

การสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วสำหรับงานเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติก

Rapid tooling for Bottle Blow molding Process

คุณยุต เอี่ยมสะอาด *, นพพร บิ๊กแวน , กิตตินาถ วรรณิสสร และ รัฐพล จันทรช่วงโชติ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 08-6374-7111, โทรสาร: 02 9428571

E-mail: kunnayut@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันงานเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติกมีการใช้อย่างแพร่หลายซึ่งภาคอุตสาหกรรมมักประสบปัญหาเดียวกันคือต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ที่มีมูลค่าสูงส่งผลต่อต้นทุนการผลิตชิ้นงานรวมถึงน้ำหนักของแม่พิมพ์ที่มีน้ำหนักมากส่งผลต่อการขนส่งและการติดตั้งเพื่อการใช้งาน การสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนการผลิตและน้ำหนักของแม่พิมพ์ลดลง การสร้างแม่พิมพ์ที่ละชั้นจึงถูกนำมาใช้โดยการเติมเนื้อที่ละชั้นจากนั้นนำชิ้นงานมาทับกันจนสมบูรณ์ตามแบบที่กำหนดไว้ ดังนั้นการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วจึงได้รับความสนใจทางด้านการออกแบบและการผลิตแม่พิมพ์เป็นอย่างมาก ด้วยจุดเด่นคือใช้เนื้อวัสดุที่น้อยกว่าช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วโดยการสแกนชิ้นงานขวดพลาสติก นำไฟล์ที่ได้มาทำการปรับแต่งพื้นผิวของชิ้นงาน จากนั้นนำแบบชิ้นงานสามมิติที่ได้มาออกแบบแม่พิมพ์เป่าขึ้นรูป ทำการผลิตแม่พิมพ์รวดเร็วโดยใช้โปรแกรมตัดแบ่งส่วนที่ขึ้นตามแบบที่กำหนด นำแบบที่ได้ไปผลิตแม่พิมพ์โดยใช้เครื่องสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วพบว่าสามารถสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วได้แต่คุณสมบัติของแม่พิมพ์ด้านความแข็งแรงและการถ่ายเทความร้อนยังเป็นปัญหาต่อการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วซึ่งจากการทดสอบคุณสมบัติของแม่พิมพ์รวดเร็วมีความแข็งแรงพอสำหรับงานเป่าขวดพลาสติกแต่การถ่ายเทความร้อนยังใช้เวลาในการเย็นตัวที่มากทำให้ไม่สามารถผลิตชิ้นงานเป็นจำนวนมากได้ ดังนั้นการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วสำหรับงานเป่าขวดพลาสติกควรนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีจำนวนน้อยหรือนำไปใช้ในส่วนของการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการผลิตนั้นต่ำลง

คำหลัก: แม่พิมพ์รวดเร็ว , แม่พิมพ์เป่า , เครื่องสร้างแม่พิมพ์แบบรวดเร็ว

Abstract

Current plastic bottle's Blow molds are used widely. In the industry often face the same problem is the cost of production molds are worth lofty affect the cost of production, including the weight of the mold with a heavy impact on the transport and installation to use. Rapid Tooling is a quick way to reduce the cost of production and reduced weight of the mold. Creating Rapid Tooling was applied by adding layer by layer technique. Thus creating a Rapid Tooling has been interested in the design and

AMM-2021

manufacture of mold is very serious. Also featured is used less material, saving time and cost of product development.

The researcher created Rapid Tooling by scanning the plastic bottle. The files can adjust the surface of the work piece. Then use 3D files (Solid Model) for blow mold design. Make a Rapid Tooling by Rapid tooling maker machine. The researchers found that we can make blow mold by the Rapid Tooling maker machine, but the properties of the blow mold, the strength and the heat transfer is also a problem. The properties of the Rapid Tooling have enough strength for blow plastic bottles, but the low of heat transfer make you can't blow lot of product. So Rapid tooling for blow mold should be used to produce a small amount or to use it in the design and development of new products. This will lower the cost of production.

