



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลกระทบของความเร็วและความหนาแน่นของพลังงานที่มีต่อการกระจายอุณหภูมิสำหรับผงไนลอน 618-s ในเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติแบบผง

Effect of Velocity and Energy Density on Temperature Distribution of Nylon 618-s in Powder Based 3D Printer

ปรีชญพร ดวงคำ¹ กริช เจียมจิโรจน์^{1*}

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Patchayaporn Doungkom¹ Krit Jiamjiroch^{1*}

¹ Faculty of Engineering, Thammasat University, Rangsit Campus, Klong Luang, Pathumthani 12120

* Corresponding author.

E-mail: jkritt@engr.tu.ac.th; Telephone: 02 5643 001-9

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการพิมพ์ของผงไนลอน 618-s ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.180–0.355 mm จากหลักการ selective laser melting (SLM) ในการศึกษาที่ใช้แหล่งความร้อนจากเลเซอร์ไดโอดขนาด 800 mW โดยจะทำการสร้างแบบจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโมเดล 2 มิติ เพื่อหาช่วงความเร็วของเลเซอร์ที่ทำให้วัสดุหลอมเหลวได้ความลึกของชั้นงานที่ 0.20–1.00 mm ซึ่งกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่หัวเลเซอร์ 0.50–3.00 mm/s เพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมไปใช้ในทดลองการทำงานจริงของเครื่องพิมพ์ ผลของการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ความเร็วคือ 0.50–2.50 mm/s ทำให้ได้การหลอมเหลวที่มีความลึกโดยประมาณเท่ากับ 0.1–1.00 mm จึงเป็นเหตุผลให้การทดลองการทำงานจริงของเครื่องพิมพ์จะทำการควบคุมให้เลเซอร์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ความเร็ว 0.60 1.50 และ 2.40 mm/s ผลของความลึกที่ได้คือ 0.69 0.61 และ 0.51 mm ตามลำดับ สำหรับผลการคำนวณที่อาจจะไม่ตรงกับผลการทดลอง แต่ให้ผลที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน และความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) ยิ่งมีค่าสูงจะทำให้ค่าความลึกที่ได้นั้นมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

คำสำคัญ

เครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติ เครื่องพิมพ์สามมิติแบบผง เลเซอร์ เอสแอลเอ็ม

Abstract

The aim of this research is to investigate a printing process of nylon618-s, particle size between 0.180–0.355 mm, by Selective Laser Melting process (SLM). This process is based on a heat source from a 800 mW laser diode. First, temperature distribution by finite element modelling in 2D models was implemented in order to find a suitable laser speed that can completely melt Nylon 618s with 0.20–1.00 mm in depth. This simulation limited laser travelling speed between 0.50 and 3.00 mm/s. The suitable laser travelling speed from finite element method showed that it should be between 0.5 and

2.5 mm/s for obtaining a melting depth of approximately 0.1–1.0 mm. Thus, the actual printing tests on a single track was performed by controlling laser speeds at 0.60, 1.50, 2.40 mm/s. The resulting depth being 0.69, 0.61, 0.51 mm, respectively. It be can be seen that the experimental results may not exactly match with the simulation results but they still give a similar trend. Lastly it can be noted that, a higher the density of energy, results in a higher depth value.

Keywords

3D printer; powder base 3D printer; laser; SLM

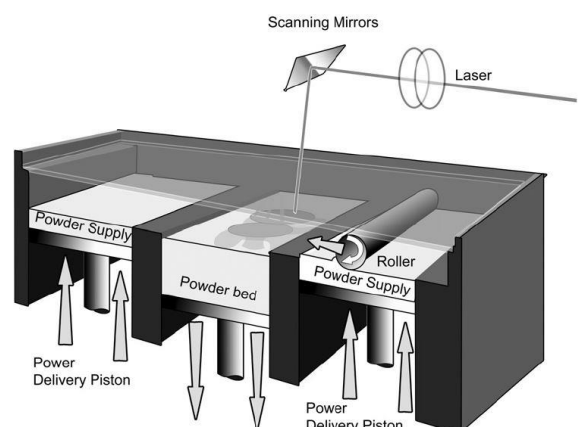
1. บทนำ

การพิมพ์ต้นแบบรวดเร็วหรือ rapid prototyping (RP) ได้รับความนิยมในกลุ่มของนักออกแบบ เช่น งานด้านวิศวกรรม สถาปัตยกรรม การแพทย์ รวมถึงการออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งการพิมพ์ต้นแบบที่รวดเร็วในปัจจุบันมีหลากหลายเทคนิค อาทิ การพิมพ์แบบพอก (fused deposition model, FDM) เทคโนโลยีการพิมพ์จากของเหลวไวแสง (Stereolithography, SLA) และ เทคโนโลยีการพิมพ์โดยอาศัยเลเซอร์เพื่อใช้ในการหลอมเหลวผงวัสดุ (selective laser sintering/melting, SLS/SLM) โดยการใช้เครื่องพิมพ์ประเภทใดนั้น ต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน แต่สำหรับเครื่องพิมพ์ชนิด SLS/SLM นั้นมีข้อได้เปรียบคือความหลากหลายของวัสดุเช่น โลหะผงหรือพลาสติกชนิดต่าง ๆ [1] หากแต่ต้องเลือกกำลังของเลเซอร์ที่เหมาะสมกับวัสดุพิมพ์ บทความนี้จะทำการวิเคราะห์ในส่วนของการขึ้นรูปสามมิติในหลักการการขึ้นรูปแบบหลอมเหลวบางส่วนโดยใช้ผง (selective laser sintering; SLS) โดยทำศึกษาด้วยผงไนลอน 618-s ซึ่งอยู่ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกส์ที่สามารถใช้เลเซอร์หลอมเหลวได้ ในปัจจัยหลักของการหลอมเหลวนั้นขึ้นอยู่กับกำลังของเลเซอร์และความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์ โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ความลึกของการดูดซึม (absorption depth) ของเลเซอร์ที่สามารถทะลุลงไปเนื้อของวัสดุได้

