

การศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไปหลตามของ  
วัสดุอะลูมิเนียมในประเทศไทย

STUDY AND DEVELOPMENT OF THE COLD FORWARD  
EXTRUSION PROCESS OF ALUMINIUM IN THAILAND

วิสุทธิ ยี่โต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นแบบไหลตามของ  
วัสดุอะลูมิเนียมในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของวัสดุอะลูมิเนียมในประเทศไทย
ชื่อ-นามสกุล	นายวิสุทธิ์ ยี่โถ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

การขึ้นรูปโลหะมีหลายรูปแบบซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงการอัดขึ้นรูปเย็นอะลูมิเนียมแบบไหลตาม ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นนี้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ขนาดของมุมตายและสารหล่อลื่นที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ค่าความหยาบผิว ค่าความแข็งหลังการอัดขึ้นรูป และทำการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตระหว่างการอัดขึ้นรูปกับการกลึงด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ

ในการศึกษานี้ใช้วัสดุอะลูมิเนียม เกรด 1100, 2011 และ 6063 ตาม International Organization Standard โดยใช้มุมตายที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ มุมตาย 20, 25 และ 30 องศา ซึ่งสารหล่อลื่นที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูป ได้แก่ น้ำมันแร่ น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว หลังจากทำการอัดขึ้นรูปเสร็จแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ไปทำการตรวจสอบ ค่าความหยาบผิว ค่าความแข็ง และทำการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นกับการกลึงด้วยเครื่อง CNC

ผลการทดลองพบว่าได้ว่า ชนิดของวัสดุ มุมตาย และสารหล่อลื่นส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูป คือ อะลูมิเนียม เกรด 1100 และจากที่มุมตายที่แตกต่างกันจะเห็นได้ว่ายิ่งมุมตายมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นมุมตายที่เหมาะสม คือ มุมตาย 20 องศา และสารหล่อลื่นที่เหมาะสม คือ น้ำมันแร่ เพราะ น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นที่ทำให้ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปต่ำที่สุด และส่งผลให้มีค่าความหยาบผิวน้อย ที่สุดด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.31 \mu m$  จากการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตจะเห็นว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อชิ้นในการอัดขึ้นรูปมีค่าน้อยกว่าการกลึงด้วยเครื่อง CNC เท่ากับ 13.85 บาท

คำสำคัญ: การอัดขึ้นรูปเย็น โครงสร้างมหภาค การไหลตัวของวัสดุ

<b>Thesis Title</b>	Study and Development of the Cold Forward Extrusion Process of Aluminum in Thailand
<b>Name - Surname</b>	Mr.Wisuth Yeetho
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

There are various types of metal working. This thesis will focus on cold forward extrusion of aluminum. This process of cold extrusion significantly helps reduction manufacturing cost. This thesis will presents the effect of using different materials, die angles and lubricants. The objective is to study the effect of different factors on force used in extrusion, surface roughness, hardness after extrusion, and to compare manufacturing cost between extrusion and lathing with CNC machine.

In this study aluminum grades used are 1100, 2011 and 6063 reference standard International Organization Standard using different die angles at 20, 25 and 30 degree. The lubricants used are mineral oil, soy bean oil and coconut oil. After the extrusion, the finished product is examined to determine the surface roughness and hardness, and the manufacturing cost of cold extrusion and lathing with CNC machine is compared.

Results showed that the type of material, die angle and lubricants used affect the force used for extrusion. The material suitable for extrusion is grade 1100 aluminum, With respect to die angles, it is found that more degree requires more extrusion force, which also results in more hardness. Therefore, the suitable die angle is 20 degree. The suitable lubricant is mineral oil, which requires less extrusion force, and therefore, creates less surface roughness at  $0.31 \mu\text{m}$ . When comparing manufacturing cost, it is found that extrusion requires less expense than lathing with CNC machine by 13.85 Baht

**Keywords:** cold extrusion, macrostructure, material flow

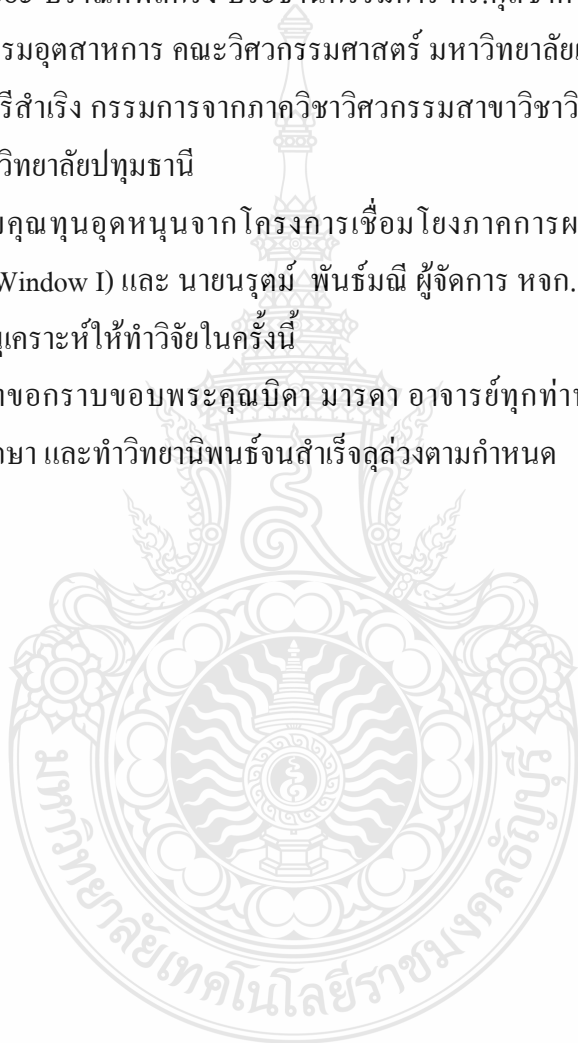
## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง การศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นแบบไหลตามแท่ง อะลูมิเนียมในประเทศไทย สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากคณาจารย์ทั้งหลายที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชา และชี้แนะแนวทาง โดยอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ หลัก ตลอดจน ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง ประธานกรรมการ ดร.กฤษชาติ จุลเพ็ญ กรรมการ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และดร.ภาสกริฐพีร์ ศรีสำเร็จ กรรมการจากภาควิชาวิศวกรรมสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนจาก โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัยทุน สกว.-อุตสาหกรรม (MAG Window I) และ นายนรุตม์ พันธุ์มณี ผู้จัดการ หจก.นิวสกาย ซัพพลายส์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ให้ทำวิจัยในครั้งนี้

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุน และแนะนำแนวทางการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงตามกำหนด

วิสุทธิ์ ยี่ไถ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	3
1.4 สมมุติฐานการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ.....	5
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	30
2.4 วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา.....	31
2.5 สรุปบท.....	33
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	34
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	34
3.2 วิธีดำเนินงานวางแผนและเตรียมการ.....	35
3.3 วัสดุที่จะนำมาใช้ทำการอัดขึ้นรูป.....	36
3.4 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการเก็บผล.....	37
3.5 การออกแบบและการคำนวณ.....	44
3.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	47

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.7 การประมาณต้นทุนของเครื่องมือและผลผลิต (Estimating Tool Cost and Productivity)..	54
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	58
4.1 ผลการทดลอง.....	58
4.2 วิเคราะห์ผล .....	65
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผล .....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป.....	81
ภาคผนวก ข ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูปเย็น.....	97
ภาคผนวก ค ค่าความแข็งหลังการอัดขึ้นรูปเย็น .....	101
ภาคผนวก ง โครงสร้างภายในหลังการอัดขึ้นรูป.....	106
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	116
ประวัติผู้เขียน .....	133

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สัญลักษณ์ของอะลูมิเนียมผสม แบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม .....	12
2.2	ค่าความเหน็ดและความหนาแน่นของสารหล่อลื่นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.).....	16
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน International Standard Organization (ISO).....	36
3.2	แรงในการอัดขึ้นรูปในการใช้สารหล่อลื่นต่างชนิดกันของแต่ละมุมคาย โดยที่น้ำมันแร่ใช้สัญลักษณ์ (Su) น้ำมันถั่วเหลืองใช้สัญลักษณ์ (So) น้ำมันมะพร้าวใช้สัญลักษณ์ (Co) และไม่ใช้สารหล่อลื่นใช้สัญลักษณ์ (No) .....	40
3.3	ค่าความหยาบผิวโดยที่ น้ำมันแร่ใช้สัญลักษณ์ (Su) น้ำมันถั่วเหลืองใช้สัญลักษณ์ (So) น้ำมันมะพร้าวใช้สัญลักษณ์ (Co) และ ไม่ใช้สารหล่อลื่นใช้สัญลักษณ์ (No) .....	41
3.4	ชิ้นส่วนของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น.....	48
4.1	การเปรียบเทียบการไหลตัวของโครงสร้างที่มุมคายต่างกันของน้ำมันแร่.....	69
4.2	เปรียบเทียบต้นทุนและผลผลิตระหว่างการอัดขึ้นรูปและการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC .	70
4.3	เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นและต่อชั่วโมง.....	71
4.4	เปรียบเทียบราคาในการสั่งซื้อวัสดุอะลูมิเนียมที่ใช้ในกระบวนการผลิต.....	72
4.5	เปรียบเทียบค่าแรงที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นที่ปริมาณการผลิต 5,000 ชิ้น .....	72
4.6	เปรียบเทียบปริมาณน้ำหนักระเบิดที่สูญเสียน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการผลิต.....	73
4.7	เปรียบเทียบราคาวัสดุที่สูญเสียน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการผลิต.....	74



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	กรรมวิธีการอัดแบบไหลตาม..... 6
2.2	การอัดขึ้นรูป..... 7
2.3	การไหลตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป..... 9
2.4	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบไหลตาม..... 10
2.5	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบไหลทวน..... 10
2.6	โครงสร้างจุลภาคแผ่นอะลูมิเนียม ผ่านการรีดเย็น หมายเลข 1100-H18 จุดสีดำเล็กๆ คือ $FeAl_3$ ..... 18
2.7	โครงสร้างจุลภาคแผ่นอะลูมิเนียมผ่านการรีด เย็นหมายเลข 1100-O และมีการเกิดผลึกใหม่ ทำให้เกรนมีขนาดเท่ากันจุดสีดำเล็กๆ คือ $FeAl_3$ ..... 19
2.8	โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมผสมที่ 6% ทองแดง เมื่อทำการเอจจิงโครงสร้างประกอบด้วยแถบสีดำคือ $\theta$ และขอบเกรนโครงสร้างนั้นเป็นอะลูมิเนียม..... 19
2.9	โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมหมายเลข 6151-T6 ผ่านการทำเอจจิงเทียม ผ่านการขึ้นรูป Close-Die Forging..... 20
2.10	ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)..... 21
2.11	ตัวอย่างการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)..... 22
2.12	การทดสอบการดึง..... 23
2.13	แรงดึง (Tensile)..... 24
2.14	แรงกด (Compression)..... 24
2.15	แรงเฉือน (Shear)..... 25
2.16	ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ..... 25
2.17	ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)..... 27
2.18	ความเครียดเฉือน (Shear Strain)..... 27
2.19	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)..... 28
2.20	การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ( $R_a$ )..... 20
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวางแผนและเตรียมการ..... 35
3.2	เครื่องปั๊มโลหะขนาด 80 ตัน ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม..... 37
3.3	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม..... 38

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4	สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ..... 38
3.5	อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน และอุปกรณ์จับเก็บสัญญาณ..... 39
3.6	การติดตั้งอุปกรณ์จับเก็บสัญญาณต่อเข้ากับเครื่องเพรส..... 39
3.7	เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น HANDYSURF ..... 41
3.8	วิธีการวัดค่าความหยาบผิว..... 41
3.9	ชิ้นงานหลังการผ่าสำหรับเป็นชิ้นงานทดสอบ..... 42
3.10	การหล่อเรซิน..... 42
3.11	ชิ้นงานหล่อเรซินสำเร็จ ..... 43
3.12	กระดาษทรายเบอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการขัดเตรียมชิ้นงาน ..... 43
3.13	อะลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิต..... 45
3.14	ชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูป..... 46
3.15	ชิ้นงานที่เลื่อยเสร็จแล้ว..... 47
3.16	ชิ้นทดสอบ..... 48
3.17	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม..... 49
3.18	คายของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น ..... 50
3.19	ตัวกระทุ้ง..... 50
3.20	ชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง ..... 51
3.21	ชุดแม่พิมพ์ตัวบน ..... 51
3.22	การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องเพรส..... 52
3.23	การปรับตั้งสวิทช์ควบคุมตามความลึกของชิ้นงาน..... 52
3.24	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นพร้อมใช้งาน..... 53
4.1	แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 1100 ..... 58
4.2	แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 2011 ..... 59
4.3	แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 6063 ..... 60
4.4	ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของอะลูมิเนียม (A1 1100)..... 61
4.5	ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของอะลูมิเนียม (A1 2011)..... 61
4.6	ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของอะลูมิเนียม (A1 6063)..... 62

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.7	ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับงานกลึง CNC .....	63
4.8	ผลการทดสอบความแข็งอะลูมิเนียมเกรด 1100.....	63
4.9	ผลการทดสอบความแข็งอะลูมิเนียม เกรด 2011.....	64
4.10	ผลการทดสอบความแข็งอะลูมิเนียม เกรด 6063.....	64
4.11	การเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังการอัดขึ้นรูป .....	65
4.12	การวิเคราะห์ผลแรงอัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น.....	66
4.13	การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่มุมตาย 20 องศา.....	67
4.14	ค่าความแข็งแต่ละจุดที่วัดในเนื้อชิ้นงาน.....	68



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\epsilon_h$	เกรดการฟอร์มตัว
$A_0$	พื้นที่หน้าตัดก่อนทำการขึ้นรูป
$A$	พื้นที่หน้าตัดหลังทำการอัดขึ้นรูป
$F_{ges}$	แรงที่เกิดให้เนื้อโลหะไหล
$F_{id}$	แรงในแนวความคิด (ปราศจากการสูญเสีย)
$F_{sch}$	แรงสูญเสียเนื่องจากการเฉือน
$F_{R1}$	แรงสูญเสียเนื่องจากความฝืดจากปลายตัวกระแทกและแหวนรีด
$F_{R2}$	แรงสูญเสียเนื่องจากความฝืดที่ลำตัว
$F$	แรงกดไหล
$k_{fm}$	ความเค้นในการฟอร์มตัวเฉลี่ย
$n_F$	ประสิทธิภาพในการฟอร์มตัว
$S_w$	ระยะกด
$X$	แฟกเตอร์กรรมวิธี $X = 1$
$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนการขึ้นรูป
$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางหลังการขึ้นรูป
$h_0$	ความยาวของวัสดุดิบ
$h_1$	ความยาวที่ไม่เปลี่ยนขนาด
$h_2$	ความยาวช่วงเปลี่ยนขนาด
$h_3$	ความยาวที่เปลี่ยนขนาดแล้ว
$V_F$	ปริมาตรชิ้นงานสำเร็จ
$V$	ปริมาตรวัสดุดิบ
$Ra$	ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว
$\ell$	ความยาวทั้งหมด
$Ph$	จำนวนชิ้นงานที่ได้ต่อชั่วโมง
$S$	เวลาที่ใช้ผลิตต่อชิ้น
$L$	ค่าใช้จ่ายแรงงาน
$Ls$	ความต้องการจากการผลิต

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

W	ค่าจ้างแรงงานต่อชั่วโมง
Ph	ความสามารถในการผลิตต่อชั่วโมง
Cp	ต้นทุนต่อชิ้นงาน
TC	ค่าใช้จ่ายเครื่องมือ



# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการออกแบบแม่พิมพ์มีบทบาทสำคัญมากต่ออุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งแม่พิมพ์ขึ้นรูปมีผลต่อการลดเวลาในการผลิตเป็นอย่างมาก โครงการนี้จึงให้ความสำคัญในการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ ชิ้นงานที่ได้หลังจากผ่านการขึ้นรูปจากตัวแปรที่แตกต่างกันให้มีประสิทธิภาพที่ดี และโครงสร้างของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

อุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ในปัจจุบันมีการแข่งขันสูงมากทั้งในด้านราคาที่ต่ำ ใช้เวลาในการผลิตน้อย เน้นคุณภาพและความเที่ยงตรงของตัวผลิตภัณฑ์ เพื่อสนองต่อความต้องการของตลาดและผู้บริโภค โดยอุตสาหกรรมการผลิตขึ้นรูปจะมีความสำคัญมากและพัฒนาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง โดยมีเทคโนโลยีแนวคิดใหม่ๆ เกิดขึ้น เพื่อยกระดับขีดความสามารถให้เพิ่มสูงขึ้น ในภาคอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า และอื่นๆ ที่สำคัญประเทศไทยเป็นฐานรับจ้างการผลิตขึ้นรูปต่างๆ รายใหญ่อันดับต้นๆ ของโลก ประกอบกับมีปัจจัยที่เหมาะสมในหลายด้านที่สำคัญ คือ ด้านแรงงานที่มีฝีมือทักษะความรู้ความสามารถ รวมทั้งเครื่องมือวัดเครื่องมือทดสอบต่างๆ เป็นไปตามมาตรฐานสากลกำหนด สามารถรองรับได้เกือบทุกอุตสาหกรรมการผลิต หนึ่งในนั้น คือ อุตสาหกรรมการผลิตจากกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นซึ่งในประเทศไทยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปเย็น มีการนำไปใช้กันอย่างมากในการผลิตขึ้นรูปต่างๆ โดยเฉพาะวัสดุขึ้นงานที่ทำจากอะลูมิเนียม ซึ่งในงานแม่พิมพ์การผลิตเพื่อการอัดขึ้นรูปเย็นของโลหะนั้นต้องเป็นไปตามแบบ ขนาด รูปร่าง รูปทรงของตัวผลิตภัณฑ์ มีคุณภาพผิวที่ดีและในด้านสมรรถนะต้องมีความแข็งแรงความทนทานตรงตามขนาดมีความเที่ยงตรงสูง เมื่อนำไปใช้ประกอบเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปให้มีประสิทธิภาพสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ทำให้ผู้รับจ้างผลิตจะต้องผลิตให้ได้ตรงตามแบบของผลิตภัณฑ์ และผลิตให้คุ้มต้นทุนคุ้มราคามากที่สุด ทั้งการเลือกใช้วัสดุดิบ เครื่องจักร เครื่องมือและอื่นๆ อย่างเหมาะสม ซึ่งจากข้อกำหนดของชิ้นงานที่เข้มงวดขึ้นจึงจำเป็นต้องศึกษาหาองค์ประกอบการทำงานร่วมกันภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดผลกระทบให้น้อยที่สุด จึงนำเสนอเพื่อการศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของวัสดุอะลูมิเนียมในประเทศไทย โดยมีองค์ประกอบหลักของกระบวนการคือ เครื่องจักรแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปและมีลักษณะการทำงาน คือ เป็นกรรมวิธีการอัดขึ้น

รูปภายในเนื้อโลหะ โดยการใช้แรงจากเครื่องจักรกดผ่านแม่พิมพ์ทำให้เกิดการไหลตัวของเนื้อโลหะไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของตัวกดโดยใช้แม่พิมพ์เป็นตัวกำหนดแบบ รูปร่างรูปทรงต่างๆ ที่ออกแบบไว้กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปเย็น จะทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ ดังนั้นวัตถุดิบต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมและมีโครงสร้างในการขึ้นรูปได้ง่ายและมีลักษณะพื้นผิวที่ดี แม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตต้องใช้วัสดุสามารถทนต่อแรงได้สูงซึ่งจากกระบวนการผลิตนี้ ถึงแม้จะผลิตชิ้นงานรูปร่างเหมือนกันแต่ยังขึ้นอยู่กับสภาพของกระบวนการที่ต่างกันไปตามเงื่อนไขอีกด้วย เช่น อุปกรณ์ในการอัดขึ้นรูป เทคนิควิธีการขึ้นรูป จำนวนการผลิตชิ้นงาน การจับยึดแม่พิมพ์ การประกอบชุดขึ้นรูปแม่พิมพ์ หรืออุปกรณ์เสริมอื่นๆ

ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการอัดขึ้นรูปเย็น เพื่อหาข้อบกพร่องและผลกระทบที่มีต่อผิวและการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ใช้ในการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น มุมดาบที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปที่แตกต่างกัน การใช้สารหล่อลื่น แรงในการอัดขึ้นรูป เพื่อศึกษาถึงค่าความหยาบผิวภายนอก คุณสมบัติทางกล ทางกายภาพ ทางโครงสร้างจากการไหลตัวของวัสดุชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ลักษณะการทำงานที่เกิดขึ้นที่ดีที่สุดในแต่ละปัจจัยการอัดขึ้นรูป การศึกษานี้จะสามารถนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อปรับปรุงและพัฒนาและเป็นทางเลือกสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตการอัดขึ้นรูปแบบไหลต่างของวัสดุอะลูมิเนียม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมตรงตามคุณสมบัติของโลหะที่จะนำไปใช้ในการผลิตเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและลดผลกระทบกระบวนการที่มีผลต่อเครื่องจักร เครื่องมือ วัสดุและตัวแปรรวมอื่นๆ ต่อไป

## 1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของวัสดุอะลูมิเนียมที่แตกต่างกันในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่แตกต่างกันในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามและคุณภาพผิวจากการไหลตัวของวัสดุในการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิตด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปกับวิธีการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

#### 1.3.1 ออกแบบมอดาย 3 มุม [1]

- ออกแบบมอดาย  $2\alpha = 20$  องศา
- ออกแบบมอดาย  $2\alpha = 25$  องศา
- ออกแบบมอดาย  $2\alpha = 30$  องศา

1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ อะลูมิเนียมเกรด Al 1100, Al 2011 และ Al 6063 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.8 มิลลิเมตร ความยาว 37 มิลลิเมตร

1.3.3 ขนาดชิ้นงานสำเร็จหลังผ่านการขึ้นรูป ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร ความยาว 52 มิลลิเมตร

1.3.4 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด คือ น้ำมันแร่ น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว

1.3.5 ในการศึกษา ใช้เครื่องเพรสขนาด 80 ตัน ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการในทดสอบ

1.3.6 ใช้ความเร็วในการอัดขึ้นรูป 2 mm/s.

1.3.7 ใช้ระยะคายแลนค์ 5 mm.

1.3.8 การเก็บและวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 1) แรงในการขึ้นรูป
- 2) ค่าความหยาบผิว
- 3) การไหลตัวของวัสดุ
- 4) ความแข็งของวัสดุ
- 5) เวลาในการผลิต

1.3.9 วิเคราะห์จุดคุ้มทุนของกระบวนการกลึงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามเปรียบเทียบระยะเวลาในการผลิต โดยวิธีการกลึงกับวิธีการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

### 1.4 สมมุติฐานการศึกษา

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม ได้แก่

- 1.4.1 ชนิดของอะลูมิเนียมทั้ง 3 ชนิด
- 1.4.2 ชนิดของสารหล่อลื่นที่ใช้
- 1.4.3 ขนาดมุมของคายที่แตกต่างกัน



## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถใช้ข้อมูลจากโครงการ เป็นแนวทางในการสนับสนุนการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียมให้เหมาะกับคุณสมบัติ เพื่อทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

1.5.2 สามารถใช้ข้อมูลจากโครงการเป็นแนวทางการปรับปรุง ต้นทุนการผลิตในการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของของวัสดุอะลูมิเนียม



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามมีลักษณะการทำงาน คือ เป็นกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปภายในเนื้อโลหะ โดยการใช้แรงจากเครื่องจักรกดลงบนเนื้อโลหะให้เกิดการไหลตัวของเนื้อโลหะไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของตัวกดโดยใช้แม่พิมพ์เป็นตัวกำหนดแบบรูปร่าง รูปทรงต่างๆ ที่ออกแบบไว้ ซึ่งวัตถุดิบต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมและมีโครงสร้างในการขึ้นรูปได้ง่ายและมีลักษณะพื้นผิวที่ดีแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตต้องใช้วัสดุที่สามารถทนรับแรงได้สูง ซึ่งจากกระบวนการผลิตนี้ถึงแม้จะผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างเหมือนกันแต่ยังขึ้นอยู่กับสภาพของกระบวนการที่ต่างกันไปตามเงื่อนไขอีกด้วย ในปัจจุบันกระบวนการขึ้นรูปแบบไหลยังมีปัจจัยต่างๆ ในการทำงานที่ต้องศึกษาเพื่อให้เกิดกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงต้องพยายามศึกษากลไกการทำงานของกระบวนการและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะอะลูมิเนียม เพื่อหาข้อบกพร่องและผลกระทบที่มีต่อผิวและการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ใช้ในการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น มุมตายที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป การใช้สารหล่อลื่น แรงในการอัดขึ้นรูป เพื่อศึกษาถึงค่าความหยาบผิวภายนอก และการไหลตัวของวัสดุชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วจึงนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ลักษณะการทำงานที่เกิดขึ้นที่ดีที่สุดในแต่ละปัจจัยการอัดขึ้นรูป ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางในอุตสาหกรรมการผลิตการขึ้นรูปโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามต่อไป

#### 2.1 นิยามศัพท์ที่สำคัญ

2.1.1 การอัดขึ้นรูป คือ การทำให้พื้นที่หน้าตัดของแท่งวัสดุลดลงหรือถูกเปลี่ยน โดยใช้แรงกดให้แท่งโลหะไหลผ่านแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างแน่นอน

2.1.2 สารหล่อลื่น คือ สารที่ทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะ หรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเพื่อเป็นการลดการสึกหรอของชิ้นงาน

2.1.3 คุณภาพผิวงาน คือ ผิวของชิ้นงานที่บ่งบอกถึงคุณภาพของชิ้นงานแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ผิวชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการต่างๆ และผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือน ชุบแข็ง เคลือบผิว เป็นต้น

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

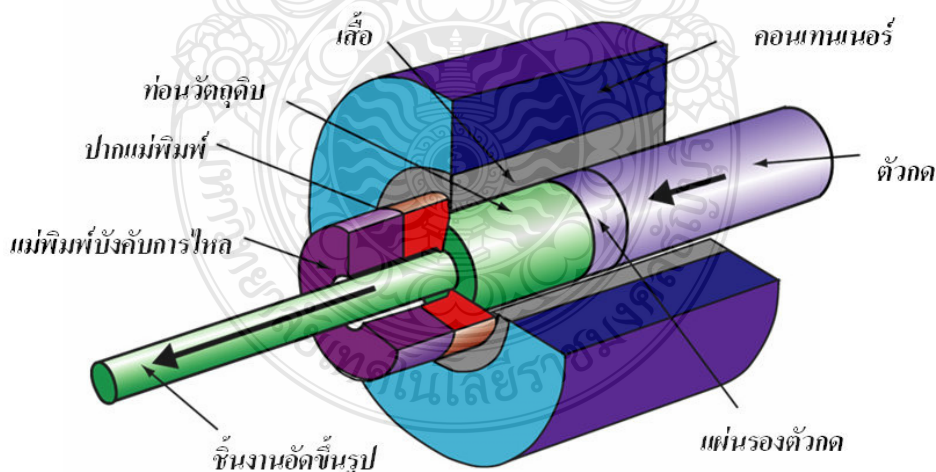
### 2.2.1 กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ

#### 1) การอัดขึ้นรูปโลหะ (Extrusion of Metals)

กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะ โดยทั่วไปเป็นการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทรงกระบอก โดยการใช้แรงอัดชิ้นงานผ่านปากแม่พิมพ์ ทำให้ได้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานคงที่ตลอดการอัดขึ้นรูป การอัดขึ้นรูปสามารถขึ้นรูปเย็นและขึ้นรูปร้อน ขึ้นอยู่กับความเหนียวของวัสดุ การอัดขึ้นรูปโลหะ เป็นกรรมวิธีการผลิตที่ผสมผสานกับการตีขึ้นรูป (Forging) เรียกว่า การอัดขึ้นรูปเย็น (Cold Extrusion) สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป เช่น รางเลื่อนประตู ท่อพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ โครงสร้างด้านสถาปัตยกรรม ประตู และ โครงสร้างหน้าต่าง สำหรับวัสดุที่นิยมนำมาใช้ขึ้นรูป เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง เหล็ก แมกนีเซียม และในตะกั่ว [2]

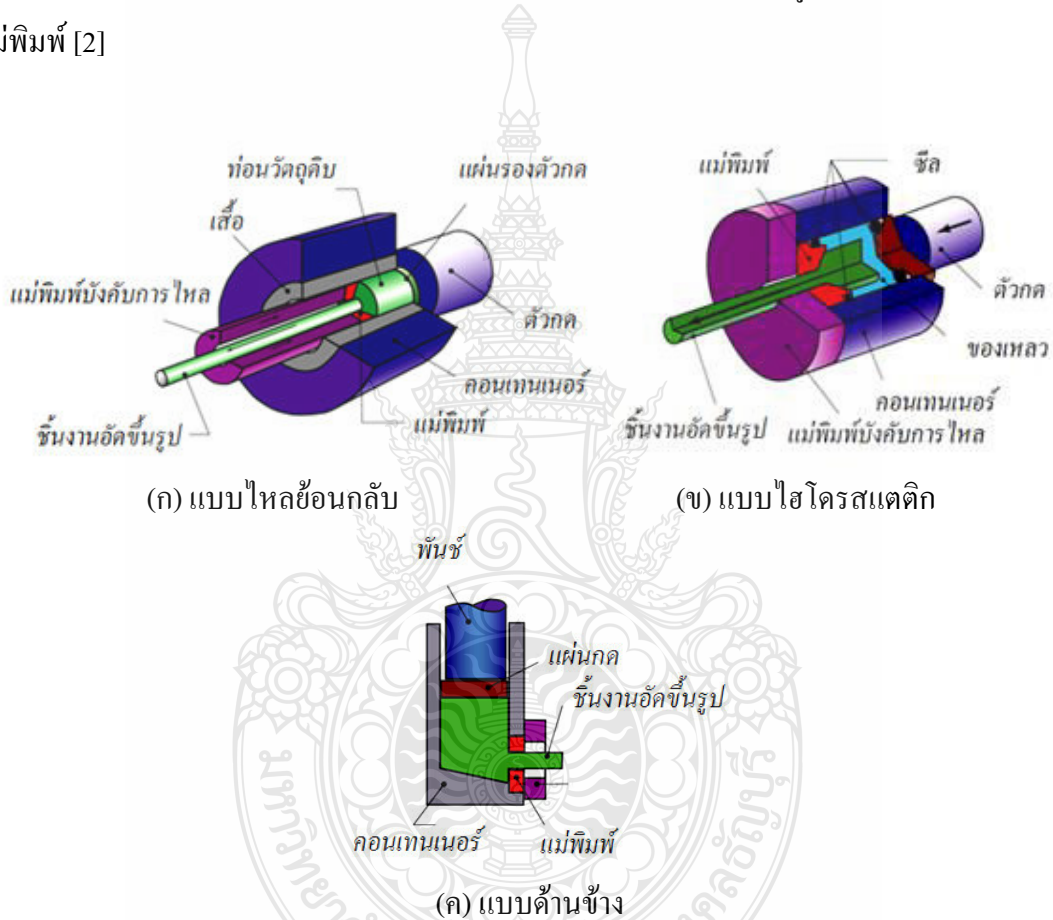
#### 2) กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปโลหะ (The Extrusion Process)

กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้หลายลักษณะขึ้นกับลักษณะการไหลของเนื้อวัสดุ แสดงดังภาพที่ 2.1 เป็นการอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม (Direct Extrusion) ซึ่งชิ้นงานถูกบรรจุไว้ในภายในคอนเทนเนอร์ (Container) ชิ้นงานถูกอัดไหลผ่านปากแม่พิมพ์ด้วยแรงอัดจากกระบอกอัดไฮดรอลิกส์



ภาพที่ 2.1 กรรมวิธีการอัดแบบไหลตาม [2]

การอัดขึ้นรูปแบบไหลย้อนกลับ (Indirect Extrusion) ชิ้นงานถูกอัดไหลสวนทางกับแรงอัดจากกระบอกอัดไฮดรอลิกส์แสดงดังภาพที่ 2.2 (ก) ส่วนการอัดขึ้นรูปแบบไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Extrusion) แสดงดังภาพที่ 2.2 (ข) ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่ากล่องบรรจุ (Chamber) ซึ่งบรรจุของเหลวไว้เต็มชุดต้นกำลังอัดของเหลวขึ้นรูปชิ้นงาน ทำให้การขึ้นรูปแบบนี้ไม่เกิดความเสียหายระหว่างชิ้นงานกับกล่องบรรจุ นอกจากนี้ยังมีการอัดขึ้นรูปอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า การอัดขึ้นรูปแบบด้านข้าง (Lateral Extrusion) แสดงดังภาพที่ 2.2 (ค) ชิ้นงานถูกอัดไหลออกทางด้านข้างแม่พิมพ์ [2]



ภาพที่ 2.2 การอัดขึ้นรูป [2]

### 3) แรงอัดขึ้นรูปโลหะ (Extrusion Force)

แรงที่ต้องการสำหรับการอัดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของชิ้นงาน อัตราการอัดขึ้นรูป ความเสียหายระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวแม่พิมพ์ อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป และความเร็วในการอัดขึ้นรูป สามารถคำนวณหาแรงอัดขึ้นรูปได้จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

- เกรดการฟอร์มตัว  $\epsilon_h$  หาได้จากสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 [3]

$$\epsilon_h = \ln \frac{A_0}{A} \quad (2.1)$$

$$\epsilon_h = \left( \ln \frac{A_0}{A} \right) \times 100\% \quad (2.2)$$

- แรงที่ใช้ในการฟอร์มตัว  $F$  หาได้จากสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.4

$$F_{ges} = F_{id} + F_{sch} + F_{R1} + F_{R2} \quad (2.3)$$

$$F_{id} = A_0 \times k_{fm} \times \epsilon_h \quad (2.4)$$

- เมื่อ  $F_{ges}$  คือ แรงที่กดให้เนื้อโลหะไหล  
 $F_{id}$  คือ แรงในแนวความคิด (ปราศจากการสูญเสีย)  
 $F_{sch}$  คือ แรงสูญเสียเนื่องจากการเฉือน  
 $F_{R1}$  คือ แรงสูญเสียเนื่องจากความฝืดจากปลายตัวกระแทกและแหวนรีด  
 $F_{R2}$  คือ แรงสูญเสียเนื่องจากความฝืดที่ลำตัว  
 แรง  $F_{sch}$ ,  $F_{R1}$  และ  $F_{R2}$  มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรง  $F_{id}$

เพื่อหาแรงรวม  $F_{ges}$  ที่ใช้ขึ้นรูป เพื่อความสะดวก เราจึงรวมแรงสูญเสียต่างๆ ให้อยู่ในรูปประสิทธิภาพในการฟอร์มตัว  $n_F$  ได้ดังสมการที่ 2.5

$$F = \frac{A_0 \times k_{fm} \times \epsilon_h}{n_F} \quad (2.5)$$

- เมื่อ  $F$  คือ แรงกดไหล หน่วยเป็นนิวตัน (N)  
 $A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดชิ้นงานดิบก่อนอัด หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร ( $\text{mm}^2$ )  
 $k_{fm}$  คือ ความเค้นในการฟอร์มตัวเฉลี่ย หน่วยเป็นนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )  
 $\epsilon_h$  คือ เกรดในการฟอร์มตัว  
 $n_F$  คือ ประสิทธิภาพในการฟอร์มตัว

งานที่ใช้ในการฟอร์มตัว  $W$  หาได้จากสมการที่ 2.6

$$W = F \times S_w \times X \quad (2.6)$$

เมื่อ  $S_w$  คือ ระยะกด =  $h_0 - h_k$   
 $X$  คือ แฟกเตอร์กรรมวิธี  $X = 1$

#### 4) การไหลตัวของโลหะในการอัดขึ้นรูปโลหะ (Metal Flow in Extrusion)

การไหลตัวของเนื้อโลหะภายในการอัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน เชื่อว่าลักษณะของเกรนชิ้นงานมีลักษณะยึดตัวตามยาวของทิศทางการรีด การศึกษาการไหลตัวของโลหะภายในการอัดขึ้นรูป โดยการผ่าครึ่งดูการไหลตัวของเนื้อโลหะ แสดงดังภาพที่ 2.3 เป็นการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์สี่เหลี่ยม ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น คือบริเวณที่ชิ้นงานไม่เกิดการไหลตัว เรียกว่า Dead-Metal Zone แสดงดังภาพที่ 2.3 (ข) และ (ค) [2]

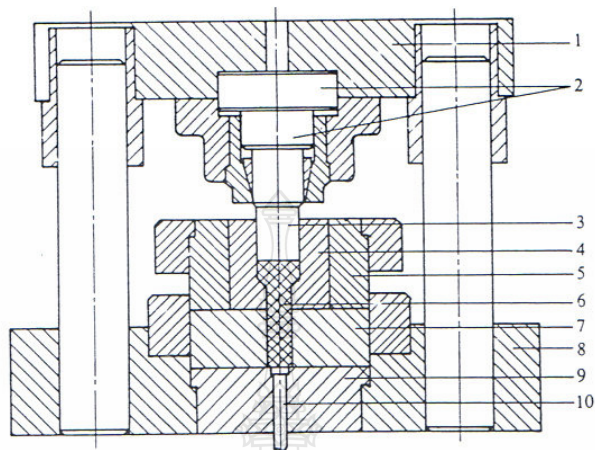


ภาพที่ 2.3 การไหลตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป [2]

#### 5) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป

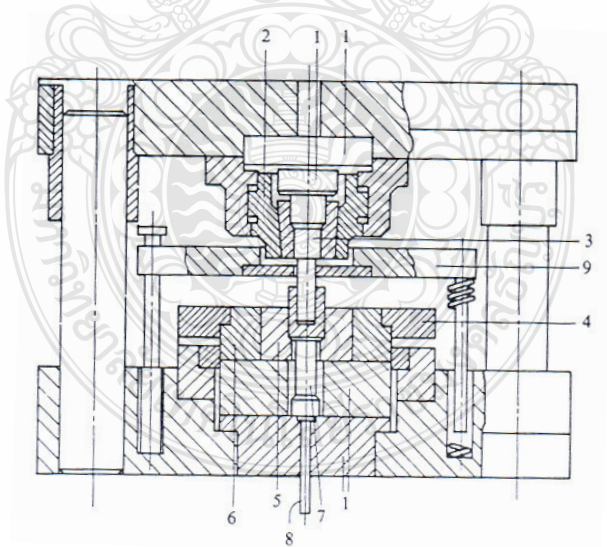
แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเป็นแม่พิมพ์ที่ต้องรับแรงสูง ดังนั้นสัมฤทธิ์ผลของแม่พิมพ์จึงขึ้นอยู่กับ การเลือกวัสดุ การชุบแข็ง และการจับยึดตัวแม่พิมพ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบไหลตาม แสดงดังภาพที่ 2.4 และแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบไหลทวน แสดงดังภาพที่ 2.5

ในการขึ้นรูปเหล็ก เบ้าแม่พิมพ์จะต้องหุ้มด้วยเกราะ ขนาดของเกราะหุ้มเบ้าแม่พิมพ์สามารถคำนวณได้ตามแนวทางของ VDI 3168 [4]



