

เงื่อนไขระบบหลอมเหลวโดยใช้เลเซอร์สำหรับเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติสำหรับผงไนลอน 618-s Effect of Parameters on the Laser Melting Process for Nylon 618-s Rapid Prototype

ปรัชญาพร ดวงคำ¹, วรวิทย์ สุรปภา² และ กริช เจียมจิโรจน์^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: +662 564 3001-9 ext. 3273

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงการวิเคราะห์ การหลอมละลายและแข็งตัวของผงไนลอน 618-s ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.35 mm โดยการฉายแสงไดโอดเลเซอร์ขนาด 800 mW ลงบนผิวเบดไนลอนเพื่อจำลองการทำงานของเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติโดยใช้ผงฝุ่น (Powder Based 3D printer) โดยจะทำการทดลองหาความหนาและความลึกที่เหมาะสม และเพื่อจำกัดขอบเขตที่ทำให้ชิ้นงานหลอมเหลว (windows process) จากปัญหาการแข็งตัวที่ไม่ต่อเนื่องกันของชิ้นงาน จากความเร็วการเคลื่อนที่ของไดโอดเลเซอร์และระยะความสูงระหว่างเลเซอร์กับผิวด้านบนของผงวัสดุ โดยการทดลองนี้จะทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของเลเซอร์เป็นเส้นตรงที่ความเร็ว 0.60, 1.50, 2.40 mm/s และระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับวัสดุผงเป็นระยะ 35, 40, 45 mm ผลการทดลองพบว่า สำหรับเงื่อนไขการทดลองนี้ ที่ความเร็ว 0.60 mm/s และระยะห่าง 35 mm มีความเหมาะสมกับผงไนลอนโดยเมื่อฉายแสงเลเซอร์ จะได้ชิ้นงานที่มีความหนา 1.17 mm

คำหลัก: เครื่องพิมพ์สามมิติ, เลเซอร์, SLM

Abstract

This paper presents a melting and solidification of nylon powder with particle size 0.35 mm by laser 800mW. Because travelling speed of laser and distance powder-bed/laser are importantly parameters for printing processes, they can be used for limiting window process region. For this experiment the travelling speed are between 0.60 and 2.40 mm/s and distances are 35, 40, 45 mm. The aim of this work is to investigate the thickness and width of work pieces by varying both of parameters. It can be see that these two proper parameters can lead to obtain a perfect connection. The result shows that experimental conditions of 0.6 mm/s for the speed and 35 mm for the distance are appropriate conditions, which are suitable for creating a 1.17mm working piece thick.

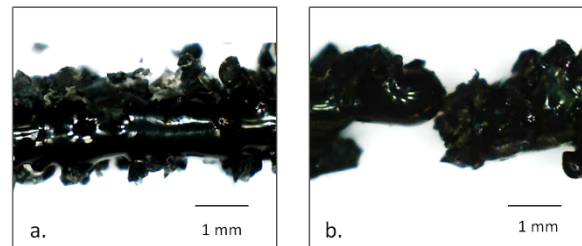
Keywords: 3D printing, laser, SLM

1. บทนำ

เทคโนโลยี Rapid Prototyping (RP) หรือ การสร้างต้นแบบสามมิติแบบรวดเร็วได้รับความนิยมสูงขึ้นในเวลา 10 ปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะกลุ่มของนักออกแบบในสาขาต่าง ๆ เช่น ด้านสถาปัตยกรรม ด้านวิศวกรรมศาสตร์ ด้านการแพทย์ ฯลฯ เนื่องจากได้ชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและทำได้โดยขั้นตอนเดียว ทั้งนี้อาจจะแบ่งเทคโนโลยี RP ออกได้เป็น สามชนิดใหญ่ อันได้แก่ 1.) การพอกโดยใช้พลาสติกเหลว (Fuse deposition modelling, FDM) 2.) การขึ้นรูปจากพอลิเมอร์เหลวไวแสง (SLA) และ 3.) การขึ้นรูปจากผงโดยใช้เลเซอร์ (Selective laser sintering/melting, SLS/SLM) จากการศึกษาพบว่า แต่ละเทคนิคก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน แต่ในสามเทคนิคนี้มีแต่ SLS/SLM เท่านั้น ที่สามารถใช้วัสดุได้หลากหลาย