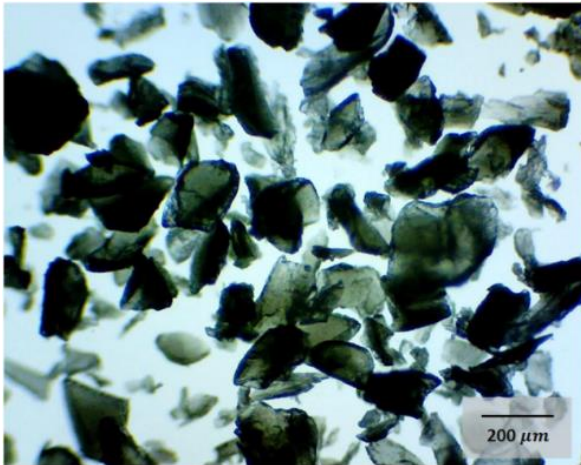
R.D. Goodridge และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาออกแบบและทดลองเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติแบบผง (selective

laser sintering/melting; SLS/SLM) สำหรับใช้กับผงพลาสติกหลาย ๆ ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยการทำงานเริ่มต้นจากแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดไปตกกระทบกระจกเพื่อบังคับทิศทางและสะท้อนแสงผ่านไปยังเลนส์ F-theta ไปยังผิวของวัสดุผงแล้วทำการเคลื่อนที่ที่เลเซอร์เป็นรูปพื้นที่หน้าตัดที่ได้ออกแบบไว้เพื่อให้ผงวัสดุหลอมเหลว จากนั้นทำการเคลื่อนที่ฐานรองรับชิ้นงาน (fabrication piston) ลงในแนวแกน z และลูกกลิ้งจะกวาดผงมาเติม จากนั้นทำการหลอมเหลวในชั้นถัดไปจนถึงชั้นสุดท้ายได้ชิ้นงาน ซึ่งจากการออกแบบและทดลองศึกษานี้ ถึงแม้จะได้เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ผงแบบหลอมละลายบางส่วนที่สามารถทำงานได้ แต่พบปัญหาหลายประการ อาทิ 1) ชนิดของพลาสติกที่ใช้ 2) ชนิดของแสงเลเซอร์ 3) ความง่ายในการปฏิบัติงาน

สำหรับประเด็นของชนิดพลาสติกที่ใช้สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติมีความสำคัญอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกเอง ทั้ง



รูปที่ 1 Selective laser sintering/melting [2]



รูปที่ 2 Powder Nylon 618-s

ในกรณีของ PLA และ ABS ที่ใช้กันมากสำหรับเครื่องพิมพ์ชนิดพอกที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน [3] ในปัจจุบันพลาสติกที่นิยมใช้สำหรับเครื่องพิมพ์ SLS/SLM นั้นมีอยู่สองกลุ่มคือ 1) กลุ่มไนลอน หรือ polyamine และ 2) กลุ่ม polyurethane [1]

Sasan Dadbakhsh และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาผลการขึ้นรูปของ polyamine 12 (PA12) โดยใช้เครื่อง SLS โดยพิจารณาในเชิงของการใช้ผงรีไซเคิลเทียบกับการใช้ผง PA12 บริสุทธิ์ และการผสมกันของผงทั้งสองชนิด โดยพบว่าเมื่อใช้การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย difference scan calorific, DSC พบว่า อุณหภูมิเริ่มหลอมเหลวและอุณหภูมิหลอมเหลวของ PA12 ทั้งสามกรณีไม่เปลี่ยนแปลงมากนักอยู่ที่ประมาณ 180 °C และ 187 °C ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการหลอมเหลวที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิ 220 °C ทั้งนี้สำหรับผงที่ใช้มีลักษณะพื้นฐาน เป็นรูปมันฝรั่ง (potato shape) ซึ่งผลสรุปพบว่า เมื่อนำผง PA12 มาใช้ซ้ำจะทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุลเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่หลอมเหลวสมบูรณ์จะเพิ่มสูงขึ้น สำหรับค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 92 J/g ถึง 102 J/g

ชนิดและกำลังของเลเซอร์นั้นเป็นอีกปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง โดยที่ชนิดของเลเซอร์ที่นิยมใช้กันมีสองประเภทคือ ชนิดต่อเนื่อง และ ชนิดไม่ต่อเนื่อง สำหรับชนิดไม่ต่อเนื่องนั้นนิยม

ตารางที่ 1 สมบัติทางความร้อนของผงไนลอน 618-s (Nylon618-s) [6]

Parameter	Value	Unit
Heat Conductivity	0.144	$W/m.K$
Density	0.90	g/cm^3
Specific heat	2.35	$J/g.K$

ตารางที่ 2 รายละเอียด Laser Diode

Parameter	Value	Unit
Peak Wavelength	808	nm
Power: P	800	mW
Operating Current	1.30	A
Operating Voltage (DC)	9-12	V
Focus Rang	1.5-5	in
Diameter of laser beam: d	1	mm

ใช้ในงานที่ต้องการกำลังที่สูง เช่นงานของ Shuja, Z และคณะ [5] ที่ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างในการขึ้นรูปโลหะและทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยใช้ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ขนาด 2000 W เส้นผ่านศูนย์กลางลำแสง 0.3 mm ฉายไปยังผิวของแผ่นเหล็กทรงสี่เหลี่ยม ทำการเคลื่อนที่เลเซอร์เป็นแนวเส้นตรงที่ความเร็ว 0.15 และ 0.05 mm/s โดยควบคุมพัลส์เลเซอร์ที่แตกต่างกัน (laser pulse parameter; β) $0 \leq \beta \leq 1$ ผลจากการศึกษาพบว่าขนาดของพัลส์เลเซอร์นั้นส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของความเข้มของแสง และการขึ้นรูปของชิ้นงาน

