน แกนแนว Z คือเคลื่อนที่ขึ้นลง เครื่องผลิตชิ้นงานอีกแบบที่ได้รับความนิยมเช่นเดียวกันคือ เครื่อง PRUSA หรือเครื่องแบบ REPRAP ซึ่งจะมี การเคลื่อนที่ของหัวฉีดในแนวแกน X คือซ้ายขวา และฐานพิมพ์ในแกน Y คือ หน้าหลัง เมื่อพิมพ์เสร็จในชั้นหนึ่งแล้ว เครื่องจะยกหัวฉีดทั้งหมดขึ้นในแนวแกน Z เพื่อพิมพ์ในชั้นต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก

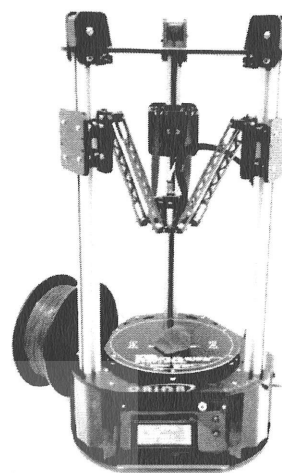
2. **ประเภท Delta** เครื่องผลิตชิ้นงานประเภทนี้มีจุดสังเกตได้ง่ายที่สุดคือ มีแกนเสาอยู่ 3 เสา เครื่อง Delta นั้นจะมี ฐานพิมพ์อยู่กับที่ หัวฉีดจะเคลื่อนที่อย่างอิสระทั้งสามแกน โดยควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวฉีดด้วยการทำงานที่สัมพันธ์กันของมอเตอร์ทั้งสามตัว เครื่องประเภทนี้สามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่่มาก ๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ข



รูปที่ 2.4 ประเภทของเครื่อง FDM



ก) เครื่อง FDM 3D ประเภท Cartesian



ข) เครื่อง FDM 3D ชนิด Delta

รูปที่ 2.5 แสดงประเภทของเครื่อง FDM ที่มา: www.print3dd.com

2.1.1.4 วัสดุที่ใช้ในการผลิตงาน 3 มิติ ด้วยกระบวนการ Fused Deposition

Modeling

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่ใช้ในงาน FDM จะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน วัสดุที่ใช้จะถูกแปรรูปให้เป็นเส้น (Filament) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เนื่องจากผู้ผลิตเส้นวัสดุต้องการให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานกับเครื่อง FDM ทั่วไปได้ และวัสดุที่ใช้งานกันทั่วไปจะมีอยู่ 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้

1. ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เกิดจากการทำปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ของโมโนเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีน (styrene) อะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile) และโพลิบิวทาไดอีน (polybutadiene) ซึ่งโพลิเมอร์ที่ได้จากโมโนเมอร์ 3 ชนิดเรียกว่า เทอร์โพลิเมอร์ (terpolymer) โมโนเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบสังเคราะห์ ABS ขึ้นมานั้น ล้วนมีผลต่อสมบัติของพลาสติกทั้งสิ้น อะคริโลไนไตรล์มีผลต่อสมบัติการทนความร้อนและสารเคมี บิวทาไดอีนมีผลต่อสมบัติความทนทานต่อแรงกระแทก (impact strength) และสไตรีนมีผลทำให้พลาสติกมีพื้นผิวเป็นมันเงา ซึ่งอัตราส่วนผสมของสารทั้ง 3 ชนิด สามารถปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ พลาสติก ABS ตัดแต่งวัสดุได้ง่าย และมีราคาต่ำเมื่อเทียบกับพลาสติกแบบอื่น ๆ มีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพอากาศ ยืดหยุ่น แข็งแรงทนทาน ทำให้ขึ้นรูปง่าย แต่เนื่องจากมีลักษณะหนืด เวลาถูกฉีดออกจากหัวฉีด จะมีความโค้งมน ขอบชิ้นงานจะไม่คมสวย (J. M. Aremas et.al., 2012)

2. PLA (Poly-Lactic Acid) เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) แบบหนึ่งเช่นกัน แต่ได้มาจากส่วนผสมของวัตถุดิบทางธรรมชาติ เป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) สามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน ผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) โดยส่วนใหญ่ผลิตมาจากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยจะบดหรือโม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้งแล้วใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคส ผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) โดยใช้แบคทีเรียแลคโตบาซิลลัสแบรวิส (*Lactobacillus brevis*) ได้ผลผลิตเป็น กรดแลคติก (Lactic acid) ผ่านกระบวนการทางเคมีได้แลคไทด์ (Lactide) มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) กลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นโพลิเมอร์ ซึ่งสามารถหลอมละลายเปลี่ยนรูปร่างได้ในความร้อน จุดเด่นของพลาสติก PLA คือ มีลักษณะใส และเงา แต่เนื่องจากมีส่วนผสมของวัตถุดิบทางธรรมชาติจึงไม่แข็งแรงเท่าพลาสติก ABS (J. M. Aremas et.al., 2012)

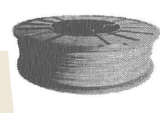
3. วัสดุผสม (Composite Material) คือวัสดุที่ถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะงาน โดยการผสมกันนั้นไม่ได้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การผสมกันของวัสดุเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันแต่จะแยกกันเป็นเฟสที่เห็นได้อย่างเด่นชัด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (Matrix) ซึ่งจะอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสซึ่งเรียกว่า เฟสที่กระจาย หรือ ตัวเสริมแรง (Reinforcement) คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเป็นฟังก์ชันหรือขึ้นกันกับคุณสมบัติและปริมาณของสารตั้งต้นเหล่านี้ และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัววัสดุผสมสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้

- วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced)
- วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-reinforced)
- วัสดุผสมโครงสร้าง (Structural)

สำหรับวัสดุผสมที่ใช้ในการผลิตงาน 3 มิติ ด้วยกรรมวิธี FDM ส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มวัสดุที่เสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle reinforced) คือประกอบด้วยเนื้อพื้นที่เป็นเนื้อเดียวกันต่อเนื่องกันและมีการเสริมแรงและเพิ่มสมบัติให้กับเนื้อพื้นด้วยการเติมสารเสริมแรงแบบเม็ดผงวัสดุ การเติมผงวัสดุต่าง ๆ ลงในพลาสติกเช่น ผสมผงเหล็ก (Iron), ผงทองแดง (Copper), สัมฤทธิ์ (Bronze), ผงเหล็ก (Stainless steel) หรือ ผงปูน (Limestone) เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้จากการผลิตงาน 3 มิติ มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานที่หลากหลาย (L. Li, Q. et.al., 2002)

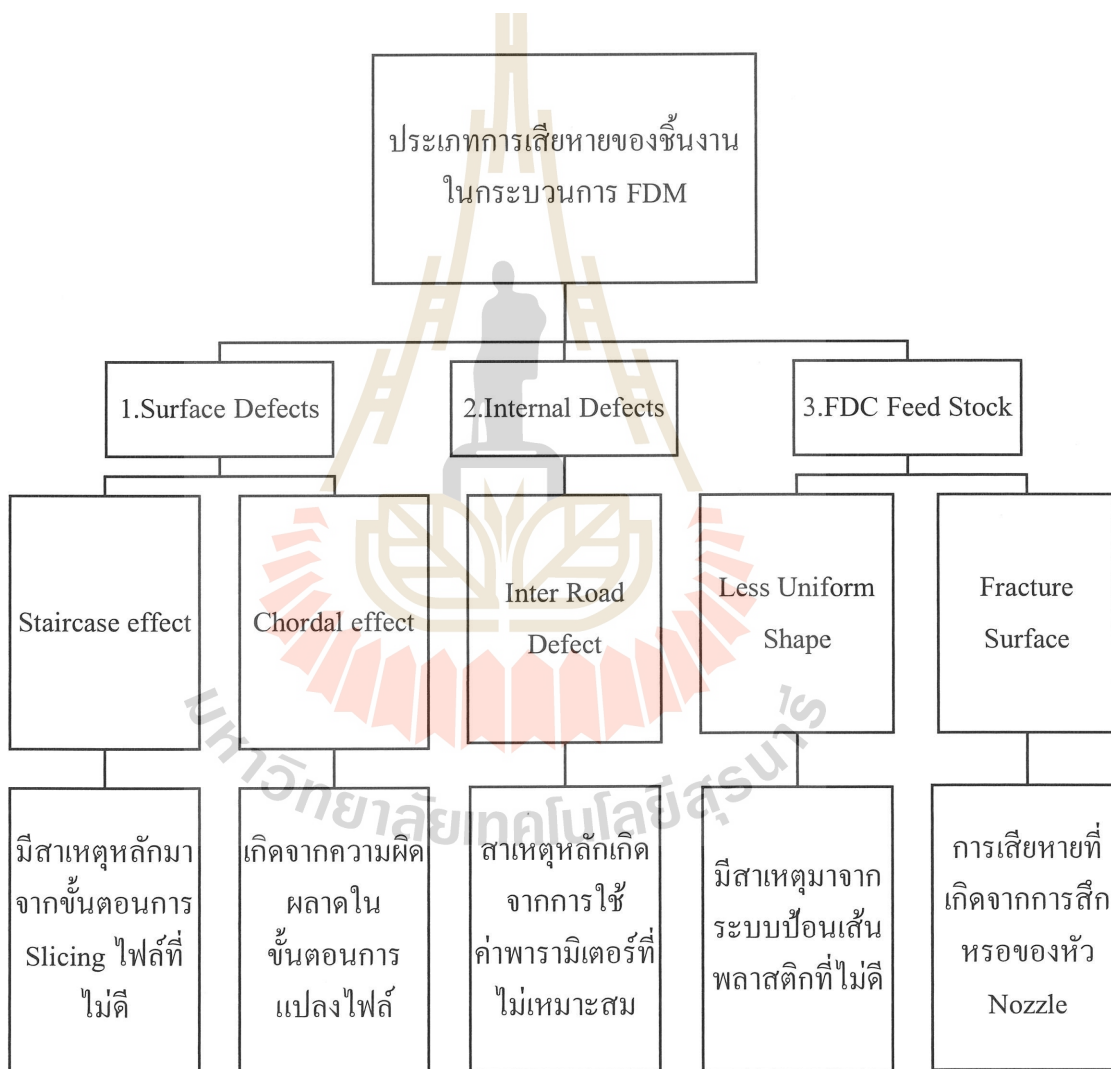
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตงาน 3 มิติ ด้วยกระบวนการ FDM

ที่มา: <https://all3dp.com/pla-abs-3d-printer-filaments-compared>

คุณสมบัติ (properties)	เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)		พลาสติกผสม (Plastic - composite material)		
	เส้น พลาสติก ABS	เส้นพลาสติก PLA	เส้นพลาสติก ผสมสแตน เลสสตีล	เส้นพลาสติก ผสมคาร์บอนไฟเบอร์	เส้นพลาสติก ผสม ผงทองแดง
					
อุณหภูมิ เปลี่ยน สถานะคล้าย แก้ว (Glass transition temperature)	105°C	60-65°C	110°C	100-110°C	100-110°C
Melt volume index (MVI)	9.7cm ³ /10min	10.3 cm ³ /10min	8.3cm ³ /10min	9.0cm ³ /10min	9.5cm ³ /10min
อุณหภูมิใน การพิมพ์ ชิ้นงาน (Printing temperature)	210-250°C	190-220°C	220-250°C	210-220°C	210-220°C
ความยืดหยุ่น (Flexibility)	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
ความแข็งแรง (Strength)	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	สูง	สูง

2.2 ปัญหาคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการผลิตด้วยเครื่องผลิตชิ้นงาน 3 มิติ ด้วย กรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM)

ปัญหาคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM) ได้มีการแบ่งประเภทความเสียหายและสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายโดยแบ่งจากลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนวัตถุหรือชิ้นงาน ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนภูมิการแบ่งประเภทการเสียหายของชิ้นงานในกรรมวิธี FDM ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของการเสียหายได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ (R.Van Weeren et.al.,2007)



รูปที่ 2.6 แสดงแผนภูมิการแบ่งประเภทการเสียหายของชิ้นงานในกระบวนการ FDM

Surface Defects แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Staircase effect และ Chordal effect การเสียหายแบบ Staircase effect มีสาเหตุหลักมาจากการขั้นตอนการแบ่งชั้น (Slicing) ไฟล์ที่ไม่ดี ส่วนการเสียหายแบบ Chordal effect เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการแปลงไฟล์ให้อยู่ในนามสกุล Stereo Lithography หรือ .stl ลักษณะของการเสียหายจะเกิดที่บริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.7

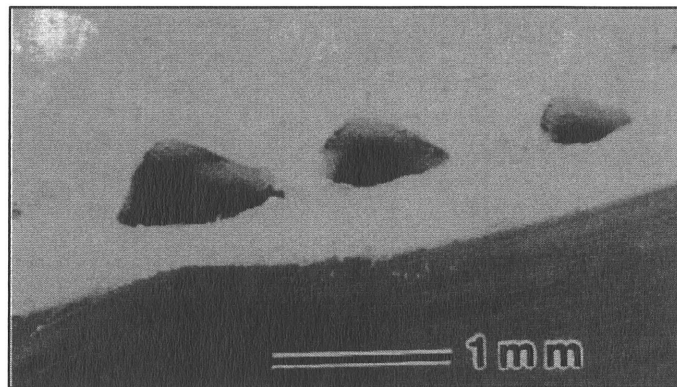
Internal Defects ความเสียหายในลักษณะนี้จะเรียกว่า Inter Road Defect สาเหตุหลักเกิดจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม และไม่สอดคล้องกันระหว่างซอฟต์แวร์ (Software) และฮาร์ดแวร์ (Hardware) ทำให้เกิดการเสียหายภายในของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.8

FDC Feed Stock แบ่งออกเป็นใน 2 ชนิด คือ Less Uniform Shape และ Fracture Surface ซึ่งการเสียหายแบบ Less Uniform จะมีสาเหตุมาจากระบบป้อนเส้นพลาสติกที่ไม่ดี ส่วน Fracture Surface เป็นการเสียหายที่เกิดจากการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

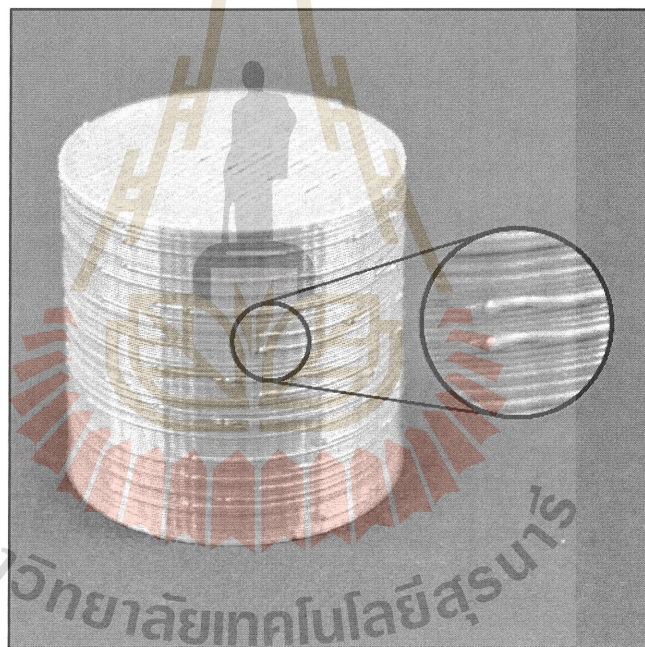


รูปที่ 2.7 แสดงการเสียหายประเภท Surface Defects ลักษณะการเสียหายชนิด Staircase effect

ที่มา: <http://3dprinting-blog.com/660-print-quality-troubleshooting-guide>



รูปที่ 2.8 แสดงการเสียหายประเภท Internal Defects ลักษณะการเสียหายชนิด Inter Road Defect
ที่มา: R. Van Weeren et.al., 2007.



รูปที่ 2.9 แสดงการเสียหายประเภท FDC Feed Stock ลักษณะการเสียหายชนิด Fracture Surface
ที่มา: <http://3dprinting-blog.com/660-print-quality-troubleshooting-guide>

2.3 เครื่องจักร เครื่องมือ และซอฟต์แวร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

2.3.1 เครื่องกัด (Milling Machine)

เครื่องกัด (Milling machine) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นเครื่องจักรกลที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในการแปรรูปวัสดุให้เป็นชิ้นงาน การทำงานของเครื่องกัด (Milling operation) ผู้ผลิตจะ

ออกแบบมาให้เหมาะสมกับความต้องการของการใช้งาน โดยยึดถือความสะดวกในการทำงานและประโยชน์การใช้งานเป็นหลัก ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลักดังนี้ 1) ชนิดของเครื่องกัด 2) ชนิดของมีดกัด และ 3) อุปกรณ์ช่วยจับและอุปกรณ์ช่วยงานพิเศษต่าง ๆ นอกจากนี้ยังสามารถแยกเป็นลักษณะงานได้ดังนี้

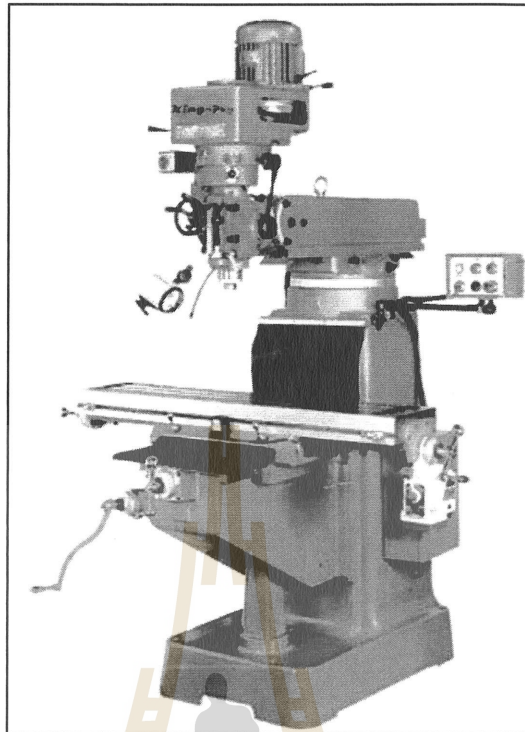
งานผิวราบ (horizontal surface) ได้แก่

- งานกัดผิวราบ
- งานกัดผิวตั้งฉาก
- งานกัดผิวเอียง

งานขึ้นรูปผิวแบบต่าง ๆ (forming machine) ได้แก่

- ร่องลิ่ม
- ร่องตัวที
- ร่องหางเหยี่ยว

ลักษณะโต๊ะงานสามารถปรับเป็นมุมในแนวราบได้ ± 45 องศา นอกจากใช้กัดงานแล้วยังนิยมใช้มาร์ค (Mark) ขึ้นงานได้ด้วย เครื่องกัดที่มีโต๊ะงานเป็นรูปวงกลมหมุนได้ในแนวระดับ เป็นเครื่องกัดแบบยูนิเวอร์แซล การกัดแบบดาวน์คัท (down cut) เป็นที่นิยมมากกว่าการกัดแบบอัปคัท (Up cut) เพราะทิศทางการหมุนของใบมีดกับทิศทางการป้อนวัสดุไปในทิศทางเดียวกันแรงกระแทกชิ้นงานกดลงด้านล่าง จึงทำให้ยึดชิ้นงานง่ายขึ้น ใบมีดมีอายุมากขึ้น แรงที่ใช้ในการกัดน้อยลง แต่การกัดแบบนี้เครื่องกัดควรจะมีการป้องกันการถอยของสกรูขับเคลื่อน มีดกัดด้านข้าง (Side cutter) จะมีฟันอยู่โดยรอบ รูปร่างของคมตัดมี 3 แบบ คือ คมกัดปกติ คมกัดหยาบ และคมกัดแบบสับหลัก ส่วนชนิดของฟันกัดมี 2 ชนิดคือชนิดฟันตรงกับชนิดฟันเฉียง (ไม่ใช่คมกัดแบบปกติกับคมกัดหยาบ) ตามมาตรฐาน JIS. มีดกัดซีเมนต์คาร์ไบด์ ถ้ามีค่าหมายเลขการใช้งานมากขึ้น แสดงว่ามีค่าความแข็งแรงมากขึ้น ถ้ากัดงานแล้วมีการตกระเด็นได้ง่ายก็ให้เลือกใช้เบอร์ที่สูงขึ้น ส่วนใบมีดกัดไฮสปีดสตีล (high speed steel) ที่มีการเคลือบด้วย TiC หรือ Al_2O_3 จะมีอายุการใช้งานนานกว่ามีดกัดที่ไม่ได้เคลือบ รอยกัดที่เกิดจากการหมุน (rotation mark) คือรอยที่มีดกัดหมุนไป 1 รอบ แล้วเหลือให้เห็นเป็นรอยเว้าแหว่ง (ไม่ใช่รอยที่เกิดจากฟันกัดแต่ละฟัน) ถ้าเป็นรอยที่เกิดจากฟันตัดแต่ละฟันเรียกว่ารอยฟันตัด (cutter Mark) (<http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/14.pdf>)



รูปที่ 2.10 เครื่องกัด (Milling machine)

2.3.2 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscope)



รูปที่ 2.11 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscope)

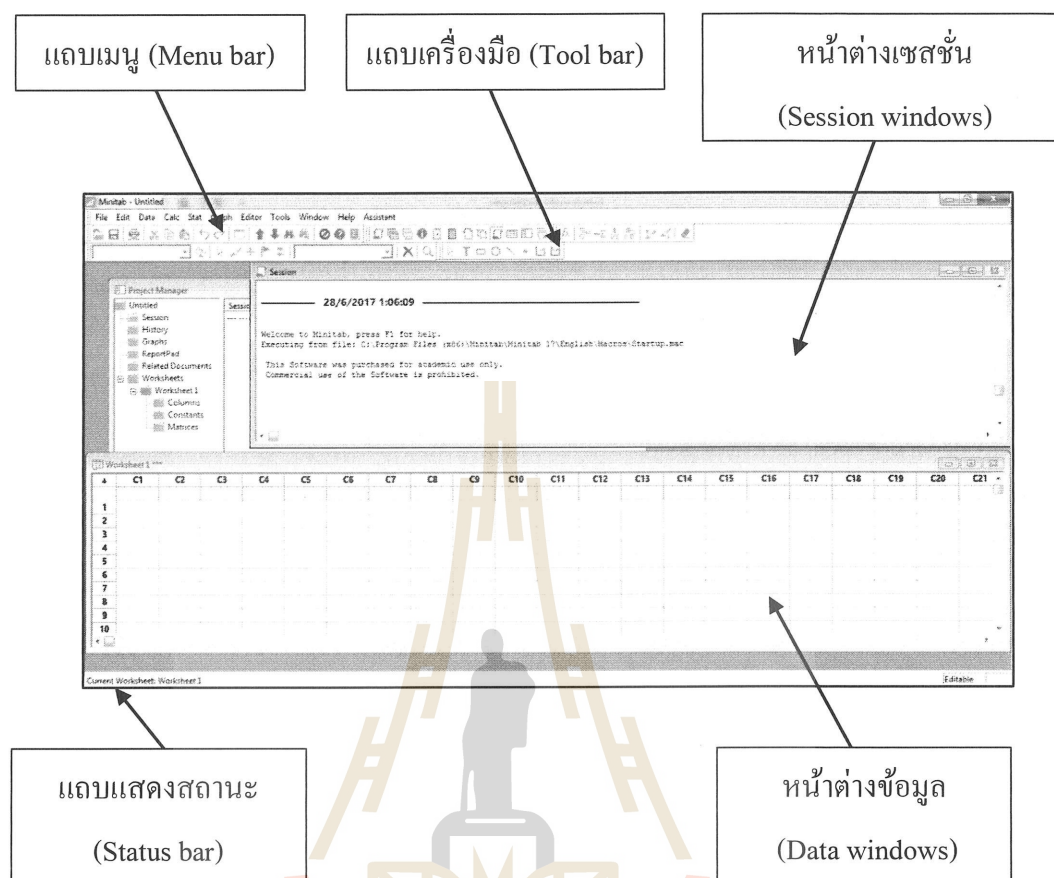
กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital Microscope) ดังรูปที่ 2.11 คือ กล้องจุลทรรศน์พร้อมกล้องดิจิทัล โดยสามารถสังเกตตัวอย่างผ่านทางคอมพิวเตอร์ กล้องจุลทรรศน์แบบนี้เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลจึงช่วยให้การวิเคราะห์ที่ตีความของกล้องจุลทรรศน์ปกติ เนื่องจากสามารถใช้ถ่ายภาพ วัตถุ และวิเคราะห์ได้ในการทำงานครั้งเดียว หลักการทำงานจะใช้เลนส์ (Lens) และกล้องดิจิทัล (Digital camera) เพื่อการส่งรูปภาพไปยังจอมอนิเตอร์ (Monitor) โดยทำงานผ่านซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลมักจะมีแหล่งกำเนิดแสงของตัวเองในการสร้างแหล่งกำเนิดแสงจะใช้หลอดแอลอีดี (LED) (<http://www.siamic-elec.com/product/usb-microscope-500x>)

2.3.3 ซอฟต์แวร์วิเคราะห์และประมวลผลทางสถิติ Minitab

โปรแกรม Minitab เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ประมวลผลข้อมูลทางด้านสถิติ โดยพัฒนาจากกลุ่มนักวิชาการทางด้านสถิติ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551) โปรแกรม Minitab เข้ามามีบทบาทสำหรับผู้สถิติในส่วนของ การประมวลผลและการแสดงผลข้อมูลในลักษณะของตัวเลขและผลในลักษณะของกราฟ ประกอบกับเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาและมีบทบาทต่อชีวิตประจำวัน ดังนั้น Minitab จึงถูกเลือกใช้ด้วยเหตุผลหลัก 3 ประการ คือ

- ความซับซ้อนในการประมวลผล (Complexity)
- ความเที่ยงตรงและแม่นยำในการประมวลผลข้อมูล (Accuracy)
- ความรวดเร็วและความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

โปรแกรม Minitab เป็นโปรแกรมที่มีความโดดเด่นในด้านการใช้งานที่ง่ายและมีการพัฒนาปรับปรุงฟังก์ชันต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับความรู้และทฤษฎีใหม่ ๆ รวมถึงการประยุกต์ทางด้านสถิติ โดยเฉพาะในงานด้านคุณภาพอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น โปรแกรม Minitab จึงเป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดีสำหรับกลุ่มผู้ที่พัฒนาปรับปรุงคุณภาพด้วยหลักการ ซิกซ์ ซิกม่า (6-sigma) เนื่องจากโปรแกรม Minitab เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับกลุ่มผู้ใช้กลุ่มนี้ แต่ไม่ได้หมายความว่าเฉพาะกลุ่มผู้ใช้กลุ่มนี้เท่านั้น โปรแกรม Minitab ยังเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิชาการ นักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ และผู้ใช้สถิติทั่วไป ถึงแม้ว่าโปรแกรม Minitab จะเป็นโปรแกรมที่ช่วยในการทำงานของเราสะดวกขึ้นมาก แต่ความรู้ความเข้าใจในการทำงานของโปรแกรมก็ยังเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้ใช้อยู่เสมอ ซึ่งภาพรวมของโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพรวมของโปรแกรม Minitab

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม Minitab

โดยทั่วไปสามารถแบ่งขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเปิดใช้งานโปรแกรมและเข้าสู่การทำงานบนแฟ้มงาน ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนเริ่มแรกเป็นการเปิดโปรแกรมเพื่อเริ่มต้นเข้าสู่การทำงานบนแฟ้มงาน

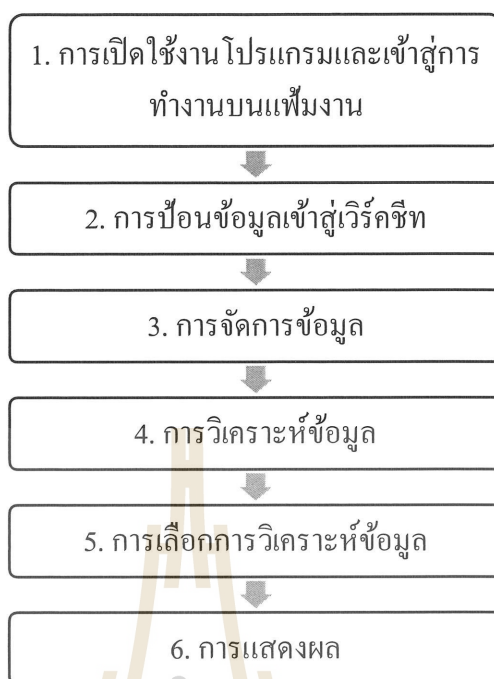
ขั้นตอนที่ 2 การป้อนข้อมูลเข้าสู่เวิร์คชีต เป็นขั้นตอนในการป้อนข้อมูลเข้าสู่เวิร์คชีต เนื่องจากโปรแกรม Minitab เป็นโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล ดังนั้นเมื่อเราเปิดแฟ้มงานแล้วสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับการใช้งานโปรแกรมคือ ข้อมูลซึ่งจะเป็นการป้อนจากแป้นพิมพ์ การนำข้อมูลจากฐานข้อมูลชนิดอื่น เช่น Excel, Access หรือ Text เป็นต้นหรือการเปิดจากไฟล์เวิร์คชีตของ Minitab ก็แล้วแต่ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ใช้เอง