จากการศึกษาพบว่า SLS/SLM นั้นได้มีการพัฒนาขึ้นตั้งแต่ก่อนทศวรรษที่ 90s ซึ่งในปัจจุบันการเทคโนโลยีนี้สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มของพลาสติก และ โลหะ แตกต่างกันที่ กำลังของเลเซอร์ โดยส่วนของการขึ้นรูปหลัก ๆ ในการขึ้นรูปโดยผงฝุ่น อาจเป็น โลหะ, พลาสติกหรือผงอื่น ๆ ที่สามารถหลอมเหลวได้โดยแสงเลเซอร์จากนั้นจะทำให้วัสดุแข็งตัวโดยอาศัยการเย็นตัวจากธรรมชาติ ความละเอียดของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับความสามารถของเลเซอร์ในการหลอมเหลวชิ้นงานและความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์ เมื่อวัสดุผงได้รับความร้อนจากเลเซอร์ จะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคในเบดของผงวัสดุ จากที่บริเวณผิวกระจายไปทั้งสามทิศทาง [1] นอกจากนี้การนำความร้อนและการหลอมเหลวที่ดีจะขึ้นอยู่กับค่าการเจาะลึก (absorption depth) ของพลังงานเลเซอร์ที่สามารถทะลุเข้าไปในวัสดุได้ กรณีที่เลเซอร์และวัสดุ มีค่าการเจาะลึกต่ำ เลเซอร์จะไม่สามารถทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานที่บริเวณผิวเท่านั้น ซึ่งพลังงานแสงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยอาศัยการนำความร้อนเป็นหลัก หากแต่ถ้าเลเซอร์และวัสดุมีค่าการเจาะลึกสูงจะทำให้พลังงานของเลเซอร์ทะลุผ่านไปในเนื้อวัสดุได้ลึกกว่า เช่น วัสดุที่เป็นวัสดุโปร่งแสง โดยที่การหลอมเหลวมีลักษณะที่ลึกและแคบกว่าแบบแรกอย่างมาก ในกรณีหลังนี้ต้องการตัดชิ้นงาน สำหรับการใช้งานแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการหลอมเหลวนั้นจำเป็นต้องการนำความร้อนเป็นหลัก [2] โดยทั้งความเร็วการเคลื่อนที่ของเลเซอร์และค่า

ระดับความเข้มของพลังงาน ทั้งสองปัจจัยนี้ส่งผลโดยตรงให้การกระจายความร้อนของวัสดุผงเมื่อฉายเลเซอร์ไปยังผิวของผงวัสดุ Kruth [3] ได้นำเสนอการทดลองเพื่อหาความเร็วในการเคลื่อนที่กับกำลังของเลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติแบบผง (SLM) โดยใช้ผงเหล็กในการทดลอง ซึ่งทำให้เกิดสามปรากฏการณ์คือ Balling, Continuous tracks, No connection จากนั้นทำการจำกัดขอบเขตของความเร็วและกำลังของเลเซอร์ที่เหมาะสม (Window process) ที่ทำให้ชิ้นงานเชื่อมต่อกัน Continuous tracks ในขณะที่ วรวิรุทธิ์ สุรปภา [4] การทดลองจำลองการทำงานของเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติโดยใช้ผงฝุ่น โดยใช้เลเซอร์ไดโอดขนาด 800 mW ฉายไปยังผิวของผงในลอน 618-s โดยให้เลเซอร์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง พบว่า ความเร็วของเลเซอร์ที่ไม่เหมาะสมนั้นส่งผลให้เกิดปัญหาความไม่ต่อเนื่องกันของชิ้นงาน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 a.) ชิ้นงานที่มีความต่อเนื่องกัน (Continuous tracks) b.) ชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่องกัน (No Connection)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและระดับความเข้มของพลังงาน นั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการหลอมเหลว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองที่เหมาะสมโดยจะแสดงค่าพารามิเตอร์ในช่วง Window process อย่างไรก็ตามเนื่องจาก ราคาของเครื่องมือวัดค่าพลังงานเลเซอร์มีราคาสูง ดังนั้นจะอาศัยการเปลี่ยนระดับความสูงของเลเซอร์ในแนวแกน Z เพื่อเป็นตัวแทนของการกำลังของเลเซอร์