Keywords: Rapid Tooling, Blow Mold, Rapid Tooling Machine

1. บทนำ

การผลิตชิ้นงานเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติกในปัจจุบันมีการใช้แม่พิมพ์ในการผลิตชิ้นงานเป็นจำนวนมากซึ่งในอุตสาหกรรมหลายแห่งมักประสบปัญหาเดียวกันคือต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ที่มีมูลค่าสูงและไม่คุ้มทุนต่อการผลิตชิ้นงาน แม่พิมพ์เป่าขวดโดยทั่วไปจะทำจากวัสดุเหล็กและอลูมิเนียมทำให้ต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์มีราคาสูงมีน้ำหนักมากส่งผลต่อการขนส่งหรือขนย้ายและการติดตั้งเพื่อการใช้งาน

การสร้างแม่พิมพ์รวดเร็ว จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนและน้ำหนักแม่พิมพ์รวมถึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ เพราะการทำต้นแบบขวดพลาสติกต้องทำแม่พิมพ์เพิ่มจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูง

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วโดยมุ่งเน้นไปที่การหาคุณสมบัติทางกลของแม่พิมพ์รวดเร็ว รวมถึงการทดสอบเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติก เพื่อหากระบวนการและวิธีสร้างแม่พิมพ์แบบใหม่ในการลดต้นทุนการผลิตและน้ำหนักของแม่พิมพ์สำหรับงานเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติกต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องตัดเลเซอร์ (Laser Marking CO2)



รูปที่1 เครื่องตัดเลเซอร์ [2]

2. เครื่องสร้างแม่พิมพ์รวดเร็ว



รูปที่2 เครื่องสร้างแม่พิมพ์รวดเร็ว[3]

3. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Infrared Thermometer)

4. เครื่องทดสอบแรงอัด (Hydraulic Hand Press)

5. ชุดคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ (PC)

6. เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ HOUNSFIELD รุ่น H50K-S-0306

7. เครื่องเป่าขวด

8. กระดาษ A4

9. กาวสำหรับติดกระดาษ

3.วิธีการดำเนินการทดลอง

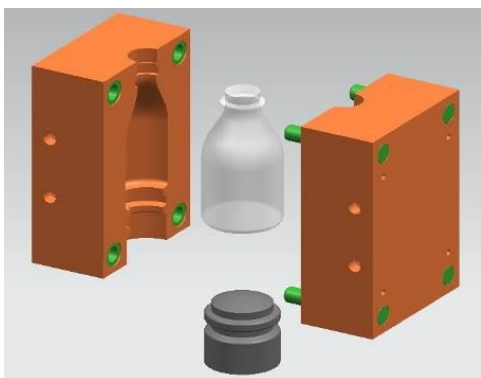
ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วสำหรับงานเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติกมีดังนี้

1. วาดแบบชิ้นงานขวดพลาสติกแบบสามมิติโดยใช้โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (3D CAD)



รูปที่ 3 แบบสามมิติชิ้นงานขวดพลาสติก[6]

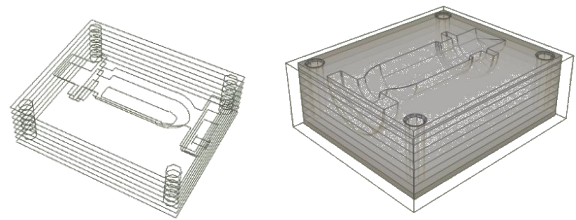
2. ทำการออกแบบแม่พิมพ์เป่าขวดพลาสติกโดยการนำแบบชิ้นงานสามมิติที่ได้มาทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยการนำเส้นแบ่งผิวชิ้นงานมาทำการตัดทั้งสองด้าน จากนั้นจะได้แม่พิมพ์เป่าด้านหนึ่งติดอยู่กับที่ ส่วนอีกด้านมีการเคลื่อนที่เข้าออก



รูปที่ 4 ออกแบบแม่พิมพ์เป่าขวดพลาสติก[8]

3. การสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วโดยใช้กระดาษ A4

นำแม่พิมพ์ที่ได้จากการออกแบบชิ้นงานขวดพลาสติกมาทำการตัดแบ่งเป็นชั้นเท่า ๆ กันเพื่อให้ได้ตามความหนาของกระดาษ A4 ที่ใช้เป็นวัตถุดิบจัดเก็บเป็น DXF File



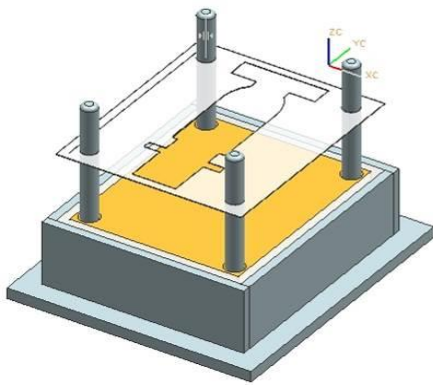
รูปที่ 5 การแบ่งชั้นของแม่พิมพ์รวดเร็วที่ขนาดเท่าๆกัน [7]

จากนั้นนำไฟล์ข้อมูล DXF File มาทำภาพตัดขวางของชิ้นงาน เพื่อทำโปรแกรมควบคุมการสั่งงานนำกระดาษ A4 ใส่เข้าไปในเครื่องตัดเลเซอร์ เครื่องจักรจะทำการตัดชิ้นงานตามแบบที่กำหนดไว้



รูปที่ 6 การตัดชิ้นงานตามแบบที่กำหนดไว้ [1]

เมื่อตัดชิ้นงานครบตามแบบที่กำหนดป้อนชิ้นงานภาพตัดขวางที่ได้จากเครื่องตัดเลเซอร์ ใส่เข้าไปในเครื่องสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วที่ละชั้นทำการยึดชิ้นงานแต่ละชั้นด้วยกาวติดกระดาษซึ่งทำให้ชิ้นงานคงรูปยึดติดกันทำจนชิ้นงานเสร็จ จากนั้นทำการตกแต่งผิวของชิ้นงานให้เรียบ



รูปที่ 7 ประกอบชิ้นงานภาพตัดขวางให้ติดกัน [4]

4. การทดสอบคุณสมบัติทางกล

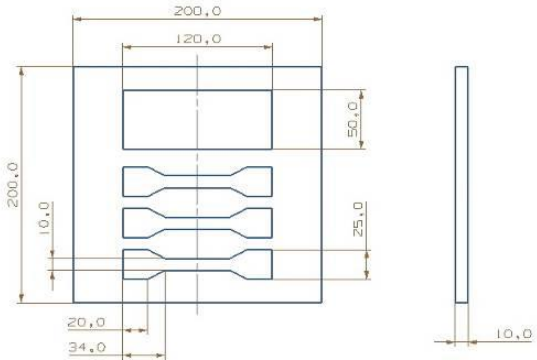
เมื่อได้แม่พิมพ์จากกระบวนการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วแล้วจากนั้นนำแม่พิมพ์ที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติทางกล โดยทำการทดสอบแรงอัด แรงดึง และการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์รวดเร็วว่าใช้งานได้จริงกับเครื่องเป่าขวดพลาสติกได้หรือไม่และดูข้อบกพร่องในการใช้งานของแม่พิมพ์ เพื่อนำไปแก้ไขเพื่อให้ได้แม่พิมพ์ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นซึ่งขั้นตอนในการทดสอบแม่พิมพ์รวดเร็วมีดังนี้

4.1 การทดสอบแรงอัด นำชิ้นงานที่ใช้ทำแม่พิมพ์รวดเร็วไปทดสอบแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบและนำแม่พิมพ์รวดเร็วไปทดสอบโดยวางบนแท่นของเครื่องอัดและทำการเพิ่มแรงอัดของเครื่องทดสอบแรงอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ จนกระทั่งแม่พิมพ์เสียรูปจากนั้นบันทึกค่าแรงอัดสูงสุด