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาจำเพาะในกลุ่มของไนลอนเท่านั้น เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่แคบ ในส่วนของกำลังและชนิดของเลเซอร์นั้นจริงอยู่ที่พัลส์เลเซอร์มีข้อดีหลายประการแต่มีราคาสูง เนื่องจากในการทดลองศึกษานี้มีงบประมาณจำกัด จึงมุ่งเน้นที่เลเซอร์ชนิดต่อเนื่อง ที่มีราคาถูกกว่ามาก ในการศึกษาเน้นการศึกษาเพื่อหาค่าความลึกซึ่งเป็น พารามิเตอร์พื้นฐานในการกำหนดความหนาในแต่ละชั้นของการพิมพ์

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการหลอมเหลวและแข็งตัวของไนลอน 618-s ซึ่งมีสมบัติตามหัวข้อ (2.1) จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลอง (แสดงหลักการคำนวณตามหัวข้อที่ 2.2) และนำผลการจำลองมาทดลองพิมพ์ชิ้นงานจริงในหัวข้อ 2.3 จากนั้นจึงทำการตรวจวัด แล้วจึงนำผลการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกัน

2.1 วัสดุ

สำหรับผงพลาสติกที่ใช้นั้นเป็นผงไนลอน 618-s สมบัติของวัสดุผง ซึ่งมีลักษณะของผงเป็นชนิดอสัณฐานดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการเตรียมโดยใช้ตะแกรงเพื่อคัดขนาดผงระหว่าง 0.18–0.35 mm อุนหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ ในการหลอมเหลวเท่ากับ 217 °C สำหรับสมบัติทางความร้อนอื่น ๆ นั้นแสดงในตารางที่ 1

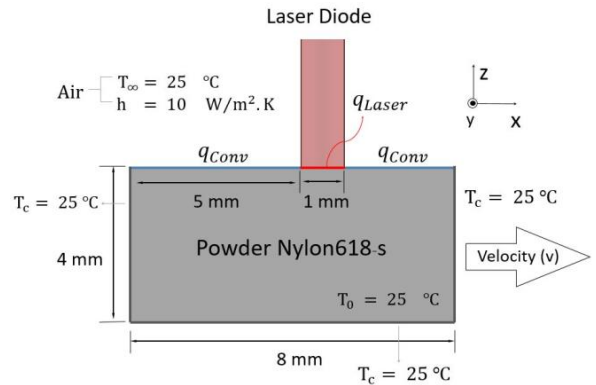
เลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์ชนิดไดโอด โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในย่านอินฟราเรด โดยกำลังของเลเซอร์จะเลือกใช้ตามอุนหภูมิที่จุดหลอมเหลวของผงไนลอน 618-s (อุนหภูมิจุดหลอมเหลวของผงไนลอน 618-s เท่ากับ 217 °C) สำหรับคุณสมบัติอื่น ๆ นั้นแสดงในตารางที่ 2

2.2 แบบจำลอง

แบบจำลองเลเซอร์หลอมเหลว SLM ในที่นี้ ใช้หลักการของแบบจำลอง (โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข) วิเคราะห์จากปริมาณ Conversion (da/dt) [3] สำหรับโดเมนที่ใช้ในการศึกษานี้ ทำการกำหนดเป็น semi-infinite slab ขนาดโดเมนเท่ากับ 4×5 mm โดยที่เลเซอร์เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 mm/s ดังแสดงในรูปที่ 3

สำหรับสมมุติฐานในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย

- 1) วิเคราะห์เป็นระนาบ 2 มิติ
- 2) ไม่มีการถ่ายเทมวลทั้งเข้าและออกจากแบบจำลอง
- 3) โดเมนของไนลอน 618-s เป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีรูพรุน



รูปที่ 3 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

2.2.1 แบบจำลองทางความร้อน

สมการการถ่ายเทความร้อนในแบบจำลอง (heat transfer equation) [5]

$$\rho \frac{\partial (C_p T)}{\partial t} = (\nabla \cdot (k \nabla T)) + v \nabla \cdot (\rho C_p v T) + S_0 \quad (1)$$

โดยที่ $v = u_{trans}$; u_{trans} คือ ความเร็ว (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$)

T คือ อุณหภูมิ (K)

t คือ เวลา (s)

k คือ ค่าการนำความร้อน ($W/m \cdot K$)

S_0 คือ ความร้อนจากการดูดกลืน (W)

โดยให้ u_{trans} คือ การเคลื่อนที่ของโมเดล (slab) ทำการศึกษาโดยใช้ความเร็วสัมพันธ์ระหว่างเลเซอร์กับแผ่นเบต เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาก็จะออกแบบให้แบบจำลองเคลื่อนที่ในขณะที่เลเซอร์ที่อยู่กับที่

สมการการดูดกลืนแสง ซึ่งอธิบายโดยการดูดกลืนความร้อนเกิดจากเลเซอร์ที่ตกกระทบผิว ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงาน ซึ่งเป็นไปตามสมการของแลมเบิร์ต (Lambert law) [7,8]

$$S_0 = I_0 d (1 - r_f) \exp(-dz) \quad (2)$$

โดยที่ S_0 คือ ความร้อนจากการดูดกลืน (W)

I_0 คือ กำลังเลเซอร์ (W)

δ คือ ค่าการดูดกลืน ($1/m$)

r_f คือ ค่าการสะท้อน

z คือ แกนในแนวดิ่ง (m)

2.2.2 เงื่อนไขเริ่มต้น

อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ มีค่าเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นที่ $25^\circ C$

$$T = T_0 \quad (3)$$

2.2.3 สำหรับเงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขต ณ ตำแหน่งทางด้านบนของเบต มีสองเงื่อนไขคือ ณ ตำแหน่งเลเซอร์โดยขนาดความกว้างของขอบเขตนี้มีขนาดเท่ากับ 1 mm ซึ่งเป็นแบบ Neumann condition และ ณ ตำแหน่งที่เหลือจะเป็น Robin condition ดังแสดงในสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