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุผงที่นำมาทดลองเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดไนลอน 618-s มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้ง่ายต่อการทดลอง สามารถใช้เลเซอร์ที่มีกำลังต่ำในการหลอมเหลว

พร้อมทั้งควบคุมขนาดของอนุภาคของผงวัสดุ (Particle Size) ทำให้ได้ผงวัสดุที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.35 mm โดยการเตรียมผงก่อนการทดลองนั้นจะผ่านกระบวนการทำให้ผงอัดแน่นกันและทำให้พื้นผิวเรียบเท่า ๆ กัน

ตารางที่ 1 รายละเอียดผงพลาสติกไนลอน 618-s (Nylon618-s) [5]

Parameter	Value	Unit
Melt Temperature	217	°C
Particle Size	≥0.355	mm
Thermal Conductivity	0.144	W/mK
Density	0.90	g/cm ³
Specific heat	2.35	J/gK
Color	Dark Gray	

2.2 อุปกรณ์

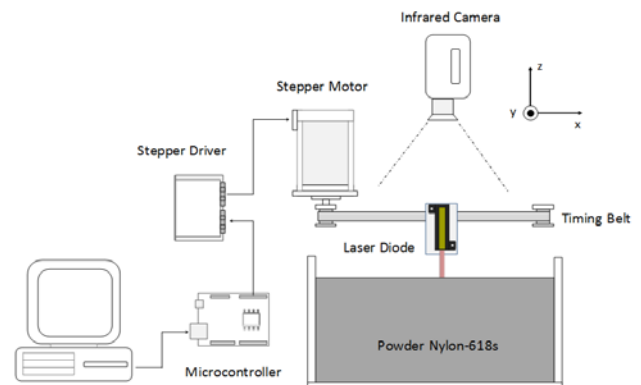
เลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์ชนิดไดโอด ลำแสงจะอยู่ในช่วงของอินฟราเรด (Infrared) โดยกำลังของเลเซอร์ (I_0) จะเลือกใช้โดยอ้างอิงจากอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของผงไนลอน 618-s

ตารางที่ 2 รายละเอียด Laser Diode [6]

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

การทดลองใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor) ชนิด NEMA 23 ผ่านคอมพิวเตอร์ ความเร็วการเคลื่อนที่ถูกควบคุมโดยการปรับพัลส์ที่สร้างขึ้นจากชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำการป้อนให้สเต็ปเปอร์ไดรเวอร์ (Stepper Driver) เพื่อควบคุมทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ซึ่งในที่นี้ สเต็ปเปอร์ไดรเวอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการ

ควบคุมความต่างศักย์และกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนในทิศทางที่ต้องการ ทำการต่อมอเตอร์เข้ากับสายพานซึ่งมีการติดตั้งชุดเลเซอร์แบบยึดแน่นกับสายพาน ดังรูปที่ 2 ขณะทำการทดลองนั้นจะติดตั้งกล้องอินฟราเรด (Infrared camera FLIR Professional Edition Version 8.1) [8] เพื่อวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของผงวัสดุขณะทำการทดลอง



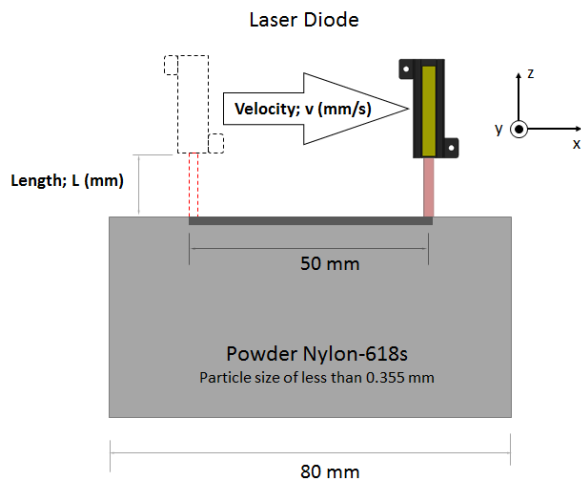
รูปที่ 2 อุปกรณ์ในการทดลอง

2.3 วิธีทดลอง

การทดลองจะทำการจำลองการทำงานของเครื่องพิมพ์ขณะทำการฉายแสงเลเซอร์ไปยังผิวของวัสดุผง กำหนดให้เลเซอร์เคลื่อนที่ในแนวแกน x เท่านั้น จะทำการควบคุมคืออุณหภูมิห้องที่ทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ตั้งอุณหภูมิเท่ากับ 25 °C และชนิดของผงวัสดุไนลอน 618-s ขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.35 mm ตัวแปรต้นที่ต้องการศึกษา คือ ผลของความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์ (Velocity; V) และระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับผิวของผงวัสดุ (Length; L) ที่ส่งผลต่อความหนาและความลึกของชิ้นงาน และค่าพารามิเตอร์ทั้งสองที่ทำให้เกิดช่วง Window process