รูปที่ 8 การทดสอบแรงอัดแม่พิมพ์รวดเร็ว

4.2 การทดสอบแรงดึง การเตรียมชิ้นงานที่จะทำการทดสอบโดยขึ้นรูปชิ้นงานตามตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-4 จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาดึงอย่างช้าๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น นำมาพล็อตกราฟ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการดึงและเพิ่มแรงที่กระทำ



รูปที่ 9 แสดงขนาดและรูปร่างชิ้นงานทดสอบ

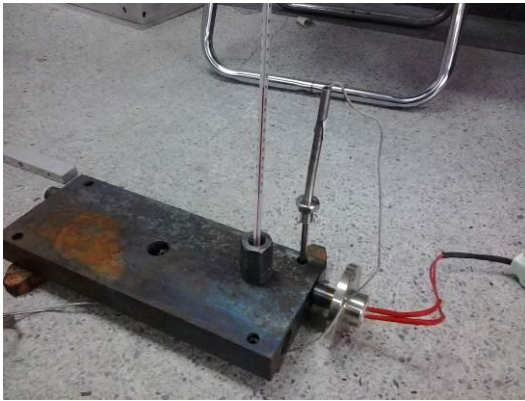


รูปที่ 10 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง
นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้เข้ากระบวนการทดสอบ
แรงดึง (Universal Testing Machine)



รูปที่ 11 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง

4.3 การทดสอบการนำร้อนของแม่พิมพ์รวดเร็ว อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติกซึ่งเกิดจากความร้อนสะสมของหลอดฟริฟอรั่มกับผนังของแม่พิมพ์โดยปกติจะอยู่ที่ประมาณ 80 - 90 องศาเซลเซียส จากกรณีดังกล่าวจึงต้องมีการทดสอบอุณหภูมิของแม่พิมพ์รวดเร็วว่าสามารถรองรับอุณหภูมิได้หรือไม่และดูการนำความร้อนของแม่พิมพ์วิธีทดสอบคือนำวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์นำมาวางบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส รอจนอุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลง นำตัววัดอุณหภูมิมาวัดค่าอีกด้านหนึ่ง บันทึกผลการทดลอง



รูปที่12 การทดสอบการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์รวดเร็ว

5. การทดสอบเป่าขึ้นงานขวดพลาสติก

นำแม่พิมพ์ที่ได้จากกระบวนการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วไปเป่าบนเครื่องเป่าขวดซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

5.1 การติดตั้งแม่พิมพ์นำแม่พิมพ์รวดเร็วไปติดตั้งบนเครื่องเป่าขวดพลาสติกทำการจับยึดแม่พิมพ์กับฐานเครื่อง จากนั้นปรับตั้งศูนย์กลางของแกนเป่ากับศูนย์กลางของแม่พิมพ์ให้ตรงกันดังแสดงในรูปที่13



รูปที่13 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องเป่าขวด

5.2 ขั้นตอนการเตรียมหลอดฟริฟอรั่ม

หลังจากปรับตั้งแม่พิมพ์เสร็จจากนั้นนำหลอดฟริฟอรั่มมาทำการให้ความร้อนโดยผ่านเครื่องให้ความร้อน ซึ่งความร้อนจะแบ่งออกเป็น 3 โซนโดยอุณหภูมิโซนที่1 ใช้ 65 องศาเซลเซียส อุณหภูมิโซนที่2 ใช้ 45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิโซนที่3 ใช้ 45 องศาเซลเซียส