- |               |                  |            |            |
|---------------|------------------|------------|------------|
| 1. แผ่นฐานรอง | 2. แผ่นรองรับแรง | 3. ตัวกด   | 4. เบ้า    |
| 5. ปลอกรัด    | 6. ชิ้นงาน       | 7. แผ่นรอง | 8. แผ่นฐาน |
| 9. แผ่นรับแรง | 10. แกนกระทู้    |            |            |

ภาพที่ 2.4 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบไหลตาม [4]



- |                  |                       |               |
|------------------|-----------------------|---------------|
| 1. แผ่นรองรับแรง | 2. แผ่นเกลียวยึดตัวกด | 3. ตัวกด      |
| 4. แหวนยึดเบ้า   | 5. เบ้า               | 6. แหวนบังคับ |
| 7. หมอน          | 8. ตัวกระทู้          | 9. ตัวปลด     |

ภาพที่ 2.5 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแบบไหลทวน [4]

## 6) ข้อบกพร่องในการอัดขึ้นรูป (Extrusion Defects)

การเกิดข้อบกพร่องในการอัดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น สภาวะของวัสดุและตัวแปรในการผลิต สำหรับจุดบกพร่องในการอัดขึ้นรูปแยกเป็นส่วนใหญ่ๆ ได้ 3 ประการ คือ ผิวเกิดการแตก (Surface Cracking) เกิดเป็นรอยตะเข็บ (Pipe) และเกิดรอยแตกภายใน (Internal Cracking)

### - ผิวเกิดการแตก (Surface Cracking)

เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอัดขึ้นรูปสูงเกินไป ความเสียดทานสูง และความเร็วในการขึ้นรูปสูง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เกิดการแตกของผิวชิ้นงาน และอาจเกิดการฉีกขาดของผิวได้ในบางกรณี สำหรับวัสดุส่วนใหญ่ที่เกิดข้อบกพร่องลักษณะนี้ ได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และสังกะสี เป็นต้น

การแตกของผิวชิ้นงานสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ หากระหว่างการอัดขึ้นรูปเกิดการติดขัดบริเวณปากแม่พิมพ์ เมื่อเกิดการติดขัดจะทำให้เกิดความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับของชิ้นงาน ซึ่งเกิดลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เรียกว่า Bamboo Defect

### - เกิดเป็นรอยตะเข็บ (Pipe)

ลักษณะเช่นนี้เกิดจากการไหลของชิ้นงาน เกิดขึ้นบริเวณความยาวตลอดแนวศูนย์กลางของชิ้นงานเป็นแนวตะเข็บ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Pipe Defect สามารถลดการเกิดรอยตะเข็บได้โดยการปรับปรุงการไหลของชิ้นงาน เช่น การควบคุมความเสียดทาน อุณหภูมิ และลดความไม่บริสุทธิ์ของชิ้นงาน

### - เกิดรอยแตกภายใน (Internal Cracking)

เกิดจากการไหลของชิ้นงานภายในบริเวณศูนย์กลาง ลักษณะการเกิดรอยแตกภายในสามารถศึกษาได้โดยการทดสอบแรงดึงซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน สำหรับแนวโน้มที่ทำให้เกิดรอยแตกภายใน มีดังนี้

- 1) การเพิ่มของมุมตายแม่พิมพ์ (Die Angle)
- 2) การเพิ่มจำนวนสิ่งเจือปนภายในชิ้นงาน (Impurities)
- 3) การลดอัตราส่วนการอัดขึ้นรูป (Extrusion Ratio) และความเสียดทาน (Friction)

## 2.2.2 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญ ได้รับความใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ คือ อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ไม้สอย ตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่าง ในเครื่องบิน จรวด ยานอวกาศ และอุปกรณ์ในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของรถให้



น้อยลง จะได้ประหยัดเชื้อเพลิง มีความเหนียวมาก สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่ายโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ หลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง เป็นโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย สามารถใช้ทำภาชนะหุงต้มและห่อรองรับอาหารได้ซึ่งอะลูมิเนียมนั้นแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ 8 กลุ่ม แสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งมีสัญลักษณ์บ่งบอกประเภทแตกต่างกันออกไป [3]

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของอะลูมิเนียมผสม แบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XXX	ทองแดง (Copper; Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese; Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon; Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium; Mg)
6XXX	แมกนีเซียมกับซิลิกอน (Magnesium, Mg and Silicon; Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc; Zn)
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other Element)

1) อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในทางการค้า (Commercially Pure Aluminium) 1XXX

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในทางการค้า คือ อะลูมิเนียมที่มีปริมาณอะลูมิเนียมต่ำสุด 99.3% ถึง 99.7% อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์มากๆ เหมาะสำหรับการนำไปใช้งาน เช่น ตัวนำไฟฟ้า และแผ่นสะท้อนแสง เป็นต้น ส่วนอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์น้อย จะเพิ่มธาตุเหล็ก และทองแดงเข้าไปเพื่อที่จะใช้ผลิตอะลูมิเนียม หมายเลข 1100 ซึ่งเป็นมาตรฐาน (Standard) ของอะลูมิเนียมผสมในทางการค้า จะทำให้มีความยืดหยุ่น ความอ่อน และคุณสมบัติการเชื่อมดีมาก อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าจะถูกนำไปใช้งานทางด้านเครื่องตกแต่ง เพราะมีความต้านทานการกัดกร่อนดีมาก

2) อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Aluminium Copper Alloys) 2XXX

ทองแดงจัดเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC (Face Centered Cubic) เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงสามารถละลายในอะลูมิเนียมได้ดี ทำให้คุณสมบัติทางกล ของอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป และทองแดงเป็นธาตุหนึ่งที่มีความสำคัญ อะลูมิเนียมผสมทองแดงส่วนมากอยู่ในรูปสารละลายของแข็ง และเหมาะกับการจัดการ เรื่องการปฏิบัติการทางความร้อน (Heat Treatment) สามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนแปลงการตกผลึกของสารละลายของแข็งจากแผนภาพสมดุลจะ

พบว่า ทองแดงละลายในอะลูมิเนียมได้สูงสุด 5.65% ที่อุณหภูมิ 548 °C และปริมาณทองแดงจะละลายในอะลูมิเนียมได้น้อยลงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 548 °C และ จะเหลือประมาณ 0.5% ที่อุณหภูมิ 200 °C ที่ส่วนผสมของทองแดง 4% จะนิยมใช้การทำเองจึงเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล ซึ่งเมื่อเย็นตัวลงมา จะมีโครงสร้างเป็น  $Al+CuAl_2$  และระบบผลึกเป็น BCC (Body Centered Cubic)

### 3) อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (Aluminium Manganese Alloys) 3XXX

แมงกานีส เป็นโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Cubic โดยมีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 1245 °C การเพิ่มธาตุแมงกานีสประมาณ 1.2% ในอะลูมิเนียม (0.6%Fe และ 0.2%Si) เป็นอะลูมิเนียมผสมที่มีความแข็งแรงพอสมควร โดยไม่มีการอบชุบให้ความร้อนแมงกานีสเพิ่มความแข็งแรงให้อะลูมิเนียม โดยอยู่ในรูปสารละลายของแข็งและมีการกระจายอย่างทั่วถึง อนุภาคเล็กๆ จะเพิ่มขึ้น โดยการเติมแมกนีเซียม 1 % หรือมากกว่าจะได้ความแข็งแรงและความสามารถในการใช้งานตามที่ต้องการ

### 4) อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (Aluminium Silicon Alloys) 4XXX

มีอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ที่ 571 °C โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ ซิลิกอน (Si) 11-13.5 ทองแดง (Cu) 0.5-1.3 สังกะสี (Zn) 0.25 เหล็ก (Fe) 1 แมกนีเซียม (Mg) 0.8-1.3 นิกเกิล (Ni) 0.5-1.3 และอื่นๆ 0.05 ซึ่งการนำไปใช้งานนั้นมักจะนำไปทำพวกลูกสูบและอุปกรณ์ที่ต้องการคุณสมบัติในการทนความร้อนสูง

### 5) อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Aluminium Magnesium Alloys) 5XXX

แมกนีเซียม เป็นโลหะที่มีโครงสร้างผลึก Hexagonal และมีอุณหภูมิหลอมละลายใกล้เคียงกับอะลูมิเนียม คือ ที่อุณหภูมิ 560 °C จึงทำให้การละลายของแมกนีเซียม ในอะลูมิเนียมได้ไม่มาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำละลายได้ประมาณ 3% ที่อุณหภูมิห้อง และละลายได้สูงสุดที่ 15.35% ที่อุณหภูมิ 451 °C ดังในแผนภาพสมดุล จะพบว่า จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 450 °C ที่ 34.5% แมกนีเซียม ปฏิกิริยายูเทคติกนี้จะให้โครงสร้างอะลูมิเนียมและโครงสร้าง  $\beta$  ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะ มีสูตรทางเคมีว่า  $Mg_2Al_3$  มีคุณสมบัติแข็งและเปราะ

### 6) อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (Aluminium Magnesium Silicon Alloys) 6XXX

การผสมแมกนีเซียม (0.6-1.2%) และ ซิลิกอน (0.4-1.3%) ในอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นการจัดอยู่ในกลุ่ม 6XXX อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ที่ผ่านการขึ้นรูปมาก่อน ทำให้สามารถทำการเองจึง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงในอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน สาเหตุที่นิยมทำการเองจึง เพราะว่าแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นธาตุในจำนวนธาตุทั่วไปในปัจจุบันที่สามารถ

รวมตัวกัน ในรูปแบบของสารประกอบเชิงโลหะ  $Mg_2Si$  ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะ  $Mg_2Si$  นี้ เป็นสภาพกึ่งเสถียร (Metastable) อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนบางหมายเลขอาจมีการเพิ่มโครเมียม เพื่อช่วยทำให้เพิ่มความแข็งแรง และควบคุมขนาดของเกรนหรืออาจจะมีการเพิ่ม ทองแดง เข้าไปในบางหมายเลข เพื่อเพิ่มความแข็งแรงเหมือนกันแต่จะทำให้ความต้านทาน การกัดกร่อนลดลง หากพิจารณาที่แผนภาพสมดุลกึ่งสมดุลสอง Al- $Mg_2Si$  แล้วจะพบว่า อะลูมิเนียมยอมให้สารประกอบเชิงโลหะ  $Mg_2Si$  ละลายสูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ  $595\text{ }^{\circ}C$  และให้ปฏิกิริยาอุทกคติที่ส่วนผสม  $Mg_2Si$  13% แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงมาจาก  $595\text{ }^{\circ}C$  จะปรากฏการละลายของ  $Mg_2Si$  ในอะลูมิเนียมต่ำลงจนเหลือ 0.2% ที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}C$

#### 7) อะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Aluminium Zinc Alloys) 7XXX

จากแผนภาพสมดุลอะลูมิเนียมสังกะสี เราจะพบว่าสังกะสี (Zn) มีอุณหภูมิการหลอมละลายต่ำกว่าอะลูมิเนียม (Al) คือ อุณหภูมิที่  $419.5\text{ }^{\circ}C$  นอกจากนี้แล้ว สังกะสียังมีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal ซึ่งแตกต่างจากอะลูมิเนียม การผสมสังกะสี 4-8% และแมกนีเซียม 1-3% ในอะลูมิเนียมใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมผสมที่แปรรูปเย็น สามารถปฏิบัติการทางความร้อนได้ในกลุ่ม 7XXX อะลูมิเนียมผสมบางกลุ่มถูกพัฒนาคุณสมบัติความแข็งแรงสูงสุดของพื้นฐานอะลูมิเนียมผสมสังกะสีและแมกนีเซียม ทั้งสองธาตุมีความสามารถในการละลายในสถานะสารละลายของแข็งสูง นอกจากนี้การเพิ่มทองแดง 1-2% ลงในกลุ่ม 7XXX ทำให้มีคุณสมบัติ ด้านความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมสังกะสีและผสมแมกนีเซียมสูงขึ้น จะนิยมนำไปใช้งานทางด้านอากาศยานที่มีความต้องการความแข็งแรงสูง [3]

#### 2.2.3 สารหล่อลื่น

การหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพเพื่อการประหยัดพลังงานสามารถสรุปได้จากการใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมตามระยะเวลาใช้งานของสารหล่อลื่นนั้นๆ ซึ่งสามารถช่วยลดการสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทานลดการสึกหรอและเพิ่มประสิทธิภาพการส่งถ่ายความร้อน

ในโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่ง การหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในเครื่องจักรได้สูงสุดถึง 20% อีกทั้งยังสามารถช่วยประหยัดเวลาในการดูแลรักษาเครื่องจักรลดพื้นที่ในการใช้งานจากการสต็อกสารหล่อลื่นที่น้อยลง และยืดอายุเครื่องจักรให้ยาวนานขึ้นรวมทั้งอายุของสารหล่อลื่นให้ยาวนานมากขึ้นอีกด้วย สำหรับแนวทางปฏิบัติที่ง่ายต่อไปการดำเนินการและเป็นประโยชน์ที่ผู้เขียนขอแนะนำให้แก่ทางโรงงาน เพื่อลดค่าใช้จ่ายในด้านการใช้พลังงาน

ดังนั้นสารหล่อลื่นเป็นสารหรือวัสดุที่ใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็งที่บิดเป็นผง ของเหลว และก๊าซ แต่ละสารหล่อลื่นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางจะอยู่ในลักษณะของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น หรือสารที่มีลักษณะเหนียว เช่น จาระบี เป็นต้น [5]

#### 2.2.4 น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้ได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลแต่ละชนิดนั้น ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป โดยการเติมสารคุณภาพต่างๆ ลงในน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่และน้ำมันสังเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้น้ำมันแร่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เพราะมีคุณภาพดีพอ และราคาถูก ส่วนน้ำมันพืชหรือจากสัตว์และน้ำมันสังเคราะห์นั้นจะนำไปใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ที่มาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้คือ

1) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or Animal Base Oil) สมัยก่อนนิยมนำมาใช้หลายอย่าง ปัจจุบันมีการใช้น้อยมาก เนื่องจากน้ำมันพืชหรือสัตว์มีความคงตัวทางเคมีต่ำ เสื่อมสภาพได้ง่ายในขณะใช้งาน เมื่อนำมาใช้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพทำให้ราคาแพงมาก ความนิยมจึงหมดไป แต่จะใช้เฉพาะงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความข้นและความสามารถในการผสมเข้ากับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของน้ำมันพืชที่ถูกนำมาใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่งและน้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ น้ำมันหมูและน้ำมันปลา เป็นต้น

2) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral Base Oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานชนิดนี้เป็นผลผลิตอันหนึ่งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกถัน ส่วนเบาที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ก๊าซ แก๊สโซลีน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซลจะระเหยไอแยกออกมา ส่วนหนักหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอและเหลืออยู่เป็นพวกน้ำมันเตาไขและยางมะตอย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ น้ำมันแร่ที่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกถันบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ที่เหลือเป็นกากก็สามารถนำไปผลิตยางมะตอยได้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาถั่น น้ำมันดิบบางอย่างก็ไม่เหมาะที่นำมาผลิตน้ำมันแร่ เนื่องจากน้ำมันแร่ที่ได้

จากน้ำมันดิบพวกฟีนิกมักจะมิใช่สูงจะต้องผ่านกระบวนการเอาไขออก น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่น ภายใต้อุณหภูมิที่ปกติคุณภาพจะไม่ดีพอที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นต้องผ่าน กระบวนการต่างๆ เพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการออกไปและเพื่อให้ที่ความอยู่ตัวเชิงเคมีและเชิงความร้อนที่ดีพอ

3) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้เป็น น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติในด้านดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหยต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่มีหลากหลายชนิด และมีราคาค่อนข้างแพง มาก [6]

**ตารางที่ 2.2** ค่าความหนืดและความหนาแน่นของสารหล่อลื่นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

สารหล่อลื่น	ความหนืด (cSt)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
น้ำมันแร่ (มอก.977)	32.00	0.865
น้ำมันถั่วเหลือง (มอก.176)	31.19	0.918
น้ำมันมะพร้าว (มอก.203)	28.26	0.915

### 2.2.5 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น

1) ช่วยหล่อลื่นฟิล์มหรือเยื่อบางๆ ของน้ำมันหล่อลื่นจะทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะ หรือ ชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรงหรือเพื่อเป็นการลดการสึกหรอของ ชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ ตลอดเวลาแม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปนั้นจะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไป เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

2) ช่วยระบายความร้อนคุณสมบัตินี้เป็นสิ่งสำคัญข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับ เครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และ ระบายความร้อนอันเนื่องมาจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์เช่น ระบบเกียร์ หรือเฟือง ท้าย เป็นต้น

3) ช่วยรักษาความสะอาดขณะทำงานที่หล่อลื่นจะต้องเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นงานนั้นไปด้วย คือจะต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสิ่งสกปรกต่างๆ จากผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

4) ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อนน้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายในการกัดกร่อนเสียเอง นอกจากนี้เมื่อมีสารภายนอกที่อาจทำให้เกิดกรดได้เช่น ก๊าซไอเสีย ละอองน้ำหรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการทำให้กรดนั้นเจือจางลงและไม่สามารถที่จะไปกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

5) ช่วยกระจายความสกปรกน้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการกระจายความสกปรกต่างๆ ที่มีปนในน้ำมันหล่อลื่นอันเนื่องจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกต่างๆ เหล่านั้นรวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการรวมตัวกันมากชิ้นจะทำให้เกิดเป็นยางเหนียว

6) มีสารป้องกันการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสารนี้จะช่วยให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันเครื่องกับออกซิเจนในอากาศเกิดได้ช้าลง ถ้าไม่มีสารนี้ น้ำมันเครื่องจะทำปฏิกิริยาดังกล่าวได้ง่าย และทำให้เกิดยางเหนียว เป็นผลให้น้ำมันเครื่องมีความหนืดเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อเครื่องยนต์

7) มีสารป้องกันการสึกหรอสารนี้จะช่วยให้ฟิล์มของน้ำมันทนต่อแรงเฉือนได้ดี

8) มีสารป้องกันการเกิดฟองการเกิดฟองในน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบการหล่อลื่นลดลง สารป้องกันการเกิดฟองจะช่วยทำให้ฟองอากาศละลายตัวได้ง่าย

9) มีการระเหยตัวต่ำน้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีจุดวาบไฟสูง ทำให้เกิดการระเหยต่ำและทนต่อความร้อนสูงๆ ได้ ไม่เกิดการเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองน้ำมันหล่อลื่นขณะใช้งาน

10) มีจุดไหลเทต่ำเพื่อนำน้ำมันหล่อลื่นไปใช้ในงานอุณหภูมิต่ำๆ ได้ [6]

#### 2.2.6 การศึกษาโครงสร้างและความหมาย

โลหะชนิดต่างๆ ถ้าเรามองดูด้วยตาเปล่าเราจะมองเห็นเพียงสีเดียว และอาจบอกได้หยาบๆ ว่าเป็นโลหะชนิดใด เช่น ทองแดง ทองเหลือง หรือเหล็ก แต่ถ้าเรามองผ่านกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เราจะเห็นโครงสร้างเป็นรูปต่างๆ กัน เรียกว่า Microstructure or Micrograph โครงสร้างของโลหะแต่ละชนิดจะมีขนาดเกรนและรูปร่างผลึกแตกต่างกัน เช่น ผ่านการรีด ดึง หรือผ่านการอบชุบด้วยความร้อน โครงสร้างของโลหะก็แตกต่างกันไปด้วย ซึ่งในการศึกษาโครงสร้างของโลหะนั้น จะแบ่งออกเป็น 2 วิธี แบบแมโคร (Macroscopic) เป็นการใช้อุปกรณ์ขยาย หรือกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 40 เท่า ลงมาเป็นการศึกษาโครงสร้างแบบหยาบๆ และแบบไมโคร (Microscopic)

เป็นการใช้กล้องขยาย หรือกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายตั้งแต่ 40 เท่า ขึ้นไป จนถึงเป็นพันๆ เท่า จะเป็นการศึกษาโครงสร้างแบบละเอียดมากๆ [7]

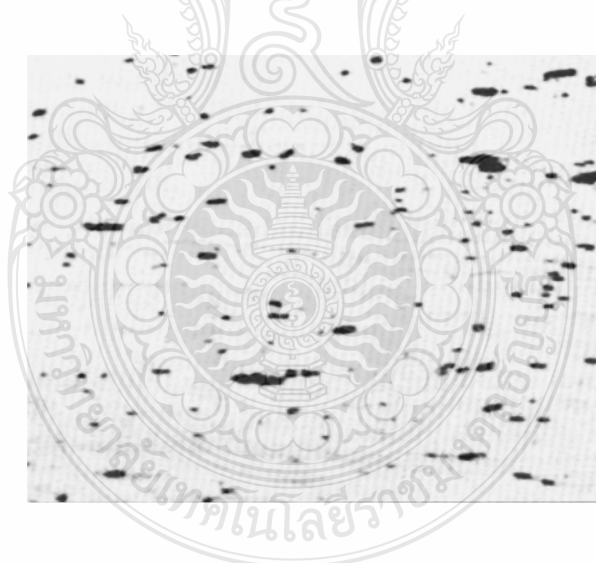
1) โครงสร้างของโลหะแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ

1. โครงสร้างของมหภาค (Macrostructure) เป็นโครงสร้างของโลหะและโลหะผสม ที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าๆ การใช้แว่นขยายหรือกล้องที่มีกำลังขยายน้อยกว่า 40 เท่า

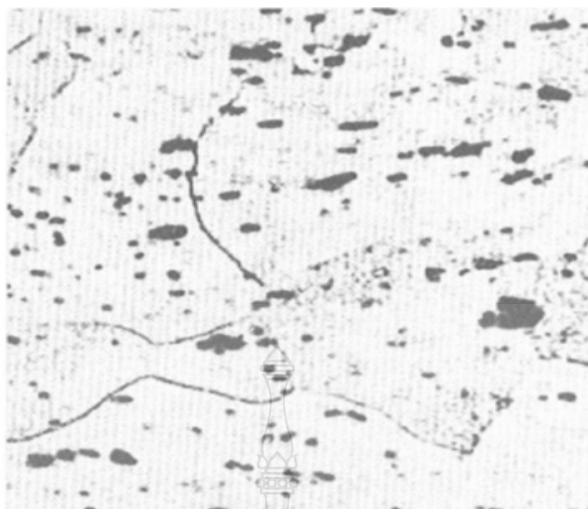
2. โครงสร้างจุลภาค (Microscope Structure) เป็นโครงสร้างที่ต้องตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงตั้งแต่ 40 เท่า ขึ้นไป เรียกอีกอย่างว่า Micrography [7]

2) โครงสร้างจุลภาค (Macrostructure) ของอะลูมิเนียม

1. โครงสร้างของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในทางการค้า กลุ่ม 1XXX แสดงลักษณะโดยมีโครงสร้างพื้น เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างอื่น ธาตุที่ไม่ละลาย ในอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทางการค้า ที่เป็นธาตุผสมหลักคือ ธาตุเหล็ก (Fe) และซิลิกอน (Si) และธาตุที่ผสม มีการกระจายทั่วเนื้อโลหะอะลูมิเนียม ตามขอบเขตที่ผสมลงไป ตั้งแต่มีการค้าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ในทางการค้า มีธาตุเหล็กและซิลิกอนเป็นธาตุที่ผสมอะลูมิเนียม ธาตุที่ไม่ละลาย มีธาตุเหล็กและซิลิกอน เป็นส่วนประกอบพื้นฐาน ทำให้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ในทางการค้ากลุ่มนี้ เปลี่ยนไป [3]



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคแผ่นอะลูมิเนียม ผ่านการรีดเย็น หมายเลข 1100-H18 จุดสีดำเล็กๆ คือ  $FeAl_3$



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคแผ่นอะลูมิเนียมผ่านการรีด เย็นหมายเลข 1100-O และมีการเกิดผลึกใหม่ ทำให้เกรนมีขนาดเท่ากันจุดดำเล็กๆ คือ  $\text{FeAl}_3$  [3]

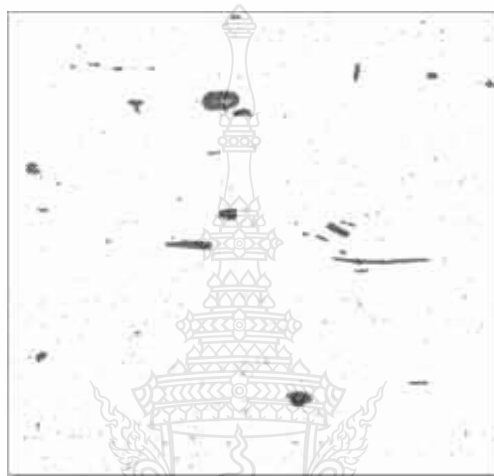
2. โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) อะลูมิเนียมผสมทองแดงกลุ่ม 2XXX โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่นิยมใช้งานส่วนมากเป็นรูปโครงสร้างจุลภาคเกี่ยวกับการทำเองจึงหรือการบ่มแข็ง ซึ่งแสดงดังภาพข้างล่าง



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมผสมที่ 6% ทองแดง เมื่อทำการเองจึงโครงสร้างประกอบด้วยแถบสีดำคือ  $\theta$  และขอบเกรนโครงสร้างนั้นเป็นอะลูมิเนียม



3. อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนกลุ่ม 6XXX (Aluminium Magnesium Silicon Alloys) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนนี้ จะได้มาจากการปฏิบัติการเอจิง ซึ่งการเกิดธาตุผสมเชิงโลหะจะได้อธิบายในหัวข้อการเอจิง แต่ในโครงสร้างจุลภาคนี้อธิบายให้รู้ว่าเป็นโครงสร้างต่างๆ ซึ่งการใช้งาน ส่วนมากจะเป็นอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ที่ผ่านการเอจิงมากกว่า [3]



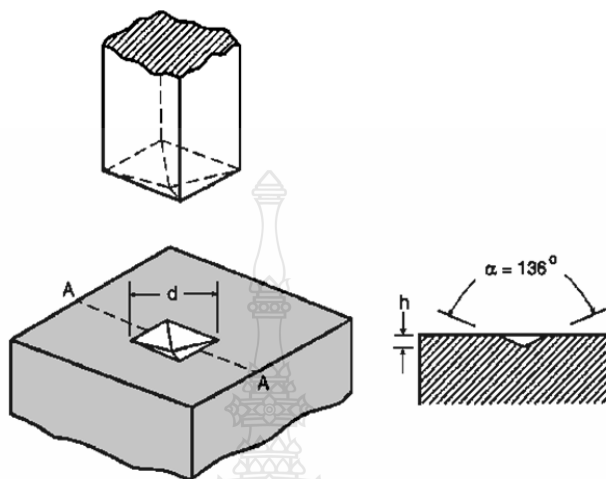
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมหมายเลข 6151-T6 ผ่านการทำเอจิงเทียมผ่านการขึ้นรูป Close-Die Forging

จากภาพที่ 2.9 จุดสีดำใหญ่ ทรงกลมๆ คือ  $Mn_2Si$  และ  $(Fe, Mn)_3SiAl_2$  ซึ่งเป็นเหลี่ยมๆ ส่วนจุดดำเล็กๆ เป็น โครเมียม

#### 2.2.7 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งวัสดุ หมายถึง การวัดความต้านทานการเกิดรอยบุ๋ม (Indentation) ของวัสดุ เพื่อต้องการทราบความแข็งแรงของวัสดุ โดยการวัดความต้านทานผิววัสดุด้วยวัตถุแข็ง (Ball) กดลงบนผิวชิ้นงาน การทดสอบโดยทั่วไปมี 3 วิธีการใหญ่ๆ คือ การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) และการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพูดถึงการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) ซึ่งมีหลักการทดสอบเช่นเดียวกับแบบบริเนล คือ สำหรับวัสดุอ่อน เช่น ทองแดง และอะลูมิเนียมผสม แต่ได้ใช้หัวกดเพชรรูปทรงพีระมิดมีมุม 136 องศา แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ การทดสอบแบบนี้เหมาะกับ

ตัวอย่างที่บางและแข็งมากๆ โดยใช้เวลาเป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยกดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ สามารถอ่านได้จากเครื่องได้อย่างง่าย ดังแสดงในภาพที่ 3.17 [2]

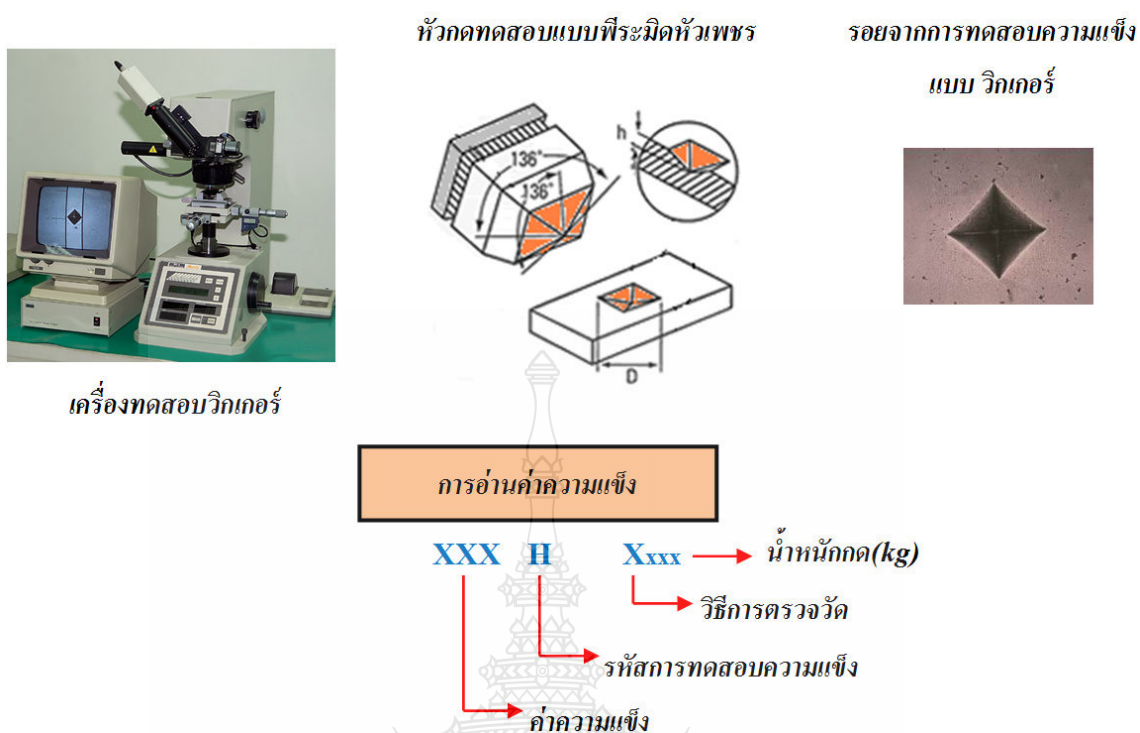


ภาพที่ 2.10 ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

สามารถคำนวณหาความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness) จากสมการที่ 2.7

$$\text{VHN} = \text{HV} = \frac{2P}{L^2} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2.7)$$

เมื่อ	P	คือแรงกด (kg)
	L	คือความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกด (mm)
	$\alpha$	คือมุมการกด ( $^{\circ}$ )



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) [2]

ตัวอย่างเช่น 100 HV100 หมายถึง ค่าการทดสอบความแข็ง 100 HV ทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ใช้หัวกดเพชรรูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุมระหว่างด้าน 136 องศา ให้น้ำหนักกดทดสอบ 100 กิโลกรัม

### 2.2.8 สมบัติเชิงกลของวัสดุจากการดึง (Mechanical Properties Tension)

สมบัติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดของผลิตภัณฑ์คือ ความสามารถในการรับแรง (Loads) การกระทำของแรง มีหลายประเภทเช่น แรงใช้งาน (Service Load) แรงสถิต (Static Load) เป็นต้น

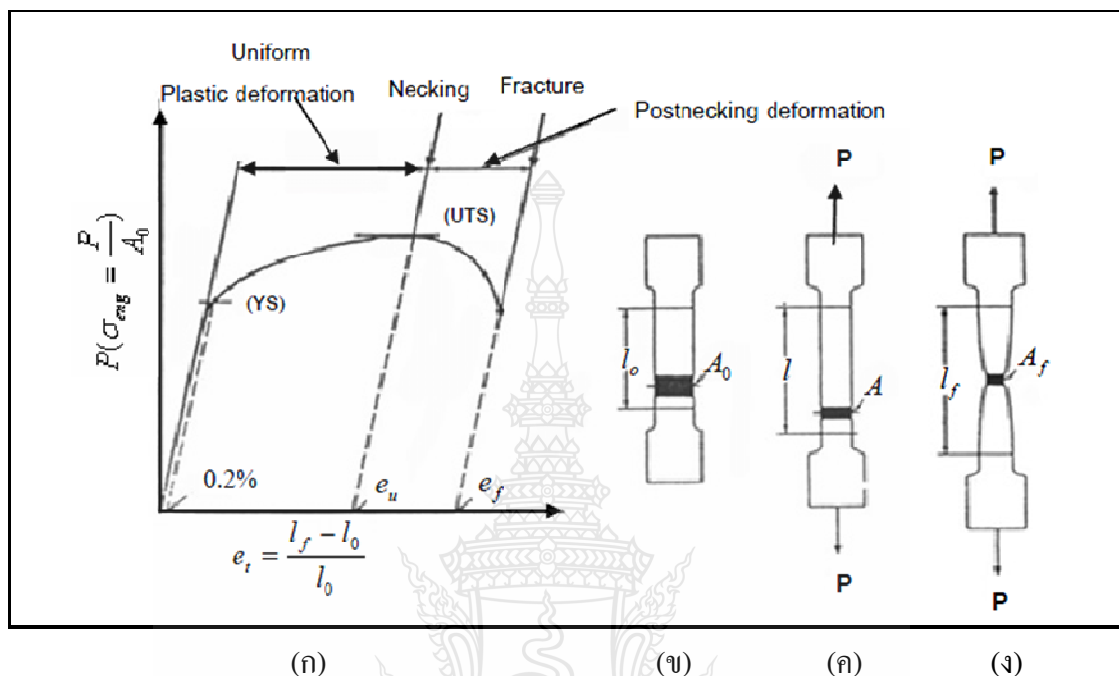
#### 1) การทดสอบการดึง (Tension Test)

วิธีการหาสมบัติวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การทดสอบการดึง (Tension Test หรือ Tensile Test) เพื่อให้ผลการทดสอบเป็นที่ยอมรับได้ทั่วไป จึงต้องทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น ASTM Standard E8 หรือมาตรฐานอื่นซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยสากล

#### 2) เส้นโค้งความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve)

ในระหว่างการทดสอบการดึง ทั้งโหลดและความยืด (Elongation) เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จึงต้องวัดการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความยืด จากนั้นจึงนำมาเขียนแผนภาพแรงกับการ

กระจัด (Force-Displacement Diagram) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (ก) ซึ่งเป็นรูปแบบของโลหะเหนียว เช่น เหล็กกล้า ที่ทดสอบในอุณหภูมิต่ำ [10]



- (ก) ความเค้นกับการกระจัดที่หาได้จากการทดสอบวัสดุเหนียว  
 (ข) ชิ้นทดสอบหน้าตัดขวางเดิม  
 (ค) เปลี่ยนรูปร่างพลาสติก-สม่ำเสมอในช่วงความยาวทดสอบ  
 (ง) การคอดและขาด

ภาพที่ 2.12 การทดสอบการดึง [15]

### 3) ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain)

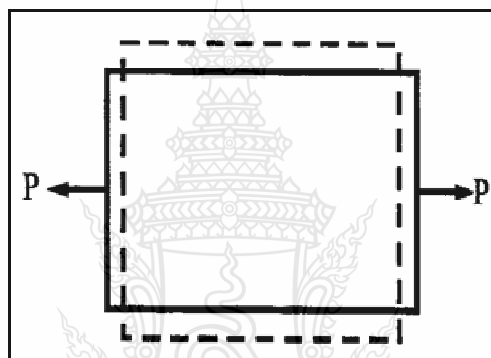
ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติและความยากในการวัดค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงกระทำภายนอกมีความสอดคล้องกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้คือ

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $\sigma$  คือ ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa,  $1 \text{ Pa} = 1\text{N/m}^2$ ) หรือ  $\text{kgf/mm}^2$   
 P คือ แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ  
 A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2$  หรือ  $\text{mm}^2$

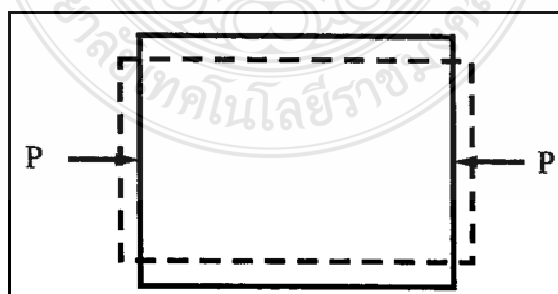
โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำโดย  
 ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆ กัน

- 1) ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่  
 ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังภาพที่ 13



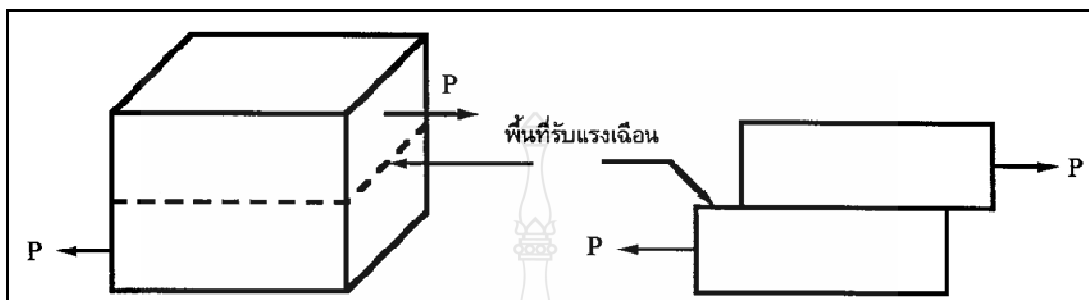
ภาพที่ 2.13 แรงดึง (Tensile)

- 2) ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่  
 ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แรงกด (Compression)

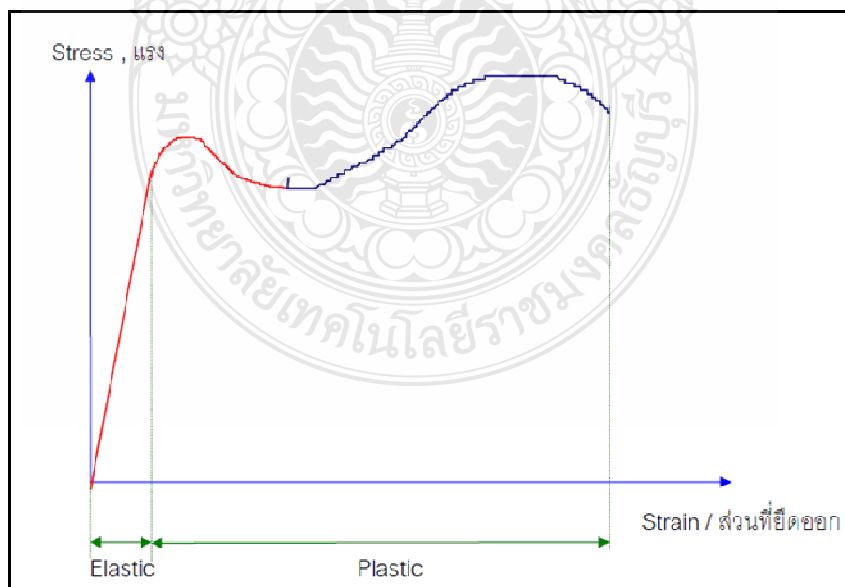
3) ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังภาพที่ 2.15 มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน [10]