ขั้นตอนที่ 3 การจัดการข้อมูล เป็นส่วนการจัดการข้อมูลเป็นขั้นตอนที่สามารถข้ามไปยังขั้นตอนต่อไปได้ ถ้าหากว่าข้อมูลที่อยู่ในเวิร์คชีทมีความพร้อมและอยู่ในรูปแบบที่ถูกต้องสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab แต่ถ้าหากไม่เราจำเป็นต้องจัดการข้อมูลดังกล่าวก่อนอาจใช้ฟังก์ชันที่มีใน Minitab หรือการจัดการจากโปรแกรมอื่นก่อนนำเข้าสู่เวิร์คชีทใน Minitab ก็ได้แล้วแต่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัญหาและประสบการณ์ในการจัดการข้อมูลของผู้ใช้งาน โปรแกรม ตัวอย่างขั้นตอนนี้ คือ การรวมข้อมูล (Stack) การเปลี่ยนทิศทางตารางข้อมูล (Transpose Data) การคำนวณข้อมูล (Calculate) การสร้างชุดข้อมูลย่อย (Subset) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูล เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ทางสถิติโดยเราจะเลือกฟังก์ชันหรือตัวสถิติที่เราจะทำการวิเคราะห์ เช่น การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) การออกแบบการทดลอง (DOE) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 5 การเลือกการวิเคราะห์ข้อมูล เป็นส่วนในรายละเอียดของการวิเคราะห์ใดๆที่เราเลือก โดยปกติแล้วถ้าเราใช้การตั้งค่าเริ่มต้นของโปรแกรม (Default) ซึ่งเป็นค่าที่มีการใช้ทั่วไปแล้ว เมื่อเราใส่ข้อมูลครบถ้วนตามที่โปรแกรมต้องการแล้ว เราสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้ แต่ในบางครั้งเราต้องการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว เช่น ค่าความเชื่อมั่น 95% เป็น 99% การสร้างกราฟหรือจะเป็นการสั่งให้โปรแกรมแสดงค่าหรือเก็บค่าใดๆที่เราต้องการ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 การแสดงผล เป็นการจัดการกับผลการประมวลผลที่โปรแกรม Minitab ดำเนินการให้ซึ่งจะออกมาใน 2 รูปแบบคือ ผลทางตัวเลขหรือตัวอักษรและกราฟ ตัวอย่างของการทำงานในขั้นตอนนี้ เช่น การสร้างรายงาน ตัดข้อมูลผิดปกติ การเปลี่ยนสีกราฟ เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการใช้งาน โปรแกรม Minitab

ความสามารถด้านฟังก์ชันทางสถิติและกราฟ

Basic Statistics เป็นฟังก์ชันพื้นฐานทางสถิติซึ่งประกอบด้วยสถิติเชิงพรรณนา (descriptive) และสถิติเชิงอนุมาน (inferential) เช่น การหาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย (mean), ค่าความแปรปรวน (variance), ค่าพิสัย (range) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีชุดคำสั่งในการหาช่วงความเชื่อมั่น และการทดสอบสมมติฐาน (confidence interval และ hypothesis testing) โดยผลการคำนวณจะให้ทั้งผลลัพธ์บน Session และกราฟ

Regression Analysis เป็นฟังก์ชันการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้ทั้งรูปแบบสมการเส้นตรง (linear) และสมการกำลัง (polynomial) หรือรูปแบบอื่นๆที่ต้องการ รวมถึงการเก็บค่าเศษเหลือ (residual) และกราฟประกอบการวิเคราะห์

ANOVA เป็นฟังก์ชันการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยสามารถวิเคราะห์ปัจจัยตั้งแต่ 1 ปัจจัย (one-way) 2 ปัจจัย (two-way) หรือมากกว่า (genera) รวมถึงการแสดงผลกราฟปัจจัยอิทธิพลหลัก (main effect plot) และปัจจัยอิทธิพลร่วม (interaction effect plot) และอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

Statistical Quality Tools เป็นฟังก์ชันสนับสนุนงานทางด้านการวิเคราะห์ด้านคุณภาพ ประกอบด้วยหัวเรื่องหลัก 4 เรื่อง คือ Quality Tools สามารถทำการสร้างกราฟพาเรโต (pareto), รันชาร์ต (run chart) เป็นต้น

Control Charts ชุดคำสั่งสร้างแผนภูมิควบคุมมากมายหลากหลายครอบคลุมข้อมูลทุกประเภท รวมถึงคำสั่งเพิ่มเติมช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลผิดปกติ

Capability Analysis เป็นคำสั่งวิเคราะห์ความสามารถกระบวนการ โดยการนำเอาความผันแปรข้อมูลเทียบกับข้อกำหนด (specification) ซึ่งสามารถจัดการได้ทั้งกรณีข้อมูลเป็นปกติ (normal) หรือไม่ปกติ (non-normal) และ Measurement System เป็นคำสั่งวิเคราะห์และประเมินความสามารถกระบวนการวัด เช่น Stability Bias Linearity และ Gage R&R

Design of Experiment เป็นชุดคำสั่งในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย factorial, response surface, mixture และ taguchi สำหรับคำสั่งการออกแบบการทดลองในโปรแกรม Minitab จะช่วยเหลือตั้งแต่การออกแบบการทดลอง การจัดเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ผลที่ได้และกราฟประกอบการแปลผล รวมถึงการหาการตั้งค่าเพื่อผลลัพธ์ที่ต้องการ (response optimizer)

Reliability เป็นฟังก์ชันสำหรับวิเคราะห์ค่าความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์โดยอาศัยหลักการทางสถิติ โดยมีฟังก์ชันช่วยในการหาฟังก์ชันความน่าจะเป็น (fit distribution) แบบต่างๆ และทำการวิเคราะห์ผ่านฟังก์ชัน โดยอาศัยหลักการความน่าจะเป็น

Power and Sample Size เป็นฟังก์ชันเพื่อช่วยในการหาขนาดทดสอบ (sample size) หรือความเชื่อมั่นในการทดสอบ (power) สำหรับการทดสอบสมมติฐานแต่ละแบบ

Multivariate Analysis เป็นฟังก์ชันสำหรับการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวแปร เช่น คำสั่ง Principal Component, factor analysis, cluster analysis เป็นต้น

Time Series and Forecasting เป็นฟังก์ชันการวิเคราะห์ข้อมูลแปรผันตามเวลาเพื่อดูแนวโน้มลักษณะกราฟหรือทิศทาง เพื่อใช้ในการทำนาย

Nonparametric เป็นฟังก์ชันการวิเคราะห์โดยไม่ใช้พารามิเตอร์

Table เป็นฟังก์ชันที่จัดการข้อมูลที่เป็นอยู่ในรูปแบบของตารางของข้อมูลนับจำนวนความถี่ พร้อมคำสั่งการวิเคราะห์ Chi-square

Simulation and Distribution เป็นคำสั่งช่วยในการสุ่มชุดข้อมูลผ่านฟังก์ชันความน่าจะเป็น (distribution) เพื่อประโยชน์ในการทำการทดสอบโมเดลหรือการวิเคราะห์ที่ต้องการ

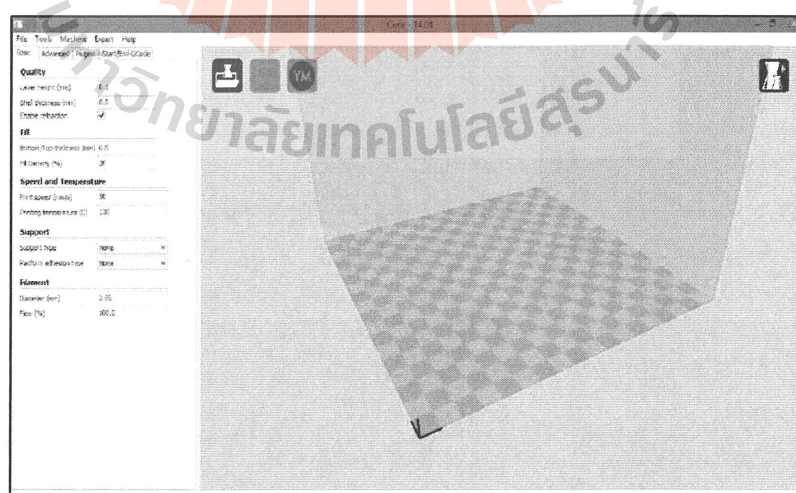
EDA (explore data analysis) เป็นหมวดฟังก์ชันในการประเมินข้อมูลเพื่อดูลักษณะการกระจายของข้อมูล เช่นคำสั่ง Stem-and leaf หรือ boxplot เป็นต้น

2.3.4 ซอฟต์แวร์ Cura

โปรแกรม Cura ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นโดย Ultimaker เพื่อช่วยให้การพิมพ์งาน 3 มิติ ง่ายและสะดวกโดย Cura ได้รวมความสามารถต่าง ๆ เตรียมพร้อมสำหรับการพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ Cura จะรับไฟล์งานในรูปแบบของไฟล์ .STL และ .OBJ มาแปลงเป็นรหัส G หรือ G-Code ซึ่งเป็นไฟล์รหัสสำหรับเครื่องจักรอัตโนมัติแล้วส่งไปยังเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อพิมพ์ชิ้นงานออกมา การถ่ายทอดไฟล์ทำได้ทั้งการส่งผ่านพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์ และแบบคัดลอกไฟล์ ไปยัง SD การ์ด จากนั้นนำ SD การ์ดไปเสียบลงในเครื่องพิมพ์ เพื่อให้พิมพ์งานจากไฟล์ใน SD การ์ดก็ได้ Ultimaker ผู้พัฒนาซอฟต์แวร์นี้ตั้งใจให้เป็นซอฟต์แวร์ระบบเปิด (open source) เพื่อให้เกิดการพัฒนาต่อยอดอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ Cura รองรับและใช้งานได้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้หลากหลาย (<https://www.ultimaker.com>)

ระบบคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ

- คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการวินโดวส์ XP ขึ้นไป หรือ MAC OS 10.6 ขึ้นไป หรือ Linux Ubuntu 12.10 ขึ้นไป
- ซีพียู Intel Core 2 ความถี่ 2 GHz ขึ้นไป
- หน่วยความจำแรมควรมีความจุ 2 GB เพื่อการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ
- พื้นที่ว่างของฮาร์ดดิสก์มากกว่า 500 MB
- มีพอร์ต USB ว่างอย่างน้อย 1 พอร์ต



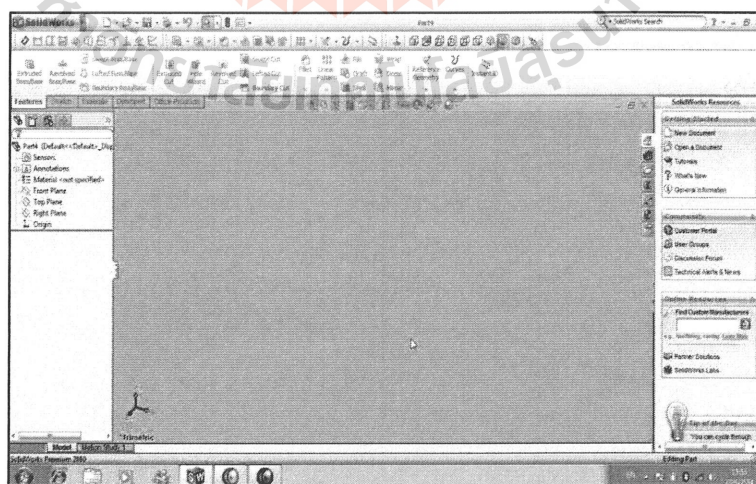
รูปที่ 2.14 ภาพรวมของโปรแกรม Cura

2.3.5 ซอฟต์แวร์ Solid works

โปรแกรม Solid Works ดังแสดงในรูปที่ 2.15 พัฒนาขึ้นในปี 1995 โดยบริษัท Dassault System ในฝรั่งเศสเป็นซอฟต์แวร์เพื่อให้นักออกแบบใช้ เป็นเครื่องมือในการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อสร้างตัวอย่างผลิตภัณฑ์จำลองในคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง โดยตัวซอฟต์แวร์จะจัดอยู่ในตระกูล CAD (Computer Aided Design) ซึ่งสามารถสร้างชิ้นงานจำลองในรูปแบบ 3 มิติ (3D Solid Models) เป็นแบบงานแยกชิ้น (Part) และแบบงานประกอบ (Assembly) เพื่อนำไปสร้างเป็นแบบงาน 2 มิติ (2D Standard Engineering) โปรแกรม Solid work เป็นโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูงมาก คือ สามารถที่จะทำงานมากมายหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นงานที่ต้องขึ้นเป็นชิ้นงานเต็มรูป (solid) หรือชิ้นงานพื้นผิว (surface) ก็มีเครื่องมือที่รองรับเป็นอย่างดี เมื่อสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อย สามารถที่จะประกอบชิ้นงานได้ใน โหมดของชุดคำสั่งงานประกอบ (Assembly) รวมทั้งผู้ต้องการแบบงาน (Drawing) ของชิ้นงาน ก็เพียงลากชิ้นงานมาวางในใบงานแล้วขนาด จะมองเห็นได้ว่าผู้ใช้งานสามารถที่จะประหยัดเวลาในการทำงานอย่างมากเมื่อเทียบกับการเขียนแบบด้วยมือหรือโปรแกรมออกแบบ 2 มิติ อื่น ๆ

ประสิทธิภาพการทำงาน

ประสิทธิภาพของโปรแกรม Solid Works ทำให้นักออกแบบสามารถสร้างชิ้นงานจำลองทางด้านการออกแบบวิศวกรรมทางกล (Mechanical Engineering Design) ได้อย่างสมบูรณ์แบบ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณทางวิศวกรรม และการตรวจสอบความผิดพลาดของชิ้นงาน 3 มิติ (3D Solid Models) เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และลดระยะเวลาการทำงานในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในบริษัทและองค์กร



รูปที่ 2.15 โปรแกรม Solid Work

ลักษณะการทำงาน

โปรแกรม Solid Works แบ่งหมวดการทำงานหลักออกเป็น 3 หมวดคือ งานแยกชิ้น (Part), แบบงานประกอบ (Assembly) และงานแบบเขียนแบบ (Drawing) โดยรูปแบบการทำงานทั้งสามหมวดมีลักษณะการใช้งานดังนี้

หมวดงานแยกชิ้น (Part Mode) เป็นหมวดการทำงานเริ่มต้นก่อนที่จะก้าวสู่การทำงานในหมวด แบบงานประกอบ (Assembly) และงานแบบเขียนแบบ (Drawing) ในขั้นนี้จะมีการแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ การใช้สเก็ต 2 มิติ (2D Sketch) เพื่อนำไปสู่การสร้างเป็นเนื้อชิ้นงาน 3 มิติ (3D Feature) และมีเงื่อนไขเป็น การสร้างแบบจำลองหรือชิ้นงาน (Feature-Based Modeling) และลักษณะพิเศษ (Parametric) โดยมีการอ้างอิงจากหมวดชิ้นงานเต็มรูป (Solid Mode)

หมวดงานประกอบ (Assembly Mode) เป็นหมวดการทำงานเพื่อนำหมวดงานแยกชิ้น (Part Mode) เข้าไปประกอบเป็นเครื่องจักรกลหรือกลไกต่างๆ และมีเงื่อนไขและมีเงื่อนไขเป็น การสร้างแบบจำลองหรือชิ้นงาน (Feature-Based Modeling) และลักษณะพิเศษ (Parametric) เช่นเดียวกับหมวดงานแยกชิ้น โดย หมวดงานแยกชิ้น และ หมวดงานประกอบ จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เมื่อทำการแก้ไขในหมวดใดอีก หรือมีการประกอบที่ซับซ้อนหรือทับกันหมวดจะมีการเปลี่ยนแปลงตามการแก้ไขไปด้วย การทำงานในหมวดงานประกอบ สามารถช่วยให้นักออกแบบหรือวิศวกรสามารถตรวจสอบความผิดพลาดในการสร้างแบบชิ้นงานได้โดยการใช้คำสั่งต่างๆ เช่น คำสั่งตรวจสอบการขัดกัน (Interference Detection) เพื่อตรวจสอบการขัดกันเมื่อมีการเคลื่อนที่ โดยใช้คำสั่งการเคลื่อนที่ชิ้นส่วนประกอบ (Move Component) เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของกลไก คำสั่งแบบจำลอง (Simulation) เพื่อจำลองต้นกำลังในการทำงานจริงของเครื่องจักร

หมวดงานเขียนแบบ (Drawing Mode) เป็นหมวดการทำงานเพื่อสร้างแบบงาน 2 มิติ (2D Standard Engineering) โดยในหมวดนี้เป็นการสร้างมุมมองและกำหนดรายละเอียดตามระบบมาตรฐานต่าง ๆ

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) คือการทดสอบ หรือ ชุดของการทดสอบ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจคุณลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) โดยการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนำเข้าอย่างตั้งใจตามแผนการทดลองที่ออกแบบไว้ (Douglas C. Montgomery, 2009) มีคำศัพท์ที่ต้องทราบคือ

ปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระ (Independence) ที่ผู้วิเคราะห์สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factor หรือ Noise factor) แทนด้วย

$z_1, z_2, \dots, z_n$ และ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factor) แทนด้วย $x_1, x_2, \dots, x_n$ โดย DOE จะมุ่งเน้นที่การศึกษาเพื่อป้องกันผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ ในขณะที่ต้องการกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ไม่ให้ส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยที่ควบคุมได้จะเรียกว่า ทริตเมนต์ (Treatment)

จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการทำการทดลองซ้ำด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน โดยในการทดลองหนึ่ง ๆ จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลอง (Treatment combination) เท่ากับผลคูณของจำนวนปัจจัยและจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย เช่น การทดลองที่มี 2 ปัจจัย ๆ ละ 2 ระดับจะมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขการทดลอง

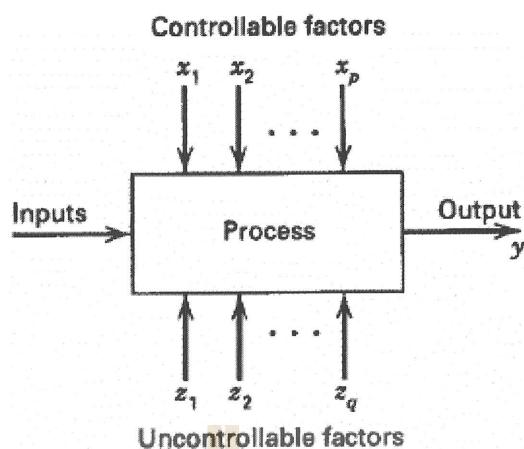
ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ ซึ่งเป็นปัจจัยไม่อิสระ (Dependence) ต้องการศึกษาควคุม ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเปลี่ยนแปลงของ ทริตเมนต์ต่าง ๆ

การสุ่ม (Randomization) เป็นส่วนหนึ่งของ DOE ที่พยายามให้ผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) กระจายอย่างสม่ำเสมอกับค่าของผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) ที่ได้จากการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะต้องมีตัวแบบของกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- บ่งชี้ปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response)
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) Y เพื่อให้ Y มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) Y เพื่อให้มีความผันแปรของค่า Y ต่ำ
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) Y เพื่อให้อิทธิพลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factor) มีน้อยที่สุด



รูปที่ 2.16 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ (Douglas C. Montgomery, 2009)

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เช่นหากผลของการติดตามกระบวนการด้วยแผนภูมิควบคุมบ่งชี้ว่ากระบวนการเกินขอบเขตการควบคุม (out of control) ซึ่งอาจมีปัจจัยจำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของความผิดปกติ การที่จะปรับปรุง แก้ไขเพื่อนำกระบวนการกลับสู่ภาวะภายใต้การควบคุมจะเป็นไปได้อย่างยากหากไม่ทราบว่าปัจจัยตัวไหนที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) อย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบการทดลองจึงเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เพื่อบ่งชี้ปัจจัยเหล่านี้ ทั้งนี้หากมีการประยุกต์หลักการของ DOE ตั้งแต่เริ่มต้นพัฒนาผลิตภัณฑ์จะนำไปสู่ผลการดำเนินการที่ดีขึ้น ดังนี้

- จำนวนผลผลิตจะดีขึ้น
- ความผันแปรลดลงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าคุณลักษณะทางคุณภาพอยู่ในช่วงที่กำหนด และใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่ต้องการ
- ลดเวลาการพัฒนาผลิตภัณฑ์
- ลดต้นทุนโดยรวม

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DOE มีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นที่ผู้วิเคราะห์ต้องมีเป้าหมายการศึกษา, ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response), ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response), วิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนแนวทางการวิเคราะห์อย่างชัดเจน ซึ่ง Douglas C. Montgomery ได้สรุปแนวทางการศึกษาด้วย DOE ไว้ดังนี้

1. **การศึกษาปัญหา** ในขั้นตอนนี้ ผู้วิเคราะห์ต้องตระหนักว่าปัญหาคืออะไร ต้องการข้อมูลจากแหล่งใดบ้าง เพื่อกำหนดเป้าหมายของการศึกษาให้ชัดเจน การศึกษาในขั้นตอนนี้บ่อยครั้งที่พบว่ามีส่วนทำให้ผู้วิเคราะห์เข้าใจกระบวนการได้ดียิ่งขึ้น และนำไปสู่แนวทางการแก้ปัญหาในที่สุด
2. **การกำหนดผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) ที่ต้องการศึกษา** เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องกำหนดคุณลักษณะทางคุณภาพที่มั่นใจได้ว่าเป็นสิ่งที่ต้องการปรับปรุงของกระบวนการที่ทำการศึกษาอยู่ อาจเป็นผลมาจากการทำการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical process control, SPC) ทั้งนี้ต้องมั่นใจได้ว่าระบบการวัดมีความสามารถเพียงพอ เนื่องจากระบบการวัดที่ไม่มีความสามารถจะทำให้การบ่งชี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) ไม่ชัดเจน เพราะผลการทดลองจะบ่งชี้ความแตกต่างของผลของปัจจัยได้เฉพาะปัจจัยที่ส่งผลสูง ๆ เท่านั้น ในขณะที่ปัจจัยที่ส่งผลระดับต่ำถึงปานกลางจะไม่สามารถแบ่งแยกได้
3. **การกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม และ ระดับของปัจจัย** เป็นขั้นตอนที่ผู้ทำการทดลองต้องเลือกปัจจัยที่สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) พร้อมทั้งระดับของแต่ละปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนได้ โดยต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับสภาพ การดำเนินการจริง ซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ และ/หรือ ประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ หากกำหนดจำนวนปัจจัย และระดับของปัจจัยไม่ครอบคลุมจะทำให้ไม่ได้ผลการทดลองที่นำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างแท้จริงในขณะที่ยกหนดมากเกินไปจะส่งผลต่อต้นทุน และเวลาในการทดลอง อย่างไรก็ตามกรณีที่มีจำนวนปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมากผู้ทำการทดลองสามารถคัดกรองปัจจัยที่ต้องการทดลองเบื้องต้นหรือการทดลองขั้นต้น (Screening Experiment) ก่อนที่จะทำการทดลองโดยละเอียดกับปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) อย่างแท้จริงต่อไป
4. **การกำหนดรูปแบบการทดลอง** เมื่อ 3 ขั้นตอนแรกทำอย่างถูกต้องขั้นตอนนี้จะไม่ยุ่งยากนัก ผู้ทำการทดลองต้องเลือกรูปแบบ (Design) ของการทดลอง ซึ่งรวมถึงขนาดตัวอย่าง จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (Replication) การกำหนดลำดับการทดลองอย่างสุ่ม เป็นต้น
5. **การทดลองและการเก็บข้อมูล** ผู้ทดลองต้องควบคุมการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่วางไว้ ความผิดพลาดทั้งจากการทดลองและการเก็บข้อมูล จะส่งผลให้การทดลองไม่น่าเชื่อถือ และไม่สามารถนำไปวิเคราะห์อะไรได้ เช่นการไม่ทำการทดลองตามหลักการของการสุ่ม จะส่งผลให้อิทธิพลของปัจจัยรบกวน (Noise factors) ไม่กระจายเฉลี่ย ทำให้ผลของการ

ทดลองแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับผลการทดลองครั้งก่อนหน้า หรือครั้งอื่น ๆ ไม่อิสระต่อกัน หรือมีความสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation) ระหว่างข้อมูลจากการทดลองเป็นต้น

6. **การวิเคราะห์ข้อมูล** การวิเคราะห์ข้อมูลทำตามหลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis Of Variance, ANOVA) การวิเคราะห์ด้วยกราฟ การวิเคราะห์สมการเส้นถดถอย ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิเคราะห์จริงผู้วิเคราะห์มีซอฟต์แวร์ทางสถิติช่วย ในการวิเคราะห์หลากหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามผู้วิเคราะห์ควรเข้าใจหลักการทางสถิติ เพื่อการแปลความหมายที่ถูกต้องด้วย
7. **การสรุปและนำเสนอแนวทางการปรับปรุง** เมื่อทราบผลการวิเคราะห์ การสรุปผลและแนะนำการดำเนินการเพื่อปรับปรุงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิเคราะห์อาจใช้เครื่องมือเช่น กราฟ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ต่าง ๆ และผลที่คาดว่าจะได้รับการปรับปรุงแก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ควรมีการทดลองเพื่อยืนยันข้อเสนอแนะการปรับปรุงอีกครั้งก่อนการประยุกต์ใช้จริง นอกจากนี้ควรมีการตรวจติดตามผลการปรับปรุงด้วยเครื่องมือของการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical process control, SPC) ที่เหมาะสมต่อไปด้วย

ประเภทของการทดลอง

การออกแบบการทดลองมีหลากหลายประเภทซึ่งผู้ทำการทดลองต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะของปัญหาซึ่งประกอบด้วย จำนวนปัจจัย เงื่อนไขการพิจารณา โครงสร้างการทดลอง โดยเฉพาะด้านการสุ่ม ความยากง่ายในการทำการทดลอง ระยะเวลาที่มี ต้นทุนที่ยอมรับได้ เป้าหมายของการทำการทดลอง เป็นต้น ประเภทของการทดลองมีตั้งแต่แบบที่ไม่ซับซ้อน ไปจนถึงแบบที่มีความซับซ้อนมาก เช่น การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design) การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) การทดลองแบบละตินสแควร์ (Latin Squares Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูปแบบ (Fractional Factorial Design) และการทดลองด้วยเทคนิคของ Taguchi เป็นต้น ในการแนะนำเบื้องต้นเกี่ยวกับ DOE นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และการทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูปแบบ (Fractional Factorial Design) เท่านั้น สำหรับการออกแบบอื่น ๆ

การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design)

เป็นการออกแบบการทดลองเมื่อสงสัยว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) มีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น การทดลองจึงมุ่งไปที่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) ซึ่งเป็นการทดลองที่ออกแบบง่าย แต่อาจนำไปสู่ผลการวิเคราะห์ที่มีได้ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเสมอไป เนื่องจากพิจารณาเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น ในขณะที่อาจมีปัจจัยอื่นๆ เกี่ยวข้อง และมีอิทธิพลแบบปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ได้

การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design)

เมื่อมีปัจจัยที่สนใจมากกว่า 1 ปัจจัย การออกแบบการทดลองที่ง่ายที่สุดคือการทดลองโดยปรับเปลี่ยนทีละปัจจัย และกำหนดระดับของปัจจัยอื่น ๆ คงที่ อย่างไรก็ตามการออกแบบการทดลองลักษณะนี้เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เพราะจะไม่ได้ข้อมูลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเลย

การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design)

เป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Combinations) ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) ได้ทั้งแบบอิทธิพลหลัก (Main effect) และ แบบปฏิสัมพันธ์ (Interaction) แต่การออกแบบการทดลองแบบนี้ต้องการเวลาและทรัพยากรในการทดลองมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนปัจจัยมีมากขึ้น การออกแบบอาจแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย คือ 1) เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยมากกว่า 2 ระดับขึ้นไป และ 2) เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ ในกรณีที่ 2 จะใช้สัญลักษณ์ 2^k Design โดยเลข 2 แทนจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย และ k แทนจำนวนปัจจัยที่พิจารณาในการทดลอง ในการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องคือ

ระดับของปัจจัย A สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., a	แทนด้วย i
ระดับของปัจจัย B สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., b	แทนด้วย j
ระดับของปัจจัย C สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., c	แทนด้วย k
จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำหรือ Replication	แทนด้วย n

ผลการทดลองจากการทดลองที่ปัจจัย A, B และ C ระดับ i, j และ k ตามลำดับครั้งที่ n แทนด้วย y_{ijkn}

สิ่งสำคัญในการทำการทดลองตามที่ออกแบบไว้จะต้องตระหนักว่าการทดลองแต่ละครั้งต้องทำตามลำดับการสุ่ม จากกระบวนการสุ่มที่เหมาะสม มิฉะนั้นอาจส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์และนำไปใช้ได้ที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากสมมติฐานของเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติไม่เป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ทำการทดลองสามารถสร้างลำดับการทดลองแบบสุ่มโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติเช่น โปรแกรม Minitab เป็นต้น

การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูป (Fractional Factorial Design)

จากการที่จำนวนการทดลอง (Runs) ของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนปัจจัยเพิ่มขึ้น เช่น 25 จะมี 32 Runs ถ้ามี 3 ตัว จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 96 ครั้ง ในการทดลองนี้จะมี อิทธิพลหลัก (Main Effects) 5 ตัว อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (2 Ways Interactions) 10 ตัว เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากทราบหรือมีแนวโน้มว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยหลายปัจจัย (High Order Interactions) จะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการทดลองเพียงบางส่วนหรือการทดลองแบบไม่เต็มรูปจะยังคงให้ข้อมูลที่มีนัยสำคัญเพียงพออยู่ โดยการทดลองแบบไม่เต็มรูปจะเป็นแบบ 2^{k-p} Factorial Design เช่นเมื่อ $p=1$ จะเป็นการทดลองแบบ Half Factorial Design ซึ่งจะลดจำนวนการทดลองได้ครึ่งหนึ่ง เมื่อ $p=2$ จะลดจำนวนการทดลองเหลือเพียงหนึ่งในสี่ส่วนเท่านั้น

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองผู้วิเคราะห์ต้องการทราบว่าปัจจัยใดบ้างส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประเมินได้จากเมื่อเปลี่ยนระดับของปัจจัยหรือทรีตเมนต์แล้วทำให้ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการวิเคราะห์จึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่างแต่ละระดับของแต่ปัจจัย หรือกล่าวได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบ Response เมื่อมีประชากรมากกว่า 2 กลุ่มนั่นเอง ดังนั้นการวิเคราะห์จึงทำได้โดยการประยุกต์หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงการวิเคราะห์แบบปัจจัยเดียวเนื่องจากสามารถทำได้โดยใช้ One-Way ANOVA โดยตรง

การวิเคราะห์กรณีการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปทั่วไป

ในกรณี 2 ปัจจัย เมื่อกำหนดให้ A และ B แทนปัจจัย ซึ่งปรับเปลี่ยนได้ a และ b ระดับตามลำดับ ถ้าทำการทดลอง n ครั้ง

y_{ijk} แทน Response จากการทดลองที่ระดับ i^{th} ของปัจจัย A ระดับ j^{th} ของปัจจัย B ครั้งที่ k^{th}