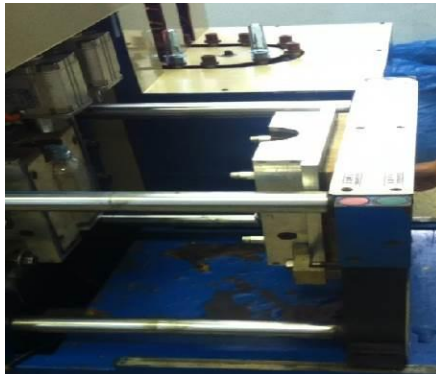


รูปที่14 หลอดฟริฟอรั่มให้ความร้อนโดยผ่านเครื่องให้ความร้อน

5.3 การเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติก

เมื่อหลอดฟริฟอรั่มได้รับความร้อนตามอุณหภูมิที่ตั้งค่ากำหนดไว้แล้วนำหลอดฟริฟอรั่มมาใส่บนแม่พิมพ์รวดเร็วจากนั้นปิดแม่พิมพ์แล้วเป่าขึ้นงานขวดพลาสติกกรอเวลาตามค่าแม่พิมพ์เปิดตามค่าที่กำหนดไว้จากนั้นนำชิ้นงานเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติกออกจากแม่พิมพ์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในการเป่าดังนี้

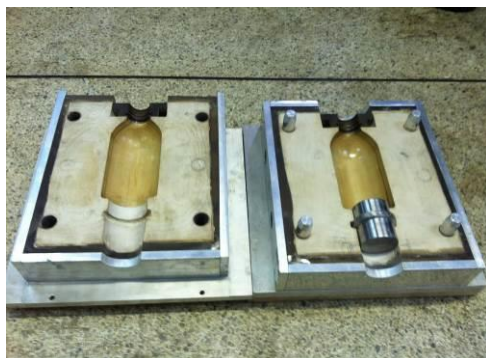
อุณหภูมิที่ใช้เป่าขวด	65,45,45 องศาเซลเซียส
แรงดันลมที่ใช้เป่าขวด	40 bar
Stretch Blow	0.30 วินาที
เป่าขึ้นรูป Blow	2 วินาที
เวลาในการเปิดแม่พิมพ์	4 วินาที



รูปที่ 15 การเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติก

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วโดยกระบวนการขึ้นที่ละชั้นโดยใช้เครื่องสร้างแม่พิมพ์รวดเร็ว พบว่าสามารถสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วได้ซึ่งประกอบไปด้วยแม่พิมพ์ 2 ด้านคือแม่พิมพ์ด้านยึดติดอยู่กับที่(1) ส่วนอีกด้านหนึ่งมีการเคลื่อนที่(2)

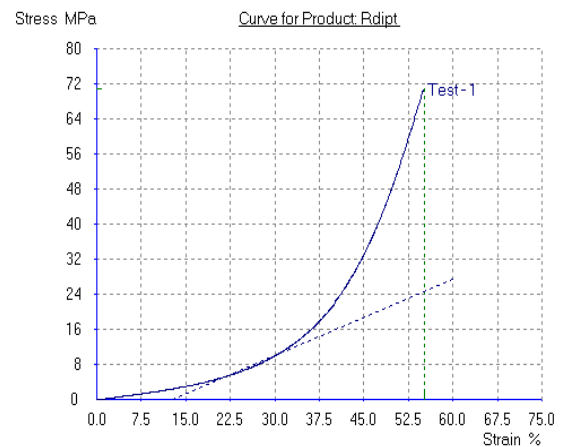


(1.) แม่พิมพ์ยึดกับที่ (2.) แม่พิมพ์เคลื่อนที่

รูปที่ 16 แม่พิมพ์รวดเร็ว [5]

4.2 ผลการทดสอบแรงอัด (Compression Test)

และแรงจับยึดแม่พิมพ์ (Clamping Force)



รูปที่ 17 กราฟแสดงการทดสอบแรงอัด

(Compression Test)

ผลจากการนำวัสดุที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วไปทดสอบแรงอัดพบว่าสามารถทนแรงอัดได้มากกว่า 40 ตันซึ่งเครื่องทดสอบสามารถอัดได้เท่านี้