Neumann condition

$$k \frac{\partial(T)}{\partial x_i} \Big|_{i=1,2} = S_0 \quad (4)$$

Robin condition

$$k \frac{\partial(T)}{\partial x_i} \Big|_{i=1,2} + h(T - T_0) = 0 \quad (5)$$

โดยที่ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/(m^2 \cdot K)$)

สำหรับขอบด้านที่ เหลือกำหนดให้เป็น finite slab ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบ Dirichlet condition ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$T|_{i=1,2} = T_0 \quad (6)$$

2.2.4 สมการการเปลี่ยนแปลงสมบัติของชิ้นงาน

สมการการเปลี่ยนแปลงสมบัติของชิ้นงานนั้นขึ้นเป็นไปตามสมการที่ (7)–(9) ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัตินั้นขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ (conversion, $d\alpha/dt$) ซึ่งได้จากการทดลองใน TGA-DSC [7]

$$k = \theta k_{phase1} + (1 - \theta) k_{phase2} \quad (7)$$

$$C_p = \theta C_{p,phase1} + (1 - \theta) C_{p,phase2} + L \frac{d\alpha}{dT} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{\theta \rho_{phase1} C_{p,phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2} C_{p,phase2}}{\theta C_{p,phase1} + (1 - \theta) C_{p,phase2}} \quad (9)$$

โดยที่ θ = ค่าบ่งบอกสถานะ ($\theta = 1$; ของแข็ง), ($\theta = 0$; ของเหลว)

L คือ ค่าความร้อนแฝง (J/kg)

k_{phase1} คือ ค่าการนำความร้อนของแข็ง ($W/m.K$)

k_{phase2} คือ ค่าการนำความร้อนของเหลว ($W/m.K$)

$C_{p,phase1}$ คือ ความจุความร้อนของแข็ง ($J/kg.K$)

$C_{p,phase2}$ คือ ความจุความร้อนของเหลว ($J/kg.K$)

ρ_{phase1} คือ ความหนาแน่นของแข็ง (kg/m^3)

ρ_{phase2} คือ ความหนาแน่นของเหลว (kg/m^3)

กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิของโมเดลจะทำให้ค่าการนำความร้อน k , ค่าความจุความร้อนจำเพาะ c_p , และค่าความหนาแน่น ρ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย กำหนดให้สถานะและลักษณะทางกายภาพของการวิเคราะห์แบบจำลองเป็นดังนี้ 1) ฉายเลเซอร์ไปยังผิวโมเดลที่กำลังสูงสุด 800 mW 2) ค่าการดูดกลืน absorption depth มีค่าเท่ากับ 0.1 cm^{-1} กำหนดให้โมเดลเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x (velocity, v) อยู่ในช่วงตั้งแต่ $0.5\text{--}3.0\text{ m/s}$ และ อุณหภูมิเริ่มต้นของโมเดลเท่ากับ $25^\circ C$ สมการ (1) และ (2) สามารถนำมาหาคำตอบโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยกำหนดความเร็วของเลเซอร์ออกเป็น 6 เงื่อนไข คือ $0.50\ 1.00\ 1.50\ 2.00\ 2.50$ และ 3.00 mm/s เพื่อหาความลึกของชิ้นงานที่ความเร็วเลเซอร์ที่แตกต่างกัน

2.3 การทดลองพิมพ์ชิ้นงานจริง

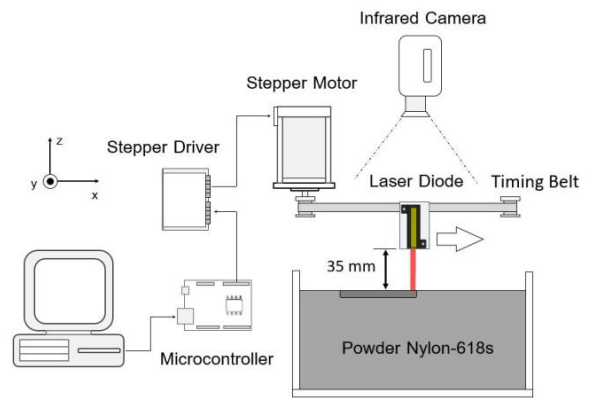
สำหรับเครื่องพิมพ์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องพิมพ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการการออกแบบอุตสาหกรรมเชิงสร้างสรรค์ (Innovative Industrial Designs,

iiDs) ม.ธรรมศาสตร์รังสิต โดยเครื่องที่ทำการออกแบบนี้ เป็นเครื่องพิมพ์ SLM ที่ใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ในการขับ เครื่องสามารถพิมพ์ชิ้นงานสูงสุดที่สามารถพิมพ์ได้เท่ากับ 150x150x120 mm การพิมพ์ใช้เลเซอร์ไดโอดชนิดต่อเนื่อง มีความยาวคลื่นในย่านอินฟราเรดเท่ากับ 808 nm ขนาด 800 mW มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลเซอร์เท่ากับ 1 mm และกำหนดระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับผิวของผงวัสดุเป็นระยะโฟกัสเท่ากับ 35 mm

การทดลองจะทำการปรับความเร็วของเลเซอร์ที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4 โดยการควบคุมความเร็วผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์และสเต็ปเปอร์ไดรเวอร์ (stepper driver) โดยสเต็ปเปอร์ไดรเวอร์นั้นจะทำการควบคุมความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ทำให้สามารถทำการปรับอัตราเร็วของมอเตอร์ได้ การทดลองจะกำหนดให้เลเซอร์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะ 50 mm โดยกำหนดความเร็วของเลเซอร์ออกเป็น 3 เรือนไข คือ 0.60 1.50 และ 2.40 mm/s โดยความเร็วที่ได้ทั้ง 3 เรือนไขนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ที่ทำให้ได้ค่าความลึกของชิ้นงานในช่วง 0.20–0.92 mm ซึ่งเป็นความลึกที่ต้องการใกล้เคียงกับที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นคือ 0.2–1.00 mm ดังนั้นเป็นเหตุผลให้ใช้ความเร็วในช่วง 0.5–2.5 mm/s มาทำการทดลองนั่นเอง