ซึ่งจะมีข้อมูลทั้งหมด abn ตัวจากการทดลองด้วยลำดับแบบสุ่ม abn ครั้ง ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) โดยปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อ Response คงที่ (Fixed Effects) และ Response จากการทดลองสามารถแทนได้ด้วยตัวแบบทางสถิติ ตามสมการที่ (2.1)

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.1)$$

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, a$

$j = 1, 2, \dots, b$

$k = 1, 2, \dots, n$

เมื่อ	μ	แทน	ค่าเฉลี่ยรวมของผลลัพธ์ที่สนใจ (Response)
	τ_i	แทน	อิทธิพลของปัจจัย A ระดับที่ i^{th}
	β_j	แทน	อิทธิพลของปัจจัย B ระดับที่ j^{th}
	$(\tau\beta)_{ij}$	แทน	อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B ระดับที่ i^{th} และ j^{th}
	ε_{ijk}	แทน	ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง ระดับ $i^{\text{th}}, j^{\text{th}}$ ครั้งที่ k^{th}

โดย ε_{ijk} จะต้องมีคุณสมบัติคือมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระต่อกันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2 หรือ $NID(0, \sigma^2)$ ซึ่งอธิบายได้ว่าหากการทดลองเป็นไปแบบสุ่มแล้ว ความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมอื่น ๆ จะต้องกระจายกับผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) ทุก ๆ ตัว ซึ่งอาจสูงบ้างต่ำบ้าง แต่โดยเฉลี่ยแล้วความคลาดเคลื่อนทางด้านสูงและต่ำควรสมดุลกัน และความคลาดเคลื่อนจากการทดลองแต่ละครั้งจะต้องเป็นอิสระต่อกัน สมการที่ (2.1) อธิบายได้ว่า ค่าของผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) จากการทดลองแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลหลัก ของปัจจัย A และ B และ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย AB ซึ่งแทนได้ด้วย τ_i, β_j และ $(\tau\beta)_{ij}$ ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ ซึ่งต้องการทดสอบสมมติฐานว่า อิทธิพลของปัจจัย A มีผลหรือไม่ อิทธิพลของปัจจัย B มีผลหรือไม่ และ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B มีผลหรือไม่ หรือเขียนเป็นสมมติฐานได้ดังนี้

อิทธิพลของปัจจัย A มีผลหรือไม่

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots, \tau_a$$

$$H_1: \tau_i \neq \tau_j ; i \neq j$$

อย่างน้อย 1 คู่

อิทธิพลของปัจจัย B มีผลหรือไม่

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots, \beta_b$$

$$H_1: \beta_i \neq \beta_j ; i \neq j \quad \text{อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B มีผลหรือไม่

$$H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots, (\tau\beta)_{ab}$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq (\tau\beta)_{kl} ; ij \neq kl \quad \text{อย่างน้อย 1 คู่}$$

โดยถ้าปัจจัย A ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Response แล้วจะได้ค่า τ_i ต่าง ๆ ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อทดสอบสมมติฐานก็จะไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ สำหรับปัจจัย B และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะต้องประเมินผลรวมกำลังสอง (Sum of Square, SS) ของความผันแปรเป็นดัชนีบ่งชี้ความผันแปร โดยความผันแปรรวม (Total Variation) ซึ่งประเมินจาก Sum of Square of Total (SS_T) จะประกอบด้วย ความผันแปรจากปัจจัย ประเมินจาก Sum of Square of Treatment (SS_{Tr} หรือ SS_{within}) และ ความผันแปรความผิดพลาดของการทดลองหรือปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งไม่ได้ควบคุม ประเมินจาก Sum of Square of Error (SSE หรือ $SS_{between}$) หรือแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.2)

ความผันแปรรวม = ความผันแปรจากปัจจัย + ความผันแปรจากความคลาดเคลื่อน

ซึ่งประเมินได้จาก

$$SS_{total} = SS_{Tr} + SS_{error} \quad (2.2)$$

โดย SS_{Tr} จะเป็นผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย กับค่าเฉลี่ยรวม (μ ซึ่งประมาณด้วย $\bar{y} \dots$) ดังนั้นจึงประกอบด้วยผลรวมกำลังสองที่มาจากอิทธิพลของแต่ละปัจจัยคือ A และ B และ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย AB ในกรณี 2 ปัจจัยนี้ SS_{Tr} จึงประกอบด้วย SS_A , SS_B และ SS_{AB}

ทั้งนี้เพื่อทดสอบสมมติฐาน ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้โปรแกรม Minitab ในการคำนวณและใช้ตาราง ANOVA ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้โปรแกรม Minitab ในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 2.17

ตารางที่ 2.2 ตาราง ANOVA สำหรับกรณี 2 ปัจจัย (A และ B) ของอิทธิพลคงที่

(Fixed Effects Model)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS_T	$abn-1$		

จากการที่สัดส่วนของค่าเฉลี่ยความผันแปร (ค่า F_0) มีพฤติกรรมที่อธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบ F ดังนั้นการวิเคราะห์หว่าอิทธิพลจากแต่ละแหล่ง (ในที่นี้คือ A, B และ AB) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ (Significance) หรือไม่ จึงประเมินจากเกณฑ์ของค่า F วิฤต จาก F_{α, v_1, v_2} เมื่อ v_1 แทน degree of freedom ของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square, MS) ของตัวตั้ง (Nominator) และ v_2 แทน degree of freedom ของค่า MS ของตัวหาร (Denominator) โดยจะปฏิเสธสมมติฐานหลักเมื่อค่า F_0 มากกว่าค่า F_{v_1, v_2} ที่ระดับความมีนัยสำคัญ (α) ที่กำหนด

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

เนื่องจากในการทดลองหนึ่ง ๆ จะมีปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมจำนวนมาก และปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการทดลองซึ่งแทนด้วย ϵ_{ijk} หรือประมาณได้ด้วย e_{ijk} (คำศัพท์ที่ใช้ใน DOE คือ Residual ซึ่งหมายถึงเศษเหลือ หรือสิ่งเหลือตกค้าง หรือค่าแปลในทำนองนี้ ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนถูกเรียกว่า Residual Analysis) เป็นดัชนีหนึ่งที่บ่งชี้ว่าผลการทดลองและตัวแบบสมการเส้นถดถอย (Regression Model) ที่จะใช้เป็นตัวแทนทำนายพฤติกรรมของปัจจัยเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด โดย e_{ijk} ต้องมีลักษณะเป็น $NID(0, \sigma^2)$ ดังได้กล่าวแล้วนั้น ค่า Residual ของการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย คำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ij} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) ค่า Residual คือผลต่างระหว่าง Response จากการทดลองและค่าเฉลี่ยของการทดลองแต่ละcombination i^{th}, j^{th} หรือ คือผลต่างระหว่าง Response กับ ค่าที่ประมาณจากตัวแบบ ($\hat{y}_{ijk}$) ในกรณีที่ผู้วิเคราะห์สร้าง Regression Model ในโปรแกรม Minitab ได้

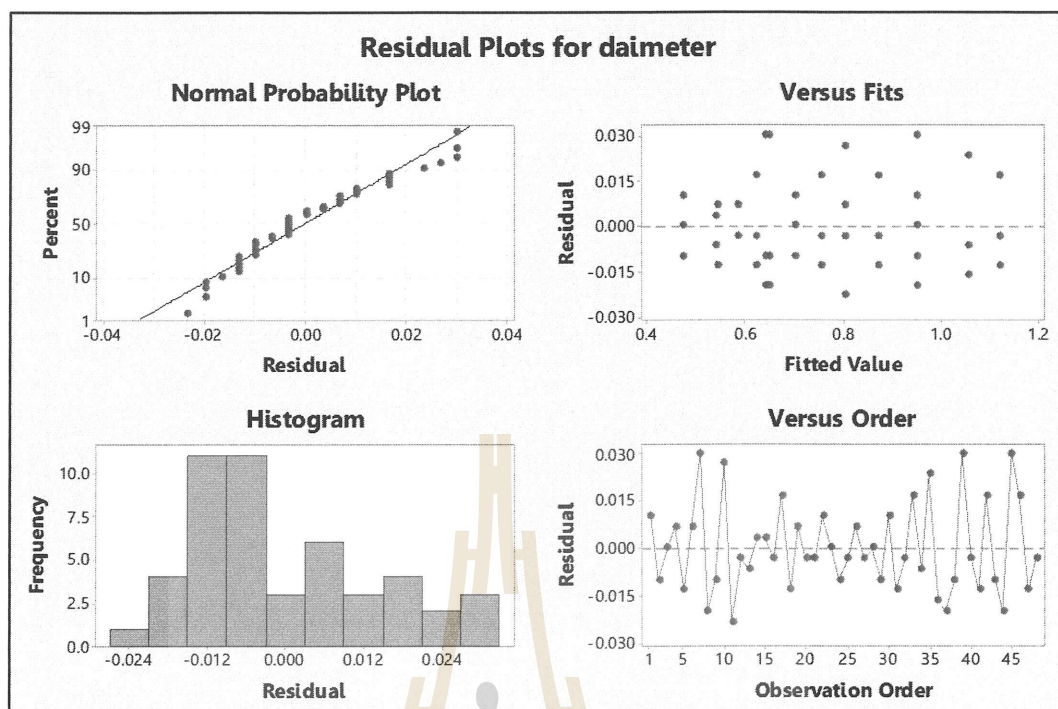
Factor Information						
Factor	Levels	Values				
feed rate	4	25, 50, 75, 100				
vol of mat	4	125, 250, 375, 500				

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	15	1.70746	0.113831	393.08	0.000	
Linear	6	1.67880	0.279800	966.22	0.000	
feed rate	3	0.41576	0.138586	478.57	0.000	
vol of mat	3	1.26304	0.421014	1453.86	0.000	
2-Way Interactions	9	0.02866	0.003184	11.00	0.000	
feed rate*vol of mat	9	0.02866	0.003184	11.00	0.000	
Error	32	0.00927	0.000290			
Total	47	1.71672				

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
0.0170171	99.46%	99.21%	98.79%	

รูปที่ 2.17 ตาราง ANOVA จากโปรแกรม Minitab

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.18 กราฟต่างๆ ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

ในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนนิยมพิจารณาจากกราฟซึ่งได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.18 ดังต่อไปนี้

- Normality plot เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความเป็นปกติของการแจกแจงของ residuals ทั้งหมด (Normality of Error)
- Scatter plot ระหว่างค่า residuals กับระดับต่าง ๆ ของแต่ละปัจจัย หรือระหว่างค่า residuals กับค่าที่คำนวณจาก Regression Model เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของความผันแปรตลอดช่วงของปัจจัย (Homoscedasticity) หากความผันแปรไม่สม่ำเสมอจะสังเกตได้จากรูปแบบต่าง ๆ ของ plot
- Scatter plot ระหว่างค่า residuals กับระยะเวลาการเก็บข้อมูล เพื่อตรวจสอบความอิสระของ Residuals (Independence of Error) ซึ่งอาจเกิดขึ้นเมื่อการทดลองต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ถ้าหาก Residuals ไม่อิสระต่อกันหรือมี Autocorrelation ระหว่าง Responses จะสังเกตได้จากรูปแบบต่างของ Plot เช่นกัน

การวิเคราะห์กรณีการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบในกรณี 2 ปัจจัย 4 ระดับ

การวิเคราะห์ต่างๆ ทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการทดลองแบบเต็มรูปแบบ โดยผลการทดลองของแต่ละระดับ จะเป็น X_1, X_2, X_3 และ X_4 ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลรวมกำลังสอง (Sum of square) จะคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$SS_X = SS_A + SS_B + SS_{AB} \quad (2.4)$$

2.5 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. Van Weeran (2007) ได้ทำการศึกษาแยกประเภทการเสียหายของชิ้นงานในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) ซึ่งได้กล่าวว่า ในกระบวนการผลิตชิ้นงาน 3 มิติด้วยกระบวนการ Fused Deposition Modeling นั้นคุณภาพของชิ้นงานถือเป็นเรื่องที่สำคัญ จึงทำการหาสาเหตุของการเสียหายแต่ละประเภท และจัดประเภทตามลักษณะการเสียหายได้ 3 ประเภทคือ Surface Defects แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Staircase effect และ Chordal effect การเสียหายแบบ Staircase effect มีสาเหตุหลักมาจากการขั้นตอนการแบ่งชั้น (Slicing) ไฟล์ที่ไม่ดี ส่วนการเสียหายแบบ Chordal effect เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการแปลงไฟล์ให้อยู่ในนามสกุล Stereo Lithography หรือ .stl ลักษณะของการเสียหายจะเกิดที่บริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงาน Internal Defects ความเสียในลักษณะนี้จะเรียกว่า Inter Road Defect สาเหตุหลักเกิดจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม และไม่สอดคล้องกันระหว่างซอฟต์แวร์ (Software) และฮาร์ดแวร์ (Hardware) ทำให้เกิดการเสียหายภายในของชิ้นงาน FDC Feed Stock แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Less Uniform Shape และ Fracture Surface ซึ่งการเสียหายแบบ Less Uniform จะมีสาเหตุมาจากระบบป้อนเส้นพลาสติกที่ไม่ดี ส่วน Fracture Surface เป็นการเสียหายที่เกิดจากการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle)

Anoop Kumar Sood, R.K. Ohdar และ S.S. Mahapstra (2009) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การปรับปรุงความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานที่ได้จากการผลิตด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM) โดยใช้วิธีการ Grey Taguchi ซึ่งได้ทำการศึกษาด้วยปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานซึ่งมี 5 ปัจจัยที่สนใจคือ ความหนาของชั้นชิ้นงาน (Layer thickness), ทิศทางการวางของชิ้นงาน (Part orientation), มุม (Angle), ช่องว่างระหว่างชั้น (Layer air gap) และความกว้างของชั้น (Layer width) จากการวิจัยพบว่าทั้ง 5 ปัจจัยมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความ

เที่ยงตรงของความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานที่ได้จากการผลิตด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM)

Anoop Kumar Sood, R.K. Ohdar และ S.S. Mahapstra (2010) ได้ทำวิจัยเพิ่มเติมต่อจากงานวิจัยเรื่อง การการปรับปรุงความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานที่ได้จากการผลิตด้วยกรรมวิธี Fused Deposition Modeling (FDM) โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษายังคงใช้ปัจจัยเดิมในการศึกษา คือ ความหนาของชั้นชิ้นงาน (Layer thickness), ทิศทางการวางของชิ้นงาน (Part orientation), มุม (Angle), ช่องว่างระหว่างชั้น (Layer air gap) และความกว้างของชั้น (Layer width) แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้มุ่งเน้นไปที่การประเมินคุณสมบัติทางกล (Mechanical propert) ของชิ้นงาน โดยวัดผลจากค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), ความแข็งแรงต่อการโค้งงอ (Flexural strength) และ ความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact strength) ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าความหนาของชั้นชิ้นงาน (Layer thickness) และความกว้างของชั้น (Layer width) ยังมีค่าสูงคุณสมบัติทางกลจะดี แต่ช่องว่างระหว่างชั้น (Layer air gap) ยังมีค่าต่ำคุณสมบัติทางกลจะดี ในขณะที่ทิศทางการวางของชิ้นงาน (Part orientation) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

Mostafa Nikzad (2009) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ความเร็วการไหล (Flow Velocity) ในกระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยวัสดุผสม ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) โดยมีเป้าหมายหลักคือการพัฒนาวัสดุผสมระหว่างพลาสติก ABS และ เหล็ก (Iron) 10% ซึ่งมีสมมุติฐานในการวิจัยเบื้องต้นคือการไหล (Flow) ต้องอยู่ในสภาวะที่เสถียร (Steady State) และต้องไม่มีการเปลี่ยนรูปแบบ (No change in flow profile) จากผลการวิจัยพบว่า ในการผลิตชิ้นงานด้วยวัสดุผสมนั้น พารามิเตอร์หลัก ที่เป็นตัวกำหนดมีอยู่ 3 ตัว คือ อุณหภูมิ (Temperature), ความเร็ว (Velocity) และความดัน (Pressure) ทั้งนี้งานวิจัยยังระบุว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานจะต้องอยู่ระหว่าง 209 -270 C ความดันภายในหัวฉีดจะต้องเป็นค่าความดันที่คงที่ จึงจะทำให้ความเร็วในการไหลเป็นไปด้วยความราบเรียบ แต่สิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยชิ้นนี้คือ พบว่าความเร็วการไหลจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณปลายทางออกของหัวฉีดซึ่งค่าความเร็วการไหลที่บริเวณอื่นๆ คือ 0.001 m/s ส่วนที่บริเวณปลายทางออกของหัวฉีดคือ 0.081 m/s จะสังเกตได้ว่า มีความแตกต่างกันมากถึง 80 เท่า

Mostafa Nikzad (2011) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกล (Thermo-mechanical properties) ของชิ้นงาน 3 มิติที่ได้จากการผลิตด้วยกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) พบว่า เมื่อผสมผงเหล็ก (Iron) ลงในพลาสติก ABS จะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณสมบัติที่ดี ใน 4 ด้านคือ 1.) การนำความร้อน (Thermal conductivity) 2.) ความจุความร้อนจำเพาะ (Heat capacity) 3.) สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (Dynamic mechanical) และ 4.) พฤติกรรมความเค้นความเครียด (Stress-Strain behavior) ที่สำคัญคืองานวิจัยนี้ได้บอกถึงอัตราส่วนการผสมที่จะทำให้ชิ้นงานมี

คุณสมบัติที่ดีที่สุดทั้ง 4 ด้านคือ ต้องผสมในอัตราหลัก 10% : ABS 90% แต่การผสมผงเหล็ก ก็ทำให้เกิดผลกระทบในด้านอื่นที่ตามมาคือ ชิ้นงานที่ได้ขาดความยืดหยุ่น และการเกิดการสึกหรอในหัวฉีด (Nozzle Wear) เนื่องจากผงเหล็กที่ผสมลงไปมีค่าความแข็งที่มากกว่าค่าความแข็งของหัวฉีดที่เป็นทองเหลือง อีกทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกผสมมีขนาด 1.75 mm. ในขณะที่ปลายทางออกของหัวฉีด มีขนาดเพียง 0.4 mm. และ ความเร็วการไหลจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณปลายทางออกของหัวฉีด ทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างผงเหล็ก กับบริเวณผิวที่ปลายทางออกของหัวฉีด นำมาซึ่งการสึกหรอในหัวฉีด และนับว่าพบการสึกหรอเกิดขึ้นเร็วกว่าการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ด้วยวัสดุพลาสติกอย่างเห็นได้ชัด

H. Brooks (2012) ได้ทำการศึกษาเพื่อทำการออกแบบหัวฉีด ที่สามารถปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ (Two Stage Nozzle) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) เนื่องจากในปัจจุบัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด เป็นหัวที่มีขนาดคงที่ (Fix Nozzle) ขนาดตั้งแต่ 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 และ 0.5 mm. แต่งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวคิดการออกแบบหัวที่สามารถปรับขนาดได้ ซึ่งจะสามารถตอบสนองต่อการใช้งานที่หลากหลายในอนาคต อย่างไรก็ดี การปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของหัวฉีด ก็มีข้อจำกัด คือ พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง กับ คุณภาพของชิ้นงาน โดยตรง ซึ่งการเสียหายจัดอยู่ในลักษณะของ Staircase effect เนื่องจากว่า หาก เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ จะทำให้ชั้นของพลาสติกที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นของชิ้นงาน

Omkar Rishi (2013) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการป้อน ในกระบวนการ Freeform Filament Extrusion (FFE) พบว่า ในการป้อนเส้นพลาสติกเข้าสู่หัวฉีดนั้น อัตราการป้อนถือเป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยการศึกษาในกลไกการป้อน (Feeding Mechanism) มีการป้อนเส้นพลาสติกในสองระบบคือ 1. ระบบ Feed-in screw rotational speed (มีหน่วยการวัดค่าเป็น rev/min) และ 2. ระบบ Filament linear speed (มีหน่วยการวัดค่าเป็น mm/min) พบว่าระบบการป้อนแบบ Feed-in screw rotational speed มีความราบเรียบและมีความเสถียรในการป้อนมากกว่า โดยทำการเทียบค่ากับการวัดค่าอัตราการไหล (Flow rate) พบว่า ค่าอัตราการป้อน (Feed Rate) เมื่อเทียบกับอัตราการป้อนมีค่าใกล้เคียงกันมาก คือมีความแตกต่าง (Percent difference) เพียง 3.38 – 3.54%

Thomas Hofstaetter (2015) ได้ทำการจำลอง (Simulation) การทำงานของหัวฉีด ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อดูการกระจายความร้อน (Heat distribution) และการไหล (Flow) พบว่าหัวฉีดที่ผลิตจากทองเหลือง (Brass) จะมีการกระจายความร้อนได้ทั่วถึงมากกว่าหัวฉีด ที่ผลิตจากวัสดุอื่นๆ นอกจากนั้นยังพบว่าการไหลของหัวหัวฉีด ที่ผลิตจากทองเหลืองจะมีการไหลที่เสถียร เกิดความแปรปรวน (Turbulence)

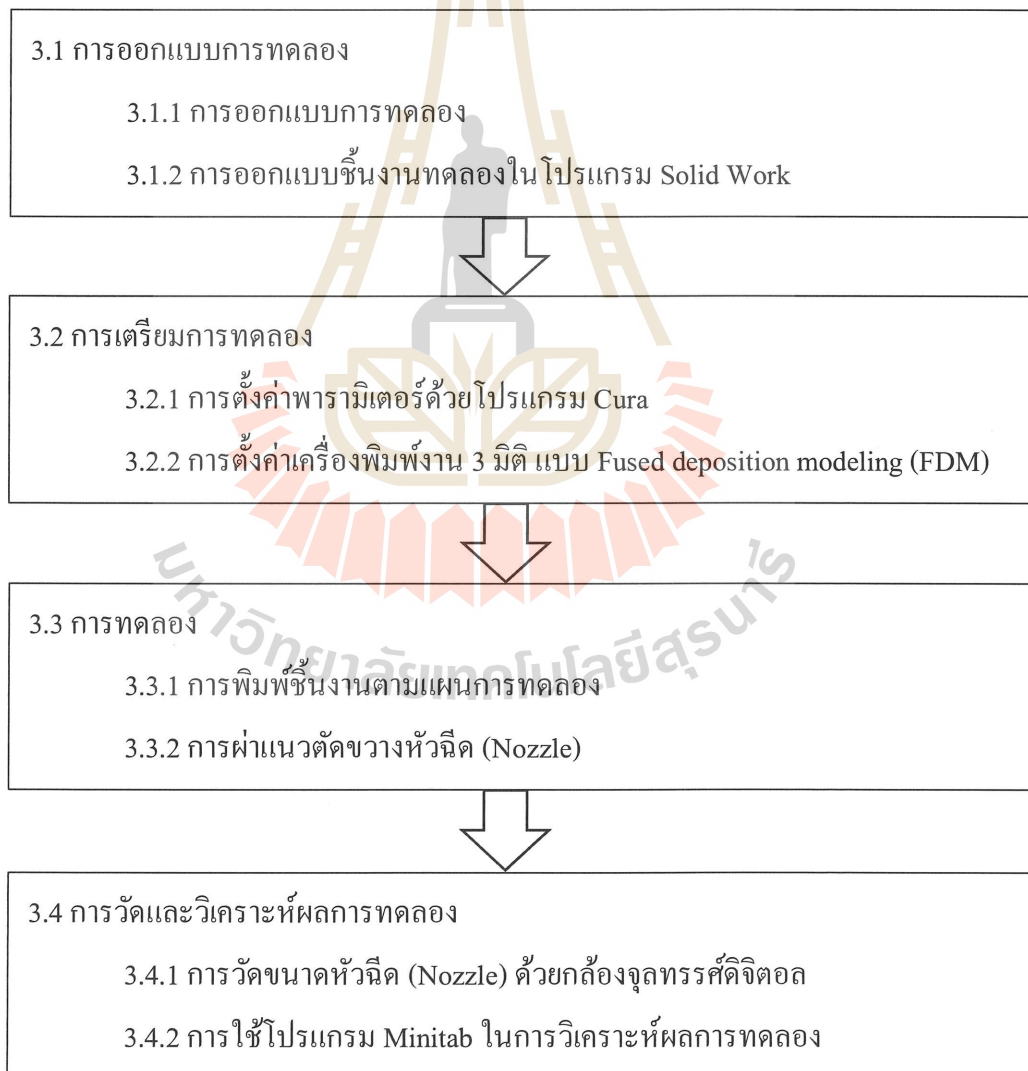
ภายในน้อย ทำให้อัตราการป้อนของเส้นวัสดุมีความสูญเสียน้อยเมื่อวัดค่าเทียบกับอัตราการไหล
ซึ่งจะส่งผลดีต่อความหนาชั้น (Layer thickness), ความกว้าง (Road width) และ ความเร็ว (Speed)
ในการผลิตชิ้นงาน



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

บทนี้นำเสนอการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) ซึ่งสามารถสรุปภาพรวมของการดำเนินงานเป็นแผนภูมิ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบการทดลอง

3.1.1 การออกแบบการทดลอง

ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ในการดำเนินงานวิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบในกรณี 2 ปัจจัย 4 ระดับ (Full Factorial Design Two Two – Level Factors) เป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Combinations) ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อ Response ได้ทั้งแบบ Main effect และ Interaction (Montgomery, 2009) การกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลองพิจารณาจากลักษณะการใช้งานจริงของการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีแบบ FDM เพื่อให้มีแนวโน้มมากพอที่จะส่งผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด ในกรณีนี้ได้มีการกำหนดปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยพิจารณาในการทดลองเป็น 2 ปัจจัย 4 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (factor)	สัญลักษณ์ (Symbol)	ระดับปัจจัย (Level)				หน่วย (Unit)
		1	2	3	4	
อัตราป้อน (Feed rate)	A	25	50	75	100	mm/s
ปริมาณวัสดุ (Volume of material)	B	125	250	375	500	gram

แผนการทดลอง

แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบในกรณี 2 ปัจจัย 4 ระดับ (Full Factorial Design Two Two – Level Factors) จำนวนทดสอบซ้ำ (Replication) 3 ซ้ำ จำนวนครั้งของการทดลองหาได้จาก สมการที่ (3.1)

$$\text{จำนวนครั้งในการทดลอง} = 4^k \times n \quad (3.1)$$

โดยที่

4	คือจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย
k	คือจำนวนปัจจัยที่พิจารณาในการทดลอง
n	คือจำนวนครั้งในการทดลองซ้ำ

ตารางที่ 3.3 ตารางแผนการทดลอง (ต่อ)

Exp. no.	Feed rate	Volume of material	Nozzle Diameter
9	25	125	Y_{113}
10	25	250	Y_{123}
11	25	375	Y_{133}
12	25	500	Y_{143}
13	50	125	Y_{211}
14	50	250	Y_{221}
15	50	375	Y_{231}
16	50	500	Y_{241}
17	50	125	Y_{212}
18	50	250	Y_{222}
19	50	375	Y_{232}
20	50	500	Y_{242}
21	50	125	Y_{213}
22	50	250	Y_{223}
23	50	375	Y_{233}
24	50	500	Y_{243}
25	75	125	Y_{311}
26	75	250	Y_{321}
27	75	375	Y_{331}
28	75	500	Y_{341}
29	75	125	Y_{312}
30	75	250	Y_{322}
31	75	375	Y_{332}
32	75	500	Y_{342}
33	75	125	Y_{313}
34	75	250	Y_{323}
35	75	375	Y_{333}
36	75	500	Y_{343}

ตารางที่ 3.3 ตารางแผนการทดลอง (ต่อ)

Exp. no.	Feed rate	Volume of material	Nozzle Diameter
37	100	125	Y_{411}
38	100	250	Y_{421}
39	100	375	Y_{431}
40	100	500	Y_{441}
41	100	125	Y_{412}
42	100	250	Y_{422}
43	100	375	Y_{432}
44	100	500	Y_{442}
45	100	125	Y_{413}
46	100	250	Y_{423}
47	100	375	Y_{433}
48	100	500	Y_{443}

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เมื่อทำการทดลองตามแผนการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และผลการทดลองจะแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 โดยมี

y_{ijk} แทน Response จากการทดลองที่ระดับ i^{th} ของปัจจัย A ระดับ j^{th} ของปัจจัย B ครั้งที่ k^{th}

ซึ่งจะมีข้อมูลทั้งหมด 48 ตัวจากการทดลอง โดยปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อ Response คงที่ (Fixed Effects) และ Response จากการทดลองสามารถแทนได้ด้วยตัวแบบทางสถิติ ตามสมการที่ (3.2)

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3.2)$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, 4$

$j = 1, 2, 3, 4$

$k = 1, 2, 3$

เมื่อ μ แทน ค่าเฉลี่ยรวมของ Response

τ_i	แทน	อิทธิพลของปัจจัย A ระดับที่ i^{th}
β_j	แทน	อิทธิพลของปัจจัย B ระดับที่ j^{th}
$(\tau\beta)_{ij}$	แทน	อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และปัจจัย B ระดับที่ i^{th} และ j^{th}
ε_{ijk}	แทน	ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง ระดับ i^{th} , j^{th} ครั้งที่ k^{th}

สมการที่ (3.2) อธิบายได้ว่า ค่าของ Response จากการทดลองแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลหลักของปัจจัย A และ B และ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย AB ซึ่งแทนได้ด้วย τ_i, β_j และ $(\tau\beta)_{ij}$ ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ ซึ่งต้องการทดสอบสมมติฐานว่า อิทธิพลของปัจจัย A มีผลหรือไม่ อิทธิพลของปัจจัย B มีผลหรือไม่ และ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B มีผลหรือไม่ โดยการใช้การทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่นัยสำคัญ 0.05 เป็นตัวชี้วัด เขียนเป็นสมมติฐานได้ดังนี้

อิทธิพลของปัจจัย A: อัตราการป้อน (Feed rate) มีผลหรือไม่

สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของอัตราการป้อนไม่มีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

H_1 : อิทธิพลของอัตราการป้อนมีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

โดยที่

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots, \tau_a$

$H_1: \tau_i \neq \tau_j ; i \neq j$ อย่างน้อย 1 คู่

อิทธิพลของปัจจัย B: ปริมาณของวัสดุ (Volume of material) มีผลหรือไม่

สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของปริมาณวัสดุไม่มีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

H_1 : อิทธิพลของปริมาณวัสดุมีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