ภาพที่ 2.15 แรงเฉือน (Shear)

### 2.2.9 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ [10]



ภาพที่ 2.16 ความเค้นความเครียดของการดึงวัสดุ

1) การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืดสปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ววัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิด นี้แล้วยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่ปราศจากแรงกระทำ วัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม

การคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

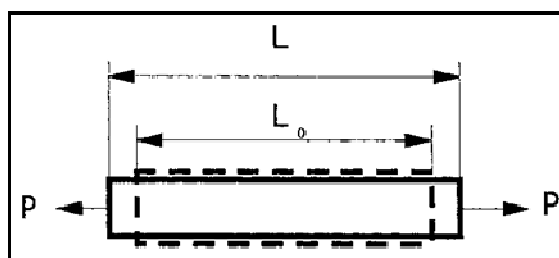
1. แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากกระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกดคงภาพที่ 2.17 ค่าของความเครียดจะเท่ากับ ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิมดังสมการที่ 2.9

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $e$  คือ ความเครียดเชิงเส้น

$\Delta L$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป ( $L - L_0$ )

$L_0$  คือ ความยาวเดิมของวัสดุที่สนใจ หรือ Gage Length



ภาพที่ 2.17 ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain)

2. แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ( $\tau$ ) ดังภาพที่ ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ ดังสมการที่ 2.10

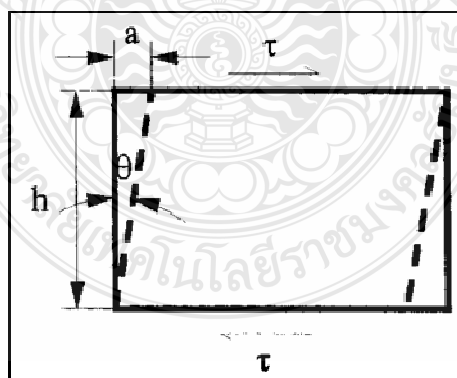
$$\gamma = \frac{a}{h} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ  $\tan \theta \approx \theta$  (Radian ในกรณีที่มุมเล็ก)

$a$  คือ ระยะที่เคลื่อนที่ไป (Displacement)

$h$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

$\theta$  คือ มุมที่เปลี่ยนไป



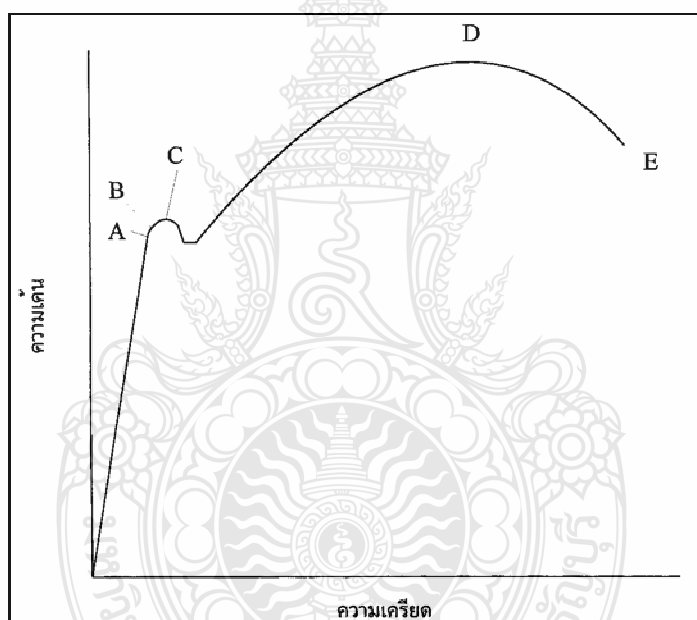
ภาพที่ 2.18 ความเครียดเฉือน (Shear Strain)



จะเห็นได้ว่าค่าของความเครียดทั้งสองแบบไม่มีหน่วย เพราะตัวตั้งและตัวหารมีหน่วยเป็นความยาวอยู่แล้ว

#### 2.2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลักโดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอนดังภาพที่ 2.19 การทดสอบแรงดึงนอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.19 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) [10]

#### 2.2.11 กระบวนการเปลี่ยนรูปของวัสดุ (Deformation of material)

กลไกในขบวนการเปลี่ยนรูป ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent Deformation) ซึ่งมักจะเกิดจากการที่ วัสดุได้รับแรงมากจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดรูปร่าง ถึงแม้ว่าเราจะเอาแรงนั้นออกแล้วก็ตาม มันก็ไม่สามารถจะกลับคืนสู่ในสภาพเดิมได้

1) สลิต (Slip Deformation) คือ การเลื่อนตัว หรือการเลื่อนผ่านกันระหว่างผลึกในแนวของอะตอม (Atom) ในระนาบ (Planes) ของผลึก โดยเป็นการเคลื่อนย้ายชนิดแบบถาวร โดยที่ถึงแม้ว่าจะไม่มี ความเค้นใดๆ แต่ผลึกนั้นๆ ก็จะไม่สามารถเคลื่อนกลับมาให้อยู่ในสภาพดั้งเดิมได้อีกเลย

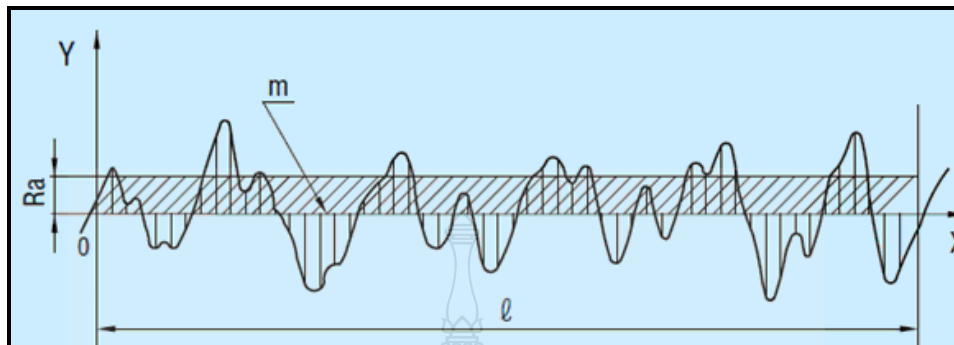
2) ทวินนิง (Twinning Deformation) หมายถึงขบวนการในการเปลี่ยนรูปร่างอันเนื่องมาจากระยะหรือแนวของผลึกเกิดการถูกเฉือนให้แบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วน ที่มีลักษณะคล้ายกัน หรือเหมือนกันโดยที่ทิศทางในการหักเหจะเป็นไปทั้งระนาบเลขที่เดียว

3) ดิสโลเคชัน (Dislocation) คือขบวนการที่เกิดการคลาดเคลื่อนของวัสดุเมื่อเกิดมีแรงหรือได้รับแรงมาจากภายนอกเข้ามากระทำจนกระทั่งอะตอมเกิดการเลื่อนตัวขึ้นนั่นเอง [10]

#### 2.2.12 ความเรียบผิวของชิ้นงาน

ในกระบวนการผลิตโดยการใช้เครื่องมือตัดปาดผิวของชิ้นงาน เช่น การตะไบ การกลึง การกัด หรือกระบวนการอื่นๆ เมื่อนำผิวของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการปาดผิวเหล่านี้มาส่องดูด้วยแว่นขยายจะพบว่าผิวของชิ้นงานขรุขระเป็นลูกคลื่นสูงๆ ต่ำๆ ไม่เรียบเสมอกันเหมือนกับการมองด้วยตาเปล่า ซึ่งลักษณะของชิ้นงานที่มีคลื่นสูงต่ำต่างกันมากย่อมแสดงว่าชิ้นงานนั้นมีความหยาบผิวสูงมากด้วยเช่นกัน ส่วนชิ้นที่มีความแตกต่างกันของคลื่นน้อยแสดงว่าผิวงานนั้นเรียบ อัตราความหยาบของผิวชิ้นงานนี้จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการผลิตชิ้นงานคุณภาพผิวของชิ้นงานต้องเหมาะสมกับความต้องการในการใช้งาน ในกรณีที่ผิวของชิ้นงานไม่เหมาะสมกับการใช้งานจะทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานนั้นสั้นลง จะเห็นได้ว่าการผลิตชิ้นงานผู้ผลิตจำเป็นต้องผลิตชิ้นงานให้มีคุณภาพผิวเป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้ หรือตามที่กำหนดในแบบสั่งงาน อย่างไรก็ตามการผลิตชิ้นงานที่มีผิวเรียบนั้นจะเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าชิ้นงานที่มีกำหนดพิกัดผิว จะเห็นได้ว่าคุณภาพผิวของชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับต้นทุนการผลิตความหยาบผิวสามารถวัดหรืออ่านค่าได้จากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น การอ่านค่าเฉลี่ยของความหยาบผิว (Ra) การอ่านค่าของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของความหยาบผิว (Ry) ตลอดจนการอ่านค่าเฉลี่ยของจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด (Rq) ค่าความหยาบในแต่ละลักษณะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการใช้งาน โดยส่วนใหญ่มักนิยมกำหนดเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ย แต่ในงานวิจัยเล่มนี้จะกล่าวถึงค่าความหยาบผิว Ra (Arithmetical Mean Roughness) เพียงค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งค่าความหยาบผิวเฉลี่ย หมายถึง ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณค่ากลางระหว่างจุดยอดและจุดก้นแอ่ง เพื่อกำหนดเส้นกึ่งกลาง (Mean) แล้วนำค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านล่างเทียบกับระยะทาง แสดงดังภาพที่ 2.20 และวิธีการคำนวณดังสมการที่ 2.11 [8]

$$Ra = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |f(x)| dx \quad (2.11)$$



ภาพที่ 2.20 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) [8]

## 2.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

### 2.3.1 การประมาณต้นทุนของเครื่องมือและผลผลิต (Estimating Tool Cost and Productivity)

คำนวณต้นทุนวัสดุที่ใช้ ค่าแรงของทุกขั้นตอนการผลิตเครื่องมือ [9]

1) คำนวณจำนวนของชิ้นงานที่เครื่องมือสามารถผลิตได้ต่อชั่วโมง (Part per hour; Ph) ดังสมการที่ 2.12

$$Ph = \frac{1}{S} \quad (2.12)$$

เมื่อ S คือ Single-part time

Ph คือ จำนวนชิ้นงานที่ได้ต่อชั่วโมง

2) การคำนวณค่าใช้จ่ายแรงงาน (Labor Expense) หาได้จากสมการที่ 2.13

$$L = \frac{LS}{Ph} \times w \quad (2.13)$$

เมื่อ Ls คือ ความต้องการจากการผลิต

W คือ ค่าจ้างแรงงานต่อชั่วโมง

Ph คือ ความสามารถในการผลิตต่อชั่วโมง

### 3) การคำนวณต้นทุนต่อชิ้นงาน (The Cost Per Part)

ต้นทุนต่อชิ้นงาน (Cost per Part; Cp) จากสมการที่ 2.14

$$Cp = \frac{TC + L}{LS} \quad (2.14)$$

เมื่อ TC	คือ ค่าใช้จ่ายเครื่องมือ
L	คือ ค่าใช้จ่ายแรงงาน
LS	คือ ความต้องการชิ้นงานในการผลิต

## 2.4 วรรณกรรมและงานวิจัยที่ผ่านมา

งานชิ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามยังมีปัจจัยต่างๆ ในการทำงานที่จะต้องศึกษาเพื่อให้เกิดกระบวนการทำงาน ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามที่จะศึกษากลไกการทำงาน ของกระบวนการ โดยมีงานวรรณกรรมที่น่าสนใจในงานการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปดังต่อไปนี้

2.4.1 S.Syahrullail และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลตัวของแท่งบิลเล็ทกับสารหล่อลื่นประเภทน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์โดยทำการอัดขึ้นรูปวัสดุแท่งบิลเล็ทอะลูมิเนียมผสม AA 5083 โดยทำการศึกษาสารหล่อลื่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ เทียบกับน้ำมันแร่พาราฟิน VG460 ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นกึ่งของเหลว ศึกษาถึงความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูป พบว่าน้ำมันแร่พาราฟิน VG460 ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีความหนืดสูง มีความสามารถในการลดความเสียหายในกระบวนการซึ่งความเสียหายดังกล่าวนี้ เป็นข้อจำกัดของการอัดขึ้นรูป แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของชิ้นงานที่ได้รับ โดยพิจารณาจากความหยาบผิวที่เกิดขึ้น พบว่าสารหล่อลื่นทั้ง 2 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

2.4.2 Dvi-Chen และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาเรื่องการขึ้นรูปแบบเย็นโดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์แบบสามมิติ ได้ทำการจำลองการขึ้นรูปแบบเย็นโดยใช้วัสดุอะลูมิเนียม A1 6062 โดยใช้มุมตายที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาถึงแรงในการดันขึ้นรูปที่แตกต่างกันพบว่า

- 1) แรงในการดันขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมตายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ระหว่าง 10 ถึง 35 องศา
- 2) ความเสียหายของวัสดุที่ถูกทำการขึ้นรูป จะเกิดขึ้นสูงสุดที่ปากทางออกของตาย
- 3) ความเครียดของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการลดขนาด

2.4.3 Tahir Altinbalik และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาเรื่องการศึกษาเชิงทฤษฎีและทดลองสำหรับกระบวนการดันขึ้นรูปแบบไหลตามในส่วนของภาคตัดเฉพาะส่วน โดยทำการขึ้นรูป ตะกั่วบริสุทธิ์ โดยกระบวนการดันขึ้นรูปแบบไหลตาม โดยใช้ตัวแปรระยะของพื้นที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาเปรียบเทียบถึงผลที่เกิดขึ้นระหว่างรูปแบบที่เกิดขึ้นในทางทฤษฎี และผลที่ได้จากการทดสอบจริงพบว่า รูปแบบของทฤษฎีและรูปแบบของผลที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกัน และพบว่าขนาดของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 21 มิลลิเมตร จะมีลักษณะของรอยมลทินที่ดีกว่าขนาดอื่นๆ

2.4.4 J.S. Ajiboye และ M.B. Adeyemi [14] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของคายแลนด์ (Die Land) ที่มีต่อกระบวนการขึ้นรูปเย็นด้วยวัสดุประเภทตะกั่วผสม โดยทำการหล่อ แท่งตะกั่วผสม มาทำการกดอัดด้วยปัจจัยระยะคายแลนด์ (Die Land) ที่แตกต่างกันโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยกระบวนการตามค่าขอบเขตสูงสุด (Upper Bound) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น เช่น ลักษณะของความเค้น และความเครียดที่เกิดขึ้น แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเปรียบเทียบกับระยะการเคลื่อนที่ส่วนโค้ง การเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเทียบกับ ระยะคายแลนด์ (Die Land) และ มุมคายที่ออกจากค่าความเค้นของมุม คุณภาพของชิ้นงาน ความแข็งของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและการเปรียบเทียบทฤษฎีที่ใช้ในคำนวณเทียบกับการวัดผลจากการขึ้นรูปจริงพบว่า ระยะคายแลนด์ (Die Land) มีผลที่จะทำให้เกิดแรงเสียดทานเป็นอย่างมาก และยังส่งผลอย่างมีนัยยะสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ใช้ในการกระบวนการอัดขึ้นรูปอีกด้วย

2.4.5 M Bakhshi-Jooybari [15] ได้ทำการศึกษาทดลองเรื่องแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุเหล็กและอะลูมิเนียม โดยเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการอัดขึ้นรูปเย็นและการขึ้นรูปร้อน พบว่าการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่แตกต่างกันด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นมีความสอดคล้องและเป็นไปตามทฤษฎีในเชิงของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น แต่ไม่เป็นไปตามทฤษฎี ในส่วนของการดันขึ้นรูปร้อน ด้วยเหล็กคาร์บอนปานกลางที่มีการใช้สารหล่อลื่น

2.4.6 P.Tierman และคณะ [16] ได้การสร้างแบบจำลองของการอัดรีดเย็นที่มีการสอบเทียบการทดลองได้ทำการศึกษาถึงการปรับค่าที่มีความเหมาะสม ในการขึ้นรูปเย็นด้วยการทำการขึ้นรูปจริง เปรียบเทียบกับการใช้การศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการคำนวณโดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมผสม AA1100 ที่มีขนาดแตกต่างกันมาทำการผ่านการอบอ่อน เพื่อลดความเครียดในชิ้นงานที่จะนำมาทำการขึ้นรูปเย็น เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริง เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ ถึงผลกระทบที่

เกิดขึ้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการคำนวณพบว่า การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการตรวจสอบการทำงาน มีความน่าเชื่อถือในระดับที่สามารถเชื่อถือได้

2.4.7 S.O.Onuh และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาผลกระทบรูปของทรงคายและความเร็วในการอัดขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปเย็น ด้วยวัสดุประเภทอะลูมิเนียม และตะกั่วผสม เพื่อให้เข้าใจ ผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยใช้แทนอัดขึ้นรูปให้มีรูปร่างเป็นแบบชิ้นส่วนทรงสมมาตรด้วยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ในการทดลองเช่น อัตราการลดรูปของคาย มุมคาย ความเร็วในการอัดขึ้นรูปเทียบกับคุณภาพของชิ้นงาน แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปและรูปแบบการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปตามแนวต่างๆ ที่กำหนดโดยใช้จากการศึกษาพบว่า แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปจะแปรผันไปกับมุมคายและค่าที่เหมาะสมสำหรับ อัตรา การกดขึ้นรูปและอัตราในการลดรูปของพื้นที่ของพื้นที่ของชิ้นงานนั้น จะพบที่การใช้มุมคายที่น้อยที่สุดจะเกิดที่ภาคตัดมุม 90 องศา

## 2.5 สรุปบท

จากการทบทวนวรรณกรรมในขั้นต้นที่กล่าวมานั้นพบว่า กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของวัสดุชนิดต่างๆ เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการอัดขึ้นรูปวัสดุที่ใช้ในเป็นอุปกรณ์ในการอัดขึ้นรูปนั้นควรเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง และทนทานในการเสียดสีที่เกิดจากการสัมผัสกันระหว่างอุปกรณ์ในการอัดขึ้นรูป ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยถึงกระบวนการอัดขึ้นรูปอย่างกว้างขวาง แต่ก็ยังมีจุดที่น่าสนใจในการดำเนินการศึกษาวิจัยอีกมากมาย ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นนั้น พบว่าสารหล่อลื่นซึ่งมีความหนืดที่แตกต่างกันและมุมคายของแม่พิมพ์ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อแรงเสียดทานในกระบวนการอัดขึ้นรูป แรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดขึ้นรูป อัตราความเครียดที่เกิดขึ้นพื้นผิวของโลหะและอัตราความหยาบผิวที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหลังการอัดขึ้นรูป โดยวัสดุที่จะใช้การศึกษาทดลองเป็นอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการยึดตัวได้ดีและมีการไหลตัวของเนื้อวัสดุได้ดี โดยที่ปัญหาต่างๆ ที่มีความสำคัญซึ่งพบจากวรรณกรรมขั้นต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ได้แก่ ปัญหาการควบคุมสภาวะการทดลองให้มีความเหมาะสมต่อคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุโลหะที่มีความแตกต่างกัน เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก หรือ ตะกั่วผสม ซึ่งสภาวะต่างๆ ของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าระยะการเคลื่อนที่ของพันทัน ระยะคายแลนด์ ความเร็วในการอัดขึ้นรูปสอดคล้องและเป็นไปตามทฤษฎีการอัดขึ้นรูปเย็นในเชิงของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น

## บทที่ 3

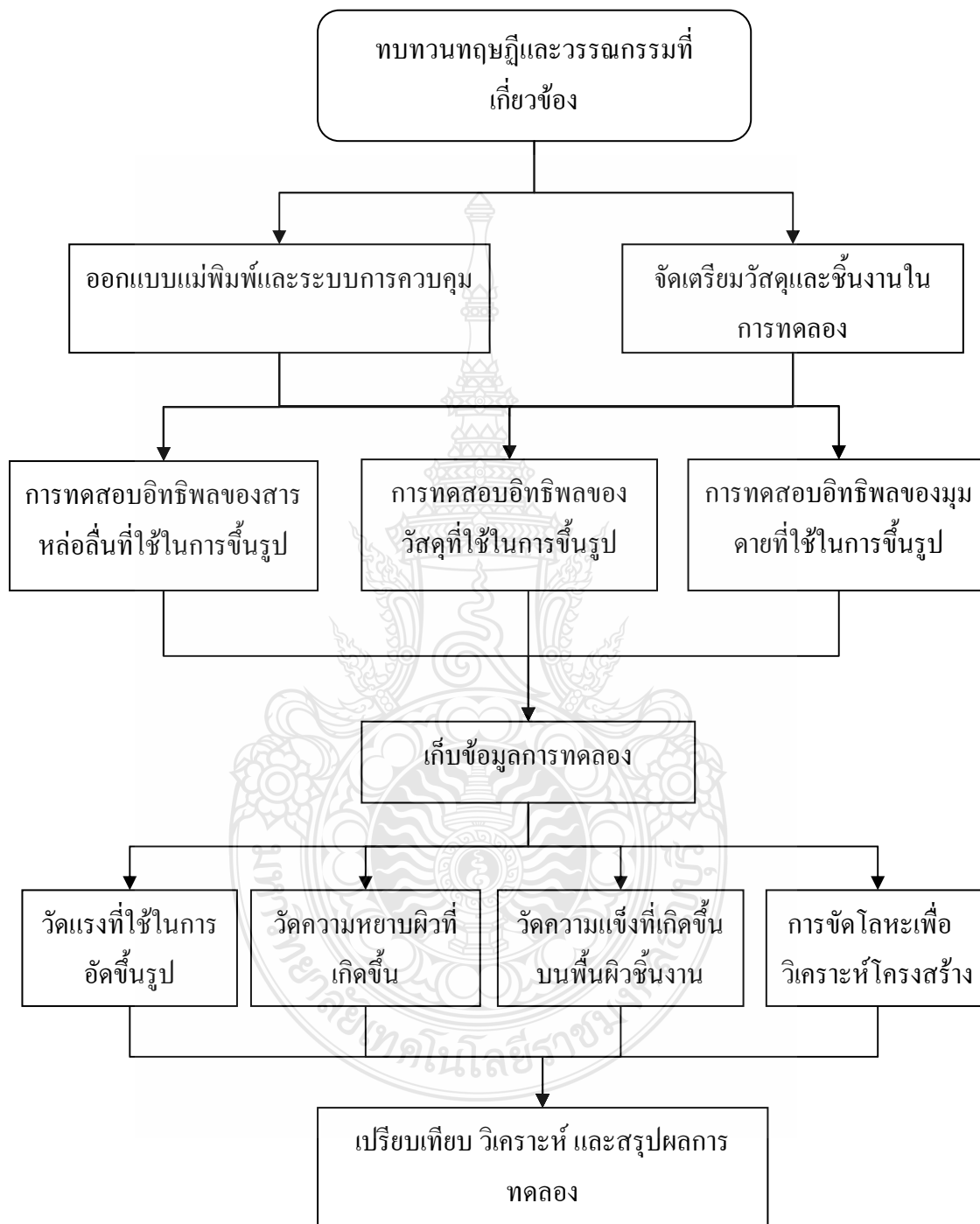
### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์ทางผู้จัดทำได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ในการทำการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาและจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของวัสดุอะลูมิเนียมในประเทศไทย” ซึ่งเป็นการอัดขึ้นรูปเย็น และทำการศึกษาการอัดขึ้นรูปที่แต่ละองศาของมุมคายเปรียบเทียบกับสารหล่อลื่นที่ใช้แต่ละชนิด ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการวางแผนการดำเนินงานของโครงการเพื่อให้สามารถวางแผนระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ดังต่อไปนี้

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

หลังจากทำการศึกษารูปแบบและข้อมูลของงานวิจัยทางทฤษฎีต่างๆ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นแนวทางที่สำคัญในทางปฏิบัติงาน ซึ่งจะพบว่าในการปฏิบัติงานจริงนั้นจะพบขั้นตอนในการทำงานที่เป็นระบบมากมาย เช่น การวางแผนงาน การจัดหาและจัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องมือและเครื่องจักรให้มีความพร้อมสมบูรณ์ เพื่อให้การทำงานมีความสะดวกและมีประสิทธิภาพ รวมถึงการเลือกใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำการทดลองที่มีความเหมาะสมกับลักษณะของงาน เพื่อลดปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นขณะปฏิบัติงานจริง ซึ่งในการปฏิบัติงานและดำเนินงานนั้นจำเป็นต้องมีความเข้าใจเป็นอย่างดี จึงจะทำให้การดำเนินงานเป็นไปตามขั้นตอนและแผนที่วางไว้ นอกจากนี้ยังมีปัญหาในการเลือกใช้อุปกรณ์ที่ต้องการความเหมาะสมในการทำวิจัย เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่นซึ่งมีหลากหลายชนิด ดังนั้นจึงได้มีการวางแผนการดำเนินงานเป็นขั้นตอน เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

### 3.2 วิธีดำเนินงานวางแผนและเตรียมการ



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวางแผนและเตรียมการ



### 3.3 วัสดุที่จะนำมาใช้ทำการอัดขึ้นรูป

วัสดุที่จะมาใช้ในการผลิตเป็นสิ่งที่จะกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะฉะนั้นในการเลือกวัสดุจึงเป็นส่วนสำคัญในการผลิต ที่จะทำให้ชิ้นงานที่ออกมามีประสิทธิภาพที่ดี เพราะวัสดุต่างๆ อาจมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน จึงเหมาะแก่การใช้งานที่ต่างกันออกไป ซึ่งวัสดุที่เลือกใช้มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 อะลูมิเนียม (Al 1100) ตาม International Organization Standard (ISO)

อะลูมิเนียมชนิดนี้เป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานการปรับปรุงคุณสมบัติการกัดกร่อนและง่ายต่อการขึ้นรูปตามความต้องการซึ่งคุณสมบัติของความแข็งแรงจะลดลง เช่น ภาชนะบรรจุอาหารและสารเคมี สามารถนำไปขึ้นรูปในลักษณะของแผ่นหลอดเพื่อใช้งานต่างๆ

#### 3.3.2 อะลูมิเนียม (Al 2011) ตาม International Organization Standard (ISO)

อะลูมิเนียมชนิดนี้เป็นอะลูมิเนียมผสมทองแดง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานทำพวกสกรู ใช้เพิ่มคุณสมบัติในการกระทำด้วยเครื่องจักรและเพิ่มความแข็งแรงเป็นต้น

#### 3.3.3 อะลูมิเนียม (Al 6063) ตาม International Organization Standard (ISO)

อะลูมิเนียมชนิดนี้เป็นอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน ซึ่งสามารถนำไปใช้งานในด้านการทำราวรั้ว อานม้า ประตูหน้าต่าง กระจับของรถบรรทุก รถกระบะ และท่อเป็นต้น [4]

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน International Standard Organization (ISO)

ธาตุ	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (% wt)		
	อะลูมิเนียม เกรด 1100	อะลูมิเนียม เกรด 2011	อะลูมิเนียม เกรด 6063
Al	99.00	91.2-94.6	97.5
Si	1.00	0.40	0.20-0.60
Fe	1.00	0.70	0.35
Mn	0.05	-	0.10
Zn	0.10	0.30	0.10
Cu	0.05-0.20	5.00-6.00	0.10
Pb	-	0.20-0.60	-
Ti	-	-	0.10

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมตามมาตรฐาน International Standard Organization (ISO) (ต่อ)

ธาตุ	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (% wt)		
	อลูมิเนียม เกรด 1100	อลูมิเนียม เกรด 2011	อลูมิเนียม เกรด 6063
Mg	-	-	0.45-0.90
Cr	-	-	0.10
Other	0.05	0.05	0.05

### 3.4 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการเก็บผล

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบใช้เครื่องบีบโลหะของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ขนาด 80 ตัน และแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นอะลูมิเนียม

#### 3.4.1 เครื่องบีบโลหะขนาด 80 ตัน

เครื่องบีบโลหะเป็นเครื่องจักรที่รวมแม่พิมพ์เข้าไว้ 2 แม่พิมพ์ หรือมากกว่านั้น ถูกออกแบบเพื่อมุ่งหมายขึ้นรูปวัสดุที่วางอยู่ระหว่างแม่พิมพ์ โดยที่แม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าหากันด้วยการใช้กำลังที่แรงไปยังวัสดุซึ่งเป็นผลให้เกิดแรงปฏิกิริยาโต้ตอบจากแรงที่ใช้ไปยังวัสดุที่อยู่ระหว่างแม่พิมพ์ ซึ่งรองรับด้วยแท่นเครื่องของตัวเองแสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เครื่องบีบโลหะขนาด 80 ตัน ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

### 3.4.2 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเยื่ออะลูมิเนียม แสดงดังภาพที่ 3.3



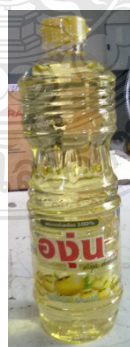
ภาพที่ 3.3 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม

### 3.4.3 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ

การเลือกสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่ใช้กันทั่วไปกับงานอัดขึ้นรูปมีหลายชนิด แต่ที่นำมาใช้ในการทดลอง คือ น้ำมันแร่ น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าว ซึ่งจะนำผลจากการทดสอบมาเปรียบเทียบกันว่าสารหล่อลื่นชนิดไหนที่เหมาะสมต่อการใช้งานอัดขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 3.4



(ก) น้ำมันแร่ (Sun's oil)



(ข) น้ำมันถั่วเหลือง



(ค) น้ำมันมะพร้าว

ภาพที่ 3.4 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.4.4 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

1) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Mini Data Logger) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลพื้นฐานของระบบ (Data Logger) ประกอบไปด้วย Scanner หรือ Multiplexer Digital-Voltmeter และตัวบันทึกข้อมูล ซึ่งรับ Input ที่เป็นระบบ Analog จาก Sensor แล้วทำการเปลี่ยนข้อมูลเป็นระบบ Digital และเก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำเพื่อนำไปใช้ต่อไป แสดงดังภาพที่ 3.5 โดยมีตารางบันทึกแรงในการอัดขึ้นรูป แสดงดังตารางที่ 3.2



(ก) อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน (ข) อุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมัน และอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ

2) การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำมันและอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณต่อเข้ากับเครื่องเพรส แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณต่อเข้ากับเครื่องเพรส

ตารางที่ 3.2 แรงในการอัดขึ้นรูปในการใช้สารหล่อลื่นต่างชนิดกันของแต่ละมุมคาย โดยที่น้ำมันแร่ ใช้สัญลักษณ์ (Su) น้ำมันถั่วเหลืองใช้สัญลักษณ์ (So) น้ำมันมะพร้าวใช้สัญลักษณ์ (Co) และไม่ใช้สารหล่อลื่นใช้สัญลักษณ์ (No)

ชิ้นงานที่ Al.....	แรงในการอัดขึ้นรูป (kN)											
	Die 20				Die 25				Die 30			
	Su	So	Co	No	Su	So	Co	No	Su	So	Co	No
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Average	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

#### 3.4.5 วัดค่าความหยาบผิว

ทำการวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยจะทำการวัดค่า Ra ของแต่ละจุดบนชิ้นงานซึ่งทำการวัดทั้งหมด 12 จุด ของชิ้นงานแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยทำการวัดชิ้นงานทั้งหมด 3 ชิ้น

##### 1) อุปกรณ์ในการวัดค่าความหยาบผิว (Surface Roughness)

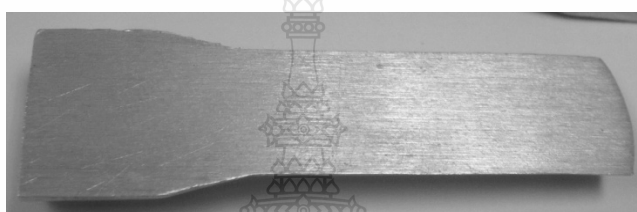
ใช้เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ ACCRETECH รุ่น HANDYSURF โดยใช้ระยะ Cut Off 5 x 0.8 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนในการวัดผิวชิ้นงานดังนี้คือ ทำความสะอาดผิวชิ้นงานโดยการล้างคราบสารหล่อลื่นออก แล้ววางชิ้นงานจับยึด บน V-Block แล้วจึงวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย โดยทำการวัดจำนวน 4 ครั้งในแต่ละด้าน โดยเริ่มวัดที่มุม 0 องศา 90 องศา 180 องศา 270 องศา ของชิ้นงานที่ทำการขึ้นอัดขึ้นรูปแล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นเครื่องวัดความหยาบผิวชนิดเข็มลากผ่านผิวสำเร็จของชิ้นงาน โดยมีข้อจำกัดจากการวัดคือนำผลที่วัดได้ตามแนวยาวตรงมาแสดงเท่านั้น แสดงดังภาพที่ 3.7 และวิธีการวัดค่าความหยาบผิว แสดงดังภาพที่ 3.8 โดยมีตารางบันทึกค่าความหยาบผิว แสดงดังตารางที่ 3.2



### 3.4.6 การไหลตัวของวัสดุ

การไหลตัวของเนื้อโลหะภายในการอัดขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อคุณภาพชิ้นงานและสมบัติทางกลของชิ้นงาน เชื่อว่าลักษณะของเกรนของชิ้นงานมีลักษณะยึดตัวตามยาวของทิศทางการรีด การศึกษาการไหลตัวของโลหะภายในการอัดขึ้นรูปโดยการผ่าครึ่งดูการไหลตัวของเนื้อโลหะด้วยวิธีดังต่อไปนี้

1) ทำการผ่าครึ่งชิ้นงานด้วยเครื่องผ่าชิ้นงานทดสอบจนได้ชิ้นงานสำหรับทำการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ชิ้นงานหลังการผ่าสำหรับเป็นชิ้นงานทดสอบ

2) เมื่อผ่าชิ้นงานเสร็จแล้วทำการหล่อเรซินชิ้นงาน แสดงดังภาพที่ 3.10 และชิ้นงานหล่อเรซินสำเร็จ แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การหล่อเรซิน



ภาพที่ 3.11 ชิ้นงานหล่อเรซินสำเร็จ

3) เมื่อหล่อเรซินเสร็จแล้วทำการขัดเตรียมชิ้นงานก่อนการทดสอบด้วยกระดาษทรายได้ความละเอียดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3.12 เมื่อขัดกระดาษทรายเสร็จแล้วนำไปขัดด้วยผ้าสักกะหลาดโดยใช้สารขัด คือ ผงเพชร เพื่อเป็นการลบรอยกระดาษทรายก่อนการนำไปกักกรด



ภาพที่ 3.12 กระดาษทรายเบอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการขัดเตรียมชิ้นงาน

4) หลังจากเตรียมชิ้นงานทดสอบเสร็จแล้วจะทำการกักกรดเพื่อส่องดูโครงสร้างซึ่งการกักกรดนั้น อะลูมิเนียมแต่ละชนิดใช้กรดในการกักไม่เหมือนกันซึ่งในการกักกรดแต่ละชนิดมีส่วนผสมดังนี้



- การผสมกรดสำหรับอะลูมิเนียม เกรด 1100 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม ผสมกับ น้ำบริสุทธิ์ 100 มิลลิลิตร
- การผสมกรดสำหรับอะลูมิเนียม เกรด 2011 ใช้กรดไนตริก 5 มิลลิลิตร กรดฟลูอริก 3 มิลลิลิตร คลอริก 2 มิลลิลิตร และน้ำ 90 มิลลิลิตร
- การผสมกรดสำหรับอะลูมิเนียม เกรด 6063 ใช้กรดไนตริก 30 มิลลิลิตร กรดฟลูอริก 10 มิลลิลิตร และน้ำ 60 มิลลิลิตร

5) เมื่อทำการกัดกรดเสร็จแล้วจึงนำไปส่องด้วยกล้อง Microscope และบันทึกผล

### 3.5 การออกแบบและการคำนวณ

ในการออกแบบขายของแม่พิมพ์ในการอัดขึ้นรูปเย็นอะลูมิเนียม นั้น ขั้นตอนแรกจะต้องพิจารณาว่าขอบเขตและความสามารถของเครื่องที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปนั้นมีศักยภาพเพียงใด โดยมีการคำนวณหาการลดขนาดและความยาวของชิ้นทดสอบ จากนั้นก็คำนวณแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเย็นว่าแรงที่ใช้จะต้องไม่เกินภาระของเครื่องอัด เมื่อคำนวณได้แล้วจากนั้นจึงเริ่มต้นในการออกแบบขายของแม่พิมพ์ ดังนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงนั้นก็ คือ แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ความแข็งแรง การลดขนาดของชิ้นงาน ความยากง่ายในการสร้าง หรือการถอดประกอบแม่พิมพ์ และความประหยัด

#### 3.5.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป

1) เกรดการฟอร์มตัว จากสมการที่ 2.2

$$\begin{aligned} \epsilon_h &= \left( \ln \frac{A_0}{A} \right) \times 100\% \\ &= \left( \ln \frac{196.07}{122.72} \right) \times 100\% \\ &= 46.86\% \end{aligned} \quad (3.1)$$

2) แรงขึ้นรูป F จากสมการที่ 2.5

$$F = \frac{A_0 \times k_{fm} \times \epsilon_h}{n_F} \quad (3.2)$$

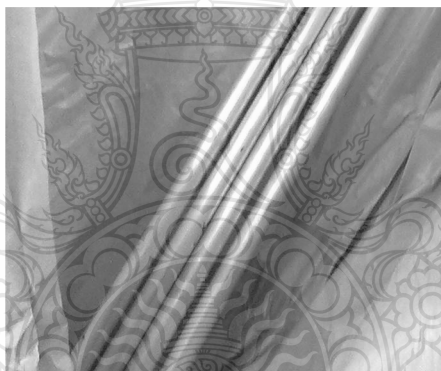
$$= \frac{196.07 \times 225.83 \times 0.4686}{0.5}$$

$$= 41497.8 \text{ N}$$

$$= 4.15 \text{ tons.}$$

### 3.5.2 วัสดุที่จะนำมาใช้ทำการผลิต

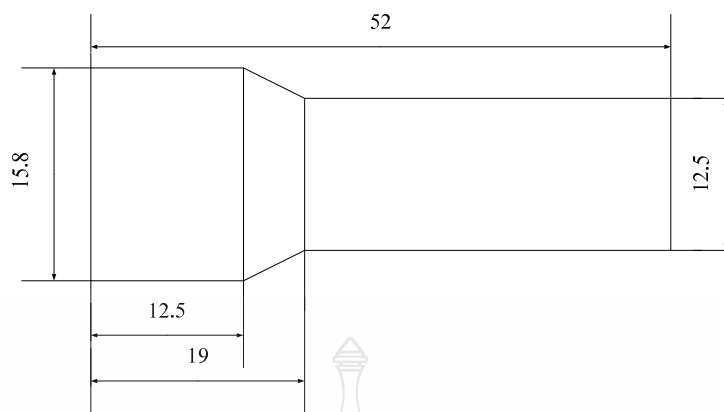
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ใช้อะลูมิเนียมซึ่งอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งคือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์สูง มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดีในบรรยากาศทั่วไป ซึ่งอะลูมิเนียมที่นำมาใช้มี 3 ชนิด ดังนี้ Al 1100, Al 2011 และ Al 6063 โดยมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 15.8 มิลลิเมตร ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 อะลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิต

### 3.5.3 ขนาดชิ้นงานหลังการขึ้นรูป

หลังจากผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้วชิ้นงานที่ได้นั้นจะต้องมีขนาด แสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 ชิ้นงานหลังจากการอัดขึ้นรูป

$$\text{ปริมาตรชิ้นงานสำเร็จ } V_F = \frac{\pi}{4} \left[ (D^2 h_1) + \left( \frac{D+d}{2} \right)^2 h_2 + (d^2 \times h_3) \right] \quad (3.3)$$

$$= \frac{\pi}{4} \left[ (15.8^2 \times 12.5) + \left( \frac{15.8+12.5}{2} \right) \times 6.5 + (12.5^2 \times 33) \right]$$

$$= 6572.78 \text{ mm}^2$$

เพื่อการสูญเสียเนื้อวัสดุ 2%

$$\text{ปริมาตรวัสดุดิบ } V = 6572.78 + \frac{\pi}{100} \times 2 \times 6572.78$$

$$= 6985.76 \text{ mm}^2$$

ขนาดวัสดุดิบ ให้  $D_0 = 15.8 \text{ mm}^2$

$$A_0 = \frac{\pi}{4} \times 15.8^2$$

$$= 196.07 \text{ mm}^2$$

$$h_0 = \frac{V}{A_0}$$

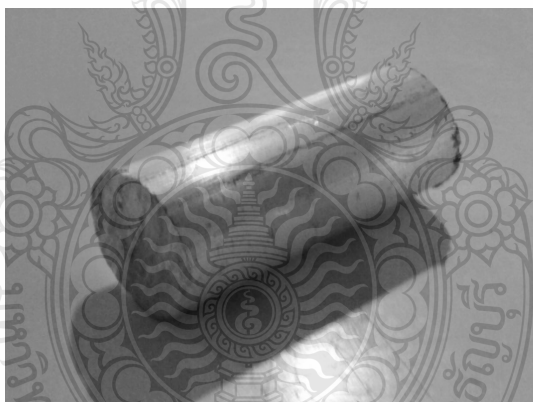
$$= \frac{6985.76}{196.07}$$

$$= 35.63 \text{ mm}$$

### 3.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.6.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1) ทำการตัดชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 15.8 มิลลิเมตร ให้มีความยาวไม่น้อยกว่า 37 มิลลิเมตร ด้วยการเลื่อยมือแสดงดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 ชิ้นงานที่เลื่อยเสร็จแล้ว

2) ทำการกลึงปาดหน้าชิ้นงานให้เรียบร้อยโดยให้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.8 มิลลิเมตร และความยาวอยู่ที่ 37 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 ชิ้นทดสอบ

### 3.6.2 การประกอบแม่พิมพ์และคายของแม่พิมพ์

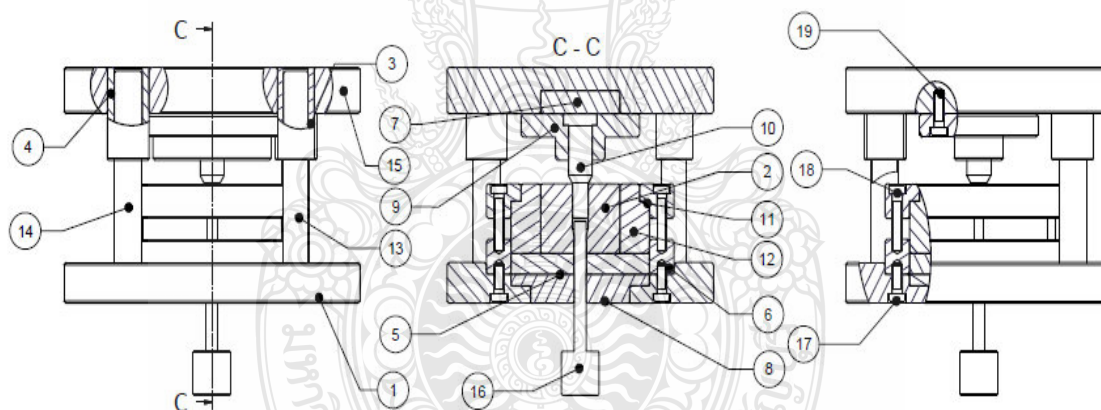
แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นนั้นสร้างขึ้นให้ใช้งานในการอัดขึ้นรูป โดยที่แม่พิมพ์ทำจากเหล็ก SKD11 และ S45C เป็นส่วนใหญ่ สำหรับส่วนประกอบที่สำคัญของแม่พิมพ์ประกอบไปด้วย คายตัวล่าง (Lower Die) คายที่มุม 20 องศา มุม 25 องศา และมุม 30 องศา (Die Insert, Guide Bush 25, Guide Bush 28, Intermediate Plate, Intermediate Plate Out, Pressure Plate Punch, Pressure Plate, Punch Plate, Punch, Shrink Ring Out, Shrink Ring, Guide Post 25, Guide Post 28, Upper Die และ Ejector แสดงดังภาพที่ 3.17

### ตารางที่ 3.4 ชิ้นส่วนของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น

ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาด	จำนวน/ชั้น
1	Lower Die	S45C	270x300x35	1
2	Die Insert	SKD11	Ø80x60	1
3	Guide Bush 25	St37	Ø37x80	2
4	Guide Bush 28	St37	Ø42x80	2
5	Intermediate Plate	S45C	Ø140x17.9	1
6	Intermediate Plate Out	St37	Ø190x30	1
7	Pressure Plate Punch	S45C	Ø80x20	1
8	Pressure Plate	S45C	Ø140x25	1
9	Punch Plate	S45C	120x190x40	1

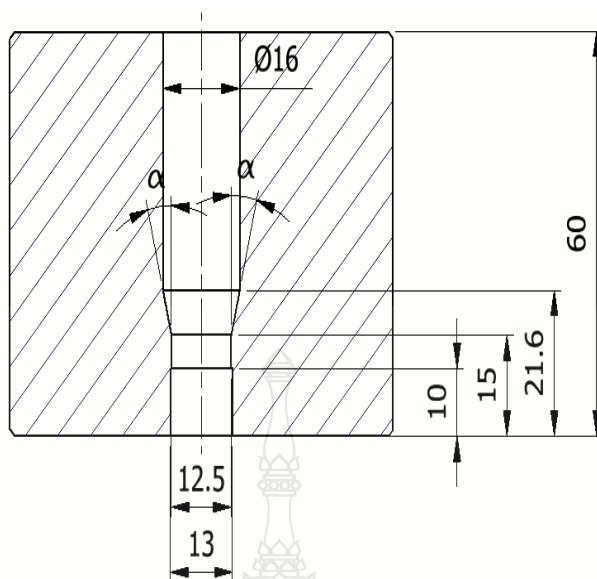
ตารางที่ 3.4 ชิ้นส่วนของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น (ต่อ)

ชิ้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาด	จำนวน/ชิ้น
10	Punch	SKD11	Ø34x90	1
11	Shrink Ring Outer	St37	Ø190x30	1
12	Shrink Ring	S45C	Ø140x60	1
13	Guide Post 25	S45C	Ø25x200	2
14	Guide Post 28	S45C	Ø28x200	2
15	Upper Die	S45C	270x300x40	1
16	Ejector	S45C	Ø38x150	1
17	Socket Head Screw		M10x1.5x25	4
18	Socket Head Screw		M10x1.5x50	4
19	Socket Head Screw		M10x1.5x30	4



ภาพที่ 3.17 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

ขนาดของมุมดาวยที่ใช้ในการทดสอบการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม 3 มุม คือ  $2\alpha = 20$  องศา  $2\alpha = 25$  องศา และ  $2\alpha = 30$  องศา แสดงดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 คายของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น

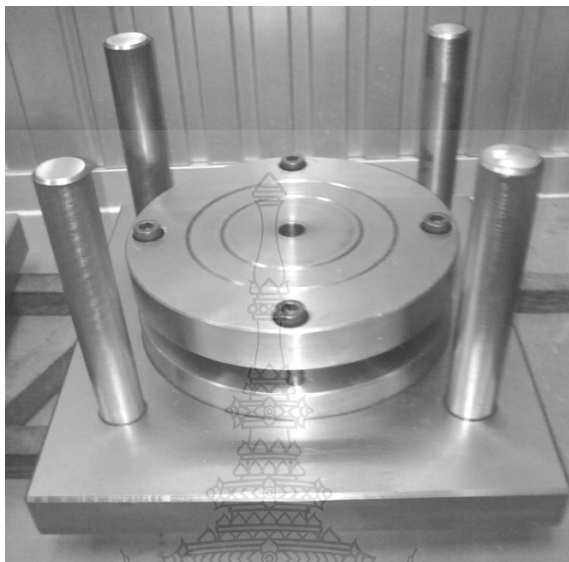
ขั้นตอนในการประกอบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น

- 1) ทำความสะอาดแม่พิมพ์ทั้งหมด
- 2) นำตัวกระทู้ ไปใส่ในช่องกระทู้ของเครื่องอัดขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 3.19



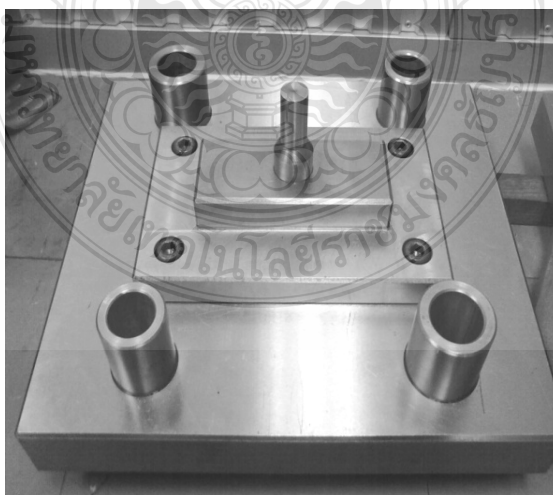
ภาพที่ 3.19 ตัวกระทู้

3) นำชุดแม่พิมพ์ตัวล่างประกอบลงบนเครื่อง และนำตัวจับยึดมาจับยึดแม่พิมพ์ให้แน่น แสดงดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง

4) นำชุดแม่พิมพ์ตัวบนไปสวมกับชุดแม่พิมพ์ตัวล่าง และยึดสกรูของชุดแม่พิมพ์ตัวบนให้แน่น แสดงดังภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 ชุดแม่พิมพ์ตัวบน

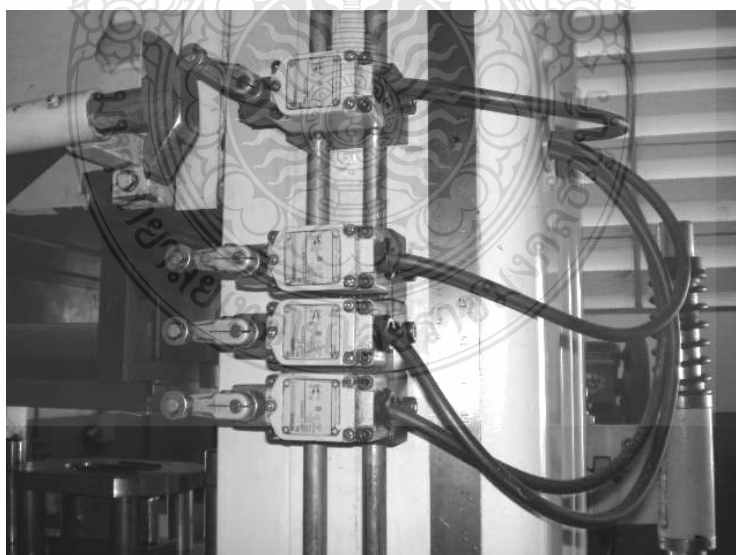


5) นำแม่พิมพ์ที่ประกอบเสร็จแล้วไปติดตั้งบนเครื่องเพรส ยึดแม่พิมพ์ด้านบนและตัวล่างให้แน่น แล้วยกชุดแม่พิมพ์ด้านบน แสดงดังภาพที่ 3.22



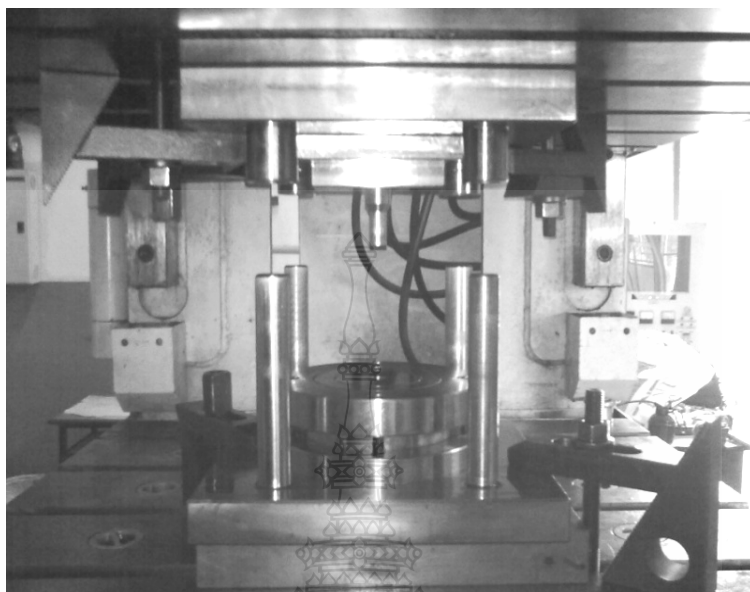
ภาพที่ 3.22 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องเพรส

6) ปรับตั้งสวิทช์ควบคุม ตามความลึกของชิ้นงานในการอัดขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 การปรับตั้งสวิทช์ควบคุมตามความลึกของชิ้นงาน

7) แม่พิมพ์ติดตั้งบนเครื่องเพรสพร้อมใช้งาน แสดงดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นพร้อมใช้งาน

### 3.6.3 ขั้นตอนในการทดลอง

เป็นวิธีการในการดำเนินงาน เพื่อให้สามารถทำการอัดขึ้นรูปจนเป็นชิ้นงานสำเร็จได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานของแม่พิมพ์ว่ามีประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นงานให้มีคุณภาพได้ดีเพียงใด หลังจากนั้นแก้ไขข้อบกพร่องและปรับปรุงคุณภาพของแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพดีตามต้องการ แสดงดังภาพที่ 3.24

- 1) นำเอาชิ้นงานที่เตรียมสำหรับทำการทดสอบใส่ลงปากคายในแม่พิมพ์
- 2) ทำการป้อนชิ้นงาน (ของแต่ละตัวแปร)
- 3) ทำการบันทึกผลนำชิ้นงานออกและตรวจสอบ
- 4) ทำตามขั้นตอนที่ 1-3 ซ้ำ จนครบทุกค่าตัวแปรตามที่กำหนดไว้
- 5) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปทุกชิ้นมาทำการวัดค่าความหยابผิว แสดงดังภาพที่ 3.7 และนำมาเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบคูโครงสร้าง
- 6) ทำการผ่าครึ่งชิ้นงานทุกชิ้นของแต่ละตัวแปร
- 7) เมื่อผ่าครึ่งชิ้นงานแล้วนำมาหล่อเรซินเพื่อสามารถให้จับชิ้นงานได้สะดวกเวลาขีดกระดาษทราย แสดงดังภาพที่ 3.9 และ 3.10

8) ทำการขัดด้วยกระดาษทรายไล่เบอร์ตั้งแต่หยาบไปจนถึงเบอร์ละเอียดจากนั้นนำไปขัดมันด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงเพชรเป็นสารขัด

9) เมื่อขัดมันจนขึ้นเงาแล้วนำชิ้นงานทดสอบมาวัดครดที่ผสมไว้ (แล้วแต่ชนิดของอะลูมิเนียม)

10) ล้างออกด้วยแอลกอฮอล์และน้ำสะอาดแล้วเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยไดร์

11) นำไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องไมโครสโคปแล้วบันทึกผล (ทำทุกๆ ชิ้นเหมือนกัน)

12) เมื่อส่องดูโครงสร้างครบทุกชิ้นแล้วนำชิ้นงานนั้นไปทำการทดสอบความแข็งและบันทึกผล

13) นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ผล

14) สรุปผลการทดลอง

### 3.7 การประมาณต้นทุนของเครื่องมือและผลผลิต (Estimating Tool Cost and Productivity)

#### 3.7.1 การประมาณค่าผลผลิตจากการป้อนขึ้นรูปและด้วยเครื่องจักร CNC

1) การประมาณผลผลิตด้วยวิธีการป้อนขึ้นรูป

$$Ph = \frac{1}{S} \quad (3.4)$$

เมื่อ Machining Time = 20 sec

Load Time = 5 sec.

Unload Time = 5 sec.

ดังนั้นสามารถแทนสมการได้ดังนี้

$$Ph = \frac{1}{\frac{20}{60 \times 60} + \frac{5}{60 \times 60} + \frac{5}{60 \times 60}} = 120$$

การประมาณผลผลิตงานป้อนขึ้นรูป เท่ากับ 120 ชิ้นต่อชั่วโมง

2) การประมาณผลผลิตด้วยวิธีการกลึงโดยใช้เครื่อง CNC

$$Ph = \frac{1}{S} \quad (3.5)$$

เมื่อ Machining Time = 45 sec.

Load Time = 5 sec.

Unload Time = 5 sec.

ดังนั้น สามารถแทนสมการได้ดังนี้

$$Ph = \frac{1}{\frac{45}{60 \times 60} + \frac{5}{60 \times 60} + \frac{5}{60 \times 60}} = 66$$

การประมาณต้นทุนของงานป้อนขึ้นรูป เท่ากับ 66 ชิ้นต่อชั่วโมง

ดังนั้นวิธีการป้อนขึ้นรูป มีผลผลิตต่อหน่วยได้มากกว่าวิธีการกลึงด้วยเครื่อง CNC จำนวน 54 ชิ้นต่อชั่วโมง

### 3.7.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายแรงงาน (Labor Expense)

1) การคำนวณค่าใช้จ่ายแรงงานด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป

$$L = \frac{LS}{Ph} \times w \quad (3.6)$$

เมื่อ  $LS = 5,000$  ชิ้น

$Ph = 120$  ชิ้นต่อชั่วโมง

$w = 37.5$  บาทต่อชั่วโมง

ดังนั้นสามารถแทนสมการได้ดังนี้

$$L = \frac{5,000}{120} \times 37.5 = 1,562.5$$

ทำการป้อนอัคซันรูปชิ้นงาน จำนวน 5,000 ชิ้น จะมีค่าใช้จ่ายแรงงาน = 1,563 บาท

2) การคำนวณค่าใช้จ่ายแรงงานด้วยวิธีการกลึงโดยใช้เครื่อง CNC

$$L = \frac{LS}{Ph} \times w \quad (1.7) \quad (3.7)$$

เมื่อ  $LS = 5,000$  ชิ้น  
 $Ph = 66$  ชิ้นต่อชั่วโมง  
 $w = 37.5$  บาทต่อชั่วโมง

ดังนั้นสามารถแทนสมการได้ดังนี้

$$L = \frac{5,000}{66} \times 37.5 = 2,840.9$$

ทำการกลึงโดยใช้เครื่อง CNC จำนวน 5,000 ชิ้น จะมีค่าใช้จ่ายแรงงาน = 2,841

3.7.3 ต้นทุนต่อชิ้นงาน (Cost Per Part)

$$Cp = \frac{TC + L}{LS} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $TC =$  Tool cost  
 $L =$  Labor expense  
 $LS =$  Lot size

## 1) ต้นทุนต่อชิ้นงานด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป

$$\text{เมื่อ } TC = 25,000$$

$$L = 1,563$$

$$LS = 5,000$$

ดังนั้น สามารถแทนค่าสมการได้ดังนี้

$$Cp = \frac{15,000 + 1,563}{5,000} = 3.31$$

ต้นทุนในการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปต่อหน่วยมีค่า = 3.31 บาท

## 2) ต้นทุนต่อชิ้นงานด้วยวิธีการกลึงโดยใช้เครื่อง CNC

$$\text{เมื่อ } TC = 25,000$$

$$L = 2,841$$

$$LS = 5,000$$

ดังนั้น สามารถแทนค่าสมการได้ดังนี้

$$Cp = \frac{15,000 + 2,841}{5,000} = 17.16$$

ต้นทุนในการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีการกลึงโดยใช้เครื่อง CNC ต่อหน่วยมีค่า = 17.16 บาท

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

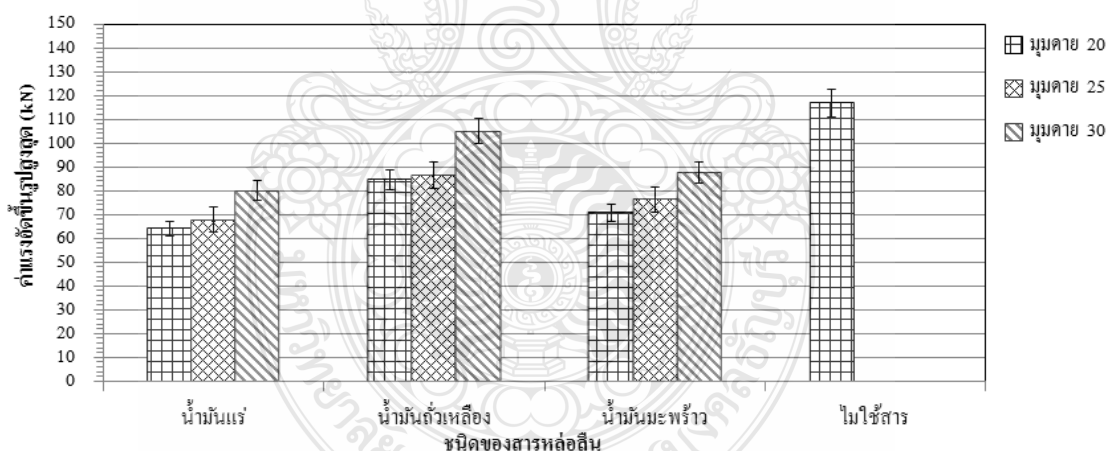
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล เป็นการนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตามตัวแปรที่กำหนดมาแสดง โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็นลักษณะต่างๆ เช่น แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ความหยาบผิวที่ผ่านการขึ้นรูปความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป และการทดสอบ โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป แสดงดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดลอง

##### 4.1.1 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป

แรงที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อตัวแปรอื่นๆ แสดงดังต่อไปนี้

1) แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 1100 (Al 1100) แสดงดังภาพที่ 4.1

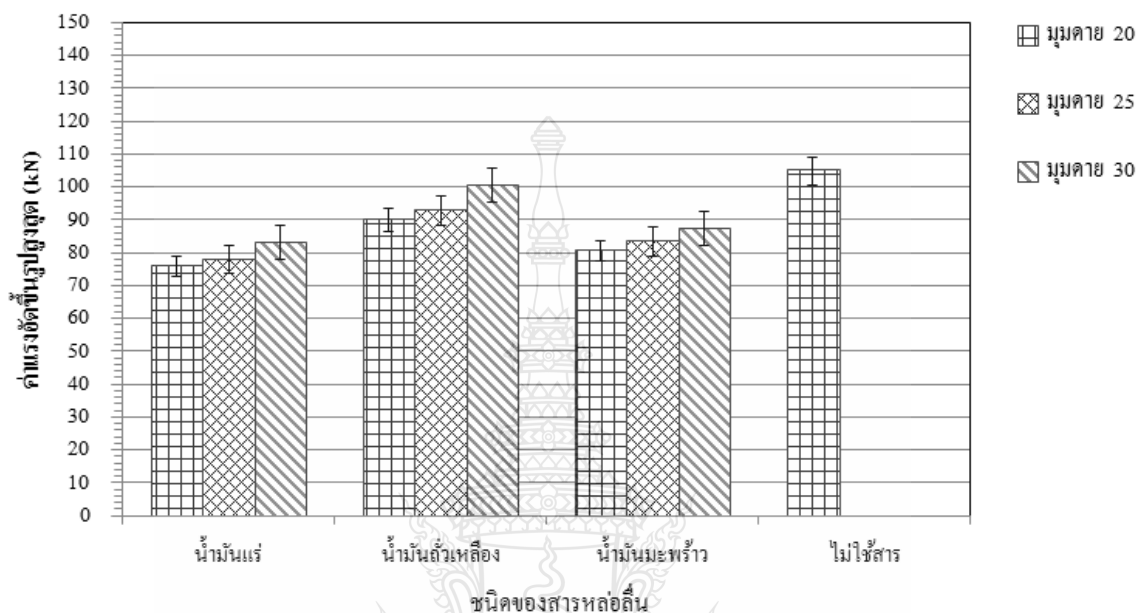


ภาพที่ 4.1 แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 1100

จากภาพที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงถึงแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 1100 โดยใช้สารหล่อลื่นที่แตกต่างกัน และมุดายที่แตกต่างกัน จากกราฟจะเห็นได้ว่า ชนิดของสารหล่อลื่นที่ให้ค่าแรงอัดขึ้นรูปจากมากไปหาน้อย คือ ไม่ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันแร่ และมุดายที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันจากมากไปหาน้อย คือ มุดาย

30 องศา มุมคาย 25 องศา และมุมคาย 20 องศา สามารถสรุปได้ว่าสารหล่อลื่นและมุมคายมีผลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปซึ่งสารหล่อลื่นที่มีค่าต่ำสุด คือ น้ำมันแร่ที่มุมคาย 20 องศา ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 64.02 kN

2) แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 2011 (A1 2011) แสดงดังภาพที่ 4.2

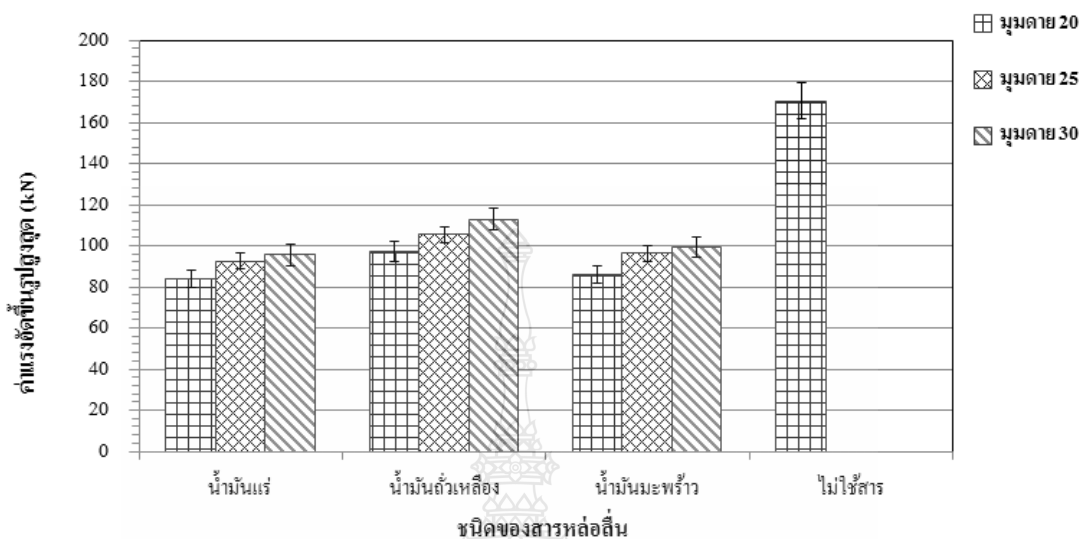


ภาพที่ 4.2 แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 2011

จากภาพที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงถึงแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 2011 โดยใช้สารหล่อลื่นที่แตกต่างกัน และมุมคายที่แตกต่างกัน จากกราฟจะเห็นได้ว่า ชนิดของสารหล่อลื่นที่ให้ค่าแรงอัดขึ้นรูปจากมากไปหาน้อย คือ ไม่ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันแร่ และมุมคายที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันจากมากไปหาน้อย คือ มุมคาย 30 องศา มุมคาย 25 องศา และมุมคาย 20 องศา สามารถสรุปได้ว่าสารหล่อลื่นและมุมคายมีผลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปซึ่งสารหล่อลื่นที่มีค่าต่ำสุด คือ น้ำมันแร่ที่มุมคาย 20 องศา ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 75.70 kN



### 3) แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 6063 (A1 6063) แสดงดังภาพที่ 4.3



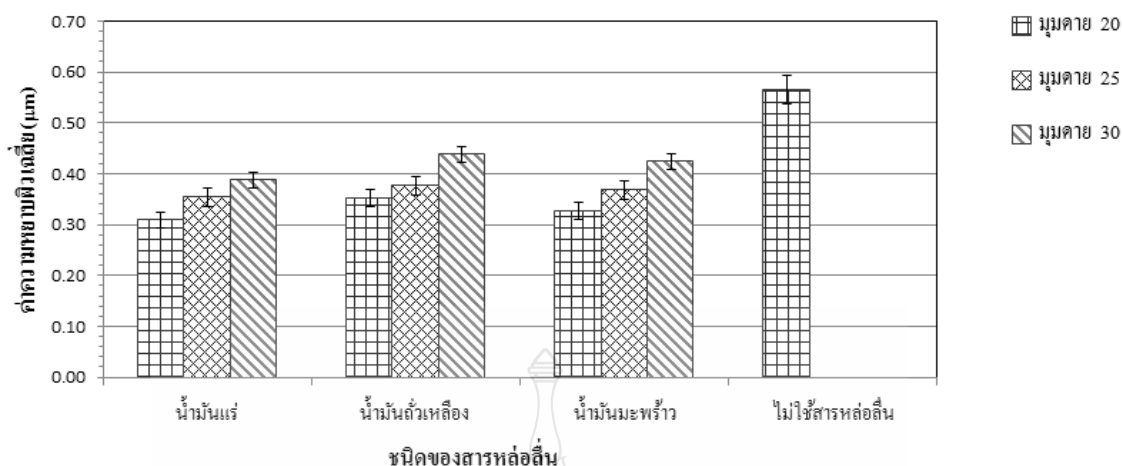
ภาพที่ 4.3 แรงในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 6063

จากภาพที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงถึงแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม เกรด 6063 โดยใช้สารหล่อลื่นที่แตกต่างกัน และมอดายที่แตกต่างกัน จากกราฟจะเห็นได้ว่า ชนิดของสารหล่อลื่นที่ให้ค่าแรงอัดขึ้นรูปจากมากไปหาน้อย คือ ไม่ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันแร่ และมอดายที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันจากมากไปหาน้อย คือ มอดาย 30 องศา มอดาย 25 องศา และมอดาย 20 องศา สามารถสรุปได้ว่าสารหล่อลื่นและมอดายมีผลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปซึ่งสารหล่อลื่นที่มีค่าต่ำสุด คือ น้ำมันแร่ที่มอดาย 20 องศา ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 83.74 kN.

#### 4.1.2 ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูป

ความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูปมีส่วนสำคัญที่จะทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพผิวที่ดี ซึ่งขึ้นอยู่กับสารหล่อลื่นที่ใช้และมอดาย

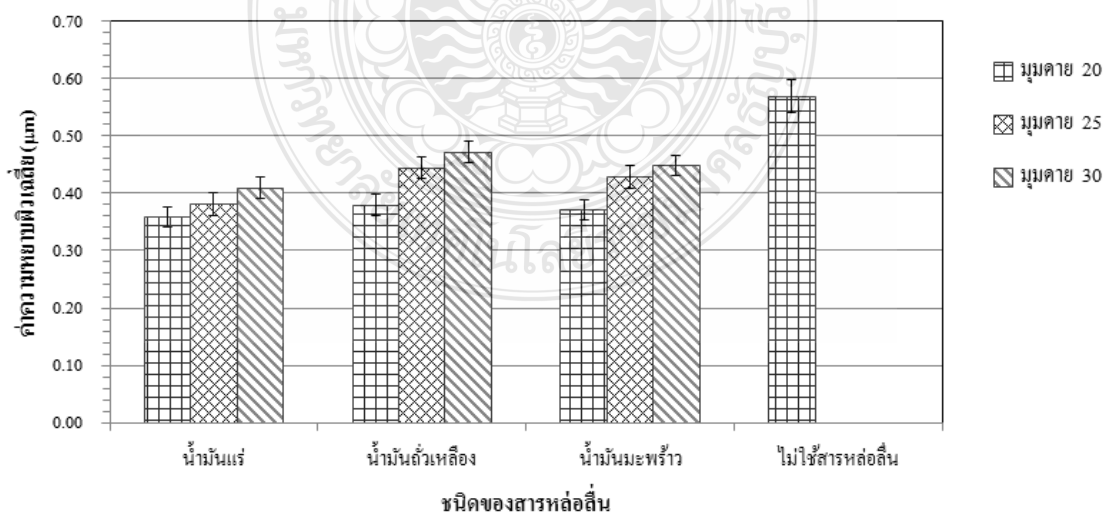
- 1) ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูปของอะลูมิเนียมเกรด 1100 (A1 1100) แสดงดังภาพที่



ภาพที่ 4.4 ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของอะลูมิเนียม (Al 1100)

จากภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกับอิทธิพลของมอดายและสารหล่อลื่น ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าสารหล่อลื่นแต่ละชนิดมีค่าความหยาบผิวที่แตกต่างกัน สารหล่อลื่นที่ให้ค่าความหยาบผิวจากมากไปน้อยดังนี้ คือ ไม่ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันแร่ จากค่าความหยาบผิวของแต่ละสารหล่อลื่นจะเห็นได้ยิ่งกว่ามอดายที่ให้ค่าความหยาบผิวสูงสุด คือ มอดาย 30 องศา ถัดลงมาจะเป็น มอดาย 25 องศา และมอดายที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ มอดาย 20 องศา ใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.31 µm.

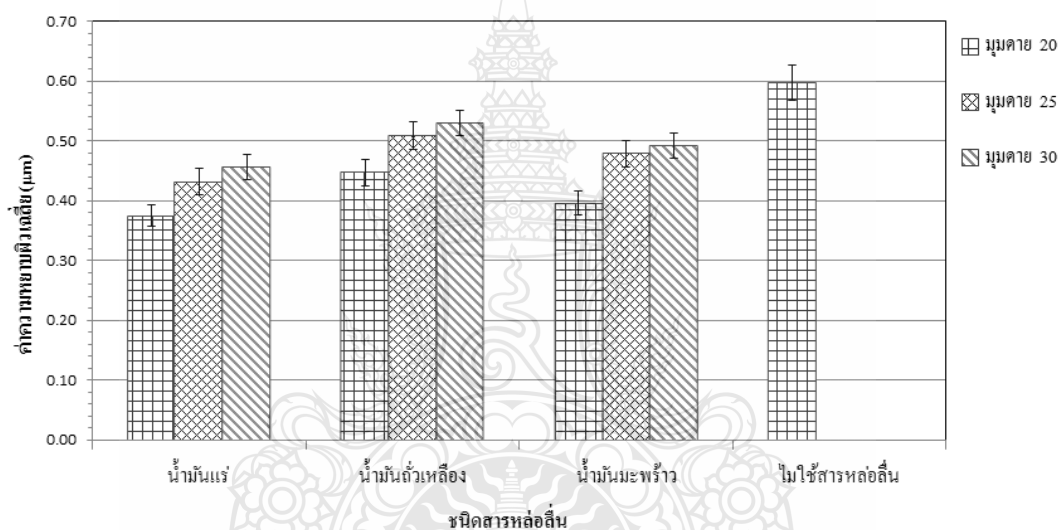
2) ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูปของอะลูมิเนียมเกรด 2011 (Al 2011) แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของอะลูมิเนียม (Al 2011)

จากภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกับอิทธิพลของมูมคายและสารหล่อลื่น ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าสารหล่อลื่นแต่ละชนิดมีค่าความหยาบผิวที่แตกต่างกัน สารหล่อลื่นที่ให้ค่าความหยาบผิวจากมากไปน้อยดังนี้ คือ ไม่ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันแร่ จากค่าความหยาบผิวของแต่ละสารหล่อลื่นจะเห็นได้อีกว่ามูมคายที่ให้ค่าความหยาบผิวสูงสุด คือ มูมคาย 30 องศา ถัดลงมาจะเป็น มูมคาย 25 องศา และมูมคายที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ มูมคาย 20 องศา ใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ซึ่งมีค่าอยู่ที่  $0.36 \mu\text{m}$

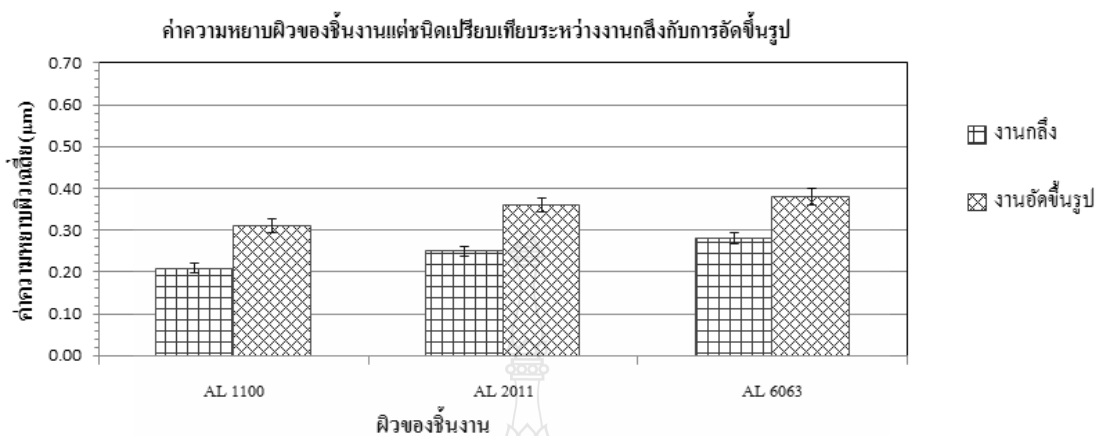
3) ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูปของอะลูมิเนียมเกรด 6063 (Al 6063) แสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของอะลูมิเนียม (Al 6063)

จากภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวเฉลี่ยกับอิทธิพลของมูมคายและสารหล่อลื่น ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าสารหล่อลื่นแต่ละชนิดมีค่าความหยาบผิวที่แตกต่างกัน สารหล่อลื่นที่ให้ค่าความหยาบผิวจากมากไปน้อยดังนี้ คือ ไม่ใช้สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันแร่ จากค่าความหยาบผิวของแต่ละสารหล่อลื่นจะเห็นได้อีกว่ามูมคายที่ให้ค่าความหยาบผิวสูงสุด คือ มูมคาย 30 องศา ถัดลงมาจะเป็น มูมคาย 25 องศา และมูมคายที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ มูมคาย 20 องศา ใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ ซึ่งมีค่าอยู่ที่  $0.38 \mu\text{m}$ .

4) ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับงานกลึง CNC แสดงดังภาพที่ 4.7

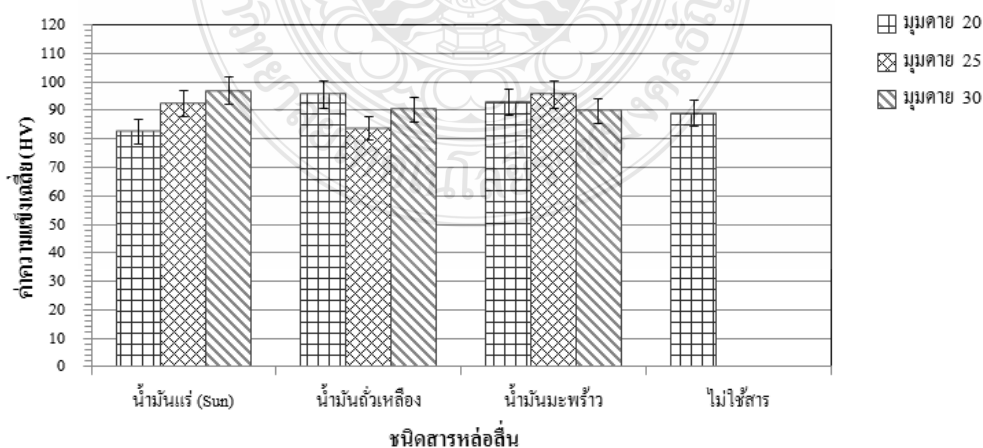


ภาพที่ 4.7 ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับงานกลึง CNC

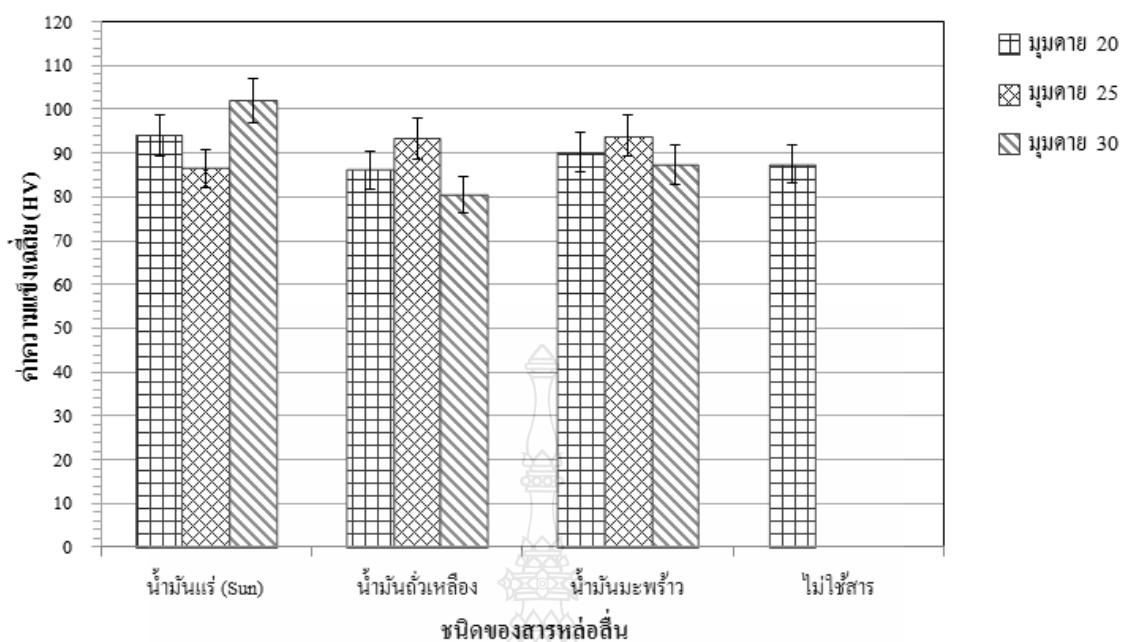
จากภาพที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยระหว่างการอัดขึ้นรูปเป็นแบบไหลตามและงานกลึงด้วย CNC จะเห็นได้ว่าผิวของงานกลึงด้วย CNC มีค่าความหยาบผิวที่ดีกว่า ซึ่งที่อะลูมิเนียมเกรด 1100 เท่ากับ  $0.21 \mu\text{m}$  อะลูมิเนียมเกรด 2011 เท่ากับ  $0.25 \mu\text{m}$  และอะลูมิเนียมเกรด 6063 เท่ากับ  $0.28 \mu\text{m}$

#### 4.1.3 ค่าความแข็งในเนื้อชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูป

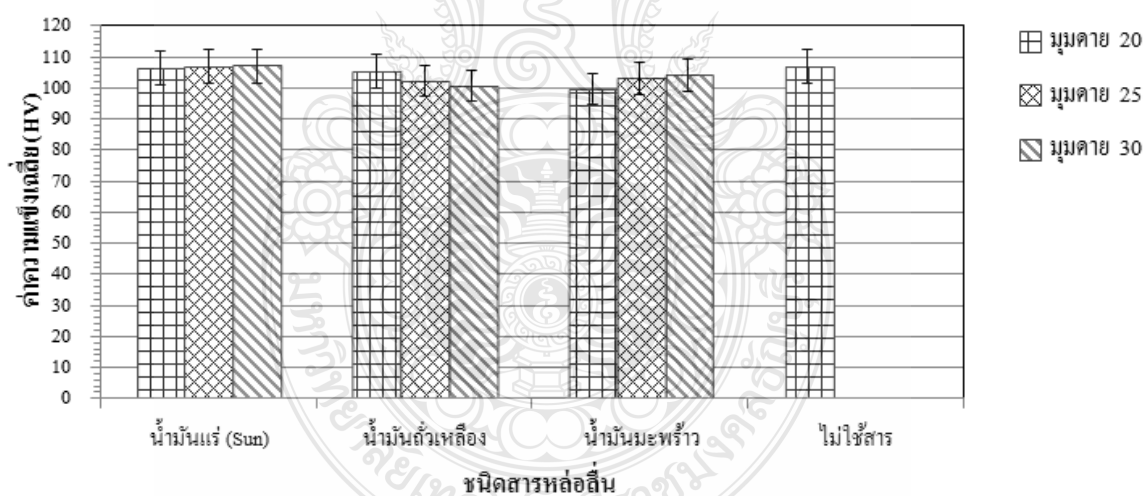
นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเป็น เมื่อผ่าชิ้นงานเสร็จแล้วนำมาทำการวัดความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ได้ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งอะลูมิเนียมเกรด 1100



ภาพที่ 4.9 ผลการทดสอบความแข็งแรงอะลูมิเนียม เกรด 2011

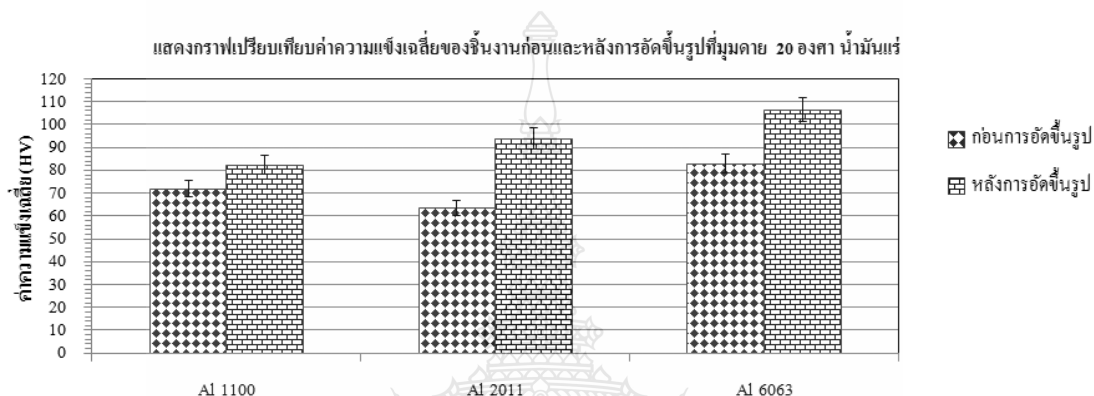


ภาพที่ 4.10 ผลการทดสอบความแข็งแรงอะลูมิเนียม เกรด 6063

จากภาพที่ 4.8 ถึง 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารหล่อลื่นและมุมคายที่ใช้ต่อค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมทั้ง 3 เกรด จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของมุมคายและสารหล่อลื่นไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงที่เกิดขึ้นของอะลูมิเนียมทั้ง 3 เกรด ทั้งนี้ในรายงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ได้หาข้อมูลมา ก็มีได้มีการพูดถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนการอัดขึ้นรูป แต่จาก

ผลที่ได้ทดสอบค่าความแข็งในเนื้ออะลูมิเนียมทั้ง 3 เกรด เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 3 กราฟ จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน คือ อะลูมิเนียมเกรด 1100 ใช้สารหล่อลื่นน้ำมันแร่ที่มุดคาย 20 องศา

1) แสดงผลเปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานก่อนและหลังการอัดขึ้นรูปที่มุดคาย 20 องศา น้ำมันแร่ของอะลูมิเนียมทั้ง 3 เกรด แสดงดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังการอัดขึ้นรูป

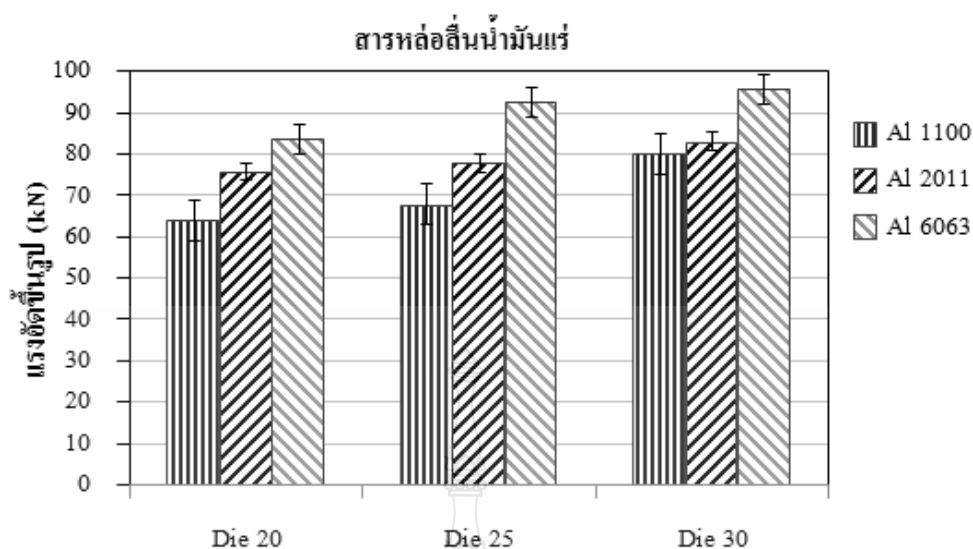
จากภาพที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานก่อนและหลังการอัดขึ้นรูปเขียนแบบไหลตาม จะเห็นได้ว่าชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่อะลูมิเนียมเกรด 1100 เท่ากับ 82.54 HV อะลูมิเนียมเกรด 2011 เท่ากับ 94.11 HV และอะลูมิเนียมเกรด 6063 เท่ากับ 106.39 HV

## 4.2 วิเคราะห์ผล

จากผลการทดลองในแต่ละตัวแปร นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์แรงอัดขึ้นรูป ค่าความหยาบผิว ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปและ โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปดังแสดงดังต่อไปนี้

### 4.2.1 วิเคราะห์แรงอัดขึ้นรูปเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุและมุดคายที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้นั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้สารหล่อลื่นเป็นน้ำมันแร่ให้แรงที่ต่ำที่สุดของแต่ละวัสดุ จึงสามารถนำมาวิเคราะห์ว่าวัสดุชนิดใดใช้แรงในการอัดขึ้นรูปน้อยที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.12

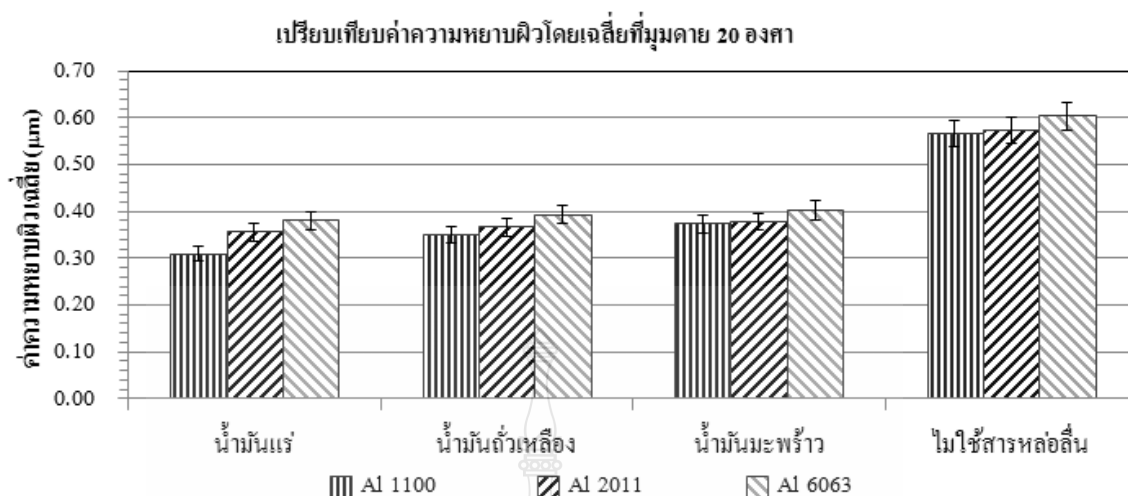


**ภาพที่ 4.12** การวิเคราะห์ผลแรงอัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น

จากภาพที่ 4.12 กราฟแสดงอิทธิพลของมุมตายและชนิดของวัสดุที่ส่งผลต่อแรงอัดขึ้นรูป จากกราฟแสดงให้เห็นได้ว่า อะลูมิเนียมที่ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปน้อยที่สุดของแต่ละมุมตาย คือ อะลูมิเนียม เกรด 1100 (Al 1100) เนื่องจากอะลูมิเนียมเกรด 1100 อยู่ในกลุ่มของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ จึงมีความเหนียวและความยืดหยุ่น ซึ่งเหมาะกับการนำไปทำการขึ้นรูป [4] และจะเห็นได้ว่ามุมตายที่แตกต่างกันก็มีผลต่อแรงอัดขึ้นรูปเช่นเดียวกัน ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าที่อะลูมิเนียมเกรด 1100 ที่มุมตาย 20 องศา จะใช้แรงอัดขึ้นรูปน้อยที่สุด เพราะถ้ายังมีมุมตายนี้อีกจะทำให้เกิดบริเวณชิ้นงานไม่เกิดการไหลตัว (Dead-Metal Zone) มีมาก ซึ่งทำให้ต้องใช้แรงอัดขึ้นรูปสูงขึ้น [2, 10]

#### 4.2.2 วิเคราะห์ความหยาบผิวของชิ้นงาน

จากกราฟผลการทดลองเบื้องต้นจะเห็นว่าที่มุมตาย 20 องศา จะให้ค่าความหยาบผิวมีค่าต่ำของแต่ละสารหล่อลื่นที่ใช้เป็นตัวแปรในการอัดขึ้นรูป ดังนั้นจึงนำข้อมูลของมุมตาย 20 องศา ของแต่ละสารหล่อลื่นมาทำการวิเคราะห์หาสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติเหมาะต่อการอัดขึ้นรูปให้ค่าความหยาบผิวต่ำและชนิดของอะลูมิเนียมด้วย แสดงดังภาพที่ 4.13



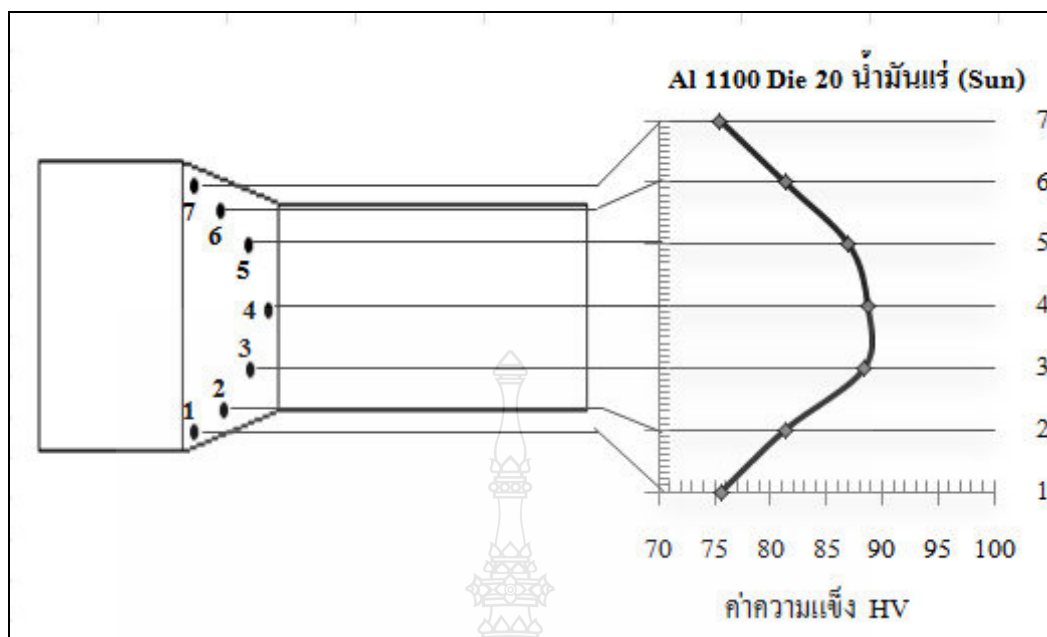
ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่มุมคาย 20 องศา

จากภาพที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวที่มุมคาย 20 องศา จากกราฟจะเห็นได้ว่าชนิดของอะลูมิเนียมและชนิดของสารหล่อลื่นมีผลต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งจากภาพสารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันแร่จะให้ค่าความหยาบผิวดำที่สุด ในสารหล่อลื่นที่ใช้ทั้งหมด ซึ่งที่อะลูมิเนียมเกรด 1100 เท่ากับ  $0.31 \mu\text{m}$  อะลูมิเนียมเกรด 2011 เท่ากับ  $0.36 \mu\text{m}$  และอะลูมิเนียมเกรด 6063 เท่ากับ  $0.38 \mu\text{m}$  เพราะที่มุมคาย 20 องศา ให้ค่าความหยาบผิวที่ดีกว่ายิ่งถ้าที่มุมคายมีค่าสูงขึ้นจะยิ่งทำให้วัสดุไหลตัวได้ไม่ดี อะลูมิเนียมเกรด 1100 ซึ่งใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นทำให้ค่าความหยาบผิวมีค่าต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ  $0.31 \mu\text{m}$  เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับไม่ใช้สารหล่อลื่น

#### 4.2.3 วิเคราะห์ความแข็งของเนื้อชิ้นงาน

จากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปเบื้องต้นนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งมีค่าที่ต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของอะลูมิเนียมด้วย ดังนั้นจึงเลือกข้อมูล อะลูมิเนียมเกรด 1100 มุมคาย 20 องศา ที่ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นของชิ้นงานที่วิเคราะห์เบื้องต้น มาแสดงในกราฟวิเคราะห์ความแข็งของแต่ละจุดในเนื้อชิ้นงาน โดยแสดงจุดวัด 7 จุด แสดงดังภาพที่ 4.14





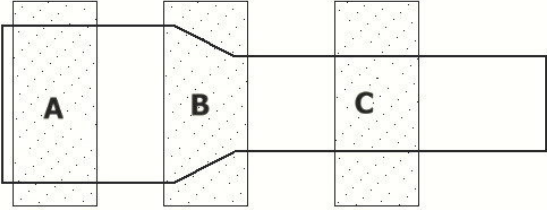
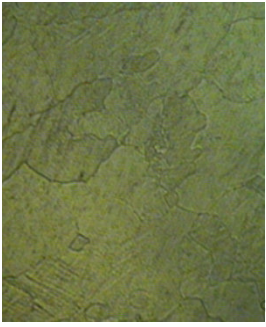
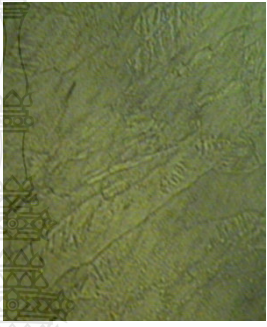






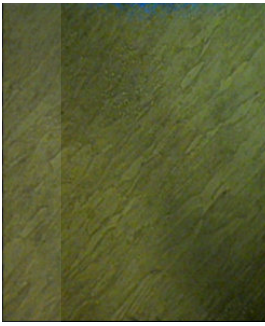
ภาพที่ 4.14 ค่าความแข็งแต่ละจุดที่วัดในเนื้อชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งแต่ละจุดที่วัดบนชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูป พบได้ว่าบริเวณใกล้ผิวชิ้นงาน จุดที่ 1 และ 7 มีค่าความแข็งน้อยกว่าในเนื้อชิ้นงานซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอัดขึ้นรูปจะทำให้ความแข็งภายในกึ่งกลางชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากโครงสร้างภายในแท่งอะลูมิเนียมบริเวณที่สัมผัสกับด้าย เกิดการอัดตัวและเปลี่ยนรูปร่างไปจากเดิม แต่โครงสร้างภายในแท่งอะลูมิเนียมที่บีบอัดมากขณะไหลผ่านด้าย จึงทำให้ความแข็งมีค่ามากขึ้นตาม เนื่องจากเกิดการกดอัดในทุกทิศทาง จึงทำให้มีความหนาแน่นที่เกิดบริเวณกึ่งกลางจุดที่ 3, 4 และ 5 เพิ่มขึ้นและเป็นผลให้ความแข็งเนื้อชิ้นงานบริเวณกึ่งกลางด้านในมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย[18]

#### 4.2.4 วิเคราะห์โครงสร้างมหภาค

การตรวจสอบดูโครงสร้างมหภาคเป็นการศึกษาดูการไหลตัวของวัสดุและการเปลี่ยนแปลงของเกรนที่แตกต่างกันออกไปของแต่ละมุมด้าย ดังนั้นจึงเลือกข้อมูลของอะลูมิเนียมเกรด 1100 ที่ใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการไหลตัวของโครงสร้างที่มุดคายต่างกันของน้ำมันแร่

ชนิดสารหล่อ ลื่นของแต่ละ มุดคาย	ลักษณะ ชั้นงาน			
	A	B	C	
น้ำมันแร่ มุดคาย 20 องศา				
น้ำมันแร่ มุดคาย 25 องศา				
น้ำมันแร่ มุดคาย 30 องศา				

จากตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบลักษณะการบีบอัดตัวของเกรน จากการอัดขึ้นเป็นรูปแบบไหลตามอะลูมิเนียม A1 1100 ด้วยใช้มุดคาย 30, 25 และ 20 องศา จะเห็นได้ว่าลักษณะของขอบเกรนในช่วงก่อนการอัดขึ้นรูป (A) จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของเกรนที่เป็นรูปร่างชัดเจน เมื่อทำการอัดขึ้นรูปที่มีลักษณะคอคอด (B) เนื้อโลหะจะไหลตัวผ่านบริเวณคอคอดทำให้เกิดการบีบอัดของเกรน

และช่วง (C) เป็นช่วงที่ชิ้นงานเปลี่ยนรูปมีขนาดเล็กจะสังเกตเห็นลักษณะของเกรนจะบีบอัดกันมีขนาดเล็กแต่ความยาวในแนวแกนที่ยาวมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการไหลตัวของชิ้นงานโดยใช้คายที่มีมุม 30, 25 และ 20 องศา จากรูปจะเห็นว่ามุมคาย 20 องศา จะทำให้การไหลตัวของเนื้อโลหะได้ดีกว่ามุมคาย 25 องศา และ 30 องศา ตามลำดับ สังเกตจากรูปในแต่ละช่วงของการไหลตัว จะเห็นว่า ลักษณะการบีบอัดตัวของเกรนจะมีขนาดที่ต่างกัน ชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปเย็นด้วยมุมคาย 20 องศา จะมีขนาดขอบเกรนใหญ่กว่าชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปเย็นด้วยมุมคาย 25 องศา และ 30 องศา ดังนั้นแสดงว่ามุมคายมีผลต่อการไหลตัวของชิ้นงาน ในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

#### 4.2.5 วิเคราะห์ต้นทุนในการผลิต

ในกระบวนการผลิตหนึ่งๆ นั้นต้องประกอบด้วยปัจจัยหลายๆ อย่างไม่ว่าจะเป็นค่าใช้จ่ายวัสดุ ค่าจ้างแรงงาน ค่าเครื่องมือเครื่องจักร ค่าน้ำค่าไฟและค่าอื่นๆ อีก ดังนั้นการผลิตที่ดีนั้นต้องใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำให้ผลผลิตที่สูง จากการคำนวณต้นทุนเครื่องมือและผลผลิตในบทที่ 3 จึงสามารถนำมาเปรียบเทียบหาวิธีการผลิตที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยและให้ผลผลิตสูง และผลผลิตระหว่างการอัดขึ้นรูปและการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC แสดงให้เห็นได้ว่าการผลิตต่อชั่วโมงการอัดขึ้นรูปสามารถผลิตได้เยอะกว่าการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC เพราะจากกระบวนการอัดขึ้นรูปสามารถนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ใส่แม่พิมพ์แล้วทำการอัดขึ้นรูปได้เลย แต่กระบวนการกลึงขึ้นรูปต้องมีการนำชิ้นงานเข้าเครื่องแล้วทำการยึดชิ้นงานให้แน่นและอื่นๆ อีกตามกระบวนการผลิต กว่าที่จะได้ผลผลิตชิ้นหนึ่งอาจใช้เวลามากกว่าการอัดขึ้นรูปจึงทำให้ความสามารถในการผลิตต่อวันนั้นผลิตชิ้นงานออกมาได้น้อยกว่าวิธีการอัดขึ้นรูปจึงส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่อชิ้นมีต้นทุนที่สูงกว่ากระบวนการอัดขึ้นรูป ดังผลการเปรียบเทียบจากตารางที่ 4.2 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบต้นทุนและผลผลิตระหว่างการอัดขึ้นรูปและการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC

วิธีการผลิต	การอัดขึ้นรูป	การกลึงโดยเครื่องจักร CNC
ผลผลิตและค่าใช้จ่าย		
ผลผลิตที่ได้ต่อชั่วโมง	120 ชิ้น	66 ชิ้น
ค่าใช้จ่ายแรงงานในการผลิต 5,000 ชิ้น	1,563 บาท	2,840.9 บาท
ต้นทุนในการผลิตต่อชิ้นงาน	3.31 บาท	17.16 บาท

### 1) กำลังการผลิตต่อวัน

ในกระบวนการผลิตที่มีความต้องการชิ้นงานที่มีการผลิตจำนวนมากต่อวันกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามนั้นมีความสามารถในการผลิตได้ดีกว่าการผลิตชิ้นงานแบบเดิมนั้นก็คือ การผลิตโดยวิธีการตัดเฉือนเนื้อวัสดุโดยในการผลิตที่มีการผลิต ชิ้นต่อวัน กรรมวิธีการผลิตแบบตัดเฉือน จะไม่สามารถรองรับการผลิตชิ้นส่วนที่มีความต้องการจำนวนมากได้ ภายในเวลาที่จำกัด ดังผลการเปรียบเทียบจากตารางที่ 4.3 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นและต่อชั่วโมง

วัสดุ	เวลาใช้ผลิตและกำลังผลิต	เวลาที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้น		กำลังการผลิตต่อวัน (8ชม.)	
		การปั๊มอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม	การกลึงด้วย CNC	การปั๊มอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม	การกลึงด้วย CNC
Al 1100		20 sec	55 sec	1,440 ชิ้น	524 ชิ้น
Al 2011		20 sec	55 sec	1,440 ชิ้น	524 ชิ้น
Al 6063		20 sec	55 sec	1,440 ชิ้น	524 ชิ้น

จากตารางจะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นและกำลังการผลิตที่ผลิตได้ต่อวันของกระบวนการปั๊มอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC ทั้งเวลาที่ใช้ในการผลิตและกำลังการผลิตที่ได้จะดีกว่า และเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อัตราการผลิตของกระบวนการปั๊มอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามจะมากกว่า 63.6 % ของกำลังการผลิตต่อวัน

### 2) ต้นทุนวัสดุอะลูมิเนียมที่สั่งซื้อใช้ในกระบวนการการผลิต

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนจำเป็นต้องมีต้นทุนการผลิตของวัสดุที่ใช้ในการผลิตซึ่งแต่ละประเภทจะมีราคาที่แตกต่างกัน ตามคุณสมบัติของวัสดุตลอดจนความสามารถในการใช้งาน โดยจะส่งผลต่อราคาการผลิตของชิ้นงานตามไปด้วย โดยการแสดงเปรียบเทียบต้นทุนในการซื้อวัสดุอะลูมิเนียมของแต่ละประเภทที่ใช้ในการผลิตของกระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC และกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามนั้น จะเห็นได้ว่าการใช้ต้นทุนในการสั่งซื้อวัสดุจะมีราคาที่แตกต่างกันดังผลตามตารางที่ 4.4 ด้านล่างนี้

#### ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบราคาในการสั่งซื้อวัสดุอะลูมิเนียมที่ใช้ในกระบวนการผลิต

เปรียบเทียบราคาวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่ 5,000 ชิ้น			
วัสดุ	ราคาอะลูมิเนียม	การปั๊มอัดขึ้นรูป	การกลึงด้วย CNC
AI 1100	400 บาท (6 ม.)	13,200 บาท (198 ม.)	18,000 บาท (270 ม.)
AI 2011	960 บาท (5 ม.)	38,400 บาท (200 ม.)	52,800 บาท (275 ม.)
AI 6063	1,000 บาท (6 ม.)	33,000 บาท (198 ม.)	45,000 บาท (270 ม.)

จากตารางจะเห็นได้ว่าราคาวัสดุที่ใช้ในการผลิตที่ 5,000 ชิ้น ของกระบวนการปั๊มอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC ค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุที่ใช้ในการผลิตจะน้อยกว่า และเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยจะมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าคือ AI 1100 เท่ากับ 26.7 % AI 2011 เท่ากับ 27.3 % AI 6063 เท่ากับ 26.7 %

#### 3) ค่าแรงที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นที่ปริมาณการผลิต 5,000 ชิ้น

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนจำเป็นต้องมีต้นทุนด้านแรงงานที่ใช้ในการผลิตเข้ามาเป็นส่วนสำคัญของการผลิต โดยจะส่งผลต่อราคาการผลิตของชิ้นงานตามไปด้วย โดยเมื่อมีการผลิตจำนวนมากๆ ก็ต้องใช้เวลาการผลิตมาก ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านแรงงานเพิ่มมากขึ้นด้วย จากกรรมวิธีการผลิตของกระบวนการปั๊มอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามและกระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC จะเห็นได้ว่าค่าแรงที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่อชิ้น ทั้ง 2 กระบวนการจะแตกต่างกัน ดังผลการเปรียบเทียบตามตารางที่ 4.5 ด้านล่างนี้

#### ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าแรงที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นที่ปริมาณการผลิต 5,000 ชิ้น

กรรมวิธีการผลิต	ค่าแรง	กำลังการผลิต	ค่าแรงต่อชิ้น	กำลังการผลิตที่ 5,000 ชิ้น
	ต่อชั่วโมง	ต่อชิ้น		
การปั๊มอัดขึ้นรูป	37.5 บาท	120 ชิ้น	0.31 บาท	1,550 บาท
การกลึงด้วย CNC	37.5 บาท	66 ชิ้น	0.57 บาท	2,850 บาท

จะเห็นได้ว่าค่าแรงที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นของกระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC จะใช้ค่าแรงเท่ากับ 0.57 บาท/ชิ้น กระบวนการปั๊มอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามจะใช้ค่าแรงเท่ากับ 0.31 บาท/ชิ้น การผลิตชิ้นส่วนทั้ง 2 กระบวนการจะเห็นได้ว่ากระบวนการปั๊มอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม ที่กำลังการผลิตจำนวน 5,000 ชิ้น ค่าแรงที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นลดลง 45.6 %

#### 4) ปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียเนื้อวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต

จากกรรมวิธีการผลิตของกระบวนการป้อนอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามและกระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC จะเห็นได้ว่ากระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC นั้น ปริมาณการสูญเสียเนื้อวัสดุจะมีการสูญเสียเนื้อวัสดุมากกว่ากระบวนการป้อนอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม ซึ่งการตัดเฉือนเนื้อโลหะนั้นจะก่อให้เกิดมีการสูญเสียเนื้อวัสดุ อีกทั้งก่อให้เกิดการสูญเสียความแข็งแรงทางโครงสร้างของวัสดุอีกด้วย ดังผลการเปรียบเทียบตามตารางที่ 4.6 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียเนื้อวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต

วัสดุ	น้ำหนักก่อนการผลิต (กรัม)		น้ำหนักก่อนการผลิต (กรัม)		น้ำหนักที่สูญเสียที่กำลังการผลิต 5,000 ชิ้น (Kg.)
	การป้อนอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม	การกลึงด้วย CNC	การป้อนอัดขึ้นรูปแบบไหลตาม	การกลึงด้วย CNC	
Al 1100	20.25 กรัม	30.07 กรัม	20.25 กรัม	20.97 กรัม	45.60 Kg.
Al 2011	20.54 กรัม	30.36 กรัม	20.54 กรัม	21.25 กรัม	45.55 Kg.
Al 6063	20.45 กรัม	30.28 กรัม	20.45 กรัม	21.16 กรัม	45.50 Kg.

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเนื้อวัสดุที่ใช้ในการผลิตของกระบวนการป้อนอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม จะไม่มีการสูญเสียเนื้อวัสดุหลังการขึ้นรูป แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC จะพบว่ามีการสูญเสียเนื้อวัสดุหลังการผลิต และเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนและหลังการผลิตพบว่า กระบวนการป้อนอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม ใช้วัสดุที่น้ำหนักน้อยกว่ากระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC ดังนี้ Al 1100 เท่ากับ 30.26 % Al 2011 เท่ากับ 30.00 % Al 6063 เท่ากับ 30.10 %

#### 5) เปรียบเทียบราคาวัสดุที่สูญเสียเนื้อวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต

จากกรรมวิธีการผลิตของกระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC จะเห็นได้ว่ากระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC นั้น ปริมาณการสูญเสียเนื้อวัสดุจะมีการสูญเสียเนื้อวัสดุมากกว่ากระบวนการป้อนอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม ซึ่งการตัดเฉือนเนื้อโลหะนั้นจะทำให้มีการสูญเสียเนื้อวัสดุเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังการขึ้นรูปแล้วนำมาคิดเป็นจำนวนเงินต่อวัสดุที่สูญเสียไปที่กำลังการผลิต 5,000 ชิ้น ดังผลการเปรียบเทียบตามตารางที่ 4.7 ด้านล่างนี้

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบราคาวัสดุที่สูญเสียเนื้อวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต

วัสดุ	ราคาต่อวัสดุ (บาทต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสูญเสีย เนื้อวัสดุที่ 5,000 ชิ้น (Kg.)	น้ำหนักที่สูญเสียคิด เป็นจำนวนเงิน (บาท)
AI 1100	122	45.60	5,563
AI 2011	339	45.55	15,441
AI 6063	280	45.50	12,740

จากตารางจะเห็นได้ว่ากระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC ด้วยวัสดุ AI 1100 มีน้ำหนักที่สูญเสียเมื่อเปรียบเทียบเป็นจำนวนเงินแล้วเท่ากับ 5,563 บาท AI 2011 เท่ากับ 15,441 บาท AI 6063 เท่ากับ 12,740 บาท จะเห็นได้ว่าวัสดุที่ใช้ในการผลิตมีมูลค่าสูง จะพบว่ากระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC จะก่อให้เกิดการสูญเสียค่าใช้จ่ายในด้านวัสดุเพิ่มขึ้นอีกด้วย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเพื่อศึกษาถึงปัจจัยและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามแท่งอะลูมิเนียมในประเทศไทย เป็นการอัดขึ้นรูปเย็น และทำการศึกษาการอัดขึ้นรูปที่มุมคาย 20 25 และ 30 องศาตามลำดับ โดยใช้อะลูมิเนียม เกรด 1100 2011 และ 6063 ในการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง پرسไฮดรอลิกส์ ขนาด 80 ตัน ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ โดยใช้สารหล่อลื่น 3 ชนิด คือน้ำมันแร่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว และไม่ใช้สารหล่อลื่นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผล

จากผลการวิจัยและการทดลองเราจะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการทดลองอัดขึ้นรูปเย็นชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียมเกรด 1100 อะลูมิเนียมเกรด 2011 และอะลูมิเนียมเกรด 6063 โดยใช้สารหล่อลื่นจากธรรมชาติที่แตกต่างกันนั้น สามารถกล่าวสรุปได้โดยย่อ ดังนี้

5.1.1 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเย็น จากแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเย็นจะสังเกตเห็นได้ว่าชนิดของสารหล่อลื่นและมุมคายมีผลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเย็นอะลูมิเนียม ซึ่งสารหล่อลื่นที่ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปน้อยที่สุด คือน้ำมันแร่ และมุมคายที่ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปน้อยที่สุด คือกุมคาย 20 องศา มีค่าเท่ากับ 64.02 kN เพราะถ้ายังมีมุมคายมีค่ามากก็จะยิ่งทำให้วัสดุไหลตัวได้ยากจึงส่งผลให้ใช้แรงในการอัดขึ้นรูปสูงตามไปด้วย

5.1.2 ค่าความหยาบผิวหลังการอัดขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันแร่จะให้ค่าความหยาบผิวค่าต่ำที่สุดในสารหล่อลื่นที่ใช้ทั้งหมด ซึ่งที่อะลูมิเนียม เกรด 1100 เท่ากับ 0.31  $\mu\text{m}$  อะลูมิเนียม เกรด 2011 เท่ากับ 0.36  $\mu\text{m}$  และอะลูมิเนียม เกรด 6063 เท่ากับ 0.38  $\mu\text{m}$  เพราะที่มุมคาย 20 องศา ให้ค่าความหยาบผิวที่ดีกว่าเพราะถ้าที่ยังมุมคายมีค่าสูงจะยิ่งทำให้วัสดุไหลตัวได้ไม่ดี อะลูมิเนียม เกรด 1100 ซึ่งใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่นทำให้ค่าความหยาบผิวมีค่าต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.31  $\mu\text{m}$  เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้สารหล่อลื่น

5.1.3 ค่าความแข็งของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูป โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเย็นมาทำการวัดความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ เนื่องจากการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามของอะลูมิเนียมแต่ละชนิดใช้แรงในการอัดขึ้นรูปไม่เท่ากัน ซึ่งอะลูมิเนียมเกรดที่มีการไหลตัวได้ดีจะใช้แรงในการอัด



ขึ้นรูปน้อย ส่วนอะลูมิเนียมที่มีการไหลตัวได้ไม่ดี จะต้องใช้แรงในการอัดขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้นจะเห็นได้ว่าแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดค่าความเค้น ความเครียดสูงและมีค่าความแข็งสูงตามไปด้วย ดังนั้นบริเวณที่มีการบีบกดอัดตัวในทุกทิศทาง จึงทำให้ความหนาแน่นที่เกิดบริเวณแกนกลางเพิ่มขึ้นและเป็นผลให้ความแข็งผิวบริเวณด้านในมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย

5.1.4 โครงสร้างการไหลตัว เมื่อเปรียบเทียบการไหลตัวของชิ้นงานโดยใช้คายที่มีมุม 30 25 20 องศา จะเห็นได้ว่ามุมคาย 20 องศา จะทำให้การไหลตัวของเนื้อโลหะได้ดีกว่ามุมคาย 25 และ 30 องศาตามลำดับ สังเกตจากรูปในแต่ละช่วงของการไหลตัว จะเห็นว่าลักษณะการบีบอัดตัวของเกรนจะมีขนาดที่ต่างกัน ชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปเย็นด้วยมุมคาย 20 องศา จะมีขนาดขอบเกรนใหญ่กว่า ชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปเย็นด้วยมุมคาย 25 องศา และ 30 องศา ดังนั้นแสดงว่ามุมคายนี้อาจมีผลต่อการไหลตัวของชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตาม

5.1.5 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิต จากการเปรียบเทียบเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิตจะเห็นว่า การอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิตน้อยกว่ากระบวนการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC อยู่ที่ 13.85 บาท และกระบวนการอัดขึ้นรูปสามารถให้ผลผลิตได้มากกว่าการกลึงด้วยเครื่องจักร CNC เท่ากับ 54 ชิ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าในเวลาเท่าๆ กัน กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบไหลตามสามารถให้ผลผลิตที่มากกว่าการกลึงและต้นทุนในการผลิตต่อชิ้นก็น้อยกว่าการกลึงอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ ก่อนการออกแบบแม่พิมพ์นั้นควรทำการศึกษาวิธีการสร้างแม่พิมพ์ให้เข้าใจก่อนลงมือออกแบบ เพราะจะช่วยในการป้องกันการเกิดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบแม่พิมพ์การประกอบแม่พิมพ์และการติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องเพชรมีความสำคัญมากเช่นกัน ควรประกอบแม่พิมพ์อย่างถูกวิธี เพื่อป้องกันไม่ให้อื่นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายและให้ได้ความแม่นยำของชิ้นงานทดสอบ การสร้างค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบแม่พิมพ์หลายๆตัวนั้นทำให้ผู้ที่ศึกษานั้นมีความรู้ ความเข้าใจที่หลากหลายมากขึ้น อันจะทำให้สามารถนำไปพัฒนาปรับปรุงและแก้ไขให้แม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมามีคุณภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานในระยะแรกอาจจะไม่ตรงตามที่คำนวณไว้เสมอไป ควรทำการลองทดลองซ้ำๆ ไปเรื่อยๆ เพื่อหาจุดบกพร่องปรับปรุงแก้ไข โดยปรับตัวแปรทีละตัวหลายๆค่า เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้วจึงค่อยนำเอาค่าที่ได้นั้นไปทำการทดสอบต่อไปหากเกิดปัญหาที่ยากหรือเกินความสามารถของผู้ที่ศึกษาควรปรึกษาผู้รู้หรือผู้ที่

ประสบการณ์ทางด้านแม่พิมพ์หรืออาจารย์ที่ปรึกษาโครงการโดยทันที และความปลอดภัยในการทดสอบแม่พิมพ์นั้นควรทำอย่างระมัดระวัง เพราะเนื่องจากแม่พิมพ์มีน้ำหนักมาก และอาจเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายในช่วงการประกอบและขั้นตอนการติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องเพรส

5.2.2 การขัดอะลูมิเนียมในขั้นตอนสุดท้ายก่อนการนำไปกัดกรดควรขัดด้วยผ้าสักกะหลาดและใช้ผงขัดเป็นผงเพชรในการขัดเมื่อนำไปส่องด้วยกล้องแล้วไม่เห็นรอยขีดข่วนบนผิวหน้าของชิ้นงานแล้วจึงนำไปกัดกรด

5.2.3 วิธีการกัดกรดเพื่อส่องดูโครงสร้างมหภาคนั้นเนื่องจากอะลูมิเนียมแต่ละชนิดมีส่วนผสมไม่เหมือนกัน จึงต้องใช้อัตราส่วนของกรดแต่ละชนิดที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงไว้ในบทที่ 3

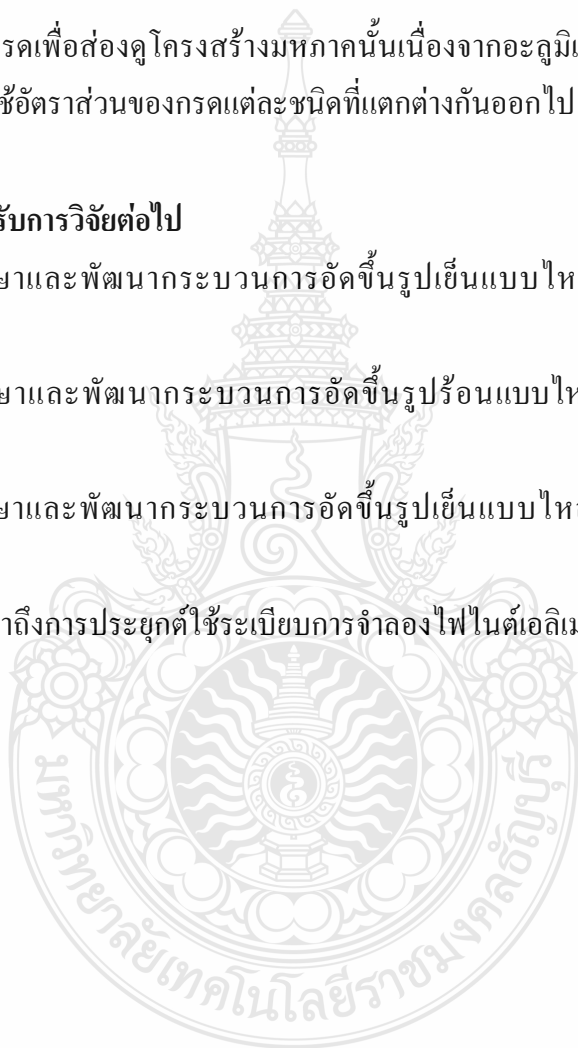
### 5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

5.3.1 ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นแบบไหลทวนแท่งอะลูมิเนียมในประเทศไทย

5.3.2 ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนแบบไหลตามแท่งอะลูมิเนียมในประเทศไทย

5.3.3 ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการอัดขึ้นรูปเป็นแบบไหลตามเหล็กเกรดต่างๆ ในประเทศไทย

5.3.4 ทำการศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ระเบียบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทำการเปรียบเทียบผลกับการทดลองจริง



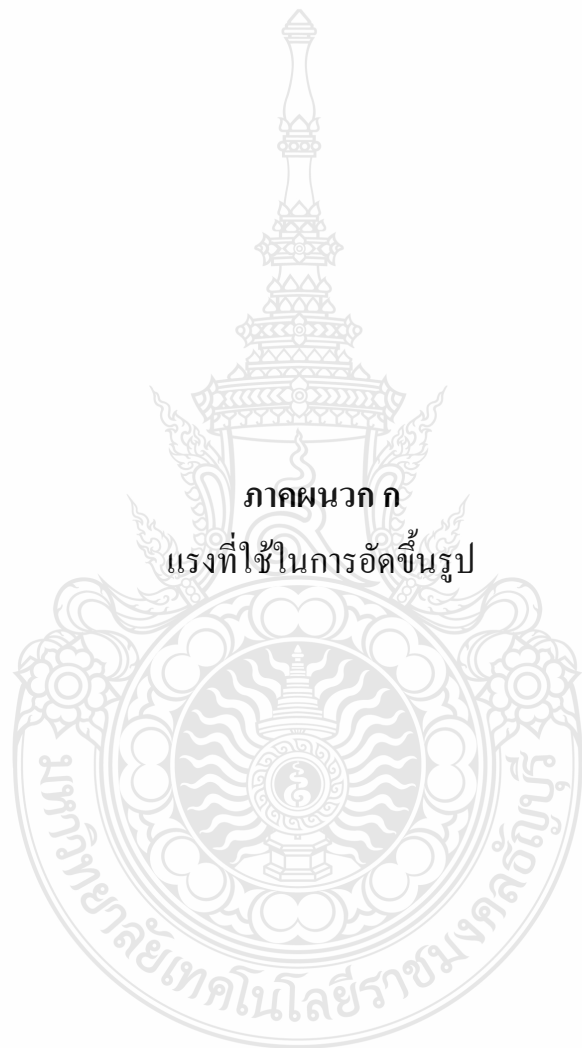
## รายการอ้างอิง

- [1] Kurt Lange, **Handbook of metal forming**. McGraw-Hill The United States of America, McGraw-Hill, 1985. pp. 13.1-13.27.
- [2] ศิริชัย ต่อสกุล และอนุชา วัฒนาภา, **พื้นฐานเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ**. กรุงเทพฯ: วี.พรีนซ์ (1991) จำกัด, 2554.
- [3] ดำรง ไชยธีรานุกูลศิริ, **การขึ้นรูปโลหะ**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538.
- [4] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, **The WebPage Assisted Instruction for Aluminium** (Online), 2000. Available: <http://www.aluminiumlearning.com> (16 ตุลาคม 2555).
- [5] มนัส สติระจินดา, **โลหะนอกกลุ่มเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [6] เกษม ชรรณโกศล, **อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อขึ้นแบบเทอร์โมอิลาสโตไฮดรอลิก**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [7] มานพ ต้นตระกูล, **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม (ฉบับปรับปรุง)**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546.
- [8] นรา บุรีพันธ์, **อิทธิพลของสภาวะการตัดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS 304 ด้วยเลเซอร์ที่มีผลต่อความหยาบผิว**, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [9] มหาวิทยาลัยสุรนารี, **การประมาณต้นทุนของเครื่องมือและผลผลิต** (Online), 2008. Available: [eng.sut.ac.th/me/meold/2\\_2552/435477/Jig/ch06\\_Economics.ppt](http://eng.sut.ac.th/me/meold/2_2552/435477/Jig/ch06_Economics.ppt) (25 กรกฎาคม 2555)
- [10] ธงชัย เฟื่องจันทร์ดี, **อิทธิพลของการขึ้นรูปแผ่นโลหะทองเหลืองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุดโดยการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมเชิงตัวเลข**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.

- [11] S.Syahrullail, C.S.N . Azwadi,Tiong Chiong Ing, “The Metal Flow Evaluation of Billet Extruded with RBD Palm Stearin,” **Journal of International Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.)**, Vol.5, No.1, January 2011. pp. 21-27.
- [12] Dyi-Cheng Chen, Sheng-Kai Syu, Cing-Hong Wu, Sin-Kai Lin, “Investigation into cold extrusion of aluminum billets using three-dimensional finite element method,” **Journal of Materials Processing Technology**, 2007. pp. 188-193.
- [13] Tahir Altinbalik, Onder Ayer, “A theoretical and experimental study for forward extrusion of clover sections,” **Science Direct Materials and Design**, 25 May 2007. pp. 1182-1189.
- [14] J.S. Ajiboye, M.B. Adeyemi, “Effects of die land on the cold extrusion of lead alloy,” **Journal of Materials Processing Technology**, 31 August 2005. pp. 428-436.
- [15] M. Bakhshi-Jooybari, “A theoretical and experimental study of friction in metal forming by the use of the forward extrusion process,” **Journal of Materials Processing Technology**, 2002. pp. 369-374.
- [16] P.Tiernan, M.T. Hilley, B. Draganescu, M.Gheorghe, “Modeling of cold Extrusion with experimental verification ” **Journal of Materials Processing Technology**, 3 February 2005. pp. 360-366.
- [17] S.O. Onuh, M. Ekoja, M.B. Adeyemi, “Effects of die geometry and extrusion speed on the cold extrusion of aluminium and lead alloys,” **Journal of Materials Processing Technology**, 3 February 2005. pp. 274-285.
- [18] สมชัย ดัชนีวิรุฬห์ และคณะ, ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอะลูมิเนียม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก  
แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป

ตารางที่ ก.1 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 1100 มุมคาย 20 องศา

Die 20							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไม้ใช้สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1.14	10.44	1.18	8.29	1.18	9.60	1.04	24.87
2.27	25.65	2.28	20.27	2.28	22.34	2.02	55.88
3.32	34.97	3.30	29.91	3.34	32.47	2.98	77.00
4.37	38.89	4.35	48.32	4.41	44.56	3.99	99.00
5.46	45.06	5.40	63.30	5.54	49.73	5.05	111.69
6.55	48.14	6.43	79.35	6.64	56.71	6.11	114.23
7.69	51.93	7.55	82.99	7.75	60.16	7.24	116.28
8.86	59.38	8.70	84.56	8.90	64.44	8.37	116.76
10.02	64.02	9.86	82.04	10.03	68.08	9.51	114.84
11.23	62.48	11.01	80.31	11.17	69.32	10.64	112.12
12.40	62.3	12.18	76.82	12.30	70.73	11.78	107.79
13.58	62.12	13.34	73.98	13.43	69.98	12.96	102.97
14.76	61.6	14.55	69.77	14.61	68.98	14.15	89.65
15.99	61.59	15.74	68.31	15.80	68.21	15.31	86.48
17.18	61.03	16.96	64.78	16.97	66.47	16.51	83.31
18.38	59.58	18.15	61.49	18.13	65.06	17.65	81.09
19.56	58.82	19.31	59.55	19.29	61.41	18.79	78.24
20.75	56.63	20.46	57.31	20.44	60.48	19.96	76.19
21.93	38.39	21.63	54.80	21.61	58.13	21.1	73.81
23.10	0	22.66	39.69	22.78	21.38	21.56	55.28
-	-	23.44	0	23.76	0	21.73	0

ตารางที่ ก.2 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 1100 มุมคาย 25 องศา

Die 25							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไม้ใช้สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1.09	17.26	1.05	17.27	1.13	12.19	0	0
2.13	33.58	2.09	33.58	2.20	28.98	0	0
3.20	47.67	3.10	52.74	3.25	44.03	0	0
4.30	58.44	4.11	70.01	4.31	53.66	0	0
5.40	63.35	5.23	76.66	5.39	64.38	0	0
6.55	66.52	6.33	81.74	6.45	70.02	0	0
7.69	67.79	7.45	83.51	7.57	73.16	0	0
8.85	67.38	8.60	84.30	8.69	74.54	0	0
10.05	64.78	9.74	86.62	9.84	75.47	0	0
11.23	63.26	10.88	84.45	10.95	76.10	0	0
12.40	57.44	12.03	82.42	12.10	76.28	0	0
13.60	55.38	13.20	78.96	13.28	75.22	0	0
14.79	54.49	14.37	75.50	14.42	74.46	0	0
15.98	52.89	15.59	69.16	15.60	73.84	0	0
17.13	51.86	16.78	63.20	16.78	72.71	0	0
18.35	50.20	18.00	62.20	17.93	70.96	0	0
19.54	48.46	19.14	60.42	19.07	69.85	0	0
20.74	46.40	20.33	54.68	20.24	68.42	0	0
21.91	19.96	21.49	52.46	21.39	66.20	0	0
23.09	15.54	22.62	21.70	22.55	22.81	0	0
24.03	0	23.65	0	23.68	0	0	0



ตารางที่ ก.3 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 1100 มุมคาย 30 องศา

Die 30							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไม้ใช้สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1	6.33	1	3.61	1	6.54	0	0
2	15.12	3	14.82	2	15.94	0	0
3	23.49	4	27.14	4	24.17	0	0
4	34.70	5	44.32	5	35.47	0	0
5	44.91	6	61.09	6	44.33	0	0
8	68.78	8	90.10	8	67.64	0	0
9	78.34	9	98.61	9	78.48	0	0
10	83.06	10	103.99	10	87.67	0	0
11	79.19	11	104.97	11	87.22	0	0
12	76.95	13	104.83	12	87.10	0	0
15	72.02	15	97.87	15	79.11	0	0
16	69.26	16	93.64	16	74.49	0	0
17	67.01	17	88.90	17	68.50	0	0
18	64.80	18	84.75	18	63.07	0	0
21	59.88	21	76.63	21	57.96	0	0
23	55.58	23	69.36	23	53.28	0	0
24	53.05	24	65.60	24	50.83	0	0
26	52.22	26	61.74	26	49.07	0	0
28	51.80	27	55.71	29	42.79	0	0
30	49.03	30	37.26	31	26.37	0	0
33	0	33	0	33	0	0	0

ตารางที่ ก.4 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 2011 มุมคาย 20 องศา

Die 20							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไมใช้สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1.14	12.67	1.12	16.77	1.14	13.94	0.89	32.31
2.22	27.40	2.18	32.60	2.22	31.05	1.79	61.77
3.27	44.35	3.17	49.02	3.25	45.62	2.74	83.79
4.30	59.72	4.18	74.17	4.30	56.86	3.73	99.94
5.34	71.91	5.21	81.56	5.35	64.31	4.77	104.85
6.48	74.59	6.29	89.81	6.47	68.42	5.89	103.27
7.62	75.70	7.42	84.72	7.61	71.60	7.00	99.63
8.76	75.59	8.53	84.63	8.71	75.55	8.13	94.40
9.93	75.66	9.66	83.06	9.84	78.72	9.28	88.86
11.12	74.60	10.88	79.32	10.95	80.46	10.44	82.84
12.27	72.26	12.12	78.26	12.07	79.67	11.59	78.09
13.45	71.72	13.28	78.14	13.22	79.51	12.78	71.91
14.64	68.89	14.45	74.01	14.41	75.08	14.01	66.52
15.83	67.00	15.34	61.07	15.55	73.49	15.14	61.77
17.04	65.42	16.58	53.39	16.77	71.91	16.32	57.97
18.21	63.68	17.77	50.22	17.92	69.38	17.45	53.38
19.40	61.63	18.93	48.06	19.07	67.64	18.58	49.26
20.51	60.03	20.09	45.12	20.22	66.37	19.76	44.35
21.72	57.81	21.25	44.84	21.36	63.83	20.94	41.97
22.89	19.96	22.42	42.71	22.53	22.81	22.08	0.00
24.02	0	23.13	0.00	23.61	0.00	-	-

ตารางที่ ก.5 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 2011 มุมคาย 25 องศา

Die 25							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไม้ใช้สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1.06	14.57	1.04	18.37	1.12	10.77	0	0
2.14	31.83	2.05	39.88	2.15	30.73	0	0
3.19	47.20	3.04	59.24	3.23	44.67	0	0
4.27	56.07	4.07	73.52	4.26	59.71	0	0
5.39	61.53	5.16	81.77	5.36	67.05	0	0
6.50	65.62	6.24	92.89	6.47	69.91	0	0
7.63	69.92	7.39	91.48	7.56	72.37	0	0
8.78	77.89	8.52	87.79	8.68	77.60	0	0
9.95	68.91	9.67	84.65	9.84	79.41	0	0
11.10	64.50	10.79	82.19	10.96	83.37	0	0
12.28	62.63	11.92	80.18	12.13	78.36	0	0
13.45	57.81	13.13	78.48	13.23	75.09	0	0
14.67	54.01	14.27	74.53	14.40	73.93	0	0
15.89	52.11	15.51	71.65	15.60	70.08	0	0
17.05	49.89	16.68	69.08	16.78	69.69	0	0
18.24	47.83	17.85	65.50	17.92	67.72	0	0
19.37	45.65	19.02	62.63	19.07	64.41	0	0
20.52	44.51	20.18	57.82	20.24	63.23	0	0
21.69	29.62	21.33	54.91	21.39	59.72	0	0
22.86	0	22.48	35.16	22.54	38.33	0	0
-	-	23.63	0	23.67	0	0	0

ตารางที่ ก.6 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 2011 มุมคาย 30 องศา

Die 30							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไมใช้สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1.18	10.13	1.19	6.85	1.19	4.24	0	0
3.32	46.72	3.42	39.66	3.51	30.53	0	0
4.39	54.62	4.48	60.65	4.56	44.67	0	0
5.42	64.58	5.47	79.12	5.63	56.81	0	0
6.49	73.92	6.50	88.43	6.72	66.90	0	0
7.60	77.40	7.57	95.58	7.81	76.95	0	0
8.72	78.83	8.68	99.80	8.94	81.72	0	0
9.83	78.99	9.78	100.47	10.05	84.27	0	0
10.99	77.53	10.94	99.25	11.17	86.54	0	0
12.18	75.03	12.09	97.18	12.32	87.25	0	0
13.34	74.51	13.24	94.09	13.48	86.52	0	0
14.54	73.01	14.39	92.40	14.63	84.50	0	0
15.68	72.13	15.59	88.33	15.78	81.66	0	0
16.87	71.57	16.75	85.48	16.94	78.97	0	0
18.04	69.34	17.93	82.87	18.14	76.66	0	0
19.26	57.45	19.14	79.45	19.39	72.95	0	0
20.43	52.14	20.37	75.23	20.53	70.44	0	0
21.61	48.08	21.53	72.81	21.71	68.74	0	0
23.94	45.38	23.82	68.44	23.97	65.05	0	0
25.13	38.97	25.00	64.93	25.11	62.94	0	0
27.50	33.58	27.67	59.54	28.20	59.17	0	0
29.53	25.58	29.63	50.58	30.75	51.37	0	0
33.00	0	33.00	0	33.00	0	0	0

ตารางที่ ก.7 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 6063 มุมคาย 20 องศา

Die 20							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไมใช้สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1.09	14.21	1.12	15.68	1.15	9.37	1.09	20.11
2.16	28.30	2.17	36.18	2.18	23.72	1.97	32.09
3.14	47.42	3.18	51.03	3.20	39.36	2.83	52.63
4.20	56.95	4.16	70.48	4.24	55.87	3.67	90.96
5.21	73.06	5.15	82.23	5.30	69.35	4.53	124.23
6.29	82.08	6.24	91.58	6.37	76.10	5.42	154.41
7.42	83.74	7.35	96.13	7.48	81.90	6.33	167.57
8.57	83.33	8.47	96.97	8.58	84.90	7.33	170.49
9.75	82.90	9.63	96.98	9.72	85.93	8.40	170.32
10.91	81.48	10.79	96.89	10.87	83.25	9.50	168.26
12.09	79.10	11.93	93.15	11.99	81.86	10.61	162.71
13.26	78.70	13.10	90.95	13.16	81.45	11.71	156.54
14.45	76.28	14.25	87.74	14.30	78.96	12.84	150.36
15.63	75.11	15.44	84.09	15.50	77.29	13.94	144.50
16.80	74.47	16.61	80.52	17.43	74.16	15.11	135.95
17.97	73.62	17.77	77.35	18.58	71.65	16.29	129.61
19.15	72.26	18.92	74.61	19.72	69.45	17.44	120.43
20.30	68.54	20.05	68.03	20.87	47.15	18.59	112.66
21.47	56.42	21.22	60.50	21.24	27.40	19.75	108.07
22.28	43.72	22.36	46.12	22.39	0	20.90	96.19
23.85	28.85	23.48	34.40	-	-	22.08	88.43
24.03	0	24.33	0	-	-	23.24	39.49
-	-	-	-	-	-	24.38	0

ตารางที่ ก.8 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 6063 มุมคาย 25 องศา

Die 25							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไม้ไผ่สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1.00	19.60	1.04	24.52	1.05	24.48	0	0
2.03	34.18	2.06	46.73	2.05	43.97	0	0
3.01	50.51	2.98	68.49	3.11	56.47	0	0
4.05	64.35	4.03	85.11	4.18	71.48	0	0
5.14	79.80	5.05	95.47	5.21	83.72	0	0
6.24	90.44	6.12	102.14	6.25	89.62	0	0
7.37	92.55	7.23	105.44	7.42	94.69	0	0
8.53	89.17	8.35	101.85	8.55	96.23	0	0
9.68	87.75	9.49	97.08	9.65	92.78	0	0
10.84	83.95	10.63	94.28	10.79	91.87	0	0
12.03	80.30	11.79	91.62	11.93	91.01	0	0
13.17	76.66	12.96	86.60	13.10	89.51	0	0
14.37	73.97	14.12	84.18	14.23	87.75	0	0
15.56	72.07	15.36	79.16	15.43	85.94	0	0
16.75	70.01	16.53	75.77	16.59	83.13	0	0
17.91	67.11	17.71	71.40	17.72	81.98	0	0
19.07	64.78	18.89	68.64	18.87	80.55	0	0
20.25	60.82	20.04	64.43	20.01	74.65	0	0
21.42	45.92	21.23	60.16	21.14	71.07	0	0
22.61	0.00	22.41	21.86	22.30	26.23	0	0
-	-	23.50	0.00	23.00	0.00	0	0

ตารางที่ ก.9 บันทึกค่าแรงอัดขึ้นรูปอะลูมิเนียมเกรด 6063 มุมคาย 30 องศา

Die 30							
น้ำมันแร่		น้ำมันถั่วเหลือง		น้ำมันมะพร้าว		ไม่ใช้สาร	
ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง	ระยะ	แรง
0	0	0	0	0	0	0	0
1.20	7.44	1.18	4.59	1.20	3.73	0	0
2.31	22.13	2.34	20.12	2.41	12.12	0	0
4.39	57.05	4.42	60.03	4.54	46.06	0	0
5.43	68.48	5.43	81.41	5.60	61.99	0	0
6.44	75.87	6.41	97.09	6.68	72.23	0	0
7.53	80.87	7.48	105.33	7.72	85.11	0	0
8.63	87.09	8.57	110.56	8.80	90.17	0	0
9.76	93.51	9.67	112.77	9.93	95.91	0	0
10.91	95.61	10.78	112.58	11.08	98.74	0	0
12.07	95.56	11.95	109.75	12.22	99.20	0	0
14.42	86.49	14.25	103.68	14.49	97.18	0	0
15.61	83.25	15.39	101.05	15.61	94.39	0	0
16.78	80.17	16.57	97.88	16.79	91.74	0	0
17.93	76.08	17.71	95.21	17.92	89.96	0	0
19.17	71.74	18.91	92.80	19.13	88.36	0	0
21.54	60.74	21.26	87.75	21.47	86.61	0	0
22.71	55.08	22.42	85.95	22.63	85.39	0	0
23.93	51.86	23.56	83.37	23.77	83.63	0	0
25.07	49.17	24.70	80.86	24.89	81.77	0	0
27.44	43.84	26.42	77.29	27.13	79.13	0	0
29.48	36.84	29.31	67.61	30.13	70.11	0	0
33.00	0.00	31.39	41.07	32.26	21.95	0	0
-	-	33.00	0.00	33.00	0.00	0	0

ตารางที่ ก.10 วิเคราะห์แรงในการอัดขึ้นรูปด้วยสารหล่อลื่นน้ำมันแร่

วัสดุที่ใช้	Die 20	Die 25	Die 30
Al 1100	64.02	67.79	80.06
Al 2011	75.70	77.89	82.99
Al 6063	83.74	92.55	95.61

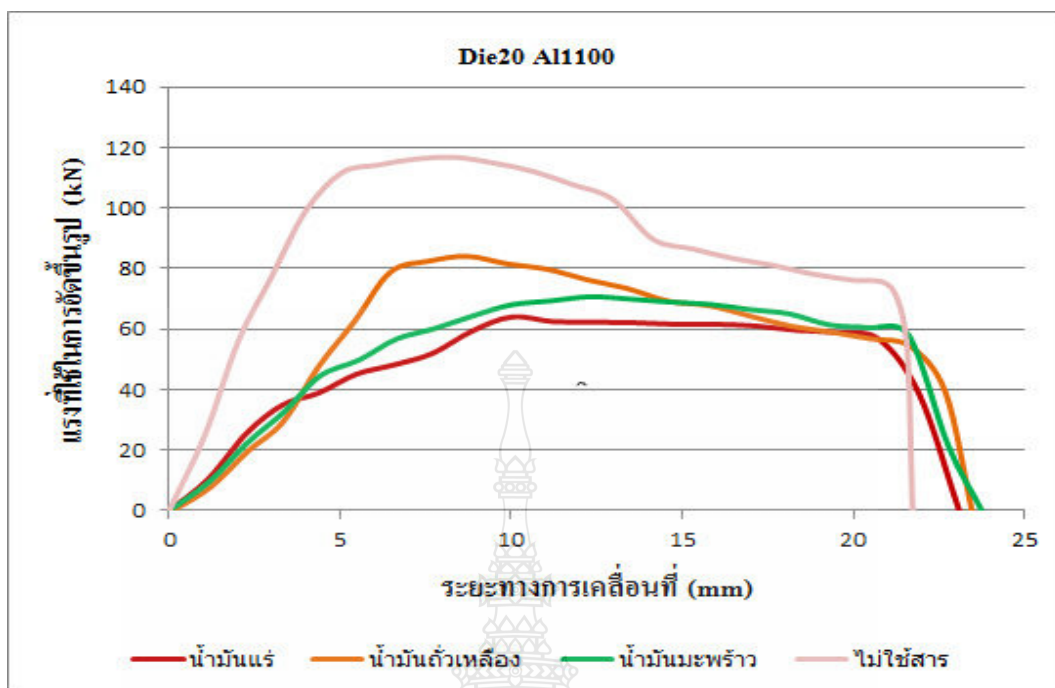
ตารางที่ ก.11 ค่าความหนาแน่นของอะลูมิเนียม 3 เกรด International Organization Standard (ISO)

วัสดุ	ความหนาแน่น g/cm <sup>3</sup>
Al 1100	2.71 g/cm <sup>3</sup>
Al 2011	2.82 g/cm <sup>3</sup>
Al 6063	2.96 g/cm <sup>3</sup>

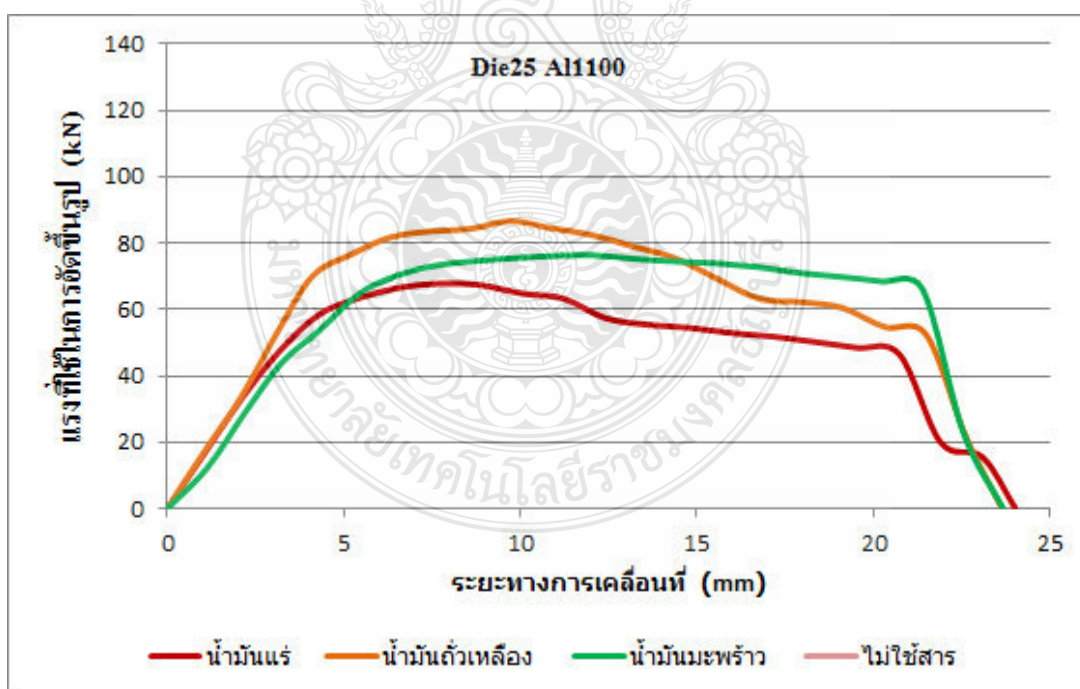
ตารางที่ ก.12 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเปรียบเทียบระหว่างงานกลึงกับการอัดขึ้นรูป

วัสดุ	งานกลึง	งานอัดขึ้นรูป
Al 1100	0.21 μm	0.31 μm
Al 2011	0.25 μm	0.36 μm
Al 6063	0.28 μm	0.38 μm

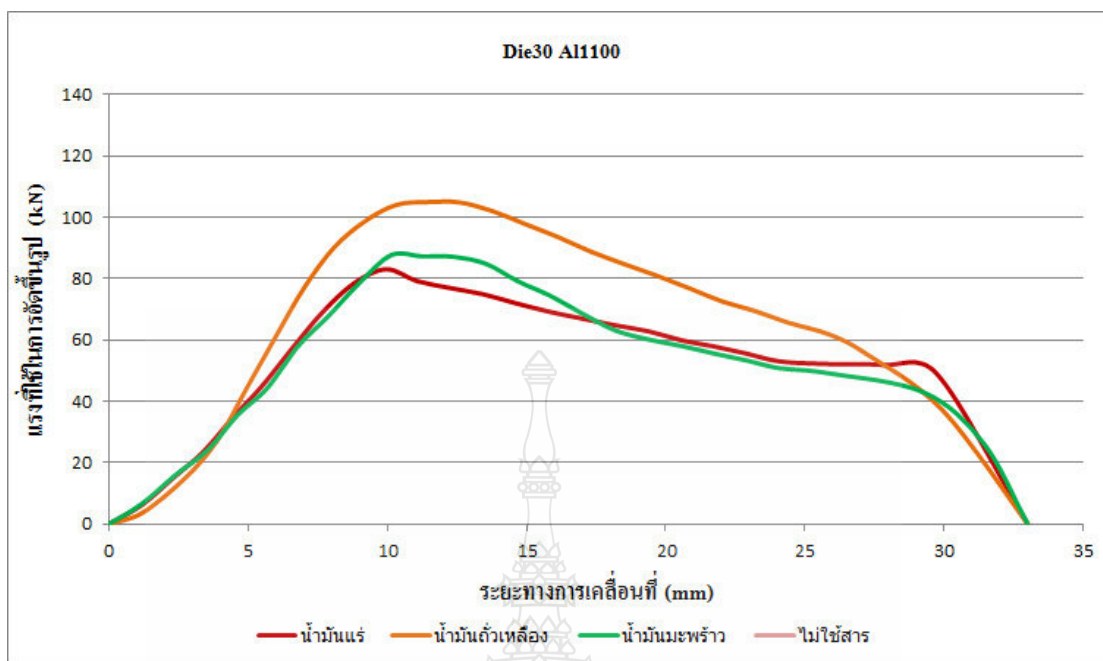




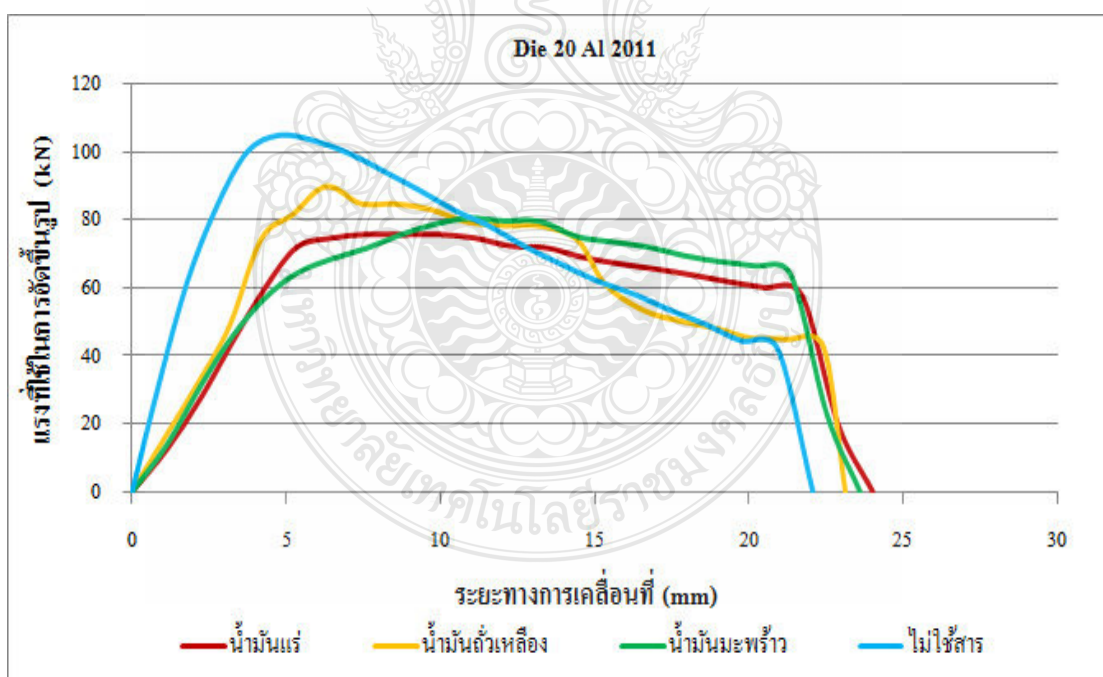
ภาพที่ ก.1 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 1100 ที่มุมตาย 20 องศา



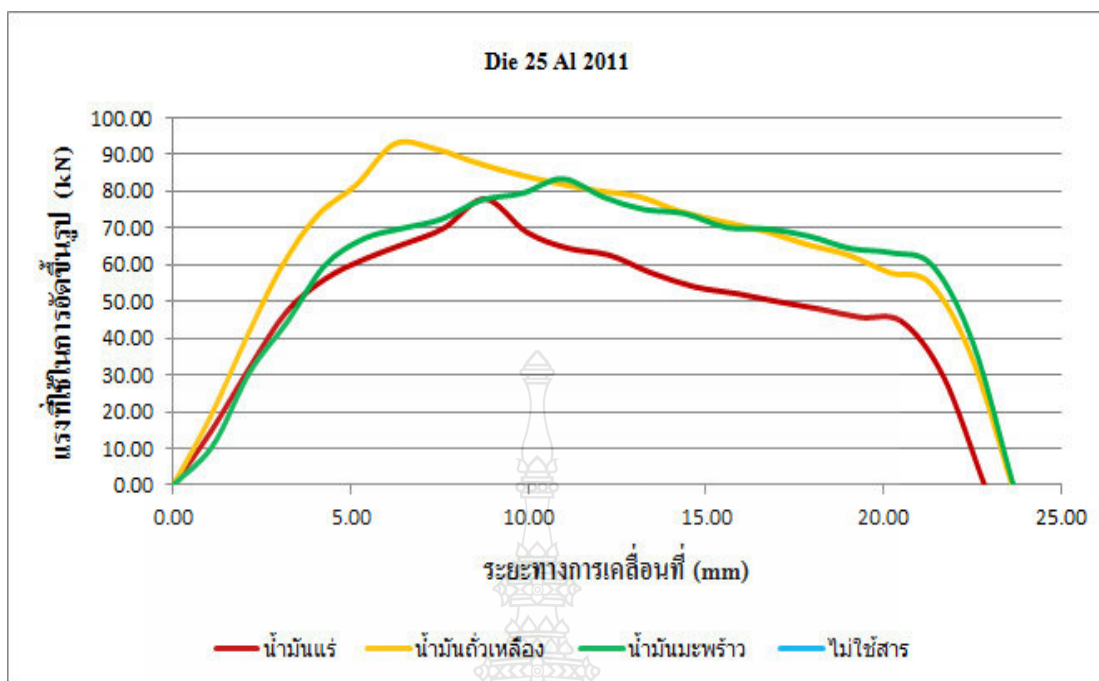
ภาพที่ ก.2 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 1100 ที่มุมตาย 25 องศา



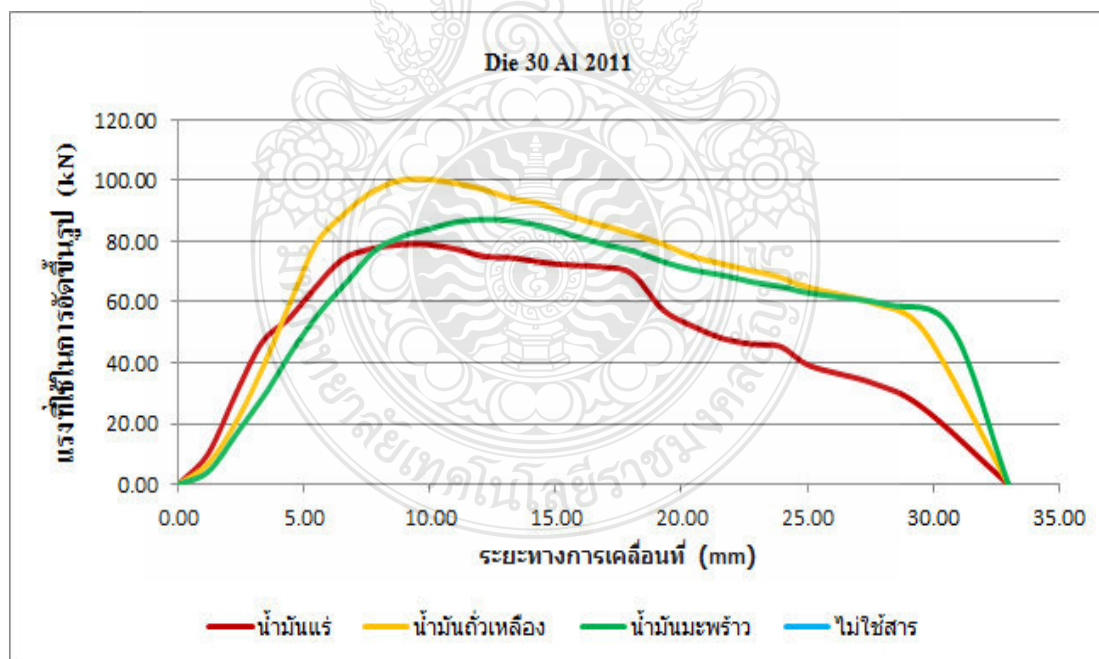
ภาพที่ ก.3 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 1100 ที่มุมคาย 30 องศา



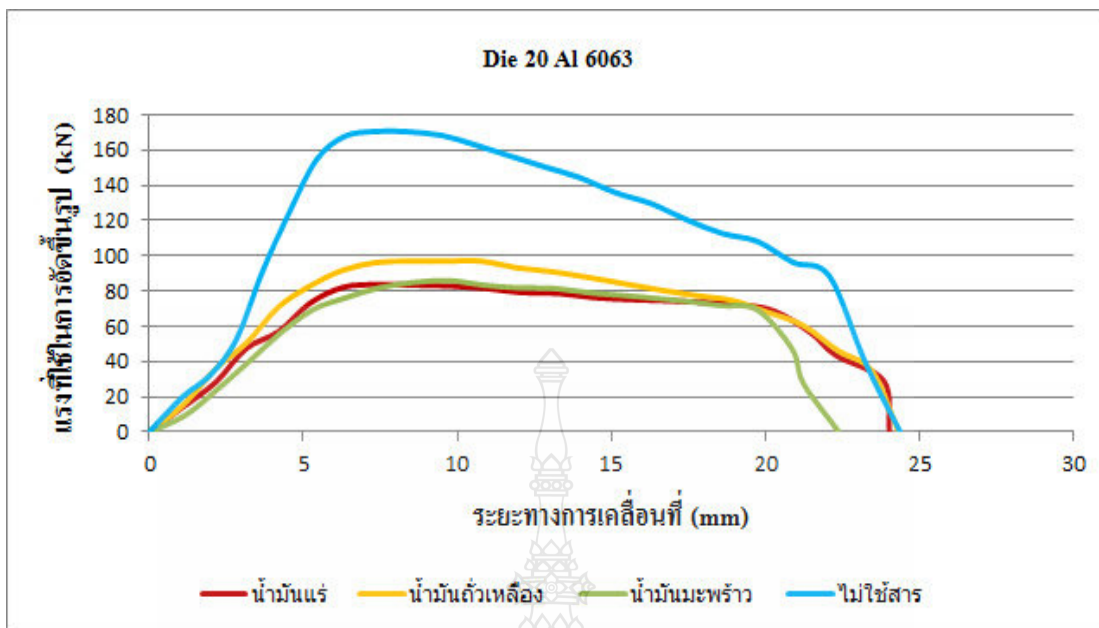
ภาพที่ ก.4 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 2011 ที่มุมคาย 20 องศา



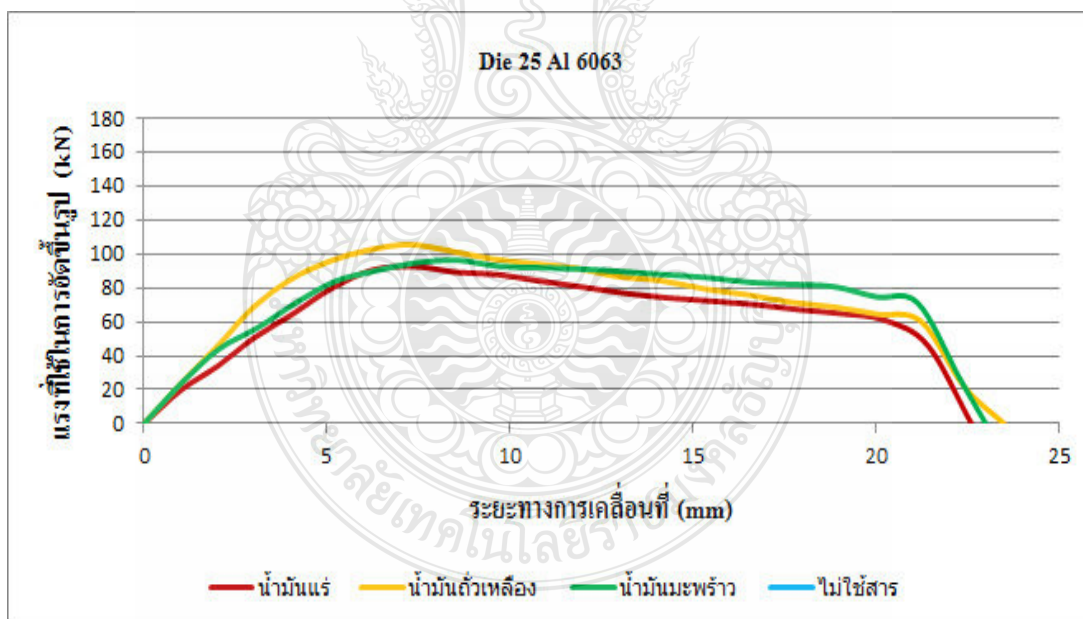
ภาพที่ ก.5 ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 2011 ที่มุมคาย 25 องศา



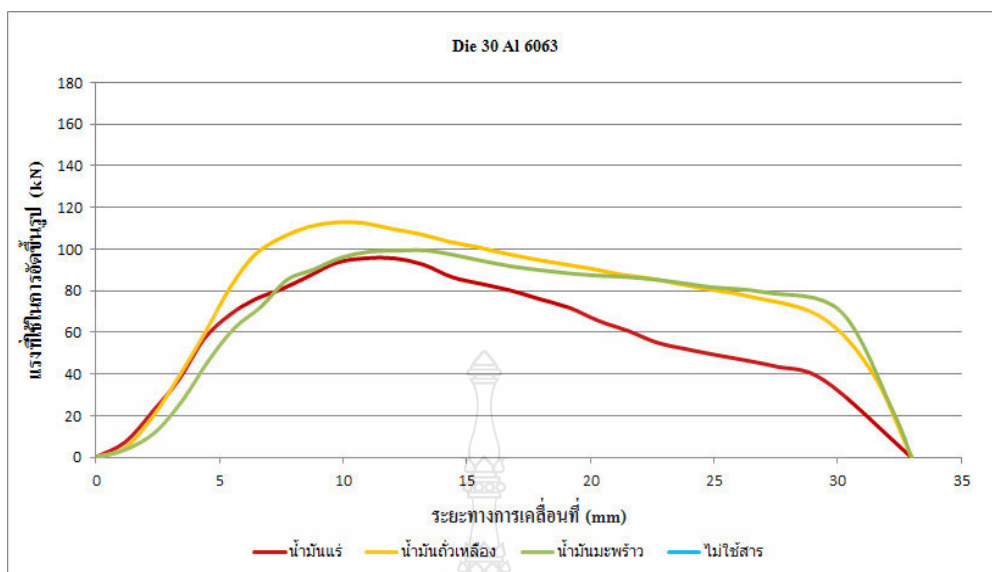
ภาพที่ ก.6 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 2011 ที่มุมคาย 30 องศา



ภาพที่ ก.7 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 6063 ที่มุมคาย 20 องศา



ภาพที่ ก.8 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 6063 ที่มุมคาย 25 องศา



ภาพที่ ก.9 แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม Al 6063 ที่มุมตาย 30 องศา



ภาพที่ ก.10 ส่วนที่ยืดออกของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูป

ตารางที่ ก.12 ส่วนที่ยืดออกของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปแบบไหลตามของอะลูมิเนียม 3 เกรด

วัสดุ/มุมตาย	ส่วนที่ยืดออกของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูป (mm)								
	Al 1100			Al 2011			AL 6063		
	20	25	30	20	25	30	20	25	30
ไม่ใช้สาร	0.44	X	X	1.04	X	X	1.18	X	X
น้ำมันแร่	1.17	1.09	0.91	1.21	1.17	1.03	1.29	1.19	1.37
น้ำมันถั่วเหลือง	1.15	1.07	0.99	1.15	1.21	1.14	1.21	-	-
น้ำมันมะพร้าว	0.94	0.92	1.15	0.91	1.09	0.70	0.93	1.19	0.94

หมายเหตุ : X หมายถึง ชิ้นงานเสียรูปจนไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้

- หมายถึง การยืดออกของชิ้นงานน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้



ตารางที่ ข.1 ค่าความหยาบผิวอะลูมิเนียมเกรด 1100 ของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด

ค่าความหยาบผิว อะลูมิเนียม เกรด 1100 (Al 1100)									
น้ำมันแร่									
ครั้งที่/ชนิด	มูมคย 20			มูมคย 25			มูมคย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.33	0.23	0.31	0.33	0.40	0.35	0.46	0.30	0.37
2	0.31	0.33	0.32	0.32	0.33	0.35	0.48	0.35	0.40
3	0.31	0.32	0.32	0.36	0.34	0.37	0.46	0.34	0.36
4	0.33	0.27	0.31	0.33	0.40	0.35	0.46	0.31	0.37
5	0.31	0.32	0.32	0.36	0.34	0.37	0.46	0.34	0.36
ค่าเฉลี่ย	0.31	0.30	0.32	0.34	0.36	0.36	0.47	0.33	0.38
น้ำมันถั่วเหลือง									
ครั้งที่/ชนิด	มูมคย 20			มูมคย 25			มูมคย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.32	0.38	0.39	0.40	0.35	0.35	0.46	0.50	0.44
2	0.32	0.32	0.35	0.35	0.44	0.37	0.44	0.48	0.44
3	0.37	0.34	0.36	0.43	0.34	0.37	0.38	0.40	0.44
4	0.32	0.38	0.39	0.40	0.35	0.35	0.46	0.50	0.44
5	0.37	0.34	0.36	0.43	0.34	0.37	0.38	0.40	0.44
ค่าเฉลี่ย	0.34	0.35	0.37	0.40	0.37	0.36	0.42	0.46	0.44
น้ำมันมะพร้าว									
ครั้งที่/ชนิด	มูมคย 20			มูมคย 25			มูมคย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.36	0.37	0.39	0.36	0.43	0.39	0.41	0.43	0.43
2	0.21	0.21	0.21	0.35	0.35	0.39	0.42	0.42	0.42
3	0.35	0.30	0.36	0.35	0.35	0.39	0.43	0.43	0.42
4	0.34	0.32	0.34	0.36	0.43	0.39	0.41	0.43	0.43
5	0.32	0.35	0.35	0.35	0.33	0.39	0.43	0.43	0.42
ค่าเฉลี่ย	0.32	0.33	0.33	0.35	0.36	0.39	0.42	0.43	0.42
ค่าความหยาบผิว อะลูมิเนียม เกรด 1100 (Al 1100)									
ไม้ใช้สารหล่อลื่น									
ครั้งที่/ชนิด	มูมคย 20			มูมคย 25			มูมคย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.59	0.52	0.59	x	x	x	x	x	x
2	0.56	0.66	0.52	x	x	x	x	x	x
3	0.58	0.54	0.57	x	x	x	x	x	x
4	0.59	0.52	0.59	x	x	x	x	x	x
5	0.56	0.52	0.57	x	x	x	x	x	x
ค่าเฉลี่ย	0.58	0.55	0.57	x	x	x	x	x	x

ตารางที่ ข.2 ค่าความหยาบผิวอะลูมิเนียมเกรด 2011 ของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด

ค่าความหยาบผิว อะลูมิเนียม เกรด 2011 (AI 2011)									
น้ำมันแร่									
ครั้งที่/ชั้นที่	มูมตย 20			มูมตย 25			มูมตย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.34	0.31	0.47	0.34	0.39	0.38	0.38	0.39	0.43
2	0.31	0.32	0.38	0.39	0.41	0.39	0.39	0.49	0.40
3	0.37	0.39	0.31	0.39	0.40	0.36	0.34	0.45	0.44
4	0.34	0.31	0.47	0.34	0.39	0.38	0.38	0.39	0.43
5	0.37	0.39	0.31	0.39	0.40	0.36	0.34	0.45	0.44
ค่าเฉลี่ย	0.34	0.34	0.39	0.37	0.40	0.37	0.37	0.43	0.43
น้ำมันถั่วเหลือง									
ครั้งที่/ชั้นที่	มูมตย 20			มูมตย 25			มูมตย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.37	0.38	0.37	0.42	0.45	0.46	0.48	0.49	0.45
2	0.38	0.40	0.38	0.46	0.43	0.48	0.48	0.49	0.46
3	0.37	0.40	0.38	0.43	0.44	0.47	0.46	0.49	0.46
4	0.37	0.38	0.37	0.42	0.45	0.46	0.48	0.49	0.45
5	0.37	0.40	0.38	0.43	0.44	0.47	0.46	0.49	0.46
ค่าเฉลี่ย	0.37	0.39	0.38	0.43	0.44	0.47	0.47	0.49	0.46
น้ำมันมะพร้าว									
ครั้งที่/ชั้นที่	มูมตย 20			มูมตย 25			มูมตย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.39	0.34	0.38	0.42	0.43	0.44	0.43	0.49	0.45
2	0.37	0.36	0.40	0.43	0.43	0.43	0.43	0.47	0.44
3	0.37	0.35	0.39	0.43	0.43	0.44	0.42	0.46	0.44
4	0.39	0.34	0.38	0.42	0.43	0.44	0.43	0.49	0.45
5	0.37	0.35	0.39	0.43	0.43	0.44	0.42	0.46	0.44
ค่าเฉลี่ย	0.38	0.35	0.39	0.43	0.43	0.43	0.43	0.47	0.44
ไม่ใช้สารหล่อลื่น									
ครั้งที่/ชั้นที่	มูมตย 20			มูมตย 25			มูมตย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.55	0.51	0.57	x	x	x	x	x	x
2	0.63	0.53	0.61	x	x	x	x	x	x
3	0.60	0.59	0.57	x	x	x	x	x	x
4	0.55	0.51	0.57	x	x	x	x	x	x
5	0.60	0.59	0.57	x	x	x	x	x	x
ค่าเฉลี่ย	0.59	0.55	0.58	x	x	x	x	x	x



ตารางที่ ข.3 ค่าความหยาบผิวอะลูมิเนียมเกรด 6063 ของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด

ค่าความหยาบผิว อะลูมิเนียม เกรด 6063(AI 6063)									
น้ำมันแร่									
ครั้งที่/ชนิดที่	มมดย 20			มมดย 25			มมดย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.39	0.38	0.34	0.43	0.49	0.33	0.43	0.44	0.48
2	0.39	0.46	0.39	0.49	0.44	0.49	0.50	0.46	0.45
3	0.39	0.33	0.38	0.51	0.38	0.38	0.47	0.48	0.43
4	0.39	0.38	0.34	0.43	0.49	0.33	0.43	0.44	0.48
5	0.39	0.33	0.38	0.51	0.38	0.38	0.47	0.48	0.43
ค่าเฉลี่ย	0.39	0.39	0.36	0.48	0.44	0.38	0.46	0.46	0.46
น้ำมันถั่วเหลือง									
ครั้งที่/ชนิดที่	มมดย 20			มมดย 25			มมดย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.46	0.47	0.48	0.42	0.58	0.55	0.51	0.55	0.54
2	0.42	0.47	0.41	0.45	0.58	0.46	0.57	0.49	0.51
3	0.45	0.42	0.44	0.40	0.56	0.56	0.49	0.56	0.55
4	0.46	0.47	0.48	0.42	0.58	0.55	0.51	0.55	0.54
5	0.45	0.42	0.44	0.40	0.56	0.56	0.49	0.56	0.55
ค่าเฉลี่ย	0.45	0.45	0.45	0.42	0.57	0.53	0.52	0.54	0.54
น้ำมันมะพร้าว									
ครั้งที่/ชนิดที่	มมดย 20			มมดย 25			มมดย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.34	0.39	0.38	0.48	0.46	0.56	0.44	0.49	0.49
2	0.46	0.36	0.50	0.44	0.48	0.45	0.52	0.49	0.52
3	0.31	0.47	0.43	0.50	0.49	0.43	0.53	0.55	0.44
4	0.34	0.39	0.38	0.48	0.46	0.56	0.44	0.49	0.49
5	0.31	0.47	0.43	0.50	0.49	0.43	0.53	0.55	0.44
ค่าเฉลี่ย	0.35	0.41	0.42	0.48	0.48	0.48	0.49	0.51	0.48
ไม่ใช้สารหล่อลื่น									
ครั้งที่/ชนิดที่	มมดย 20			มมดย 25			มมดย 30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0.65	0.55	0.59	x	x	x	x	x	x
2	0.66	0.68	0.57	x	x	x	x	x	x
3	0.68	0.57	0.49	x	x	x	x	x	x
4	0.65	0.55	0.59	x	x	x	x	x	x
5	0.68	0.57	0.49	x	x	x	x	x	x
ค่าเฉลี่ย	0.66	0.58	0.55	x	x	x	x	x	x

หมายเหตุ x คือ ไม่สามารถทำการอัดขึ้นรูปได้ เนื่องจากชิ้นงานเกิดการเสียดสีระหว่าง  
กระบวนการอัดขึ้นรูป



ภาคผนวก ค

ค่าความแข็งหลังการอัดขึ้นรูปเย็น

ตารางที่ ค.1 ความแข็งอะลูมิเนียมเกรด 1100 ของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด

AI 1100				
มูมตาย 20	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไมใช้สาร
1	75.60	88.20	85.90	82.60
2	81.30	96.60	92.10	85.00
3	88.40	98.20	96.80	90.90
4	88.70	100.60	98.10	93.10
5	87.00	100.20	97.90	92.80
6	81.30	95.10	92.10	91.70
7	75.50	91.10	87.80	87.20
Average	82.54	95.71	92.96	89.04
AI 1100				
มูมตาย 25	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไมใช้สาร
1	84.80	79.10	93.00	x
2	90.90	84.80	95.50	x
3	95.30	88.70	96.20	x
4	97.90	89.00	98.20	x
5	97.50	83.40	97.90	x
6	94.20	81.40	95.50	x
7	87.20	80.40	92.80	x
Average	92.54	83.83	95.59	x
AI 1100				
มูมตาย 30	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไมใช้สาร
1	89.30	85.20	80.90	x
2	96.60	94.90	93.60	x
3	102.10	95.10	94.90	x
4	102.50	95.30	95.20	x
5	99.20	91.10	94.00	x
6	95.30	86.60	88.50	x
7	92.60	83.20	81.60	x
Average	96.80	90.20	89.81	x

ตารางที่ ค.2 ความแข็งอะลูมิเนียมเกรด 2011 ของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด

AI 2011				
มูมดาย 20	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไมใช้สาร
1	95.70	82.00	84.40	75.50
2	97.90	83.70	91.90	80.30
3	94.40	89.30	92.30	85.50
4	94.80	89.50	93.30	97.50
5	91.90	87.50	93.00	97.20
6	92.60	86.20	88.10	101.00
7	91.50	84.90	87.60	74.90
Average	94.11	86.16	90.09	87.41
AI 2011				
มูมดาย 25	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไมใช้สาร
1	80.90	88.70	89.20	x
2	84.60	92.30	93.80	x
3	86.10	101.20	97.70	x
4	90.50	101.60	98.00	x
5	90.20	92.60	95.60	x
6	87.60	91.10	93.40	x
7	86.00	86.50	90.10	x
Average	86.56	93.43	93.97	x
AI 2011				
มูมดาย 30	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไมใช้สาร
1	98.80	70.10	80.40	x
2	101.30	81.10	81.50	x
3	105.50	83.00	85.40	x
4	105.70	84.20	94.10	x
5	105.50	83.90	93.80	x
6	100.30	81.60	90.50	x
7	97.10	79.10	85.40	x
Average	102.03	80.43	87.30	x

ตารางที่ ค.3 ความแข็งอะลูมิเนียมเกรด 6063 ของสารหล่อลื่นแต่ละชนิด

AI 6063				
มูมตาย 20	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไม่ใช้สาร
1	101.20	100.70	95.30	103.30
2	104.30	107.90	96.70	108.90
3	112.20	108.40	103.50	110.00
4	112.70	108.60	103.90	110.40
5	107.10	107.40	101.40	108.40
6	104.30	104.30	100.50	106.30
7	102.90	100.50	96.20	101.40
Average	106.39	105.40	99.64	106.96
AI 6063				
มูมตาย 25	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไม่ใช้สาร
1	102.60	97.30	98.50	x
2	105.70	100.50	99.10	x
3	110.90	107.60	107.40	x
4	111.20	108.00	108.90	x
5	108.50	104.60	108.40	x
6	105.20	99.80	103.80	x
7	103.70	97.90	96.00	x
Average	106.83	102.24	103.16	x
AI 6063				
มูมตาย 30	ความแข็ง (HV)			
จุดที่	น้ำมันแร่ (Sun)	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไม่ใช้สาร
1	103.80	91.30	100.00	x
2	106.30	103.30	103.10	x
3	110.50	106.80	108.90	x
4	110.60	107.00	109.30	x
5	110.50	103.00	106.60	x
6	105.30	100.20	101.40	x
7	102.10	92.40	99.30	x
Average	107.01	100.57	104.09	x

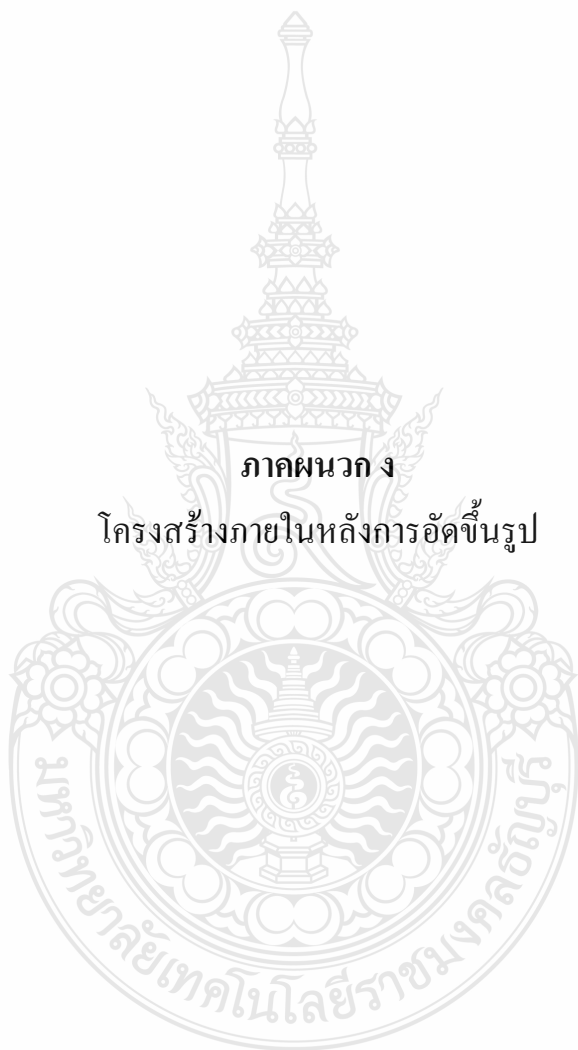
หมายเหตุ x คือ ไม่สามารถทำการอัดขึ้นรูปได้ เนื่องจากชิ้นงานเกิดการเสียรูปในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป

ตารางที่ ค.4 ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานก่อนการอัดขึ้นรูปที่มุมตาย 20 องศา น้ำมันแร่


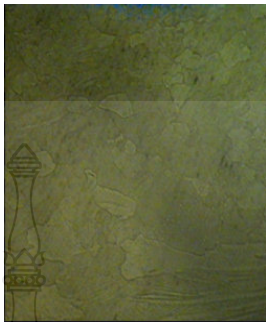
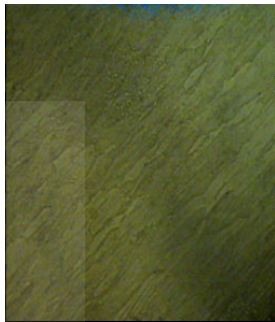






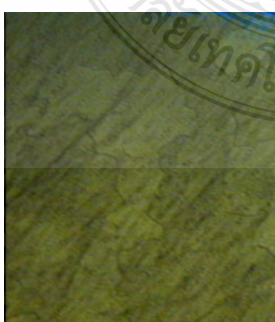

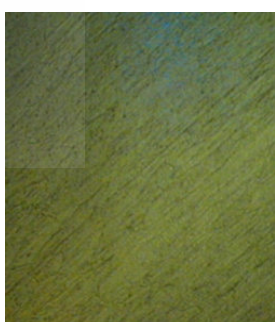
ความแข็ง (HV)			
จุดที่	AI 1100	AI 2011	AI 6063
1	75.60	65.50	81.20
2	75.00	65.10	80.10
3	72.00	63.80	83.50
4	72.40	64.10	84.00
5	72.60	64.50	82.80
6	67.90	61.00	84.20
7	68.30	60.50	83.90
Average	71.97	63.50	82.81



ภาคผนวก ง  
โครงสร้างภายในหลังการอัปเดตในรูปแบบ


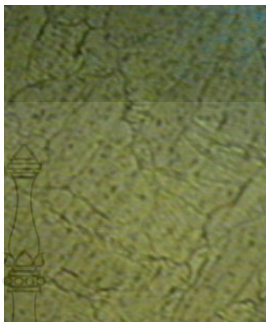
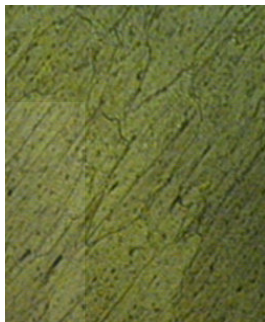

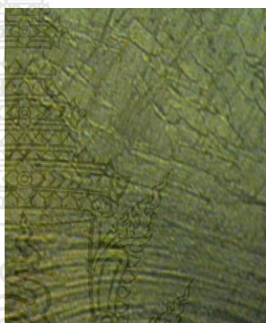


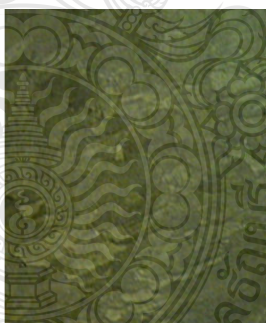
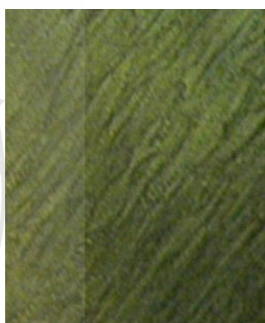


ตารางที่ ง.1 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 1100 Die 20 องศา

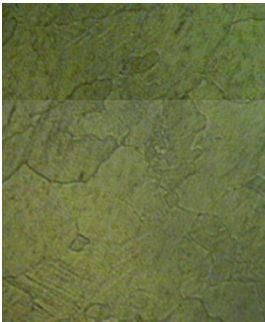
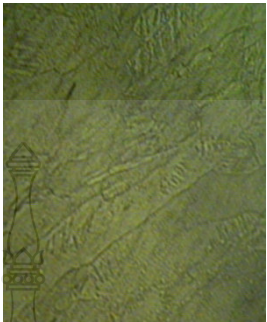





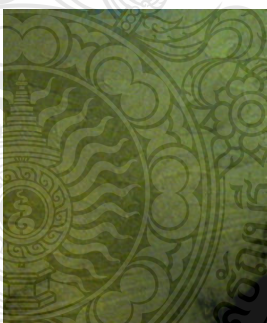

ชนิดของสาร หล่อขึ้น	ช่วงของขึ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช่สาร			



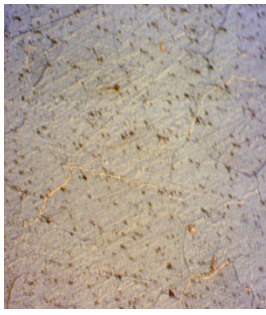
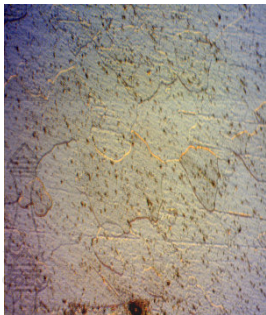
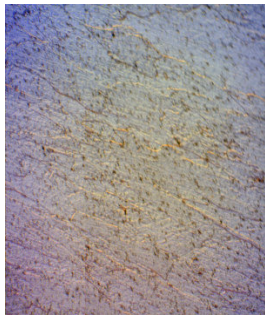
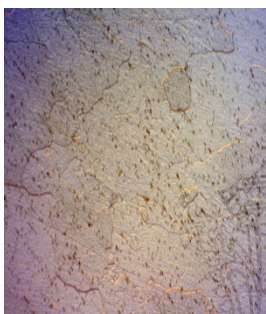
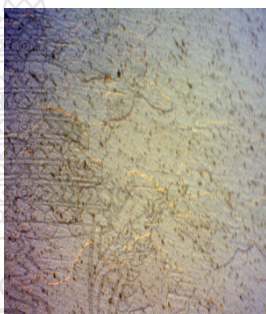
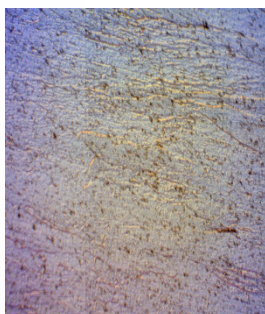
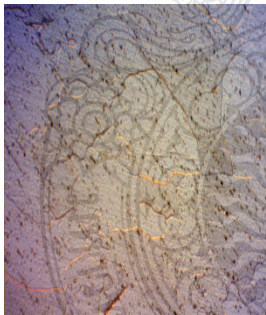
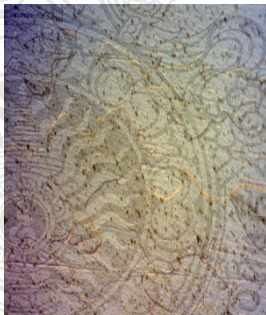
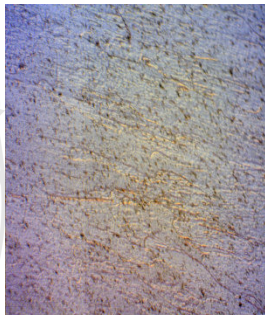
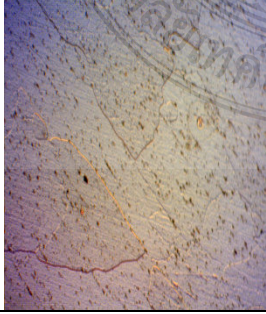
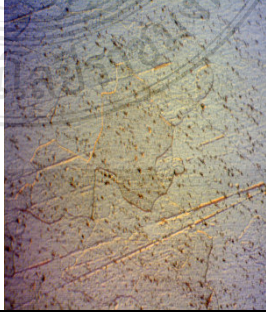
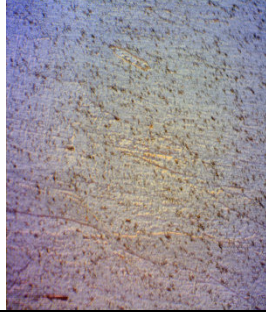
ตารางที่ ง.2 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 1100 Die 25 องศา

ชนิดของสาร หล่อขึ้น	ช่วงของขึ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช้สาร	x	x	x

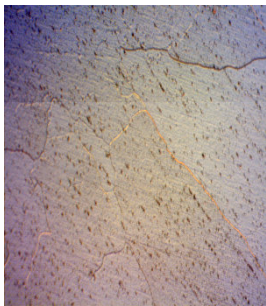

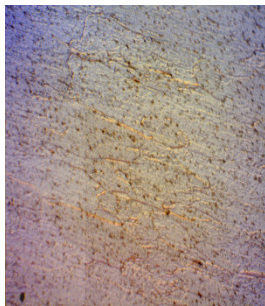
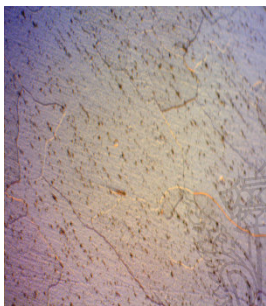
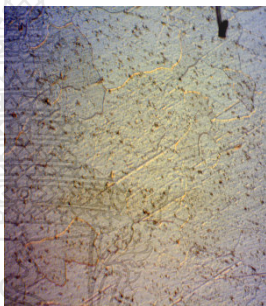
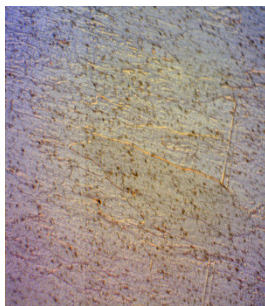
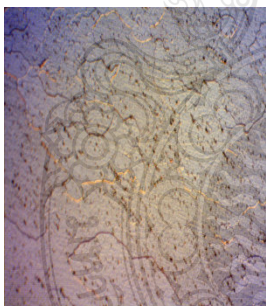
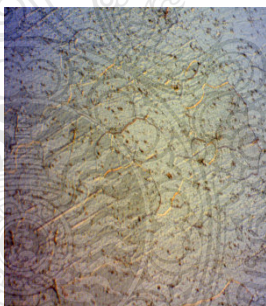
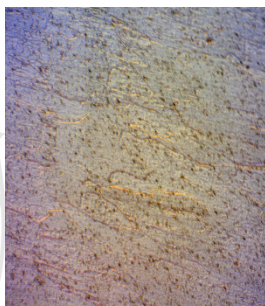
ตารางที่ ง.3 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 1100 Die 30 องศา

ชนิดของสาร หล่อขึ้น	ช่วงของขึ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช้สาร	x	x	x

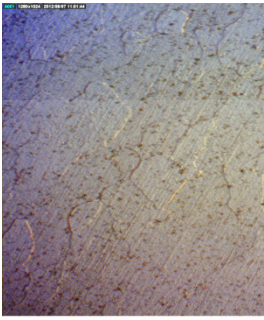
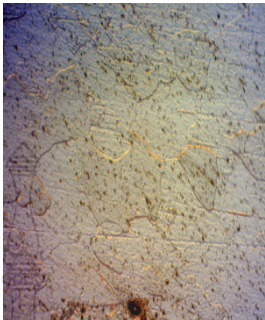
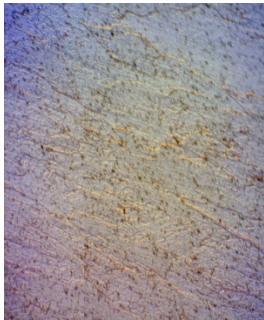
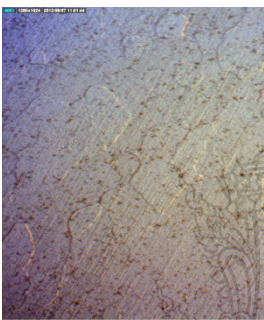
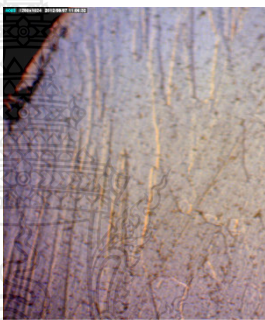
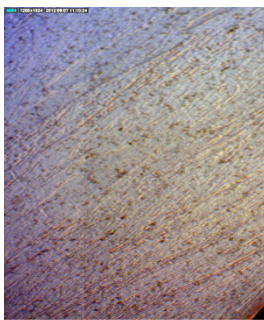
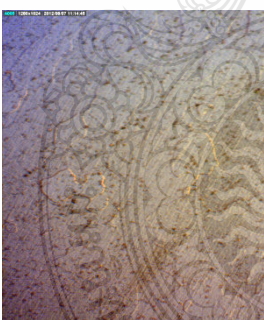
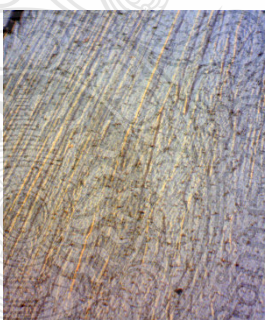
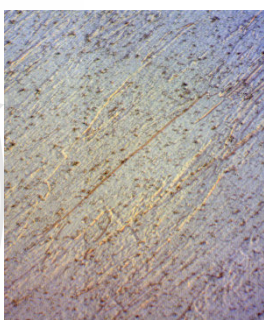
ตารางที่ ง.4 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 2011 Die 20 องศา

ชนิดของสาร หล่อขึ้น	ช่วงของชิ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช่สาร			



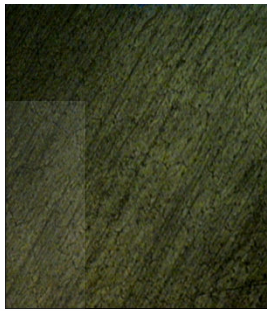




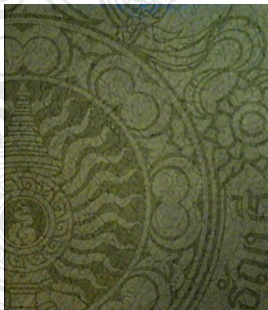



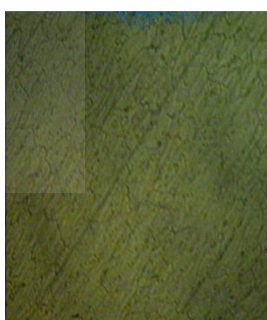
ตารางที่ ง.5 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 2011 Die 25 องศา

ชนิดของสาร หล่อขึ้น	ช่วงของชิ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช้สาร	x	x	x


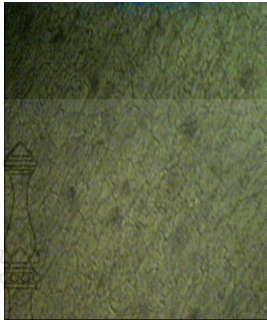







ตารางที่ ง.6 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 2011 Die 30 องศา

ชนิดของสารหล่อลื่น	ช่วงของชิ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช้สาร	x	x	x



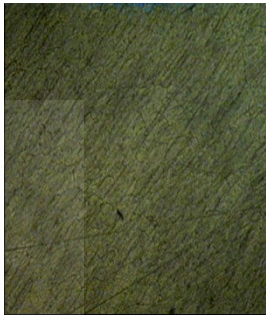






ตารางที่ ง.7 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 6063 Die 20 องศา

ชนิดของสาร หล่อขึ้น	ช่วงของขึ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช้สาร			

ตารางที่ ง.8 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 6063 Die 25 องศา

ชนิดของสาร หล่อขึ้น	ช่วงของชิ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช่สาร	x	x	x

ตารางที่ ง.9 โครงสร้างอะลูมิเนียม Al 6063 Die 30 องศา

ชนิดของสารหล่อลื่น	ช่วงของชิ้นงาน		
	ก่อนการเปลี่ยนขนาด	ช่วงเปลี่ยนขนาด	เปลี่ยนขนาดแล้ว
น้ำมันแร่ (Sun)			
น้ำมันถั่วเหลือง			
น้ำมันมะพร้าว			
ไม่ใช้สาร	x	x	x

หมายเหตุ x คือ ไม่สามารถทำการอัดขึ้นรูปได้ เนื่องจากชิ้นงานเกิดการเสียรูปในระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูป





**ภาคผนวก จ**  
**ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่**

**Industrial Challenges in the ASEAN Economic Community**



# IE Network Conference 2012

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ประจำปี 2555

เอกสารรวมบทคัดย่อ  
(Abstract Summary)



17 - 19 ตุลาคม 2555

โรงแรมเมธาวลัย ชะอำ อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี

มหาวิทยาลัยศรีปทุม  
SRIPATUM UNIVERSITY



### สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
MPM006	การศึกษาอิทธิพลของความหยาบผิวของดอร์บิสในงานลากขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบไม่สมมาตร ธีรยุทธ กาญจนแสงทอง สุธรรม ศิวาวุช ศิริชัย ต่อสกุล*	183
MPM007	การลดของเสียประเภทโพรงหดตัวจากกระบวนการผลิตแบบไดแคสติ้งแรงดันสูง เจริญ สว่างวงศ์* สมชาย พัวจินดาเนตร	184
MPM008	การออกแบบข้อกำหนดของกระบวนการตัดผ้าลายริ้ว จรรยา สุนทรรักษ์* จิตรา รุกกิจการพานิช	185
MPM009	ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของการเชื่อมพอกผิววัสดุเหล็ก AS3678 เกรด 350 ยงยุทธ ดุลยกุล* เดช เหมือนขาว สมยศ กวางตุง	186
MPM010	การสร้างเครื่องกัด CNC ขนาดเล็กสำหรับการผลิตแบบหล่อโฝมหายแบบแยกชิ้น ทศพิช วิสมิตนันท์* พิเชฐ ตระการชัยศิริ เกียรติกร ไวยกาญจน์	187
MPM011	ผลกระทบของการเอียงเครื่องมือการเชื่อมเสียดทานแบบกวนคอลลูมิเนียม 6063 และ 7075 วิชัย พุ่มจันทร์	188
MPM012	การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุสำหรับสร้างต้นแบบท้อจรวด นาวาโทสิทธา สายดาราสุมทร* นาวาโทรณพงษ์ สุริยะ ธีรทัศน์ พรยงยืน	189
MPM013	การประมาณการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม เฉลิมพล คล้ายนิล* พงศกร หลีตระกูล พงษ์พันธ์ุ ราชภักดี	190
MPM014	การศึกษานิดของเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัด เฉลิมพล คล้ายนิล* จิณกมล สุธจันทร์ พิมพ์มาศ ภาละวงศ์	191
MPM015	การศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพหัวเจาะน้ำบาดาลสำหรับชนบท กฤษณาล ทองครี* ศิริชัย ต่อสกุล บดินทร์ชาติ สุขบท	192
MPM016	อิทธิพลของตัวแปรในการอัดขึ้นรูปเย็นต่อการไหลตัวของโลหะและ โครงสร้างมหภาค ของอลูมิเนียมผสม วิสิทธิ์ ยี่ไถ่ มนตรี น่วมจิตร สมชาย เอี่ยมเจริญ ศิริชัย ต่อสกุล*	193



การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ชะอำ เพชรบุรี

**คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ**  
**การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2555**

**จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**

รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา  
รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เภาประเสริฐวงศ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุวิงศ์.  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสวงศ์ โอสถศิลป์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ เรี่ยวเคชะ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ  
อาจารย์สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล สุธีจาววัฒน์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริง ปรีชานนท์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ อัครประดมพงศ์  
อาจารย์ ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย  
อาจารย์ ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล  
อาจารย์ภูมิ เหลืองจามีกร

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

อาจารย์ ดร.ปยุตต์มี สัจจกมล  
อาจารย์ ดร.พัชรี โตนแก้ว ทองรัตน์  
อาจารย์ ดร.รมิตายุ อยู่สุข

อาจารย์ ดร.สุตารัตน์ วงศ์วีระเกียรติ  
อาจารย์ ดร.สุวิกรมน์ วิชกุล  
อาจารย์ ดร.ไอลดา ตีร์รัตน์ตระกูล

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน**

อาจารย์อนงค์ ชัยมณี

**มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา**

อาจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง  
อาจารย์ ดร.ณัฐวิภา จันทร์ศรี  
อาจารย์ ดร.เพ็ญสุดา พันธุ์ศรีดี  
อาจารย์นันทวุฒิ ศรีอริยวัฒน์

อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ หมิ่นนิชกุล  
อาจารย์ ดร.สิริวงศ์ กลั่นคำสอน  
อาจารย์จักรินทร์ กลั่นเงิน  
อาจารย์ประภาพรณ เกษราพงศ์

**มหาวิทยาลัยขอนแก่น**

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์  
อาจารย์ ดร.จุมพล วรสายัณห์

รองศาสตราจารย์ ดร.दनัยพงศ์ เชษฐโชติศักดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินทร์ สุขโต  
อาจารย์ ดร.ธนา ราษฎร์ภักดิ์



การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบุรี

#### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนาถ กฤตวรกาญจน์  
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท เจริญใจ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินโหว  
อาจารย์ ดร.วรพจน์ เสวีรัฐ

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภานแดง  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤต เล็กสกุล  
อาจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์  
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พันธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โขมพัตรภรณ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยา คำคำ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พจมาน เตียวัฒน์รัฐติกาล  
อาจารย์ ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์  
อาจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข  
อาจารย์ ดร.พิเนษฐ์ ศรีโยธา  
อาจารย์มงคล สีนะวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.อาษา ประทีปเสนา  
รองศาสตราจารย์วชิระ มีทอง  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ พรหมบุญพงศ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์นา อุดมศักดิ์กุล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ สุนทรวานิชย์  
อาจารย์ ดร.ไพบูลย์ ช่วงทอง  
อาจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ บุญเกียรติ  
อาจารย์ ดร.อุษณีย์ คำพูล  
อาจารย์เจษฎา จันทวงษ์โส  
อาจารย์สุจินต์ ชงถาวรสุวรรณ

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร เก่งพล  
รองศาสตราจารย์วันชัย แผลมหล็กสกุล  
อาจารย์ ดร.กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์  
อาจารย์ ดร.กฤษดา อัครวงแสงกุล  
อาจารย์ ดร.กุลศ พิมพันธ์ศรี  
อาจารย์ ดร.ชยชัย เมื่อกลามัญญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นราธิป แสงชัย  
อาจารย์ ดร.ชนสาร อินทรกำรชัย  
อาจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิต  
อาจารย์ ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์  
อาจารย์สงกรานต์ บางศรีณีย์ทิพย์

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

อาจารย์ ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา  
อาจารย์ธนิดา สุนาร์ักษ์  
อาจารย์พัฒนพงษ์ แสงหัตถวัฒนา

อาจารย์วรินทร์ เกียรติคุณกุล  
อาจารย์อรุณีชา อนุชิตชาญชัย  
อาจารย์พรเทพ แก้วเชื้อ

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทร์มณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์



การประชุมวิชาการรายงานนิพนธ์กรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ซะยา เพชรบุรี

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐา คุปต์ขันธ์

อาจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง

อาจารย์ศุภเอก ประมูลมาก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ ตรีวนพงษ์

อาจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อวิพันธ์

อาจารย์ ดร.นเรศ อินทร์วงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิลา

อาจารย์ ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พายัพ เชียงใหม่**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อวิพันธ์

อาจารย์ ดร.นเรศ อินทร์วงศ์

อาจารย์ ดร.บรรเจิด แสงจันทร์พิลา

อาจารย์ ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว

อาจารย์ ดร.มาดามะสุโฮมี มะแซ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ**

อาจารย์สัญญา คำจริง

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล

อาจารย์ ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์

อาจารย์ ดร.ปภากร ทิพย์वाल

อาจารย์ ดร.วีระชัย มโนพิเชษฐพัฒนา

**มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ วีระวราพฤษ

รองศาสตราจารย์ ดร.ตรีทศ เหล่าศิริหงษ์ทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุนธุ์

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรศิริพงศ์ เจริญภัณฑารักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ



การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ซะอำ เพชรบุรี

#### มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล  
อาจารย์ ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์  
อาจารย์ ดร.สันห์ รัฐวิบูลย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์  
อาจารย์ ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ

#### มหาวิทยาลัยนเรศวร

รองศาสตราจารย์ ดร.กวิณ สนธิเพิ่มพูน  
อาจารย์ ดร.ขวัญดิถี คำเมือง  
อาจารย์วิวิสาห์ เจ้าสกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ  
อาจารย์ ดร.ภาณุ บุรณจารุกร  
อาจารย์ศรีสัจจา วิทยศักดิ์

#### มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์เกษม พิพัฒน์ปัญญาคุณ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์ทา นาควชิระตระกูล  
อาจารย์ ดร.จักรวาล คุณะดิลก  
อาจารย์ ดร.ฤทธิชัย จันทรสภา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรพชาญ ลิลา  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรวัฒน์ สมสิริกาญจนคุณ  
อาจารย์ ดร.กฤษดา ประสพชัยชนะ

#### มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

รองศาสตราจารย์สุคนธ์ อัจฉฤทธิ์

#### มหาวิทยาลัยรังสิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์  
อาจารย์ ดร.พิษณุ มั่นปิติ  
อาจารย์พรคพงษ์ แก่นณรงค์  
อาจารย์สมพร พรหมดวง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจันทร์ จริงจิตร  
อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า  
อาจารย์ศิลปชัย วัฒนเสย  
อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

#### มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา พิศลยุบุตร  
อาจารย์ ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์  
อาจารย์นุกุล อุบลมาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชณี ภูวพัฒนะพันธ์  
อาจารย์นันทวรรณ อำเอี่ยม  
อาจารย์มารีสา แก้วสุวรรณ



การประชุมวิชาการรายงานวิทยกรรมการอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ชะอำ เพชรบุรี

#### มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ธนรัตน์ แต้วัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

อาจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช

อาจารย์พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์มีตรมาณี ตรีวัฒนวงศ์

อาจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

อาจารย์สิรเดช ชาตินิยม

#### มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รองศาสตราจารย์สมชาย ชูโณม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชานา สินธวาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ เจตวิจิตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีเชษฐ ตระการชัยศิริ

รองศาสตราจารย์วันดา รัตนมณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลางเดือน โปชนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ สังข์พงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยอดดวง พันธุ์รนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สงวน ตั้งโพธิธรรม

#### มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร อมรสวัสดิวัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์

อาจารย์ ดร.วิวัฒน์ชัย พุกกานนท์

#### มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

อาจารย์จิตลดา ชัมเจริญ

อาจารย์นิศากร สมสุข

อาจารย์วรัลภรณ์ เสถียรรังษณภูมิ

อาจารย์อรอุมา กอสนาน

#### มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร ภูนิคม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชสรา เกียรติกรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุของค์มา ลี

อาจารย์ ดร.จริยาภรณ์ อุนวนษ์

อาจารย์ ดร.ธารชุตตา พันธุ์นิกุล

อาจารย์โท แสงเทียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพียรทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา เกียรติกรกฎ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเขาวน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรียา โชคสวัสดิ์

อาจารย์ ดร.สันห์ โอพาพิริยกุล

อาจารย์ตะวันฉาย โพธิ์หอม

อาจารย์สุรเจษฎ์ ก้อนจันทร์





การประชุมวิชาการย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบุรี

**มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดชา พวงดาวเรือง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี

**โรงเรียนนายเรืออากาศ**

รองศาสตราจารย์สุทธิ ศรีบูรพา

อาจารย์อวยชัย วิดต์เอื้อ

อาจารย์อมฤต ศรีบูรพา

**สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพฤกษ์ อาภาเวท

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประยูร สุรินทร์

อาจารย์เจษฎา วงษ์อ่อน

อาจารย์พิทักษ์ พนาวัน

อาจารย์สุนทร มุลทา

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาสุจันทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต

อาจารย์ ดร.ชุมพล ยวงโย

อาจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาน

อาจารย์ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

**มหาวิทยาลัยศิลปากร**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ อนรรคนานนท์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ลีลาขวิวงศ์

อาจารย์ ดร.สิทธิชัย แซ่เหลิม

อาจารย์ ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

อาจารย์ ดร.กมลศ พลอยดน้อย

อาจารย์กวีบรุษ สยเจริญ

**มหาวิทยาลัยมหิดล**

รองศาสตราจารย์ศุภชัย นาทะพันธ์

อาจารย์ ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง

อาจารย์ ดร.มงคล เทียนวิบูลย์

อาจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

อาจารย์ ดร.รณชัย ธีโรเวจกุล

อาจารย์ดวงยศ สุกักิตย์

อาจารย์ศุภชัย ราชฎร์ศิริ

อาจารย์ธนา สาตรา

อาจารย์สิทธิพันธ์ ตันหาวิรุฬห์



การประชุมวิชาการช่างานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 พะงำ เพชรบุรี

### มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชรินี มณีศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมตะ ทศนภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนาภัทร พรหมวัฒน์ภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พศวีร์ ศรีโหมด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิต เกรือสุข

อาจารย์ ดร.เทพฤทธิ์ ทองชุม

อาจารย์ ดร.วิสร่า เลิศไพฑูรย์พันธ์

อาจารย์จักรพันธ์ กันหา

อาจารย์ธัญญ์ เรือนคง

อาจารย์อัศวิน วงศ์วิวัฒน์

อาจารย์ศิริระ สัตยไพศาล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลธิศ เอี่ยมวรฤทธิกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ถาวร อมตภักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต มณีศรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ

อาจารย์ ดร.อัศม์เดช วานิชชินชัย

อาจารย์ก่อศักดิ์ อาชวากร

อาจารย์ธนิน ศรีระมย์

อาจารย์ธวิวิท นฤนาท

อาจารย์วันวิสา ต่วนตระกูลศิลป์





การประชุมวิชาการงานวิจัยวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ธานี เพชรบุรี

**อิทธิพลของตัวแปรในการอัดขึ้นรูปเย็นต่อการไหลตัวของโลหะ  
และโครงสร้างมหภาค ของอะลูมิเนียมผสม**

**The Influence of Parameters of the Cold Extrusion on Metal Flow and  
Macrostructure of Aluminium Alloys**

วิสุทธิ ยี่โต<sup>1</sup> มนตรี น่วมจิตร<sup>2</sup> สมชาย เอี่ยมเจริญ<sup>3</sup> ศิริชัย ต่อสกุล<sup>4\*</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
จังหวัดปทุมธานี 12110 E-mail: storsakul@yayoo.com<sup>\*</sup>

Wisuth Yeetho<sup>1</sup> Montree Nuamchit<sup>2</sup> Somchai Iemcharoen<sup>3</sup> Sirichai Torsakul<sup>4\*</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology

Thanyaburi, Phatumthani 12110

E-mail: storsakul@yayoo.com<sup>\*</sup>

**บทคัดย่อ**

การอัดขึ้นรูปเย็นอะลูมิเนียม ที่สภาวะอุณหภูมิห้องนั้น หรือเรียกว่า Cold – Extrusion จะให้รูปร่างและคุณภาพผิวที่ดีกว่า การดันขึ้นรูปร้อนซึ่งสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก ดังนั้นปริมาณนิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอผลกระทบ เนื่องจากการใช้สารหล่อลื่นที่หาได้จากธรรมชาติที่มีราคาถูกกว่าน้ำมันสังเคราะห์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผล การอัดขึ้นรูปเย็นอะลูมิเนียม เพื่อศึกษาผลกระทบของสารหล่อลื่นตามธรรมชาติในการอัดขึ้นรูปเย็น และสามารถนำ สารหล่อลื่นตามธรรมชาติในการอัดขึ้นรูปเย็นไปใช้งาน ได้อย่างถูกต้องตามลักษณะของงาน จากผลการวิจัยและการ ทดลองเราจะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการทดลองอัดขึ้นรูปเย็นขึ้นทดสอบ โดยใช้สารหล่อลื่นจากธรรมชาติที่แตกต่างกันนั้น แรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเย็นพบว่าแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเย็นพบว่า ซึ่งมีค่าความแตกต่างกับไม่ใช้สารหล่อลื่น 0.58 ตัน ดังนั้นสารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ในส่วนของค่าความหยาบผิวพบว่า น้ำมันถั่วเหลืองมี ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าความแตกต่างจากการที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นอยู่ 0.34  $\mu\text{m}$  ดังนั้นสารหล่อลื่นมีอิทธิพล ต่อคุณภาพผิวชิ้นงาน และจากการไหลตัวของวัสดุ ไม่มีความแตกต่างกันมาก ในบริเวณภายในของเนื้อวัสดุ ซึ่งนั้น แสดงให้เห็นว่าสารหล่อลื่นนั้นไม่ได้รับอิทธิพลต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุ

**คำหลัก** การอัดขึ้นรูป สารหล่อลื่น คุณภาพผิวงาน

**Abstract**

Cold – Extrusion of aluminium provides better shape and surface finish than Hot – Extrusion and may to reduce production cost of the extrusion process. The thesis presents effect of different natural lubricants to the cold extrusion, it cheaper and easily to find than synthetic base oil. The results of this thesis was cold extrusion die which able to used as teaching materials and study of compare of factors, lubricants can reduce force to use extrusion, mineral oil was the best minimum for forced to use extrusion as different as don't use lubricants was 0.58 ton and

lubricants could reduced roughness surface, soy oil was the best minimum for roughness surface as different as didn't use lubricants was 0.34  $\mu\text{m}$  and materials flowing was similar for didn't used lubricants and used lubricants, so lubricant is ineffective for materials flowing.

**Keywords:** extrusion lubricants roughness

## 1. บทนำ

ในกระบวนการดัดขึ้นรูป พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะจะถูกลด หรือถูกเปลี่ยนโดยใช้แรงกดให้แท่งโลหะไหลผ่านแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างแน่นอน ซึ่งสิ่งสำคัญที่ต้องการจากกระบวนการนี้คือเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมทางกลตามต้องการคุณสมบัติของโลหะที่ปราศจากข้อบกพร่อง และ รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ กระบวนการดัดขึ้นรูปสามารถทำได้ทั้งอุณหภูมิปกติของวัสดุคือ การดัดขึ้นรูปสภาพเย็น (cold extrusion) หรือทำให้วัสดุอุณหภูมิสูงขึ้น (hot extrusion) ตามสภาวะที่เหมาะสม ในการดัดขึ้นรูป กระบวนการดัดขึ้นรูปในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การดัดขึ้นรูปโดยตรง (direct extrusion) และการดัดขึ้นรูปโดยอ้อม (indirect extrusion) [1] โลหะส่วนใหญ่สามารถทำการดัดขึ้นรูปได้หลายวิธี ตามความเหมาะสม ซึ่งโลหะทั่วไปที่สามารถดัดขึ้นรูปได้ทั้งอุณหภูมิปกติคือ ตะกั่ว อลูมิเนียม และทองแดง การดัดขึ้นรูปในสภาพเย็นของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (cold extrusion of non-ferrous components) สามารถทำได้ง่ายเพราะ ใช้แรงในการขึ้นรูปหรือทำให้โลหะเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่าโลหะกลุ่มเหล็กตัวแปรหลักๆ ในกระบวนการดัดขึ้นรูป คือ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมุมดาบ (dies angle) ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของดาบกับชิ้นงาน และความเร็วในการดัดขึ้นรูป ในส่วนของความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสมีผลกระทบโดยตรงกับแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป และความเสียหายที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิดรอยร้าวภายในบางครั้ง ในทางทฤษฎีเราสามารถ กำหนดอัตราส่วนการลดขนาด และสภาวะความเสียดทานที่แน่นอนเพื่อที่จะใช้แรงในการดัดขึ้นรูป และความเค้นที่น้อยที่สุดได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ไม่สามารถนำกระบวนการดัดขึ้นรูปที่มุมดาบนี้ไปใช้ได้ เพราะจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติอย่างอื่นประกอบกันด้วยเช่น คุณภาพผิว ความเที่ยงตรงของขนาด การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน

ภายหลังการดัดขึ้นรูป ซึ่งกรณีนี้ถ้าการบิดเบี้ยวมีมากก็หมายความว่าชิ้นงานจะไม่สามารถใช้งานได้ ส่งผลต่อต้นทุน ในกระบวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นได้ ค่าความแข็งเป็นเกณฑ์อย่างหนึ่งที่ใช้ในการเลือกวัสดุ เพื่อที่จะได้ชิ้นงานที่ทนต่อการสึกหรอและเครื่องมือที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน [2] Onawola, O.O. and Adeyemi, M.B. [3] ได้ศึกษาการอัดขึ้นรูปอลูมิเนียม โดยให้ความสนใจต่อแปรผันอุณหภูมิ และอัตราการขึ้นรูปต่ำ หรือเรียกว่า Low Strain rate ในงานอัดขึ้นรูปอุ่น ซึ่งได้ให้อุณหภูมิช่วง 30-250 องศาเซลเซียส Caminaga, C. and et al. [4] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาสารหล่อลื่นมาใช้ในงานอัดขึ้นรูปเย็นของแท่งเหล็ก โดยศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแรงในการอัดขึ้นรูป และคุณภาพของชิ้นงาน Chen, D.C. and et al. [5] ทำการวิเคราะห์การการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติของกระบวนการขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียม โดยการใช้โปรแกรม DEFORM™ 3D Ishikawa, T. and et al. [6] ทำการศึกษาการไหลตัวของอลูมิเนียมผสมบรอนซ์ และ โครงสร้างในการอัดขึ้นรูปโดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับกรณีจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมโดยใช้สารหล่อลื่นตามธรรมชาติเพื่อลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ตัวแปรของสารหล่อลื่นตามธรรมชาติที่นำมาศึกษาคือชนิดของสารหล่อลื่นจากธรรมชาติที่มีความแตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่ออย่างไรกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียม และการไหลตัวของวัสดุว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดภายหลังจากผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูป

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

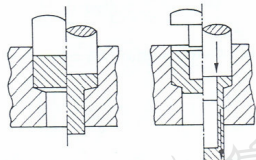
### 2.1 กระบวนการอัดขึ้นรูป

การอัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการขึ้นรูปภายในเนื้อโลหะ โดยการใช้แรงที่สูงกดลงบนเนื้อโลหะให้เกิดการไหลตัว การขึ้นรูปจะเป็นไปภายใต้อุณหภูมิปกติ ซึ่งก็คือการอัดขึ้นรูปเย็น



การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ซะอำ เพชรบุรี

งานที่ได้จะมีผิวสวยและมีขนาดความเที่ยงตรงสูงในบางกรณีของการขึ้นรูปขึ้นต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูง เช่น งานที่มีเกรดการขึ้นรูปโต เพื่อเป็นการลดแรง การขึ้นรูปก็จะเปลี่ยนเป็นการอัดขึ้นรูปร้อน โดยการให้ความร้อนวัสดุคืบที่อุณหภูมิขึ้นรูป ผลผลิตที่ได้รับจะมีขนาดความเที่ยงตรงลดลง การเกิดสะเก็ดเนื่องจากการเผาทำให้ชิ้นงานมีผิวหยาบ การอัดขึ้นรูปแบบตาม การเคลื่อนตัวของตัวกดและการไหลของเนื้อ โลหะมีทิศทางเดียวกัน เนื้อโลหะจะถูกกดด้วยแรงดันสูงให้ไหลตัวไปทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของตัวกดรูปร่างภายนอกของงานเป็นไปตามรูปร่างภายในของแม่พิมพ์ ดังแสดงใน รูปที่ 4



รูปที่ 1 แสดงรูปแบบอัดขึ้นรูปแบบตาม [7]

## 2.2 สารหล่อลื่น

แต่ละสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลองนั้นมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ค่าความหนืด ความหนาแน่นเป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าความหนืด และความหนาแน่นของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง [8]

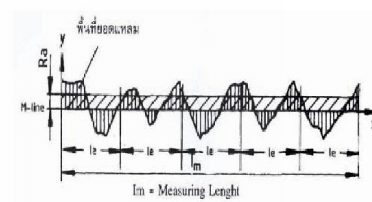
สารหล่อลื่น	ความหนืด (cSt)	ความหนาแน่น ( $g/cm^3$ )
น้ำมันแร่	30.6	0.865
น้ำมันถั่วเหลือง	57.2	0.918
น้ำมันมะพร้าว	51.9	0.915

## 2.3 คุณภาพผิวงาน

การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวงานตามมาตรฐานของ ISO 4287 การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวงานที่

ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว ในหน่วยนี้จะ กล่าวถึงเฉพาะค่าความหยาบ Ra เท่านั้น

กรณีค่าความหยาบ Ra หมายถึง ค่าความหยาบผิวที่หาได้จากกรรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง หาด้วยความยาวเฉลี่ย (Lm) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตรดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวัดค่าความหยาบ Ra [9]

## 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ

ลำดับที่	รายละเอียด
1	เครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 80 ตัน
2	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียม
3	น้ำมันแร่, น้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันมะพร้าว
4	อุปกรณ์เก็บข้อมูล (Mini data logger)
5	อุปกรณ์วัดความหยาบผิว (Surface roughness)
6	เครื่องวัดเหล็ก
7	กล้อง microscope



3.2 วิธีทำการทดลอง

- ทำการคำนวณหาการลดขนาดและความยาวของชิ้น

ทดสอบ แรง ในการขึ้นรูป

เกรดการฟอร์มตัว

$$\begin{aligned} \epsilon_n &= \left( \ln \frac{A_0}{A} \right) \times 100\% \\ &= \left( \ln \frac{201.06}{122.76} \right) \times 100\% \end{aligned}$$

= 49 %

แรงขึ้นรูป F

$$\begin{aligned} F &= \frac{A_0 \times k_m \times \epsilon_n}{n_F} \\ &= \frac{201.06 \times 225.83 \times 0.49}{0.5} \\ &= 44497.3 \text{ N} \\ &= 4.53 \text{ T} \end{aligned}$$

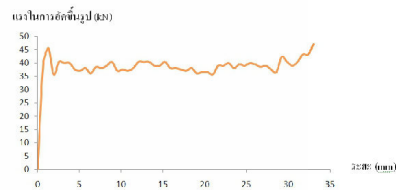
- ตัดชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 16 มม. ให้มีความยาวไม่น้อยกว่า 37 มม. ด้วยการเลื่อยมือ
- ทำการกลึงปาดหน้าชิ้นงานให้เรียบ โดยให้มีความยาวอยู่ที่ 37 มม.
- การประกอบและติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องเพรสไฮดรอลิกส์ขนาด 80 ตันและการปรับตั้ง (Limit switch) ตามความลึกของชิ้นงาน
- ทดสอบการอัดขึ้นรูป
- เตรียมชิ้นงานที่จะทำการอัด ใต้น้ำมันหล่อลื่น
- ทำการอัดขึ้นรูปและบันทึกแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป

- วิเคราะห์ผลการทดสอบ

4. ผลการทดลองและการวิจารณ์

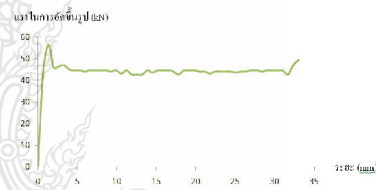
4.1 ผลการทดลอง

กราฟแสดงแรงอัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น ดังแสดง ในรูปที่ 8



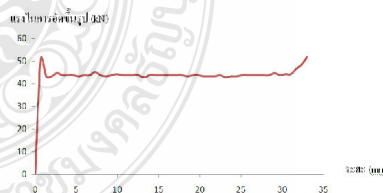
รูปที่ 8 กราฟแสดงแรงที่ได้จากการใช้น้ำมันแร่เป็นสารหล่อลื่น

กราฟแสดงแรงอัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ดังแสดง ในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงแรงที่ได้จากการใช้น้ำมันถั่วเหลือง

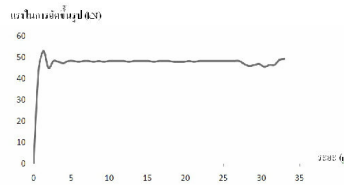
เป็นสารหล่อลื่น กราฟแสดงแรงอัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ดังแสดง ในรูปที่ 10



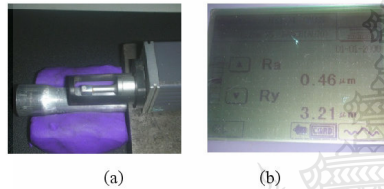
รูปที่ 10 กราฟแสดงแรงที่ได้จากการใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น



กราฟแสดงแรงอัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นสารหล่อลื่น ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟแสดงแรงที่ได้จากไม่ใช้สารหล่อลื่น



รูปที่ 12 วิธีการวัดค่าความหยาบผิว (a) และค่า Ra ที่อ่านได้จากเครื่องวัดค่าความหยาบผิว (b)

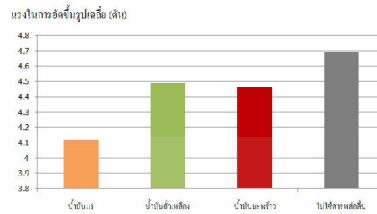
ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการ ในการวัดค่าความหยาบผิว และนำมาเปรียบเทียบในแต่ละสารหล่อลื่น

ชิ้นงานที่	ค่าความหยาบผิว (μm)			
	น้ำมันแร่	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะพร้าว	ไม่ใช้สารหล่อลื่น
1	0.55	0.25	0.61	0.83
2	0.76	0.27	0.33	0.54
3	0.57	0.41	0.65	0.58
เฉลี่ย	0.63	0.31	0.53	0.65

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

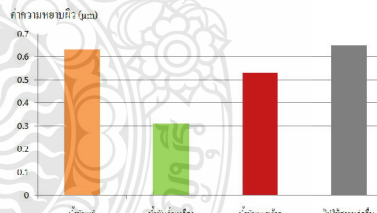
จากผลการทดลองสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผล ได้ดังแสดง ในรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบแรงในการขึ้นรูปของแต่ละสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 13 สามารถศึกษาผลกระทบของตัวแปรคือสภาพการหล่อลื่นของชิ้นงานโดยเปรียบเทียบดังนี้คือ น้ำมันแร่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว และไม่ใช้สารหล่อลื่นในการขึ้นรูป เมื่อเปรียบเทียบแรงกดในการขึ้นรูปของชิ้นงานจะ ได้ค่าของแรงกดของแต่ละสารหล่อลื่น โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ ไม่ใช้สารหล่อลื่น > น้ำมันถั่วเหลือง > น้ำมันมะพร้าว > น้ำมันแร่ จะได้ว่าสารหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีผลต่อการขึ้นรูป ดังนั้นจากการศึกษาครั้งนี้พบได้ว่าในการ ใช้แรงอัดในการขึ้นรูปสารหล่อลื่นน้ำมันแร่ให้ผลที่ดีที่สุด โดยใช้แรงน้อยที่สุดคือ 40.4172 kN หรือประมาณ 4.12 T

การวิเคราะห์ความหยาบผิวที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป ดังแสดง ในรูปที่ 14



รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของชิ้นงานในแต่ละสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 14 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของแต่ละสารหล่อลื่น โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ไม่ใช้สารหล่อลื่น > น้ำมันแร่ > น้ำมันมะพร้าว > น้ำมันถั่วเหลือง จะเห็นได้ว่าการที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นในการอัดขึ้นรูปเย็นอูมิเนี่ยมนั้นจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหยาบมาก



ตรงกันข้ามกับสารหล่อลื่นน้ำมันฉ่ำเหลืองซึ่งให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด คือ 0.31  $\mu\text{m}$  เพราะฉะนั้นสารหล่อลื่นซึ่งมีความหนืดมากเท่าไรผิวก็จะมากขึ้นมากเท่านั้นแต่ในทางตรงกันข้ามก็จะใช้แรงในการอัดมากขึ้น

#### การวิเคราะห์การไหลตัวของวัสดุ

การศึกษาการไหลตัวของวัสดุ ทำได้โดยการนำชิ้นงานไปทำการกัดผ่าครั้ง แล้วทำการขัดให้เรียบ จึงนำไปกัดครดแล้วนำไปส่องดูที่กล้อง microscope เพื่อดูการไหลตัวของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองในการดูการไหลตัว และนำมาเปรียบเทียบกับแต่ละสารหล่อลื่น

วัสดุชิ้นงาน	สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ			
	น้ำมัน	น้ำมันพืช	น้ำมันข้าว	ไขมันหมู
ความเรียบ				
ความมันวาว				
เนื้อผิวละเอียด				

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ในแต่ละสารหล่อลื่นนั้นทิศทางการไหลตัวของอลูมิเนียมนั้นก็จะมีทิศทางเดียวกัน จะสังเกตได้ว่าก่อนที่จะมีการเปลี่ยนขนาดขอบเกรนของเนื้ออลูมิเนียมจะมีลักษณะค่อนข้างใหญ่ และมีขนาดใกล้เคียงกันทั้งบริเวณ เมื่อทำการอัดขึ้นรูปในช่วงของระหว่างการเปลี่ยนขนาดนั้น จะสังเกตได้ว่าขอบเกรนจะค่อยๆอัดตัวกันบริเวณขอบผิวของอลูมิเนียม และจะอัดแน่นเข้าสู่ศูนย์กลางลดลง นั่นคือการเสียรูปร่างอย่างฉับพลันเนื่องจากในผลึกอลูมิเนียมมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยกลไกเลื่อนไถล ส่งผลให้ขอบเกรนบริเวณผิวของอลูมิเนียมนั้นค่อยๆอัดตัวเล็กลงส่งผลให้มีความหนาแน่นมากขึ้น จากนั้นเมื่อถึงช่วงเปลี่ยนขนาดแล้ว จะพบว่าบริเวณผิวของชิ้นงานขอบเกรนอัดตัวแน่นแต่บริเวณแกนในของอลูมิเนียมขอบเกรนยังมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณขอบผิว นั่นก็คือบริเวณแกนในแทบจะไม่มีผลกระทบต่อการอัด ดังนั้นจากการศึกษาการไหลตัวของสารหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด เมื่อเทียบกับไม่ใช้สารหล่อลื่น

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555  
17-19 ตุลาคม 2555 ซะอำ เพชรบุรี

จะไม่เห็นความแตกต่างกันเลย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสารหล่อลื่นไม่มีผลต่อการไหลตัวของวัสดุ

#### 5. สรุปผล

จากผลการทดลองเราจะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการทดลองอัดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบโดยใช้สารหล่อลื่นจากธรรมชาติที่แตกต่างกันนั้น สามารถสรุปได้ว่า แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปขึ้นนั้นจะสังเกตได้ว่าสารหล่อลื่นจากธรรมชาติที่ให้ค่าน้อยที่สุดเป็นน้ำมันแร่ ซึ่งมีค่าความแตกต่างกับไม่ใช้สารหล่อลื่น 0.58 ตัน ดังนั้นสารหล่อลื่นมีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปค่าความหยาบหรือคุณภาพผิวงานพบว่าสารหล่อลื่นธรรมชาติที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ น้ำมันฉ่ำเหลือง และส่วนการไหลตัวของวัสดุเมื่อนำชิ้นงาน ไปส่องดูโครงสร้างหลังการทดสอบแล้วพบว่าไม่มีความแตกต่างกันมาก ในบริเวณภายในของเนื้อวัสดุ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารหล่อลื่นไม่มีอิทธิพลต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุเลย ดังนั้นสารหล่อลื่นตามธรรมชาติที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปขึ้นอลูมิเนียม ควรเลือกน้ำมันฉ่ำเหลืองเนื่องจากผิวชิ้นงานที่มีคุณภาพดีกว่าและแรงที่ต่างกันไม่มากนัก

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มทร. ชัยบุรีงบประมาณปี 2555 และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ชัยบุรี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Lange, K. (1985). Metal Forming Handbook., New York : McGraw-Hill.
- [2] Schuler GmbH. (1998). Metal Forming Handbook. Berlin : Springer.
- [3] Onawola, O.O. and Adeyemi, M.B., 2003, Warm Compression and extrusion tests of aluminium, Journal of Materials Processing Technology 136 : pp. 7-11





- [4] Caminage, C. Neves, F.O. Gentile, F.G. and Buttom, S.G.,2007, Study of alternative lubricants to the cold extrusion of steel shafts, *Journal of Material Processing Technology* 182:pp.432-439
- [5] Chen,D.C. Syu, S.K. Wu, C.H. and Lin,S.K.,2007, Investigation into cold extrusion of aluminum billets using three-dimension finite element method, *Journal of Materials Processing Technology* 192-193:pp.188-193.
- [6] Ishikawa, T. Sano, H. Yoshida, Y.Yukawa N. Sakamoto J. and Tozawa, Y.,2006, Effect of Extrusion Conditions on Metal Flow and Microstructures of Aluminum Alloys, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Volume 55, Issue 1, Page : 275-278
- [7] ดำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริ. 2538. การขึ้นรูปโลหะ. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [8] เกษม ธรรมโกศล. 2546. อิทธิพลของสารหล่อลื่นของแข็งต่อการหล่อเส้นแบบเทอร์โมออลาสโตไดรอปไดนามิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] ชีระชัย เข้าสกุล. 2541. เขียนแบบเทคนิค 1, บริษัท ดวงกมลสมัย จำกัด, กรุงเทพมหานคร

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายวิสุทธิ์ ชัยโก
วัน เดือน ปีเกิด	4 มีนาคม พ.ศ. 2516
ที่อยู่	57 หมู่ 2 ต.น้ำพุ อ.บ้านนาสาร จ.สุราษฎร์ธานี 84120
การศึกษา	
พ.ศ. 2541	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2555 - ปัจจุบัน	ตำแหน่ง ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรมและตัวแทนฝ่ายบริหาร บริษัท Thai Mihara Co.,Ltd.
พ.ศ. 2544 - พ.ศ. 2545	ตำแหน่ง หัวหน้าแผนกฝ่ายวิศวกรรม บริษัท Wako Sangyo Thailand Co.,Ltd.
พ.ศ. 2541 - พ.ศ. 2543	ตำแหน่ง วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัท V.P.S. Industries Co.,Ltd.