การทดลองจะทำการควบคุมความเร็ว (V) ในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ออกเป็น 3 ระดับคือ 0.6, 1.5 และ 2.4 mm/s และควบคุมระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับผิวของผงวัสดุ (L) ออกเป็น 3 ระยะคือ 35, 40 และ 45 mm โดยเหตุผลที่ใช้ระยะความสูงเริ่มจาก 35 mm เพราะว่าเป็นช่วงเริ่มต้นของระยะโฟกัสของเลเซอร์ชนิดนี้ โดยช่วงของระยะโฟกัสคือ 1.5 – 5.0 in ดังตารางที่

2



รูปที่ 3 ไดอะแกรมของอุปกรณ์การทดลอง

การทดลองจะกำหนดให้เลเซอร์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะ 50 mm จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการวัดขนาดความหนา (Thickness; t) และความลึก (Depth; d) การวัดขนาดความหนา ของชิ้นงานนั้นจะใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope Camera) อัตราการขยาย 400 เท่า [7] ถ่ายภาพด้านบนของชิ้นงานเทียบกับระยะอ้างอิงเพื่อนำไปวัดขนาดความหนาสามตำแหน่งโดยใช้โปรแกรม Image J Ver.1.50b แล้วทำการเปรียบเทียบหาคุณภาพของชิ้นงานที่ความเร็วและระยะความสูงที่ต่างกัน การวัดความหนาของชิ้นงานจะทำการวัด 3 ครั้ง คือ ซ้าย, กลาง และขวาของชิ้นงานแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย จะได้ความหนาที่เป็นความหนาเฉลี่ย

3. ผลและวิจารณ์การทดลอง

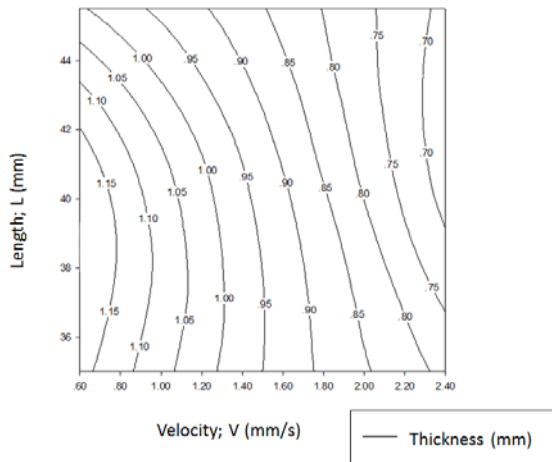
จากตารางที่ 3 สังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ของความเร็วและความสูงระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับผิวของผงวัสดุส่งผลโดยตรงต่อความหนา (Thickness) ของชิ้นงานที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์มีค่าน้อยและระยะห่าง (L) น้อยจะได้ความหนาที่มาก ซึ่งตรงกันข้ามกับความเร็วมีค่ามากและระยะห่างมีค่ามาก จากการทดลองพบว่า ความหนาของชิ้นงานนั้นเปลี่ยนแปลงตามความเร็วและระยะความสูง โดยความหนาที่มีค่าน้อยที่สุดที่ความเร็ว 1.5 mm/s ที่ระยะความสูง 40 ถึง 45 mm และที่ความเร็ว 2.4 mm/s ทุก ๆ ระยะห่าง โดยความหนาที่มีค่ามากที่สุดที่ความเร็ว 0.6 mm/s ที่ระยะความสูง 35 mm ผลจากการทดลองแสดงว่า ที่ความเร็ว 0.6 mm/s ทุก ๆ ระยะห่างและที่ความเร็ว 1.5 mm/s ที่ระยะความสูง 35 และ 40 มีความต่อเนื่องของชิ้นงาน (Continuous Tracks) แต่ในภาพที่เห็นชิ้นงานไม่ต่อเนื่องกัน เกิดขึ้นจากขั้นตอนการนำชิ้นงานออกมาถ่ายภาพทำให้เกิดการแตกหัก ชิ้นงานที่ไม่มีมีความต่อเนื่องกัน (No Connection)

ขนาดของความลึก (Depth; d) ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักที่ความเร็วและระยะความสูงต่างกัน โดยทั้ง 9 การทดลองความลึกมีค่าอยู่ในช่วง 0.45 - 0.60 mm โดยความลึกจะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการทะลุผ่านของเลเซอร์ (optical penetration depth; mm) [2] ที่สามารถทะลุผ่านเข้าไปยังเนื้อของผงวัสดุได้

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานที่ของความเร็วและความสูงระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับผิวของผงวัสดุ

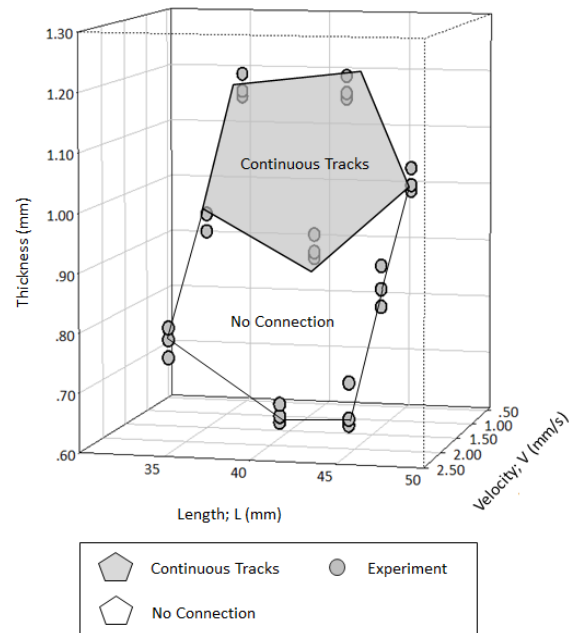
Length ; L Velocity; V	35 mm	40 mm	45 mm
0.60 mm/s			
Thickness	1.17 mm (Continuous Tracks)	1.17 mm (Continuous Tracks)	1.00 mm (Continuous Tracks)
1.50 mm/s			
Thickness	0.95 mm (Continuous Tracks)	0.92 mm (Continuous Tracks)	0.85 mm (No Connection)
2.40 mm/s			
Thickness	0.79 mm (No Connection)	0.67 mm (No Connection)	0.69 mm (No Connection)

เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วและระยะความสูงของเลเซอร์ ดังรูปที่ 7 ทำให้สามารถควบคุมความหนาของชิ้นงานได้



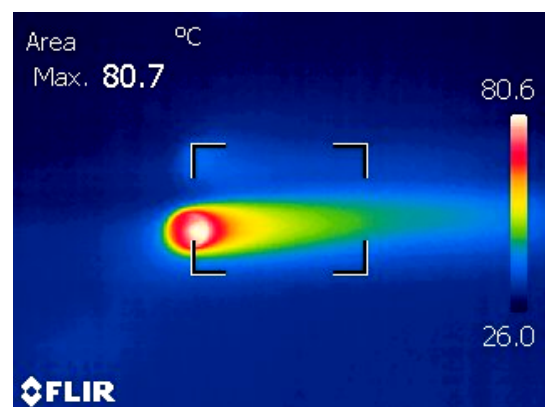
รูปที่ 7 กราฟแสดงความหนาของชิ้นงานจากความสัมพันธ์ของความเร็วและระยะความสูงของเลเซอร์
รูปที่ 8 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (V), ระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับผิวของผงวัสดุ (L) และความหนาของชิ้นงาน (Thickness) โดยจะแสดงช่วง Window Process หรือช่วงที่บ่งบอกสถานะของชิ้นงาน ส่วนที่แรเงาคือช่วงที่ชิ้นงานมีความต่อเนื่องกัน (Continuous Tracks) และส่วนที่ไม่แรเงาคือช่วงที่

ชิ้นงานไม่มีความต่อเนื่องกัน (No Connection) จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์มีค่าน้อยจะทำให้ได้ชิ้นงานมีความหนาสูง



รูปที่ 8 ขอบเขตการแข็งตัวหลังหลอมเหลว

รูปที่ 9 แสดงภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรดขณะทำการทดลอง แสดงการกระจายตัวของความร้อนที่บริเวณผิวของวัสดุผง โดยเป็นการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์จากขวาไปซ้าย จากการทดลองทั้งหมดพบว่าที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์ต่ำจะทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนออกไปทางด้านข้างได้มากทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนาและมีความยาวพอที่จะทำให้วัสดุผงหลอมเหลวจึงทำให้ชิ้นงานมีความต่อเนื่องกัน แต่ในทางตรงกันข้ามที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์สูงจะทำให้ชิ้นงานมีค่าความหนาน้อย อันสืบเนื่องมาจากการกระจายตัวของความร้อนและอุณหภูมิไม่เพียงพอต่อการหลอมเหลวจึงทำให้ได้ชิ้นงานที่ไม่มีความต่อเนื่องกัน



รูปที่ 9 ภาพถ่ายจากกล้องอินฟราเรด(Infrared camera) ที่บริเวณพื้นผิวของผงวัสดุขณะทำการทดลอง

ที่ความเร็ว 1.5 mm/s และที่ระยะความสูง 41.5 mm

4. สรุป

จากการศึกษาการหลอมละลายของผงไนลอน-618s ที่ใช้ไดโอดเลเซอร์ขนาด 0.8 W เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติแบบผง (SLM) สรุปได้ว่า ความลึกของชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 0.45-0.60 mm ในขณะที่ความหนาของชิ้นงานนั้นขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์ (V) และปรับระยะความสูงระหว่างเลเซอร์กับพื้นผิวของผงวัสดุ (L) ให้สอดคล้องกัน ดังแสดงในกราฟรูปภาพที่ 7 และ 8 ซึ่งผลลัพธ์ที่มีความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานสูงสุดคือ 1.17 mm ที่ความเร็ว 0.6 mm/s และที่ระยะความสูง 35 mm กล่าวคือ เมื่อใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวเลเซอร์ต่ำจะให้ได้ความหนาของชิ้นงานมากและที่ระยะความสูงของเลเซอร์ 35 mm จะมีความเข้มแสงมากที่สุดทำให้เกิดการหลอมเหลวได้ดีที่สำคัญสามารถจำกัดขอบเขตสถานะของการแข็งตัวหลังการหลอมเหลว (Window Process) ของชิ้นงานได้คือช่วงที่มีความต่อเนื่องกันของชิ้นงานและช่วงที่ไม่มีความต่อเนื่องกันของชิ้นงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมการวิจัยและกองทุนบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่อุปกรณ์และสนับสนุนทุนการศึกษาของนายปรัชญาพร ดวงคำ และทุนในการวิจัย จนสำเร็จลุล่วงลงได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rolf Klein (2011). Laser Welding of Plastics. First Edition by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Germany. ISBN: 978-3-527-40972-3 pp.109-136
- [2] S.Z. Shuja, B.S. Yilbas and Momin (2011). Laser heating of a moving slab : Influence of laser intensity parameter and scanning speed on temperature field and melt size. Optics and Laser in Engineering Vol.49. September 2010 pp. 265-272..
- [3] JP. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, (2005) "Binding

mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting", Rapid Prototyping Journal, Vol. 11 Iss: 1, pp.26-36

[4] วรวิริ์ สุรปภา(2558), เงื่อนไขที่ส่งผลต่อระบบหลอมเหลวโดยใช้เลเซอร์สำหรับเครื่องพิมพ์ต้นแบบสามมิติพลาสติก, ปรินูญานพนธ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 73 หน้า

[5] By Eddie Krassenstein (2014). URL:<http://3dpri nt.com/14441/taulman3d-nylon-618-s/>, access on 2/1/2016

[6] KALE CNC's laser modules Turkey(2015). URL: <http://www.ebay.com/itm/Industrial-808nm-800mw-Infrared>, access on 2/1/2016

[7] Veho Company (2016). URL:http://www.veho-uk.com/main/shop_detail.aspx?article=40 , access on 2/1/2016

[8] Infrared camera User's manual FLIR Reporter Professional. (Professional Edition. Version 8.3) ENGLISH (EN). March 18, 2008