โดยที่

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots, \beta_b$

$H_1: \beta_i \neq \beta_j ; i \neq j$ อย่างน้อย 1 คู่

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A: อัตราการป้อน (Feed rate) และ B: ปริมาณของวัสดุ (Volume of material) มีผลหรือไม่

สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยไม่มีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

H_1 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

โดยที่

$$H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots, (\tau\beta)_{ab}$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq (\tau\beta)_{kl} ; ij \neq kl \quad \text{อย่างน้อย 1 คู่}$$

ซึ่งในการวิเคราะห์ผลจะใช้ตาราง ANOVA ในโปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองต่อไป

3.1.2 ออกแบบชิ้นงานทดลองในโปรแกรม Solid Work

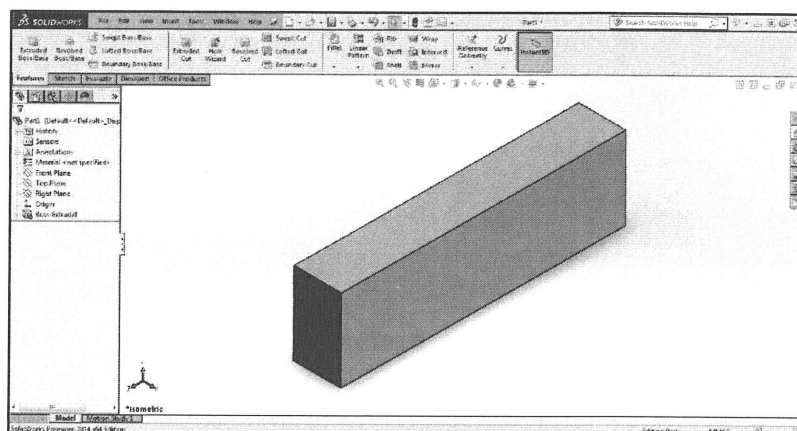
การออกแบบชิ้นงานทดลองได้ออกแบบให้สอดคล้องกับระดับปัจจัยที่กำหนดไว้ คือ ปริมาณของวัสดุ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3) และ (3.4) ดังต่อไปนี้

$$\rho_{SSPLA} = \frac{m}{V} \quad (3.3)$$

$$m = \rho_{SSPLA} \times V \quad (3.4)$$

เมื่อ	ρ_{SSPLA}	คือ ความหนาแน่น (density) ของพลาสติก SSPLA ซึ่งมีค่า 2.38 g/cm ³
	m	คือ ปริมาณของวัสดุ (gram)
	V	คือ ปริมาตรของวัสดุ (cm ³)

เพื่อให้ได้ชิ้นงานทดลองที่มีน้ำหนักชิ้นละ 25 กรัม จึงต้องออกแบบให้มีขนาด 10mm × 17.5mm × 60mm (กว้าง × สูง × ยาว) โดยโปรแกรม Solid Work ถูกนำมาใช้ในการออกแบบชิ้นงานได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เมื่อทำการออกแบบแล้วเสร็จต้องนำออกไฟล์ในนามสกุล .STL เพื่อนำไฟล์ไปตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และสั่งพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ด้วยโปรแกรม Cura ต่อไป



รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบชิ้นงานทดลองโดยโปรแกรม Solid Work



รูปที่ 3.3 แสดงชิ้นงานทดลอง 3 มิติ โดยเครื่อง FDM

3.2 การเตรียมการทดลอง

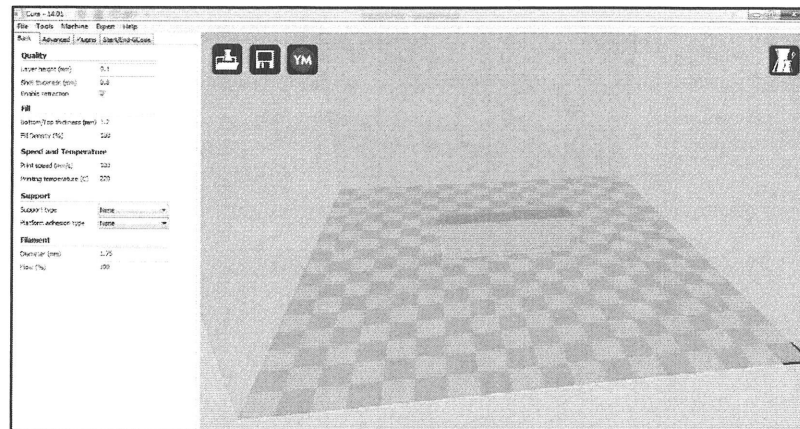
3.2.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม Cura

เป็นขั้นตอนการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำงานร่วมกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM ชิ้นงานที่แปลงไฟล์ในนามสกุล .stl คือข้อมูลนำเข้าของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.4 การตั้งค่าอัตราการป้อน (Feed rate) ซึ่งเป็นปัจจัยในการทดลอง จะถูกกำหนดในขั้นตอนนี้ นอกจากนี้ยังมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมเพื่อให้ผลิตชิ้นงานได้อย่างมีคุณภาพ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ FDM จะใช้โปรแกรม Cura เชื่อมต่อโดยตรงกับเครื่องพิมพ์ มีหน้าที่สั่งงานและควบคุมการทำงานของเครื่อง โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังแสดงใน

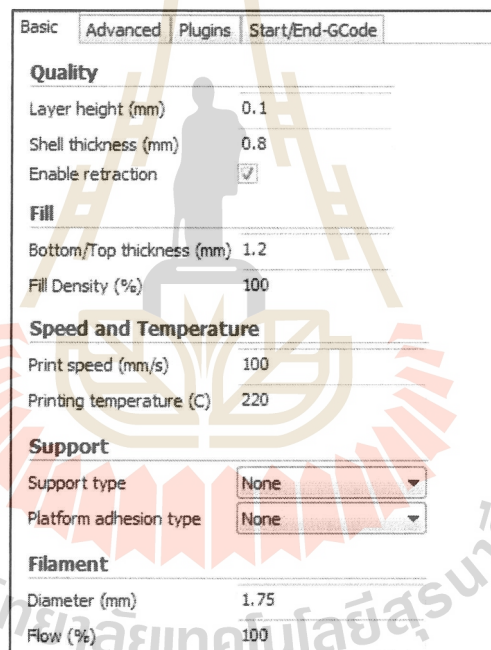
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ในตารางจะถูกกำหนดเป็นค่าพื้นฐาน (Basic) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อดำเนินการในขั้นตอนการตั้งค่าแล้วเสร็จต้องทำการบันทึกข้อมูลของการตั้งค่าเก็บไว้เป็นไฟล์อ้างอิง ทั้งนี้ในทุกครั้งที่ทำการทดลองจะทำการตั้งค่าเหมือนเดิมเสมอ ยกเว้นอัตราการป้อน (Feed rate) ซึ่งเป็นปัจจัยในการทดลอง จะถูกกำหนดตามแผนการทดลองในแต่ละครั้ง

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ในการทำงานของเครื่อง FDM

พารามิเตอร์	ความหมาย
ความสูงของชั้นเลเยอร์ (Layer height)	ใช้ปรับแต่งความละเอียดของความสูงของเส้นวัสดุที่เรียงตัวกันในแต่ละชั้นนับเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการช่วยให้ชิ้นงานที่พิมพ์ออกมามีคุณภาพ
ความหนาขอบ (Shell thickness)	เป็นการระบุความหนาของผนังชิ้นงาน
การถอนวัสดุ (Enable retraction)	ความสามารถในการถอนหรือหมุนเส้นวัสดุกลับเมื่อหัวฉีดเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในขณะที่พิมพ์ชิ้นงาน
ความหนาบน/ล่าง (Bottom/top thickness)	ใช้ปรับความหนาของพื้นผิวด้านล่างและด้านบน
ความหนาแน่น (Fill density)	ใช้ปรับค่าความหนาแน่นของเนื้อชิ้นงาน
ความเร็วการพิมพ์ (Print Speed)	เป็นการระบุความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน
อุณหภูมิพิมพ์งาน (Print temperature)	ใช้กำหนดอุณหภูมิในการพิมพ์
รูปแบบโครงสร้างรองรับ (Support type)	เป็นการกำหนดรูปแบบของโครงสร้างรองรับ
ประเภทการยึด (Platform adhesion type)	เป็นการกำหนดประเภทการยึดเส้นโครงร่างของโครงสร้างรองรับ
ขนาดเส้นวัสดุ (Filament diameter)	เป็นการกำหนดขนาดเส้นวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์งาน
อัตราการไหล (Filament flow)	เป็นการกำหนดอัตราการป้อนเส้นวัสดุ



รูปที่ 3.4 โปรแกรม Cura



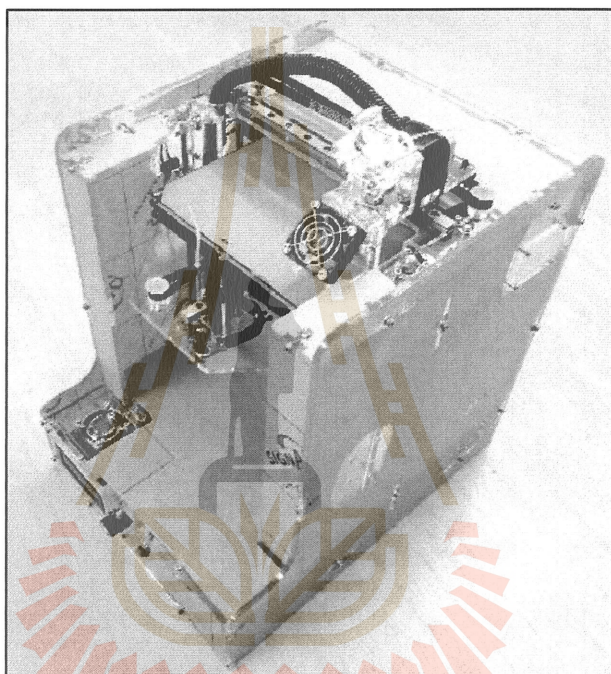
รูปที่ 3.5 แสดงการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรม Cura

3.2.2 เครื่องพิมพ์งาน และการตั้งค่าเครื่องพิมพ์งาน 3 มิติ แบบ Fused Deposition

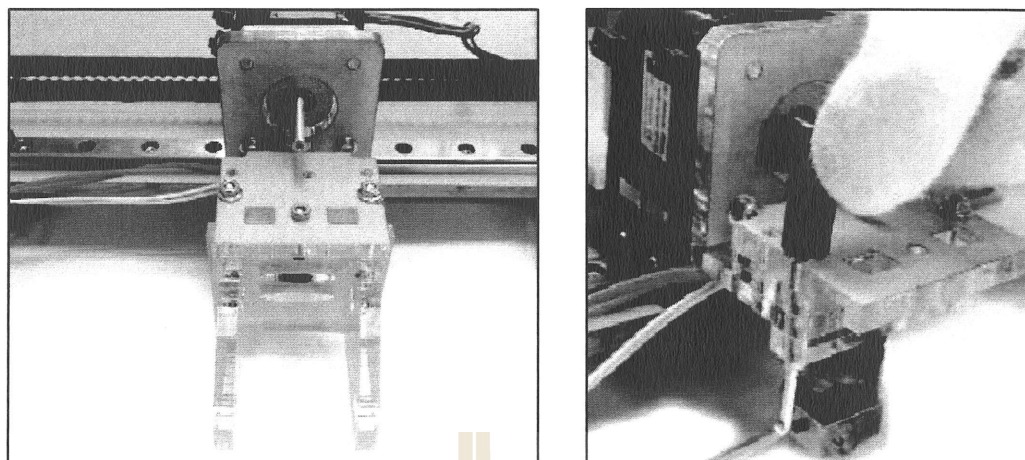
Modeling (FDM)

ในการวิจัยใช้เครื่องพิมพ์งาน 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) ประเภท Cartesian ยี่ห้อ Inventor-3D เครื่องจะทำงานโดยการยึด (Fix) แกนในการเคลื่อนที่ของหัวฉีดใน แกน X, Y วิ่งได้ซ้ายขวา หน้าหลัง ส่วนฐานพิมพ์นั้นจะเคลื่อนที่ใน แกนแนว Z คือเคลื่อนที่ขึ้นลง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากแผนการทดลอง เมื่อดำเนินการทดลองได้ตามค่าที่กำหนดไว้ในแต่ละ

ระดับของปัจจัย จะเปลี่ยนใช้หัวฉีดใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานก่อนเริ่มการทดลองในระดับปัจจัยที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นหัวฉีดจะถูกนำไปผ่าตามแนวตัดขวาง และวัดค่าความสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์ ในขั้นตอนการเปลี่ยนหัวฉีด จะต้องถอดชุดหัวฉีด (Extrusion set) ออกโดยใช้ประแจขัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และในขั้นตอนการประกอบเข้าต้องทำการปรับระดับหัวฉีดขึ้นงานให้เหมาะสม ซึ่งต้องทำในทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนหัวฉีด โดยในการปรับระดับชุดหัวฉีดจะใช้กระดาษแข็งในการเทียบเพื่อปรับระดับของหัวฉีด ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 เครื่องพิมพ์งาน 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling (FDM)



รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนหัวฉีด (Nozzle)



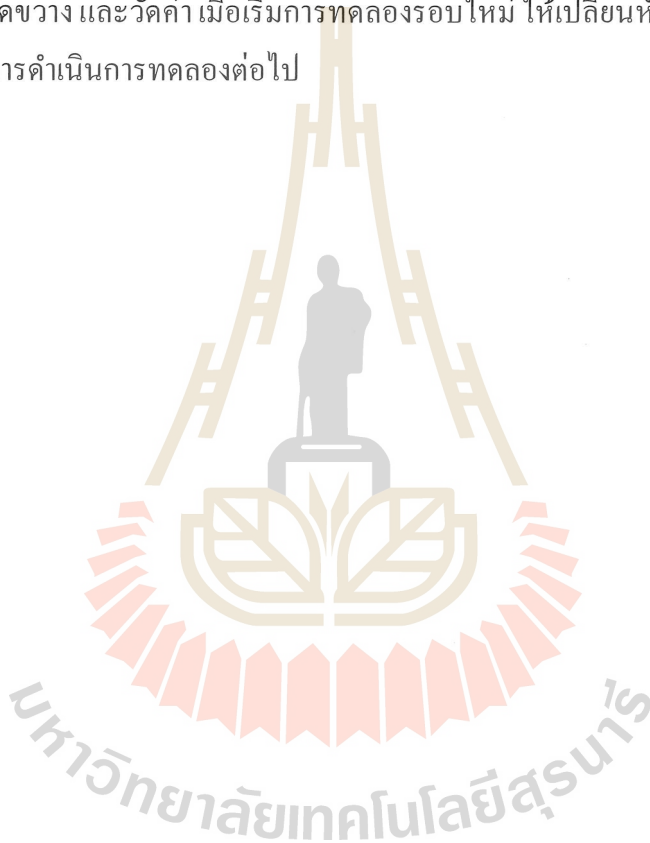
รูปที่ 3.8 แสดงการปรับระดับชุดหัวฉีดโดยใช้กระดาษแข็ง

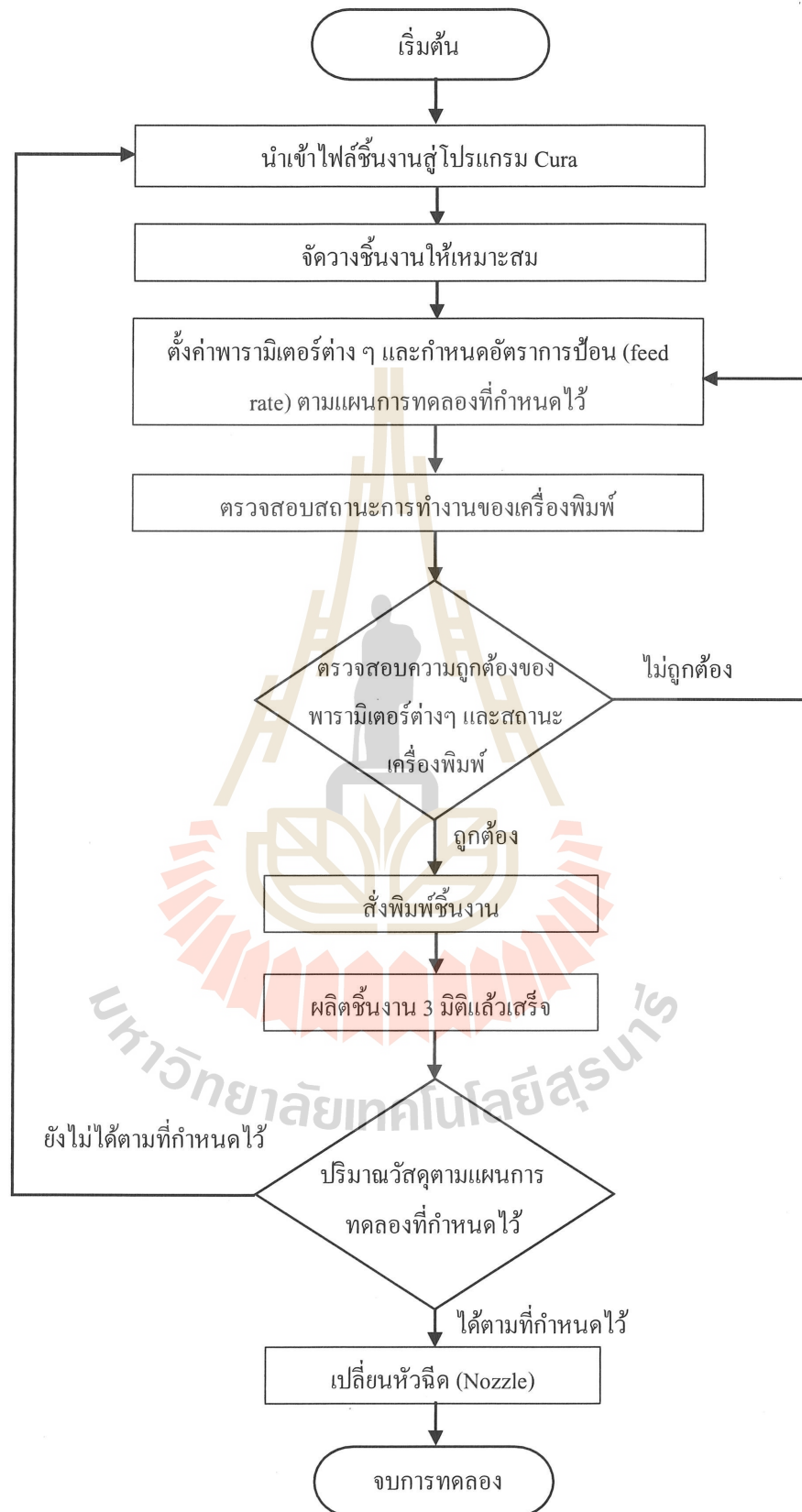
3.3 การทดลอง

3.3.1 การพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์งาน 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling

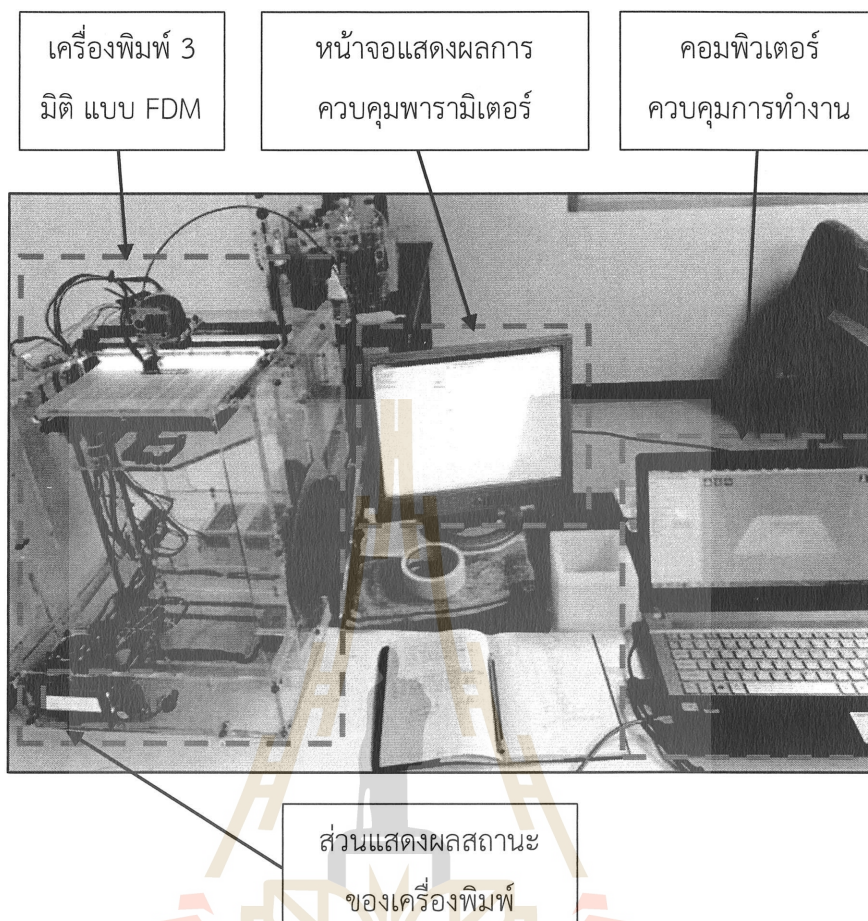
การดำเนินการพิมพ์ชิ้นงานมีองค์ประกอบในการดำเนินงานดังนี้ 1) เครื่องพิมพ์งาน 3 มิติแบบ FDM 2) จอแสดงผล 3) ตอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน และ 4) จอแสดงสถานะเครื่องพิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 การพิมพ์ชิ้นงานมีการดำเนินการเป็นขั้นตอนตามแผนการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทดลองเริ่มต้นด้วยการนำเข้าไฟล์ชิ้นงานสู่โปรแกรม Cura จัดวางชิ้นงานและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการทำงานตามแต่ละระดับปัจจัย ตรวจสอบสถานะการทำงานของ

เครื่องพิมพ์และความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องก่อนสั่งพิมพ์ชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 การตรวจสอบในขั้นตอนนี้เป็นการตรวจเพื่อควบคุมการพิมพ์ชิ้นงานให้ตรงกับพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ เมื่อตรวจสอบความถูกต้องแล้วเสร็จดำเนินการสั่งพิมพ์ชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เครื่องจะเริ่มทำงานจนได้ชิ้นงาน 3 มิติ ขั้นตอนที่ต่อไปคือการตรวจสอบปริมาณวัสดุตามแผนการทดลองหากตรวจสอบแล้วพบว่ายังไม่ได้ปริมาณตามที่กำหนดไว้ จะต้องดำเนินการทดลองอีกครั้ง และสั่งพิมพ์ซ้ำ จนได้ปริมาณวัสดุตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ เมื่อได้ปริมาณวัสดุตามแผนการทดลอง ให้หยุดเครื่อง และรอให้ชุดหัวฉีด (Extrusion set) มีอุณหภูมิลดลง ทำการเปลี่ยนหัวฉีดเพื่อนำไปผ่าแนวตัดขวาง และวัดค่า เมื่อเริ่มการทดลองรอบใหม่ ให้เปลี่ยนหัวฉีด ปรับระดับหัวฉีดให้พร้อมสำหรับการดำเนินการทดลองต่อไป

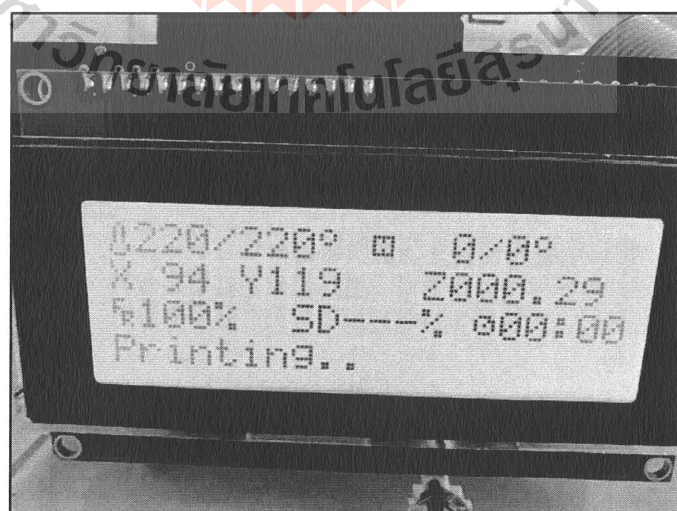




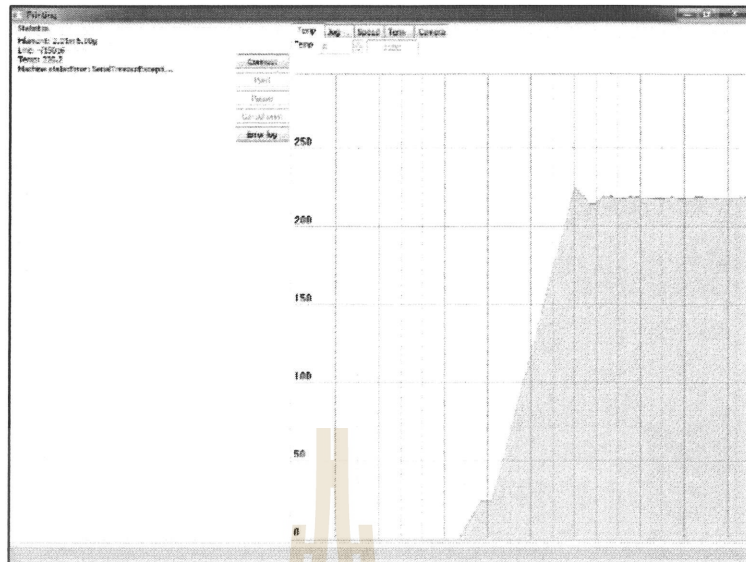
รูปที่ 3.9 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการพิมพ์งานตามแผนการทดลอง



รูปที่ 3.10 แสดงการดำเนินการพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling



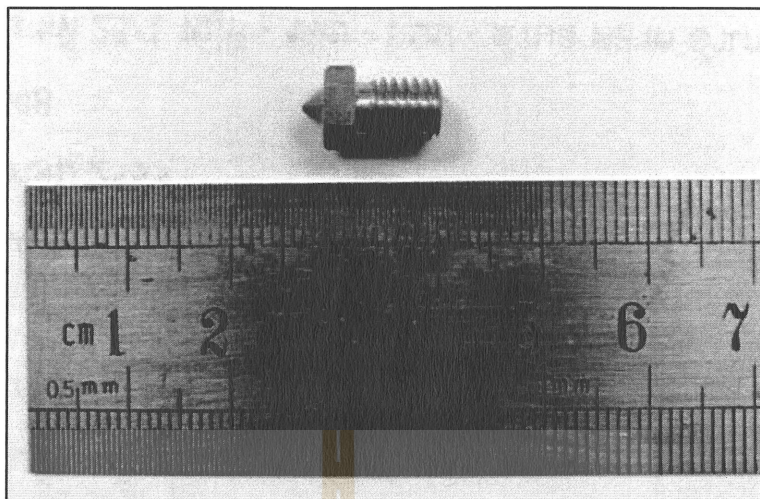
รูปที่ 3.11 หน้าจอแสดงสถานะการทำงานของเครื่องพิมพ์



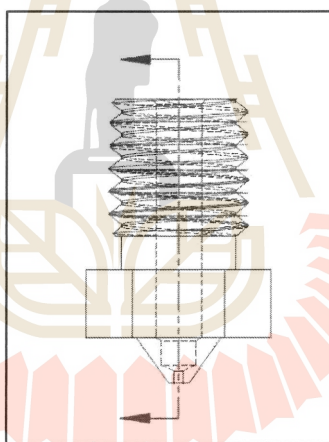
รูปที่ 3.12 หน้าต่างโปรแกรมสำหรับคำสั่งพิมพ์งาน

3.3.2 การผ่าแนวตัดขวางหัวฉีด (Nozzle)

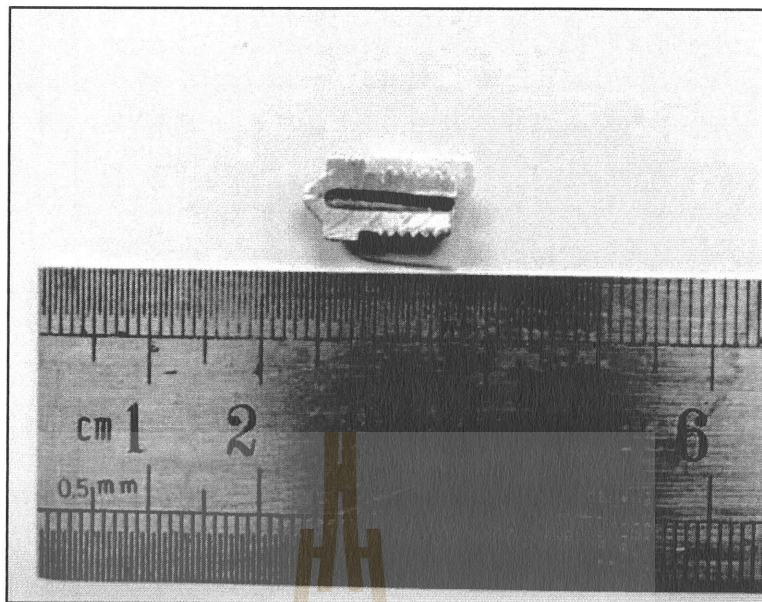
หัวฉีด (Nozzle) ที่ใช้ในเครื่องพิมพ์งาน 3 มิติ แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) มีหลายขนาด ที่นิยมใช้ส่วนใหญ่มีขนาดดังนี้ 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm และ 0.5 mm ซึ่งในการวิจัยจะใช้หัวฉีดขนาด 0.4 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.13 สามารถใช้ผลิตงานด้วยเส้นวัสดุ (material filament) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75 mm จากการทดลองเมื่อดำเนินการทดลองแล้วเสร็จในแต่ละการทดลองจะวัดค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (Nozzle Diameter) โดยการผ่าแนวตัดขวางหัวฉีด (Cross section cutting) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ด้วยเครื่องกัด (Milling machine) เพื่อให้สามารถวัดขนาดของหัวฉีดที่ผ่านการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 3.15 ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล



รูปที่ 3.13 หัวฉีด (Nozzle) ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 3.14 ลักษณะการผ่าแนวตัดขวาง (Cross section cutting)