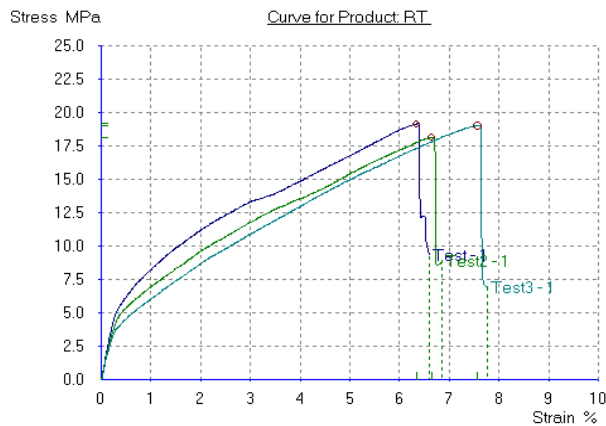
ผลการทดสอบแรงจับยึดแม่พิมพ์ที่มีจำนวน 2 คิวติ์ โดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 40 กิโลนิวตัน จากการทดสอบพบว่าเมื่อให้แรงที่ 40 กิโลนิวตัน ดังตารางที่ 1 แม่พิมพ์สามารถทนแรงจับยึดได้ สรุปได้ว่าแม่พิมพ์รวดเร็วโดยใช้กระดาษ A4 สามารถต้านทานต่อแรงจับยึดของเครื่องเป่าขวดพลาสติกได้โดยไม่เกิดความเสียหายใดๆแก่แม่พิมพ์

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบแรงจับยึดแม่พิมพ์รวดเร็ว

Clamping Force (F)		Area (A)		Pressure (P)	
Ton	KN	In2	m2	kpa	bar
2	19.6	6.9	0.004452	4402.907	44.029
4	39.2	6.9	0.004452	8805.814	88.058
6	58.8	6.9	0.004452	13208.722	132.087

4.3 ผลการทดสอบแรงดึงของแม่พิมพ์รวดเร็ว

พบว่ามีความ Yield Stress , Ultimate Tensile Strength และ Fracture Stress ดังตารางที่ 2



รูปที่ 18 กราฟ Stress-Strain Curve ของชิ้นงาน
ทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

วัสดุที่ใช้ ทดสอบ	E-Modulus (MPa)	Yield Stress (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)
กระดาษ A4	2.74	18.78	24.98

4.4 ผลทดสอบการทดสอบการดัดของชิ้นงาน

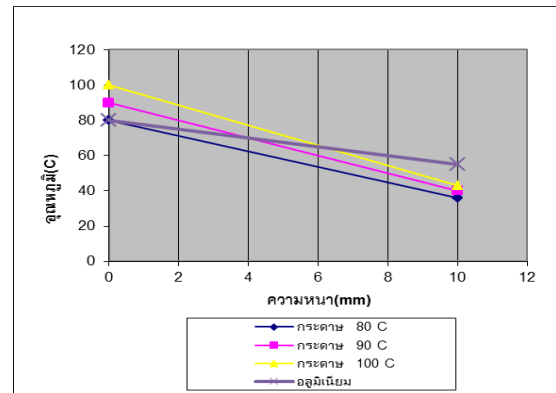


รูปที่ 19 กราฟ Stress-Strain Curve ของชิ้นงาน
ทดสอบการดัด

พบว่ารับความเค้นดัดได้สูงสุด 13.19 MPa

4.5 ผลจากการทดสอบการนำความร้อนของ
กระดาษ A4 ที่ใช้สร้างแม่พิมพ์รวดเร็ว จากกราฟการ
นำความร้อนพบว่าความชันของวัสดุอลูมิเนียมมีค่า-
2.5 ส่วนวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์รวดเร็วมีความชันเฉลี่ย
ที่ -5.03 สรุปว่าวัสดุกระดาษ A4 ที่ใช้สร้างแม่พิมพ์

รวดเร็วนำความร้อนได้ไม่ค่อยดีเมื่อเปรียบเทียบกับ
วัสดุอลูมิเนียม



รูปที่ 20 การนำความร้อนของวัสดุ ที่ใช้สร้าง
แม่พิมพ์รวดเร็ว

จากกราฟถ้าวัสดุมีความชันที่ค่าติดลบ
มากกว่าแสดงว่ามีการนำความร้อนที่ไม่ดีเพราะความ
สูงของกราฟด้านซ้ายมือเป็นค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิ
ส่วนด้านขวามือเป็นอุณหภูมิเมื่อผ่านวัสดุที่ใช้ทดสอบ
แล้ว ดังนั้นถ้าด้านซ้ายมือสูงกว่าด้านขวามือมาก
แสดงว่าวัสดุนั้นนำความร้อนได้ไม่ดีในทางกลับกันถ้า
กราฟทางด้านขวามือกับด้านซ้ายมือนั้นใกล้เคียงกัน
หรืออีกนัยหนึ่งความชันด้านลบน้อยแสดงว่าวัสดุนั้น
นำความร้อนได้ดี

5. ผลการทดลองเป่าชิ้นงานขวดพลาสติกโดยใช้
ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้พบว่าแม่พิมพ์ที่สร้างจาก
กระบวนการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วสามารถเป่าชิ้นงาน
ได้ประมาณ 20 ชิ้นซึ่งยังไม่เสียรูปแต่เมื่อเป่าชิ้นงาน
จำนวนมากชิ้นไม่สามารถเป่าชิ้นงานได้เพราะชิ้นงาน
เสียรูปทรงเนื่องจากแม่พิมพ์รวดเร็วยังไม่มีระบบการ
หล่อเย็นและมีลมรั่วออกจากระบบ ซึ่งปัญหาดังกล่าว
คณะวิจัยจะได้มีการพัฒนาและปรับปรุงต่อไปเพื่อให้
ได้แม่พิมพ์รวดเร็วที่สมบูรณ์และสามารถนำมาใช้
ทดแทนแม่พิมพ์ที่มีในปัจจุบันได้



รูปที่ 21 ขวดพลาสติกที่ได้จากแม่พิมพ์รวดเร็ว

6. สรุปผลการทดลอง

การสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วในการเป่าขวดพลาสติกจากการทำวิจัยสามารถสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วได้แต่คุณสมบัติของแม่พิมพ์ด้านความแข็งแรงและการถ่ายเทความร้อนยังเป็นปัญหาต่อการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วซึ่งจากการทดสอบคุณสมบัติของแม่พิมพ์รวดเร็วมีความแข็งแรงพอสำหรับงานเป่าขวดพลาสติกแต่การนำความร้อนยังใช้เวลาในการเย็นตัวที่มากทำให้ไม่สามารถผลิตชิ้นงานเป็นจำนวนมากได้ ดังนั้นการสร้างแม่พิมพ์รวดเร็วสำหรับงานเป่าขวดพลาสติกควรนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีจำนวนน้อยหรือนำไปใช้ในส่วนของการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการผลิตนั้นต่ำลง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khaing, M., J. Fuh, and Lu, L. (2001) Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterization of EOS parts, Journal of Materials Processing Technology, vol. 113(1), June 2001, pp. 269-272.
- [2] Griffith, M.L. et al. (1996). Freeform fabrication of metallic component using laser engineered net shaping (LENS), in proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin.
- [3] Mazumder, J., Choi, J., Nagarathnam, K., Koch, J. and Hetzner, D. (1997). The direct metal

Deposition of H13 tool steel for 3D components, Journal of Materials Processing of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin.

- [4] Chua, C.K., Hong, K.H. and Ho, S.L. (1999). Rapid tooling technology. Part 1. A comparative study, The international Journal of Advanced
- [5] Steenathbabu, A. and Karunakaran, K.P. (2006) Hybrid adaptive layer manufacturing: An intelligent art of direct metal rapid tooling process, Robotics and computer Integrated Manufacturing, vol.22, February 2006, pp. 113-123
- [6] Toshihide, H., Kirihara, S. and Miyamoto, Y. (2009). Freeform Fabrication of superalloy objects by 3D micro welding, Materials and Design, vol.30, June 2008, pp 1093 - 1097
- [7] กิตตินาถ วรรณนิสร. การขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบรวดเร็วด้วยกระบวนการขึ้นรูปที่ละชั้นสำหรับการหล่อพระ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554.
- [8] ดารง ไชยธีรนิวาศศิริ. การออกแบบแม่พิมพ์พลาสติก. กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดดูเคชั่น. 2539.