2.4 ความหนาแน่นของพลังงาน (Energy Density, E_d) [10]

ความหนาแน่นของพลังงาน (energy density, E_d) เป็นผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ของกำลังเลเซอร์ (power: P), ความเร็วเลเซอร์ (velocity, V) และเส้นผ่านศูนย์กลางเลเซอร์ (spot diameter, d) ซึ่งสมการนี้สามารถวิเคราะห์ความหนาแน่นของพลังงานที่เงื่อนไขของความเร็วที่แตกต่างกัน โดยที่ กำลังเลเซอร์และเส้นผ่านศูนย์กลางเลเซอร์เท่าเดิม ดังสมการ energy density



รูปที่ 4 อุปกรณ์การทดลอง

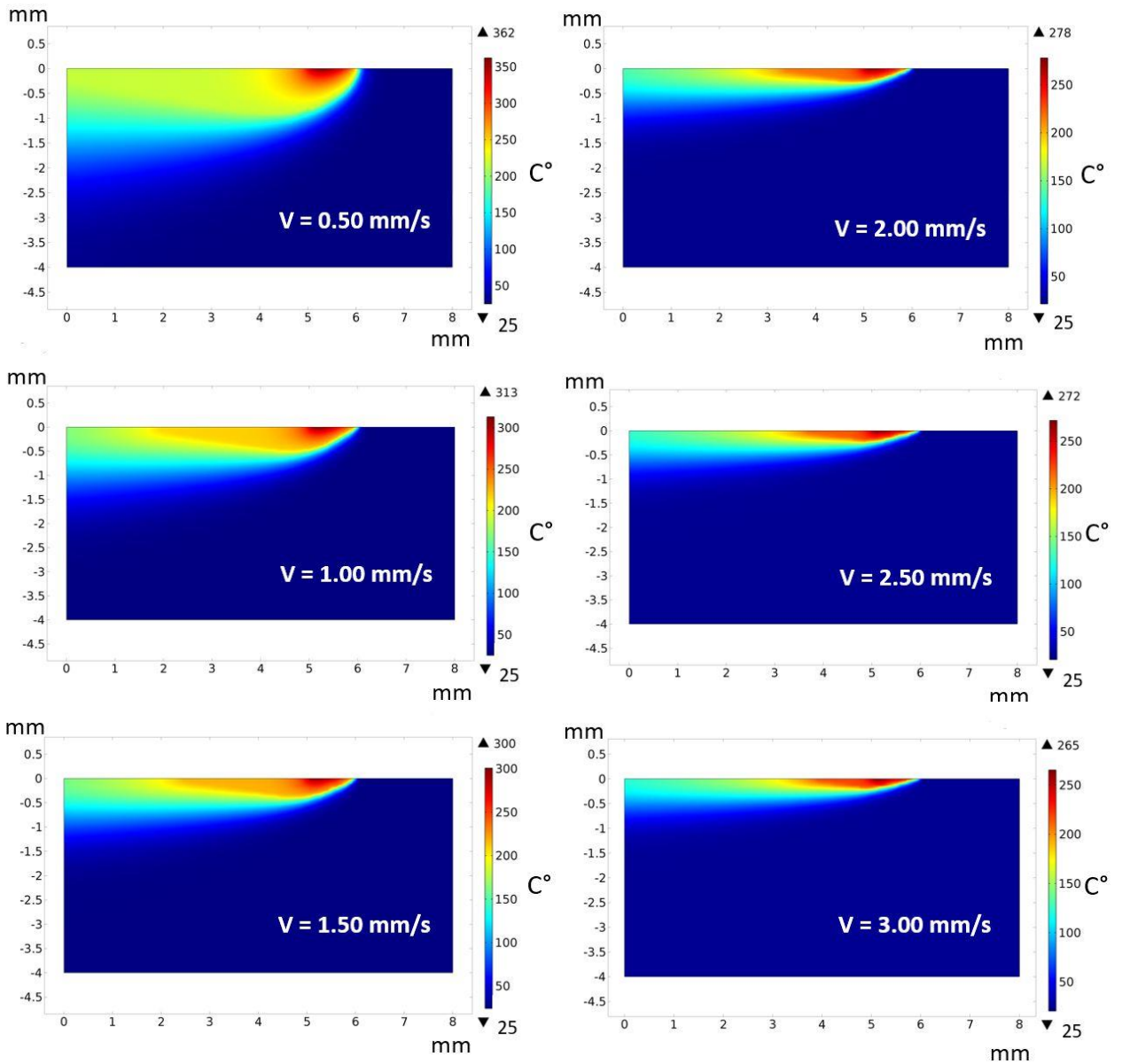
$$E_d = \frac{P}{V \cdot d} \quad (10)$$

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

จากรูปที่ 5 เป็นผลเฉลยการกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่ความเร็วต่างกัน (0.50–3.00 mm/s) จะพบว่าที่ความเร็วต่างกันจะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิต่างกันคือ เมื่อความเร็วสูงขึ้นส่งผลให้ความลึกในการดูดกลืนมีค่าลดลงอันสืบเนื่องมาจากที่ความเร็วต่ำจะมีระยะเวลาในการดูดกลืนพลังงานได้นาน ทำให้พลังงานความร้อนของเลเซอร์ที่ตกกระทบบริเวณผิวด้านบนของโมเดลเกิดการถ่ายเทความร้อนและการนำความร้อนไปยังพื้นที่ใกล้เคียงได้มาก แต่ในทางกลับกันที่ความเร็วสูงจะเกิดการดูดกลืนพลังงานความร้อนได้น้อยจึงทำให้เกิดการนำความร้อนไปยังพื้นที่ใกล้เคียงได้น้อย

รูปที่ 6 แสดงการวิเคราะห์การหลอมเหลวซึ่งเป็นผลเฉลยที่ต่อเนื่องมาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวของผงวัสดุในลอน 618-s เท่ากับ 217 °C จากรูปที่ 6 แสดงผลเฉลยการหลอมเหลวที่ความเร็วต่าง ๆ คือ 0.50 1.00 1.50 2.00 2.50 และ 3.00 mm/s ได้ผลเฉลยของความลึกคือ 0.92 0.45 0.36 0.24 0.20 และ 0.14 mm ตามลำดับ



รูปที่ 5 ผลเฉลยการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature; $^{\circ}\text{C}$)

พื้นที่สีดำแสดงส่วนที่หลอมเหลว (สถานะของเหลว) ส่วนพื้นที่สีเทาแสดงส่วนที่ไม่หลอมเหลว (สถานะของแข็ง)

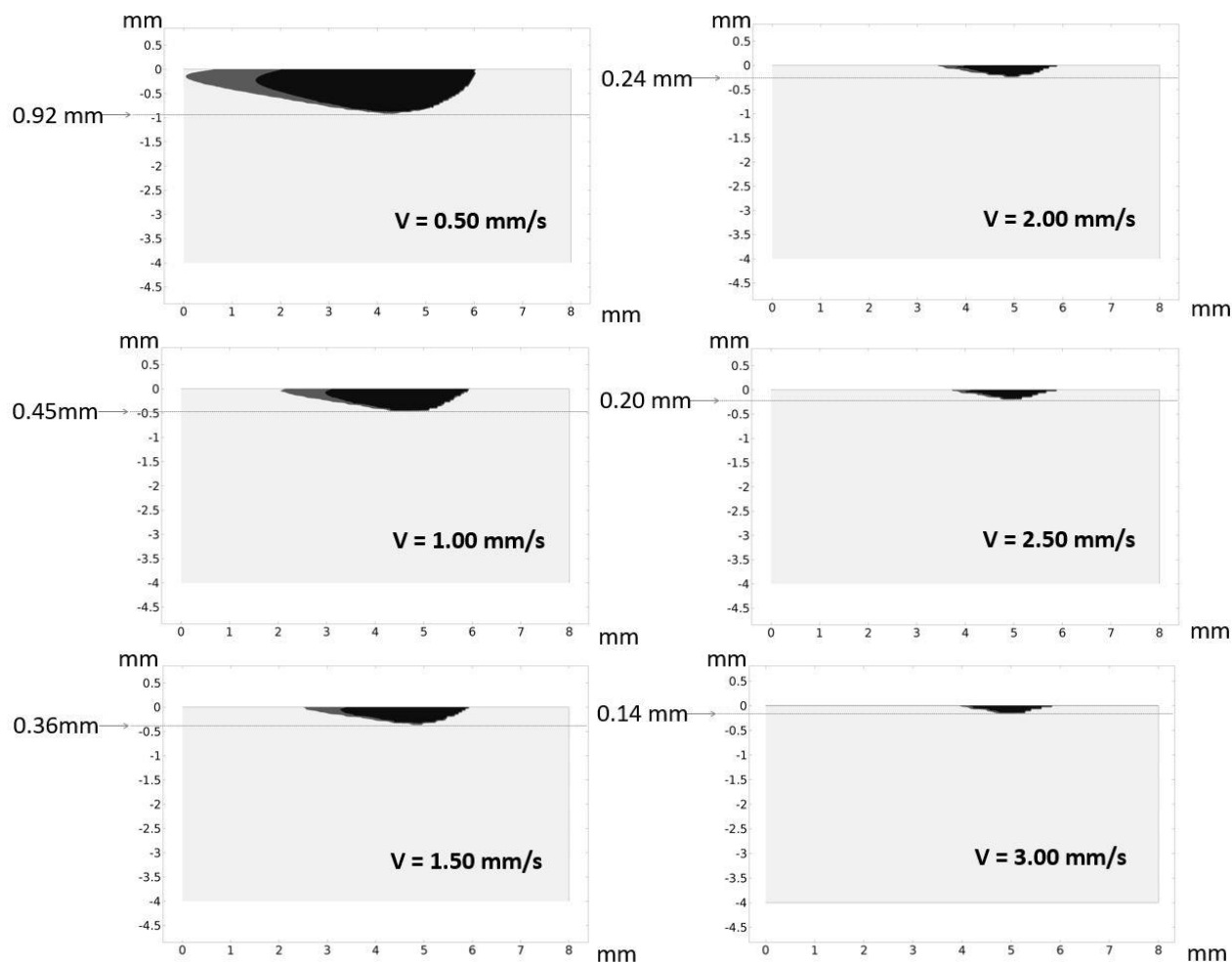
3.2 ผลการทดลองขึ้นรูป

การขึ้นรูปชิ้นงานจากอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 7 ได้จากการทำการทดลองเคลื่อนที่เลเซอร์เป็นระยะทาง 50 mm จากนั้นจึงทำการเทรซิงเพื่อทำการเก็บตัวอย่างภาพตัดขวางของตัวอย่างชิ้นงาน โดยระยะความลึกของชิ้นงานนั้น สามารถ

ทำการตรวจวัดได้ด้วยถ่ายภาพตัดขวางแล้วจึงนำภาพไปทำการตรวจวัดความลึกโดยใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ

3.2.1 ผลการทดลองวัดความลึกจากชิ้นงาน

ความลึก (depth) ที่เงื่อนไขของความเร็ว 0.6 1.5 และ 2.4 mm/s ได้ความลึกที่วัดจากภาพตัดขวาง (section view) คือ 0.69 0.61 และ 0.51 mm ตามลำดับ โดยทำการสุ่มวัด



รูปที่ 6 ผลเฉลยการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature; °C)

ความลึกทั้งหมด 3 ตำแหน่ง (ด้านปลายและตรงกลางของชิ้นงาน) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 3

3.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณ และการทดลองการทำงานจริงของเครื่องพิมพ์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์และความลึกเฉลี่ยของชิ้นงานโดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าความลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (simulation) และค่าความลึกที่ได้จากการทดลองการทำงานจริงของเครื่องพิมพ์ (experiment) ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขและการทดลองการทำงานจริงของเครื่องพิมพ์มีแนวโน้มไปในทิศทาง

เดียวกัน คือค่าความลึกจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วของหัวเลเซอร์มากขึ้น โดยที่ความเร็วต่ำจะมีค่าความลึกใกล้เคียงกัน ที่ความเร็วสูงขึ้นจะมีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิเคราะห์ทั้งโดเมนเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน และทำการวัดค่าความลึกที่บริเวณที่เกิดการหลอมเหลว แต่ในทางตรงกันข้ามกับการทดลองการทำงานจริง ผงวัสดุที่ใช้มีขนาดระหว่าง 0.18–0.35 mm เมื่อใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์สูงจะทำให้ผงวัสดุหลอมเหลวบางส่วนเท่านั้น ทำให้ค่าความลึกที่วัดได้ไม่ใช่ค่าความลึกของผงวัสดุที่หลอมเหลวทั้งหมด แต่จะเป็นค่าความลึกที่รวมกับอนุภาคของผงวัสดุที่หลอมเหลวบางส่วนติดมาด้วย

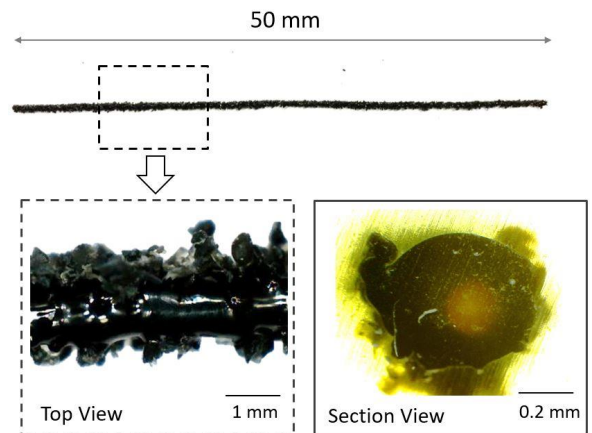
แม้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์จะให้ผลเฉลยที่ไม่ถูกต้องมากนัก ผลจากค่าความตึงผิวซึ่งพบมากในกระบวนการแข็งตัวของไนลอน 618-s โดยที่ผิวด้านบนจะมีแนวโน้มสูงขึ้นทำให้ความลึกสูงขึ้นตามไปด้วยแต่ขอบของชิ้นงานมีแนวโน้มหดตัวทำให้ความกว้างของชิ้นงานในพื้นที่หน้าตัดมีค่าน้อยลงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ใช้ให้แนวโน้มในทางเดียวกัน โดยความคลาดเคลื่อนนั้นอาจเกิดจากค่าสมมุติฐานในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น เกิดจากโมเดลไม่ได้คิดเป็นวัสดุพรุน (porous) และค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เป็นต้น ปัจจัยต่อมาคือขณะทำการทดลองเกิดจากแรงตึงผิว (surface tension) พังวัสดุเกิดการหลอมเหลวและในขณะที่วัสดุแข็งตัวจะทำให้ชิ้นงานดันตัวขึ้นด้านบนด้วย จึงทำให้เกิดการแข็งตัวหลังการหลอมเหลวจะทำให้ความลึกเพิ่มขึ้นด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ค่าความลึกของการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขและการทดลองการทำงานจริงของเครื่องพิมพ์มีค่าไม่เท่ากัน

3.4 ผลลัพธ์จากสมการความหนาแน่นของพลังงาน (Energy Density, E_d)

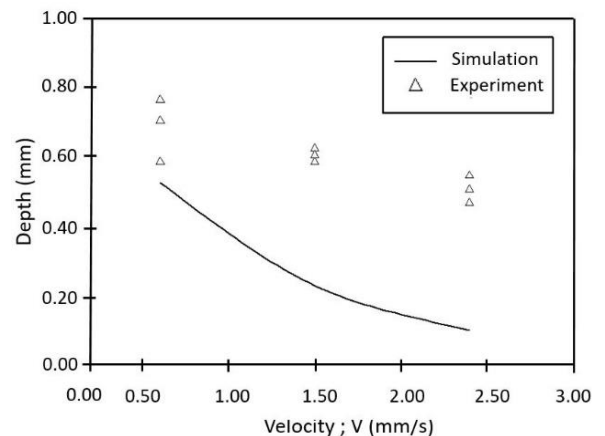
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง energy density, E_d กับค่าความลึกเฉลี่ยของชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง energy density เป็นผลลัพธ์จากสมการที่ 10 โดยที่ กำลังเลเซอร์มีค่าเท่ากับ 800 mW เส้นผ่านศูนย์กลางเลเซอร์เท่ากับ 1 mm และความเร็วเท่ากับ 0.6 1.5 และ 2.4 mm/s กล่าวคือ energy density, E_d จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็ว พบว่าที่ความเร็วต่ำจะทำให้ค่า E_d มีค่าสูงและที่ความเร็วสูงจะทำให้ค่า E_d มีค่าต่ำตามลำดับ จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าที่ E_d มีค่าสูงจะทำให้ค่าความลึกที่ได้นั้นมาค่ามากขึ้นตามลำดับ

4. สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลอง เพื่อหาความเร็วของหัวเลเซอร์ที่ทำให้ได้ความลึก (depth) ในช่วง 0.20–1.00 mm จากการวิเคราะห์การหลอมเหลวไนลอน 2 มิติ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใน



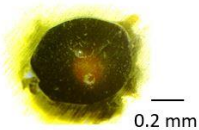
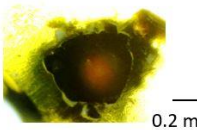
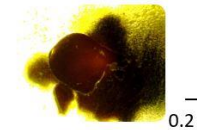
รูปที่ 7 ชิ้นงานที่ความเร็ว 0.6 mm/s [9]

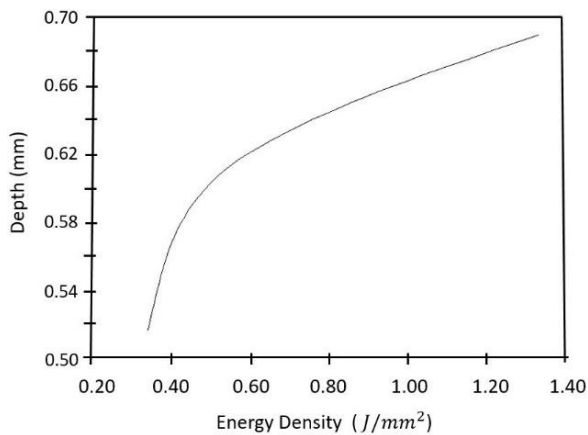


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ความเร็วกับความลึก เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลข (simulation) และการทดลองการทำงานจริงของเครื่องพิมพ์ (experiment)

เครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติโดยใช้วัสดุผง ในหลักการ selective laser melting, SLM) ในช่วงความเร็ว 0.50–3.00 mm/s ผลเฉลยที่ได้คือ ที่ความเร็ว 0.50–2.50 mm/s ทำให้ได้ความลึก 0.20–1.00 mm ซึ่งถูกนำมาใช้กำหนดเป็นเงื่อนไขของความเร็วของหัวเลเซอร์ในการทดลองพิมพ์ชิ้นงานจริงคือ 0.6 1.5 และ 2.4 mm/s และผลจากการทดลองพบว่า ความลึกเฉลี่ย 0.69 0.61 และ 0.51 mm ตามลำดับ โดยค่าความลึกของการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง

ตารางที่ 3 เปรียบความลึกของชิ้นงานที่ความเร็วเลเซอร์ต่างกัน [3]

ความเร็ว รายการ	0.6 mm/s	1.5 mm/s	2.4 mm/s
ภาพตัดขวางชิ้นงาน			
ความลึกชิ้นงานเฉลี่ย	0.69 mm	0.61 mm	0.51 mm



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง energy density กับ ความลึก (depth)

การทำงานจริงคือ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นความลึกของชิ้นงานลดลง โดยการวัดค่าความลึกของชิ้นงานนั้น อาจเกิดการคลาดเคลื่อนเนื่องจากข้อจำกัดคือ ไม่สามารถทะลุชิ้นลงได้ทั้งหมดของพื้นผิวเบด ทำให้ค่าการวัดความลึกที่ได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเมื่อเทียบกับระดับความสูงที่ผิวเบด ซึ่งการลดลงของความหนาของชิ้นงานเป็นไปตาม Lambert law และเมื่อใช้ความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้ผงวัสดุหลอมเหลวบางส่วน ทำให้ค่าความลึกที่วัดได้นั้นเป็นค่าความลึกที่รวมกับอนุภาคของผงวัสดุที่หลอมเหลวบางส่วนติดมาด้วย จึงทำให้แบบจำลองการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขให้ผลเฉลยที่ไม่ถูกต้องมากนักเนื่องจากโมเดลไม่ได้คิดเป็นวัสดุพูน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและทุนการศึกษาของนายปรัชญาพร ดวงคำ จากกองทุนวิจัย คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

เอกสารอ้างอิง

[1] ปรัชญาพร, ชนากานต์, ศิริณญา. ประเภทของเครื่องพิมพ์สามมิติ การออกแบบและพัฒนา เครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติโดยเทคนิคการแข็งตัวของของเหลว. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2557.

[2] Goodridge RD, Tuck CJ, Hague RJM. Laser sintering of polyamides and other polymers. *Progress in Materials Science*. 2012; 57: 229–267.

[3] ปรัชญาพร ดวงคำ, การพัฒนาเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติจากวัสดุผงและการศึกษาพารามิเตอร์ในการพิมพ์ : กรณีสึกษาในลอน 618-s. วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2559.

[4] Dadbakhsh S, Verbelen L, Verkinderen O, Strobbe D, Puyvelde PV, Kruth JP. Effect of PA12 powder reuse on coalescence behaviour and microstructure of SLS parts. *European Polymer Journal*. 2017; 92: 250–262.

[5] Shuja SZ, Yilbas BS, Momin O. Laser heating of a moving slab : Influence of laser intensity parameter and scanning speed on temperature field and melt size. *Optics and Lasers in Engineering*. 2011; 49: 265–272.

[6] Krassenstein E. taulman3D releases New Nylon 618-s Laser Sintering 3D Printing Powder. เข้าถึงได้

จ ำ ก : <http://3dprint.com/14441/taulman3d-nylon-618-s>.

- [7] Rolf Klein. Laser Welding of Plastics. KGaA Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., ISBN: 978-3-527-40972-3; 2011; p.109–136.
- [8] Jiamjiroch K. Developments of a fluidized bed process for the recycling of carbon fiber composites. Thesis, Nottingham University, U.K. 2012.
- [9] ปรัชญาพร ดวงคำ, วรวิทย์ สุรปภา, กริช เจียมจิโรจน์. การทดสอบเงื่อนไขระบบหลอมเหลวโดยใช้เลเซอร์ สำหรับเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติสำหรับผงไนลอน 618-s. ใน: การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30. สงขลา; 2559. หน้า 117–122.
- [10] Campanelli SL, Contuzzi Nicola. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process. In: *New Trends in Technologies, Department of Management and Mechanical Engineering*. Viale Japigia, 182 Italy; 2010. Chapter 13.