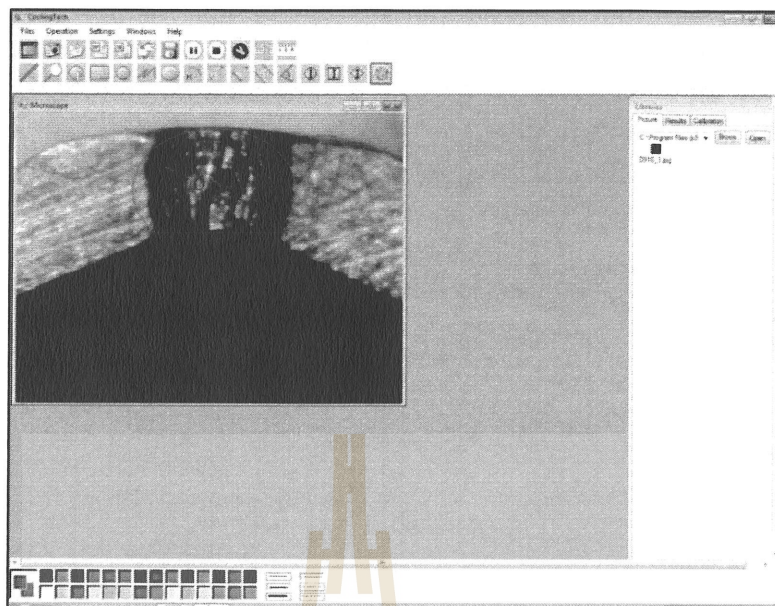
รูปที่ 3.15 หัวฉีด (Nozzle) ที่ได้จากการผ่าแนวตัดขวาง

3.4 การวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.1 การวัดขนาดหัวฉีด (Nozzle Diameter) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

ในขั้นตอนการวัดขนาดหัวฉีด (Nozzle diameter) นั้นจะใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลในการวัดขนาดและถ่ายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และนำค่าที่ได้จากการวัดผลบันทึกลงในตารางเก็บผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินมิดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบความพร้อมของกล้องจุลทรรศน์และอุปกรณ์ต่างๆ
2. ทำการถ่ายรูปชิ้นงาน โดยเฉพาะรูปส่วนปลายของหัวฉีด
3. ใช้โปรแกรมของกล้องจุลทรรศน์วัดขนาดของรูส่วนปลายของหัวฉีด (Nozzle diameter)



รูปที่ 3.16 แสดงการวัดขนาดโดยโปรแกรมของกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

3.4.2 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

โปรแกรม Minitab ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ เพื่อศึกษาอัตรา การป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) รายละเอียดในการวิเคราะห์ ผลได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.1 ในการดำเนินการใช้โปรแกรม Minitab 17 Free Trial ซึ่งมีขั้นตอน หลักในการดำเนินการดังนี้

1. สร้างแฟ้มงาน เวิร์คชีท และออกแบบตารางการทดลอง
2. ทำการกรอกข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
3. วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยฟังก์ชัน ANOVA Two Way
4. ใช้ตาราง ANOVA ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง
5. ใช้กราฟต่างๆ ของ Residual และค่า fitted ของตัวแบบ Regression ในการวิเคราะห์ผล การทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้นำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยการวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์หัตถิพลของอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) และการวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM)

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยแสดงในภาคผนวกที่ 1 โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงผลของการดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองโดยแสดงเป็นขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter) และขนาดของหัวฉีดเฉลี่ย ($\bar{D}$) ที่ผ่านการใช้งานตามอัตราการป้อน (Feed rate) และ ปริมาณ วัสดุ (Volume of Material) ในระดับต่างๆ 4 ระดับ และจำนวนทดสอบซ้ำ (Replication) 3 ซ้ำ

ตารางที่ 4.1 ขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

Nozzle diameter (mm)		B: Volume of material (g)															
		125				250				375				500			
		n1	n2	n3	$\bar{D}_1$	n1	n2	n3	$\bar{D}_1$	n1	n2	n3	$\bar{D}_1$	n1	n2	n3	$\bar{D}_1$
A: Feed rate (mm/s)	25	0.48	0.53	0.64	0.55	0.46	0.55	0.83	0.61	0.47	0.68	0.78	0.64	0.55	0.63	0.80	0.66
	50	0.53	0.64	0.80	0.66	0.54	0.61	0.96	0.70	0.54	0.81	0.95	0.77	0.62	0.80	0.94	0.79
	75	0.58	0.69	0.89	0.72	0.59	0.71	1.05	0.78	0.58	0.86	1.08	0.84	0.70	0.87	1.04	0.87
	100	0.62	0.74	0.98	0.78	0.63	0.77	1.14	0.85	0.67	0.94	1.11	0.91	0.75	0.93	1.12	0.93

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 อิทธิพลของอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 แสดงผลการบันทึกข้อมูลของขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter) ที่ผ่านการพิมพ์งานตามระดับปัจจัย นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดของหัวฉีดที่มีนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) (Kohout, 1974) ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ Minitab 17 ดังแสดงในการวิเคราะห์ต่อไปนี้

4.2.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) เพื่อศึกษาหาปัจจัย อัตราการป้อน (Feed Rate) และ ปริมาณของวัสดุ (volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM) ซึ่งสามารถนำผลการทดลองในตารางที่ 4.1 มาคำนวณโดยใช้โปรแกรม Minitab ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1

Factor Information						
Factor	Levels	Values				
feed rate	4	25, 50, 75, 100				
vol of mat	4	125, 250, 375, 500				
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	15	1.70746	0.113831	393.08	0.000	
Linear	6	1.67880	0.279800	966.22	0.000	
feed rate	3	0.41576	0.138586	478.57	0.000	
vol of mat	3	1.26304	0.421014	1453.86	0.000	
2-Way Interactions	9	0.02866	0.003184	11.00	0.000	
feed rate*vol of mat	9	0.02866	0.003184	11.00	0.000	
Error	32	0.00927	0.000290			
Total	47	1.71672				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0.0170171	99.46%	99.21%	98.79%			

รูปที่ 4.1 แสดงตาราง ANOVA ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

จากผลการคำนวณโดยโปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 4.1 นำมาวิเคราะห์ผลได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางการวิเคราะห์ ANOVA

Source of variation	Sum of squares (SS)	Degree of freedom	Mean square (MS)	F_0	F_{α,v_1,v_2}	P-value
A	0.41576	3	0.138586	478.57	$F_{0.05,3,32} = 2.92$	0.000
B	1.26304	3	0.421014	1453.86	$F_{0.05,3,32} = 2.92$	0.000
AB	0.02866	9	0.003184	11	$F_{0.05,9,32} = 2.21$	0.000
Error	0.00927	32	0.000290			
Total	1.71672	47				

จากการที่สัดส่วนของค่าเฉลี่ยความผันแปร (F_0) มีพฤติกรรมที่อธิบายและหาค่าได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ว่าอิทธิพลจากปัจจัย A, B และ AB มีผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ จะประเมินจากเกณฑ์ของค่า F วิฤต คือ F_{α,v_1,v_2} เมื่อ V_1 แทน Degree of freedom ของค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัย (Mean square) ของตัวตั้ง และ V_2 แทน Degree of freedom ของค่า Error ซึ่งค่า F วิฤตสามารถหาได้จากการใช้ตาราง Percentage point of the F Distribution ซึ่งแสดงในภาคผนวก ค

ในการวิเคราะห์ผล ซึ่งต้องการทดสอบสมมติฐานว่า อิทธิพลของปัจจัย A มีผลหรือไม่ อิทธิพลของปัจจัย B มีผลหรือไม่ และ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A และ B มีผลหรือไม่ โดยการใช้การทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่นัยสำคัญ 0.05 เป็นตัวชี้วัดโดยจะปฏิเสธสมมติฐานหลักเมื่อค่า F_0 มีค่ามากกว่า F_{α,v_1,v_2} ซึ่งมีผลการทดสอบสมมติฐานดังนี้

อิทธิพลของปัจจัย A: อัตราการป้อน (Feed rate) มีผลหรือไม่
สมมุติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของอัตราการป้อนไม่มีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

H_1 : อิทธิพลของอัตราการป้อนมีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

ปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 เนื่องจากค่า $F_0 = 478.57$ มากกว่า ค่า $F_{0.05,3,32} = 2.92$ และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

อิทธิพลของปัจจัย B: ปริมาณของวัสดุ (Volume of material) มีผลหรือไม่

สมมุติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของปริมาณวัสดุไม่มีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

H_1 : อิทธิพลของปริมาณวัสดุมีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

ปฏิเสธสมมุติฐานหลัก H_0 เนื่องจากค่า $F_0 = 1453.86$ มากกว่า ค่า $F_{0.05,3,32} = 2.92$ และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A: อัตราการป้อน (Feed rate) และ B: ปริมาณของวัสดุ (Volume of material) มีผลหรือไม่

สมมุติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยไม่มีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

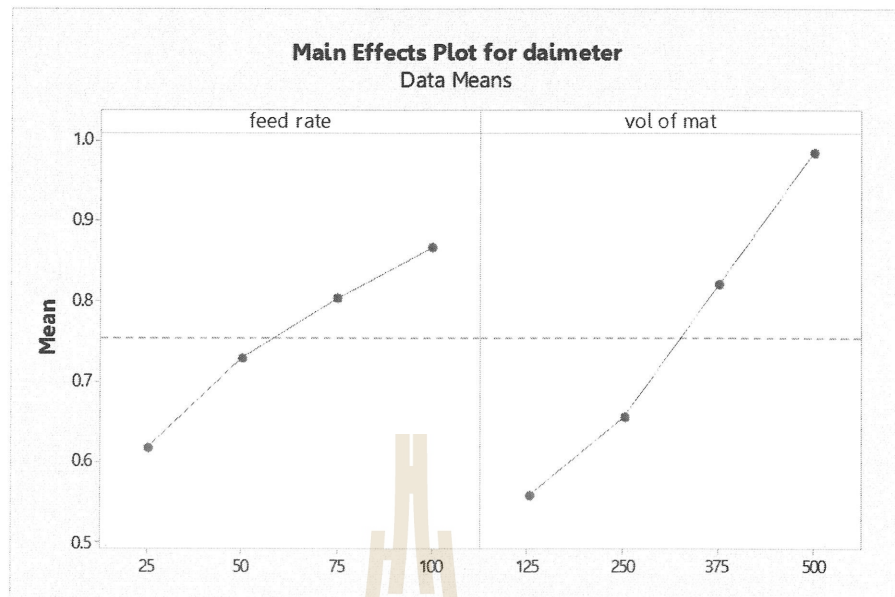
H_1 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีผลต่อขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter)

ปฏิเสธสมมุติฐานหลัก H_0 เนื่องจากค่า $F_0 = 11$ มากกว่า ค่า $F_{0.05,9,32} = 2.21$ และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าเป็นปัจจัยอัตราการป้อน ปริมาณของวัสดุ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของอัตราการป้อน และปริมาณของวัสดุ มีอิทธิพลต่อขนาดของหัวฉีด

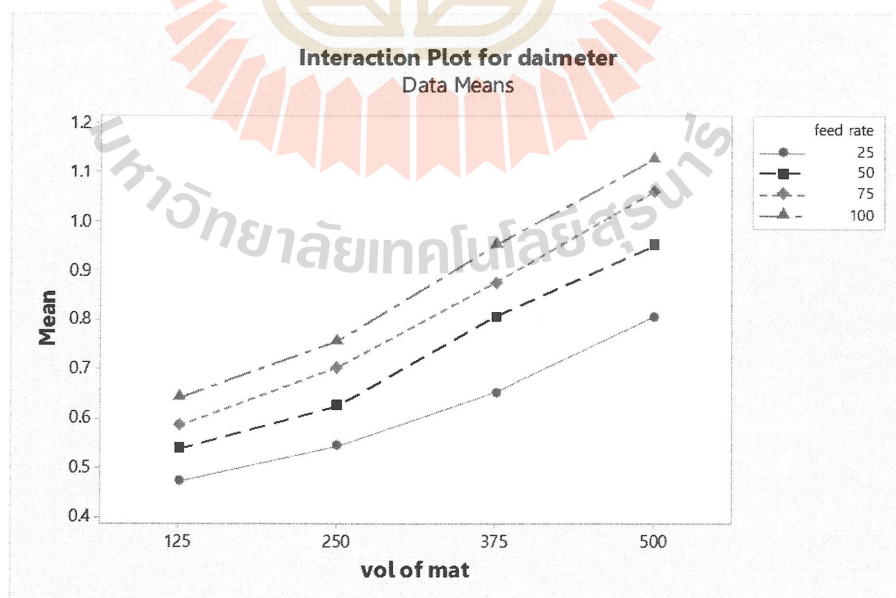
4.2.1.2 วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อขนาดของหัวฉีด

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยตาราง ANOVA แสดงให้เห็นอย่างมีนัยสำคัญว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อขนาดของหัวฉีด เช่นเดียวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดของหัวฉีด เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟระหว่างของหัวฉีดกับระดับปัจจัยของปัจจัยหลักและปัจจัยรวมจะแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลของปัจจัยในลักษณะเชิงเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.2 , 4.3 และ 4.4

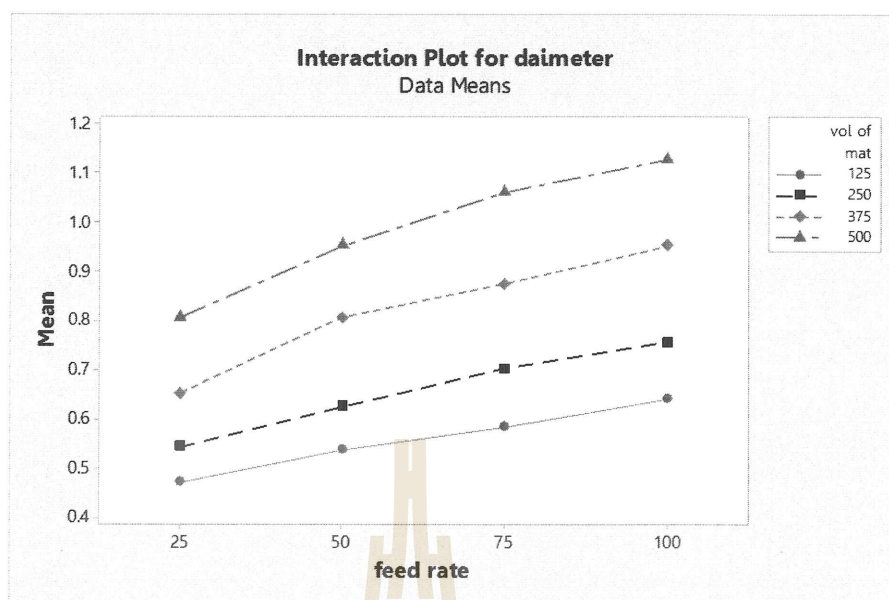


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงขนาดของหัวฉีดกับระดับปัจจัยของปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย

พิจารณากราฟในรูปที่ 4.2 พบว่ากราฟแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลของอัตราการป้อน (Feed rate) และปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในลักษณะเส้นตรง ตีความได้ว่า เมื่อค่าของอัตราการป้อนเพิ่มขึ้นขนาดของหัวฉีดจะเพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกับกราฟของปริมาณวัสดุ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงขนาดของหัวฉีดกับระดับปัจจัยของอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณวัสดุ (Volume of material) และอัตราการป้อน (Feed rate)

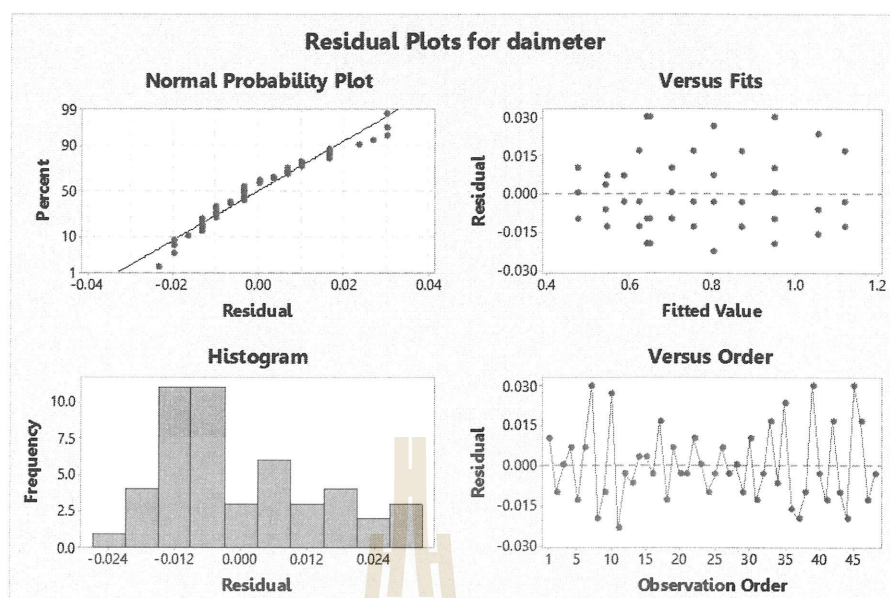


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงขนาดของหัวฉีดกับระดับปัจจัยของอิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการป้อน (Feed rate) และปริมาณวัสดุ (Volume of material)

พิจารณากราฟในรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่ากราฟแสดงให้เห็นผลของอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัย ในลักษณะเส้นตรง ที่มีลักษณะของเส้นกราฟและแนวโน้มของเส้นกราฟใกล้เคียงกันทุกระดับปัจจัย ดีความได้ว่า เมื่อค่าของอัตราการป้อนและปริมาณวัสดุเพิ่มขึ้นขนาดของหัวฉีดจะเพิ่มขึ้นในแนวโน้มเดียวกัน

4.2.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองโดยการนำข้อมูลมาพล็อตกราฟ 4 กราฟด้วยโปรแกรม Minitab คือกราฟ Normal probability, กราฟ Versus fits, กราฟแท่ง Histogram และกราฟ Versus order ซึ่งผลการตรวจสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) ของขนาดหัวฉีด (Nozzle diameter)

จากรูปที่ 4.5 กราฟ Normal probability แสดงการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของของ Residual มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ยกเว้นตอนต้นและตอนปลายของกราฟที่มีการกระจายตัวอยู่ห่างจากแนวเส้น แต่ไม่มากนัก โดยภาพรวมของข้อมูลอยู่ในแนวเส้น ทำให้ประมาณได้ว่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ กราฟ Histogram พบว่ามีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ ค่า Residual มีการแจกแจงแบบปกติ กราฟ Versus fits และกราฟ Versus order แสดงการกระจายตัวของ Residual ในแต่ละระดับปัจจัยที่กระจายตัวในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกันทั้งสองกราฟ จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของ Residual มีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าข้อมูลของตัวอย่างการทดลองมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ

4.2.1.4 การตรวจสอบความผันแปรจากการการวัดค่า

การตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้นด้วยการพิจารณาการกระจายของข้อมูล โดยใช้แผนภูมิควบคุมค่าพิสัย ซึ่งจะใช้ในการวัดความผันแปรของข้อมูล หากค่าพิสัยที่ได้มีค่าน้อย (ความผันแปรต่ำ) แสดงว่ากระบวนการทดลองคงที่ โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะได้ผลการทดลองที่มีความเที่ยงตรงมาก แต่ในทางตรงกันข้าม หากค่าพิสัยที่ได้มีค่ามาก (ความผันแปรสูง) แสดงว่ากระบวนการทดลองไม่คงที่ โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะได้ผลการทดลองที่มีความเที่ยงตรงน้อย

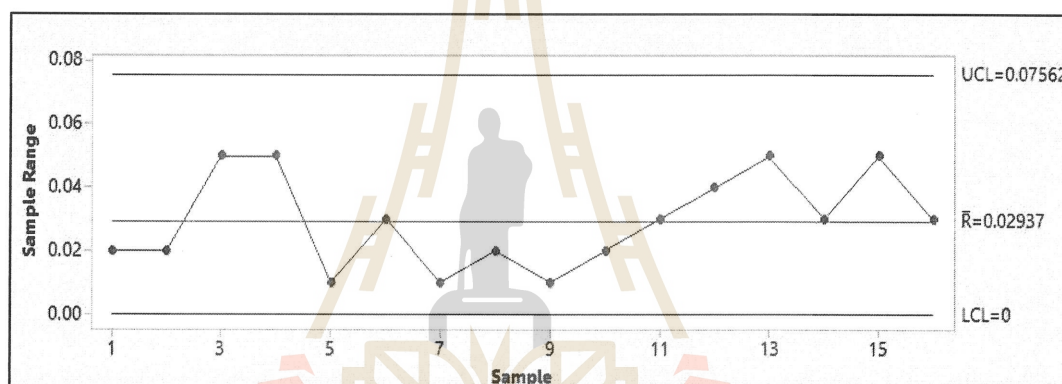
ผลจากการทดลอง สามารถนำมาคำนวณค่าพิสัย (R) และค่าพิสัยเฉลี่ย (R bar) โดยการคำนวณใช้โปรแกรม Minitab ในการคำนวณค่าพิสัยเฉลี่ย (R bar) (ดังแสดงในภาคผนวก X) เพื่อนำไปสร้างแผนภูมิควบคุมค่าพิสัยดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยการกำหนดขอบเขตควบคุมในแผนภูมิสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$LCL = R \text{ bar} * D3 = 0.02937 * 0 = 0$$

$$CL = R \text{ bar} = 0.02937$$

$$UCL = R \text{ bar} * D4 = 0.02937 * 2.114 = 0.07562$$

ค่า D3 และ D4 สามารถหาได้จากตารางค่าคงที่สำหรับแผนภูมิควบคุม (Factor for control chart) ในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.6 แผนภูมิค่าควบคุมพิสัย

จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าพิสัย (R) ทุกค่าอยู่ในขอบเขตการควบคุม (Control limit) ถึงแม้ข้อมูลจะมีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) อยู่เล็กน้อย แต่ข้อมูลมาจากประชากรเดียวกัน ถือว่ามีความแตกต่างกันน้อยมากจนสามารถประมาณได้ว่าไม่มีความแตกต่างกัน ฉะนั้นจึงสามารถนำข้อมูลทั้ง 3 ข้อมูลมาเฉลี่ยรวมกันได้

4.3 อัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate)

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในส่วนที่แล้วทำให้พบว่า การผลิตชิ้นงานด้วยวัสดุผสม (composite material) ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุผสมระหว่างพลาสติก PLA ผสมกับสแตนเลสสตีลนั้น ส่งผลต่อขนาดของหัวฉีด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear) ซึ่งบริเวณส่วนปลายอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อเทียบกับหัวฉีดที่ยังไม่ผ่านการพิมพ์งานดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากผลการทดลองจะพบว่าการสึกหรอที่บริเวณส่วนปลายของ

หัวฉีดและมีลักษณะการสึกหรอรูปโดม (Dome shape) และจากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two-Way ANOVA) สามารถสรุปได้ชัดเจนจากผลการวิเคราะห์ว่าปัจจัยของอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (volume of material) มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate) ซึ่งจากผลการทดลองสามารถวัดอัตราการสึกหรอ (wear rate) ได้จากสมการที่ (4.1)

$$\text{Wear rate}(\%) = \left(\frac{|D_0 - D_1|}{D_0} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ D_0 คือ ขนาดของหัวฉีดก่อนพิมพ์ชิ้นงาน (nozzle diameter before print specimen)
 D_1 คือ ขนาดของหัวฉีดหลังพิมพ์ชิ้นงาน (nozzle diameter after print specimen)



รูปที่ 4.7 หัวฉีด (Nozzle) ที่ยังไม่ผ่านการพิมพ์งาน



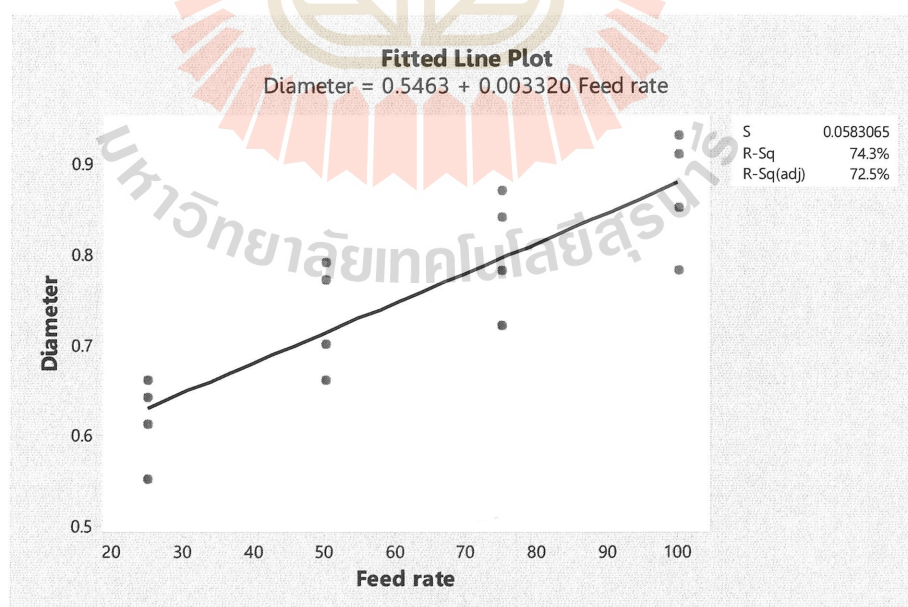
รูปที่ 4.8 หัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการพิมพ์งานด้วยวัสดุผสม

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงผลของการดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองโดยแสดงเป็นขนาดของหัวฉีด (Nozzle diameter) และขนาดของหัวฉีดเฉลี่ย ($\bar{D}$) ที่ผ่านการใช้งานตามอัตราการป้อน (Feed rate) และ ปริมาณวัสดุ (Volume of Material) ในระดับต่างๆ 4 ระดับ และจำนวนทดสอบซ้ำ (Replication) 3 ซ้ำ มาสรุปใหม่ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลการทดลองเฉลี่ย ($\bar{D}$) ของขนาดของหัวฉีด

($\bar{D}$) : Diameter (mm)		B : Volume of material (g)			
		125	250	375	500
A : Feed rate (mm/s)	25	0.55	0.61	0.64	0.66
	50	0.66	0.70	0.77	0.79
	75	0.72	0.78	0.84	0.87
	100	0.78	0.85	0.91	0.93

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตกราฟ Regression line plot เพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์จะได้ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 จากนั้นทำการพิจารณาลักษณะของเส้นกราฟ แนวโน้มของจุดพล็อตและตรวจสอบค่าค่า R-Sq ค่า R-Sq(adj) ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ อัตราการป้อน (Feed rate)

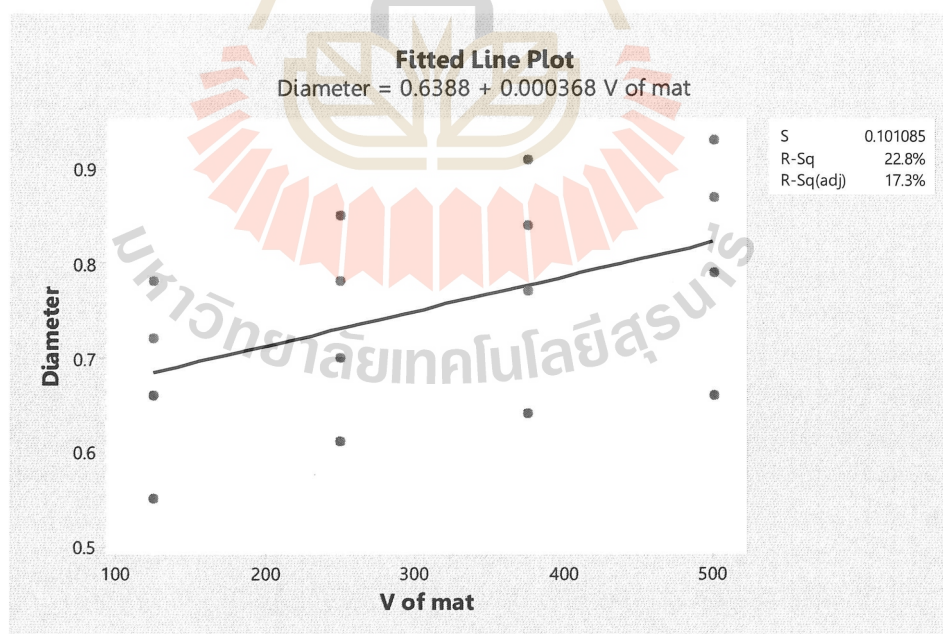
พิจารณากราฟในรูปที่ 4.9 จะพบว่า กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง และจุดทุกจุดในกราฟ แสดงลักษณะร่วมคือมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน มีค่า R-Sq เป็น 74.3% และมีค่า R-Sq(adj) เป็น 72.5% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้ ซึ่งจากกราฟได้ตัวแบบคณิตศาสตร์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$D_1 = C_F + m_F F + e \quad (4.2)$$

ดังนั้น

$$D_1 = 0.5463 + 0.00332F + e \quad (4.3)$$

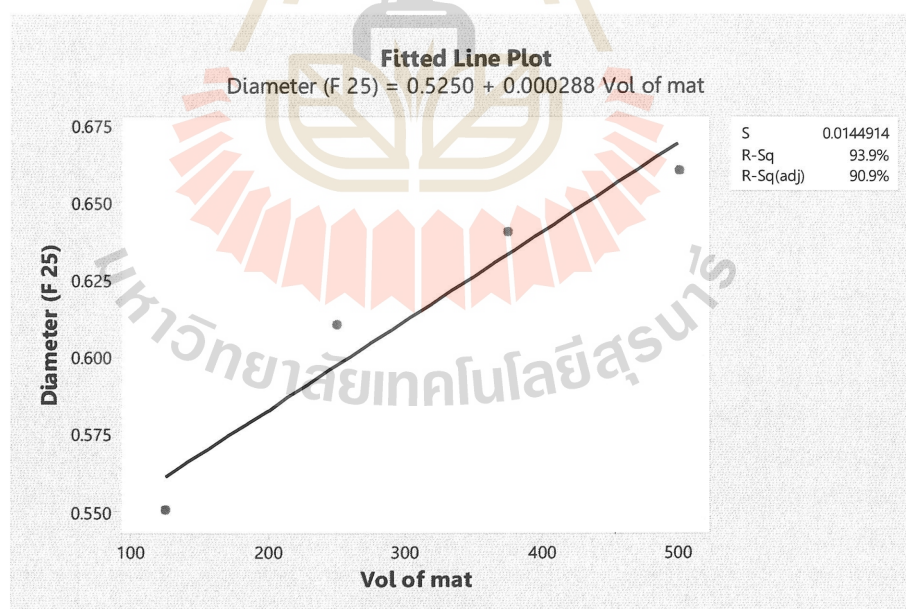
- เมื่อ D_1 คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน
 C_F คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Response) มีค่าเท่ากับ 0.5463
 m_F คือ อิทธิพลของปัจจัย มีค่าเท่ากับ 0.00332
 F คือ อัตราป้อน (Feed rate)
 e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนการทดลอง



รูปที่ 4.10 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material)

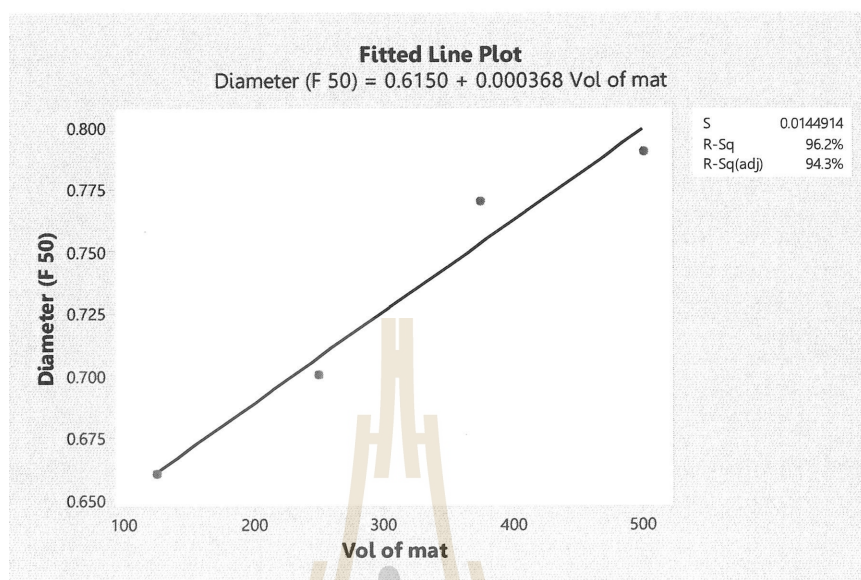
พิจารณากราฟในรูปที่ 4.10 จะพบว่า กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง และจุดทุกจุดในกราฟแสดงลักษณะร่วมคือมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน แต่มีค่า R-Sq เป็น 22.8 และค่า R-Sq(adj) เป็น 17.3% ซึ่งมีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นไม่สามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้ดีพอ ซึ่งลักษณะดังกล่าวไม่ได้แปลความหมายว่าผลการทดลองไม่สามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้ เพราะค่า R-Sq คือตัวสถิติที่ใช้วัดว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้นี้มีความสมรूपกับข้อมูลมากน้อยอย่างไร ซึ่งจากกราฟในรูปที่ 4.10 แสดงผลว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้ไม่มีสมรूपและแม่นยำพอที่จะอธิบายความผันแปรทั้งหมดได้ Montgomery (2001) และ Montgomery (2005) ดังนั้นจึงต้องแบ่งช่วงของ regression fitted line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ใหม่ เพื่อเพิ่มความสมรूपและความแม่นยำของตัวแบบคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถแบ่งช่วงของ regression fitted line plot ระหว่าง ขนาดของหัวฉีดกับปริมาณวัสดุตามระดับของอัตราการผลิตได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 ดังนี้

ช่วงระดับอัตราการผลิต (Feed rate) ที่ 25 mm/s ได้กราฟดังรูปที่ 4.11



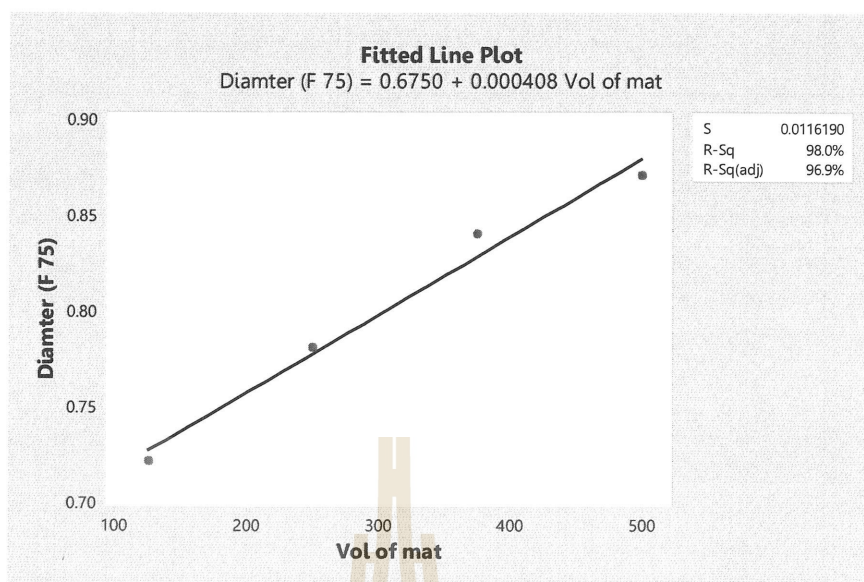
รูปที่ 4.11 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในช่วงระดับอัตราการผลิต (Feed rate) ที่ 25 mm/s

ช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 50 mm/s ได้กราฟดังรูปที่ 4.12



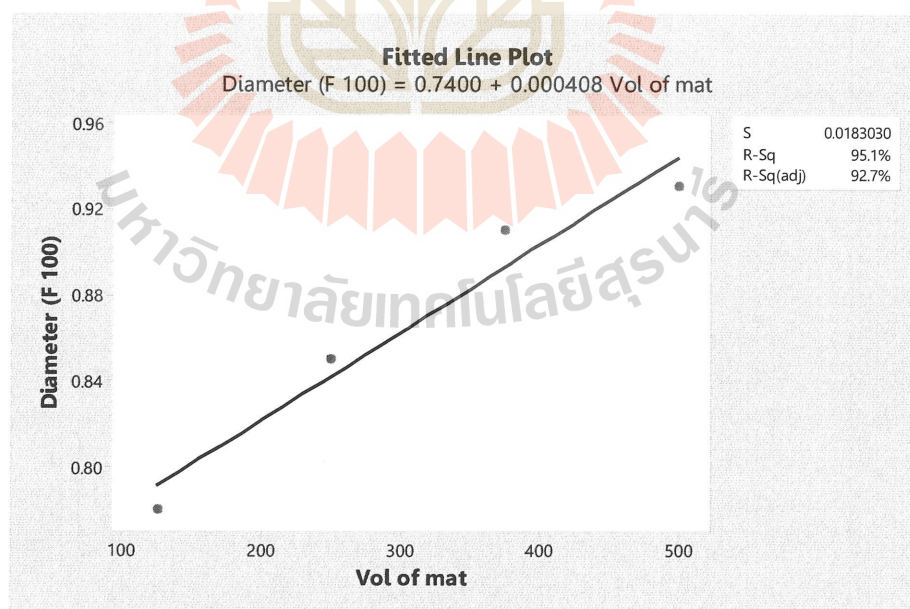
รูปที่ 4.12 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ

ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 50 mm/s
ช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 75 mm/s ได้กราฟดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 75 mm/s

ช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 100 mm/s ได้กราฟดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ในช่วงระดับอัตราการป้อน (Feed rate) ที่ 100 mm/s

พิจารณารูปภาพในรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 จะพบว่า กราฟที่ได้ทุกกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง และจุดทุกจุดในทุกรูปแสดงลักษณะร่วมคือมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน ซึ่งจากกราฟ Regression fitted line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ที่ทำการแบ่งช่วงตามระดับของอัตราการป้อน จะพบว่า ทุกช่วงมีค่า R-Sq และมีค่า R-Sq(adj) ที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้ และจากกราฟของทุกช่วงจะพบว่าอิทธิพลของปัจจัยมีค่าใกล้เคียงกันมากคือ 0.00028, 0.000368, 0.000408 และ 0.000408 ตามลำดับ จึงสามารถใช้ค่าอิทธิพลของปัจจัยจากกราฟ regression fitted line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีด (Diameter) กับ ปริมาณวัสดุ (Volume of material) ได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.000368 และมีสมการดังนี้

$$D_1 = C_V + m_V V + e \quad (4.4)$$

เมื่อ	D_1	คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน
	C_V	คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Response)
	m_V	คือ อิทธิพลของปัจจัย มีค่าเท่ากับ 0.000368
	V	คือ ปริมาณวัสดุ (Volume of material)
	e	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนการทดลอง

ดังนั้น

$$D_1 = C_V + 0.000368V + e \quad (4.5)$$

โดยที่	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.525 เมื่ออัตราการป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 25 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.615 เมื่ออัตราการป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 50 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.675 เมื่ออัตราการป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 75 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.740 เมื่ออัตราการป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 100 mm/s

จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองปัจจัยดังแสดงในสมการที่ (4.3) และ (4.5) สามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองปัจจัย สำหรับการประมาณขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน ได้ดังนี้

รวมตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองปัจจัย (4.3) + (4.5)

$$2D_1 = [(0.5463 + 0.00332F) + (C_V + 0.000368V)] + e \quad (4.6)$$

ได้

$$D_1 = \frac{1}{2} [(0.5463 + C_V + 0.00332F + 0.000368V) + e] \quad (4.7)$$

โดยที่	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.525 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 25 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.615 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 50 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.675 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 75 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.740 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 100 mm/s

เมื่อ	D_1	คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน
	C_V	คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Response)
	F	คือ อัตราป้อน (Feed rate)
	V	คือ ปริมาณวัสดุ (Volume of material)
	e	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนการทดลอง

อย่างไรก็ตามจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองปัจจัยสำหรับการประมาณขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน ดังแสดงในสมการที่ (4.7) จำเป็นจะต้องคำนึงถึงค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง เนื่องจากในการทดลองในทางปฏิบัตินั้นจะมีปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมและไม่สามารถควบคุมได้จำนวนมาก และปัจจัยเหล่านี้อาจจะส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ Montgomery (2001) และ Montgomery (2005) ด้วยเหตุนี้จึงต้องพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (e) ซึ่งคำนวณได้จาก สมการที่ (4.8)

$$e_{ij} = D_{ij} - \bar{D}_{ij} \quad (4.8)$$

โดยที่	e_{ij}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง	ที่ระดับ ij
	D_{ij}	คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ได้จากการทดลอง	ที่ระดับ ij

$\bar{D}_{ij}$ คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ได้จากการการคำนวณ ที่ระดับ ij

ซึ่งสามารถแสดงผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (e) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (e)

ที่ระดับ ij	F	V	CV	D_{ij}	$\bar{D}_{ij}$	e_{ij}
25,125	25	125	0.525	0.55	0.60015	-0.05015
25,250	25	250	0.525	0.61	0.62315	-0.01315
25,375	25	375	0.525	0.64	0.64615	-0.00615
25,500	25	500	0.525	0.66	0.66915	-0.00915
50,125	50	125	0.615	0.66	0.68665	-0.02665
50,250	50	250	0.615	0.70	0.70965	-0.00965
50,375	50	375	0.615	0.77	0.73265	0.03735
50,500	50	500	0.615	0.79	0.75565	0.03435
75,125	75	125	0.675	0.72	0.75815	-0.03815
75,250	75	250	0.675	0.78	0.78115	-0.00115
75,375	75	375	0.675	0.84	0.80415	0.03585
75,500	75	500	0.675	0.87	0.82715	0.04285
100,125	100	125	0.74	0.78	0.83215	-0.05215
100,250	100	250	0.74	0.85	0.85515	-0.00515
100,375	100	375	0.74	0.91	0.87815	0.03185
100,500	100	500	0.74	0.93	0.90115	0.02885
ผลรวม				12.06	12.0604	-0.00040

จากตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (e_{ij}) มีค่าเท่ากับ -0.0004 และจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองปัจจัยสำหรับการประมาณขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน ดังแสดงในสมการที่ (4.7) เมื่อรวมค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (e_{ij}) จะได้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการ ที่ (4.10) ดังนี้

$$D_1 = \frac{1}{2}[(0.5463 + C_V + 0.00332F + 0.000368V) - 0.00040] \quad (4.9)$$

ได้

$$D_1 = 0.27295 + 0.5C_V + 0.00166F + 0.000184V \quad (4.10)$$

โดยที่	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.525 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 25 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.615 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 50 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.675 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 75 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.740 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 100 mm/s

เมื่อ	D_1	คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน
	C_V	คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Response)
	F	คือ อัตราป้อน (Feed rate)
	V	คือ ปริมาณวัสดุ (Volume of material)

จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของทั้งสองปัจจัยสำหรับการประมาณขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน ดังแสดงในสมการที่ (4.10) สามารถนำมาคำนวณอัตราการสึกหรอ (Wear rate) จากสมการที่ (4.1) เพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณอัตราการสึกหรอ จากสมการที่ (4.1) แทนค่า D_1 ตามสมการที่ (4.10) จะได้สมการที่ (4.11) ดังนี้

$$Wear\ rate(\%) = \frac{|D_0 - (0.27295 + 0.5C_V + 0.00166F + 0.000184V)|}{D_0} \times 100 \quad (4.11)$$

โดยที่	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.525 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 25 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.615 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 50 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.675 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 75 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.740 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 100 mm/s

เมื่อ	D_0	คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ก่อนการใช้งาน
	D_1	คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน
	C_V	คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Response)

F คือ อัตราป้อน (Feed rate)

V คือ ปริมาณวัสดุ (Volume of material)

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองจึงสรุปได้ว่า ปัจจัยของอัตราการป้อน (Feed Rate), ปริมาณของวัสดุ (volume of material) และปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยมีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) อย่างมีนัยยะสำคัญ และจากการทดลองสามารถสร้างสมการเพื่อประมาณการสึกหรอได้ดังสมการที่ (4.11)



บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากข้อมูลอันเป็นผลของการทดลองที่ได้วิเคราะห์เชิงสถิติในบทที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 อิทธิพลของอัตราการป้อน (Feed Rate) และปริมาณของวัสดุ (volume of material) ที่มีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle Wear) ในกระบวนการ Fused Deposition Modeling (FDM)

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าปัจจัยอัตราการป้อน ปัจจัยปริมาณของวัสดุ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของอัตราการป้อน และปริมาณของวัสดุ มีอิทธิพลต่อขนาดของหัวฉีดอย่างมีนัยสำคัญในเชิงเส้นตรง การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองพบว่าข้อมูลของตัวอย่างการทดลองมีการกระจายตัวเป็นปกติ และการตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้นด้วยการพิจารณาการกระจายของข้อมูลพบว่าค่าพิสัยที่ได้มีความผันแปรต่ำ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทดลองคงที่ มีความเที่ยงตรง จึงสรุปผลได้ว่าอัตราการป้อนและปริมาณวัสดุมีผลต่อการสึกหรอของหัวฉีดในกระบวนการ Fused deposition modeling (FDM)

5.1.2 อัตราการสึกหรอของหัวฉีด (Nozzle wear rate)

จากการวิเคราะห์ผลของอัตราการสึกหรอของหัวฉีดพบว่ากราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีดกับอัตราการป้อน แสดงลักษณะร่วมคือมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน มีค่า R-Sq เป็น 74.3% และมีค่า R-Sq(adj) เป็น 72.5% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้ แต่กราฟ Regression line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีดกับปริมาณวัสดุ มีค่า R-Sq เป็น 22.8 และค่า R-Sq(adj) เป็น 17.3% ซึ่งมีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นไม่สามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้ดีพอ ต้องแบ่งช่วงของ regression fitted line plot ระหว่างขนาดของหัวฉีดกับปริมาณวัสดุใหม่ เพื่อเพิ่มความสมบูรณ์และความแม่นยำของตัวแบบคณิตศาสตร์ พบว่าสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้ ดังนั้นจึงสร้าง

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณอัตราการสึกหรอของหัวฉีดในกระบวนการ Fused deposition modeling (FDM) ได้ดังนี้

$$\text{Wear rate}(\%) = \frac{|D_0 - (0.27295 + 0.5C_V + 0.00166F + 0.000184V)|}{D_0} \times 100$$

โดยที่	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.525 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 25 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.615 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 50 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.675 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 75 mm/s
	C_V	มีค่าเท่ากับ 0.740 เมื่ออัตราป้อน (Feed rate) มีค่าเท่ากับ 100 mm/s
เมื่อ	D_0	คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ก่อนการใช้งาน
	D_1	คือ ขนาด (Diameter) ของหัวฉีด (Nozzle) ที่ผ่านการใช้งาน
	C_V	คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Response)
	F	คือ อัตราป้อน (Feed rate)
	V	คือ ปริมาณวัสดุ (Volume of material)

5.2 ประโยชน์ที่จะได้รับ

สามารถใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณอัตราการสึกหรอของหัวฉีดในกระบวนการ Fused deposition modeling (FDM) ได้ ด้วยการคำนวณจะทำให้ผู้ใช้งานสามารถคาดการณ์การสึกหรอที่จะเกิดขึ้นกับหัวฉีดในการผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีแบบ FDM ซึ่งจะลดปัญหาการผลิตชิ้นงานเสียที่เกิดความเสียหายจากการสึกหรอของหัวฉีด และลดต้นทุนในการผลิตของเสีย ที่จากเดิมนั้นไม่สามารถคาดการณ์และสังเกตได้

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยในอนาคต

ผลจากการวิจัยถือว่า เป็นไปตามวัตถุประสงค์ คือสามารถประมาณอัตราการสึกหรอของหัวฉีดในกระบวนการ Fused deposition modeling (FDM) ได้ด้วยการคำนวณ แต่ยังมีหลายส่วนที่สามารถนำไปทำการวิจัยในอนาคตได้ เช่น การพิจารณาเพิ่มปัจจัยในการทดลอง การเพิ่มระดับของแต่ละปัจจัย หรือการประยุกต์ใช้สมการประมาณอัตราการสึกหรอสำหรับการควบคุมคุณภาพชิ้นงาน เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- ฉัตรชัย จันทน์แดง. (2543). **เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (Rapid Prototyping Technology)**. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
- พิทยชาล, ป., & เป้าทอง, ธ. (2556). การวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือในเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วจากความสัมพันธ์ของเส้นโครงร่าง. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ฉบับที่ 1 ปีที่ 6 ประจำเดือนมกราคม-มิถุนายน 2556, 61-69.
- ปริญญา พงษ์สิน, ทรงคุณ ศรีเจริญ และวรวิทย์ วงศ์สินธน. (2008). **เทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว**. Defence Technology Institute (Public Organisation).
- Chua C. K., Leong, K. F., and Lim. (2010). **Rapid prototyping principles and applications**. World Scientific Pub Co Inc, 2010.
- Lopez, S.M. and Wright, P.K. (2002). **The role of rapid prototyping in the product development process: a case study on the economic factors of handle video game**. Rapid Prototyping Journal, 8(2): 116-125
- M. Nikzad, S. Hasan Masood, I. Sbarski and A. Groth. (2009). **Study of Melt Flow Analysis of an ABS-Iron Composite in Fused Deposition Modelling Process**. Tsinghua Science and Technology, vol. 14, pp. 29-37.
- H. S. Ramanath. (2008). **Melt Flow Behaviour of Poly-Epsilon-Caprolactone in Fused Deposition Modelling**. Journal of Materials Science: Materials in Medicine.
- B.H. Lee, J. Abdullah, and Z.A. Khan. (2005). **Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object**. Journal of materials processing technology, vol. 169, pp. 54-61.
- H. BROOKS, A.E.W. RENNIE, T.N. ABRAM, J. McGOVERN1 & F. CARON. (2012). **Variable Fused Deposition Modelling – Concept Design and Tool Path Generation**. UK.
- M. Nikzad, S.H. Masood and I. Sbarski. (2011). **Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling**. Material and Design, vol. 32, pp. 3448-3456.

- R. van Weeren, M. Agarwala, V. R. Jamalabad and A. Bandyopadhyay. (1995). **Quality of Parts Processed by Fused Deposition**.
- J. M. Aremas, Cristina A., F. Blaya and A. Sanz. (2012). **Multi-criteria selection of structural adhesives to bond ABS parts obtained by rapid prototyping**. International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 33, pp. 67-74.
- L. Li, Q. sun, C. Bellehumeur and P. Gu. (2002). **Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties**. Journal of manufacturing processes, vol. 4/No.2, pp. 129-140.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพฑูริย์. (2551). **การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง**. สำนักพิมพ์ท็อปจำกัด. กรุงเทพมหานคร.
- Montgomery, D.C. (2009). **Design and analysis of experiments**. John Wiley & Sons. 6th ed.
- Anoop Kumar Sood , R.K. Ohdar and S.S. Mahapatra. (2009). **Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method**. Material and Design, vol. 30, pp. 4243-4252.
- Anoop Kumar Sood , R.K. Ohdar and S.S. Mahapatra. (2010). **Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts**. Material and Design, vol. 31, pp. 287-295.
- Omkar Rishi. (2013). **Feed Rate Effects In Freeform Filament Extrusion**. Thesis. Rochester Institute of Technology. USA.
- Thomas Hofstaetter, Rodrigo Pimentel, David B. Pedersen, Michael Mischkot and Hans N. Hansen. (2015). **Simulation of a Downsized FDM Nozzle**. Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Grenoble.
- J. Tyberg and J. B. Helge. (1999). **FDM system and local adaptive slicing**. Material and Design, vol. 20, pp. 77-88.
- Print quality troubleshooting guide**. [Online]. Available: <http://3dprinting-blog.com/660-print-quality-troubleshooting-guide-by-simplify3d>
- ประเภทเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ FDM** [Online]. Available: www.print3dd.com
- คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในเครื่อง FDM** [Online]. Available: <https://all3dp.com/pla-abs-3d-printer-filaments-compared.com>

เครื่องกัด (Milling machine) [Online]. Available: <http://ie.eng.cmu.ac.th/IE2014/elearnings/14.pdf>

กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล [Online]. Available: <http://www.siamic-elec.com/product/microscope-500x>

โปรแกรม Cura [Online]. Available: <https://www.ultimaker.com>

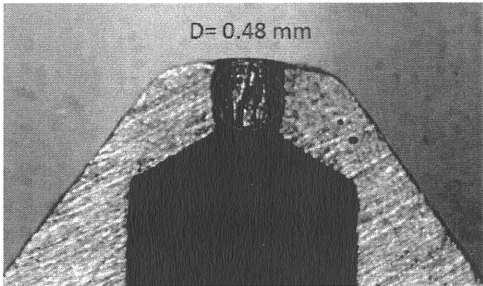
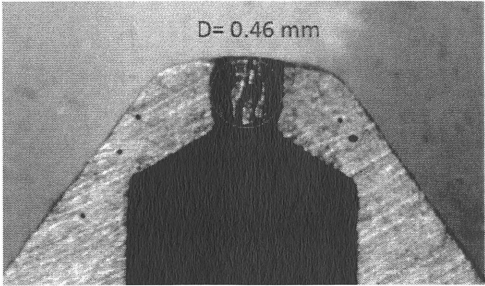
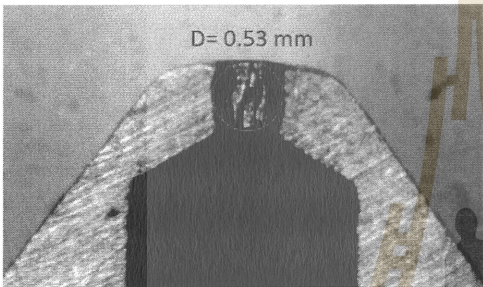
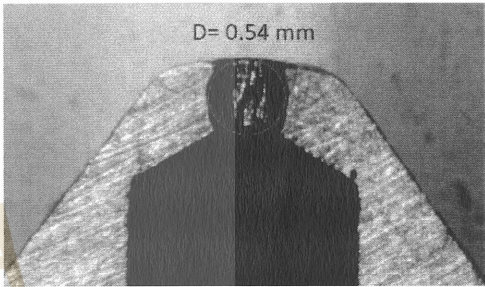
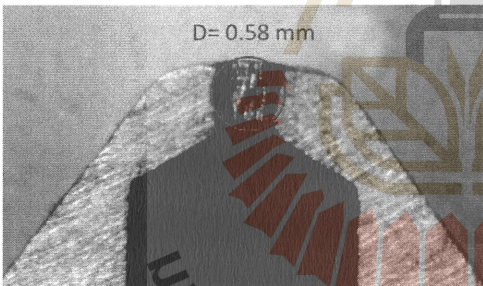
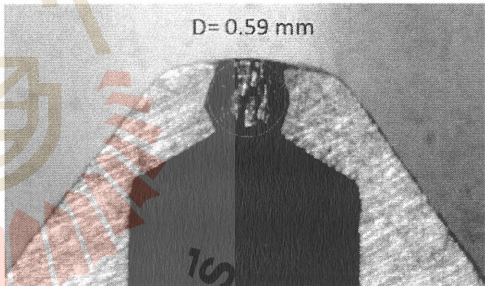
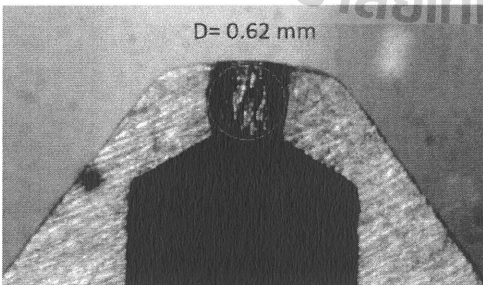
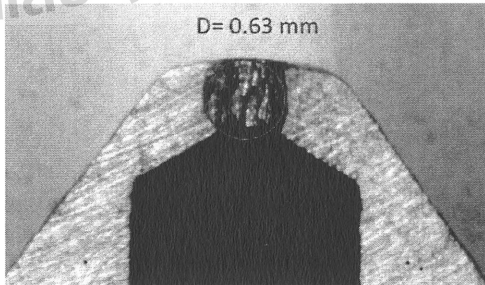


ภาคผนวก ก

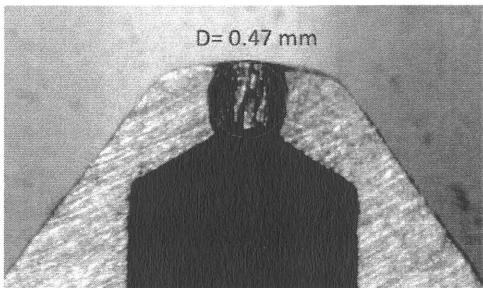
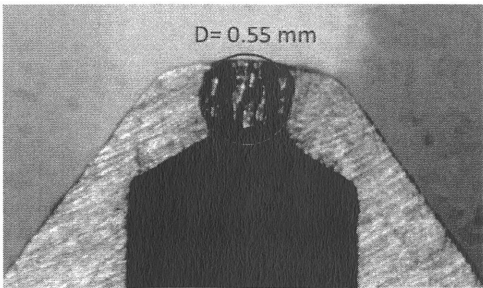
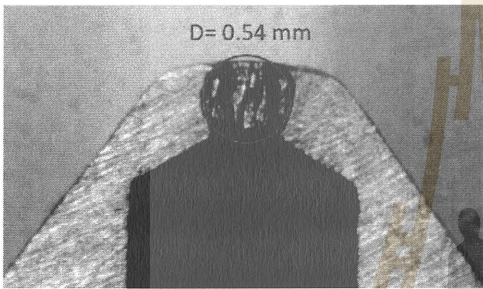
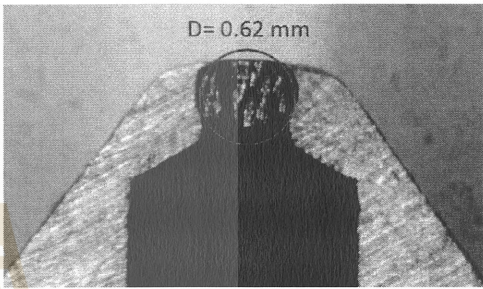
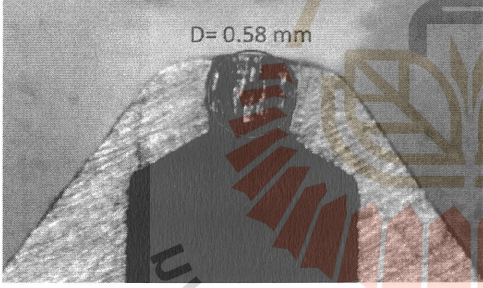
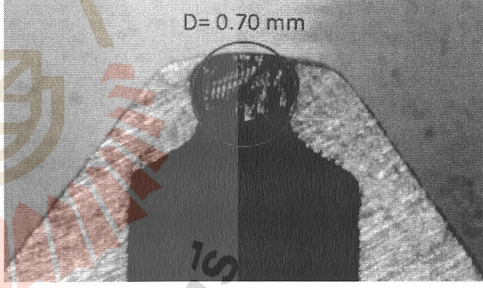
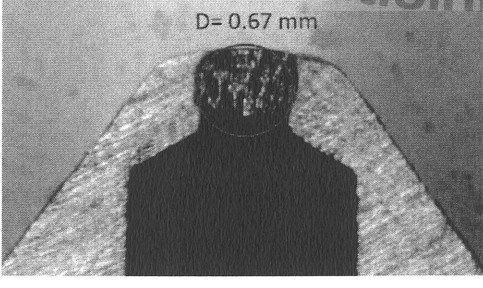
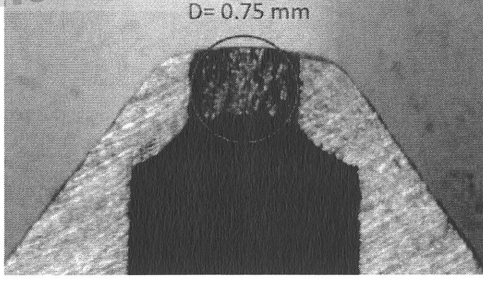
ภาพและขนาดของหัวฉีดในแต่ละระดับของปัจจัย



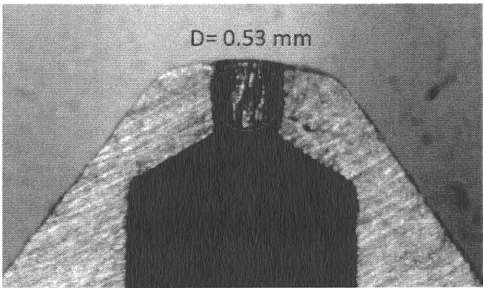
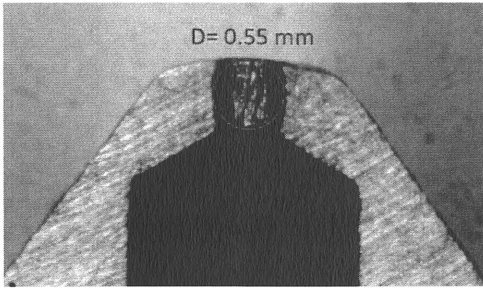
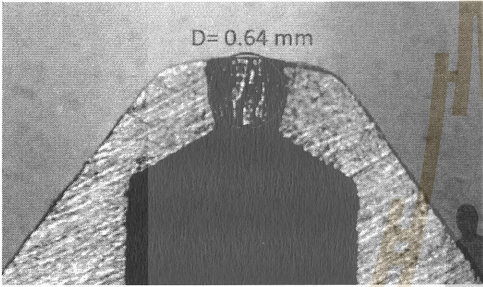
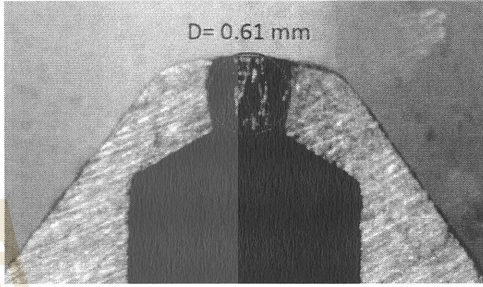
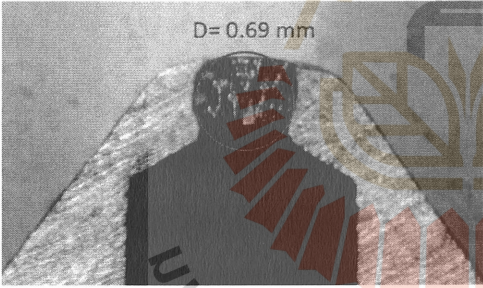
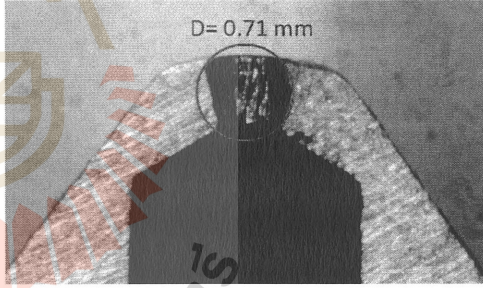
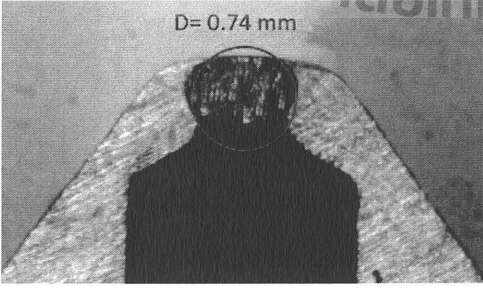
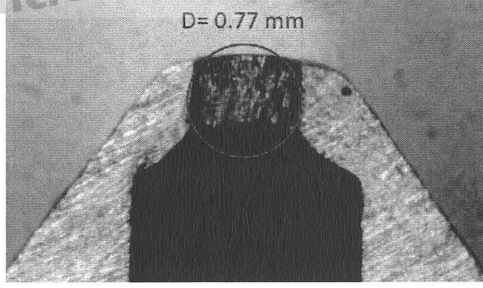
ตารางที่ ก.1 ภาพและขนาดของหัวฉีดในแต่ละระดับของปัจจัยในการทดลองซ้ำที่ 1 (n1)

 D= 0.48 mm f=25,v=125	 D= 0.46 mm f=25,v=250
 D= 0.53 mm f=50,v=125	 D= 0.54 mm f=50,v=250
 D= 0.58 mm f=75,v=125	 D= 0.59 mm f=75,v=250
 D= 0.62 mm f=100,v=125	 D= 0.63 mm f=100,v=250

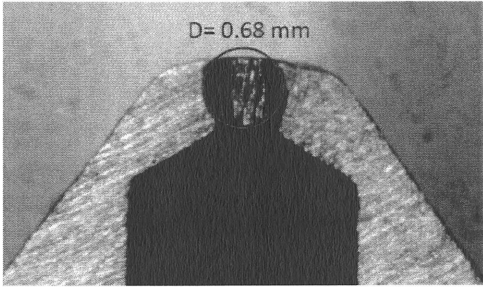
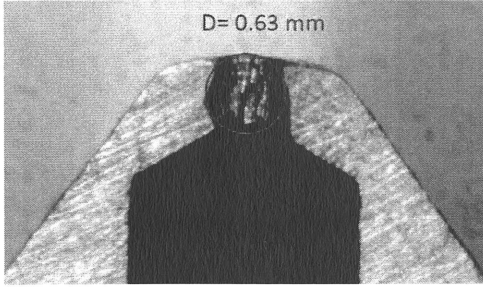
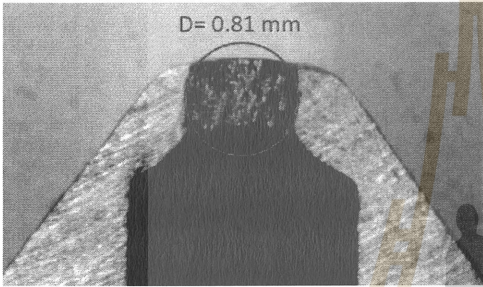
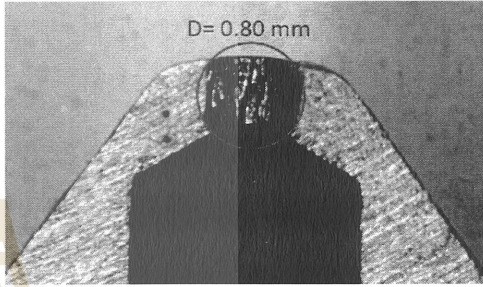
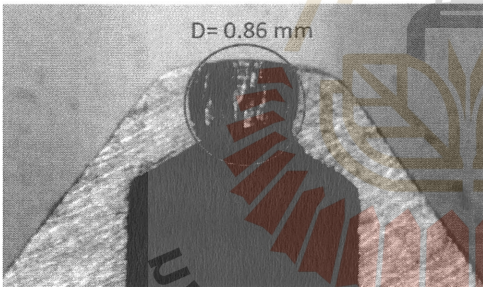
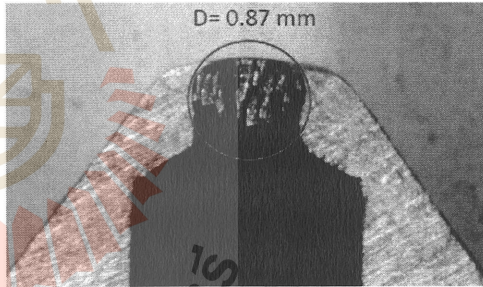
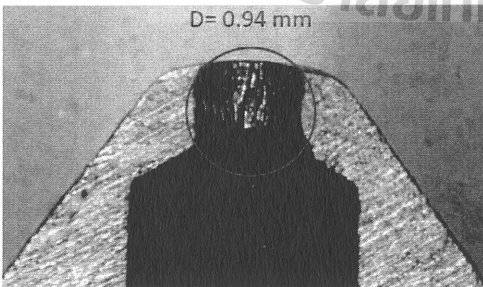
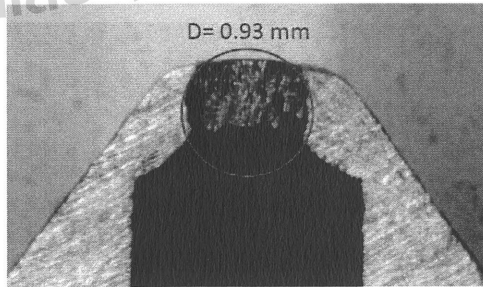
ตารางที่ ก.1 ภาพและขนาดของหัวฉีดในแต่ละระดับของปัจจัยในการทดลองซ้ำที่ 1 (n1) (ต่อ)

 D= 0.47 mm f=25,v=375	 D= 0.55 mm f=25,v=500
 D= 0.54 mm f=50,v=375	 D= 0.62 mm f=50,v=500
 D= 0.58 mm f=75,v=375	 D= 0.70 mm f=75,v=500
 D= 0.67 mm f=100,v=375	 D= 0.75 mm f=100,v=500

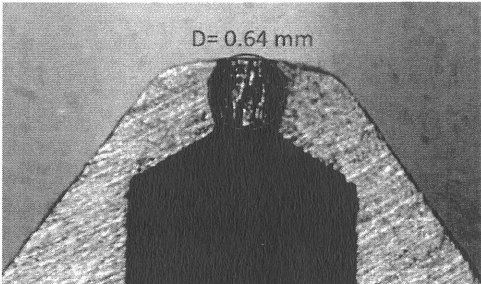
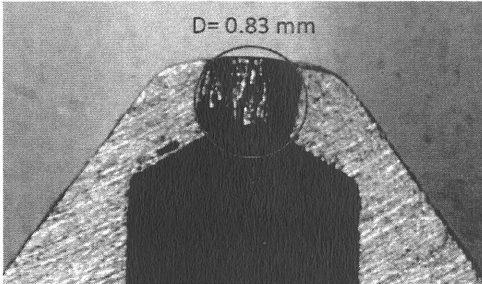
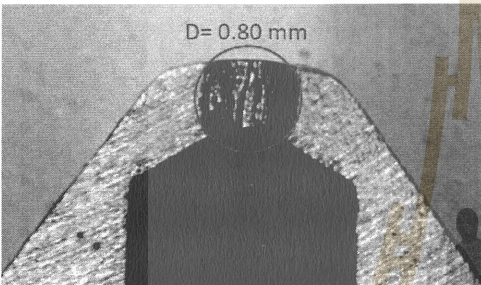
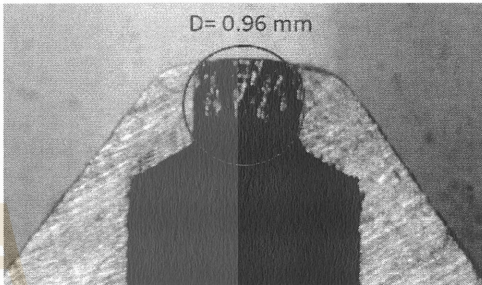
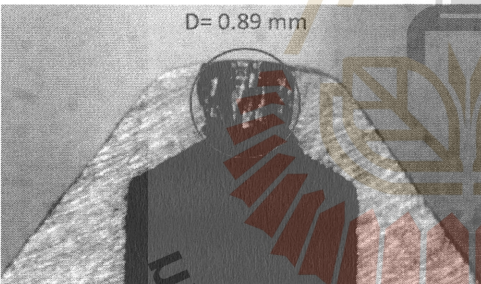
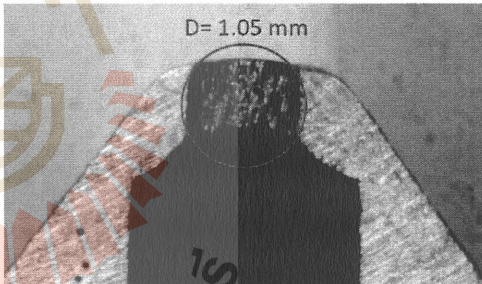
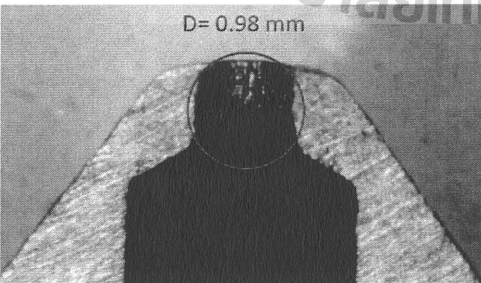
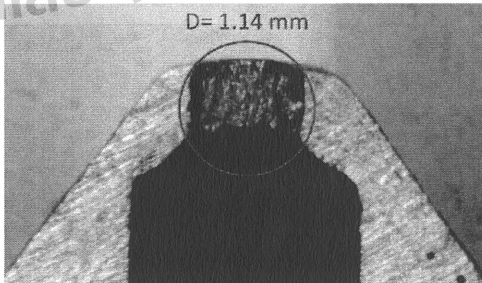
ตารางที่ ก.2 ภาพและขนาดของหัวฉีดในแต่ละระดับของปัจจัยในการทดลองซ้ำที่ 2 (n2)

 D= 0.53 mm f=25,v=125	 D= 0.55 mm f=25,v=250
 D= 0.64 mm f=50,v=125	 D= 0.61 mm f=50,v=250
 D= 0.69 mm f=75,v=125	 D= 0.71 mm f=75,v=250
 D= 0.74 mm f=100,v=125	 D= 0.77 mm f=100,v=250

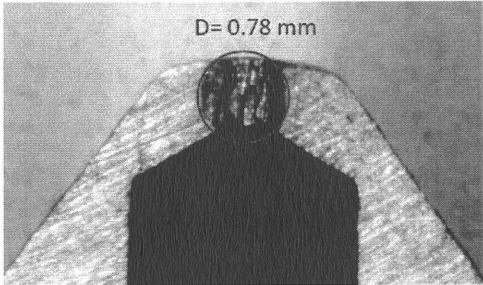
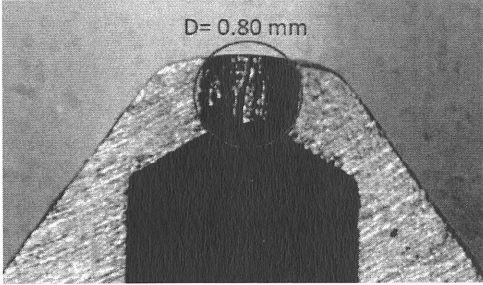
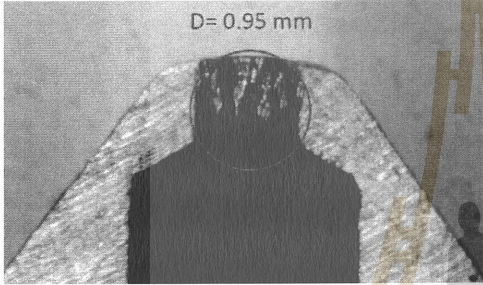
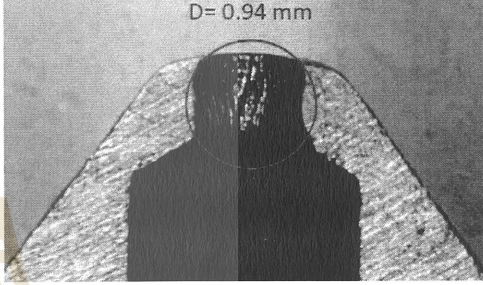
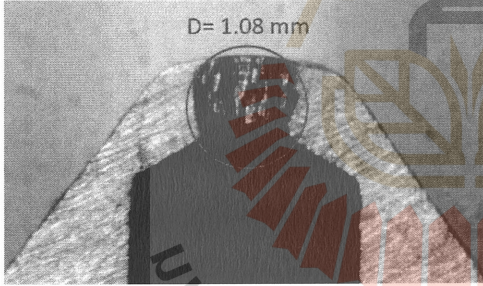
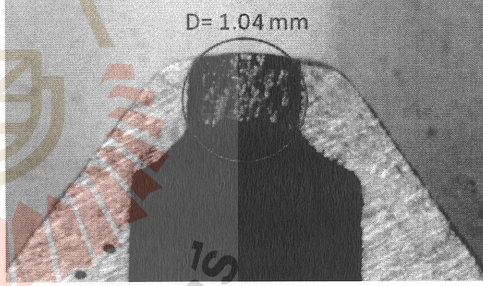
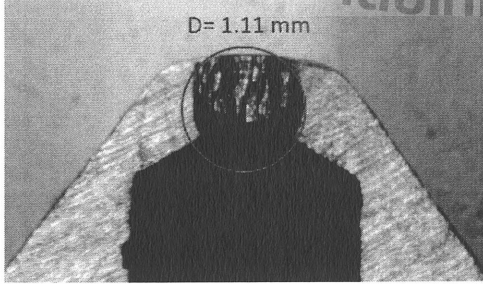
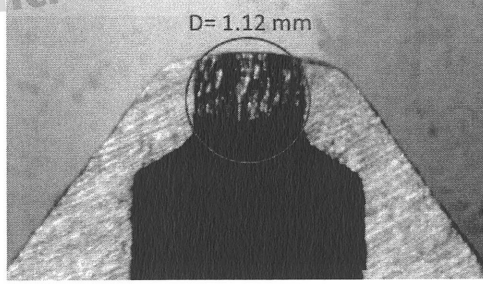
ตารางที่ ก.2 ภาพและขนาดของหัวฉีดในแต่ละระดับของปัจจัยในการทดลองซ้ำที่ 2 (n2) (ต่อ)

 D= 0.68 mm f=25,v=375	 D= 0.63 mm f=25,v=500
 D= 0.81 mm f=50,v=375	 D= 0.80 mm f=50,v=500
 D= 0.86 mm f=75,v=375	 D= 0.87 mm f=75,v=500
 D= 0.94 mm f=100,v=375	 D= 0.93 mm f=100,v=500

ตารางที่ ก.3 ภาพและขนาดของหัวฉีดในแต่ละระดับของปัจจัยในการทดลองซ้ำที่ 3 (n3)

 D= 0.64 mm f=25,v=125	 D= 0.83 mm f=25,v=250
 D= 0.80 mm f=50,v=125	 D= 0.96 mm f=50,v=250
 D= 0.89 mm f=75,v=125	 D= 1.05 mm f=75,v=250
 D= 0.98 mm f=100,v=125	 D= 1.14 mm f=100,v=250

ตารางที่ ก.3 ภาพและขนาดของหัวฉีดในแต่ละระดับของปัจจัยในการทดลองซ้ำที่ 3 (น3) (ต่อ)

 D= 0.78 mm f=25,v=375	 D= 0.80 mm f=25,v=500
 D= 0.95 mm f=50,v=375	 D= 0.94 mm f=50,v=500
 D= 1.08 mm f=75,v=375	 D= 1.04 mm f=75,v=500
 D= 1.11 mm f=100,v=375	 D= 1.12 mm f=100,v=500

ตาราง ก.4 ตารางบันทึกผลการทดลอง

Exp. no.	Feed rate	Volume of material	Nozzle Diameter	Exp. no.	Feed rate	Volume of material	Nozzle Diameter
1	25	125	0.48	25	75	125	0.58
2	25	250	0.46	26	75	250	0.59
3	25	375	0.47	27	75	375	0.58
4	25	500	0.55	28	75	500	0.70
5	25	125	0.53	29	75	125	0.69
6	25	250	0.55	30	75	250	0.71
7	25	375	0.68	31	75	375	0.86
8	25	500	0.63	32	75	500	0.87
9	25	125	0.64	33	75	125	0.89
10	25	250	0.83	34	75	250	1.05
11	25	375	0.78	35	75	375	1.08
12	25	500	0.80	36	75	500	1.04
13	50	125	0.53	37	100	125	0.62
14	50	250	0.54	38	100	250	0.63
15	50	375	0.54	39	100	375	0.67
16	50	500	0.62	40	100	500	0.75
17	50	125	0.64	41	100	125	0.74
18	50	250	0.61	42	100	250	0.77
19	50	375	0.81	43	100	375	0.94
20	50	500	0.80	44	100	500	0.93
21	50	125	0.80	45	100	125	0.98
22	50	250	0.96	46	100	250	1.14
23	50	375	0.95	47	100	375	1.11
24	50	500	0.94	48	100	500	1.12

ภาคผนวก ข

ค่าคงที่สำหรับแผนภูมิควบคุม (Factor for control chart)



ตาราง ข.1 ค่าคงที่สำหรับแผนภูมิควบคุม (Factor for control chart)

Number of Observations	Chart for Averages			Chart for Standard Deviations					
	Factors for Control Limits			Factor for Central Line		Factor for Control Limits			
Sample, n	A	A ₁	A ₂	C ₂	1/C ₂	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
2	2.121	3.760	1.880	0.5642	1.7725	0	1.843	0	3.267
3	1.732	0.394	1.023	0.7236	1.3820	0	1.858	0	2.568
4	1.500	1.880	0.729	0.7979	1.2533	0	1.808	0	2.266
5	1.342	1.596	0.577	0.8407	1.1894	0	1.756	0	2.059
6	1.225	1.410	0.483	0.8686	1.1512	0.026	1.711	0.030	1.970
7	1.134	1.277	0.419	0.8882	1.1259	0.105	1.672	0.118	1.882
8	1.061	1.175	0.373	0.9027	1.1078	0.167	1.638	0.185	1.815
9	1.000	1.094	0.337	0.9139	1.0942	0.219	1.609	0.339	1.761
10	0.949	1.028	0.308	0.9227	1.0837	0.262	1.584	0.284	1.716
11	0.905	0.973	0.285	0.9300	1.0753	0.299	1.561	0.321	1.679
12	0.865	0.925	0.266	0.9359	1.0664	0.331	1.541	0.354	1.646
13	0.832	0.884	0.249	0.9410	1.0627	0.359	1.523	0.382	1.618
14	0.802	0.848	0.235	0.9453	1.0579	0.384	1.507	0.405	1.594
15	0.775	0.816	0.223	0.9490	1.0537	0.406	1.492	0.428	1.572
16	0.750	0.788	0.212	0.9523	1.0501	0.427	1.478	0.448	1.552
17	0.728	0.762	0.203	0.9551	1.0470	0.445	1.465	0.466	1.534
18	0.707	0.735	0.194	0.9576	1.0442	0.461	1.454	0.482	1.518
19	0.688	0.717	0.187	0.9599	1.0413	0.477	1.443	0.497	1.503
20	0.671	0.697	0.180	0.9619	1.0396	0.491	1.433	0.510	1.490
21	0.655	0.679	0.173	0.9638	1.0376	0.504	1.424	0.523	1.477
22	0.640	0.662	0.167	0.9655	1.0358	0.516	1.415	0.534	1.466
23	0.626	0.647	0.162	0.9670	1.0342	0.527	1.407	0.545	1.455
24	0.612	0.632	0.157	0.9684	1.0327	0.538	1.399	0.555	1.445
25	0.600	0.619	0.153	0.9696	1.0313	0.548	1.392	0.565	1.436
Over 25		$\sqrt{n}$	$\sqrt{n}$						

ที่มา: Montgomery, D.C., 2009.

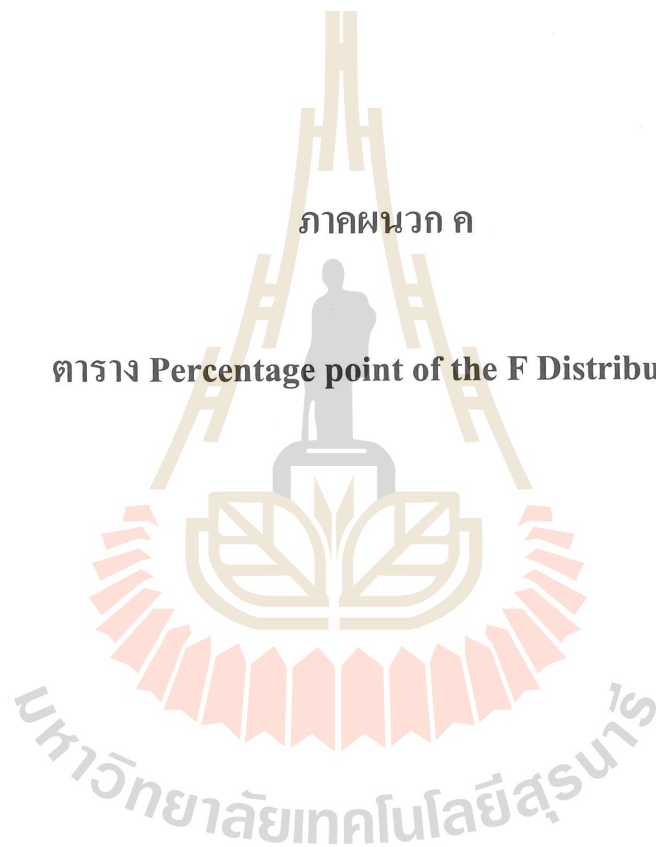
ตาราง ข.1 ค่าคงที่สำหรับแผนภูมิควบคุม (Factor for control chart) (ต่อ)

Number of Observations	Chart of Ranges						
	Factor for Central Line			Factor for Control Limits			
Sample, n	d_2	$1/d_2$	D_3	D_1	D_2	D_3	D_4
2	1.128	0.8865	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.693	0.5907	0.838	0	4.353	0	2.575
4	2.059	0.4857	0.880	0	4.698	0	2.282
5	2.326	0.4299	0.864	0	4.918	0	2.115
6	2.534	0.3945	0.848	0	5.078	0	2.004
7	2.704	0.3698	0.833	0.205	5.203	0.076	1.924
8	2.847	0.3512	0.829	0.387	5.307	0.136	1.864
9	2.970	0.3367	0.803	0.546	5.394	0.164	1.816
10	3.078	0.3249	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	3.173	0.3152	0.787	0.812	5.534	0.258	1.744
12	3.258	0.3068	0.778	0.924	5.592	0.284	1.716
13	3.336	0.2993	0.770	1.026	5.646	0.308	1.692
14	3.407	0.2935	0.762	1.121	5.693	0.329	1.671
15	3.472	0.2880	0.755	1.207	5.737	0.348	1.652
16	3.532	0.2831	0.749	1.285	5.779	0.364	1.635
17	3.588	0.2787	0.743	1.359	5.817	0.379	1.621
18	3.640	0.2747	0.739	1.426	5.854	0.392	1.608
19	3.689	0.2711	0.733	1.490	5.888	0.404	1.596
20	3.735	0.2677	0.728	1.548	5.922	0.414	1.586
21	3.778	0.2647	0.724	1.606	5.950	0.425	1.576
22	3.819	0.2618	0.720	1.659	5.979	0.434	1.566
23	3.858	0.2582	0.716	1.710	6.006	0.443	1.557
24	3.895	0.2567	0.712	1.759	6.031	0.452	1.548
25	3.931	0.2544	0.709	1.804	6.056	0.459	1.541
Over 25							

ที่มา: Montgomery, D.C., 2009.

ภาคผนวก ค

ตาราง Percentage point of the F Distribution



ตาราง ค.1 Percentage point of the F Distribution

$v_1 \backslash v_2$		Degrees of freedom for the numerator (v_1)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞	
1	1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3	
2	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50	
3	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	
4	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	
5	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36	
6	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	
7	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	
8	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	
9	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	
10	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	
11	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	
12	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	
13	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	
14	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	
15	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	
16	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01	
17	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	
18	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	
19	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	
20	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	
21	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	
22	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	
23	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	
24	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	
25	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	
26	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	
27	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	
28	28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	
29	29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	
30	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	
40	40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
60	60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	
120	120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25	
∞	∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00	

ที่มา: Montgomery, D.C., 2009.

ภาคผนวก ง

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



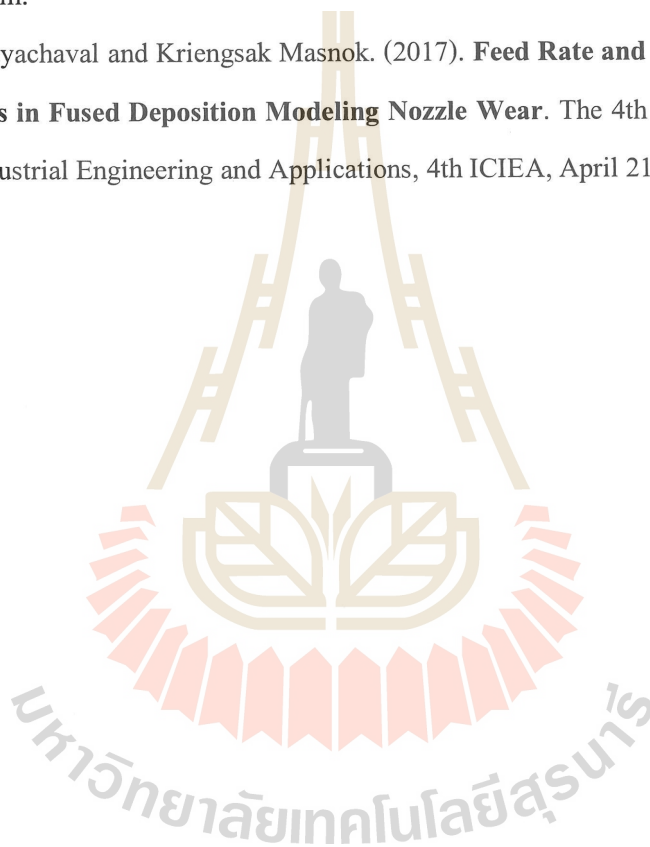
รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Paphakorn Pitayachaval and Kriengsak Masnok. (2017). **Effects of Composite Material**

Filaments on Fused Deposition Modeling Nozzle. 11th South East Asean Technical University Consortium Symposium, 11th SEATUCS, March 13 – 14, Ho Chi Minh, Vietnam.

Paphakorn Pitayachaval and Kriengsak Masnok. (2017). **Feed Rate and Volume of Material**

Effects in Fused Deposition Modeling Nozzle Wear. The 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications, 4th ICIEA, April 21 – 23, Nagoya, Japan.



EFFECTS OF COMPOSITE MATERIAL FILAMENTS ON FUSED DEPOSITION MODELLING NOZZLE

Paphakorn Pitayachaval*, Kriengsak Masnok
 School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of
 Technology, NakhonRatchasima, 30000, Thailand
 *E-mail Address: paphakorn@g.sut.ac.th

ABSTRACT

Traditionally fused deposition modelling (FDM) have been able to build parts only in thermoplastic but the modern FDM can process parts in composite material filaments such as PLA filled bronze, iron or stainless steel in which these materials will cause nozzle wear. This paper presents an experimental to determine the effect of composite material filaments on FDM nozzle. The experiment was conducted by using standard nozzle size 0.4 mm, fitted with FDM machine and printed metal-filled material, then nozzle wear was investigated by microscope. The results showed the effect of composite material filaments that significant effect on the nozzles wear.

KEYWORDS: Rapid prototyping (RP), fused deposition modelling (FDM), additive manufacturing, composite material

1. INTRODUCTION

Rapid prototyping (RP) is the key success technique in the product development process. Rapid prototyping technique can construct part directly from 3D CAD file without special tooling and dies. Consequently, creating a prototype is much easier, cheaper and faster compared with conventional production methods. Rapid prototyping also improves product flexibility and hence can satisfy individual customer demands (Chua, Leong, and Lim, 2010). Several techniques have been developed for rapid prototyping process and they can be classified into 3 categories based on the initial state of materials liquid-based, solid-based and powder-based (D. Pham, and R. Gault, 1998).

A popular technique in a solid-based system is the fused deposition modelling (FDM) (V. Kumar, and D. Dutta, 1997). FDM has become a widely used additive manufacturing technologies for various application (S. Singaneni, 2012). FDM works on an "additive" principle the process involves layer-by-layer deposition a

bead of extruded molten material through a nozzle using feedstock filament from a spool. The nozzle and bed platform move via computer control to lay down a pattern on the bed platform, as shown in Fig 1. (S.S. Crump, 1989). In recent year modern FDM technologies offers great potential for a range of other materials including PLA filled bronze, iron or stainless steel (Mostafa Nikzad, 2009) and new composite material filaments with metal filled particles have been successfully developed for direct application in FDM process (Mostafa Nikzad, 2011).

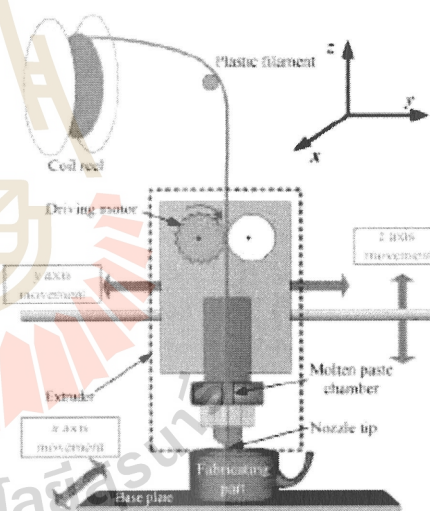


Fig 1. Schematic diagram of FDM process (Yu-an Jin, et al., 2015)

The most concerned of FDM process parts with composite material filaments is the wear of the nozzle (L. Li and Q. Sun, 2002). Almost all filament manufacturers give a vague warning about composite material filaments causing nozzle wear on the nozzle of FDM machine (B.H. Lee, J. Abdullah, and Z.A. Khan, 2005). The wear of the nozzle also leads to the defected in parts, which cause a troublesome in feeding mechanism. The feeding mechanism is important to flow and fill smooth. The defected in parts are appearance on surface quality and loss of accuracy (R. van Weeren, 1995).

This paper presents an experimental to determine the effect of composite material filaments on FDM nozzle. Since the nozzle wear requires constant maintenance and inspection, which leads to machine down-time and increase the process costs, the nozzle wear problem should be investigated by in-depth experimental

2. EXPERIMENT

2.1 Experimental Design

The experiment was conducted by using standard nozzle size 0.4mm, fitted with the FDM Inventor-3D machine, as shown in Fig 2. The material filaments used for testing are Proto-pasta stainless steel PLA and PLA. The printed parts were designed via SolidWorks 2014x64 Edition software and exported as STL file. The STL file is imported to Cura 14.01 software for parameter setting and model printing, as shown in Fig 3. After parts were printed according part volume control, the used nozzle was then cut and investigated its cross section by milling machine and microscope, respectively.

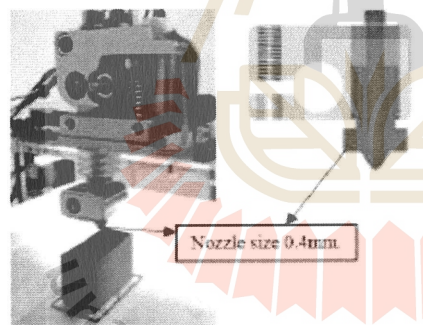


Fig 2. Picture of standard nozzle size 0.4mm fitted with the FDM extrusion set

2.2 Investigated parameters:

A main variable factor on nozzle wear is volume of printing material, which is the most influencing the lifetime of the FDM nozzle (R. Anthita, 2001). The specimens are assigned into four level according to printed volume, while feed rate and temperature are kept at their fixed level factor. The variable factors and fixed level factor are assigned, as shown in Table 1.

Table 1. List of process variable and fixed factor

Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Volume of material (g)	125	250	375	500
Feed rate (rev/min)	50	50	50	50
Temperature (°C)	210	210	210	210

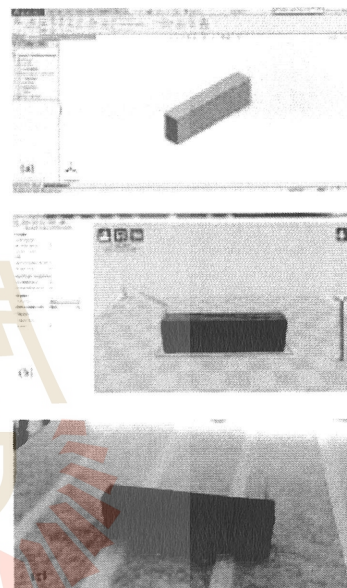


Fig 3. (a) Parts designed via SolidWorks 2014x64 Edition software, (b) Parameter setting via Cura 14.01 software, and (c) Model printing

2.3 Measurement method

The used nozzles are cut by milling machine, then their cross-section are measured in order to investigate to variation, as shown in Fig 4. To determine the wear of nozzle, the diameter of nozzle that prints specimen is measured, as shown in Fig 5. The percentage of the nozzle wear rate is calculated by the following equation.

$$\text{Wear rate (\%)} = \left(\frac{0.4 - X}{0.4} \right) \times 100 \quad (1)$$

Where X is the dimension of nozzle diameter after print specimen (mm) and 0.4 is the size of nozzle before print specimen (mm).

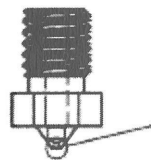


Fig 4. Drawing of nozzle

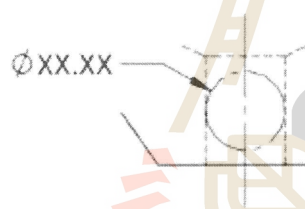


Fig 5. A measuring of dimension of nozzle diameter

3. RESULT AND DISCUSSION

The results were obtained by printing all the four level for material volume (125g, 250g, 375g and 500g). The result shown that nozzle shapes related with the volume of printing material. The diameters of nozzles were expanded when more volume of material was printed, as shown in Fig 6. The dimensions of the nozzle diameters were measured, as shown in Fig 7. The wear rate of each experiment level were determined, as shown in Table 2.

The relationship between the volume of printed material and nozzle diameter were presented as linear relation in which nozzle diameters were expanded during

to more material was printed, as shown in Fig 8. In order to forecast nozzle wear, the effect of volume printed composite material filament is a significant factor that should be concerned.

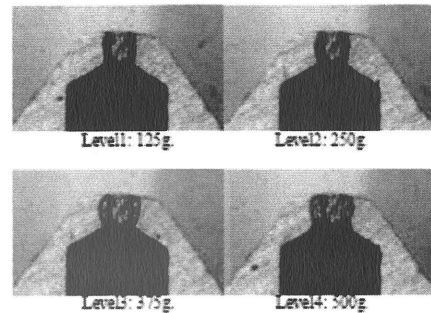


Fig 6. The shape of the nozzle diameters related with volume of printing material

A series of image of the nozzle exit, prior to after experiments are presents in Fig6. For the nozzle exit in Fig 7 shown the diameter increased from an initial size of 0.4mm. to 0.96mm.

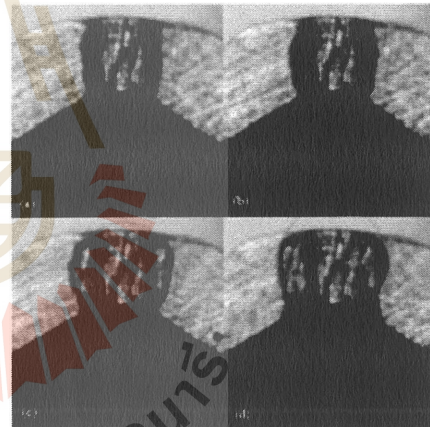


Fig 7. The dimension measurement of nozzle diameter

Table 2: The percentage of the nozzle wear rate

	Volume of material (g)	Dimension of nozzle diameter (mm)	Wear rate (%)
Level 1	125	0.53	32.5
Level 2	250	0.62	55
Level 3	375	0.81	102.5
Level 4	500	0.96	140

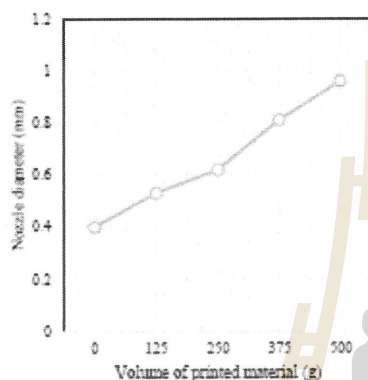


Fig 8. The relation between volume of material and dimension of nozzle diameter

4. CONCLUSIONS

The volume of printed composite material filament is a significant factor for FDM nozzle wear. The experimental results clearly demonstrated that the FDM nozzle wear rates related with the volume of composite material filaments. Furthermore, the forecast nozzle wear equation will be study as a future work.

5. ACKNOWLEDGE

This research has been supported by the research and development supporting fund, Suranaree University of Technology.

REFERENCES

- S.S. Crump, Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects, *United States Patent, US 5,121,329*, 1989.
- Yu-an Jin, Hui Li, Yong He and Jian-zhong Fu, Quantitative analysis of surface profile in fused deposition modelling, 2015.

Mostafa Nikzad, Syed Hasan Masood, Igor Sbarski and Andrew Groth, Study of Melt Flow Analysis of an ABS-Iron Composite in Fused Deposition Modelling Process, Australia, 2009.

M. Nikzad, S.H. Masood and I. Sbarski, Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling, Australia, 2011.

R. van Weeren, M. Agarwala, V. R. Jamalabad and A. Bandyopadhyay, Quality of Parts Processed by Fused Deposition, 1995.

Chua, C. K., Leong, K. F., and Lim, Rapid prototyping principles and applications, World Scientific Pub Co Inc, 2010.

D. Pham, and R. Gault, A comparison of rapid prototyping technologies, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38 (10-11), pp. 1257-128, 1998.

V. Kumar, and D. Dutta, An assessment of data formats for layered manufacturing, *Advances in Engineering Software* 28 (3), pp. 151-164, 1997.

R. Anitha, S. Arunachalam and P. Radhakrishnan, Critical parameter influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling, *Journal of Materials Processing Technology* 118, p.385-338, UK, 2001.

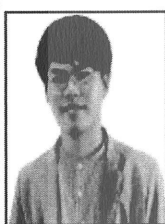
B.H. Lee, J. Abdullah, and Z.A. Khan, Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object, *Journal of materials processing technology*, 169, p.54-61, 2005.

Sarat Singamneni, Asimava Roychoudhury, Olaf Diegela, Bin Huang, Modeling and evaluation of curved layer fused deposition, *Journal of Materials Processing Technology* 212, p. 27-35, 2012.

L. Li, Q. sun, C. Bellehumeur and P. Gu, Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties, *Journal of manufacturing processes*, Vol.4/No.2, p.129-140, 2002.

The 11th SEATUC Symposium

Paphakorn Pitayachaval received the B.E. (1998) from Suranaree University of Technology, M.E. (2000) from King Mongkut's University of Technology Thonburi and Ph.D. (2009) from Asian Institute of Technology. She is a Asst. Prof. in a school of industrial engineering, Suranaree University of Technology.



Kriengsak Masnok received the B.E. (2014) degrees in industrial engineering from Suranaree University of technology. Currently, he is studying Master degree in industrial engineering, Suranaree University of Technology.



Feed Rate and Volume of Material Effects in Fused Deposition Modeling Nozzle Wear

Paphakorn Pitayachaval, Kriengsak Masnook

School of Industrial Engineering, Institute of Engineering

Suranaree University of Technology

Nakhon Ratchasima, Thailand

e-mail: paphakorn@eng.sut.ac.th

Abstract—Fused deposition modeling (FDM) is a fast growing technology due to its ability to build functional parts having complex geometrical shape in reasonable time period. Traditionally, FDM have been able to build parts only in thermoplastic but the modern FDM can process parts in composite material filaments such as poly lactic acid (PLA) filled bronze, iron or stainless steel in which these materials will cause nozzle wear. The wear of the nozzle depends on many process variables. In this study, two important process parameters include feed rate and volume of material are considered. Experiments were conducted by using standard nozzle, fitted with FDM machine and printed PLA metal-filled material, then nozzle wear was investigated by microscope. The result showed the effects of these process parameters that significant effect on the FDM nozzle wear.

Keywords—component; fused deposition modeling (FDM), rapid prototyping (RP), composite material filaments

1 INTRODUCTION

Fast changing customer demand and increased competitiveness in marketplace forced the industries to rethink the way of product development process. Rapid prototyping (RP) is the key success technique in the product development process. Rapid prototyping technique can construct part directly from 3D CAD file without special tooling and dies. Consequently, creating a prototype is much easier, cheaper and faster compared with conventional production methods. Rapid prototyping also improves product flexibility and hence can satisfy individual customer demands [1]. Several techniques have been developed for rapid prototyping process and they can be classified into 3 categories based on the initial state of materials liquid-based, solid-based and powder-based [2].

A popular technique in a solid-based system is the fused deposition modeling (FDM) [3]. FDM, developed by Stratays Inc., has become a widely used additive manufacturing technologies for various application [4]. Due to its advantages of low cost, convenient and high material usage efficiency, FDM shows great potential in mold fabrication, bio-medical device design, tissue engineering and other industrial fields. FDM works on an "additive" principle the process involves layer-by layer deposition a bead of extruded molten material through a nozzle using feedstock filament from a spool. The nozzle and bed platform move via computer control to lay down a pattern on

the bed platform [5], as shown in Fig. 1. In recent year, modern FDM technologies offers great potential for a range of other materials including PLA filled bronze, iron or stainless steel [6] and new composite material filaments with metal filled particles have been successfully developed for direct application in FDM process [7]. The most concerned of FDM process parts with composite material filaments is the wear of the nozzle [8]. Almost all filament manufacturers give a vague warning about composite material filaments causing nozzle wear on the nozzle of FDM machine [9].

The extrusion set in FDM machine, as shown in Fig. 2. The systems involves a cold end and a hot end. The cold end is part of an extruder system that pulls and feed the material from the spool, and pushes it towards the hot end. The cold end is mostly gear- or roller-based supplying torque to the material and controlling the feed rate by means of a stepper motor. The hot end is the active part which also hosts the liquefier of the FDM that melts the filament. The hot end consists of a heating chamber and nozzle [10]. The melt flow channel's shape and length in nozzle are designed for thermoplastic material [11]. It is important to know what happens in the melt flow channel when a composite of PLA filled metal particles pass through the nozzle. The flow behavior at the melt flow channel is affected by the wear of the nozzle tip [12]. Feed rate significantly affects the force required to push the filament. This directly effects the quality of the product as the road width of the product varies. Hence it is crucial to know the force required to push the filament in the melt flow channel [13]. The other parameters for the investigation are the volume of material and the temperature distribution along the melt flow channel as the material from the solid filament converts into semi-molten state in the melt flow channel [14]. However, the temperature in the melt flow channel must be constant as the condition of the material properties [15]. The wear of the nozzle also leads to the defected in parts, which cause a troublesome in feeding mechanism. The defected in parts are appearance on surface quality and loss of accuracy [16].

This paper presents an experimental study on two important process parameters of FDM including feed rate and volume of material are to determine the effect of these process parameters that significant effect on FDM nozzle wear. Since the nozzle wear requires constant maintenance and inspection, which leads to machine down-time and increase the process costs, the nozzle wear problem should be investigated by in-depth experimental.

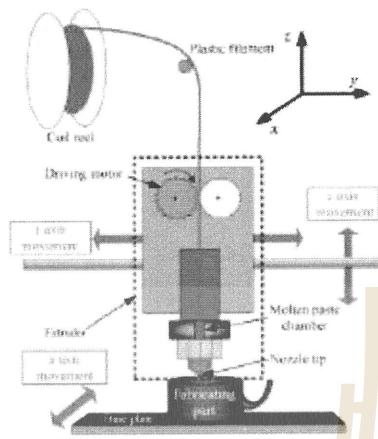


Figure 1. Schematic diagram of FDM process

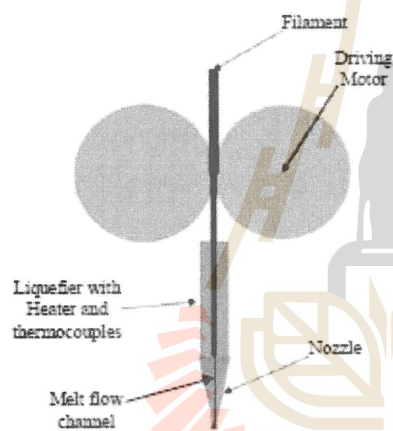


Figure 2. Schematic diagram of extrusion set

II. EXPERIMENT

A. Investigated Parameter

The foregoing discussions reveal, that two important process parameters of FDM include feed rate and volume of material, which is the most influencing the wear of the FDM nozzle. The experiments are assigned into four level according to volume of material and feed rate, while temperature is kept at fixed level factor. The variable factor and fixed level factor are assigned, as shown in Table I.

B. Specimen Preparation

The experimental campaign involved specimen made of stainless steel PLA, filament developed by Proto-Pasta Inc., a widely used composite material for FDM processed parts. The dimension of specimen is 10mm × 17.5mm × 60mm (width × height × length), as shown in Fig. 3. The specimen were designed via SolidWork 2014x64 Edition software and exported as STL file. The STL file is imported to Cura 14.01 software for parameter setting and model printing, as shown in Fig. 4.

Before proceeding with experimentation, it was necessary to control the mass of the stainless steel PLA filament used for experimentation. In order to perform this experiment, the mass of the stainless steel PLA was calculated using Archimedes principle, are as follows:

$$\rho_{\text{stainless}} = m / V \quad (1)$$

$$m = \rho_{\text{stainless}} \times V \quad (2)$$

where $\rho_{\text{stainless}}$ is the nominal density of the stainless steel PLA is given as 2.38 g/cm³, m is the mass of material (g) and V is the volume of material (cm³).

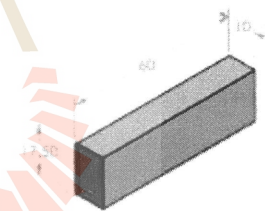


Figure 3. Dimension of the specimen (mm)

TABLE I. LIST OF FACTORS AND THEIR LEVELS

Fixed factor			Variable factor							
Factor	Symbol	Value	Unit	Factor	Symbol	Level				Unit
Temperature	T	210	°C	Feed rate	f	25	50	75	100	mm/s
				mass of material	m	125	250	375	500	g

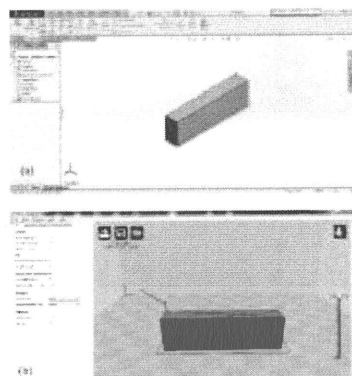


Figure 4. (a) Parts designed via SolidWorks 2014-rs64 Edition software and (b) Parameter setting via Cura 14.01 software

C. Experimental Setup

The experiment was conducted by using standard nozzle size 0.4mm, fitted with the FDM Inventor-3D machine, as shown in Fig. 5. The specimen (Fig. 3) is modelled in software and exported as STL file. STL file imported to FDM Inventor-3D machine. Hence, control factor (Table I.) are set as per experiment plan, as shown in Table II. In experiment plan, study of two variable factor at four level requires number of experiments is 16 (2^4). After the parts were printed the used nozzle was then cut and investigated its cross section by milling machine and microscope, respectively.

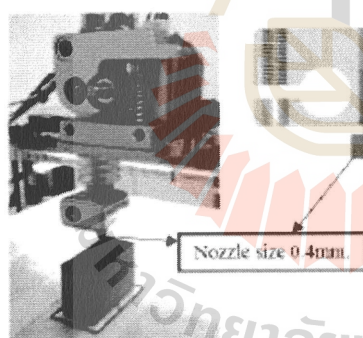


Figure 5. Picture of standard nozzle size 0.4mm fitted with the FDM extrusion set

D. Measurement Method

The used nozzles are cut by milling machine, then their cross-section are measured in order to investigate to variation, as shown in Fig. 6. To determine the wear of nozzle, the diameter of nozzle that prints specimen is measured, as shown in Fig. 7. The percentage of the nozzle wear rate is calculated by the following equation:

$$\text{Wear rate (\%)} = ((0.4 - X) / 0.4) \times 100 \quad (3)$$

where X is the dimension of nozzle diameter after print specimen (mm) and 0.4 is the size of nozzle before print specimen (mm).

TABLE II. EXPERIMENT PLAN

Variable Factor:			
Exp. No.	f	m	T
1	25	125	210
2	25	250	210
3	25	375	210
4	25	500	210
5	50	125	210
6	50	250	210
7	50	375	210
8	50	500	210
9	75	125	210
10	75	250	210
11	75	375	210
12	75	500	210
13	100	125	210
14	100	250	210
15	100	375	210
16	100	500	210

Figure 6. Drawing of nozzle



Figure 7. A measuring of dimension of nozzle diameter

III. RESULT AND DISCUSSION

The results were obtained by printing all the four level of two variable factor and controlled fixed factor. The result shown that nozzle shapes related with the variable factor. The diameters of nozzles were expanded when more printed material and feed rate was printed. The dimensions of the nozzle diameters were measured, as shown in Fig. 8 and as shown in Table III. The wear rate of each experiment level were determined, as shown in Table IV. The relationship between the printed material, feed rate and nozzle diameter were presented as linear relation in which nozzle diameters were expanded during to more material was printed, as shown in Fig. 9. In order to forecast nozzle wear, the effect of these process parameters in composite material filament is a significant factor that should be concerned.

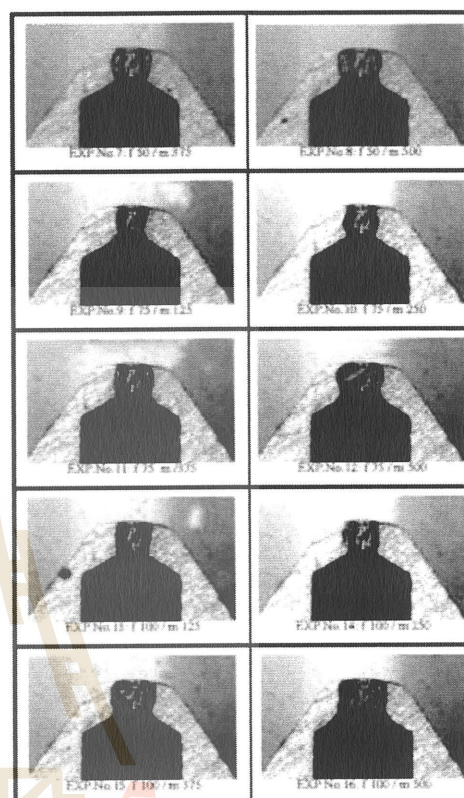
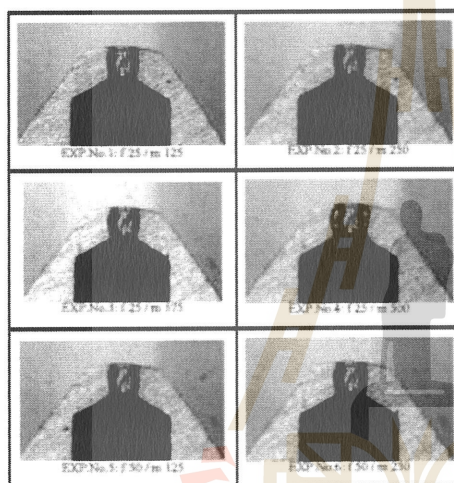


Figure 9. The dimension measurement of nozzle diameter

TABLE III. THE DIMENSION OF NOZZLE DIAMETER

Dimension of nozzle diameter (mm)	mass of material (g)				
	125	250	375	500	
Feed rate (mm/s)	25	0.48	0.55	0.68	0.83
	50	0.53	0.62	0.81	0.96
	75	0.58	0.70	0.86	1.05
	100	0.62	0.75	0.94	1.14

TABLE IV. THE PERCENTAGE OF THE NOZZLE WEAR RATE

Exp. No.	f	m	T	Nozzle diameter (mm)	Wear rate (%)
1	25	125	210	0.48	20.00
2	25	250	210	0.55	37.50
3	25	375	210	0.68	70.00

4	25	500	210	0.83	107.50
5	50	125	210	0.53	32.50
6	50	250	210	0.62	55.00
7	50	375	210	0.81	102.50
8	50	500	210	0.96	140.00
9	75	125	210	0.58	45.00
10	75	250	210	0.70	75.00
11	75	375	210	0.86	115.00
12	75	500	210	1.05	162.50
13	100	125	210	0.62	55.00
14	100	250	210	0.75	87.50
15	100	375	210	0.94	135.00
16	100	500	210	1.14	185.00

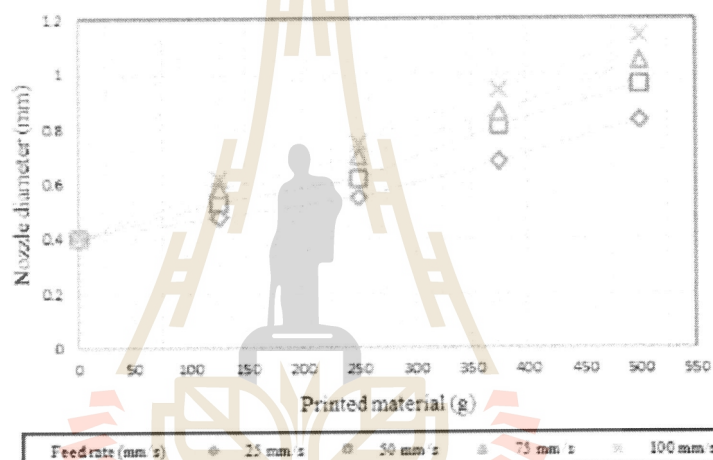


Figure 9. The relation between printed material, feed rate and dimension of nozzle diameter

IV. CONCLUSIONS

The printed material and feed rate in composite material filament are significant factor for FDM nozzle wear. The experimental results clearly demonstrated that the FDM nozzle wear rates related with the feed rate and printed material. Furthermore, the forecast nozzle wear equation will be study as a future work.

ACKNOWLEDGMENT

This research has been supported by the research and development supporting fund, Suranaree University of Technology.

REFERENCES

- [1] Chua C. K., Leong, K. F., and Lim, "Rapid prototyping principles and applications," World Scientific Pub Co Inc, 2010.
- [2] D. Pham and R. Gault, "A comparison of rapid prototyping technologies," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, pp. 1267-1287, 1998.
- [3] V. Kumar and D. Dorn, "An assessment of data formats for layered manufacturing," *Advances in Engineering Software*, vol. 28 (3), pp. 151-164, 1997.
- [4] S. Sriramanna, A. Roychoudhary, O. Diegel, and B. Huang, "Modeling and evaluation of curved layer fused deposition," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, p. 27-33, 2012.
- [5] S.S. Crump and Apparatus, "Method for Creating Three-Dimensional Objects," United States Patent, US, vol. 5, pp. 321-329, 1989.
- [6] M. Nikzad, S. Hasan Masood, I. Sharaki and A. Groth, "Study of Melt Flow Analysis of an ABS-Iron Composite in Fused Deposition

- Modelling Process," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 14, pp. 29-37, 2009.
- [7] M. Niazid, S.H. Masood and I. Sharifi, "Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composite for Fused Deposition Modeling," *Material and Design*, vol. 32, pp. 3448-3456, 2011.
- [8] L. Li, Q. sun, C. Bellehumeur and P. Gu, "Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototype with locally controlled properties," *Journal of manufacturing processes*, vol. 4 No.2, pp. 129-140, 2002.
- B.H. Lee, J. Abdullah, and Z.A. Khan, "Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object," *Journal of materials processing technology*, vol. 169, pp. 54-61, 2005.
- [9] K. Thirumalinu, Pulak M. Pandey and N. Venkata Reddy, "Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling," *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, vol. 44, pp. 585-594, 2004.
- [10] Bellini, A., "Fused deposition of ceramics: A comprehensive experimental, analytical and computational study of material behavior, fabrication process and equipment design," Philadelphia, USA: Drexel University, 2002.
- [11] H. S. Ramasankar, "Melt Flow Behaviour of Poly-Epsilon-Caprolactone in Fused Deposition Modelling," *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2008.
- [12] R. Anitha, S. Arunachalam and P. Radhakrishnan, "Critical parameter influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 118, pp. 365-386, UK, 2001.
- [13] J. Tyberg and J. B. Helge, "FDM system and local adaptive slicing," *Material and Design*, vol. 20, pp. 77-88, 1999.
- [14] A. Karmarou and D. Karalekas, "Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process," *Material and Design*, vol. 30, pp. 44-50, 2013.
- [15] J. M. Arenas, Cristina A., F. Blaya and A. Sana, "Multi-criteria selection of structural adhesives to bond ABS parts obtained by rapid prototyping," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 33, pp. 67-74, 2012.
- [16] R. van Weeren, M. Agarwala, V. R. Jamalabed and A. Bandyopadhyay, "Quality of Parts Processed by Fused Deposition," 1993.



ประวัติผู้เขียน

นายเกรียงศักดิ์ มาศนอก เกิดเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านโนนสมบูรณ์ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนโนนสมบูรณ์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา ภายหลังได้ศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2553 ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2557 เมื่อสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานตำแหน่งวิศวกร ที่บริษัท บางกอกแปซิฟิคสตีล จำกัด หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2558 ปีที่สำเร็จการศึกษา 2560

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความวิชาการเรื่อง Effects of Composite Material Filaments on Fused Deposition Modeling Nozzle ในการประชุมวิชาการ 11th South East Asean Technical University Consortium Symposium (SEATUC) ที่เมืองโฮจิมินห์ ประเทศเวียดนาม และเสนอบทความวิชาการเรื่อง Feed Rate and Volume of Material Effects in Fused Deposition Modeling Nozzle Wear ในการประชุมวิชาการ The 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) ที่เมืองนาโงย่า ประเทศญี่ปุ่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี