

การวิเคราะห์การอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุน

ANALYSIS OF FORWARD EXTRUSION THROUGH STEADILY
ROTATING DIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-030-219

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์การอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุน

**ANALYSIS OF FORWARD EXTRUSION THROUGH STEADILY
ROTATING DIES**



อดิศักดิ์ ชมมิ

ADISAK CHOMMI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**82726**
วัน,เดือน,ปี.....**22 ก.ค. 2551**

| |
|--------|
| b..... |
| i..... |

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
พ.ศ.2551

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2008-EN-M-030-219

**ANALYSIS OF FORWARD EXTRUSION THROUGH STEADILY
ROTATING DIES**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2008

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2008-EN-M-030-219



COPYRIGHT 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า


SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์การอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุน
Analysis of Forward Extrusion Through Steadily Rotating Dies
นักศึกษา นายอดิศักดิ์ ชมมิ
รหัสประจำตัว 46060423
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|--------------|--|
| รศ.ดร.จำลอง | ปราบแก้ว |  |
| ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ | พิมสาร |  |
| ผศ.ดร.อนุรัตน์ | พิน โสภณ |  |
| รศ.ดิลก | ศรีประไพ |  |
| รศ.สมชัย | นรเศรษฐ์โสภณ |  |

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 12 พฤษภาคม 2551 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 5 ชั้น 5 อาคาร A

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.รวีวรรณ ชินะตระกูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานวันที่.....เดือน.....พ.ศ..... การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การวิเคราะห์การอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุน |
| นักศึกษา | นายอดิศักดิ์ ชมมิ |
| รหัสประจำตัว | 46060423 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| พ.ศ. | 2551 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ |

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอ การวิเคราะห์การอัดรีดแบบไปด้านหน้าแม่พิมพ์หมุน โดยพิจารณาตัวแปร ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด สภาพความเสียดทาน และความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่ต่างกัน โดยทำการพิจารณาค่าความเค้นและแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป และค่าความแข็งภายในหน้าตัดของชิ้นงานจากการทดลอง และค่าความเค้นตกค้างของชิ้นงานจากการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการอัดรีดขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบอัดรีดไปหน้าหน้าผ่านแม่พิมพ์รูปกรวย โดยใช้ลูมิเนียม 6063 เป็นชิ้นงานในการทดสอบ ซึ่งผลที่ได้ทั้งจากการทดลองจริงและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า แรงและความเค้นที่ใช้ในการอัดรีดลดลงเมื่อมีการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่มีการหมุน และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของแม่พิมพ์แรงขึ้นรูปก็ลดลงมากขึ้นด้วย รวมทั้งค่าความแข็งจากการทดสอบโดยมีค่ามากขึ้นที่ผิวแต่ที่กลางแท่งชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ค่าความเค้นตกค้างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบของแม่พิมพ์เช่นกัน และพบว่าการเกิดความเค้นเฉือนบิดที่ชิ้นงานเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Analysis of Forward Extrusion Through Steadily Rotating Dies |
| Student | Mr.Adisak Chommi |
| Student ID. | 46060423 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Mechanical Engineering |
| Year | 2008 |
| Thesis Adviser | Assoc.Prof.Somchai Norasetthasopon |

ABSTRACT

This research presents forward extrusion through steadily rotating dies. The process variables are die half angle, reduction ratio in area, friction condition and rotating speed of dies to determined stress extrusion force and hardness by experiment and determined residual stress by finite element method also. The extrusion method used in this study is forward extrusion through conical die. The billet materials were 6063 aluminum rod. Results from experiment and finite element method showed die rotation was increase while decrease the extrusion force. Hardness of aluminum billet increases as die rotating speed increase, but it increase significantly only near the outer surface. Residual stress increase as die rotating speed increase that was determined by finite element method and die rotation was shown impose a twist shear stress into the partially extruded billet.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ไขปัญหาลดลงจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ศ.คาศินีริ โยชิตะ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น ที่เป็นผู้เริ่มต้นการให้คำสอนและคำแนะนำการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงสามารถนำมาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ได้สำเร็จ

ขอขอบคุณ อาจารย์วรรณชัย จิตรา และคุณคัมภีร์ ศิริคะเนรัตน์ นายช่างเทคนิค ประจำห้องปฏิบัติการโลหการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณ คุณแสงเพชร งอนชัยภูมิ นายช่างเทคนิคประจำห้องปฏิบัติการฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณสมชัย ตันจวิรุพห์ น้องที่ให้คำปรึกษาในการทำเครื่องมือทดลอง และให้ความช่วยเหลือต่างๆทางด้านการศึกษา รวมทั้งเพื่อน พี่ และน้อง ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ร่วมศึกษาและช่วยเหลือด้วยกันมาตลอดจนจบการศึกษาได้

ขอขอบคุณ คุณชาญ อินทร์สมบัติ แห่ง บริษัท วุฒิชัยชาญ เอ็นจิเนียริง จำกัด จังหวัดสมุทรสงคราม ที่เป็นผู้สร้างเครื่องมือทดลองในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และช่วยแก้ไขปัญหของเครื่องทดสอบให้สามารถทำการทดลองได้สำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณถัดดาวลัย แซ่เจีย ที่เป็นผู้อยู่เบื้องหลังและเป็นกำลังใจให้ จนถึงวันสุดท้ายของการศึกษาและทำวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จ รวมทั้งครอบครัวที่คอยให้ความช่วยเหลือ

สุดท้ายนี้คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดาซึ่งเป็นที่เคารพรักยิ่ง คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนทุนการศึกษา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

อดิศักดิ์ ชนมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | IX |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | XVI |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปัญหา..... | 2 |
| 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา | 2 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.6 ขั้นตอนการศึกษา..... | 3 |
| บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| บทที่ 3 กระบวนการขึ้นรูปโลหะ..... | 26 |
| 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ..... | 27 |
| 3.2 กระบวนการหล่อโลหะ..... | 33 |
| 3.3 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผง..... | 33 |
| 3.4 กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยแรง..... | 34 |
| 3.4.1 การอัดรีดขึ้นรูป | 35 |
| 3.4.1.1 การอัดรีดขึ้นรูปโดยตรง | 35 |
| 3.4.1.2 การอัดรีดขึ้นรูปโดยอ้อม | 36 |
| 3.4.1.3 การอัดรีดขึ้นรูปแบบกระแทก | 36 |
| 3.4.1.4 ทฤษฎีของการอัดรีดขึ้นรูปของการอัดรีดขึ้นรูปโดยตรง..... | 38 |
| 3.4.1.4.1 การวิเคราะห์การอัดรีดขึ้นรูปโดยวิธีงานอุคมคติ..... | 40 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 3.4.1.4.2 วิธีการสมดุลแรงหรือวิธีแบ่งช่วง | 42 |
| 3.5 กระบวนการตัดเศษวัสดุ | 45 |
| บทที่ 4 การทดลองและวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 47 |
| 4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... | 47 |
| 4.1.1 อลูมิเนียม..... | 47 |
| 4.1.2 วัสดุสารหล่อลื่น | 49 |
| 4.1.2.1 โซเดียมสเตียเรต..... | 49 |
| 4.1.2.2 น้ำมันหล่อลื่น SAE40..... | 49 |
| 4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและทดสอบ | 50 |
| 4.2.1 เครื่องทดสอบวัสดุ..... | 51 |
| 4.2.2 เครื่องทดสอบค่าความแข็ง | 51 |
| 4.2.3 เครื่องอัดรีดขึ้นรูปที่แม่พิมพ์หมุนได้..... | 51 |
| 4.2.3.1 ชุดแม่พิมพ์..... | 53 |
| 4.2.3.2 หัวกดและเข้าประคอง..... | 53 |
| 4.2.3.3 ชุดขับเคลื่อนการหมุน..... | 54 |
| 4.3 แผนการทดลอง | 57 |
| 4.4 ขั้นตอนการทดลอง | 58 |
| 4.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานหรือแท่งอลูมิเนียม | 58 |
| 4.4.2 ขั้นตอนระหว่างการอัดรีด..... | 59 |
| 4.4.3 ขั้นตอนภายหลังการอัดรีด..... | 59 |
| 4.5 วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 59 |
| 4.5.1 การสร้างแผนภาพโครงข่ายเอลิเมนต์..... | 60 |
| 4.5.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต..... | 61 |
| 4.5.3 การกำหนดสมบัติของวัสดุ..... | 61 |
| 4.5.4 การกำหนดลักษณะของผิวสัมผัส..... | 61 |
| 4.5.5 การหาผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม..... | 61 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเข้าถึงที่จำกัดโดยไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำ

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล..... | 62 |
| 5.1 ผลการทดลอง..... | 62 |
| 5.1.1 ความเค้นในการอัดรีด..... | 62 |
| 5.1.2 ความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม..... | 84 |
| 5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์..... | 99 |
| 5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง..... | 107 |
| บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ..... | 115 |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง..... | 115 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ..... | 117 |
| บรรณานุกรม..... | 118 |
| ภาคผนวก..... | 120 |
| ภาคผนวก ก. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์..... | 121 |
| ภาคผนวก ข. ภาพการกระจายความเค้นในชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูป..... | 129 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 135 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2.1 | สรุปผลการทดลองการอัดรีดขึ้นรูปแท่งตะกั่วผ่านแม่พิมพ์หมุนของ Ma และคณะ.....9 |
| 4.1 | ส่วนประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมที่ได้จากการทดสอบ (% โดยน้ำหนัก).....48 |
| 4.2 | สมบัติเฉพาะของ Al 6063.....48 |
| 4.3 | แสดงคุณสมบัติเฉพาะของโซเดียมสเตียเรต.....50 |
| 4.4 | รายละเอียดของมอเตอร์ไฟฟ้า.....54 |
| 4.5 | แสดงรายละเอียดของชุดเฟืองเจียงและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่ได้.....55 |
| 4.6 | แสดงแผนการทดลอง.....57 |
| 4.7 | แสดงแผนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์.....60 |
| 5.1 | แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต $r_e = 20$ และ 30%.....64 |
| 5.2 | แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20$ และ 30%.....67 |
| 5.3 | แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต $r_e = 20$ และ 30%.....71 |
| 5.4 | แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20$ และ 30%.....74 |
| 5.5 | แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 45^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต $r_e = 20$ และ 30%.....78 |
| 5.6 | แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20$ และ 30%.....81 |
| 5.7 | ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต...86 |
| 5.8 | ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40.....88 |
| 5.9 | ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต.90 |
| 5.10 | ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40.....92 |
| 5.11 | ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 45^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต.94 |
| 5.12 | ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 45^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40.....96 |
| 5.13 | แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.07$ $r_e = 20$ และ 30%.....100 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.14 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.3$ $r_e = 20$ และ 30%..... | 100 |
| 5.15 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ $\mu = 0.07$ $r_e = 20$ และ 30%..... | 103 |
| 5.16 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ $\mu = 0.3$ $r_e = 20$ และ 30%..... | 103 |
| 5.17 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 45^\circ$ $\mu = 0.07$ $r_e = 20$ และ 30%..... | 105 |
| 5.18 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 45^\circ$ $\mu = 0.3$ $r_e = 20$ และ 30%..... | 106 |
| 5.19 รูปทรงอัดรีดที่ใช้สูงสุดและต่ำสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบ ของแม่พิมพ์ที่อัตราส่วนการลดขนาด $r_e = 20\%$ | 109 |
| 5.20 รูปทรงอัดรีดที่ใช้สูงสุดและต่ำสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบ ของแม่พิมพ์ที่อัตราส่วนการลดขนาด $r_e = 30\%$ | 110 |
| 5.21 รูปทรงความแข็งที่ผิวต่ำสุดและสูงสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบ ของแม่พิมพ์ที่อัตราส่วนการลดขนาด $r_e = 20\%$ | 112 |
| 5.22 รูปทรงความแข็งที่ผิวต่ำสุดและสูงสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบ ของแม่พิมพ์ที่อัตราส่วนการลดขนาด $r_e = 30\%$ | 113 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 2.1 | ลักษณะของการอัดรีดแบบไปด้านหน้าและแบบสวนทาง 6 |
| 2.2 | แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแรงและระยะการเคลื่อนที่ของแท่งอลูมิเนียม 40 มิลลิเมตร a) การอัดรีดขึ้นรูปไปด้านหน้า (b) การอัดรีดขึ้นรูปสวนทาง..... 6 |
| 2.3 | แรงที่ใช้ในการอัดรีดตามความยาวแท่งอลูมิเนียม (a) 20; (b) 30; (c) 40 มิลลิเมตร 7 |
| 2.4 | แสดงแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปความยาวแท่งเหล็ก 40 มิลลิเมตรจากการทดลอง 7 |
| 2.5 | กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบของแม่พิมพ์กับเปอร์เซ็นต์แรงอัดรีดขึ้นรูปที่ลดลง 9 |
| 2.6 | แสดงการบิดตัวของแท่งตะกั่วภายในเบ้าประคอง..... 10 |
| 2.7 | แสดงการบิดตัวของแท่งตะกั่วภายในแม่พิมพ์ที่หมุน 10 |
| 2.8 | ภาพหน้าตัดและชิ้นงานของแท่ง โลหะภายหลังการอัดรีดขึ้นรูป 14 |
| 2.9 | การทดสอบหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแรงกดของ อลูมิเนียมและตะกั่ว..... 15 |
| 2.10 | แรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปที่เปลี่ยน ไปตามระยะทางของ อลูมิเนียมและตะกั่ว..... 16 |
| 2.11 | การ โกงงของชิ้นงานของตะกั่วเมื่อเทียบกับขนาดมุมแม่พิมพ์ที่ต่างกัน 16 |
| 2.12 | การ โกงงของชิ้นงานของเมื่อเทียบกับการลดขนาดหน้าตัดและความเร็ว 17 |
| 2.13 | ความดันที่ใช้ในการดันเทียบกับอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็ว..... 18 |
| 2.14 | ภาพตัดแสดงรูปแบบการไหลของชิ้นงาน 19 |
| 2.15 | ขนาดและลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง 20 |
| 2.16 | แรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปเมื่อความยาว Die Land มีขนาดต่างกัน 20 |
| 2.17 | ความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป 21 |
| 2.18 | การ โกงงของชิ้นงานหลังการอัดรีดขึ้นรูป 21 |
| 2.19 | ความแข็งที่ผิวแท่งตะกั่วและรูปแบบการไหลหลังการอัดรีดขึ้นรูป..... 22 |
| 2.20 | การจำลองทางไฟในดัดอลิเมนต์และผลที่ได้จากการจำลองกรณีแม่พิมพ์รูปกรวย 23 |
| 2.21 | ความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปเมื่อมีขนาดมุมแม่พิมพ์มากขึ้น 24 |
| 2.22 | การจำลองทางไฟในดัดอลิเมนต์และผลที่ได้จากการจำลองกรณีมุมแม่พิมพ์ 90 องศา..... 24 |
| 2.23 | ความดันที่ได้จากระเบียบวิธีไฟในดัดอลิเมนต์ที่มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้น 25 |
| 3.1 | การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแรงกดของ อลูมิเนียมและตะกั่ว..... 27 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid - Perfectly Plastic..... | 28 |
| 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Elastic - Perfectly Plastic..... | 29 |
| 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic..... | 29 |
| 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic..... | 30 |
| 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Nonlinear Strain Hardening Plastic..... | 31 |
| 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic..... | 31 |
| 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic - Nonlinear Strain Hardening Plastic..... | 32 |
| 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Elastic – Steady State Plastic..... | 33 |
| 3.10 แสดงการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อ..... | 33 |
| 3.11 แสดงการขึ้นรูปวัสดุผง..... | 34 |
| 3.12 แสดงกรรมวิธีการเปลี่ยนรูปด้วยแรง..... | 34 |
| 3.13 แสดงกระบวนการขึ้นรูปวัสดุแบบต่างๆโดยใช้แรงกระทำ..... | 35 |
| 3.14 ลักษณะการอัดรีดขึ้นรูป (a) Direct (b) Indirect (c) Impact extrusion..... | 36 |
| 3.15 กระจัดรีดขึ้นรูปแบบกระแทกในลักษณะต่างๆ..... | 37 |
| 3.16 แสดงระบบที่ใช้แรงดันของเหลวแทนตัวกระทุ้ง..... | 37 |
| 3.17 การอัดรีดขึ้นรูปแบบ Hydrostatic ใช้ของเหลวร่วมกับตัวกระทุ้ง..... | 38 |
| 3.18 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานในการอัดรีดขึ้นรูปแบบโดยตรง..... | 39 |
| 3.19 แสดงตัวแปรพื้นฐานในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปแบบ โดยตรง..... | 39 |
| 3.20 แสดงความเค้นหรือความดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป..... | 41 |
| 3.21 ลักษณะของสแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรง..... | 42 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.22 แสดงแสลบทที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรงเมื่อพิจารณาความเสียดทานระหว่างแท่งโลหะกับเบ้าประคอง | 44 |
| 3.23 แสดงการขึ้นรูปโดยการตัดเฉย (a) การกลึง (b) การเจาะ (c) การกัด | 45 |
| 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบด้วยการอัด (Compression Test) ของแท่งอลูมิเนียม | 49 |
| 4.2 โฆเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นในการอัดรีดขึ้นรูป | 50 |
| 4.3 แสดงภาพด้านหน้าของเครื่องทดสอบวัสดุและไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง | 51 |
| 4.4 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดขึ้นรูป | 52 |
| 4.5 แสดงการออกแบบส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดขึ้นรูปที่แม่พิมพ์หมุนได้ | 52 |
| 4.6 ตัวจับยึดแม่พิมพ์และชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง | 53 |
| 4.7 หัวกดและเบ้าประคองที่ใช้ในการทดลอง | 54 |
| 4.8 แสดงชุดเฟืองทดรอบและเบริงรับแรงตามแนวแกน | 55 |
| 4.9 แสดงการประกอบชิ้นส่วนของเครื่องอัดรีดขึ้นรูปที่แม่พิมพ์หมุนได้ | 55 |
| 4.10 แสดงด้านหน้าของเครื่องอัดรีดขึ้นรูปบนแท่นเครื่องทดสอบ UTM | 56 |
| 4.11 แสดงด้านหลังของเครื่องอัดรีดขึ้นรูปบนแท่นเครื่องทดสอบ UTM | 56 |
| 4.12 แสดงชิ้นงานอลูมิเนียมที่เตรียมสำหรับการทดลอง | 58 |
| 4.13 แสดงแผนภาพโครงข่ายอิทธิพลต่อของชิ้นงาน | 61 |
| 5.1 ลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นกับแท่งอลูมิเนียมในการอัดรีด | 63 |
| 5.2 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดรูป $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่น โฆเดียมสเตียเรต $r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที | 64 |
| 5.3 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่น โฆเดียมสเตียเรต $r_e = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที | 65 |
| 5.4 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่น โฆเดียมสเตียเรต $r_e = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที | 66 |
| 5.5 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที | 68 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เป็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 5.6 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....69 |
| 5.7 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....69 |
| 5.8 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....71 |
| 5.9 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_e = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....72 |
| 5.10 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_e = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....73 |
| 5.11 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....75 |
| 5.12 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....76 |
| 5.13 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....76 |
| 5.14 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....78 |
| 5.15 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_e = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....79 |
| 5.16 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_e = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....80 |
| 5.17 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....82 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิได้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 5.18 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....83 |
| 5.19 | แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที.....83 |
| 5.20 | แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดรีดที่ $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เปรียบเทียบกับระยะเคลื่อนที่ของตัวกด.....84 |
| 5.21 | ลักษณะรอยกดรูปปริมาตรที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็ง.....85 |
| 5.22 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....87 |
| 5.23 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....87 |
| 5.24 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 8^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....89 |
| 5.25 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 8^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....89 |
| 5.26 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....91 |
| 5.27 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....91 |
| 5.28 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....93 |
| 5.29 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....93 |
| 5.30 | ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว.....95 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น ๆ มิใช่ใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำมาใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.31 ค่าความแข็งแรงภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว..... | 95 |
| 5.32 ค่าความแข็งแรงภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 45^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว..... | 97 |
| 5.33 ค่าความแข็งแรงภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว..... | 97 |
| 5.34 เปรียบเทียบความแข็งแรงภายในแท่งอลูมิเนียมจากการอัดรีด ที่ $\alpha = 8^\circ$ 15° และ 45° สารหล่อ โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ | 98 |
| 5.35 แสดงจุดต่ออิมิตที่ภาคตัดขวางของแท่งชิ้นงาน..... | 99 |
| 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 8 องศา $\mu = 0.07$ | 101 |
| 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 8 องศา $\mu = 0.3$ | 102 |
| 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 15 องศา $\mu = 0.07$ | 104 |
| 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 15 องศา $\mu = 0.3$ | 104 |
| 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 45 องศา $\mu = 0.07$ | 106 |
| 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 45 องศา $\mu = 0.3$ | 107 |
| 5.42 ลักษณะแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป..... | 108 |
| 5.43 ภาพขยาย 60 เท่าของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการอัดรีดที่แม่พิมพ์ไม่หมุน ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต..... | 108 |
| 5.44 ภาพขยาย 60 เท่าของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการอัดรีดที่แม่พิมพ์หมุนด้วยความเร็วรอบ 0.940 รอบต่อนาที ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต..... | 109 |
| 5.45 แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ไม่หมุน ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คนแปลกหน้าเข้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ที่ = 20% ใช้สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต..... | 110 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.46 แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ไม่หมุน ที่ = 30% ใช้สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต..... | 111 |
| 5.47 แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ไม่หมุน ที่ = 20% ใช้สารหล่อลื่น SAE40..... | 111 |
| 5.48 แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ไม่หมุน ที่ = 30% ใช้สารหล่อลื่น SAE40..... | 112 |
| 5.49 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของแรงอัดรีดที่ลดลงตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่ เพิ่มขึ้นระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 114 |
| 5.50 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของแรงอัดรีดที่ลดลงตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่ เพิ่มขึ้นระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 114 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์และคำย่อ | ความหมาย | หน่วย |
|----------------------|--------------------------------------|----------|
| α | ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ | องศา |
| μ | สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน | - |
| ν | อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) | - |
| ρ | ความหนาแน่น | kg/m^3 |
| ε | ความเครียด | - |
| σ | ความเค้น | N/m^2 |
| σ_c | ความเค้นอัด | N/m^2 |
| σ_x, σ_y | ความเค้นตามแนวแกน x และ y | N/m^2 |
| r_e | อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด | % |
| A_f | พื้นที่หน้าตัดทางเข้า | m^2 |
| A_o | พื้นที่หน้าตัดทางออก | m^2 |
| D_f | เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า | m |
| D_o | เส้นผ่านศูนย์กลางทางออก | m |
| L | ความยาวแท่งอลูมิเนียม | m |
| F | แรง | N, kN |
| P | ความดัน | N/m^2 |
| τ | ความเค้นเฉือน | N/m^2 |
| Y | ความเค้นจุดครากของวัสดุ | N/m^2 |
| m | น้ำหนัก | kg |
| Al | อลูมิเนียม | - |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานวิจัยและพัฒนาวัสดุเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจในวงการอุตสาหกรรมทั่วโลกมากขึ้นมาโดยตลอดเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางการค้า เพราะทุกสิ่งก่อนที่จะเป็นผลิตภัณฑ์ล้วนผลิตขึ้นจากวัสดุทั้งสิ้น ผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตขึ้นจะต้องพิจารณาเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ และเหมาะสมกับกระบวนการผลิตนั้นๆ เพื่อให้การผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมกับผลิออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการ ซึ่งวัสดุในงานวิศวกรรมอาจแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มหลัก คือ โลหะ เซรามิก โพลีเมอร์ วัสดุผสม (Composite Materials) และวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งในกลุ่มโลหะยังแบ่งย่อยออกเป็น โลหะกลุ่มเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก แม้ว่าโลหะกลุ่มเหล็กจะเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางแต่ภายใต้เงื่อนไขหรือสภาวะบางอย่างเช่น ต้องการน้ำหนักต่อปริมาตรที่เบากว่า หรือต้องการใช้ในสภาวะที่ต้องทนต่อการกัดกร่อน โลหะกลุ่มเหล็กก็ไม่สามารถใช้ตามความต้องการดังกล่าวได้ดี โลหะนอกกลุ่มเหล็กจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ทดแทน แม้โลหะนอกกลุ่มเหล็กในสภาพบริสุทธิ์จะมีคุณสมบัติบางประการที่มีประโยชน์ในทางวิศวกรรม แต่โลหะนอกกลุ่มเหล็กก็ยังมีข้อด้อยอื่นเช่น การขาดความแข็งแรง ดังนั้นจึงมีการแก้ไขข้อจำกัดต่างๆ ของโลหะทั้งสองกลุ่มนี้โดยการนำโลหะกลุ่มเหล็กหรือโลหะนอกกลุ่มเหล็กมาผสมกับสารหรือธาตุอื่นตั้งแต่หนึ่งชนิดขึ้นไป หรือนำโลหะมาผสมกันเองกลายเป็นโลหะผสม (Alloy) ทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป เช่นทำให้มีความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) หรืออุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization Temperature) เปลี่ยนแปลงไปเป็นต้น และโลหะผสมนี้ก็มักเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรมเป็นส่วนใหญ่

เมื่อโลหะผสมได้ถูกนำมาใช้แทนโลหะเดี่ยว เพื่อให้มีคุณสมบัติตรงกับผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการได้แล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาคือวิธีทำให้โลหะผสมเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งนั่นก็คือกระบวนการผลิต (Processing) โดยวิศวกรจะต้องเลือกวิธีการเปลี่ยนโลหะที่เป็นวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม และต้องรู้ว่ากระบวนการผลิตนั้นๆ เกิดผลต่อผลิตภัณฑ์สุดท้ายอย่างไร และนอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตด้วย ซึ่งก่อนที่จะมีการผลิตจริงวิศวกรอาจจะทำการทดลองการผลิตในห้องทดลองก่อน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตสูงสุด แต่ในปัจจุบันได้มีการจำลองกระบวนการผลิตในคอมพิวเตอร์ โดยใช้หลักการและการคำนวณทางทฤษฎีที่ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็เป็นหนึ่งใน

หลักการทางทฤษฎีที่ถูกนำมาใช้ด้วยเช่นกัน และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะ

ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกการขึ้นรูปวัสดุ ด้วยกรรมวิธีการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการขึ้นรูปโลหะ และวิเคราะห์กระบวนการด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีการเปรียบเทียบและพิจารณาร่วมกับการทดสอบในห้องทดลองด้วย ในการศึกษาครั้งนี้ใช้อลูมิเนียมแท่งหน้าตัดกลมซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กเป็นวัสดุเพื่อศึกษาและทดสอบ แท่งอลูมิเนียมที่ใช้ถูกตัดออกเป็นชิ้น จากนั้นนำมาทำการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์รูปกรวย (Conical Dies) ที่มีการหมุน และทำการอัดรีดที่อุณหภูมิห้องในสภาวะตัวแปรที่ต่างกันคือ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัด ความเร็วในการอัดรีด และสารหล่อลื่น เพื่อศึกษาว่าตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปอลูมิเนียมด้วยกรรมวิธีการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุนนี้ ส่งผลอย่างไรต่อสมบัติทางกลของอลูมิเนียมที่นำมาทำการอัดรีด เช่น ค่าความแข็ง โครงสร้างของโลหะ รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของแม่พิมพ์กับแรงที่ใช้ในการอัดรีด ทั้งนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และทดลองอาจนำไปใช้หรือประยุกต์เข้ากับงานอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดียิ่งขึ้นหรือลดต้นทุนในการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ กระบวนการอัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับการทดสอบในห้องทดลอง โดยพิจารณาว่าความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่หมุนมีผลต่อแรงดันที่ใช้ในการอัดรีดหรือไม่ และเปรียบเทียบคุณสมบัติของแท่งอลูมิเนียมหลังจากผ่านการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุนและไม่หมุนว่าแตกต่างกันหรือไม่ โดยมีสมบัติเชิงกลที่พิจารณาคือ ความแข็งของหน้าตัดอลูมิเนียม และความเค้นดกค้างภายในแท่งอลูมิเนียม ตัวแปรที่ใช้ควบคุมในการทดลองคือ ความเร็วรอบแม่พิมพ์ ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และสภาพการหล่อลื่น

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 แท่งอลูมิเนียมที่ใช้ก่อนการทดสอบมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Homogenous)

1.3.2 ขณะทำการอัดรีด แท่งอลูมิเนียมไหลผ่านแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอ

1.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความต้านทานแรงมากกว่าแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการอัด

รีดจึงถือว่าอุปกรณ์การทดลองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะทำการอัดรีด ซึ่งประโยชน์ด้านการคำนวณ

1.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่เปลี่ยนแปลงตามความดันในระหว่างอัดรีดนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

เมื่อแท่งโลหะหน้าตัดกลมถูกแรงกระทำพร้อมกัน (Combined Loading) โดยมีทั้งแรงกดตามแนวแกน (Axial Compression) และแรงบิด (Torsion) จะทำให้แท่งโลหะนั้นมีเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic Deformation) ได้ง่ายกว่าการใช้แรงกดตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากแรงทั้งสองชนิดนี้จะทำให้เนื้อโลหะมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้น และเข้าใกล้ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield) เร็วขึ้น หรือกล่าวได้ว่าหากใช้ความเร็วในการออกแรงกดแท่งโลหะที่เท่ากันแล้ว แท่งโลหะที่ถูกบิดไปพร้อมกับการกดจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก่อนแท่งโลหะที่ไม่ถูกบิด

กระบวนการการอัดรีดแท่งโลหะ เนื้อโลหะจะถูกกดให้ไหลผ่านแม่พิมพ์ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่า แรงที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งในเนื้อโลหะคือแรงกดตามแนวแกน และหากพยายามทำให้เนื้อโลหะเกิดแรงบิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดรีดแล้ว แรงที่ใช้กดแท่งโลหะจะน้อยลงไปด้วย โดยวิธีการที่จะทำให้แท่งโลหะเกิดแรงบิดระหว่างกระบวนการอัดรีดนั้นมีหลายวิธีได้แก่ การหมุนของตัวกด (Punch) การหมุนของเบ้าประกอบชิ้นงาน (Container) และการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งการหมุนของเครื่องมือทั้งหมดนี้ล้วนแต่ใช้ประโยชน์จากแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงานแท่งโลหะ เพื่อสร้างแรงบิดขึ้นมา โดยงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกวิธีการสร้างแรงบิดในระหว่างการอัดรีดด้วยการหมุนของแม่พิมพ์

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 แรงที่ใช้ในการอัดรีดแท่งอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร จำกัดอยู่ที่ 100 kN และมีความเค้นในการอัดรีดไม่เกิน 755 N/mm^2
- 1.5.2 ศึกษาตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปโลหะโดยพิจารณาปัจจัยที่แตกต่างกัน 4 ตัวแปร คือ ขนาดมุมของแม่พิมพ์ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ สภาวะสารหล่อลื่นหรือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด
- 1.5.3 ศึกษาค่าความแข็งภายในของแท่งอลูมิเนียม โดยวัดบนพื้นที่หน้าตัดขวางของชิ้นงาน
- 1.5.4 ศึกษาวิธีการวิเคราะห์การอัดรีดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MARC®

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- เอกสารนี้เป็น 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 1.6.2 ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอย่างจริงจังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.6.3 ทำการออกแบบเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแท่งอลูมิเนียม
ในระหว่างการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุน โดยสร้างขึ้นมาเป็นกรณีพิเศษเพื่อใช้ในการทดลอง
- 1.6.4 ทำการทดลองอัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุน
- 1.6.5 ทำการนำชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดไปทำการทดสอบและวัดค่า
- 1.6.6 ทำการวิเคราะห์การอัดรีดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม MARC®
- 1.6.7 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.6.8 สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยและการทดลองครั้งนี้ เพื่อวิเคราะห์การอัดรีดไปด้านหน้าผ่านแม่พิมพ์หมุนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับการทดลอง ซึ่งได้ทำการศึกษาบทความและผลการวิจัยที่ผ่านมาเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของการศึกษางานวิจัย รวมทั้งใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาและค้นคว้าเพิ่มเติมสำหรับการทดลองหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์หมุน และใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุทดสอบที่นำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของการศึกษางานวิจัย และใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาและค้นคว้าเพิ่มเติมแสดงดังต่อไปนี้

2.1 การทดลองของ Bakhshi และ Jooybari (2002)

ในชื่อเรื่อง A Theoretical and Experimental Study of Friction in Metal Forming by The Used of The Forward Extrusion Process. การทดลองนี้ศึกษาถึงความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับแม่พิมพ์และเบ้าประคอง ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุโดยวิธีอัดรีดแบบดันไปด้านหน้า (Forward Extrusion) และแบบดันสวนทาง (Backward Extrusion) โดยใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุในการทดลองและทำการอัดรีดที่อุณหภูมิห้อง จากกระบวนการอัดรีดแบบดันไปด้านหน้า สามารถแสดงแรงที่ต้องการในการอัดรีดเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ แสดงดังสมการที่ 2.1

$$F_t = F_{fc} + F_{fd} + F_{dd} \quad (2.1)$$

เมื่อ F_t คือ แรงที่ใช้ในการอัดรีด

F_{fc} คือ แรงเสียดทานระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคอง

F_{fd} คือ แรงเสียดทานระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับแม่พิมพ์

F_{dd} คือ แรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งอลูมิเนียมภายในแม่พิมพ์

จากสมการที่ 2.1 รวม F_{fd} และ F_{dd} เข้าไว้ด้วยกันและแทนโดย F_d จะได้สมการใหม่คือ

$$F_t = F_{fc} + F_d \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แรงเสียดทานระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองหาได้จากสมการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{fc} = \tau \pi d_o L \quad (2.3)$$

โดยที่ τ คือ ความเค้นเฉือนระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเข้าประคองมีค่าคือ $\tau = mk$ เมื่อ m คือแฟกเตอร์ของความเสียดทาน, k คือความเค้นเฉือนจากแรงเสียดทาน, L คือความยาวของแท่งอลูมิเนียม, d_o คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเข้าประคอง แทนค่าสมการ 2.3 ลงในสมการที่ 2.2 จะได้ สมการของแรงทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นรูปใหม่คือ

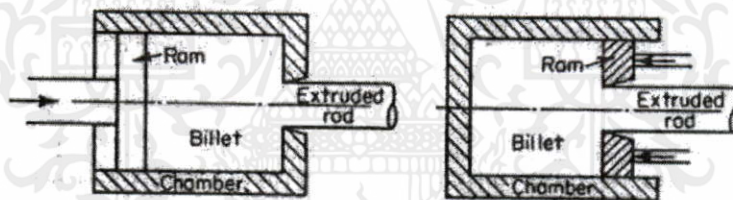
$$F_t = mk\pi d_o L + F_d \quad (2.4)$$

หากพิจารณาการอัดรีดไปด้านหน้าในสมการที่ 2.4 ค่าของ $mk\pi d_o$ และ F_d เป็นค่าคงที่ทั้งหมด เขียนสมการที่ 2.4 ใหม่จะได้

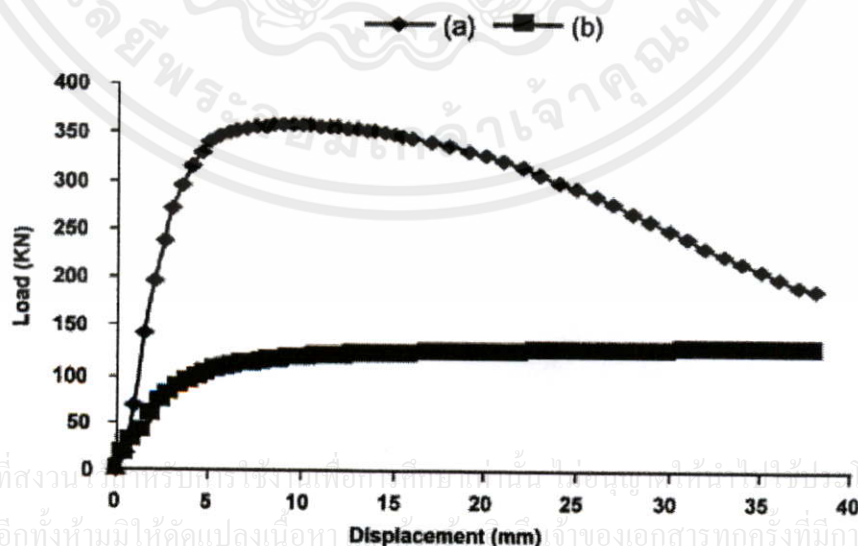
$$F_t = aL + F_d \quad (2.5)$$

เมื่อ $a = mk\pi d_o$

แต่ถ้าเป็นการอัดรีดแบบสวนทาง แท่งอลูมิเนียมจะไม่มีเคลื่อนที่สมการที่ 2.4 จะลดรูปเหลือเพียง $F_t = F_d$ เท่านั้น



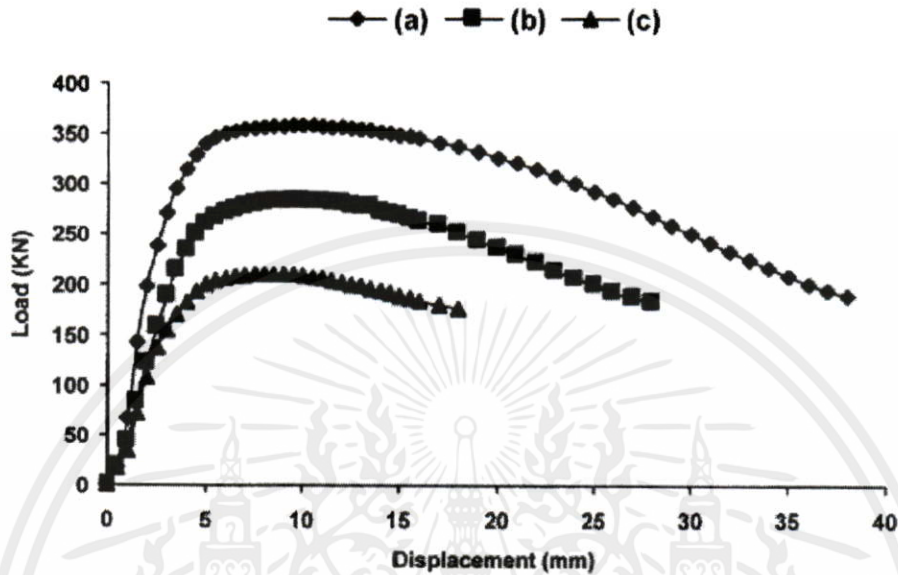
รูปที่ 2.1 ลักษณะของการอัดรีดแบบไปด้านหน้าและแบบสวนทาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

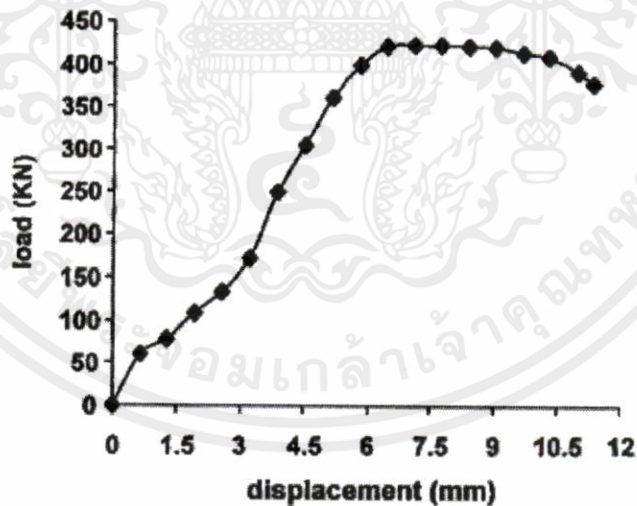
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแรงและระยะการเคลื่อนที่ของแท่งอลูมิเนียม 40 มิลลิเมตร (a) การอัดรีดขึ้นรูปไปด้านหน้า (b) การอัดรีดขึ้นรูปสวนทาง [11]

จากสมการที่ 2.5 พบว่าแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปวัสดุ ขึ้นอยู่กับความยาวของชิ้นงาน แสดงผลในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นผลการคำนวณของการอัดรีดขึ้นรูปแบบไปด้านหน้าของแท่งอลูมิเนียม ที่ความยาว 20 30 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ



Load-displacement curves in forward extrusion of aluminium billets of length: (a) 40 mm; (b) 30 mm; (c) 20 mm.

รูปที่ 2.3 แรงที่ใช้ในการอัดรีดตามความยาวแท่งอลูมิเนียม (a) 20; (b) 30; (c) 40 มิลลิเมตร [11]



Load-displacement curve of 40 mm length steel billet in forward extrusion.

รูปที่ 2.4 แสดงแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปความยาวแท่งเหล็ก 40 มิลลิเมตรจากการทดลอง [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 สรุปผลจากการทดลองอัดรีดขึ้นรูป โดยเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งอลูมิเนียมให้ต่างกัน
 ไม่ว่าจะวิธีใดทางสั้น อีกทงหน้มน ให้คิดแปลงเป็อหา และคองเอางองถึงเจ้าขอ เอกสารทุกค้ง ท้มการนำ ไป ใช้
 พบว่า ความยาวของแท่งอลูมิเนียมส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป โดยที่ความยาวของแท่ง

อลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตาม และจากการอัดรีดขึ้นรูปแบบสวนทางนี้จะใช้แรงน้อยกว่าการอัดรีดขึ้นรูปไปด้านหน้า

2.2 บทความของ Ma และคณะ (2004)

ในชื่อเรื่อง Forward Extrusion Through Steadily Rotating Conical Dies. Part I: Experiments และ Forward Extrusion Through Steadily Rotating Conical Dies. Part II: Theoretical Analysis ในบทความทั้งสองนี้ได้ศึกษาถึงการอัดรีดขึ้นรูปแท่งตะกั่วผ่านแม่พิมพ์หมุนรูปกรวย โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การทดลองและการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การทดลอง

การทดลองของ Ma และคณะในครั้งนี้ ได้มีการพัฒนาปรับปรุงเครื่องมือทดลองต่อจากการทดลองของ Kong และ Hodgson อีกครั้งหนึ่ง ที่ศึกษาเรื่องการอัดรีดขึ้นรูปและดึงขึ้นรูป (Drawing) ผ่านแม่พิมพ์ที่มีการหมุนแบบกลับไปมา (Cyclic Rotating) ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดกลับไปมาด้วย โดยการทดลองของ Ma และคณะได้ทำการทดลองผ่านแม่พิมพ์หมุนแบบทิศทางเดียว (Monotonically Rotating) เช่นเดียวกันกับงานวิจัยฉบับนี้ แต่งานวิจัยของ Ma และคณะมุ่งเน้นศึกษาผลของแรงดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์หมุน และทดลองหามุมบิดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เป็นแท่งตะกั่วเท่านั้น โดยผลจากการทดลองค้นแท่งตะกั่วผ่านแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ ตามขนาดมุมของแม่พิมพ์ ได้ผลสรุปตามตารางที่ 2.1 ซึ่งการทดลองที่มุมของแม่พิมพ์ 45° แม่พิมพ์จะหมุนคงที่ตลอดเวลาที่ทำการอัดรีดขึ้นรูป แตกต่างกับการทดลองที่มุมของแม่พิมพ์ 90° ที่กำหนดให้แม่พิมพ์เริ่มหมุนเมื่อได้อัดรีดขึ้นรูปชิ้นงานไปแล้วครึ่งหนึ่ง

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่า หากเพิ่มความเร็วรอบของแม่พิมพ์จะทำให้แรงดันที่ใช้อัดรีดขึ้นรูปลดลงตามไปด้วย และเป็นที่น่าสนใจว่า เมื่อไม่มีการหล่อลื่นแรงดันที่ใช้ขึ้นรูปนั้นกลับน้อยกว่าการใช้น้ำมันหล่อลื่นขณะอัดรีดขึ้นรูป ซึ่ง Ma และคณะได้สรุปว่าแรงเสียดทานที่มากกว่าจะทำให้เกิดแรงบิดภายในชิ้นงานมากขึ้นขณะแม่พิมพ์หมุน และทำให้ใช้แรงอัดรีดขึ้นรูปน้อยลง และมีข้อที่น่าสนใจอีกข้อหนึ่งคือ แม้ว่าการเพิ่มความเร็วรอบที่มากขึ้นแล้วทำให้แรงอัดรีดขึ้นรูปน้อยลง แต่หากนำผลการทดลองมาเขียนเป็นกราฟตามรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าแนวโน้มความชันของกราฟแรงอัดรีดขึ้นรูปจะเริ่มลดลง กล่าวได้ว่าประสิทธิผลจากการเพิ่มความเร็วรอบของแม่พิมพ์ลดลง

นอกจากนี้ ยังได้ข้อสรุปถึงการบิดภายในชิ้นงานแท่งตะกั่วว่า แท่งตะกั่วเกิดการบิดภายในเบ้าประกอบตามรูปที่ 2.6 และเกิดการบิดภายในแม่พิมพ์ตามรูปที่ 2.7 และเกิดมุมบิดของชิ้นงานมากขึ้นตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สรุปผลการทดลองการอัดรีดขึ้นรูปแท่งตะกั่วผ่านแม่พิมพ์หมุนของ Ma และคณะ

| มุมของ แม่พิมพ์ (องศา) | สารหล่อลื่น | ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rad/s) | แรงอัดรีดขึ้น รูปที่ใช้สูงสุด (kN) | % ของแรงอัดรีดขึ้นรูปที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่ ไม่หมุน |
|------------------------------|------------------|------------------------------------|--|---|
| 45 | ไม่มีการหล่อลื่น | 0 (ไม่หมุน) | 22.5 | - |
| | | 0.26 | 12.5 | 44 % |
| | | 0.34 | 10.7 | 52 % |
| | น้ำมันหล่อลื่น | 0 (ไม่หมุน) | 14.7 | - |
| | | 0.34 | 11.1 | 24 % |
| | | 0.52 | 8.8 | 40 % |
| 90 | ไม่มีการหล่อลื่น | 0 (ไม่หมุน) | 23.0 | - |
| | | 0.22 | 18.0 | 22 % |
| | | 0.43 | 14.2 | 38 % |
| | | 0.86 | 12.2 | 47 % |

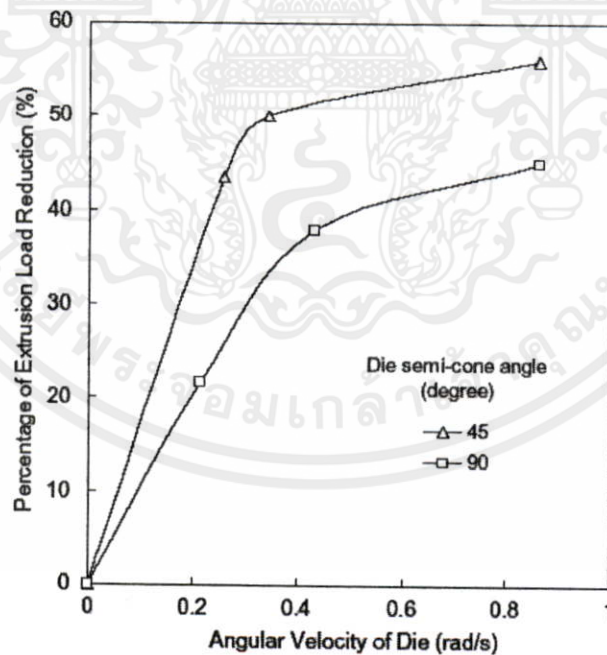


Fig. 15. The effect of the angular velocity of die on the reduction in extrusion load.

รูปที่ 2.5 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบของแม่พิมพ์กับเปอร์เซ็นต์แรงอัดรีดขึ้นรูปที่ลดลง [15] การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

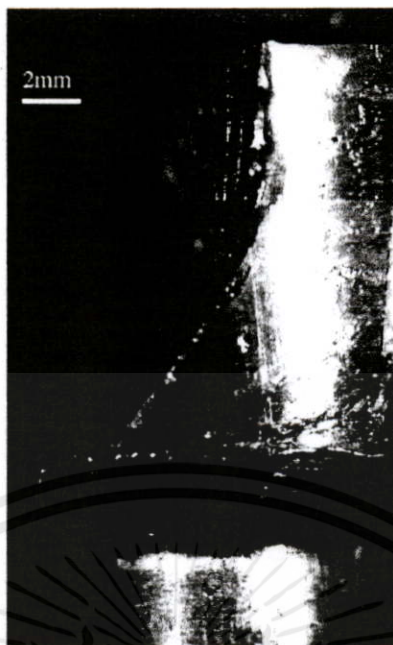


Fig. 11. Material twisting inside the container.

รูปที่ 2.6 แสดงการบิดตัวของแท่งตะกั่วภายในเบ้าประคอง [15]



Fig. 12. Material twisting inside the rotating die.

รูปที่ 2.7 แสดงการบิดตัวของแท่งตะกั่วภายในแม่พิมพ์ที่หมุน [15]

2.2.2 การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

Ma และคณะ ได้ทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีควบคู่ไปกับการทดลองเกี่ยวกับการอัดรีดขึ้นรูปแท่งตะกั่วผ่านแม่พิมพ์หมุน โดยใช้หลักการของทฤษฎีค่าขอบเขตบน (Upper-Bound) ร่วมกับวิธีแผ่นแบน (Slab Method) ซึ่งทฤษฎีค่าขอบเขตบนนั้นใช้วิธีการสมมติสนามเส้นเดือนไหล (Slipline Field) และหาผลลัพธ์ของแรงที่ใช้อัดรีดขึ้นรูปสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ใน

ส่วนวิธีแผ่นแบนนั้นใช้หลักการสมดุลของแรงบนชิ้นงานที่ถูกวิเคราะห์ให้เป็นแผ่นแบนแต่ละชั้น โดยชั้นของแผ่นที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะส่งผ่านค่าความเค้นไปยังชั้นของแผ่นส่วนที่เหลือ

งานวิจัยของ Ma และคณะได้แบ่งการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์หมุน ออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่หมุนอยู่ในแม่พิมพ์ที่ใช้ทฤษฎีค่าขอบเขตบน และส่วนที่อยู่ในเบ้า ประคองใช้วิธีแผ่นแบน จากนั้นจึงรวมผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ทั้งสองส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.2.1 การวิเคราะห์ชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ด้วยทฤษฎีค่าขอบเขตบน

พลังงานรวมที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปจากทฤษฎีขอบเขตบนนั้นเขียนได้ว่า

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_f + \dot{W}_s \quad (2.6)$$

โดยที่ \dot{W}_i คือ งานที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation)

\dot{W}_f คือ งานที่เกิดจากแรงเสียดทาน

\dot{W}_s คือ งานสูญเสียจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วที่ผิว (Discontinuity Velocity)

X. Ma และ คณะ [4] ได้หาสมการพลังงานภายนอกที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์หมุนได้ว่า

$$J^* = -\pi v_o R_o^2 \sigma_x - \frac{2\pi}{3\sqrt{3} \sin \alpha} m \sigma_o \omega_d h (R_o^3, R_f^3) \quad (2.7)$$

โดยเทอมแรกเป็นงานภายนอกจากการดันของตัวกด (Punch) ส่วนเทอมที่สองเป็นงานภายนอกจากการหมุนของแม่พิมพ์

เมื่อ v_o คือ ความเร็วในการอัดรีดขึ้นรูปหรือความเร็วของตัวกด

ω_d คือ ความเร็วเชิงมุมของแม่พิมพ์

$h(R_o^3, R_f^3)$ คือฟังก์ชันกำลัง 3 ที่เกิดจากการหมุนแม่พิมพ์และส่งผ่านแรงบิดไปที่ชิ้นงานมี

ค่าตามสมการที่ (2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้แก่บุคคลภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต (2.8)

$$h(R_o^3, R_f^3) = \left[\sqrt{X} - \left(\frac{b_1}{2} + \beta_1 R_f^3 \right) \sinh^{-1} \frac{2R^3}{\sqrt{4c_1 - b_1^2}} \right]_{R=R_f}^{R=R_o} \quad (2.8)$$

$$b_1 = -2\beta_1 R_f^3 \quad (2.9)$$

$$c_1 = (\beta_1 R_f^3)^2 + \left(\frac{v_f R_f^2 \cos \alpha}{\omega_d} \right)^2 \quad (2.10)$$

$$X = R^6 + b_1 R^3 + c_1 \quad (2.11)$$

สมการที่ (2.6) พลังงานภายในจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างคือ

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV \quad (2.12)$$

X. Ma และ คณะ [4] ได้หาพลังงานภายในได้ตามสมการที่ (2.13)

$$\dot{W}_i = 2\pi\sigma_o R^2 v_o \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) f(\alpha, m_1) \quad (2.13)$$

ซึ่ง ฟังก์ชัน $f(\alpha, m_1)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่าที่เป็นบวกหรือลบตามสมการ

$$m_1 = \frac{1}{12} \left[\left(3\beta_1 \frac{\omega_d R_f^3}{v_o R_o^2 \sin \alpha} \right)^2 - 11 \right] \quad (2.14)$$

กรณีที่ค่า $m_1 = 0$ จะได้ค่า $f(\alpha, m_1)$ คือ

$$f(\alpha, m_1) = \frac{2(1 - \cos \alpha)}{\sin^2 \alpha} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานที่เกิดจากแรงเสียดทาน \dot{W}_f เกิดขึ้นที่ผิวของแม่พิมพ์ หาได้จากการอินทิเกรตแรงเสียดทานคูณกับความเร็ว ตลอดพื้นที่ผิวสัมผัสของแม่พิมพ์ได้ว่า

$$\dot{W}_f = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}\sin\alpha} m\sigma_o v_o \frac{R_o^2}{R_f^2} g(U, R_f, R_o) \quad (2.16)$$

เมื่อ $g(U, R_f, R_o)$ คือฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกตามสมการ

$$g(U, R_f, R_o) = \left(\frac{b}{2\sqrt{a}} \sinh^{-1} \frac{2aR^3 + b}{\sqrt{4ac - b^2}} - \sqrt{c} \sinh^{-1} \frac{bR^3 + 2c}{R^3 \sqrt{4ac - b^2}} + U \right) \Big|_{R=R_f}^{R_o} \quad (2.17)$$

$$a = \frac{\omega_d^2}{v_f^2} \quad (2.18)$$

$$b = -2\beta_1 \frac{\omega_d^2 R_f^3}{v_f^2} \quad (2.19)$$

$$c = (R_f^2 \cos\alpha)^2 + \left(\frac{\beta_1 \omega_d}{v_f} \right)^2 R_f^6 \quad (2.20)$$

$$U = \sqrt{aR^6 + bR^3 + c} \quad (2.21)$$

เทอมสุดท้ายของสมการที่ (2.6) นั้นเป็นงานที่เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วที่ทางเข้าและทางออกของแม่พิมพ์ ทำให้เกิดแรงเฉือนสูญเสียภายในวัสดุ (Internal Shear Force) ซึ่ง Avitzur ได้หาสมการดังกล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\dot{W}_s = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sigma_o v_o R_o^2 \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \quad (2.22)$$

นำสมการที่ (2.7), (2.13), (2.16) และ (24) แทนลงในสมการที่ (2.6) ได้

$$\frac{\sigma_x}{\bar{\sigma}} = -2 \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) f(\alpha, m_1) - \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{mg(U, R_f, R_o)}{R_f^2 \sin \alpha} - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \frac{2}{3\sqrt{3} \sin \alpha} \frac{m\omega_d}{v_o R_o^2} h(R_o^3, R_f^3) \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.8) เป็นต้นมาจะเห็นว่า มีตัวแปร β_1 คือ Slippage Parameter ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้หาสัดส่วนความเร็วเชิงมุม ของชิ้นงาน เทียบกับความเร็วเชิงมุมของแม่พิมพ์ตามสมการ

$$\omega_l = \beta_1 \omega_d \left(\frac{R_f}{R} \right)^3 \quad (2.24)$$

โดยที่ ω_l คือความเร็วเชิงมุมชิ้นงานที่ตำแหน่งแม่พิมพ์ ซึ่งค่า β_1 หาได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Procedure) ของสมการ (2.24) ซึ่งได้ค่าที่เหมาะสม คือ 0.3

2.3 การทดลองของ Onuh และคณะ (2002)

เรื่อง Effect of Die Geometry and Extrusion Speed on The Cold Extrusion of Aluminum and Lead Alloys ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการทดลองบนพื้นฐานตัวแปรในการอัดรีดขึ้นรูปแบบเย็นทั้งหมดคือ การลดขนาดพื้นที่หน้าตัด มุมแม่พิมพ์ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรง โดยทำการพิจารณาถึง คุณภาพของชิ้นงานที่ได้ ความดันที่เกิดขึ้นขณะทำการอัดรีดขึ้นรูป รูปแบบการไหลของแท่งโลหะที่ใช้อัดรีดขึ้นรูป และขนาดที่ได้หลังการอัดรีดขึ้นรูป โดยรูปร่างของแท่งโลหะภายหลังการอัดรีดขึ้นรูปมีหน้าตัดที่สมมาตรกันแสดงในรูปที่ 2.8

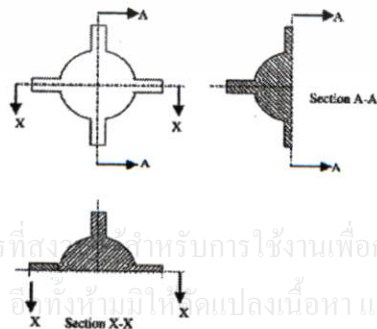
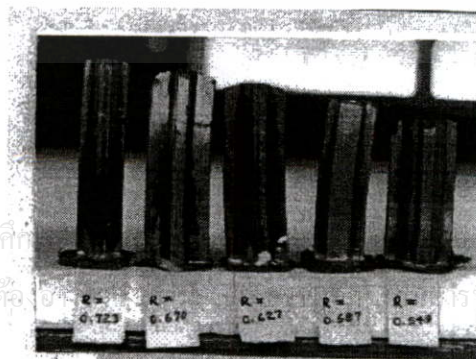


Fig. 2. A cross-section schematic view of the extruded section.



รูปที่ 2.8 ภาพหน้าตัดและชิ้นงานของแท่ง โลหะภายหลังการอัดรีดขึ้นรูป [10]

โลหะที่ใช้ในการทดลองอัดรีดขึ้นรูปใช้โลหะ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียมและตะกั่ว ขนาดของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองอัดรีดขึ้นรูปมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.3 มิลลิเมตร ยาว 32 มิลลิเมตร และขนาดของแท่งตะกั่วที่ใช้ในการทดลองอัดรีดขึ้นรูป เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.3 มิลลิเมตร ยาว 25.4 มิลลิเมตร ซึ่งอลูมิเนียมและตะกั่วที่นำมาทดลองได้ทำการทดสอบหาความเค้นที่จุดครากจากแรงอัด (Compressive Yield Stress) ได้ตามรูปที่ 2.9 สำหรับการศึกษานี้ในกรณีของรูปแบบการไหลของแท่งโลหะ ขณะทำการอัดรีดขึ้นรูป ได้ทำการแบ่งแท่งอลูมิเนียมและตะกั่วออกเป็น 2 ชิ้น ตามแนวยาวเพื่อสร้างรอยบากในลักษณะรูปดาวรังสีเหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 4 ตาราง มิลลิเมตร ไว้ภายใน และความเร็วที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปใช้ความเร็วระหว่าง 0.4 ถึง 8 มิลลิเมตรต่อ นาที

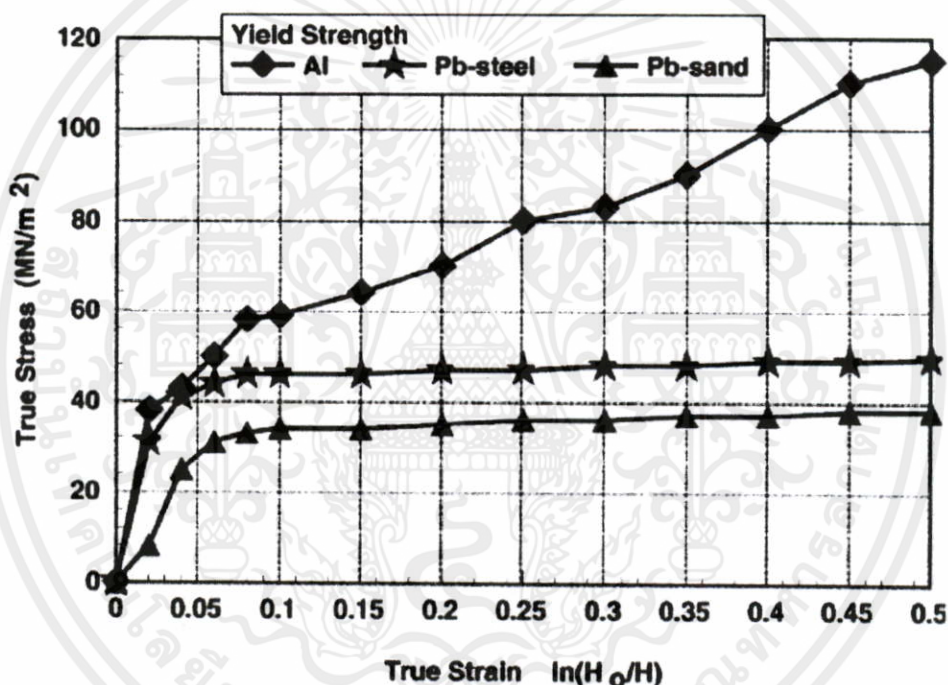


Fig. 3. True stress-strain curves for Al and Pb.

รูปที่ 2.9 การทดสอบหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแรงกดของอลูมิเนียมและตะกั่ว [10]

ผลการทดลองที่ได้ ในรูปที่ 2.10 แสดงแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป อลูมิเนียมและตะกั่วซึ่งแปรผันตามระยะการเคลื่อนที่ของตัวกด ซึ่งในรูปนี้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมมีค่าสูงกว่าแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปตะกั่ว ซึ่งแรงที่มีค่าสูงในการอัดรีดขึ้นรูปอลูมิเนียมนี้เนื่องจากอลูมิเนียมมีแรงต้านทานในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มากกว่าเทียบได้จาก ค่าความเค้นจุดครากของอลูมิเนียมที่มีค่ามากกว่าตะกั่ว ในส่วนของขนาดภายหลังการอัดรีดขึ้นรูป มีค่าความแม่นยำอยู่ระหว่าง ± 0.105 มิลลิเมตร ในรูปที่ 2.8 ชิ้นงานที่ได้บางชิ้นเกิดการโค้งซึ่งเนื่องมาจากความ

แตกต่างของความเสียดทานระหว่างแม่พิมพ์ทั้งสองข้าง ในรูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงผลกระทบเนื่องจาก อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด มุมแม่พิมพ์ และความเร็วในการอัดรีดขึ้นรูป กับการโค้งงอของชิ้นงาน ซึ่งผลที่ได้พบว่า ที่มุมแม่พิมพ์ 60 ถึง 120 องศา การโค้งงอของชิ้นงานมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 120 องศา การโค้งงอมีค่าเพิ่มเล็กน้อยจนถึง 160 องศา หลังจากนั้นการโค้งงอของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลของอัตราการลดขนาดหน้าตัด ในรูปที่ 2.12 การโค้งงอมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ หากอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมีค่ามากทั้งอลูมิเนียมและตะกั่ว และผลเนื่องจากความเร็วพบว่าความเร็วไม่ส่งผลต่อการ โค้งงอของแท่งอลูมิเนียมและตะกั่ว

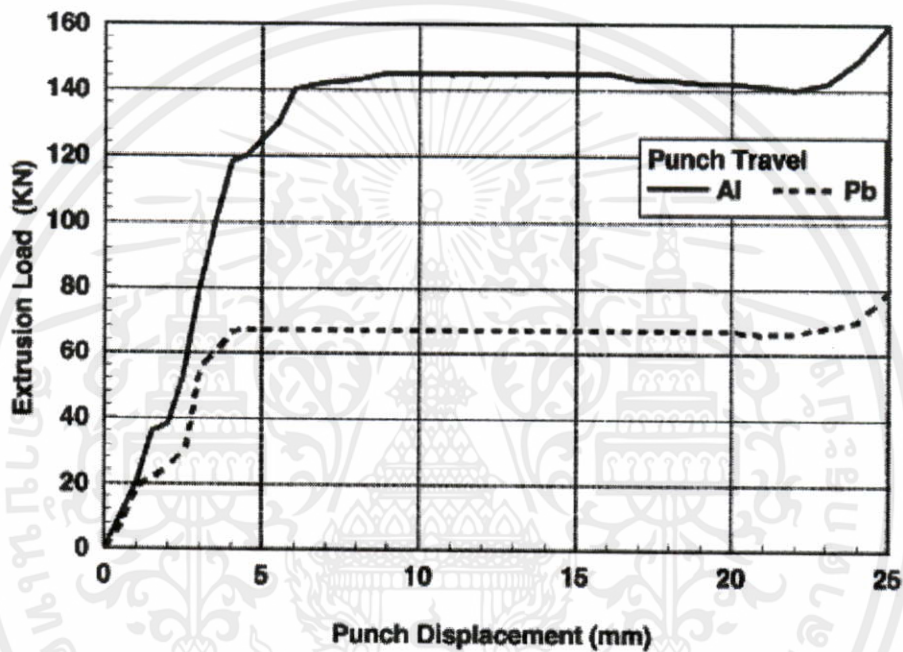


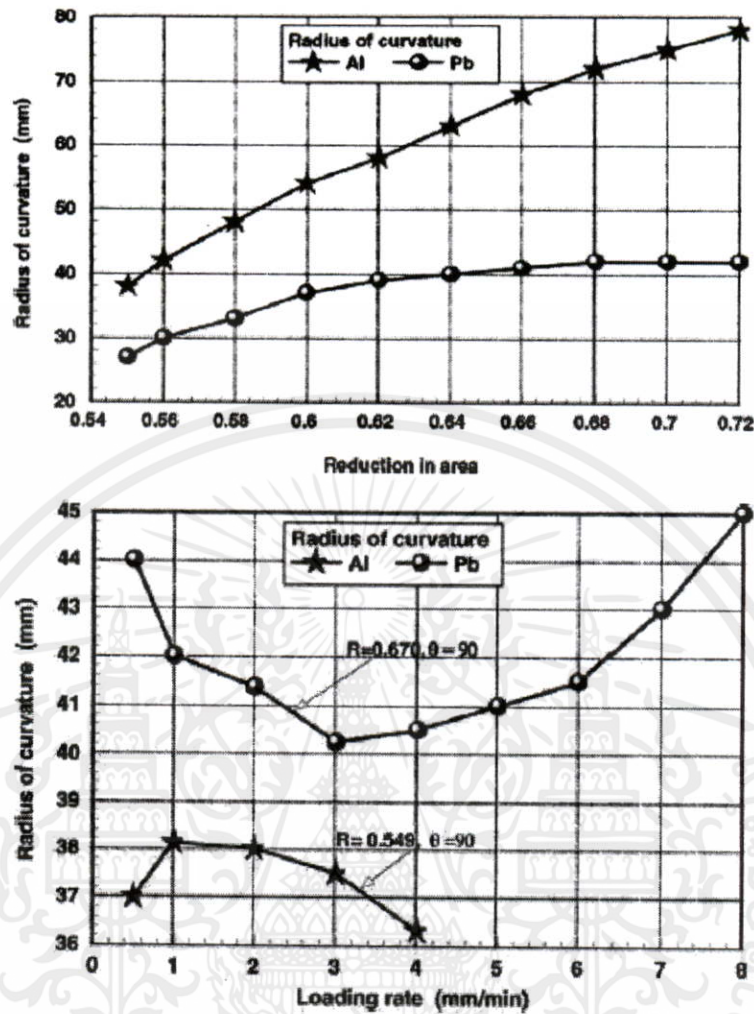
Fig. 4. Extrusion load versus punch displacement curves for Al and Pb.

รูปที่ 2.10 แรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของ อลูมิเนียมและตะกั่ว [10]



Fig. 6. Plot of radius of curvature against die angles for Pb alloy.

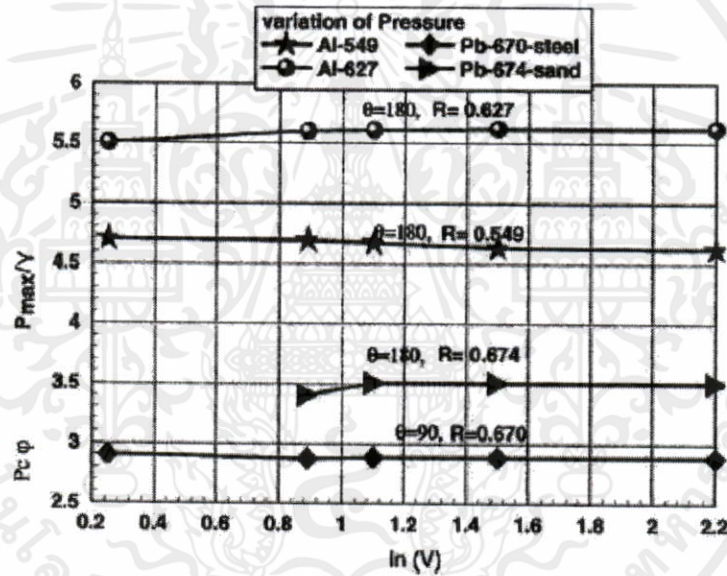
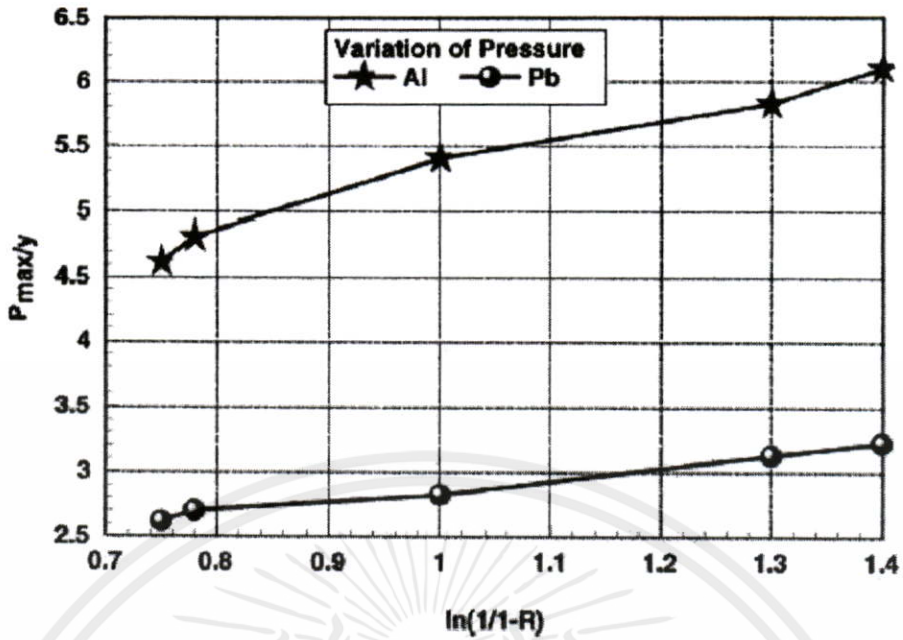
รูปที่ 2.11 การ โค้งงอของชิ้นงานของตะกั่วเมื่อเทียบกับขนาดมุมแม่พิมพ์ที่ต่างกัน [10]



รูปที่ 2.12 การโค้งงอของชิ้นงานเมื่อเทียบกับการลดขนาดหน้าตัดและความเร็ว [10]

รูปที่ 2.13 แสดงความดันที่เกิดขึ้นในการอัดรีดชิ้นรูปแท่งอลูมิเนียมและตะกั่ว เมื่อเทียบกับ อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และความเร็วจากรูปพบว่า เมื่ออัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น ความดันที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยแต่ความดันที่เกิดขึ้นมีลักษณะเกือบคงที่กราฟเป็นเส้นตรงเมื่อความเร็วมีค่ามากขึ้น

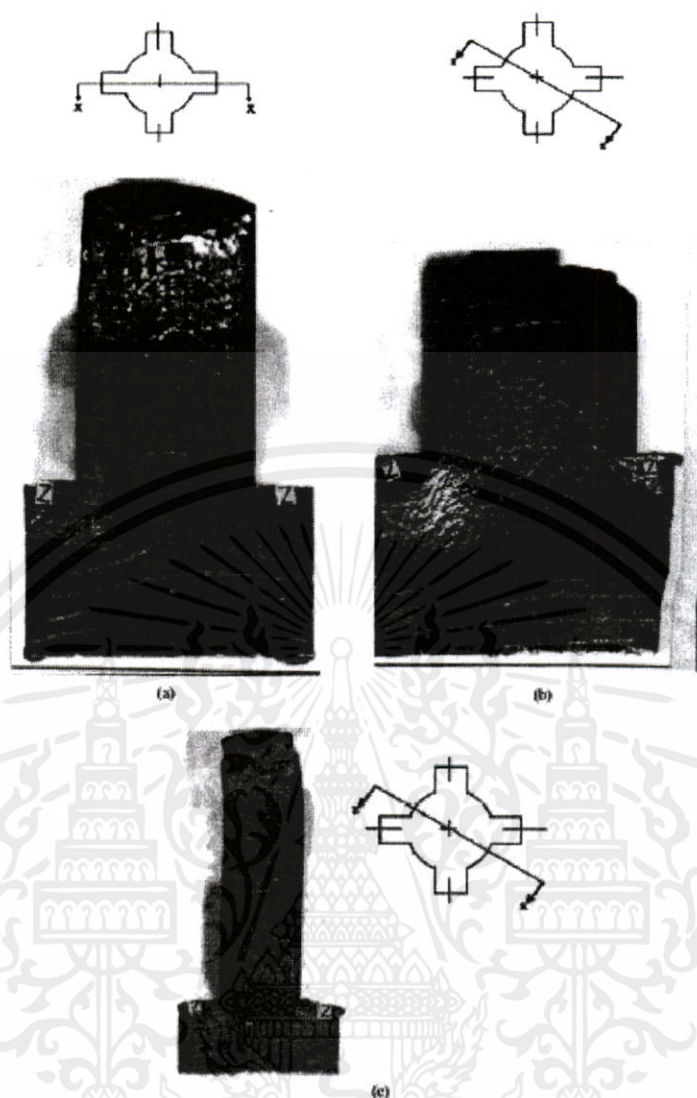
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ความดันที่ใช้ในการดันเทียบกับอัตราลดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็ว [10]

รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบการไหลของชิ้นงาน ที่มุมแม่พิมพ์ 180 องศาทั้งหมด อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ต่างกัน 3 ขนาด พบว่าที่บริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิด Dead Metal คือโลหะจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ในทุกๆ การทดลอง สรุปผลการทดลองโดยรวม ในการศึกษาผลเนื่องจากการแปรในการอัดรีดขึ้นรูป คือ มุมแม่พิมพ์ อัตราการลดขนาดและความเร็วในการอัดรีดขึ้นรูป พบว่าการโค้งงอของแท่งอลูมิเนียมและตะกั่วจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น และความเร็วไม่มีผลกระทบต่อ การโค้งงอ

การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ภาพตัดแสดงรูปแบบการไหลของชิ้นงาน [10]

2.4 การทดลองของ Ajiboye และ Adeyemi (2005)

เรื่อง Effect of Die Land on The Cold Extrusion of Lead Alloy ซึ่งเป็นบทความที่น่าเสนอ การศึกษาผลกระทบเนื่องจากความยาวของ Die Land ต่อ แรงและความดันในการอัดรีดขึ้นรูป โดยเปรียบเทียบกันระหว่าง การทดลองและการประมาณค่าจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีขอบเขตบน วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นตะกั่ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.82 มิลลิเมตร ยาว 15 และ 26 มิลลิเมตร

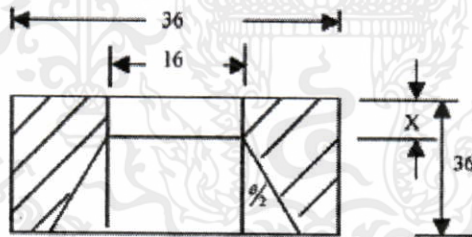
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะและขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง มีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทั้งหมดคือ 58 เปอร์เซ็นต์ และมุมแม่พิมพ์ 180 องศา และมุมแม่พิมพ์ด้านทางออกที่ใช้ในการทดลอง 4 มุมคือ 10 15 20 และ 26 องศา ความยาวของ Die Land 5 ขนาด คือ 1 5 10 15 และ 20 มิลลิเมตร ผลการอัดรีดขึ้นรูปที่ขนาดความยาวของ Die Land ที่ต่างกันแสดงตามรูปที่ 2.16 ซึ่งแสดงแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปที่มุมแม่พิมพ์ 180 องศา ขนาดของ

Die Land 1 5 10 15 และ 20 มิลลิเมตร ความยาวแท่งตะกั่ว 15 มิลลิเมตร และมุมแม่พิมพ์ทางออก 10 องศา ผลการทดลองพบว่า เมื่อขนาดความยาวของ Die Land มากขึ้นต้องใช้แรงในการอัดรีดขึ้นรูปมากขึ้น เมื่อพิจารณาความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป ที่ความยาวแท่งตะกั่ว 15 และ 26 มิลลิเมตร ในรูปที่ 2.17 พบว่า ความดันที่เกิดขึ้นในการอัดรีดขึ้นรูปที่ความยาว 26 มิลลิเมตร ที่ค่าสูงกว่า 15 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้ระหว่างการทดลองและการประมาณค่าด้วยวิธีขอบเขตบนมีค่าใกล้เคียงกันมาก และรูปที่ 2.18 พิจารณาการโค้งงอของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ผลที่ได้พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งตะกั่ว 26 มิลลิเมตร เกิดการโค้งงอน้อยกว่าแท่งตะกั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ที่ขนาด Die Land และมุมแม่พิมพ์ทางออกที่เท่าๆกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงความยาวของ Die Land เพียงอย่างเดียวแล้ว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความยาวของ Die Land ที่เพิ่มขึ้นทำให้ การโค้งงอของชิ้นงานลดลงได้อย่างมาก

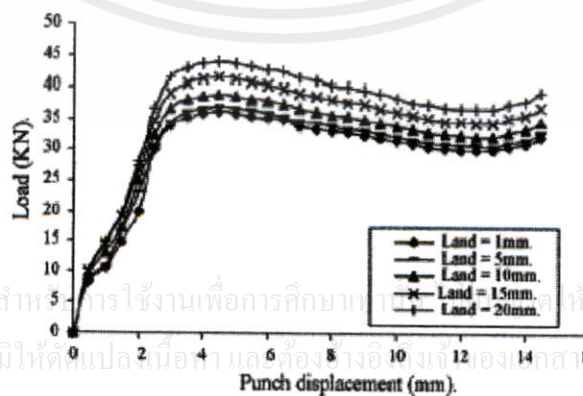
Dimensions of dies used die opening: circular Ø16 mm; die type: split dies; included die angle (2α) = 180°

| S.no. | Die land, x (mm) | Exit clearance angle, θ ($^\circ$) | Percentage reduction |
|-------|------------------|---|----------------------|
| 1 | 1 | 10 | 58 |
| 2 | 5 | 10 | 58 |
| 3 | 10 | 10 | 58 |
| 4 | 15 | 10 | 58 |
| 5 | 20 | 10 | 58 |
| 6 | 10 | 15 | 58 |
| 7 | 10 | 20 | 58 |
| 8 | 10 | 26 | 58 |

Flat die dimensions used.

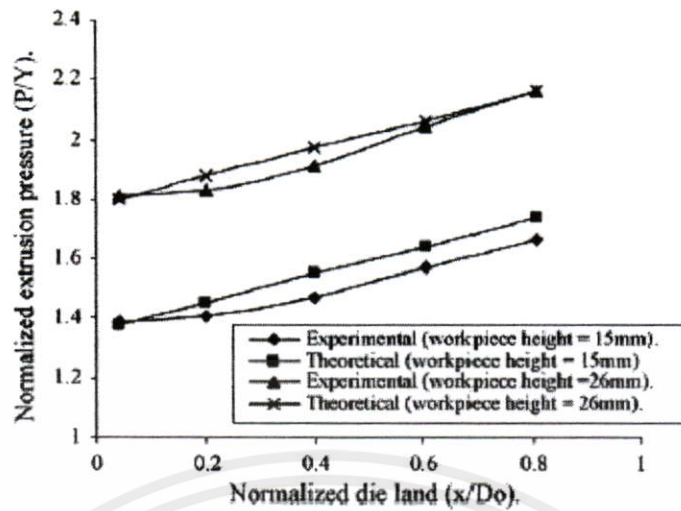


รูปที่ 2.15 ขนาดและลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง [8]

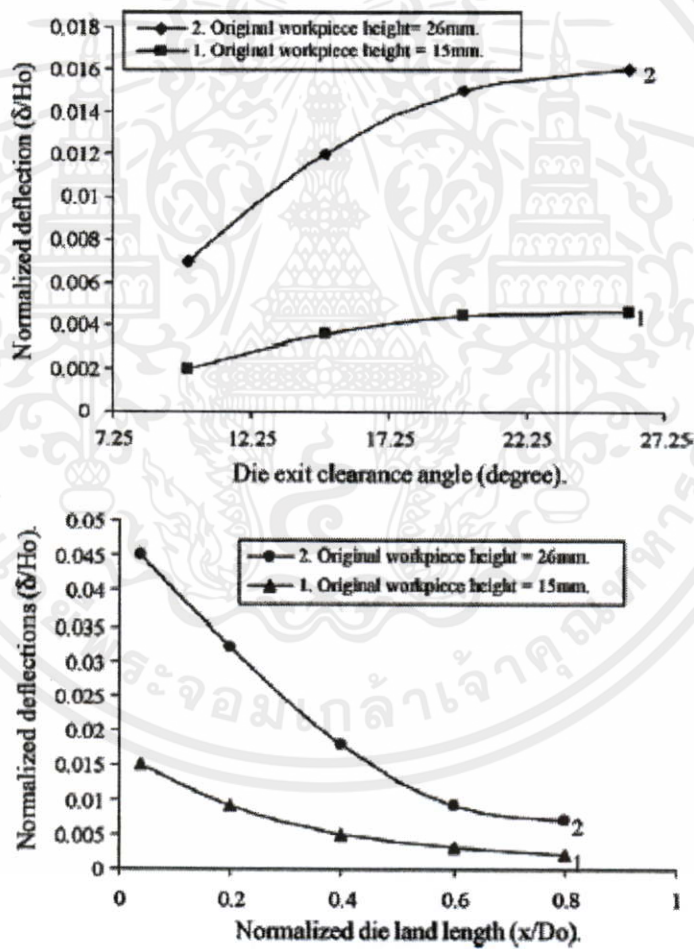


รูปที่ 2.16 แรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปเมื่อความยาว die land มีขนาดต่างกัน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเปลี่ยนแปลงข้อมูลอ้างอิงอื่นใดจากเอกสารชุดนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

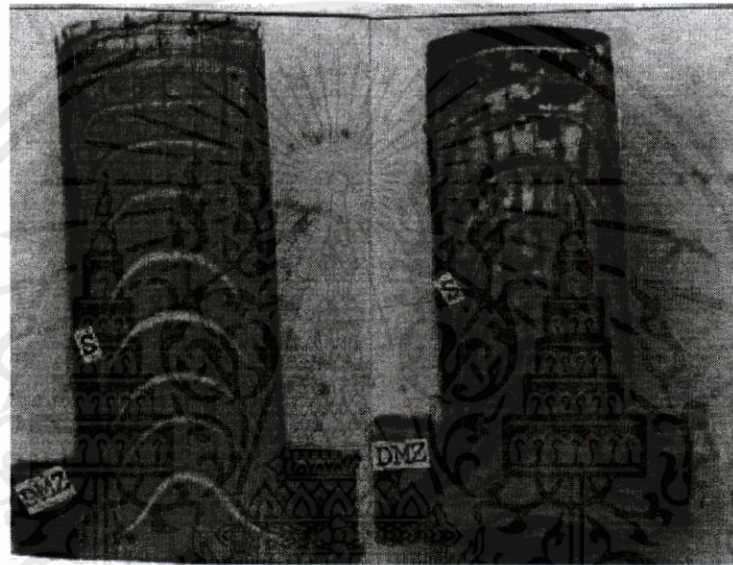
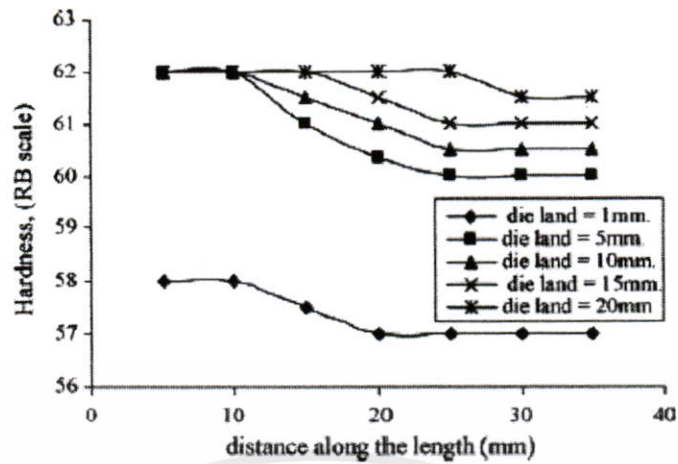


รูปที่ 2.17 ความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป [8]



รูปที่ 2.18 การโค้งงอของชิ้นงานหลังการอัดรีดขึ้นรูป [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

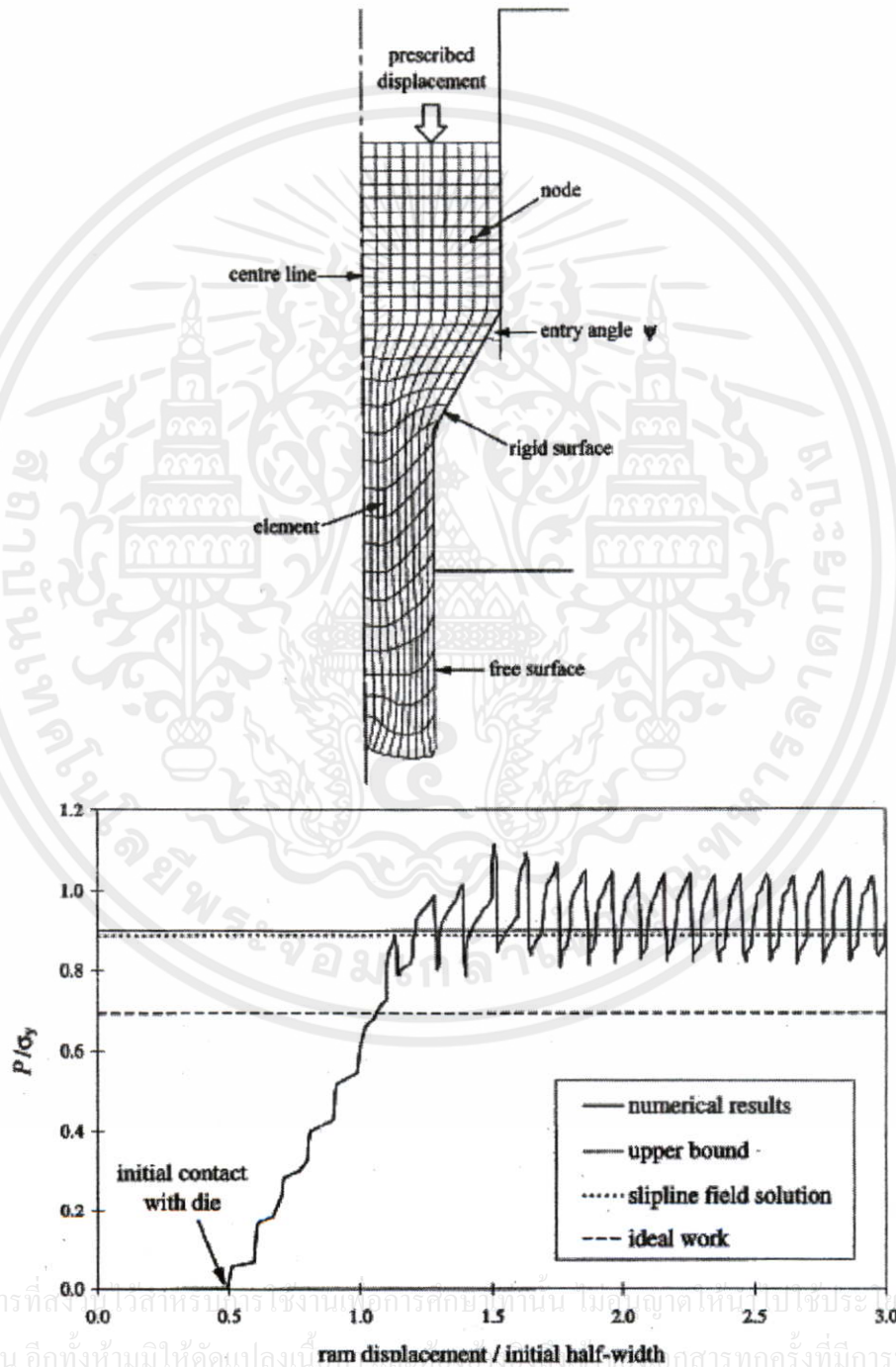
Deformation flow patterns for a die reduction ratio of 58%. (a) Die land length of 20 mm and (b) die land length of 1 mm.

รูปที่ 2.19 ความแข็งที่ผิวแท่งตะกั่วและรูปแบบการไหลหลังการอัดรีดขึ้นรูป [8]

ในรูปที่ 2.19 แสดงค่าความแข็งของแท่งตะกั่วหลังการอัดรีดขึ้นรูป ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่อัดรีดขึ้นรูปที่ ความยาว Die Land มากขึ้นค่าความแข็งที่ผิวของแท่งตะกั่ว เมื่อวัดตามความยาวมีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลของตะกั่ว รูป a และ b เป็นการอัดรีดขึ้นรูปที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 58 เท่ากันแต่ความยาวของ Die Land ต่างกันคือ a และ b มีความยาว 20 และ 1 มิลลิเมตรตามลำดับ จากลักษณะของการไหลของแท่งตะกั่วในการอัดรีดขึ้นรูปที่ Die Land 20 มิลลิเมตร เกิดการเหือนบริเวณผิวแท่งตะกั่วมากกว่า 1 มิลลิเมตร การเหือนนี้จึงทำให้ค่าความแข็งที่ผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น สรุปการทดลองนี้ทำให้ทราบว่า เมื่อ Die Land มีค่ามากขึ้นส่งผลให้ความดันและแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปมีค่ามากขึ้น และมีผลดี คือ ทำให้การโค้งงอของชิ้นงานลดลง และเมื่อมุมทางออกของแม่พิมพ์มีค่ามากขึ้นการทำให้เกิดการโค้งงอได้มากกว่าขนาดมุมแม่พิมพ์ทางออกของแม่พิมพ์ที่เล็กลง

2.5 บทความของ Horrobin และ Nedderman (1998)

เรื่อง Die Entry Pressure Drops in Paste Extrusion ในบทความนี้ทำการวิเคราะห์ ความดันที่เกิดขึ้นในการอัดรีดขึ้นรูป วัสดุที่มีความอ่อนมากซึ่งสามารถทำให้วิเคราะห์เป็นแบบ พลาสติกสมบูรณ์ (Perfectly Plastic Deformation) ได้ ซึ่งการวิเคราะห์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ABAQUS ในการคำนวณ และเปรียบเทียบกับ การคำนวณด้วยวิธี ขอบเขตบน และวิธีสนามเส้นเลื่อนไหล

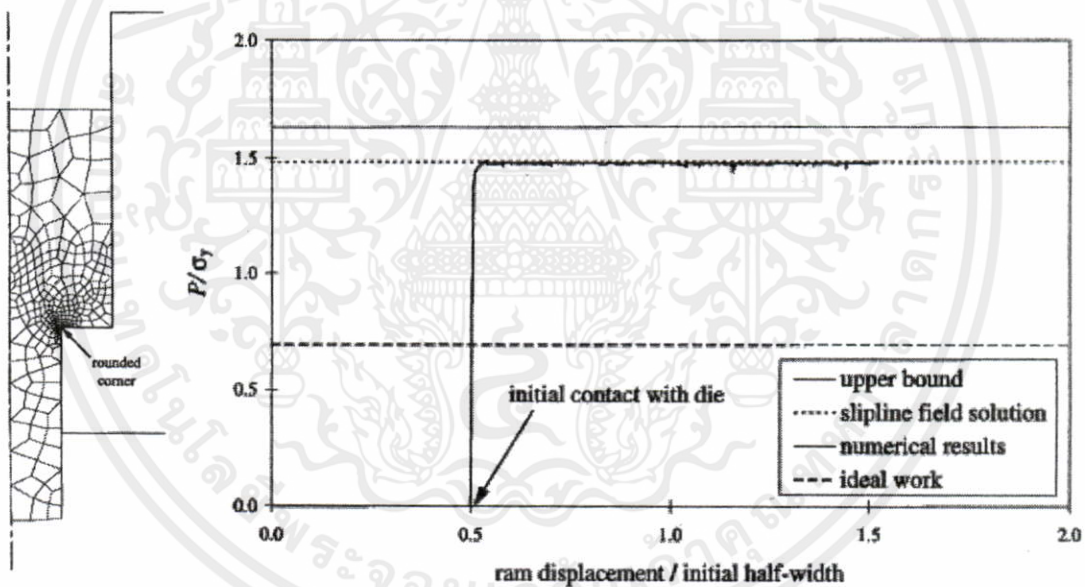


รูปที่ 2.20 การจำลองทางไฟไนต์อีลิเมนต์และผลที่ได้จากการจำลองกรณีแม่พิมพ์รูปกรวย [12]

ในรูปที่ 2.20 แสดงการจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์ที่สภาวะครึ่งมุมแม่พิมพ์ 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 50 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง ผลที่ได้จากการคำนวณด้วย สนามเส้นเลื่อนไหลและวิธีขอบเขตบน และเมื่อมีขนาดมุมแม่พิมพ์มากขึ้น ความดันที่เกิดขึ้นในการอัดรีดขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นตาม แสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งในรูปเป็นการจำลองที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เท่ากัน คือ 58 เปอร์เซ็นต์

| Die entry angle (deg) | P/σ_y |
|-----------------------|--------------|
| 5 | 1.49 |
| 15 | 1.55 |
| 30 | 1.65 |
| 45 | 1.84 |
| 60 | 2.06 |
| 75 | 2.28 |
| 90 | 2.49 |

รูปที่ 2.21 ความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปเมื่อมีขนาดมุมแม่พิมพ์มากขึ้น [12]



รูปที่ 2.22 การจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์และผลที่ได้จากการจำลองกรณีมุมแม่พิมพ์ 90 องศา [12]

เมื่อทำการจำลองที่สภาวะมุมแม่พิมพ์ 90 องศา ผลที่ได้จากรูปที่ 2.22 พบว่าความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป มีค่าเท่ากับผลที่ได้จากวิธีสนามเส้นเลื่อนไหล ซึ่งเมื่ออัตราส่วนการลดการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น ความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นตามแสดงผลไว้ในรูปที่

2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สรุปการทดลองที่ได้ แสดงได้ว่าผลของมุมแม่พิมพ์และ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คิดเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เพิ่มขึ้นทำให้ต้องเพิ่มความดันมากขึ้นเพื่อทำให้วัสดุที่มีความอ่อนไหลผ่านแม่พิมพ์ได้

| Die land diameter | Diameter reduction (%) | P/σ_y |
|-------------------|------------------------|--------------|
| 24 | 4 | 0.33 |
| 22 | 12 | 0.78 |
| 20 | 20 | 1.14 |
| 18 | 28 | 1.47 |
| 16 | 36 | 1.81 |
| 14 | 44 | 2.15 |
| 12 | 52 | 2.49 |
| 10 | 60 | 2.85 |
| 8 | 68 | 3.26 |
| 6 | 76 | 3.81 |
| 4 | 84 | 4.57 |
| 2 | 92 | 5.93 |

Note: Barrel diameter = 25 in all cases.

รูปที่ 2.23 ความดันที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้น [12]

2.6 สรุปจากบทความที่ได้ทำการศึกษา

ในการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีอัดรีดขึ้นรูปที่ผ่านมานั้น สิ่งที่น่าสนใจทั้งหลายได้ทำการทดลองไว้ส่วนมากจะเป็นการทำนายหรือประมาณแรงและความดันที่สามารถทำให้วัสดุที่ใช้ในการทดลองไหลผ่านแม่พิมพ์ ในกรณีต่างๆ เช่น เมื่อมุมแม่พิมพ์ หรืออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต่างกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้นำมาเสนอนั้น วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในการอัดรีดเป็นตะกั่ว เนื่องจากมีสมบัติที่ง่ายต่อการขึ้นรูปเพราะมีค่าความเค้นที่จุดครากจากการอัด (Compressive Yield Stress) น้อยกว่าอลูมิเนียม ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้อลูมิเนียม AI6063 ที่มีค่าความเค้นที่จุดครากเท่ากับ 210 MPa และตะกั่วมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบ Elastic – Perfectly Plastic โดยรายละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแต่ละแบบที่แตกต่างกันจะแสดงในบทที่ 3 ต่อไป

ในส่วนของการทดลองการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุนนั้น เท่าที่ได้ค้นคว้าว่ามีผู้ทำการศึกษาน้อยมาก และการศึกษาที่ผ่านมายังเป็นการศึกษาขั้นต้นที่ยังต้องการศึกษาในกรณีดังกล่าวอีกมาก เพราะทุกการศึกษาและวิจัยที่ผ่านมาได้ข้อสรุปตรงกันว่า การอัดรีดขึ้นรูปที่มีการหมุนของแม่พิมพ์ เบ้าประกอบ และหัวกด สามารถทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดมีค่าลดลงได้

ในการศึกษาและวิจัยครั้งนี้ จึงทำการวิเคราะห์การอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ร่วมกับการทดลอง เพื่อทำการหาค่าแรงที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูปว่ามีค่าลดลงตามงานวิจัยอื่นที่ผ่านมาหรือไม่ และนำเสนอผลของการวิเคราะห์และการทดลองเพื่อหาข้อสรุปและ

เอกสารนี้เน้นแนวทางในการพัฒนาต่อไปการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการขึ้นรูปโลหะ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming Process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของโลหะ โดยการทำให้ชิ้นงานโลหะตั้งต้นหรือที่เรียกว่าบิลเลท (Billet) ถูกแรงกระทำผ่านแม่พิมพ์ (Dies) หรืออุปกรณ์และเครื่องมืออื่น ให้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ ซึ่งบิลเลทที่ถูกแรงกระทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปนั้น จะอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุจากช่วงอีลาสติก (Elastic State) ไปสู่ช่วงพลาสติก (Plastic State) กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้นทฤษฎีหลักที่ใช้วิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะคือ ทฤษฎีพลาสติก (Plasticity Theory) ซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เช่นเดียวกับ ทฤษฎีอีลาสติก (Elasticity Theory)

ถึงแม้ทฤษฎีพลาสติกจะสามารถอธิบายหลักการขึ้นรูปโลหะได้ แต่ก็ยังเป็นทฤษฎีขั้นพื้นฐานที่หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะอย่างถาวร ซึ่งการใช้ทฤษฎีนี้เพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เหมาะสม หากจะนำมาใช้วิเคราะห์ในงานอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันกันทางด้านเทคโนโลยีการผลิต เนื่องจากในงานอุตสาหกรรมของการขึ้นรูปโลหะ จะมีตัวแปรหลายตัวที่จะต้องถูกวิเคราะห์ เช่น การไหลของโลหะ (Metal Flow), แรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือและชิ้นงาน, ความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงานระหว่างกระบวนการ, ตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุจากช่วงอีลาสติกไปสู่ช่วงพลาสติก, ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาคในเนื้อโลหะกับคุณสมบัติของโลหะที่เปลี่ยนไปหลังจากกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งสิ่งต่างๆที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ ยากต่อการวิเคราะห์และแปลผลความสัมพันธ์จากทฤษฎีพลาสติกเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยทฤษฎีพลาสติก จะถูกนำมาใช้วิเคราะห์สำหรับการขึ้นรูปขั้นพื้นฐานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน หรือใช้วิเคราะห์ในการขึ้นรูปช่วงแรกก่อนที่จะเป็นผลิตภัณฑ์ โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบของตัวแปรดังตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแล้ว การวิเคราะห์ในขั้นนี้อาจจะเป็นเพียงการหาแรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูป ในส่วนของการวิเคราะห์ให้ลึกซึ้งขึ้นไปนั้น จะใช้สำหรับการขึ้นรูปที่มีรูปร่างซับซ้อนหรือเป็นกระบวนการขึ้นรูปขั้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ที่ตัวแปรต่างๆมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ โดยมีแนวทางหลักที่ต้องพิจารณาดังนี้

1 การหาความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกับความเร็วที่ใช้ในการขึ้นรูป หรืออัตราการไหลของโลหะที่เหมาะสม

2 การหาความแข็งแรงของเนื้อโลหะที่สามารถทนได้ในระหว่างการขึ้นรูป แล้วไม่ทำให้ผิวของโลหะปริแตก หรือเนื้อภายในแตกเสียหาย (Internal Fracture)

3 หาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปกับความสามารถในการรับแรงนั้นของเครื่องมือ ว่าสามารถรับแรงนั้นได้หรือไม่

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะนั้น เกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษาสมบัติทางกลของโลหะ ซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำ ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะคือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยโลหะแต่ละชนิดก็จะมีค่าความสัมพันธ์นี้แตกต่างกันไป เช่นตะกั่วกับอลูมิเนียมจะมีกราฟความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันตามที่แสดงในรูปที่ 3.1

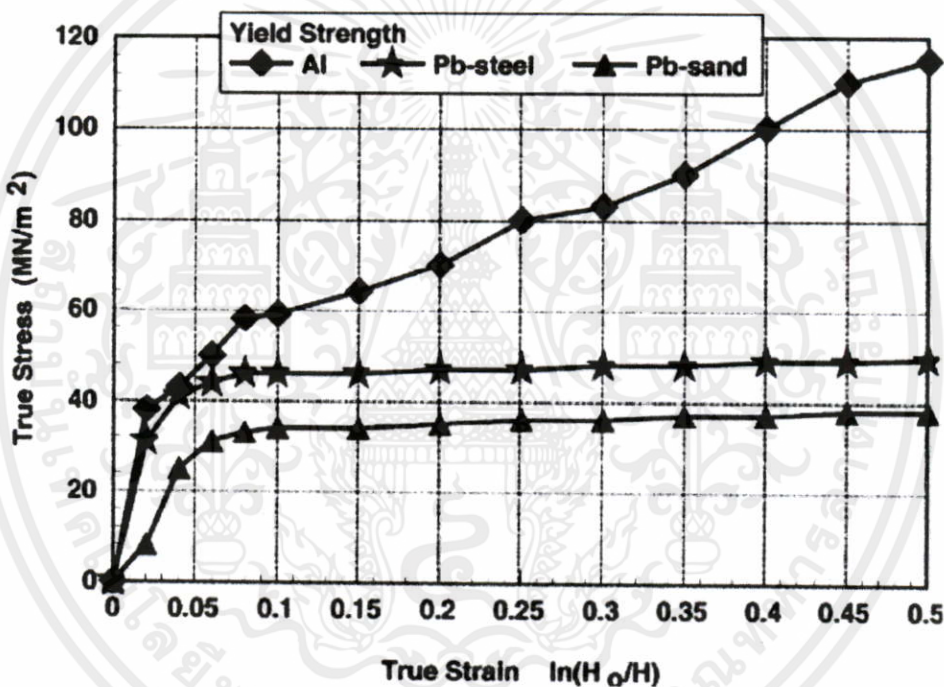


Fig. 3. True stress–strain curves for Al and Pb.

รูปที่ 3.1 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแรงกดของอลูมิเนียมและตะกั่ว [10]

โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในอุดมคติ (Idealized Stress-Strain Curve) ที่แสดงถึงพฤติกรรมต่างๆของโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 7 แบบ และแต่ละแบบมีสมการที่หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังนี้

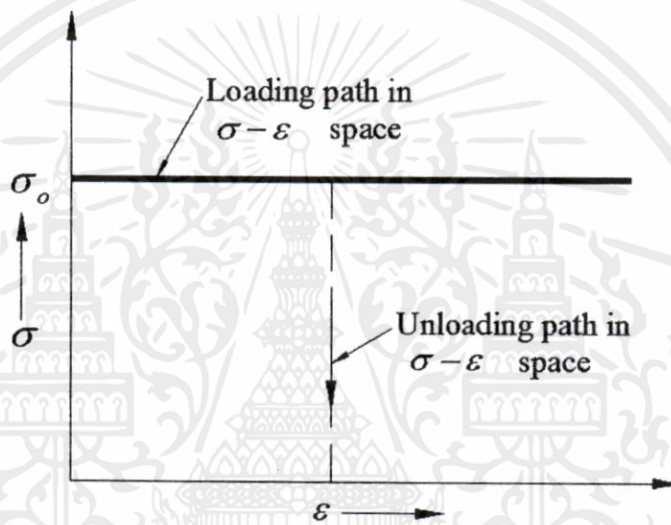
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 Rigid - Perfectly Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid - Perfectly Plastic ซึ่งวัสดุแบบนี้เมื่อถูกแรงกระทำก็จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรในทันที ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 \quad (3.1)$$

เมื่อ σ_0 = ความเค้นที่จุดคราก (Yield Stress)



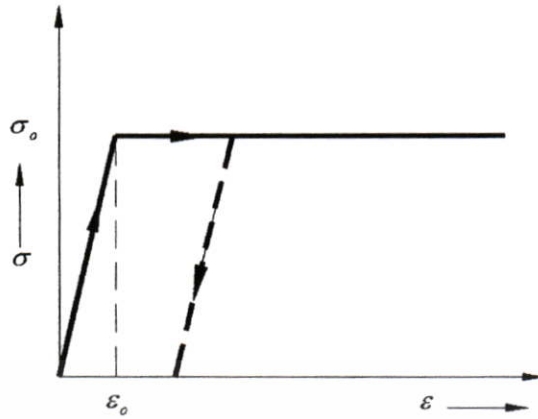
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid - Perfectly Plastic

3.1.2 Elastic - Perfectly Plastic

โลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic - Perfectly Plastic นั้นเป็นโลหะที่หากถูกแรงกระทำแล้วยังไม่ถึงจุดครากจะสามารถคืนตัวได้ แต่เมื่อถูกกระทำเลยจุดครากแล้วโลหะนั้นจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่อไปแม้ไม่มีการเพิ่มแรงกระทำ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.3 และมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad ; \quad \sigma = 0 \text{ ถึง } \sigma_0 \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $\sigma = \sigma_0$ ศึกษา; $\sigma \geq \sigma_0$ กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.3) การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เมื่อ E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)



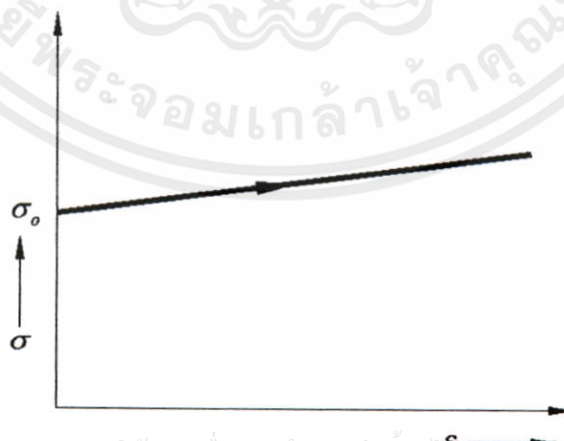
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Elastic - Perfectly Plastic

3.1.3 Rigid - Linearly Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งพฤติกรรมของโลหะในช่วงหลังจากจุดครากนั้น หากต้องการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะต่อไปจะต้องเพิ่มแรงกระทำ ซึ่งพฤติกรรมแบบนี้เรียกว่าการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening) มีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon \tag{3.4}$$

เมื่อ $K =$ ค่าคงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic

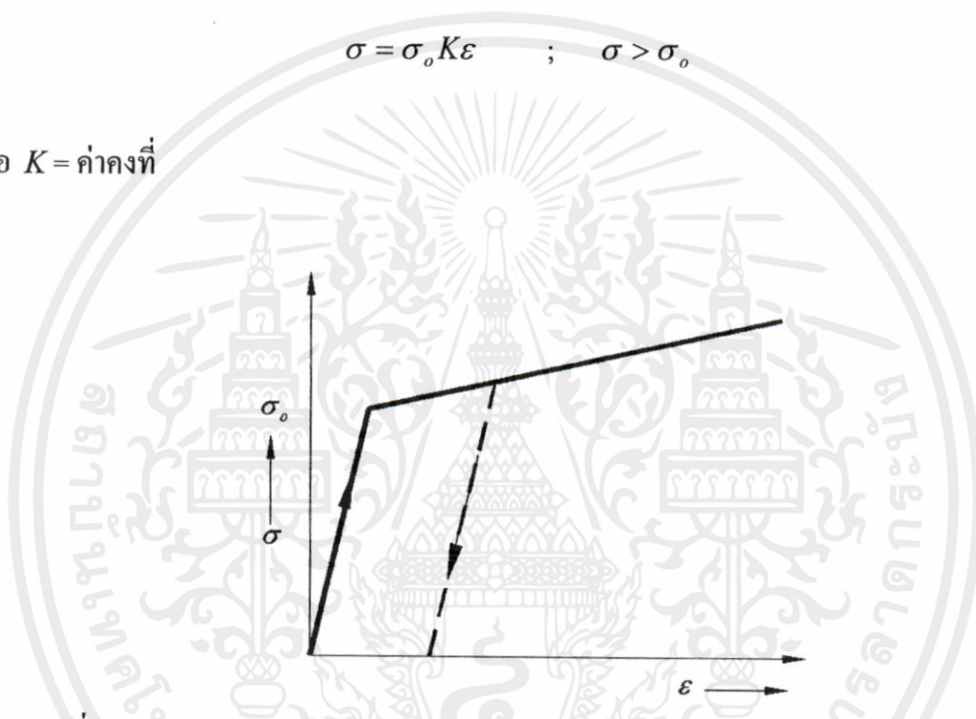
3.1.4 Linearly Elastic - Linearly Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Linearly Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งพฤติกรรมของโลหะก่อนจุดครากนั้นเป็นแบบเชิงเส้น และในช่วงหลังจากจุดครากก็เป็นการทำให้แข็งด้วยความเครียดแบบเชิงเส้น (Linearly Strain Hardening) เช่นกัน โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad ; \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_0 \tag{3.5}$$

$$\sigma = \sigma_0 K\varepsilon \quad ; \quad \sigma > \sigma_0 \tag{3.6}$$

เมื่อ $K =$ ค่าคงที่



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic

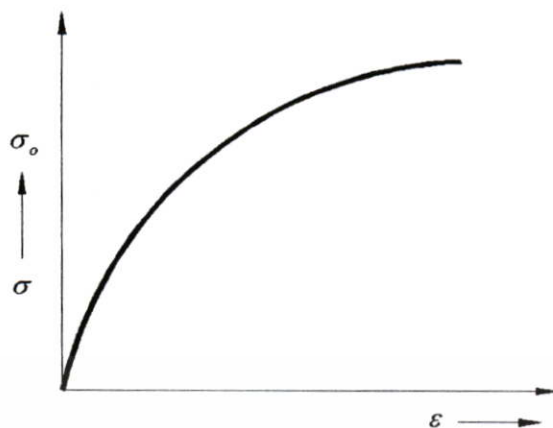
3.1.5 Nonlinear Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Nonlinear Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งพฤติกรรมของโลหะนั้นไม่แสดงจุดครากที่ชัดเจน โดยกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตลอดเวลาที่มีแรงกระทำ สมการความสัมพันธ์แบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Hollomon-Ludwik Power Law เนื่องจากได้มาจากการทดลองของ Hollomon และ Ludwik ซึ่งมีสมการคือ

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad ; \quad 0 < n < 1 \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



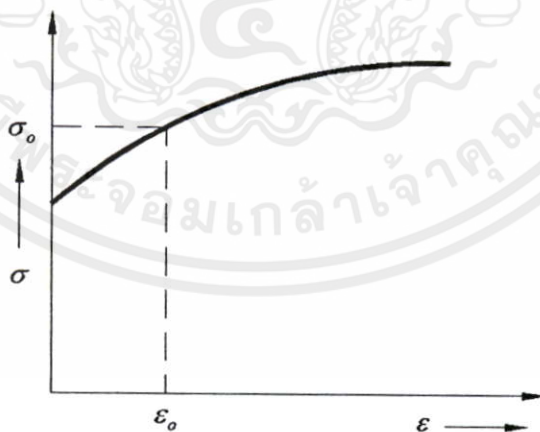
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Nonlinear Strain Hardening Plastic

3.1.6 Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.7 โดยความสัมพันธ์แบบนี้ไม่พิจารณาในช่วงอีลาสติกเนื่องจากมีช่วงที่แคบมาก เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงพลาสติกซึ่งมีสมการคือ

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \tag{3.7}$$

เมื่อ K และ n คือค่าคงที่



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid Nonlinear Strain Hardening Plastic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

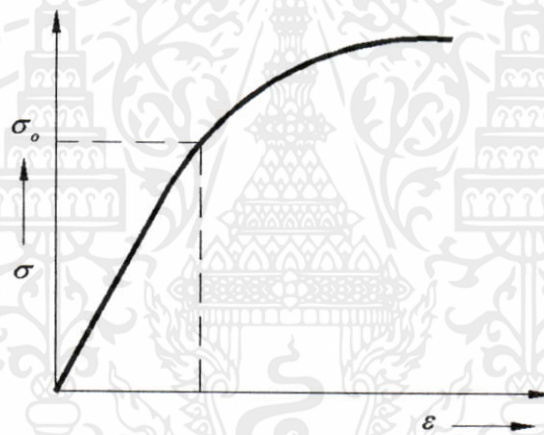
3.1.7 Linearly Elastic - Nonlinear Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Linearly Elastic - Nonlinear Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.8 โดยความสัมพันธ์แบบนี้ในช่วงอีลาสติกจะมีลักษณะเชิงเส้น และช่วงพลาสติกมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีสมการคือ

$$\sigma = E\varepsilon \quad ; \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_0 \quad (3.8)$$

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad ; \quad \sigma > \sigma_0, \quad 0 < n < 1 \quad (3.9)$$

เมื่อ K และ n คือค่าคงที่



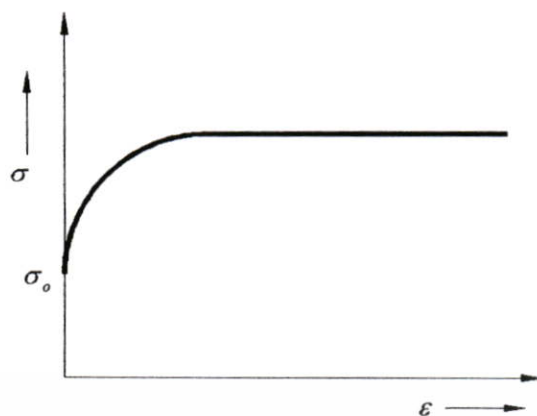
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic - Nonlinear Strain Hardening Plastic

3.1.8 Elastic – Steady State Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic – Steady State Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.9 โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 + C[1 - e^{-D\varepsilon}]^n \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อ C , D และ n คือค่าคงที่ของโลหะแต่ละชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด (Strain rate) และ
อุณหภูมิของโลหะในขณะที่ถูกแรงกระทำ

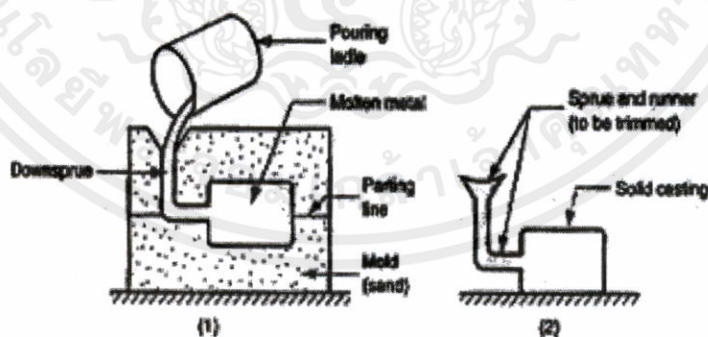


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ

Elastic – Steady State Plastic

3.2 กระบวนการหล่อโลหะ (Casting)

เป็นขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Molding) และกระบวนการอื่น ๆ ที่จะต้องให้ความร้อนกับวัสดุจนเป็นของเหลว หรือกึ่งของเหลว วัสดุที่ทำการผลิตในกระบวนการนี้ได้แก่ โลหะ เซรามิก แก้ว พลาสติก ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่ให้ความร้อนแล้วสามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้เมื่อวัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวหรือกึ่งของเหลวแล้วจะใช้แรงกดดันหรือน้ำหนักตัวของของเหลว ไหลเข้าสู่แบบหล่อและแข็งตัวภายในแบบหล่อได้รูปทรงตามต้องการ กระบวนการหล่อจะใช้กับวัสดุที่เป็นโลหะ การฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จะใช้กับวัสดุพวกพลาสติก วัสดุจำพวกแก้วอาจจะมีทั้งสองกระบวนการ ส่วนวัสดุผสมพวกโพลีเมอร์อาจจะใช้กระบวนการเดียวกันกับพลาสติกดังรูปที่ 3.10

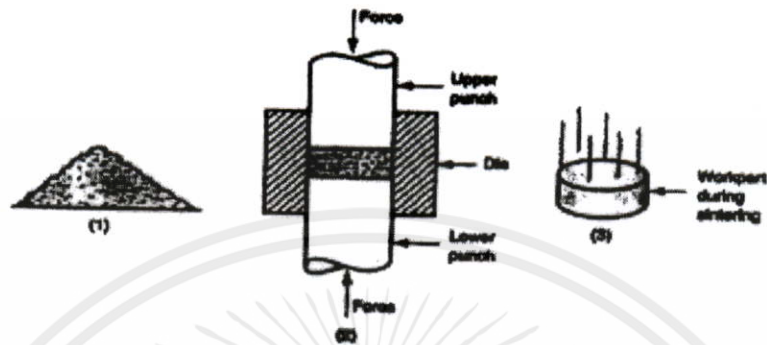


รูปที่ 3.10 แสดงการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อ

3.3 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผง (Particulate Processing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า วัสดุเริ่มต้นจะมีลักษณะเป็นผง นำมาให้ความร้อนแล้วอัดขึ้นรูป ผงโลหะ หรือเซรามิก ซึ่งทั้งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทางห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไปใช้ สองวัสดุนี้จะมีรายละเอียดของกระบวนการที่แตกต่างกัน กระบวนการขึ้นรูปโลหะผงนี้สามารถทำได้ง่าย คือการใช้แรงกดพร้อมกับการให้ความร้อน ดังรูปที่ 3.11 นำผงโลหะใส่แบบ แล้วอัดด้วย

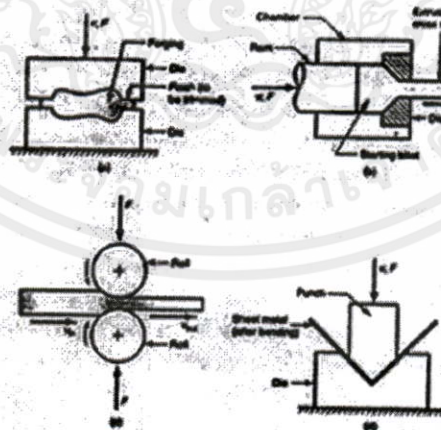
แรงดันสูง ทำให้ผงโลหะเกิดเป็นรูปร่างตามแบบ อุณหภูมิที่ให้กับวัสดุจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ซึ่งสามารถช่วยทำให้เกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ การเกิดการจับตัวกันของผงโลหะโดยวิธีนี้เรียกว่า ซินเตอร์ริง (Sintering)



รูปที่ 3.11 แสดงการขึ้นรูปวัสดุผง

























3.4 กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยแรง (Deformation Processes)

วัสดุเริ่มต้นจะเป็นวัสดุแข็งเหนียว (Ductile Solid) โดยทั่วไปเช่น การเปลี่ยนรูปของโลหะจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อของวัสดุซึ่งเกิดจากแรงกระทำ บางกระบวนการจะใช้ความร้อนช่วยให้วัสดุสามารถยืดตัวออกได้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำกว่าจุดหลอมละลาย กระบวนการเหล่านี้ ได้แก่ Forging Extrusion และ Rolling แสดงในรูปที่ 3.12 และกระบวนการขึ้นรูปเกี่ยวกับโลหะแผ่น คือ การพับ (Bending) ในรูปที่ 3.13 แสดงกระบวนการขึ้นรูปวัสดุแบบต่างๆ โดยใช้แรงกระทำ



รูปที่ 3.12 แสดงกรรมวิธีการเปลี่ยนรูปด้วยแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Mode | Process | | |
|-------------------------|---------|---|---|
| Compression | 1 | Upsetting  | |
| | 2 | Drawing out  | |
| | 3 | Drop forging coining  | |
| | 4 | Pressing in closed die  | |
| | 5 | Extrusion  | |
| | 6 | Reducing  | |
| | 7 | Swaging  | |
| | 8 | Rolling  | |
| | 9 | Reducer rolling  | |
| | 10 | Spinning (conventional)  | |
| | 11 | Power spinning  | |
| Tension and compression | 12 | Expanding  | |
| | 13 | Stretch forming  | |
| | 14 | Embossing  | |
| | 15 | Wire drawing  | |
| | 16 | Deep drawing | With blank-holder   |
| | | Without blank-holder  | |
| | 17 | Ironing  | |
| | Bending | 18 | At straight axis  |
| | | 19 | At curved axis  |
| | Shear | 20 | Shear spinning  |
| | | Shear pressing  | |
| Torsion | 21 | Setting  | |

รูปที่ 3.13 แสดงกระบวนการขึ้นรูปวัสดุ โดยใช้แรงกระทำแบบต่างๆ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะโดยการ ใช้แรงที่แสดงตามรูปที่ 3.13 นั้นมีทั้งหมด 21 กระบวนการ โดยในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการอัดรีดขึ้นรูป ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการดังนี้

3.4.1 การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion)

เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะในสภาวะร้อนหรือเย็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้แรงอัดลงบนชิ้นงานให้ไหลออกมาจากแม่พิมพ์เป็นรูปร่างต่างๆ อาจจะเป็นแท่งตันหรือกลวงก็ได้ กรรมวิธีนี้จะกระทำได้โดยนำชิ้นงานเข้าไปในแม่แบบหรือเบ้าแบบปิด ซึ่งในเบ้าปิดนี้จะมีรูสำหรับให้วัสดุไหลหรือลุดออกตามปริมาตรที่ลดลงของเบ้าเนื่องจากแรงดันของตัวกระทำทั้ง วัสดุที่ถูกดันหรือลุดออกจากเบ้านี้เนื่องจากแรงดันจะทำให้ชิ้นงานอาจติดอยู่กับแม่แบบ หรือลุดออกมากับแกนบีบก็ได้ และชิ้นงานจะมีหน้าตัดที่สม่ำเสมอตามลักษณะของทางออกซึ่งเรียกกันแม่พิมพ์ ในการอัดรีดขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะใหญ่ดังต่อไปนี้

3.4.1.1 การอัดรีดขึ้นรูปโดยตรง (Direct Extrusion)

การอัดรีดด้วยวิธีนี้อาจเรียกอีกอย่างว่า การอัดรีดไปด้านหน้า (Forward Extrusion) ในรูปที่ 3.14 (a) แสดงการอัดรีดโดยตรง โดยตัวกระทำ (Punch) จะอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของบิลเล็ตและจะดันให้บิลเล็ตไหลออกมาจากเบ้าแม่พิมพ์ (Container) ผ่านแม่พิมพ์ (Dies) ที่อยู่กัด้านหนึ่งของบิล

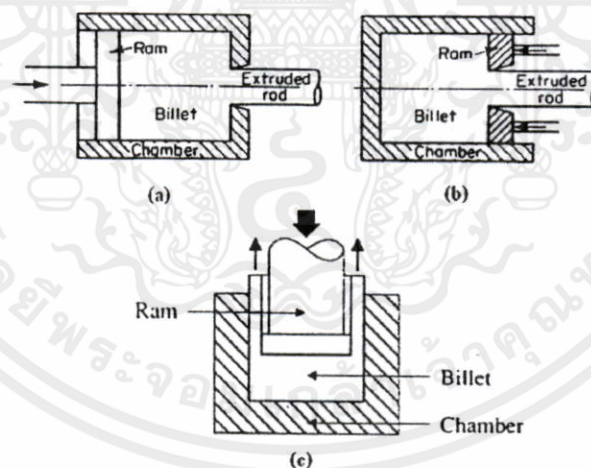
เล็ทเป็นรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ ไม่ว่าจะป็นหน้าตัดกลมตัน หน้าตัดกลมกลวง หรือหน้าตัดรูปหลายเหลี่ยมขึ้นอยู่กับรูปร่างของแม่พิมพ์นั่นเอง

3.4.1.2 การอัดรีดขึ้นรูปโดยอ้อม (Indirect Extrusion)

การอัดรีดวิธีนี้อาจเรียกตามลักษณะทิศทางการไหลออกของวัสดุจากแม่พิมพ์ได้อีกคือ การอัดรีดแบบสวนทาง (Backward Extrusion) ซึ่งในการดันแม่พิมพ์หรือแม่พิมพ์และตัวกระทงจะอยู่ที่ปลายของบิลเล็ทด้านเดียวกัน จึงดูเหมือนว่าใช้แม่พิมพ์เป็นตัวดันงานเอง ทิศทางการไหลของโลหะหรือวัสดุที่ออกจากแม่พิมพ์จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับวิธีแรก หรือตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของการดัน จึงเรียกว่าการอัดรีดแบบสวนทางได้ แสดงในรูปที่ 3.14 (b) ในการอัดรีดด้วยวิธีนี้ใช้กับงานที่มีขนาดจำกัด และมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ที่สำคัญใช้แรงในการดันน้อยกว่าวิธีแรก เนื่องจากผิวของบิลเล็ทที่สัมผัสกับเข้าแม่พิมพ์จะไม่มี การเคลื่อนที่เหมือนการอัดรีดโดยตรง

3.4.1.3 การอัดรีดขึ้นรูปแบบกระแทก (Impact Extrusion)

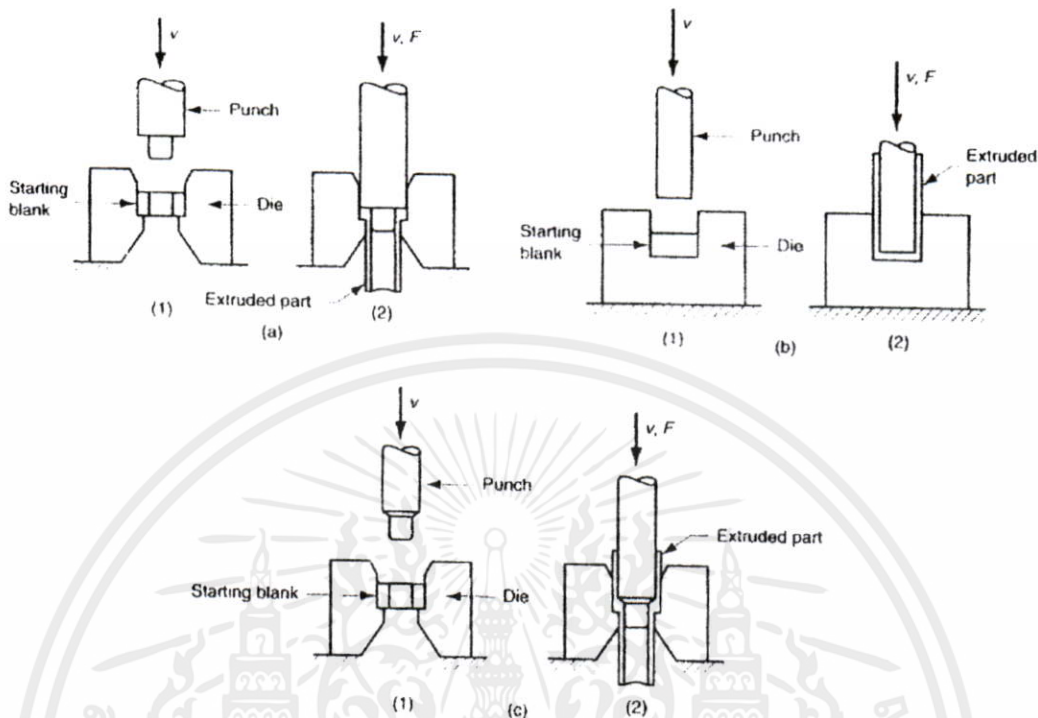
เป็นการอัดรีดโดยในแรงกระแทกแสดงดังรูปที่ 3.14 (c) สามารถผลิตชิ้นงานที่ต้องการผิวบางมาก ๆ ได้ โดยทั่วไปวัสดุที่จะนำมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะต้องมีความอ่อน เช่น ตะกั่ว อลูมิเนียม ดีบุก และสังกะสี เป็นต้น ลักษณะของการดันกระแทกขึ้นรูปมี 3 แบบ คือ ดันไปด้านหน้า (Forward) ดันสวนทาง (Backward) และดันแบบผสม (Combination) แสดงดังรูปที่ 3.15



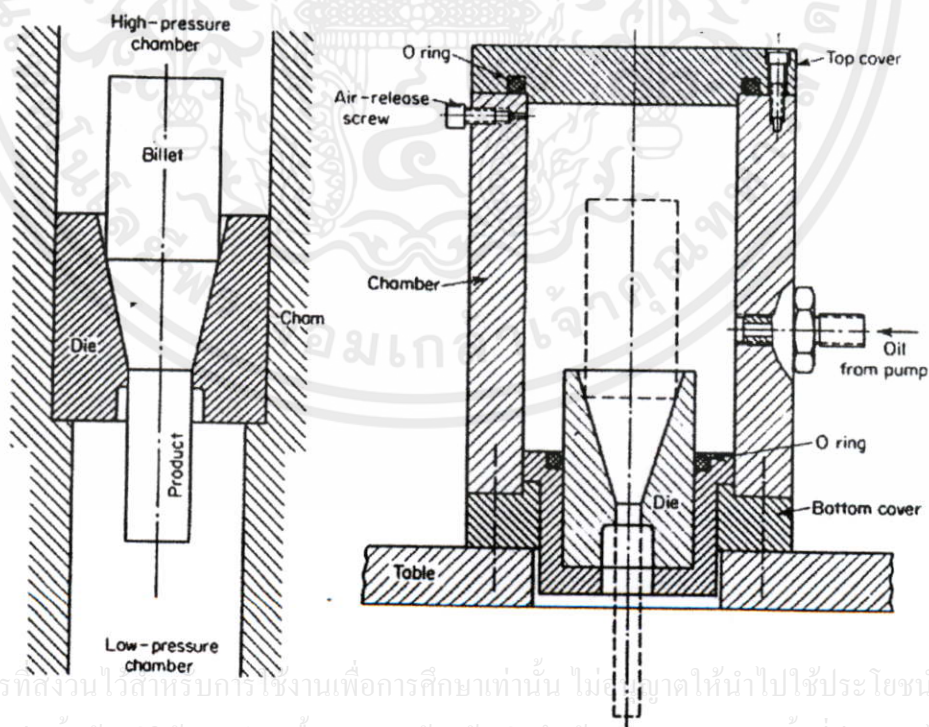
รูปที่ 3.14 ลักษณะการอัดรีดขึ้นรูป (a) Direct (b) Indirect (c) Impact extrusion

ในกระบวนการอัดรีดแบบโดยตรง (Direct Extrusion) นั้นมักจะพบปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยคือ ปัญหาเนื่องจากความฝืด (Friction) ระหว่างผิวสัมผัสของแท่งบิลเล็ทกับเข้าแม่พิมพ์ (Container) จึงได้มีการนำเอาระบบที่มีของเหลวมาพร้อมกับตัวกระทง หรือใช้แรงดันของเหลวดันให้บิลเล็ทไหลผ่านแม่พิมพ์แทนตัวกระทง ซึ่งเรียกว่าการอัดรีดแบบ Hydrostatic Extrusion มาใช้แทน ซึ่งสามารถลดปัญหาดังกล่าวไปได้ รูปที่ 3.16 แสดงการอัดรีดโดยใช้

ของเหลวแทนตัวกระทู้ ส่วนรูปที่ 3.17 ใช้ของเหลวร่วมกับตัวกระทู้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผิวของบิลเล็ตหรือวัสดุที่นำมาทำการขึ้นรูปนั้นจะไม่สัมผัสกับเบ้าแม่พิมพ์เลย

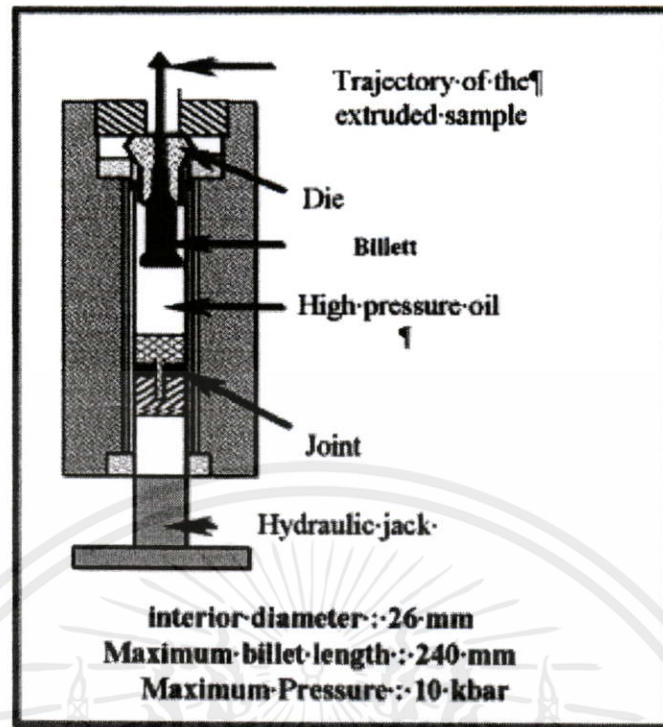


รูปที่ 3.15 การอัดรีดแบบกระแทกในลักษณะต่างๆ



รูปที่ 3.16 แสดงระบบที่ใช้แรงดันของเหลวแทนตัวกระทู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

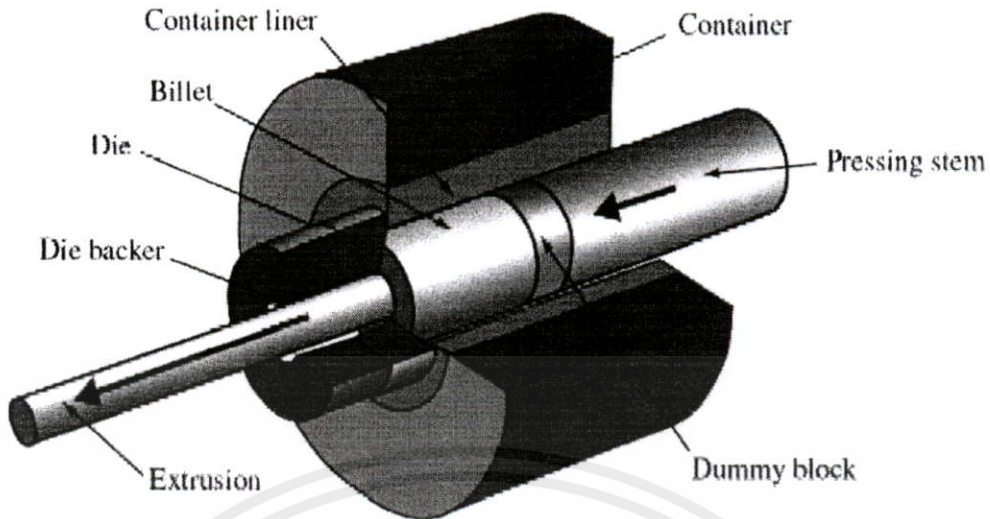


รูปที่ 3.17 การอัดรีดแบบ Hydrostatic ใช้ของเหลวร่วมกับตัวกระทุ้ง

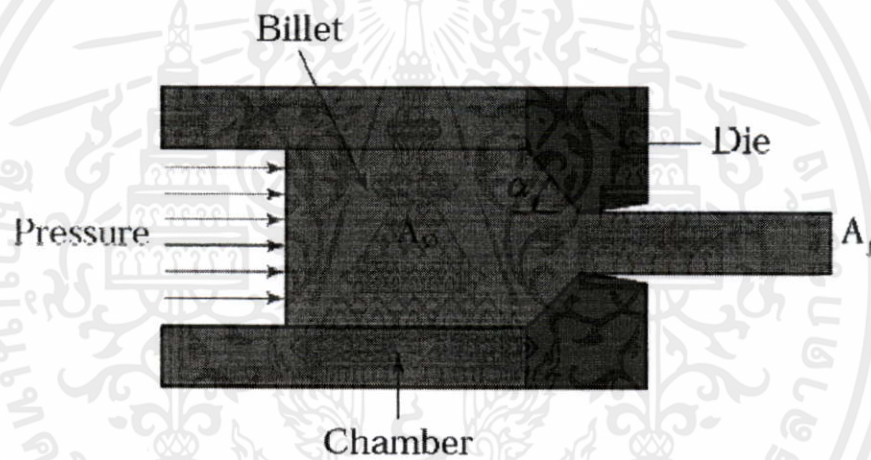
3.4.1.4 ทฤษฎีของการอัดรีดแบบการอัดรีดขึ้นรูปโดยตรง

ในรูปที่ 3.18 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานสำหรับการอัดรีดวิธีนี้ ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจับยึด ชุดจับแม่พิมพ์ เบ้าแม่พิมพ์ ตัวกระทุ้ง และอุปกรณ์เสริมต่างๆ รูปที่ 3.19 แสดงตัวแปรพื้นฐานในกระบวนการอัดรีดแบบโดยตรง เช่น มุมแม่พิมพ์ (Dies angle) อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัด (Reduction ratio of cross section area) ความเร็วในการอัดรีด (Extrusion speed) อุณหภูมิของบิลเล็ต และสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความเสียดทานทุกๆ ผิวสัมผัส

เมื่อก้าวถึงการขึ้นรูปโลหะสิ่งหนึ่งที่มีจะต้องพิจารณา คือ การทำนายโหลดที่กระทำจากภายนอก เพื่อให้โลหะเกิดการไหลและเปลี่ยนแปลงรูปทรงตามที่ต้องการ เนื่องจากในความจริงมักมีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดขึ้นจาก ผลของความเสียดทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่เป็นเอกพันธ์ และการทำให้แข็งด้วยความเครียดที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการเปลี่ยนรูปที่ซับซ้อน จึงเป็นการยากที่จะทำนายแรงหรือภาระที่ต้องการในการขึ้นรูปได้อย่างแม่นยำ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคต่าง และใช้สมมติฐานที่เหมาะสมกับปัญหา ทำให้สามารถประมาณค่าแรงที่ต้องการได้ ในการวิเคราะห์ได้พยายามคำนึงถึง ความไม่แน่นอน ที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยรวมไว้ในสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อให้สามารถประมาณค่าแรงที่ใช้ในการอัดรีด แรงที่เป็นเงื่อนไขบังคับและวิธีการที่โลหะไหลได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่สุด โดยทั่วไปแล้วเทคนิคเหล่านี้ก็มีจุดอ่อนเช่นกันคือ ไม่ว่าจะวิธีใดก็ตามที่สามารถที่จะทำนายคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผ่านการเปลี่ยนรูป การเปลี่ยนรูปสูงสุดที่เป็นไปได้จนกระทั่งแตก หรือการแปรผันของผลจากความเสียดทานระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูป



รูปที่ 3.18 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานในการอัดรีดแบบโดยตรง



รูปที่ 3.19 แสดงตัวแปรพื้นฐานในกระบวนการอัดรีดแบบโดยตรง

ในปัจจุบันการคาดคะเนหรือประมาณค่าความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นมีอยู่ 4 วิธีหลักๆ ดังนี้

1. วิธีงานอุดมคติ (Ideal work)
2. วิธีสมดุลย์แรงหรือวิธีแบ่งช่วง (Free-body equilibrium or slab method)
3. วิธีขอบเขตบน (Upper bound solution)
4. วิธีสนามเส้นเลื่อนไหล (Slip-line field analysis)

ซึ่งใน 4 วิธีดังกล่าวมา วิธีที่ 1 นั้นเป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปอย่าง

ง่ายที่สุด วิธีที่ 2 เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างมากเพราะมีความที่แน่นอนในระดับหนึ่งและง่ายต่อการ

คำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ 4 ซึ่งมีค่าซับซ้อนและยุ่งยากให้การคำนวณแต่จะให้ผลที่แม่นยำ

มาก ส่วนในวิธี 3 นั้นเป็นการประมาณค่าสูงสุดในกระบวนการอัดรีดซึ่งค่าที่คำนวณได้จากวิธีที่ 1 2

และ 4 จะไม่สามารถมีค่ามากกว่านี้ได้

3.4.1.4.1 การวิเคราะห์การอัดรีดขึ้นรูปโดยวิธีงานอุดมคติ (Ideal work)

วิธีการง่ายที่สุดสำหรับการทำนายแรงก็คือ การสมมูลงานหรือสมมูลพลังงาน โดยให้งานภายนอกเท่ากับพลังงานที่ใช้ในระหว่างการเปลี่ยนรูปขึ้นงาน กรรมวิธีนี้เป็นการสมมติทางอุดมคติว่า งานภายนอกทั้งหมดใช้ไปในการเปลี่ยนรูปเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ทั้งนี้ไม่ได้คิดถึงผลของความเสียดทานและการเปลี่ยนรูปที่ไม่เป็นเอกพันธ์ งานต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้นจริงกับความเครียดจริงภายใต้ขีดจำกัดของความเครียดที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากเป็นวิธีอุดมคติ งานต่อหน่วยปริมาตรมีค่าเท่ากับ

$$w_i = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (3.11)$$

เมื่อ $\epsilon = \ln(A_0/A_f)$

หากพิจารณาการอัดรีดไปด้านหน้าโดยใช้แรงกดแท่งโลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม D_0 ให้ไหลผ่านแม่พิมพ์ลู่เข้า ไปยังทางออกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D_f เมื่อวัสดุเริ่มไหลออกนี้ถือว่าเป็นสถานะคงที่ เนื่องจากโลหะมีสภาพอัดตัวไม่ได้ ดังนั้นปริมาตรของโลหะขาเข้า $A_0\Delta l$ ต้องเท่ากับขาออก $A_f\Delta l$ และงานจริงรวมคือ W_a ที่กระทำภายนอกต้องเท่ากับ

$$W_a = F_e\Delta l \quad (3.12)$$

เมื่อ F_e คือแรงที่กระทำกับแท่งโลหะ เพราะฉะนั้นงานต่อหน่วยปริมาตรจะมีค่าเท่ากับ

$$w_a = \frac{W_a}{A_0\Delta l} = \frac{F_e\Delta l}{A_0\Delta l} \quad (3.13)$$

เมื่อนิยามว่า F_e/A_0 คือความเค้นหรือความดันที่ใช้ในการอัดรีด σ_c จะได้

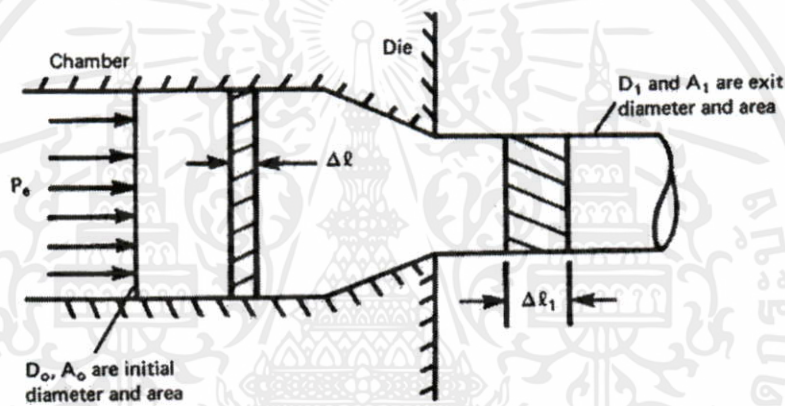
$$w_a = \sigma_c \quad (3.14)$$

สำหรับกรรมวิธีแบบอุดมคติ $w_a = w_i$ แต่ในความเป็นจริง $w_a > w_i$ เพราะฉะนั้นค่าความเค้นที่เอกสารนี้ใช้ในการอัดรีดเมื่อพิจารณาแบบอุดมคติจะมีค่าเท่ากับค่าที่แน่นอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} = \ln \frac{A_0}{A_f} = \ln \left(\frac{1}{1-r_e} \right) \quad (3.15)$$

- เมื่อ σ_c = ค่าความเค้นดึงหรืออัดรีด
 $\bar{\sigma}$ = ค่าความเค้นไหลเฉลี่ยของวัสดุ
 A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนเข้าแม่พิมพ์
 A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังออกจากแม่พิมพ์
 r_e = อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด = $(A_o - A_f) / A_o$

ค่าความเค้นหรือความดันที่ได้ในวิธีนี้จะมีค่าต่ำที่สุดในบรรดาวิธีทั้งหมดที่มีอยู่ หรือบางครั้งเรียกวิธีนี้ว่า วิธีขอบเขตล่าง (Lower bound solution) ในรูปที่ 3.20 แสดงลักษณะความเค้นหรือความดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการดึงหรืออัดรีดขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์รูปกรวย เมื่อไม่คำนึงถึงแรงเสียดทานภายในและแรงเฉือนภายในที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.20 แสดงความเค้นหรือความดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป

พิจารณาค่าแก้สำหรับแรงเสียดทานภายใน และแรงเฉือนภายนอกที่เกิดขึ้น จากสมการที่ 3.15 สามารถเขียนใหม่ได้โดยคูณตัวประกอบในการแก้ไข 2 ตัว ตัวแรกเป็นค่าแก้สำหรับแรงเสียดทานภายนอก $C_f(\alpha)$ ซึ่งฟังก์ชันนี้ขึ้นอยู่กับครึ่งมุมแม่พิมพ์ (α) เป็นหลัก และค่าแก้สำหรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายใน $C_i(\alpha, r_e)$ ซึ่งฟังก์ชันนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับครึ่งมุมแม่พิมพ์เท่านั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (r_e) ด้วย โดยที่ครึ่งมุมแม่พิมพ์จะวัดที่ผิวของแม่พิมพ์เทียบกับแกนกลางของชิ้นงาน

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r_e) \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึง 1 ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r_e) \bar{\sigma} \ln \frac{1}{1-r_e} \quad (3.17)$$

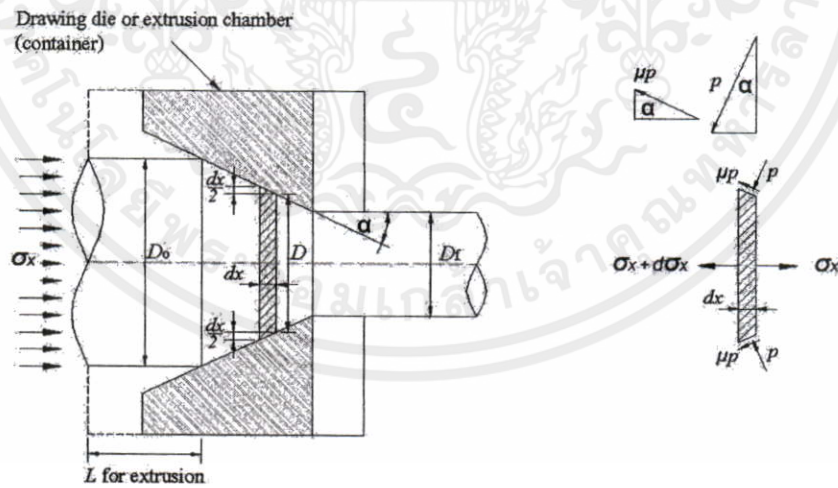
เมื่อ C_f = ฟังก์ชันค่าปรับแก้สำหรับแรงเสียดทานภายนอก

C_i = ฟังก์ชันค่าปรับแก้สำหรับแรงเฉือนภายใน

α = ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์

3.4.1.4.2 วิธีการสมดุลแรงหรือวิธีแบ่งช่วง (Free-Body Equilibrium or Slab Method)

วิธีนี้เรียกว่า วิธีสมดุลวัตถุอิสระ โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นบนโลหะหรือสแลบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน วิธีนี้จะให้สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งพิจารณาการแปรผันเฉพาะทิศทางเดียวเท่านั้น เมื่อใช้เงื่อนไขที่เหมาะสม การอินทิเกรตสมการนี้จะให้ผลเฉลยของปัญหาซึ่งสมมติฐานที่เหมาะสมประกอบไปด้วย ทิศทางของไหลที่กระทำและระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางนี้ นิยามว่าเป็นทิศทางหลัก และความเค้นหลักไม่แปรผันบนระนาบเหล่านี้ ผลของความเสียดทานที่ผิวรวมอยู่ในสมการสมดุลของแรงแต่ไม่มีผลกระทบต่อการบิดเบี้ยวภายในของโลหะ และภาคตัดของระนาบยังคงเป็นระนาบเดิมหลังจากการเปลี่ยนแปลงรูปไปแล้ว ในรูปที่ 3.21 แสดงแท่งโลหะทรงกระบอกถูกดันให้ไหลผ่านแม่พิมพ์รูปกรวย และสแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรง เนื่องจากความเค้นไม่แปรผันบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ การเปลี่ยนแปลงโคของ σ_x ที่เกิดขึ้นเทียบกับ dx จึงมีเพียงทิศทางเดียวดังรูป ความเค้นที่เกิดขึ้นที่แม่พิมพ์ ตั้งฉากกับชิ้นงานคือ P และผลของความเสียดทานที่ผิวคือ μP เมื่อ μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน



รูปที่ 3.21 ลักษณะของสแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรง

เอกสารนี้พิจารณาการสมดุลของแรงในทิศทางแกน x จะได้ว่า แท้ที่จริง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 + P \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \mu P \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3.18)$$

จัดรูปสมการให้ง่ายขึ้น และไม่คิดเทอมอนุพันธ์อันดับสูงจะได้

$$\sigma_x dD + Dd\sigma_x + 2Pdx \tan \alpha + 2\mu Pdx = 0 \quad (3.19)$$

แทนค่า $2dx = \frac{dD}{\tan \alpha}$ สมการ 3.19 เขียนใหม่ได้เป็น

$$Dd\sigma_x + 2[\sigma_x + P(1 + \mu \cot \alpha)]dD = 0 \quad (3.20)$$

ก่อนทำการอินทิเกรตสมการ 3.20 ได้ต้องทราบความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันระหว่าง P กับ σ_x ก่อน ถ้าสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของความเค้นหลักแล้วรวมเกณฑ์การครากก็จะได้ความสัมพันธ์ที่จำเป็นของ P กับ σ_x

จากสมมติฐานว่า x และ y เป็นทิศทางการหลัก σ_x และ σ_y จึงเป็นความเค้นหลักและไม่แปรผันในระนาบของสแลบ รวมแรงในทิศทางแกน y ให้ $\sum F_y = 0$ จะได้

$$\sigma_y (\pi D dx) + P \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha - \mu P \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = 0 \quad (3.21)$$

จัดรูปสมการ 3.21 ให้ง่ายขึ้นจะได้

$$\sigma_y = -P(1 - \mu \tan \alpha) \quad (3.22)$$

โดยทั่วไปแล้ว $\mu \tan \alpha \ll 1$ ในเทอม $\mu \tan \alpha$ จึงไม่จำเป็นต้องนำมาคิดสมการ 3.22 จะเหลือ

$$\sigma_y = -P \quad (3.23)$$

ซึ่งในสมการที่ 3.23 แสดงให้เห็นว่า σ_y เป็นความเค้นอัด ในพจน์ของความเค้นหลัก เนื่องจากเห็นได้ชัดว่า σ_x เป็นความเค้นดึง ดังนั้น

$$\sigma_x = \sigma_1, \sigma_y = \sigma_3 = -P, \sigma_z = \sigma_2 \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อพิจารณาเป็นความเค้นเครียดในระนาบ จากเกณฑ์การครากของ Von Mises และ Tresca จะได้

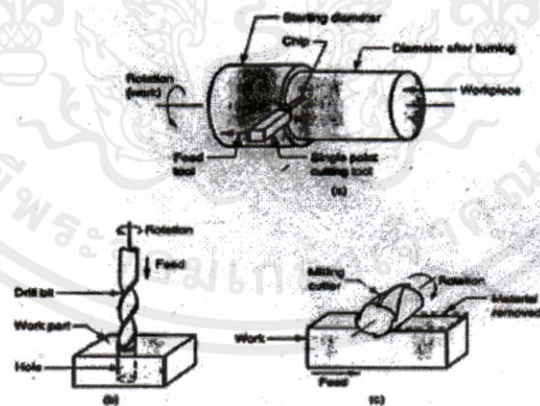
$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \sigma_x - (-P) \quad (3.25)$$

หากทำการพิจารณาความยาวของแท่งอลูมิเนียมและเข้าประกอบแล้ว ในรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นขณะทำการอัดรีด ไม่ได้เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของแท่งโลหะกับแม่พิมพ์เพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของแท่งโลหะกับเข้าประกอบด้วยซึ่งสมการที่ใช้ทำนายหรือประมาณค่าแรงที่ใช้ในการอัดรีด ซึ่งมีวิธีและที่มาคล้ายคลึงกับกรณีไม่คิดความเสียหายระหว่างแท่งโลหะกับเข้าประกอบแสดงดังนี้

$$\frac{\sigma}{2k} = \left\{ 1 + \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{R_o}{R_f} \right)^{2B} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ 2B \left[\frac{L}{R_o} \tan \alpha - \left(1 - \frac{R_f}{R_o} \right) \right] \right\} - 1 \quad (3.29)$$

3.5 กระบวนการตัดเศษวัสดุ (Material removal processes)

วัสดุเริ่มต้นจะเป็นของแข็ง ซึ่งจะนำบางส่วนที่ไม่ได้ใช้งานออกไปทำให้เกิดเป็นชิ้นส่วนมีรูปทรงตามต้องการ กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีเครื่องจักรในการทำงาน เช่น การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัด (Milling) ดังรูปที่ 3.23 แสดงขั้นตอนการตัดอย่างง่ายที่ใช้กับวัสดุแข็ง ซึ่งจะต้องมีเครื่องมือตัด (Tooling) ที่แข็งกว่าวัสดุที่นำมาทำการตัด การเจียรใน (Grinding) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งซึ่งจะต้องใช้ล้อหินขัดตัดเศษวัสดุออก ส่วนกระบวนการอื่น ๆ เป็นกระบวนการพิเศษ ได้แก่ การตัดด้วยลำแสงเลเซอร์หรือลำอิเล็กตรอน การใช้สารเคมีกัด การตัดโดยใช้กระแสไฟฟ้า และการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับสารเคมี



รูปที่ 3.23 แสดงการขึ้นรูปโดยการตัดเศษ (a) การกลึง (b) การเจาะ (c) การกัด

ในกระบวนการผลิตเพื่อทำการขึ้นรูปวัสดุจำเป็นต้องทำให้เกิดมีของเสีย (Waste) และเศษวัสดุ (Scrap) น้อยที่สุด จะเห็นได้ว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยการตัดเศษวัสดุบางส่วนออกจะทำให้เกิดของเสีย หรือเศษมาก (Net shape Processes) หรือได้ชิ้นงานใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง (Near net shape Processes) ขั้นตอนการผลิตจำเป็นต้องมีเครื่องจักร เครื่องมือขึ้นรูป และคน เครื่องจักรเป็น

สิ่งแรกที่จะต้องพิจารณา ซึ่งเป็นตัวกำหนดเวลาทำการตัด เครื่องจักรเหล่านี้หลายอย่างเรียกรวมว่า Machine Tool ซึ่งจะทำหน้าที่จับเครื่องมือขึ้นรูปงานโดยมีคนควบคุม ในปัจจุบันเครื่องจักรที่ทันสมัยขึ้นจะเป็นแบบอัตโนมัติ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรอาจมาจากไฟฟ้า หรือไอน้ำ เครื่องจักรที่นำมาใช้ควรเลือกให้สามารถใช้งานได้หลายอย่าง เครื่องจักรในการผลิตอื่น ๆ เช่น เครื่องกดอัด (Press) ใช้ในขั้นตอนการกดขึ้นรูป Forge hammer ใช้สำหรับการรีดขึ้นรูปด้วยความร้อน Rolling mills ใช้สำหรับการรีดโลหะแผ่น เครื่องเชื่อม (Welding Machines) ใช้สำหรับการเชื่อม Insertion Machines ใช้สำหรับการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจร นอกจากนี้ชื่อของเครื่องจักรจะเป็นไปตามชื่อกระบวนการ

กระบวนการขึ้นรูป (forming process) ของวัสดุนั้นส่วนใหญ่จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นโลหะเป็นส่วนมาก หรือบางที่เรียก Deformation process ซึ่งเป็นการทำงานในช่วงการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (plastic deformation) ในกระบวนการพื้นฐานที่กล่าวมายังสามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายหลายวิธี ดังนี้ แบ่งตามชนิดของแรงกระทำบนชิ้นงาน เช่น แรงอัด แรงดึง และแรงเฉือน แบ่งตามการใช้งานของชิ้นงานสำเร็จ เช่น ชิ้นงานที่สามารถนำไปใช้งานได้เลย และชิ้นงานที่ต้องนำไปประกอบกับชิ้นงานอื่นๆจึงสามารถนำไปใช้งานได้ แบ่งตามขนาดของชิ้นงาน เช่น ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นงานที่ขึ้นรูปทั้งก้อน และชิ้นงานที่ขึ้นรูปเป็นแผ่น แบ่งตามอุณหภูมิในการทำงาน เช่น การขึ้นรูปร้อน และการขึ้นรูปเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

การศึกษาและวิจัยการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุนในครั้งนี้นั้น นอกจากได้ทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แล้วได้มีการทดลองเปรียบเทียบด้วย เพื่อการเปรียบเทียบของผลที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งได้พิจารณาควบคุมตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดไปด้านหน้าผ่านแม่พิมพ์หมุน โดยมีตัวแปรที่พิจารณาดังนี้คือ ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความเร็วของการอัดรีด ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่หมุน และสารหล่อลื่นที่ใช้ลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานอลูมิเนียมและแม่พิมพ์ โดยการวิจัยครั้งนี้มีการนำเครื่องมือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ มาใช้ในการทดลอง ทดสอบและบันทึกผล ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาตั้งแต่วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง อุปกรณ์เครื่องมือ เครื่องจักร วิธีและขั้นตอนในการทดลอง รวมไปถึงวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อหลัก ๆ ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและทดสอบ
3. ตัวแปรในการทดลอง แผนการทดลองและคุณสมบัติที่วิเคราะห์ภายหลังการอัดรีด
4. ขั้นตอนและวิธีในการทดลอง
5. วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาการอัดรีดไปด้านหน้าผ่านแม่พิมพ์หมุนในครั้งนี เลือกใช้อลูมิเนียมเป็นชิ้นงานที่ใช้ในการอัดรีด โดยใช้วัสดุสารหล่อลื่น 2 แบบ คือ สารหล่อลื่นแบบของแข็งและแบบของเหลว ซึ่งสมบัติต่างๆ ของอลูมิเนียมและสารหล่อลื่นที่เลือกใช้มีดังนี้

4.1.1 อลูมิเนียม

อลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองเลือกใช้อลูมิเนียมแท่ง หน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ซึ่งได้มีการนำอลูมิเนียมแท่งหน้าตัดกลมขนาดดังกล่าวที่หาซื้อได้ทั่วไป ไปหาส่วนผสมทางเคมี เพื่อหาว่าอลูมิเนียมดังกล่าวมีหมายเลขตรงกับหมายเลขใดตามมาตรฐานของ Aluminum Association Number โดยได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวัสดุและสารประกอบ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectrometer (EDS) และวิเคราะห์ได้ส่วนประกอบทางเคมีโดยนำหน้าแสดงไว้

ในตารางที่ 4.1 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ Aluminum Association Number จึงทราบว่ามีความหมายเลขมาตรฐานคือ Al6063 เนื่องจากพบส่วนผสมของ ซิลิกอน (Si) และแมกนีเซียม (Mg) ในปริมาณที่ตรงกับมาตรฐาน และทำให้ทราบค่าสมบัติเฉพาะตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ส่วนค่าความแข็งแรงของวัสดุ ได้มีการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติเหล่านี้ด้วยการทดสอบแรงอัดตามมาตรฐาน American Society for Testing and Material (ASTM) โดยใช้แท่งอลูมิเนียมที่มีความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงทดสอบ (Gauge Length) เท่ากับ 10 และ 9 มิลลิเมตรตามลำดับ และใช้ความเร็วในการอัด 1 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งผลการทดสอบได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ได้ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield Strength Y) เท่ากับ 210 Mpa ซึ่งค่าความเค้นที่จุดครากที่ได้นี้ ได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย

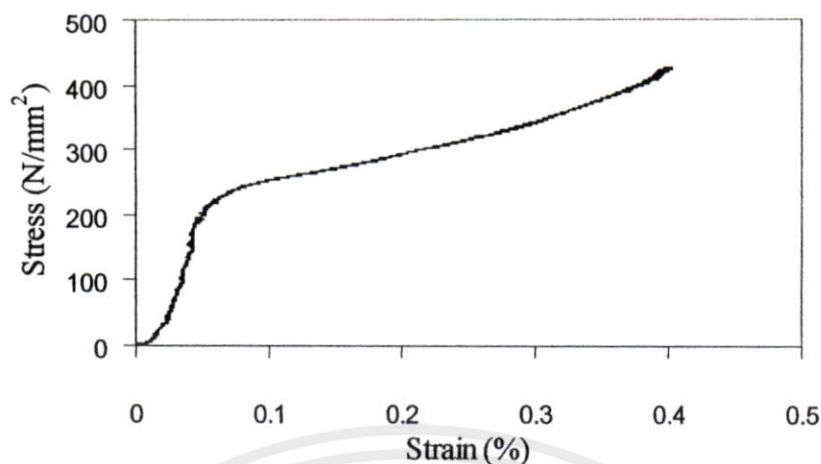
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของอลูมิเนียมที่ได้จากการทดสอบ (% โดยน้ำหนัก)

| ส่วนผสม | Mg | Si | Fe | Cu | Al |
|-----------|-----|-----|-----|-----|------|
| % โดย นน. | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 99.1 |

ตารางที่ 4.2 สมบัติเฉพาะของ Al 6063

| | |
|---|-----------------------|
| Yield Strength (MPa) | 210 |
| Density (g/cm^3) | 2.70 |
| Modulus of Elasticity (GPa) | 69 |
| Poisson's Ratio | 0.33 |
| Coefficient of Thermal Expansion ($^{\circ}C^{-1}$) | 23.6×10^{-6} |
| Thermal Conductivity ($W/m \cdot K$) | 180 |
| Specific Heat ($J/kg \cdot K$) | 896 |
| Electrical Resistivity ($\Omega \cdot m$) | 3.7×10^{28} |
| Crystal structure (Type) | F.C.C. |
| Melting Point ($^{\circ}C$) | 660 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบด้วยการอัด (Compression Test) ของแท่งอลูมิเนียม

4.1.2 วัสดุสารหล่อลื่น

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปวัสดุนั้น เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเลือกใช้เครื่องจักรเพื่อทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง หากแรงเสียดทานมีค่ามากเครื่องจักรจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่หรือใช้กำลังงานมากเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานดังกล่าว หากทำให้แรงเสียดทานดังกล่าวมีค่าลดลงหรือหายไปได้ การขึ้นรูปวัสดุก็จะสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้พลังงานน้อยลงหรือขนาดของเครื่องจักรที่เล็กลงได้ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้วัสดุหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสให้มีคุณสมบัติที่ต่างกันทั้งหมด 2 ชนิดคือ โซเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่นตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1.2.1 โซเดียมสเตียเรต (Sodium Stearate Na-ST)

โซเดียมสเตียเรตหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สบู่โซเดียม (Sodium Soap) เนื่องจากเป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของกรดไขมันที่ใช้ในการผลิตสบู่และเครื่องสำอาง โซเดียมสเตียเรตสามารถละลายในน้ำได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นเพื่อลดความเสียดทานในอุตสาหกรรมดึงขึ้นรูปและอัดรีดโลหะในปัจจุบัน เพราะสามารถกำจัดออกจากผิวของชิ้นงานได้ง่ายหลังจากชิ้นงานโลหะผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว โดยโซเดียมสเตียเรตมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวคล้ายแป้งและมีคุณสมบัติเฉพาะตามที่แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโซเดียมสเตียเรตจากบริษัท อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมีภัณฑ์ (ประเทศไทย) จำกัด

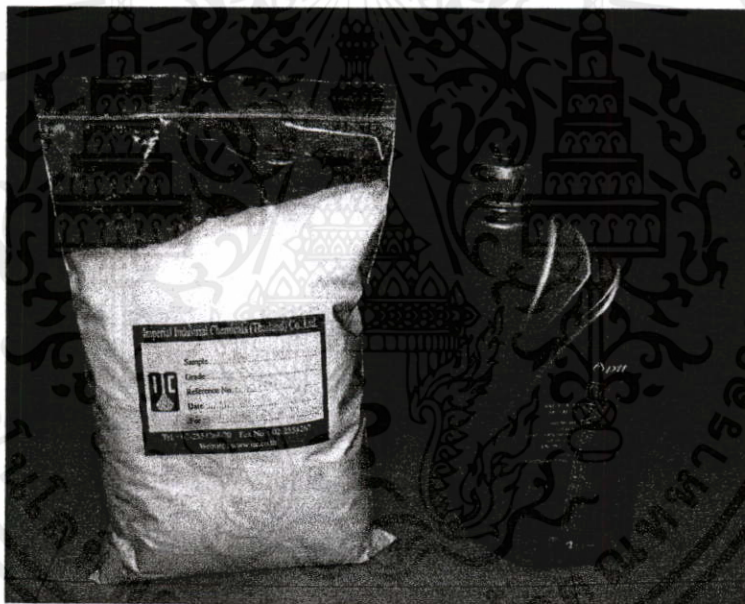
4.1.2.2 น้ำมันหล่อลื่น SAE 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 (Society of Automotive Engineer) เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สำหรับหล่อลื่นชิ้นส่วนในเครื่องจักรกลทั่วไป ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 สามารถหาได้จากหนังสือทั่วไป และคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น SEA 40 ที่มีใช้และหาซื้อได้โดยทั่วไปจะมีค่าความ

หนาแน่นประมาณ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °C มีค่าประมาณ 0.11405 (Pa·s)

ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของโซเดียมสเตียเรต

| SPECIFICATION | |
|----------------------------|--------------|
| FREE FATTY ACID | 2% MAX |
| APPEARANCE | WHITE POWDER |
| FREE ALKALI | 2% MAX |
| SODIUM CONTENT | 7.5-8.5 % |
| MELTING POINT | > 200°C |
| LOSS OF MOISTURE AT 105° C | 8 % MAX |



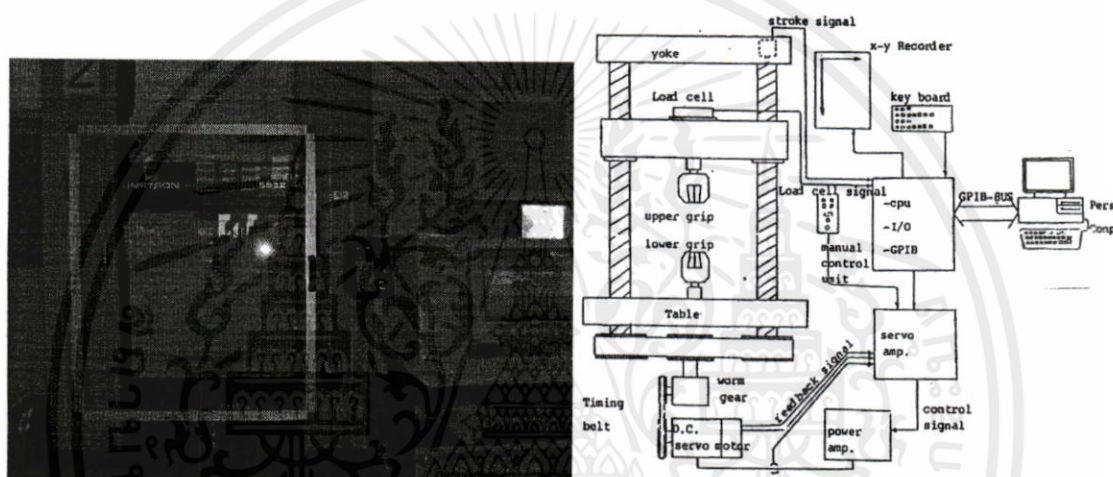
รูปที่ 4.2 โซเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นในการอัดรีด

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและทดสอบ

ในการอัดรีดโลหะ แท่งโลหะจะถูกดันให้ไหลผ่านแม่พิมพ์ด้วยแรงกดผ่านทางหัวกด (Punch) ทำให้แท่งโลหะมีรูปร่างตามรูปแบบของแม่พิมพ์ที่ใช้ ซึ่งในการอัดรีดต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์หลายชนิด นอกเหนือจากแม่พิมพ์และหัวกดแล้วยังต้องมีเครื่องจักรสำหรับสร้างแรงขับเคลื่อนให้หัวกด และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังการอัดรีดด้วย อีก เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่สามารถนำไปอ้างอิงและเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ จึงมีการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบดังนี้

4.2.1 เครื่องทดสอบวัสดุ

ในการทดลองเพื่อศึกษาถึง การอัดรีดแท่งอลูมิเนียมไปด้านหน้าผ่านแม่พิมพ์หมุน ได้ใช้เครื่องทดสอบ UNIVERSAL TESTING MACHINE (UTM) ของ INSTRON 5582 100 kN เพื่อสร้างแรงกดให้แท่งอลูมิเนียมไหลผ่านแม่พิมพ์ผ่านทางหัวกด (Punch) ซึ่งเครื่องทดสอบวัสดุนี้สามารถสร้างแรงกดได้สูงสุด 10 ตัน หรือ 10,000 กิโลกรัม และสามารถควบคุมการทำงานต่างๆ รวมถึงการประมวลผล และบันทึกผลได้โดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งไคอะแกรมการทำงานและลักษณะต่างๆ ของเครื่องทดสอบวัสดุแสดงไว้ตามรูปที่ 4.3 โดยเครื่องทดสอบนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ โลหการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



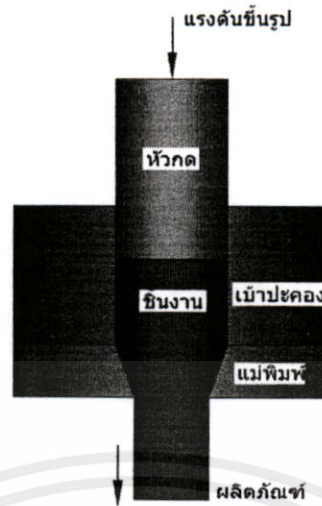
รูปที่ 4.3 แสดงภาพด้านหน้าของเครื่องทดสอบวัสดุและไคอะแกรมการทำงานของเครื่อง

4.2.2 เครื่องทดสอบค่าความแข็ง

การทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานอลูมิเนียมก่อนและหลังกระบวนการอัดรีด โดยการทดสอบและวัดค่าความแข็งทดสอบและวัดค่าด้วยเครื่องทดสอบค่าความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Testing) หรือที่เรียกกันว่า วิกเกอร์สเกล (HV) โดยใช้น้ำหนักในการกดชิ้นงาน 0.3 กิโลกรัม หรือประมาณ 3 นิวตัน และเวลาในการกด 10 วินาที ซึ่งการทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์นี้รอยกดที่ได้จะมีขนาดเล็ก การวัดขนาดของรอยกดต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ ในการวัดขนาด ซึ่งวิธีการวัดแบบนี้เหมาะสำหรับการวัดและทดสอบในบริเวณพื้นที่แคบและพื้นที่ที่ต้องการความละเอียดสูงอย่างเช่น บนพื้นที่หน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการอัดรีดแล้ว

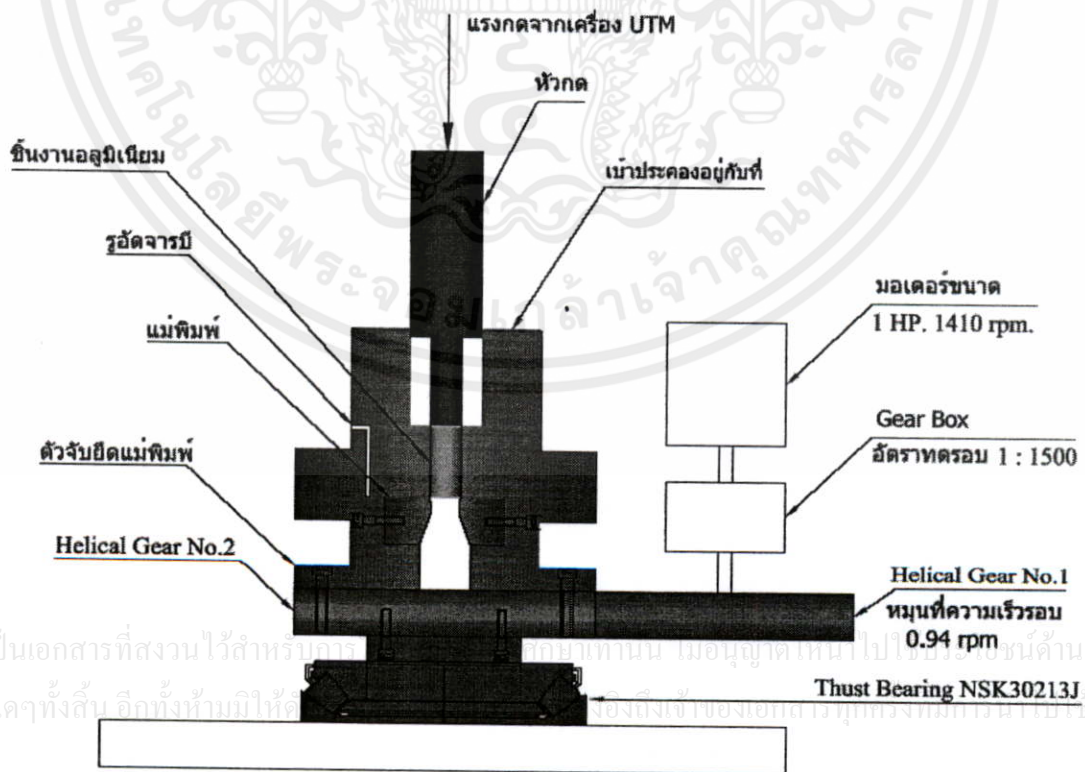
4.2.3 เครื่องอัดรีดชิ้นรูปที่แม่พิมพ์หมุนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เครื่องอัดรีดชิ้นรูป (Extrusion Machine) นั้นประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักเพียง 3 ส่วนคือ หัวกด (Punch) แม่พิมพ์ (Dies) และเบ้าประคอง (Container) ตามที่แสดงในรูปที่ 4.4 หัวกดทำหน้าที่อัดรีดชิ้นงานที่อยู่ในเบ้าประคองผ่านแม่พิมพ์ให้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.4 แสดงส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีดขึ้นรูป

การทดลองครั้งนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอัดรีดขึ้นรูปขึ้นมาใหม่ โดยเครื่องอัดรีดที่ออกแบบนี้แตกต่างจากเครื่องอัดรีดโดยทั่วไปที่แม่พิมพ์หมุนได้ ในขณะที่หัวกดและเบ้าปะคองไม่หมุน ซึ่งการออกแบบนอกจากจะต้องทำให้แม่พิมพ์หมุนได้ขณะทำการอัดรีดขึ้นงานแล้ว ต้องคำนึงถึงแรงเสียดทานของเครื่องอัดรีดให้มีค่าน้อยที่สุด เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทาน จึงทำให้มีการเพิ่มขึ้นส่วนประกอบอื่นๆ เพิ่มเติม ตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 โดยแต่ละชิ้นส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.5 แสดงการออกแบบส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดขึ้นรูปที่แม่พิมพ์หมุนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้...
 1

4.2.3.1 ชุดแม่พิมพ์

ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองทำขึ้นจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทำแม่พิมพ์ในงานขึ้นรูปเย็น ซึ่งภายหลังจากผ่านกระบวนการตัดกลึงเพื่อให้ได้รูปทรงตามแบบแล้วนำไปผ่านกระบวนการชุบแข็งเพื่อให้วัสดุมีความแข็งและทนต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น หลังจากการชุบแข็งแล้วค่าความแข็งของแม่พิมพ์มีค่าอยู่ระหว่าง 59-60 HRC ซึ่งแม่พิมพ์จะถูกประกอบเข้ากับตัวจับยึดแม่พิมพ์ เพื่อทำประกอบกับชุดเครื่องมืออื่น ลักษณะของตัวจับยึดแม่พิมพ์และชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.6 ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดครึ่งมูมของแม่พิมพ์จำนวน 3 ขนาด โดยหลักการเลือกนั้นส่วนหนึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งขนาดของแม่พิมพ์ที่เลือกใช้มีดังนี้

1. ขนาดครึ่งมูมแม่พิมพ์ 8 องศา โดยแบ่งออกเป็น 2 ตัว ตามอัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดคือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์
2. ขนาดครึ่งมูมแม่พิมพ์ 15 องศา โดยแบ่งออกเป็น 2 ตัว ตามอัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดคือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์
3. ขนาดครึ่งมูมแม่พิมพ์ 45 องศา โดยแบ่งออกเป็น 2 ตัว ตามอัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดคือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์

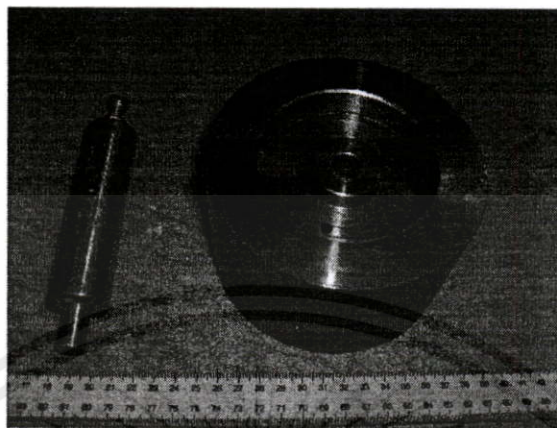


รูปที่ 4.6 ตัวจับยึดแม่พิมพ์และชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.3.2 หัวกดและเบ้าประกอบ

หัวกดและเบ้าประกอบถูกสร้างขึ้นจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 เช่นกัน โดยหัวกดและเบ้าประกอบจะถูกยึดแน่นกับโครงสร้างของเครื่อง เพื่อไม่ให้มีการหมุนตามแม่พิมพ์ ซึ่งหัวกดจะมีลิ้ม

เป็นตัวบังคับให้เคลื่อนที่ขึ้นลงได้โดยที่ไม่หมุน ลักษณะของชุดหัวคดและเบ้าประกอบแสดงตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 หัวคดและเบ้าประกอบที่ใช้ในการทดลอง

4.2.3.3 ชุดขับเคลื่อนการหมุน

การทดลองในครั้งนี้ได้ออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนการหมุนขึ้น เพื่อให้แม่พิมพ์ถูกหมุนด้วยความเร็วรอบตามที่กำหนดได้ ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ มอเตอร์ไฟฟ้า ชุดเฟืองทดรอบ (Gear Box) ชุดเฟืองเฉียง (Helical Gear) และเบร็กรับแรงตามแนวแกน (Spherical Thrust Bearing) โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ามียุทธศาสตร์ตามตารางที่ 4.4 ซึ่งการออกแบบในส่วนของคุณเฟืองทดรอบเลือกใช้อัตราทดรอบ 1 ต่อ 1500 รอบ เพื่อลดความเร็วรอบของมอเตอร์ไปขับเฟืองเฉียงตัวที่ 1 ให้เหลือ 0.94 รอบต่อนาที โดยสาเหตุของการเลือกเฟืองเฉียงสำหรับเครื่องอัดรีดในครั้งนี้เนื่องมาจากเฟืองเฉียงสามารถทำงานได้ดีกว่าเฟืองชนิดอื่นๆ ในกรณีที่แกนเพลลาของเฟืองเฉียงตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ไม่ขนานกัน ซึ่งเฟืองเฉียงตัวที่ 1 จะถูกเปลี่ยนตามการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ โดยมีจำนวนฟันเฟืองต่างกันตามที่แสดงในตารางที่ 4.5 และการออกแบบครั้งนี้มีเบร็กรับแรงตามแนวแกนทำหน้าที่เป็นฐานรับแรงกดที่สามารถหมุนได้ เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดจากการหมุนไปพร้อมกับการกด โดยรูปที่ 4.8 แสดงชุดเฟืองทดรอบและเบร็กรับแรงตามแนวแกน

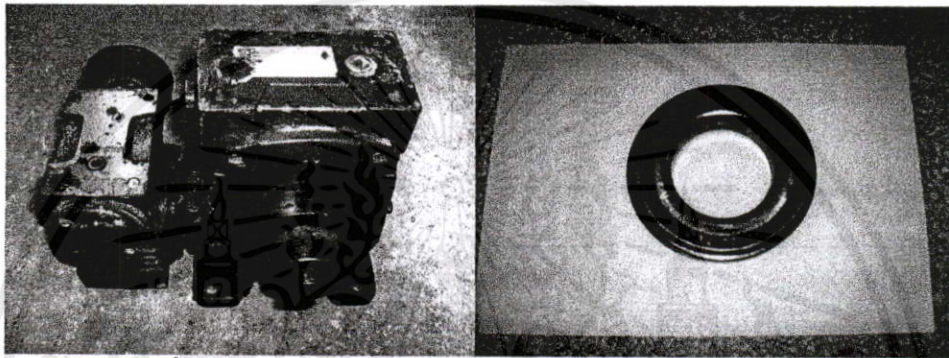
ตารางที่ 4.4 รายละเอียดของมอเตอร์ไฟฟ้า

| | |
|-------------|-------------------------------------|
| ผู้ผลิต | MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION |
| รุ่น | SUPER LINE SF-J |
| ระบบไฟฟ้า | 3 เฟส, 50 Hertz, 380 Volt, 2.0 Amp. |
| ขนาดกำลัง | 1 HP (0.75 kW) |
| ความเร็วรอบ | 1410 รอบต่อนาที |

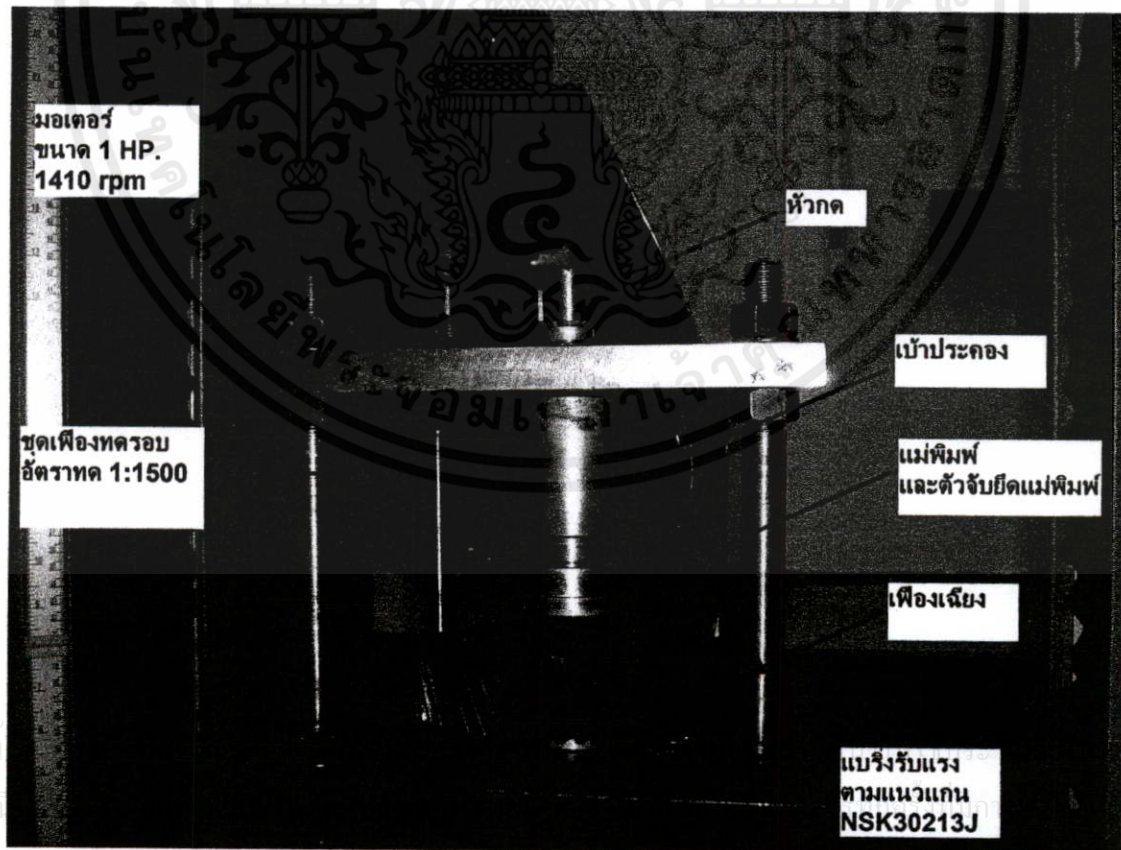
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ ต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดของชุดเฟืองเฉียงและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่ได้

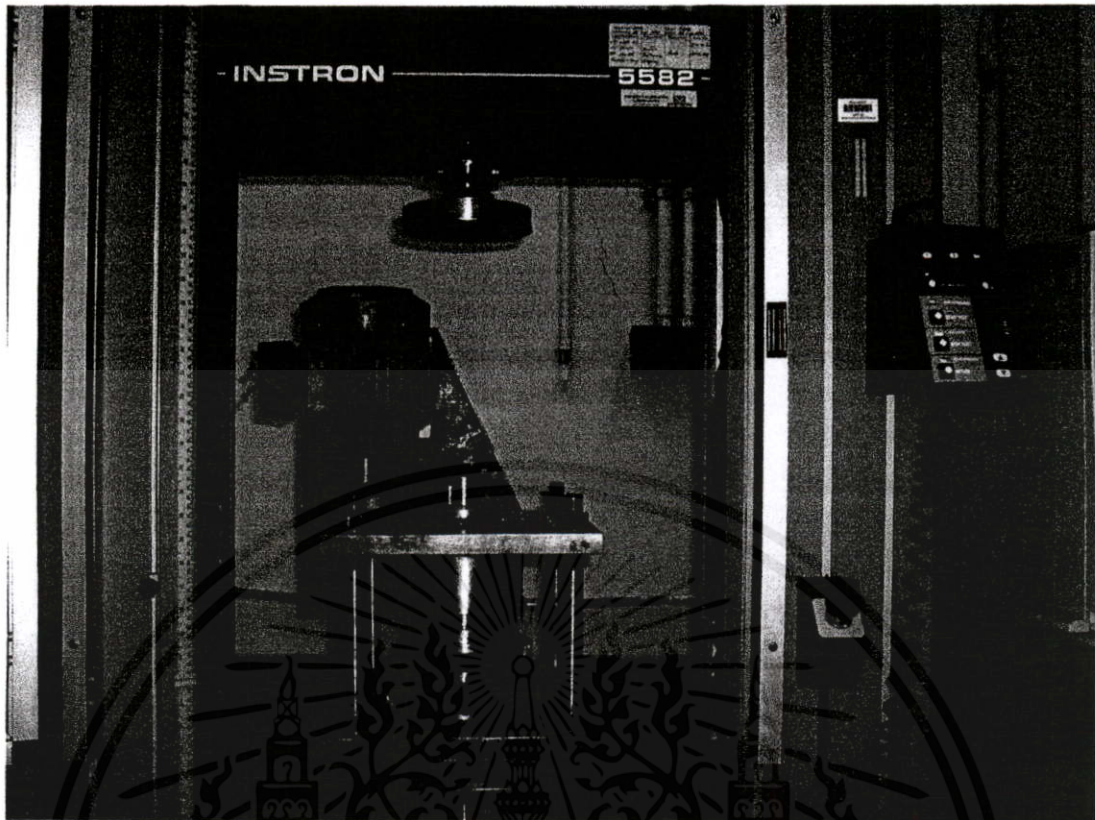
| จำนวนฟันของเฟือง ตัวที่ 1 (เฟืองขับ) | จำนวนฟันของเฟือง ตัวที่ 2 (เฟืองตาม) | อัตราทด รอบ | ความเร็วรอบที่ได้ | |
|---|---|----------------|-------------------|-----------|
| | | | รอบต่อนาที | rad./sec. |
| 52 | 58 | 0.897 | 0.843 | 0.088 |
| 58 | | 1.000 | 0.940 | 0.098 |
| 70 | | 1.207 | 1.134 | 0.119 |
| 76 | | 1.310 | 1.232 | 0.129 |



รูปที่ 4.8 แสดงชุดเฟืองทดรอบและแบร์ริงรับแรงตามแนวแกน



รูปที่ 4.9 แสดงการประกอบชิ้นส่วนของเครื่องอัดรีดที่แม่พิมพ์หมุนได้



รูปที่ 4.10 แสดงด้านหน้าของเครื่องอัดรีดบนแทนเครื่องทดสอบ UTM



รูปที่ 4.11 แสดงด้านหลังของเครื่องอัดรีดบนแทนเครื่องทดสอบ UTM

หลังจากเตรียมชิ้นส่วนประกอบของเครื่องอัดรีดที่มีแม่พิมพ์หมุนได้ทั้งหมดแล้ว จึงทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกันตามที่แสดงในรูปที่ 4.9 และนำไปประกอบบนแท่นของเครื่องทดสอบ UTM ตามที่แสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 เป็นรูปบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของเครื่อง ตามลำดับ

4.3 แผนการทดลอง

ในกระบวนการอัดรีดที่ใช้ในการศึกษาและทดลองนี้ ได้ทำการเลือกตัวแปรในกระบวนการอัดรีดมาทั้งหมด 5 ตัวแปรคือ

1. ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์
2. สารหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสชิ้นงานและเครื่องมือ
3. อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด
4. ความเร็วรอบของแม่พิมพ์
5. ความเร็วในการอัดรีด

ซึ่งตัวแปรที่ทำการเลือกมาข้างต้นนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงให้สถานะที่ใช้ในการทดลองมีสถานะที่แตกต่างกันเพื่อจะสามารถทำการศึกษาได้ชัดเจนว่า ตัวแปรดังกล่าวที่เลือกมานั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์แล้วได้ผลแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งได้สรุปเป็นตารางแผนการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 แสดงแผนการทดลอง

| ครึ่งมุมแม่พิมพ์ (องศา) | สารหล่อลื่น | อัตราส่วนการลด ขนาดพื้นที่หน้าตัด (%) | ความเร็วรอบของ แม่พิมพ์ (รอบต่อนาที) |
|----------------------------|--------------------|---|--|
| 8 | 1. โซเดียมสเตียเรท | 20 | 0 |
| 15 | 2. น้ำมันหล่อลื่น | 30 | 0.843 |
| 45 | | | 0.940 |
| | | | 1.134 |
| | | | 1.232 |

จากตารางแผนการทดลองที่ 4.6 ครึ่งมุมแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองมี 3 ขนาด คือ 8 องศา 15 องศา และ 22.5 องศา โดยแต่ละแม่พิมพ์ได้ใช้สารหล่อลื่นทั้งหมด 2 ชนิด และสารหล่อลื่นแต่ละชนิดจะทำการทดลองที่อัตราส่วนการลดขนาดทั้งหมด 2 ขนาดคือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแต่ละขนาดนั้น มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของแม่พิมพ์อีก

5 ค่า ตั้งแต่ความเร็วรอบที่เป็นศูนย์หรือแม่พิมพ์อยู่นิ่งจนถึงความเร็วรอบเป็น 1.232 รอบต่อนาที และในการทดลองในแต่ละครั้งมีการทดลองซ้ำ 5 ครั้งเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแน่นอน สรุปจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลอง ที่คิดจำนวนครั้งแบบ ไม่มีการทำซ้ำ 60 ครั้ง

ภายหลังจากการอัดรีดแท่งอลูมิเนียมตามแผนการทดลองแล้ว ผลที่ได้จากการอัดรีดที่จะทำการศึกษาและบันทึกผลการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไปนั้นมีดังนี้

1. ความเค้นในการอัดรีด
2. ความแข็งภายในของแท่งอลูมิเนียมหลังจากการอัดรีด

4.4 ขั้นตอนการทดลอง

เพื่อให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนและได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากขึ้น ในการทดลองแต่ละครั้ง จึงมีการเตรียมชิ้นงานหรือแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองให้มีขนาดเท่ากัน รวมไปถึงสภาวะที่ใช้ในการทดลองหรือวิธีที่ใช้ในการทดสอบและวัดค่าแต่ละครั้ง ก็ต้องอยู่ในสภาวะและวิธีเดียวกันด้วย ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนของการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานหรือแท่งอลูมิเนียม

แท่งอลูมิเนียมที่จำหน่ายในร้านวัสดุโดยปกติจะมีความยาว 6 เมตร นำมาตัดให้มีความยาวมากกว่า 20 มิลลิเมตรตามรูปที่ 4.12 ด้วยเลื่อยกลขณะตัดใช้น้ำมันตัดกลึงช่วยหล่อเย็นเพื่อให้คุณสมบัติทางกลของแท่งอลูมิเนียมไม่เปลี่ยนแปลง ภายหลังจากการตัดให้เป็นท่อนสั้นแล้วทำการขัดผิวหน้าแท่งอลูมิเนียมที่ได้ให้เรียบด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1000 จากนั้นทำความสะอาดแท่งอลูมิเนียมที่ได้ให้ปราศจากคราบน้ำมันเพื่อนำไปทำการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.12 แสดงชิ้นงานอลูมิเนียมที่เตรียมสำหรับการทดลอง

4.4.2 ขั้นตอนระหว่างการอัดรีด

1. ประกอบเครื่องอัดรีดขึ้นรูปเข้ากับเครื่องทดสอบ UTM แล้วยึดให้แน่น และต่อแหล่งจ่ายไฟเข้ากับตู้ควบคุมสำหรับสแตร์ทมอเตอร์แบบสแตร์
2. นำแท่งอลูมิเนียมที่ตัดไว้ชุบเคลือบผิวด้วยสารหล่อลื่นชนิดใดชนิดหนึ่ง ใส่ลงในเบ้าประคองตามด้วยตัวกด
3. เปิดสวิทช์ที่ตู้ควบคุมให้มอเตอร์หมุน หลังจากนั้นควบคุมเครื่องทดสอบ UTM ทางคอมพิวเตอร์ให้มีการกดไปที่หัวกด และตั้งค่าของเครื่องเพื่อเตรียมบันทึกผลแรงกด
4. เมื่อกดให้แท่งอลูมิเนียมไหลออกจากแม่พิมพ์แล้วบันทึกผลการทดลองค่าความเค้นในการอัดรีด นำชิ้นงานออกมาทำความสะอาดเพื่อทำการทดสอบในขั้นต่อไป
5. ทำการเปลี่ยนเฟืองเชิงขั้วชุดที่ 1 เพื่อเปลี่ยนความเร็วรอบแม่พิมพ์ และทำซ้ำในข้อที่ 1 ถึง 4

4.4.3 ขั้นตอนภายหลังการอัดรีด

ภายหลังการอัดรีดแล้วนำชิ้นงานที่ได้มาหาความแข็งของชิ้นงาน ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์เครื่องมือจากห้องปฏิบัติการ โลหการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีขั้นตอนของการทดสอบดังนี้

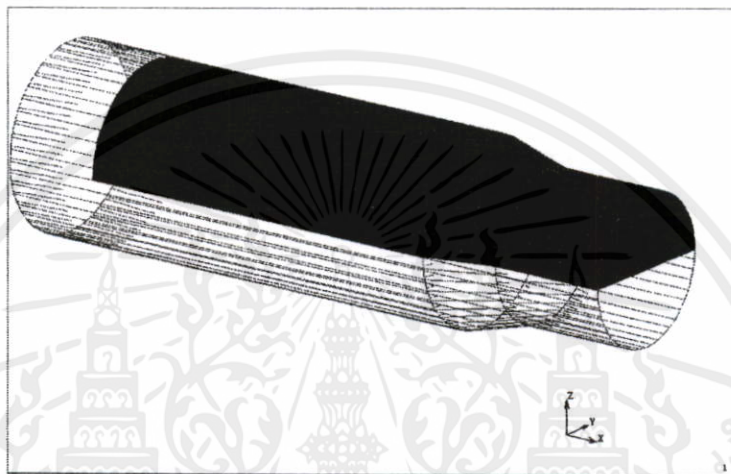
1. นำแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการอัดรีดมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ความยาวประมาณ 10 มิลลิเมตร หล่อเย็นด้วยน้ำขณะทำการตัด
2. นำชิ้นอลูมิเนียมที่ตัดแล้วไปใส่ในเบ้าหล่อเรซินแล้วเทเรซินเหลวลงไป เมื่อเรซินแข็งตัวจะทำให้สามารถจับชิ้นงานเพื่อขัดผิวได้ง่ายขึ้น
3. นำอลูมิเนียมที่หล่ออยู่ในเรซินไปทำการขัดผิวด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 1200 เพื่อลบรอยที่เกิดจากการตัดให้หายไป จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดและผงอลูมินาเพื่อให้รอยที่เกิดขึ้นจากกระดาษทรายหายไป
4. นำชิ้นงานที่ขัดแล้วไปทดสอบค่าความแข็ง โดยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ ใช้น้ำหนักในการกดชิ้นงาน 0.3 กิโลกรัม หรือประมาณ 3 นิวตัน และเวลาในการกด 10 วินาที ในการวัดค่าความแข็งจะทำการวัดจากจุดศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมจนถึงขอบของแท่งอลูมิเนียม

4.5 วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในครั้งนี้ ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MARC รุ่น 2000 ของบริษัท MSC SOFTWARE CORPORATION โดยแผนการวิเคราะห์การอัดรีดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในครั้งนี้ จะทำการวิเคราะห์ตามตัวแปรที่กำหนดเช่นเดียวกันกับการทดลองตามแผนการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 4.7 และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมครั้งนี้ไม่คิดผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดรีด

4.5.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) นั้นได้กำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนตัว (Fixed Displacement) ที่แกนกลางตามแนวยาวของชิ้นงานอลูมิเนียม เนื่องจากมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกนดังกล่าว จากนั้นจึงกำหนดให้หัวกดมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วการอัดรีด และกำหนดให้แม่พิมพ์มีการหมุนด้วยความเร็วรอบตามแผนการทดลองที่ใช้ ในส่วนของแรงดันที่ใช้ดันหัวกดจะใช้วิธีการรวมแรงที่จุดต่อ (Node) แต่ละจุด



รูปที่ 4.13 แสดงแผนภาพโครงข่ายอีลิเมนต์ของชิ้นงาน

4.5.3 การกำหนดสมบัติของวัสดุ (Materials Properties)

การวิเคราะห์ครั้งนี้กำหนดให้แม่พิมพ์ และเบ้าประคอง รวมถึงหัวกด เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) และกำหนดให้ชิ้นงานอลูมิเนียมมีสมบัติเชิงกลตรงกับการทดลองตามที่แสดงในตารางที่ 4.2 โดยกำหนดให้โปรแกรมวิเคราะห์หัววัสดุที่เป็นชิ้นงานอลูมิเนียมด้วยสมการแบบ Elastic-Plastic

4.5.4 การกำหนดลักษณะของผิวสัมผัส

การสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานอลูมิเนียมกับแม่พิมพ์ เบ้าประคอง และหัวกดนั้น ได้กำหนดให้มีการสัมผัสกันตลอดเวลาในระหว่างกระบวนการอัดรีด เพื่อกำหนดสภาพการหล่อลื่นหรือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตามที่กำหนดได้

4.5.5 การหาผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

หลังจากที่ได้มีการกำหนดค่าต่างๆ ให้โปรแกรมมีข้อมูลในการคำนวณครบหมดแล้ว จึงสั่งให้โปรแกรมเริ่มทำการคำนวณ โดยผลลัพธ์ของการคำนวณที่ต้องการคือ ค่าความเค้นที่กระจายในชิ้นงานอลูมิเนียมระหว่างการอัดรีด แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟของความเค้นที่กระจายในชิ้นงาน

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่ต้องการอีกค่าหนึ่งคือ ค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ของชิ้นงานหลังจากอัดรีดแล้วว่ามีลักษณะการกระจายความเค้นอย่างไร

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในการดำเนินงานวิจัยการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุนในครั้งนี ได้ทำการพิจารณาตามตัวแปรในกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปจำนวน 4 ตัวแปรคือ ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ สภาวะสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และความเร็วรอบของแม่พิมพ์ และการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้แบ่งการดำเนินงานวิจัยออกได้เป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ทำการทดลองและส่วนที่ทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ได้มีการบันทึกผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการบันทึกผล 2 ค่าคือ ความเค้นในการอัดรีดขึ้นรูป และค่าความแข็งของหน้าตัดขึ้นงานอลูมิเนียม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 ความเค้นในการอัดรีด (Extrusion stress)

ความเค้นในการอัดรีดหรือเรียกว่าความดันในการขึ้นรูป (Extrusion pressure) ค่าความเค้นในการอัดรีดนี้สามารถบันทึกผลได้โดยตรง ผ่านทางโหลดเซลล์ของเครื่องทดสอบวัสดุ ซึ่งแรงที่กระทำผ่านทางโหลดเซลล์จะถูกส่งไปประมวลผลร่วมกับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมในคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมเครื่อง ก่อนทำการทดลองจะต้องกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมเข้าไปด้วย ซึ่งขนาดของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้น ค่าความเค้นที่ได้ขณะอัดรีดจากเครื่องทดสอบวัสดุจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับ แรงที่ใช้ในการกดแท่งอลูมิเนียม แสดงตามสมการที่ 5.1 คือ

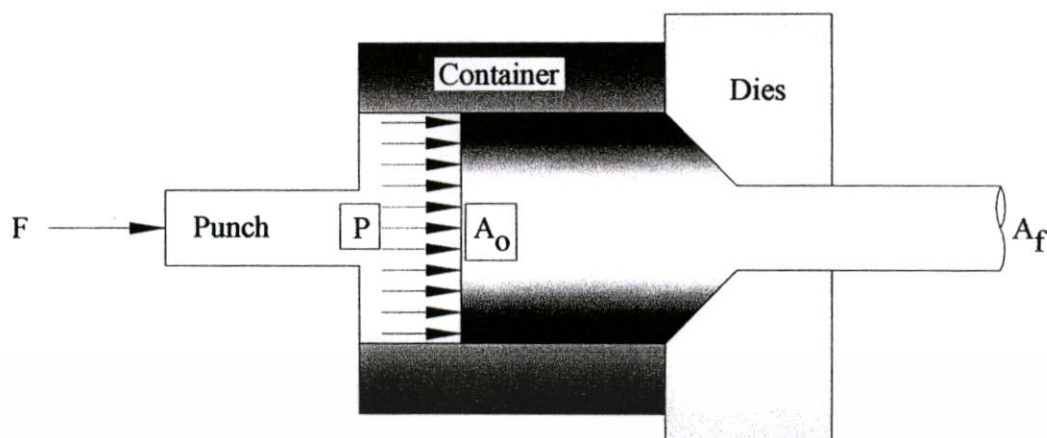
$$\sigma_c = P = \frac{F}{A_o} \quad (5.1)$$

เมื่อ σ_c, P คือ ความเค้นหรือความดันที่ใช้ในการอัดรีด

F คือ แรงที่ใช้ในการอัดรีด

A_o คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมก่อนการทดลอง มีค่าประมาณ 132.73 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้เห็นหน้าเป็นใช้มีระเบียบข้อดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นกับแท่งอลูมิเนียมในการอัดรีด

5.1.1.1 ผลการอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 8 องศา ($\alpha = 8^\circ$)

ในการอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 8 องศา มีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทั้งหมด 2 ชนิด คือ โซเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 8 องศา มีทั้งหมด 2 ขนาด คือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ และในการอัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดแต่ละค่านั้นทำการอัดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.843, 0.940, 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์นั้นหมายถึงไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปผลการทดลองการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ที่ได้แสดงแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

5.1.1.1.1 ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น

1. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% จากการค้นคว้าความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 58.12 57.16 56.54 56.12 และ 56.05 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 437.87 430.64 425.97 422.81 และ 422.27 N/mm^2 ตามลำดับ

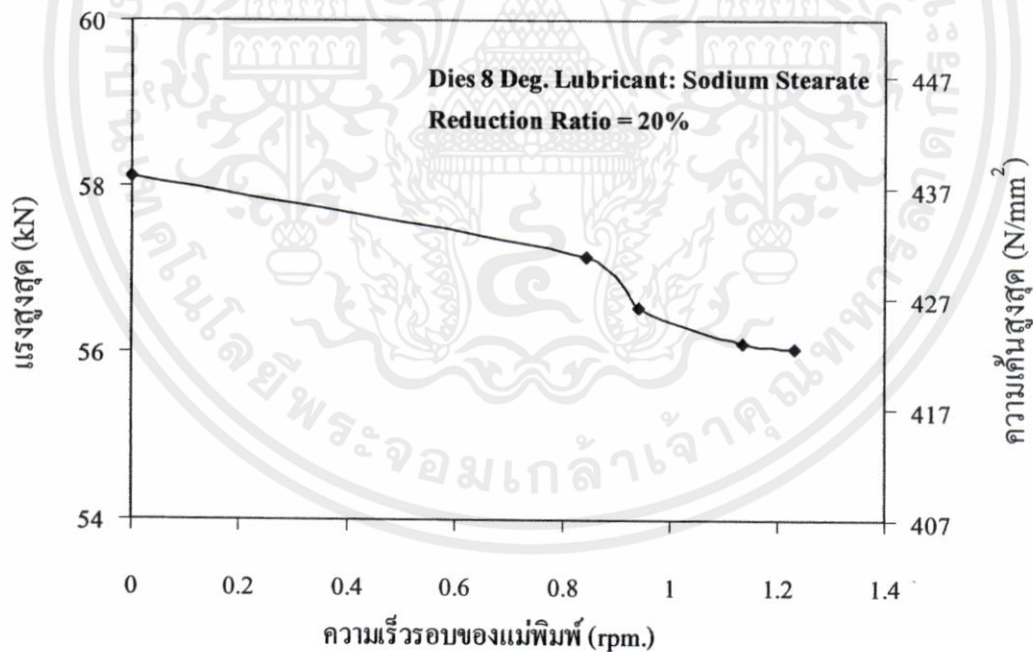
2. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% จากการค้นคว้าความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 76.21 75.12 74.43 73.48 และ 73.32 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 574.16 565.95 560.75 553.60 และ 552.39 N/mm^2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 8^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต

$r_e = 20$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 58.12 | 57.16 | 56.54 | 56.12 | 56.05 |
| ความเค้น (N/mm^2) | 437.87 | 430.64 | 425.97 | 422.81 | 422.28 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 76.21 | 75.12 | 74.43 | 73.48 | 73.32 |
| ความเค้น (N/mm^2) | 574.16 | 565.95 | 560.75 | 553.60 | 552.39 |

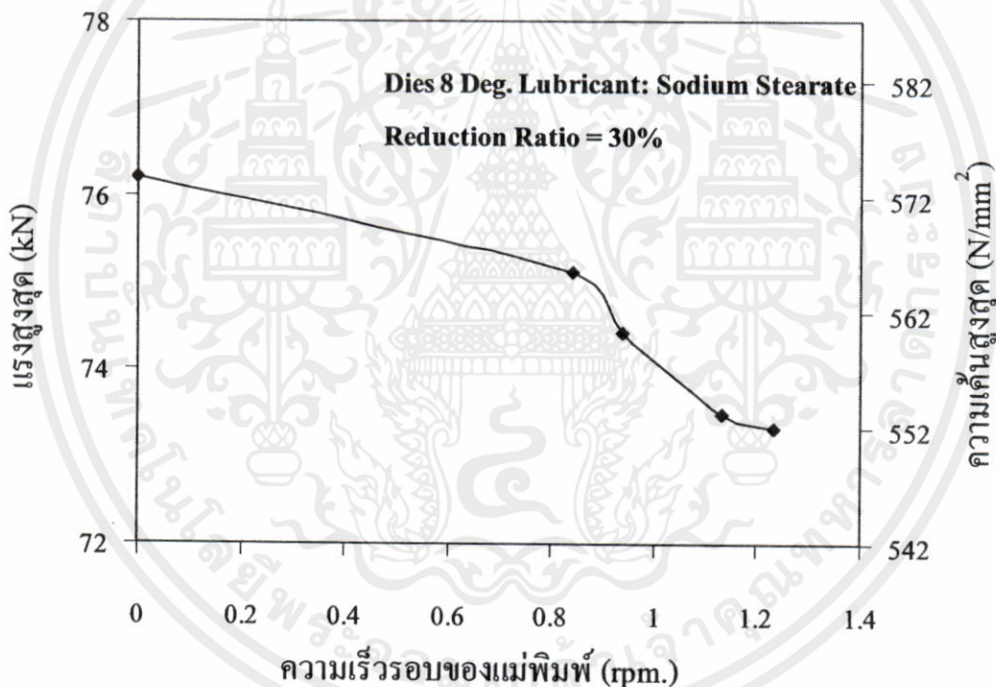


รูปที่ 5.2 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต

$r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

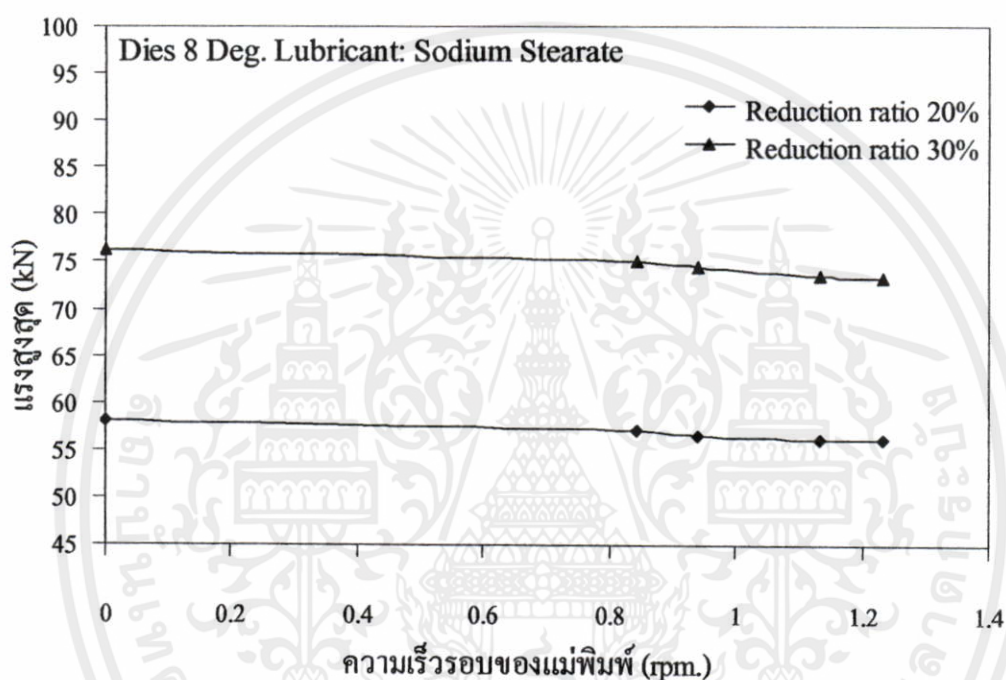
ในรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 0.96 1.58 2.00 และ 2.07 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.68% 2.79% 3.56% และ 3.69% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



รูปที่ 5.3 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต $r_e = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

ในรูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็ว

รอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 1.09 1.78 2.73 และ 2.89 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.45% 2.39% 3.72% และ 3.94% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



รูปที่ 5.4 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดตามรูปที่ 5.4 อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้นจากอัตราส่วนการลดขนาด 20% เป็น 30% แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการอัดรีดก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

5.1.1.1.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

1. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% จากการค้นที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้

ในการอัดรีดเท่ากับ 75.44 74.21 73.32 72.15 และ 72.01 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 568.36 559.10 552.39 543.57 และ 542.52 N/mm^2 ตามลำดับ

2. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% จากการค้นที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 98.74 97.10 96.03 94.43 และ 94.15 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 743.90 731.55 723.49 711.43 และ 709.32 N/mm^2 ตามลำดับ

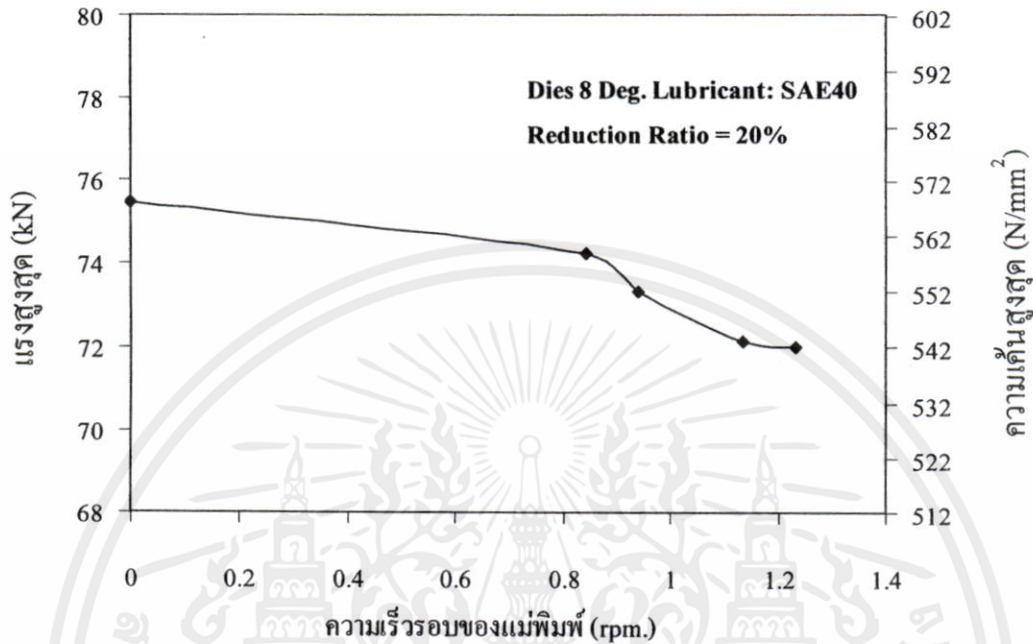
ตารางที่ 5.2 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 8^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40

$r_c = 20$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 75.44 | 74.21 | 73.32 | 72.15 | 72.01 |
| ความเค้น (N/mm^2) | 568.36 | 559.10 | 552.39 | 543.58 | 542.52 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 98.74 | 97.10 | 96.03 | 94.43 | 94.15 |
| ความเค้น (N/mm^2) | 743.90 | 731.55 | 723.49 | 711.43 | 709.32 |

ในรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 1.23 2.12 3.29 และ 3.43 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่ากรณีที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

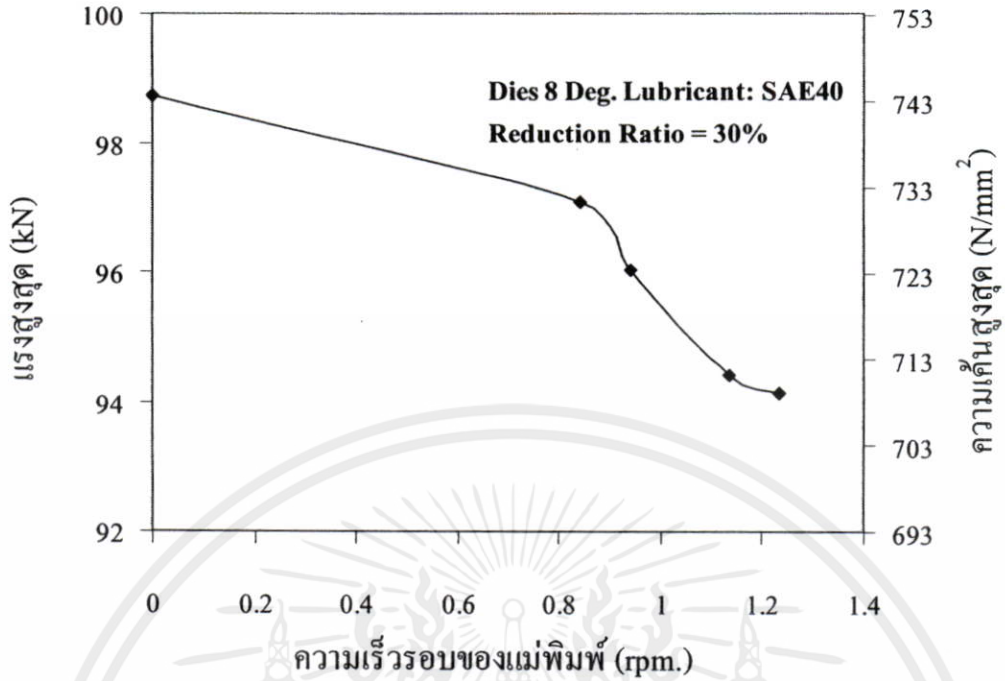
เท่ากับ 1.66% 2.89% 4.56% และ 4.76% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



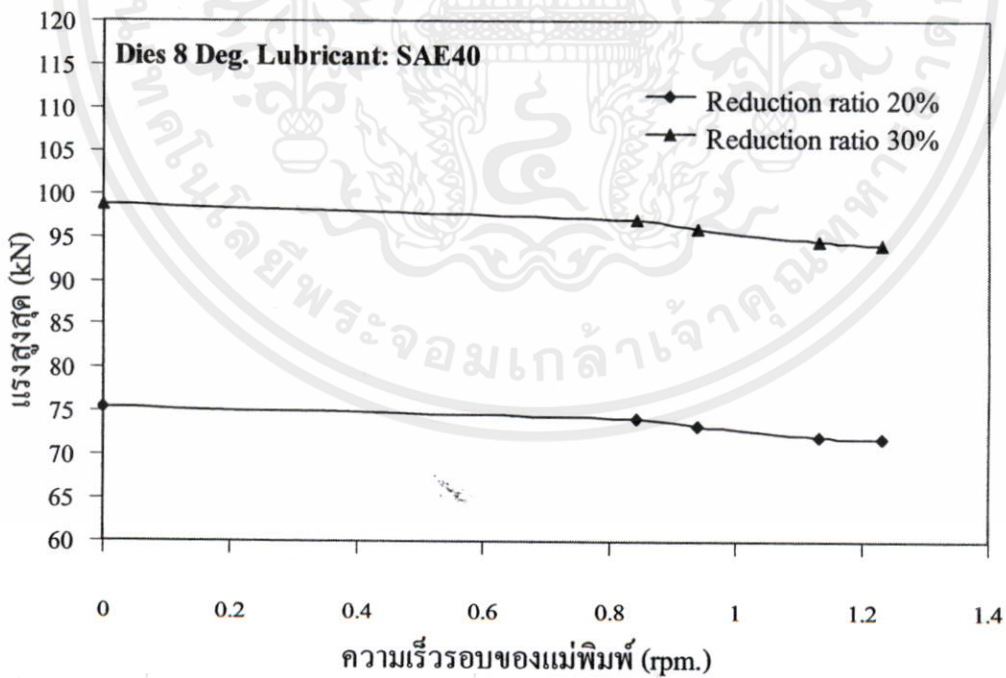
รูปที่ 5.5 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

ในรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 1.64 2.71 4.31 และ 4.59 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.69% 2.82% 4.56% และ 4.88% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.7 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 8^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดตามรูปที่ 5.7 อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้นจากอัตราการลดขนาด 20% เป็น 30% แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการอัดรีดก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

5.1.1.2 ผลการอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 15 องศา ($\alpha = 15^\circ$)

ในการอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 15 องศา มีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทั้งหมด 2 ชนิด คือ โซเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 15 องศา มีทั้งหมด 2 ขนาด คือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ และในการอัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดแต่ละค่านั้นทำการอัดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.843, 0.940, 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์นั้นหมายถึงไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปผลการทดลองการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ที่ได้แสดงแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

5.1.1.2.1 ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น

1. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% จากการค้นที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 51.18 50.42 50.03 49.13 และ 49.04 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 385.59 379.86 376.92 370.14 และ 369.47 N/mm^2 ตามลำดับ

2. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

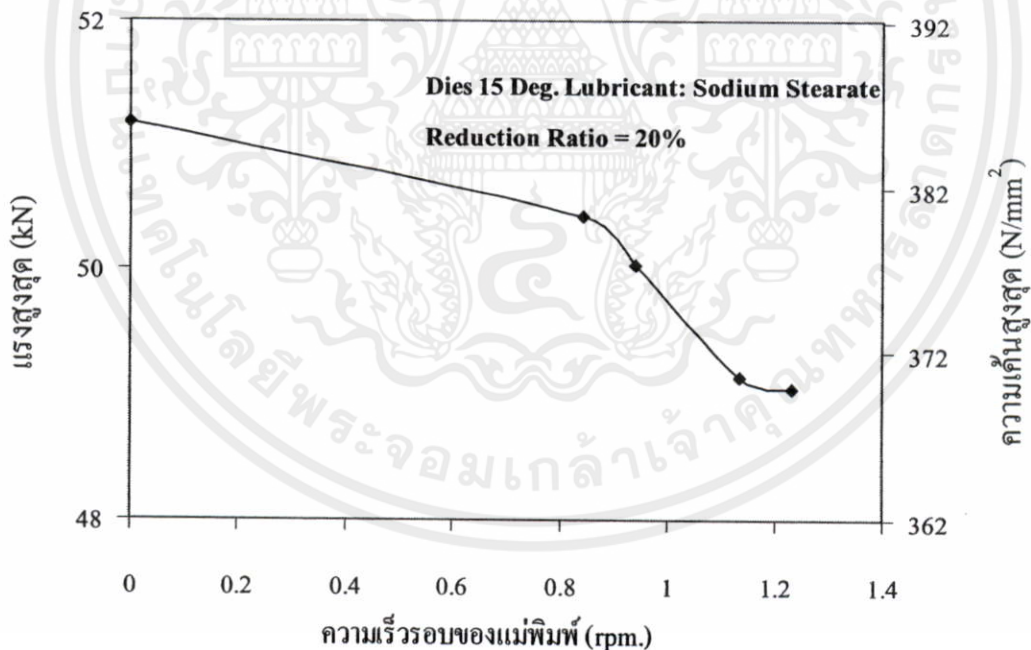
ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% จากการค้นที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 67.32 66.23 65.78 64.78 และ 64.63 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 507.19 498.97 495.58 488.05 และ 486.92 N/mm^2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต

$r_e = 20$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 51.18 | 50.42 | 50.03 | 49.13 | 49.04 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 385.59 | 379.86 | 376.92 | 370.14 | 369.47 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 67.32 | 66.23 | 65.78 | 64.78 | 64.63 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 507.19 | 498.97 | 495.58 | 488.05 | 486.92 |

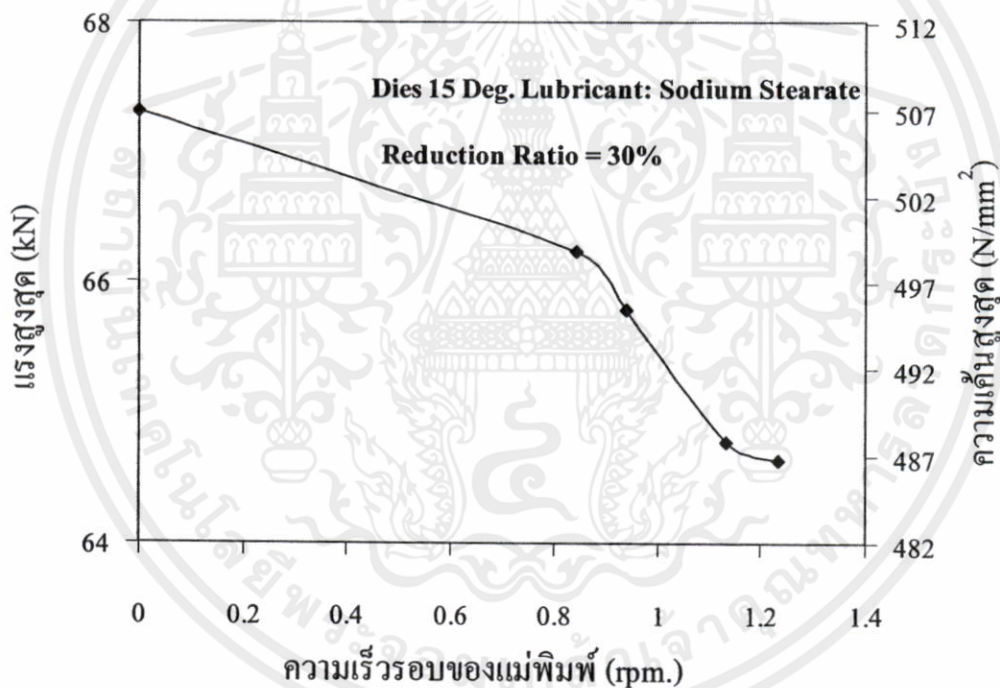


รูปที่ 5.8 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต

$r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

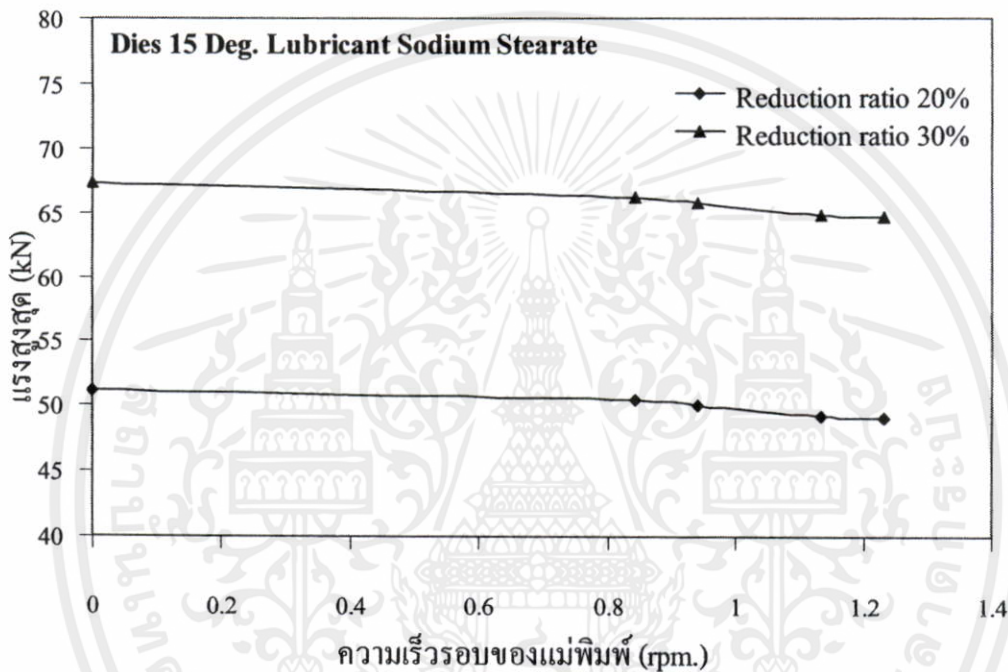
ในรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 0.76 1.15 2.05 และ 2.14 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.51% 2.30% 4.17% และ 4.36% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



รูปที่ 5.9 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

ในรูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็ว

รอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อ นาที อยู่ที่ 1.09 1.54 2.54 และ 2.69 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.65% 2.34% 3.92% และ 4.16% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



รูปที่ 5.10 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดตามรูปที่ 5.10 อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้นจากอัตราการลดขนาด 20% เป็น 30% แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการอัดรีดก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

5.1.1.2.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

1. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ ไปยังศา α ใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% จากการค้นที่ใช้ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 66.59 65.45 64.97 63.87 และ 63.62 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีด เท่ากับ 501.89 493.10 489.48 481.19 และ 479.31 N/mm^2 ตามลำดับ

2. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% จากการค้นที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 87.48 86.19 85.43 83.15 และ 83.57 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีด เท่ากับ 659.07 649.35 643.63 631.72 และ 629.61 N/mm^2 ตามลำดับ

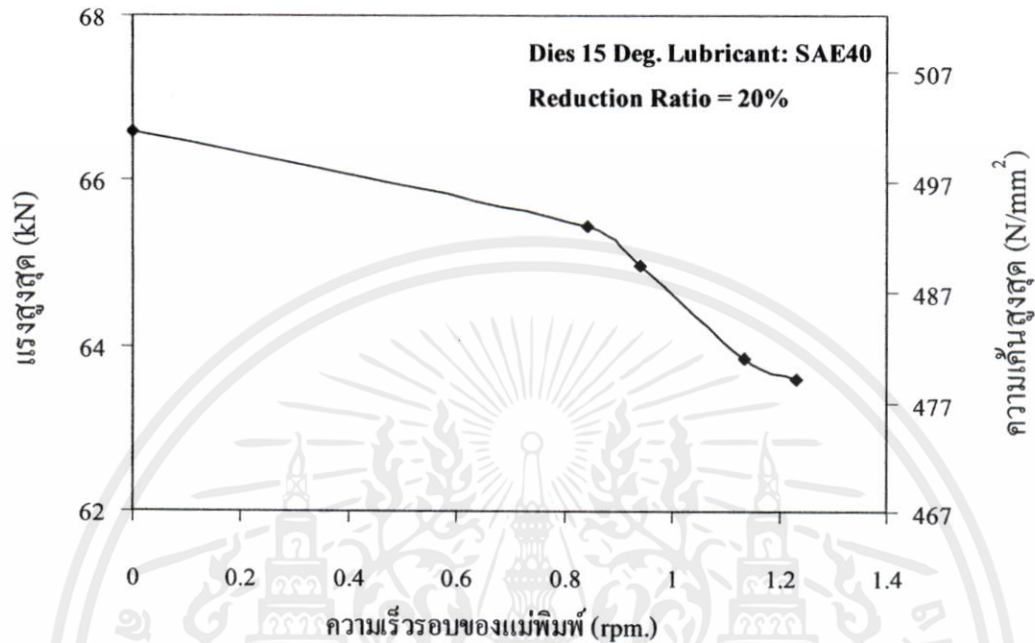
ตารางที่ 5.4 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE 40

$r_c = 20$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 66.59 | 66.45 | 64.97 | 63.87 | 63.62 |
| ความเค้น (N/mm^2) | 501.69 | 493.10 | 489.48 | 481.19 | 479.31 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 87.48 | 86.19 | 85.43 | 83.85 | 83.57 |
| ความเค้น (N/mm^2) | 659.07 | 649.35 | 643.63 | 631.72 | 629.61 |

ในรูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 1.14 1.62 2.72 และ 2.97 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

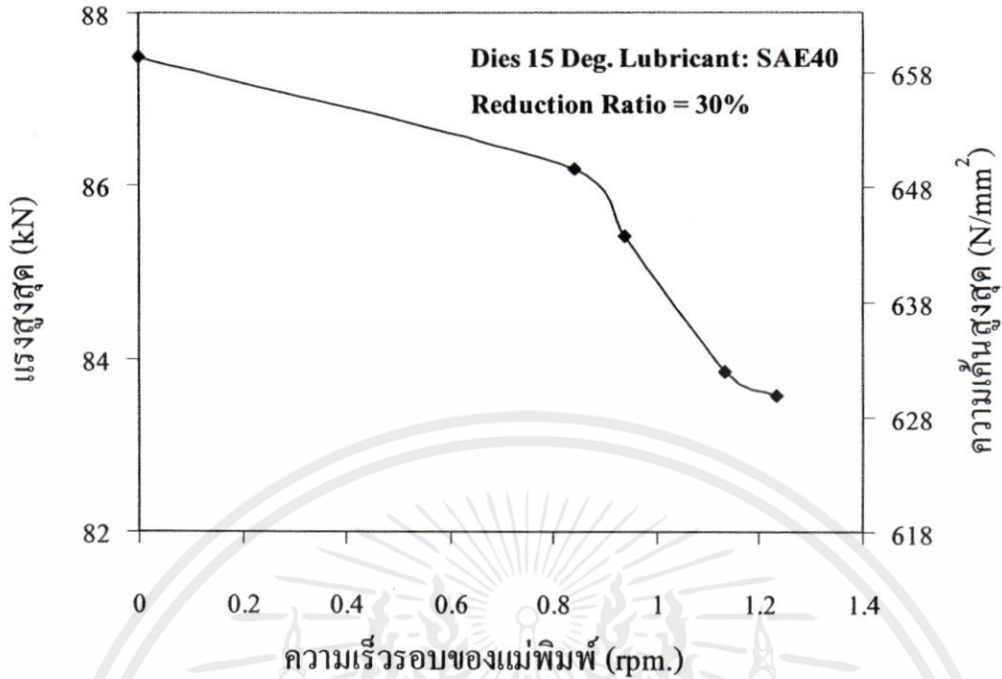
เท่ากับ 1.74% 2.49% 4.26% และ 4.67% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



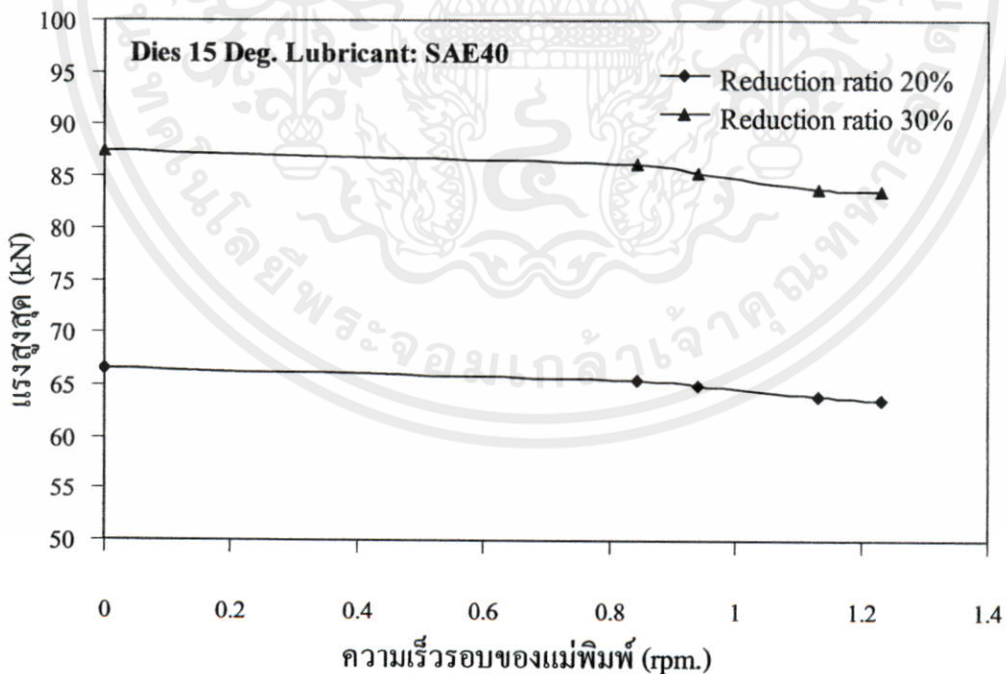
รูปที่ 5.11 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

ในรูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 1.29 2.05 3.63 และ 3.91 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.50% 2.40% 4.33% และ 4.68% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.13 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 15^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดตามรูปที่ 5.13 อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้นจากอัตราส่วนการลดขนาด 20% เป็น 30% แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการอัดรีดก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

5.1.1.3 ผลการอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมูม 45 องศา ($\alpha = 45^\circ$)

ในการอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมูม 45 องศา มีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทั้งหมด 2 ชนิด คือ โซเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมูม 45 องศา มีทั้งหมด 2 ขนาด คือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ และในการอัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดแต่ละค่านี้ทำการอัดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.843, 0.940, 1.134 และ 1.232 รอบต่ออนาที โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์นั้นหมายถึงไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปผลการทดลองการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมูมของแม่พิมพ์ 45 องศา ที่ได้แสดงแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

5.1.1.3.1 ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น

1. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมูมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% จากการค้นที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่ออนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 52.31 51.42 51.12 50.21 และ 50.04 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 394.10 387.40 385.14 378.28 และ 377.00 N/mm^2 ตามลำดับ

2. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

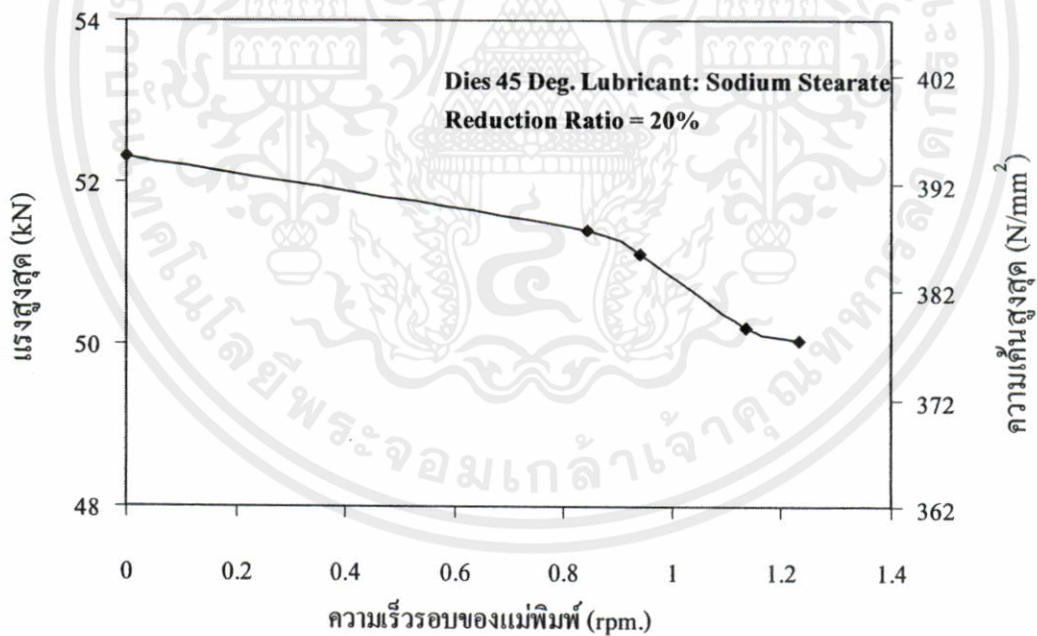
ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมูมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% จากการค้นที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่ออนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 69.30 68.10 67.50 66.70 และ 66.50 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 522.10 513.06 508.54 502.52 และ 501.01 N/mm^2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 45^\circ$ ใช้สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต

$r_e = 20$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 52.31 | 51.42 | 51.12 | 50.21 | 50.04 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 394.10 | 387.40 | 385.14 | 378.28 | 377.00 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 69.30 | 68.10 | 67.50 | 66.70 | 66.50 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 522.10 | 513.06 | 508.54 | 502.52 | 501.01 |

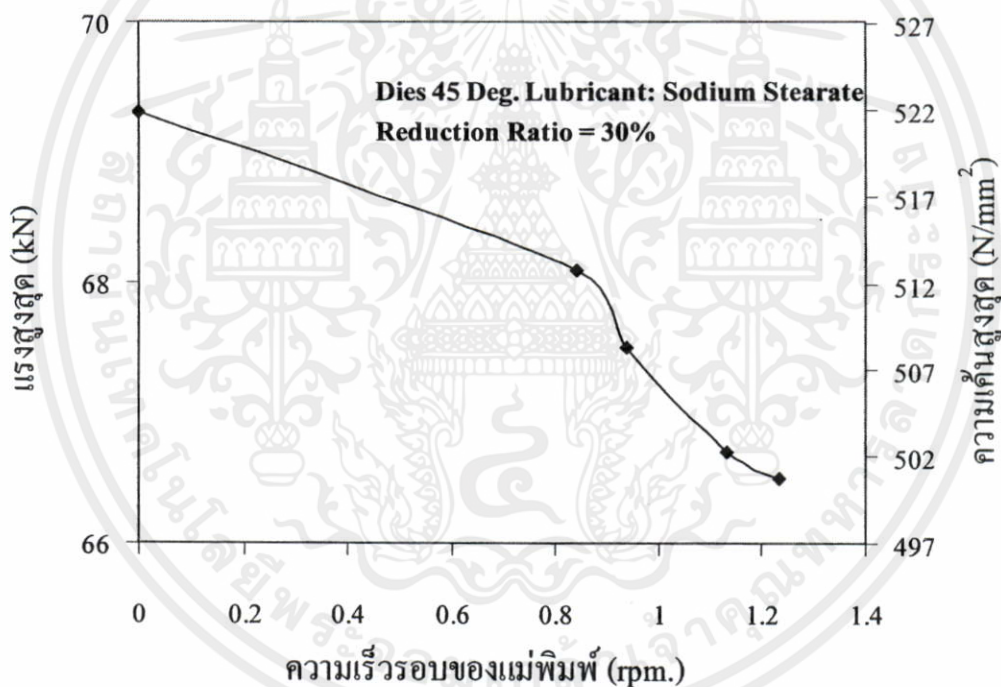


รูปที่ 5.14 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต

$r_e = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

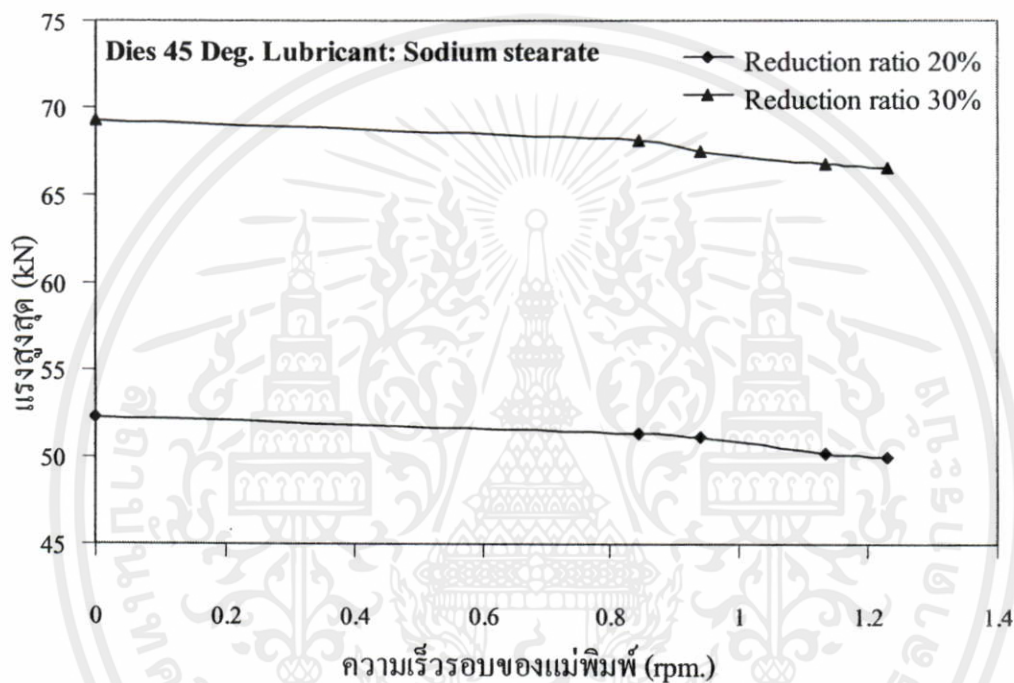
ในรูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะทำการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 0.89 1.19 2.10 และ 2.27 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.73% 2.33% 4.18% และ 4.54% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



รูปที่ 5.15 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

ในรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะทำการอัดรีด ที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็ว

รอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 1.20 1.80 2.60 และ 2.80 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.76% 2.67% 3.90% และ 4.21% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



รูปที่ 5.16 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดตามรูปที่ 5.16 อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้นจากอัตราการลดขนาด 20% เป็น 30% แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการอัดรีดก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

5.1.1.3.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

1. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

เอกสารนี้ ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้ไม่ว่าใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% จากการค้นที่ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 68.64 67.49 66.91 65.86 และ 65.62 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีด เท่ากับ 517.13 508.47 504.10 496.19 และ 494.38 N/mm^2 ตามลำดับ

2. อัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% จากการค้นหาค่าความเร็วรอบของแม่พิมพ์แตกต่างกัน 5 ความเร็ว คือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 89.57 88.10 87.21 86.13 และ 85.91 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีด เท่ากับ 674.82 663.74 657.04 648.90 และ 647.24 N/mm^2 ตามลำดับ

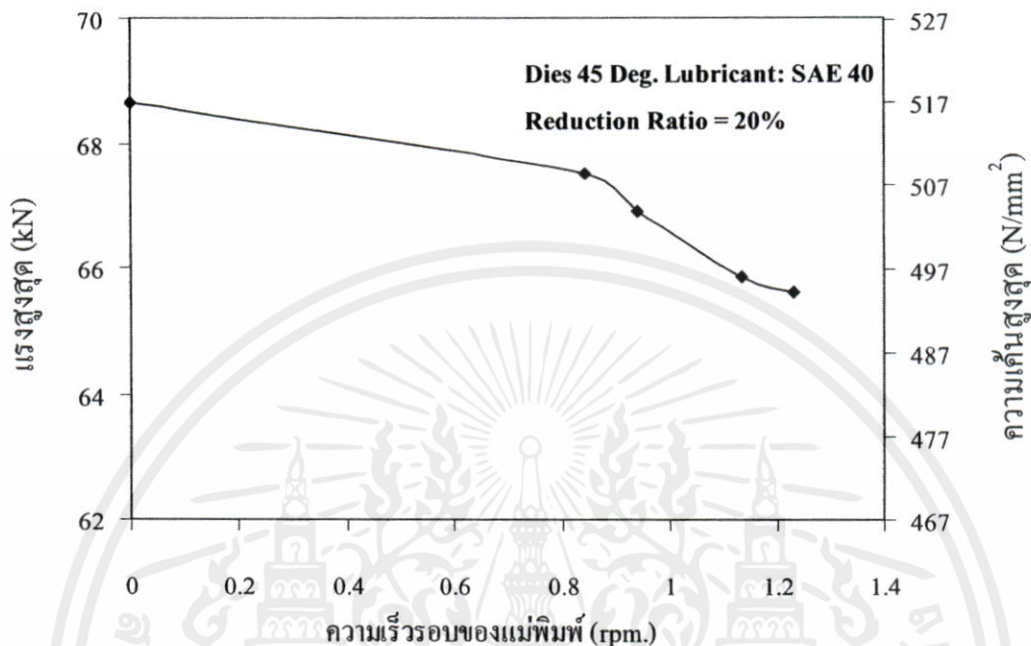
ตารางที่ 5.6 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 45^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40

$r_c = 20$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบแม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 68.64 | 67.49 | 66.91 | 65.86 | 65.62 |
| ความเค้น (N/mm^2) | 517.13 | 508.47 | 504.10 | 496.19 | 494.38 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 89.57 | 88.10 | 87.21 | 86.13 | 85.91 |
| ความเค้น (N/mm^2) | 674.82 | 663.74 | 657.04 | 648.90 | 647.24 |

ในรูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 1.15 1.73 2.78 และ 3.02 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

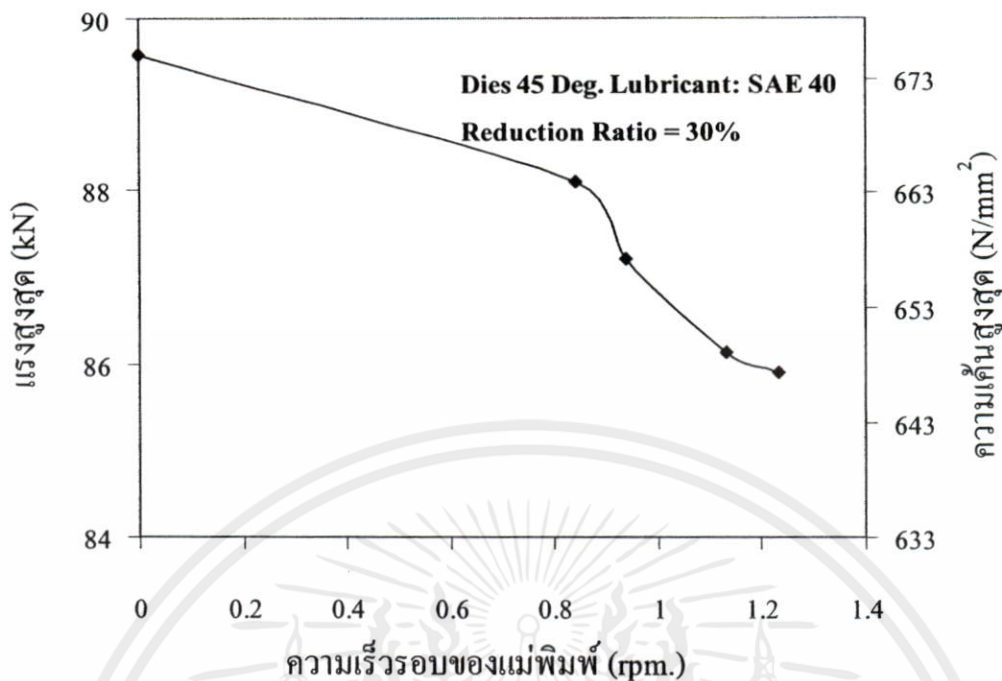
เท่ากับ 1.70% 2.59% 4.22% และ 4.60% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง



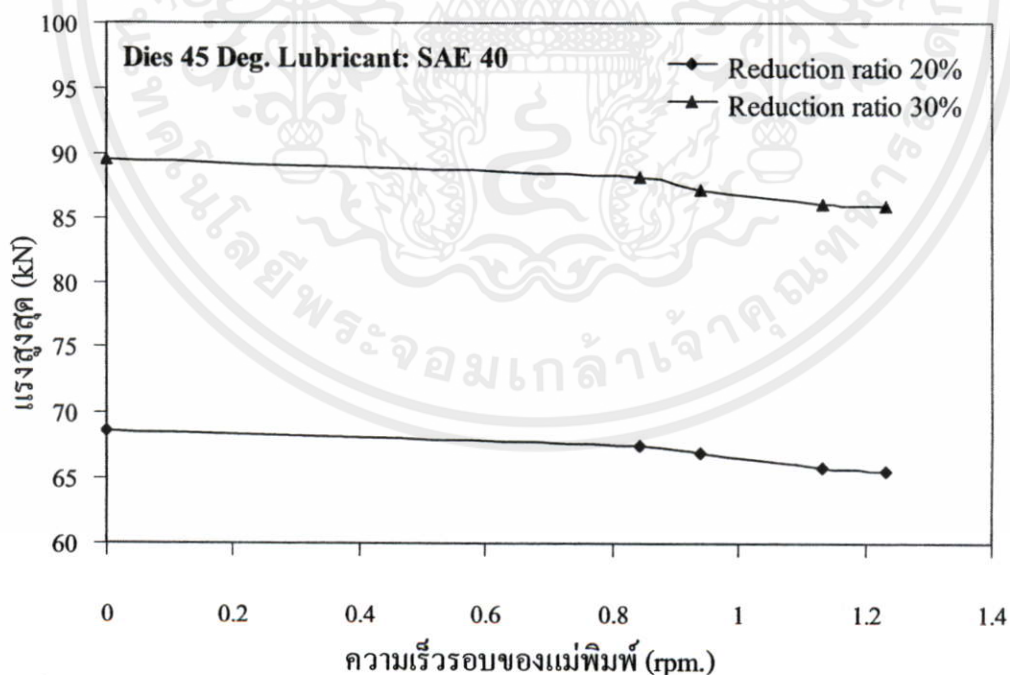
รูปที่ 5.17 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

ในรูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการอัดรีดที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 รอบต่อนาที หรือแม่พิมพ์ไม่มีการหมุน แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีดมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที อยู่ที่ 1.47 2.36 3.44 และ 3.66 kN ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าการที่แม่พิมพ์ไม่หมุนใช้แรงอัดรีดมากกว่าแม่พิมพ์หมุนที่ความเร็วรอบ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที เท่ากับ 1.67% 2.71% 3.99% และ 4.26% ตามลำดับ ซึ่งผลของการหมุนของแม่พิมพ์ทำให้แรงที่ใช้ในการอัดรีดลดลง

เอกสารนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดตามรูปที่ 5.19 อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้นจากอัตราส่วนการลดขนาด 20% เป็น 30% แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการอัดรีดก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

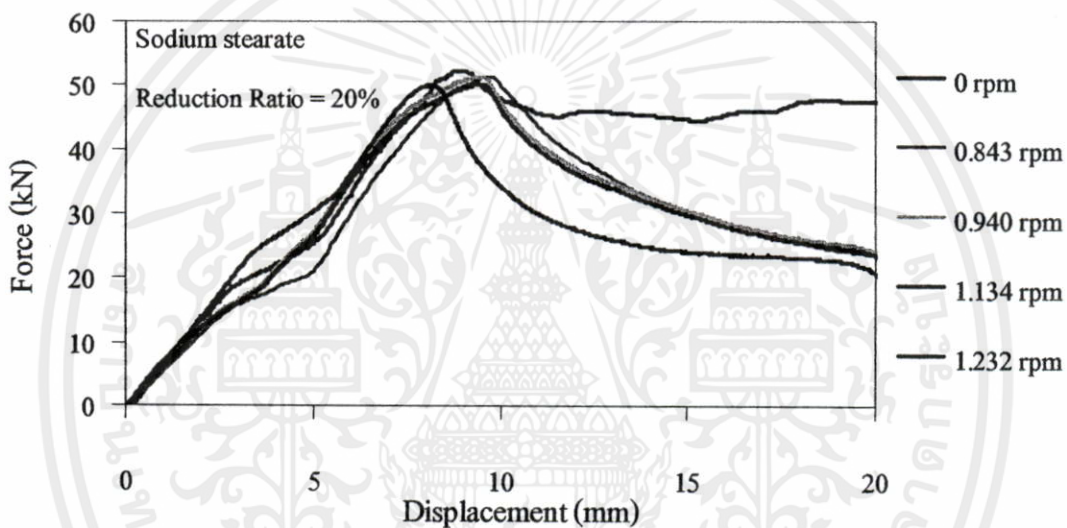


รูปที่ 5.18 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 30\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.19 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการอัดรีด $\alpha = 45^\circ$ น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 20\%$ และ 30% ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที

รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการอัดรีดกับระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวกดของการใช้ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต อัตราส่วนการลดขนาดหน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากรูปพบว่าเมื่อเริ่มต้นแท่งอลูมิเนียมแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด เนื่องจากการอัดแท่งอลูมิเนียมตอนเริ่มต้นจนเต็มเข้าประคองรวมกับการดันแท่งอลูมิเนียมที่ยังไม่เปลี่ยนรูปร่างบางส่วน เมื่อแรงถึงจุดสูงสุดแท่งอลูมิเนียมเริ่มไหลออกจากแม่พิมพ์ภายใต้สถานะคงที่และแท่งอลูมิเนียมเริ่มเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้แรงลดลงเป็นผลจากการลดความเสียดทานที่ผิวสัมผัส ระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเข้าประคองอย่างสม่ำเสมอ เมื่อแท่งอลูมิเนียมรับการดันมากขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสลดลงอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำให้แรงเสียดทานรวมลดลง



รูปที่ 5.20 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดรีดที่ $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ ที่ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อวินาที เปรียบเทียบกับระยะเคลื่อนที่ของตัวกด

5.1.2 ความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม (Internal Hardness)

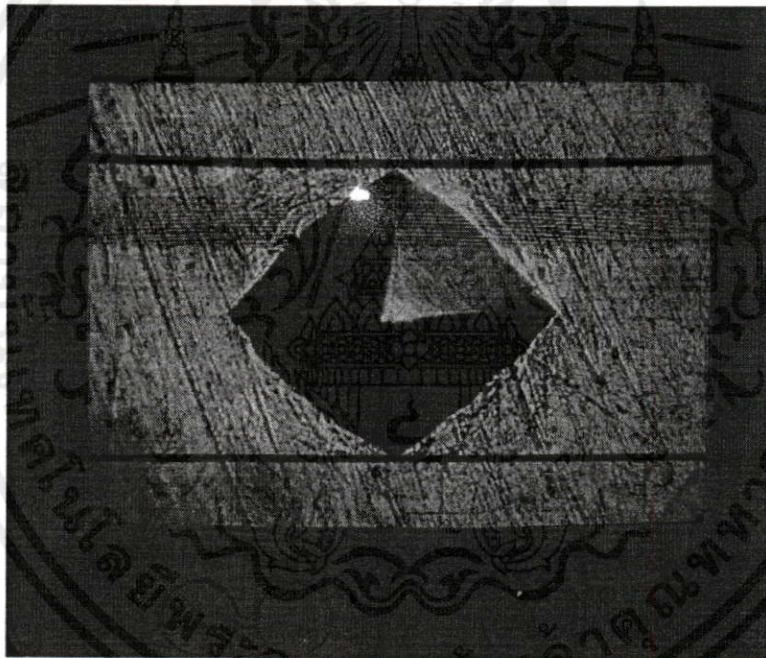
การทดสอบค่าความแข็งของงานวิจัยครั้งนี้ ได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือจาก ห้องปฏิบัติการโลหการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุรนารี โดยในงานวิจัยนี้ ใช้การวัดค่าความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ หลักการของการทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ จะใช้แรงกดขนาดตั้งแต่ 50 ถึง 1000 กรัม หรือ 0.49 ถึง 9.81 นิวตัน ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ใช้แรงในการทดสอบ 300 กรัม หรือ 2.943 นิวตัน ใช้เวลาในการกด 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยสุรนารี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งสามารถหาได้จากสูตรความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของแรงกดที่ใช้ในการดันหัวกดรูปปิรามิด มุมระหว่างค้ำนยอดที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 136 องศา กับพื้นที่ของรอยกดที่เกิดบนผิวชิ้นทดสอบ คือ

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0.102(2F \sin 136^\circ)}{d^2} = 0.1809 \frac{F}{d^2} \quad (5.3)$$

- เมื่อ HV คือ ค่าความแข็งวิกเกอร์
 F คือ แรงกด (นิวตัน)
 S คือ พื้นที่ของรอยกด (ตารางมิลลิเมตร)
 d คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุม (มิลลิเมตร)



รูปที่ 5.21 ลักษณะรอยกดรูปปิรามิดที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็ง

5.1.2.1 ผลการทดสอบความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ($\alpha = 8^\circ$)

จากการทดลองอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 8 องศา ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่สามารถทำการอัดรีดได้ 2 ขนาดคือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ใช้สารหล่อลื่น 2 ชนิด คือ โซเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่น SAE40 และทำการอัดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.843, 0.940, 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์กลางนั้นหมายถึงไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ได้หลังจากการอัดรีดแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

5.1.2.1.1 ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น

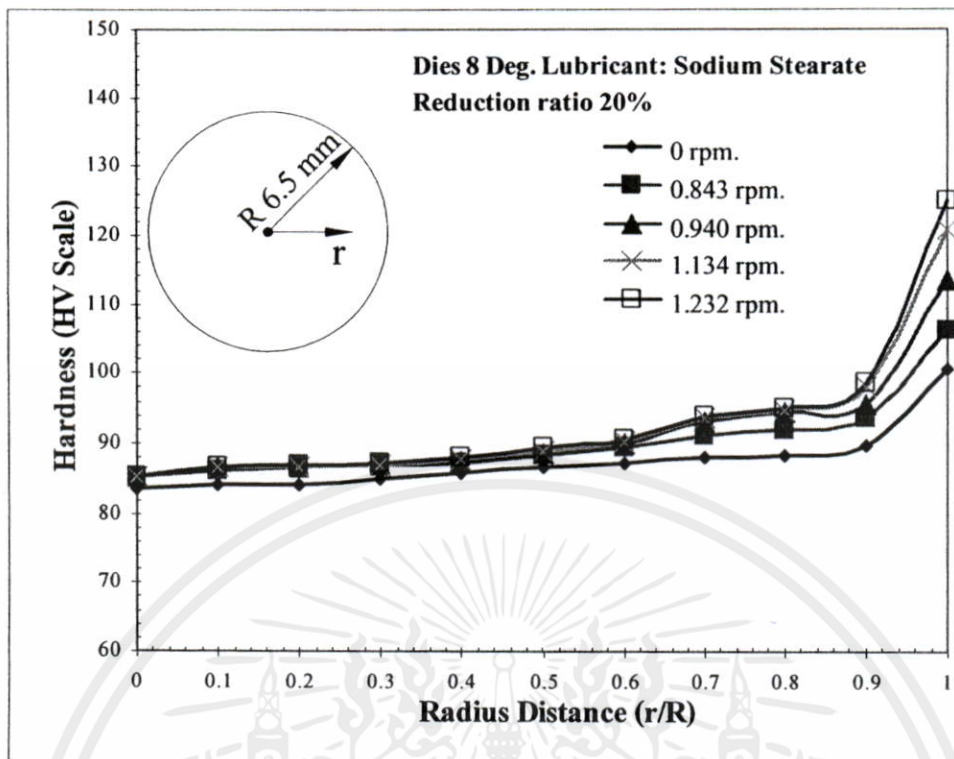
ผลการวัดค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการอัดรีดแล้ว ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ยังไม่ได้ผ่านการอัดรีด โดยที่ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการอัดรีดมีค่าเท่ากับ 65HV แต่ความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมไม่ได้เพิ่มขึ้นเท่ากันตลอดทั้งแท่ง จะมีการเพิ่มมากในบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมซึ่งลักษณะของการกระจายความแข็งแสดงในรูปที่ 5.22 ด้านซ้ายของรูปเป็นบริเวณศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียม ส่วนด้านขวาของรูปเป็นบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม ในรูป 5.22 เป็นค่าความแข็งจากการอัดรีดที่ใช้ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งที่วัดได้สำหรับการอัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวเท่ากับ ที่สุดบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 100.7 106.3 113.5 120.9 และ 125.1 HV ตามลำดับ ส่วนบริเวณศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียม ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 5.7 ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดที่ $\alpha = 8^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต

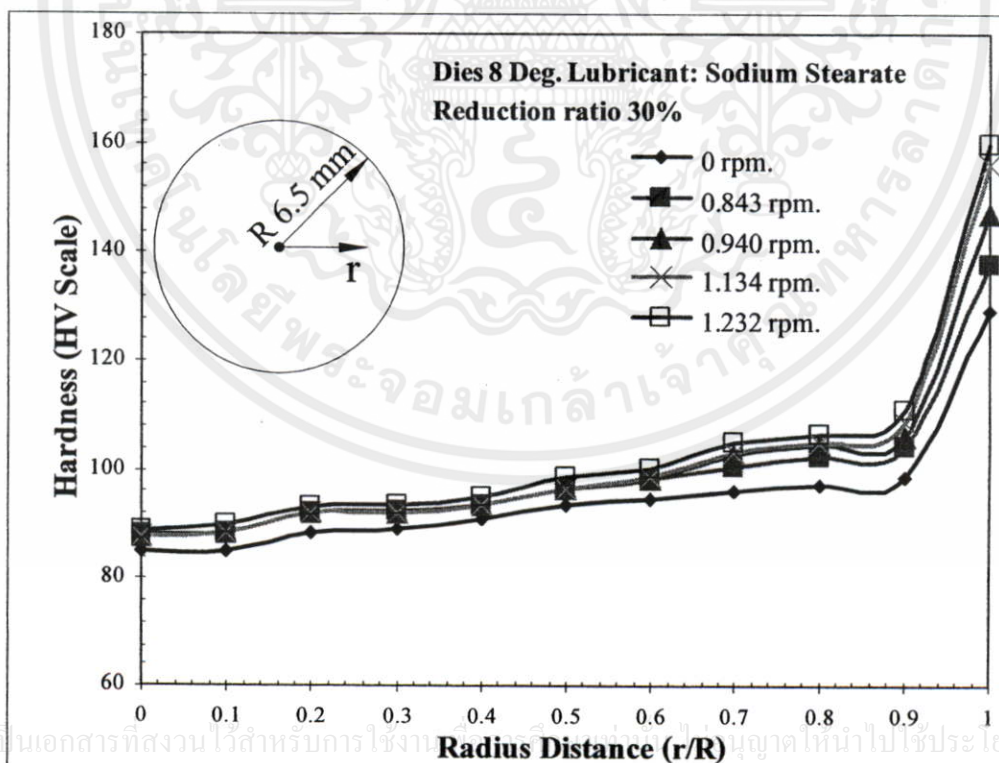
| | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| Hardness (HV) | 100.7 | 106.3 | 113.5 | 120.9 | 125.1 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| Hardness (HV) | 129.2 | 138.1 | 147.0 | 156.2 | 167.9 |

เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งที่วัดมีค่าสอดคล้องกับการทดลองของการใช้อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ได้ค่าความแข็งตามรูปที่ 5.23 โดยใช้แม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวเท่ากับ ที่สุดบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 129.2 138.1 147.0 156.2 และ 167.9 HV ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลทั้งหมดนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว



รูปที่ 5.23 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 8^\circ$ สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว

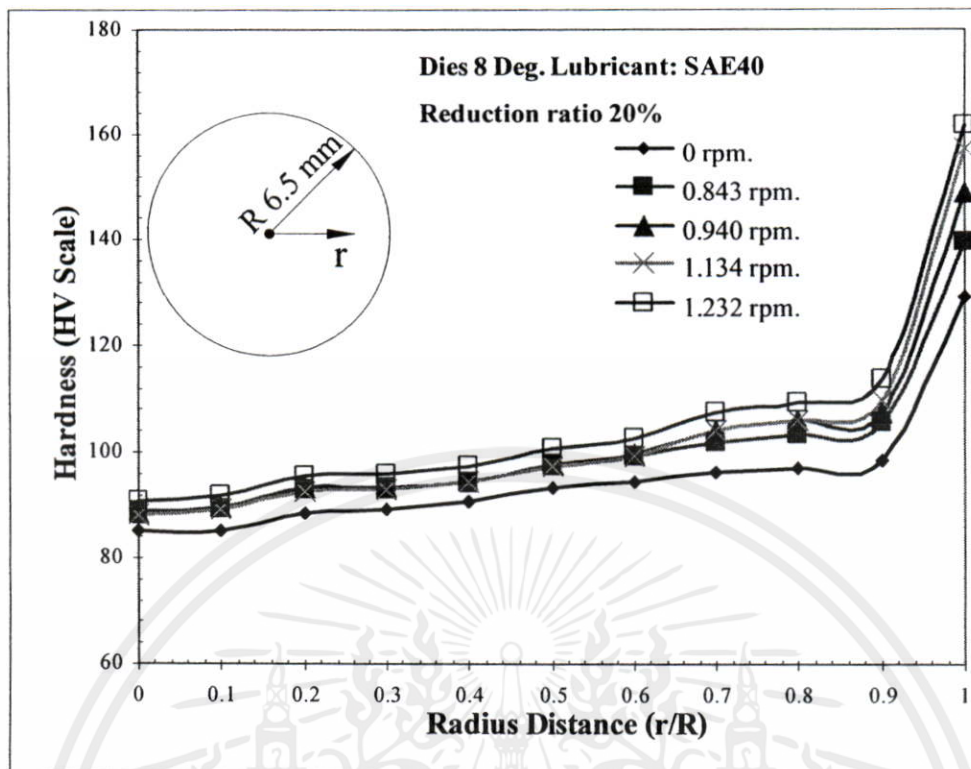
5.1.2.1.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

ในการทดสอบค่าความแข็งแท่งอลูมิเนียมหลังจากการอัดรีดเมื่อเปลี่ยนสารหล่อลื่น จากสารหล่อลื่นของแข็งเป็นสารหล่อลื่นแบบเหลวโดยใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 จากการวัดค่าความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ อัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองที่มีลักษณะสอดคล้องกันกับกรณี ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น คือค่าความแข็งมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนการทดลอง แต่จะมีค่ามากบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเท่านั้น ค่าความแข็งมากที่สุดที่วัดได้ในการอัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่แม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 129.2 139.6 148.8 157.5 และ 171.8 HV ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งสูงสุดเท่ากับ 129.1 141.4 150.4 158.8 และ 173.7 HV ตามลำดับ ในรูปที่ 5.24 เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการอัดรีด อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ และในรูปที่ 5.25 เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการอัดรีด อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์

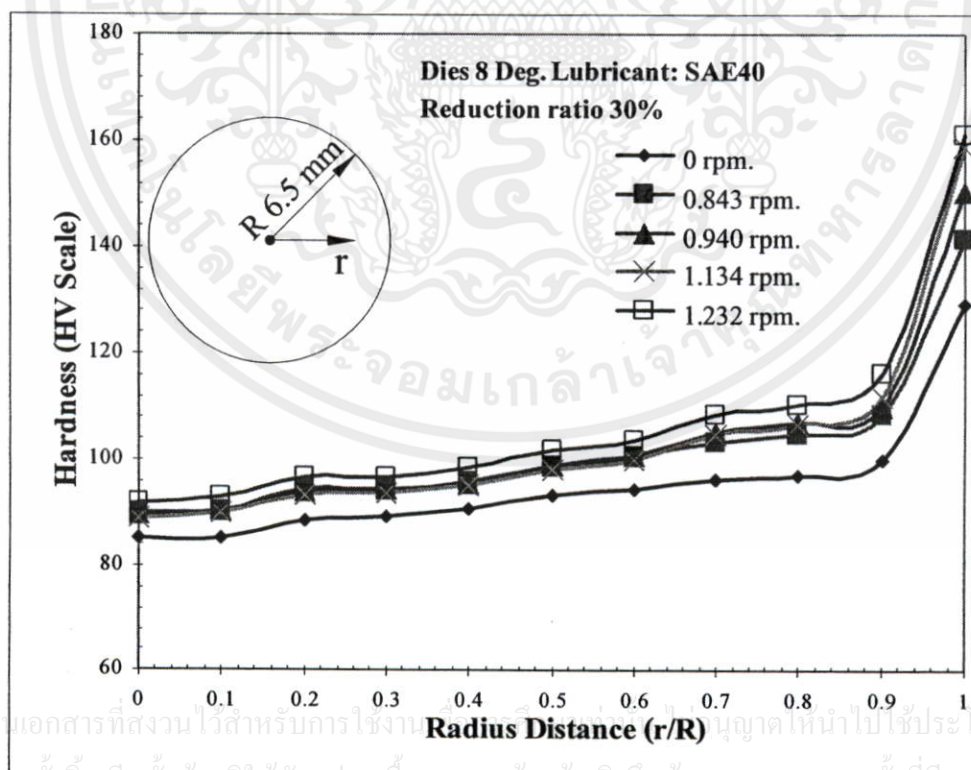
ตารางที่ 5.8 ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดที่ $\alpha = 8^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40

| | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| Hardness (HV) | 129.2 | 139.6 | 148.8 | 157.5 | 171.8 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| Hardness (HV) | 129.1 | 141.4 | 150.4 | 158.8 | 173.7 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 8^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว



รูปที่ 5.25 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 8^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว

5.1.2.2 ผลการทดสอบความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ($\alpha = 15^\circ$)

จากการทดลองอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 15 องศา ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่สามารถทำการอัดรีดได้ 2 ขนาดคือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ใช้สารหล่อลื่น 2 ชนิด คือ โซเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่น SAE40 และทำการอัดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.843, 0.940, 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์กลางนั้นหมายถึงไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ได้หลังจากการอัดรีดแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

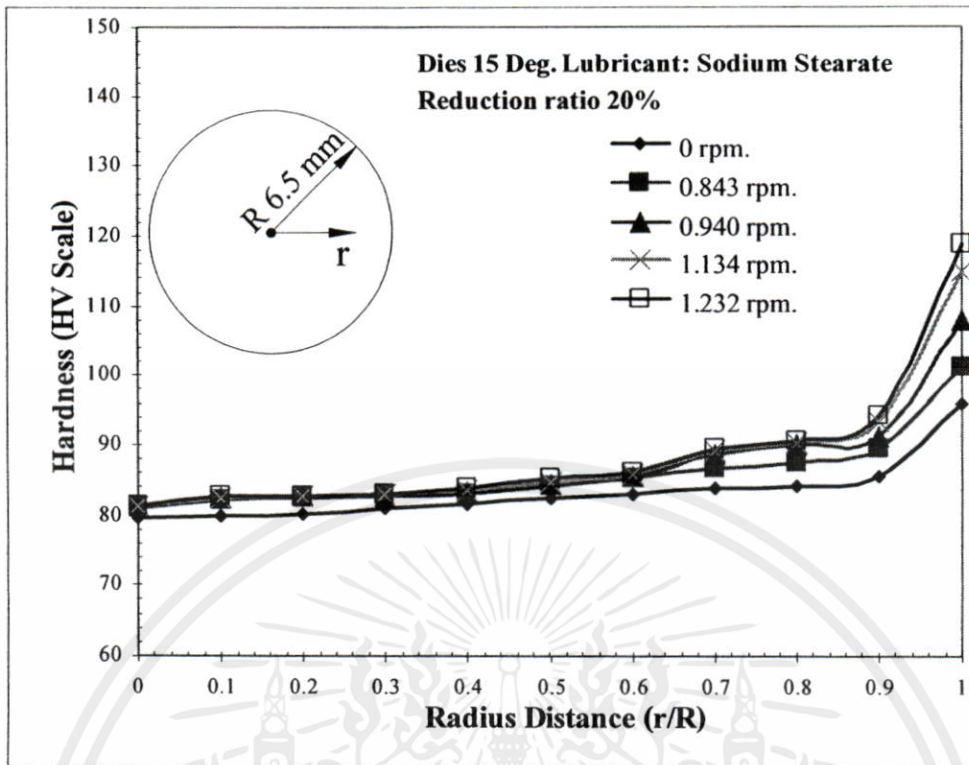
5.1.2.2.1 ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น

ลักษณะของการกระจายความแข็งแสดงในรูปที่ 5.26 ด้านซ้ายของรูปเป็นบริเวณศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียม ส่วนด้านขวาของรูปเป็นบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม ในรูป 5.26 เป็นค่าความแข็งจากการอัดรีดที่ใช้ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งที่วัดได้สำหรับการอัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวเท่ากับ ที่สุดบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 95.9 101.2 108.1 115.1 และ 119.1 HV ตามลำดับ ส่วนบริเวณศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย

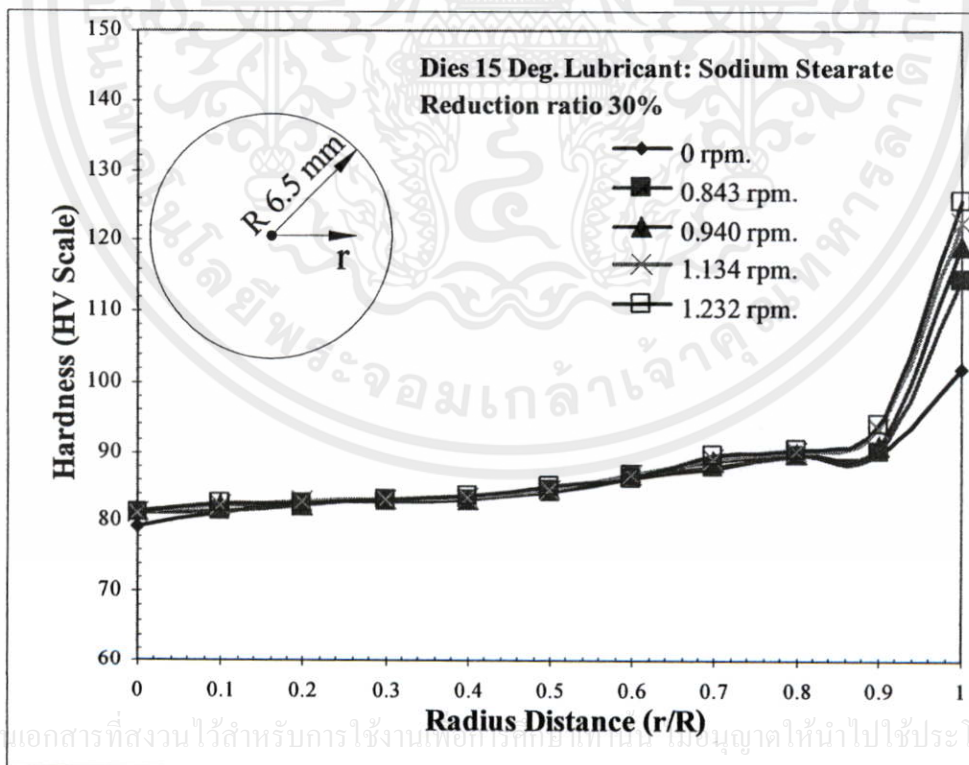
ตารางที่ 5.9 ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| Hardness (HV) | 95.9 | 101.2 | 108.1 | 115.1 | 119.1 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| Hardness (HV) | 102.0 | 114.6 | 119.2 | 122.5 | 125.8 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว



รูปที่ 5.27 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น มิใช่เพื่อการค้า หากมีการนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ดำเนินการต่อไปได้

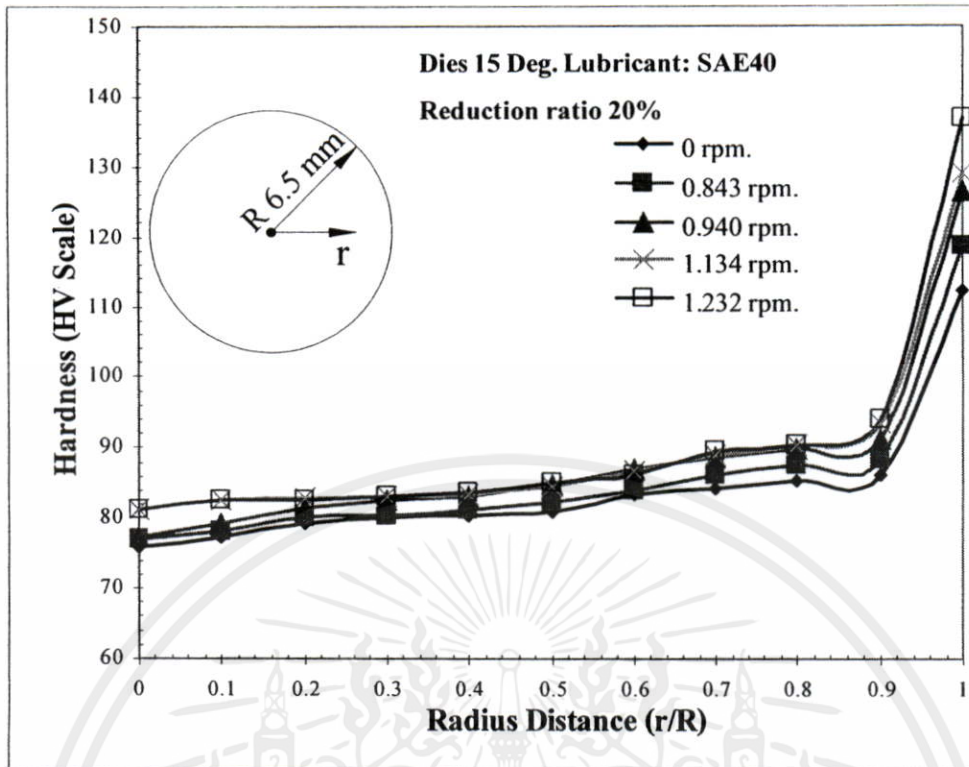
เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งที่วัดมีค่าตามรูปที่ 5.27 โดยใช้แม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวเท่ากับ ที่สุดบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 114.6 119.2 122.5 และ 125.8 HV ตามลำดับ

5.1.2.2.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

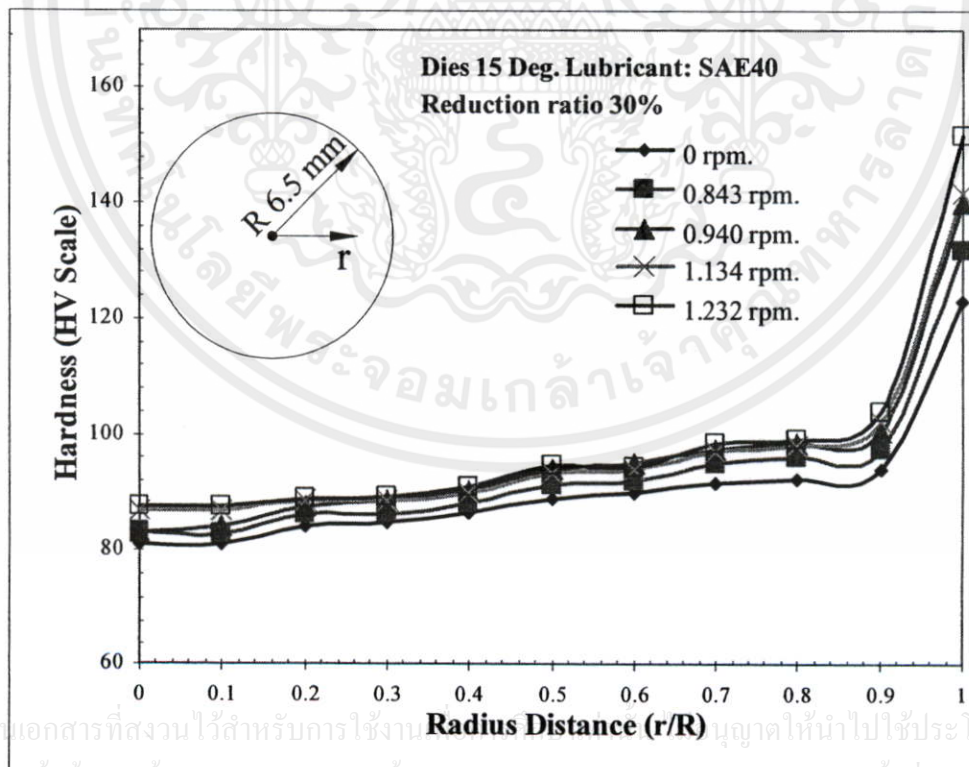
ในการทดสอบค่าความแข็งแท่งอลูมิเนียมหลังจากการอัดรีดเมื่อเปลี่ยนสารหล่อลื่น จากสารหล่อลื่นของแข็งเป็นสารหล่อลื่นแบบเหลวโดยใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 จากการวัดค่าความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ อัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองที่มีลักษณะสอดคล้องกันกับกรณี ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น คือค่าความแข็งมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนการทดลอง แต่จะมีค่ามากบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเท่านั้น ค่าความแข็งมากที่สุดที่วัดได้ในการอัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่แม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 112.4 118.9 126.7 129.1 และ 137.0 HV ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งสูงสุดเท่ากับ 123.0 131.8 140.2 141.8 และ 151.7 HV ตามลำดับ ในรูปที่ 5.28 เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการอัดรีด อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ และในรูปที่ 5.29 เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการอัดรีด อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5.10 ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40

| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| Hardness (HV) | 112.4 | 118.9 | 126.7 | 129.1 | 137.0 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| Hardness (HV) | 123.0 | 131.8 | 140.2 | 141.8 | 151.7 |



รูปที่ 5.28 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว



รูปที่ 5.29 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_e = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.3 ผลการทดสอบความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ($\alpha = 45^\circ$)

จากการทดลองอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 45 องศา ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่สามารถทำการอัดรีดได้ 2 ขนาดคือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ใช้สารหล่อลื่น 2 ชนิด คือ โซเดียมสเตียเรตและน้ำมันหล่อลื่น SAE40 และทำการอัดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.843, 0.940, 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์นั้นหมายถึงไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ได้หลังจากการอัดรีดแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

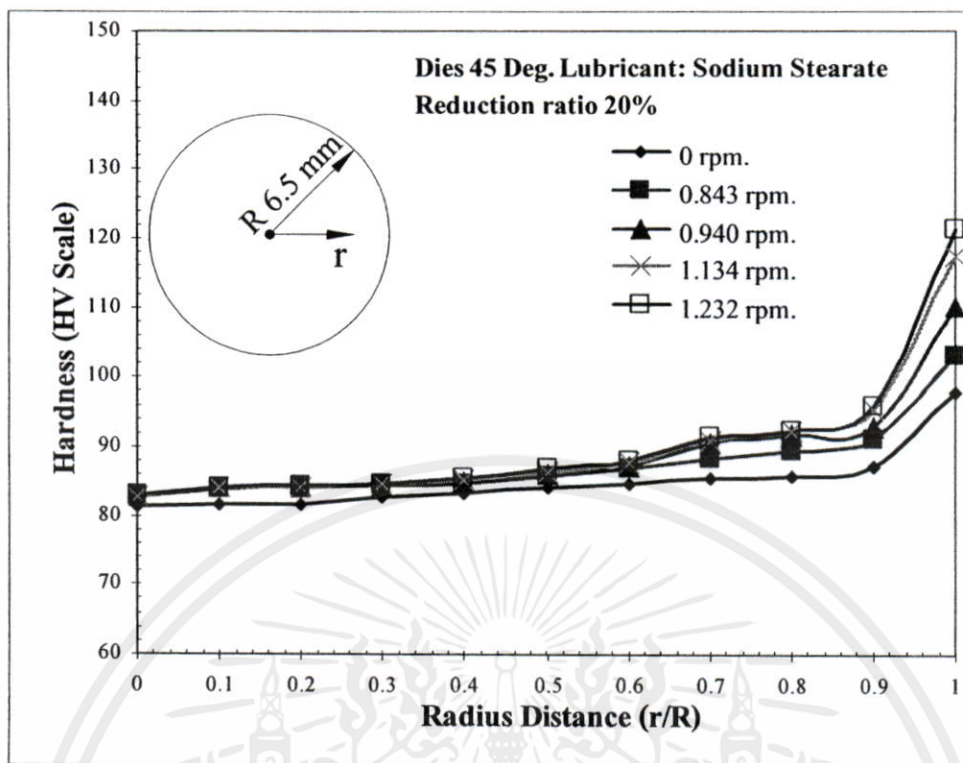
5.1.2.3.1 ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น

ลักษณะของการกระจายความแข็งแสดงในรูปที่ 5.30 ด้านซ้ายของรูปเป็นบริเวณศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียม ส่วนด้านขวาของรูปเป็นบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม ในรูป 5.30 เป็นค่าความแข็งจากการอัดรีดที่ใช้ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งที่วัดได้สำหรับการอัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวเท่ากับ ที่สุดบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 97.8 103.2 110.3 117.4 และ 121.5 HV ตามลำดับ ส่วนบริเวณศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย

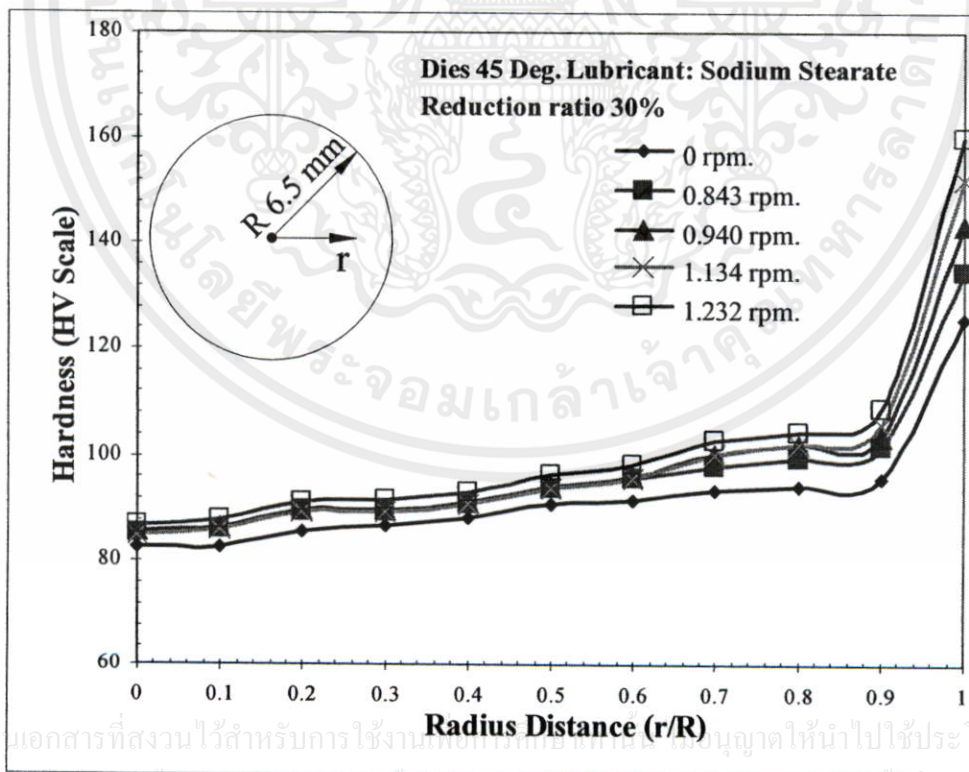
ตารางที่ 5.11 ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดที่ $\alpha = 45^\circ$ ใช้สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต

| | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| Hardness (HV) | 97.8 | 103.2 | 110.3 | 117.4 | 121.5 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| Hardness (HV) | 125.5 | 134.4 | 143.5 | 151.9 | 163.1 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว



รูปที่ 5.31 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 45^\circ$ สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

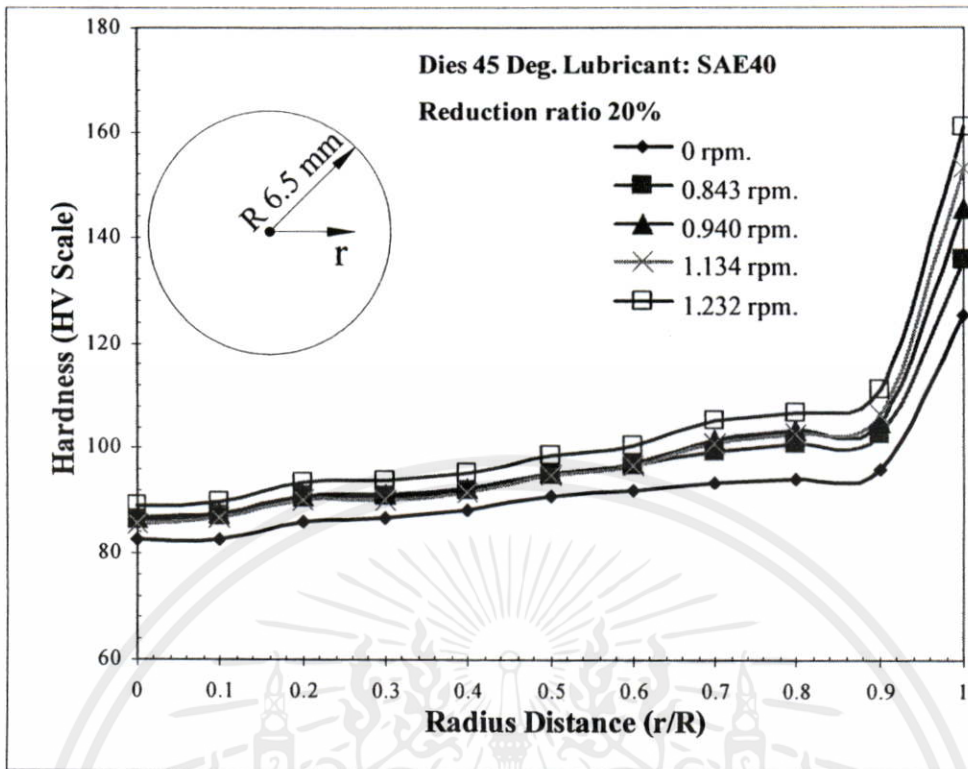
เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งที่วัดมีความสอดคล้องกับการทดลองของการใช้อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ ได้ค่าความแข็งตามรูปที่ 5.31 โดยใช้แม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวเท่ากับ ที่สุดบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 114.6 119.2 122.5 และ 125.8 HV ตามลำดับ

5.1.2.3.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

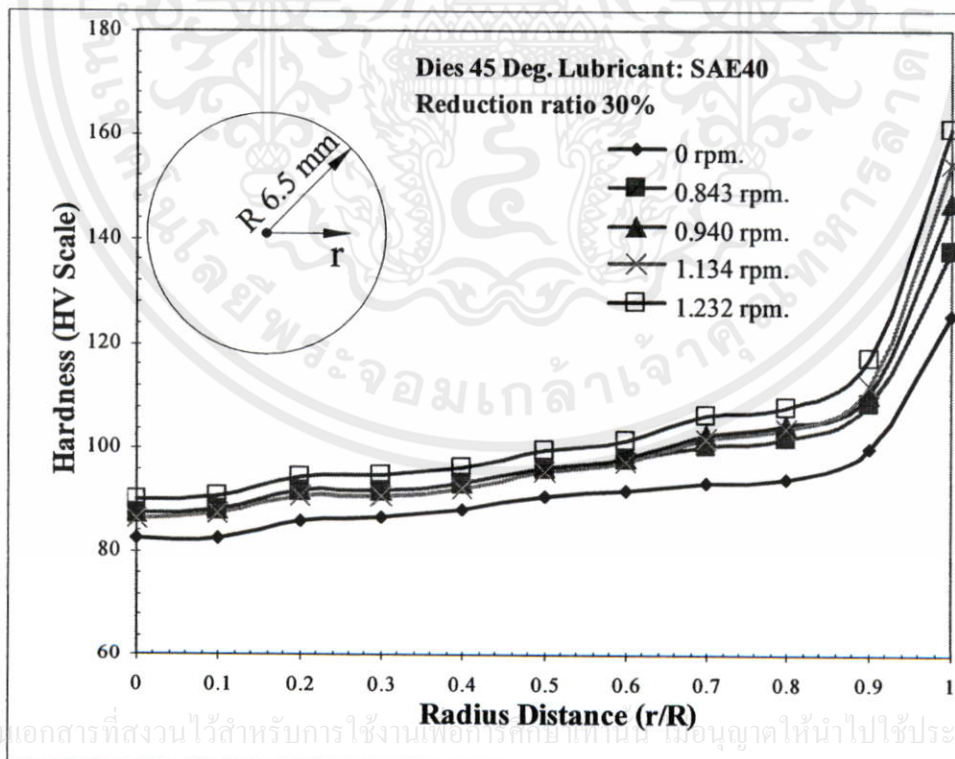
ในการทดสอบค่าความแข็งแท่งอลูมิเนียมหลังจากการอัดรีดเมื่อเปลี่ยนสารหล่อลื่น จากสารหล่อลื่นของแข็งเป็นสารหล่อลื่นแบบเหลวโดยใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 จากการวัดค่าความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ อัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบแตกต่างกัน 5 ค่าคือ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองที่มีลักษณะสอดคล้องกันกับกรณี ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น คือค่าความแข็งมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนการทดลอง แต่จะมีค่ามากบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเท่านั้น ค่าความแข็งมากที่สุดที่วัดได้ในการอัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่แม่พิมพ์หมุนที่มีความเร็วรอบเท่ากับ 0 0.843 0.940 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาที ได้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 112.4 118.9 126.7 129.1 และ 137.0 HV ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งสูงสุดเท่ากับ 123.0 131.8 140.2 141.8 และ 151.7 HV ตามลำดับ ในรูปที่ 5.32 เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการอัดรีด อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ และในรูปที่ 5.33 เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการอัดรีด อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5.12 ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวชิ้นงาน อัดรีดที่ $\alpha = 45^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40

| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.843 | 0.940 | 1.134 | 1.232 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| Hardness (HV) | 125.5 | 135.9 | 145.3 | 153.1 | 166.9 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| Hardness (HV) | 125.6 | 137.7 | 146.9 | 154.3 | 168.7 |



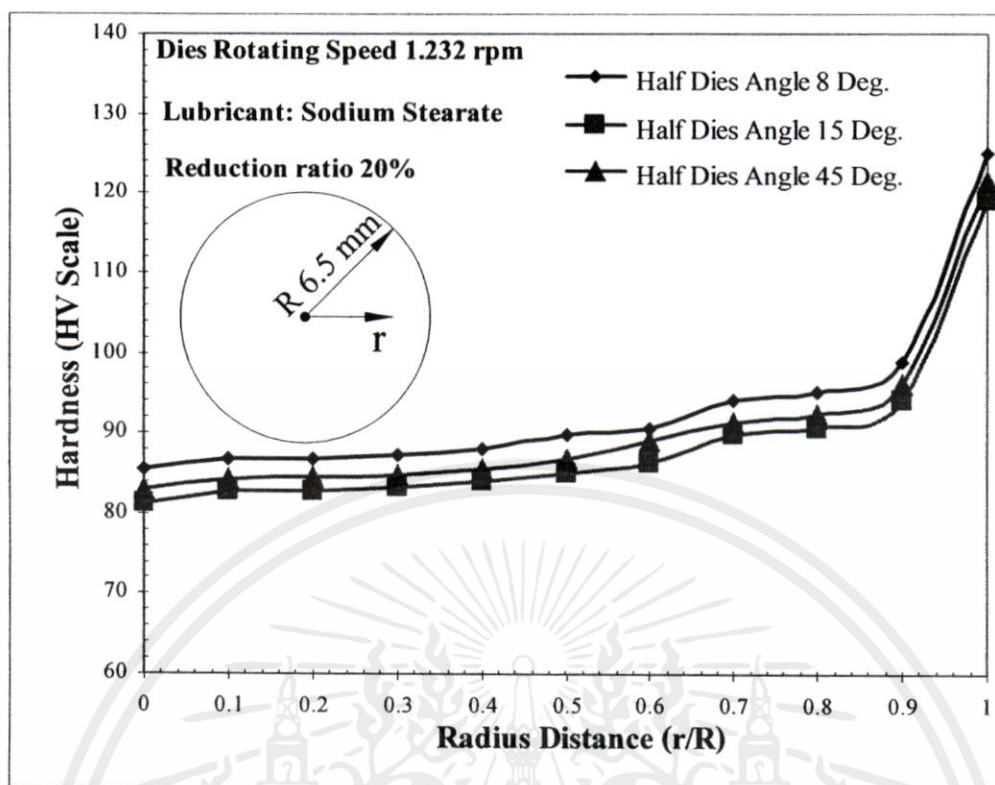
รูปที่ 5.32 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 45^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 20\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว



รูปที่ 5.33 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมหลังการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ $\alpha = 15^\circ$ ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 $r_c = 30\%$ วัดค่ารัศมีจากจุดศูนย์กลางไปหาผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัย โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตยางธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เป็นการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมจากการอัดรีดที่ $\alpha = 8$ 15 และ 45° สารหล่อโซเดียมสเตียเรต $r_c = 20\%$

จากผลการทดลองที่ได้ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมมีการเพิ่มขึ้น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการเพิ่มขึ้นอย่างเท่ากันบริเวณรอบแกนกลางของแท่งอลูมิเนียม การเพิ่มขึ้นของความแข็งบริเวณรอบแกนกลางนี้เนื่องจาก การอัดตัวของแท่งอลูมิเนียมภายในเบ้าประคองเนื่องจากแรงที่ใช้กดขณะทำการอัดรีดก่อนที่แท่งอลูมิเนียมจะไหลผ่านแม่พิมพ์ และส่วนที่สองคือการเพิ่มขึ้นของความแข็งบริเวณผิวหรือขอบของแท่งอลูมิเนียม ในการเพิ่มขึ้นของความแข็งในส่วนนี้เป็นการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเนียนที่เกิดขึ้นจากความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งอลูมิเนียม เบ้าประคอง และแม่พิมพ์ รวมทั้งการลดลงของขนาดแท่งอลูมิเนียมในแต่ละอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็วรอบการหมุนของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อลูมิเนียมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ค่าความแข็งก็เพิ่มขึ้นสูงสุดไม่เกิน 161 HV

รูปที่ 5.34 แสดงความแข็งที่ได้จากการอัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 1.232 รอบต่อวินาที ผลที่ได้พบว่าที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ 15 องศา ความแข็งที่วัดได้ภายในแท่งอลูมิเนียมมีค่าน้อยที่สุด โดยที่ครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 45 องศา และ 8 องศา ความแข็งที่วัดได้ภายในแท่งอลูมิเนียมมีค่ามากกว่าตามลำดับ

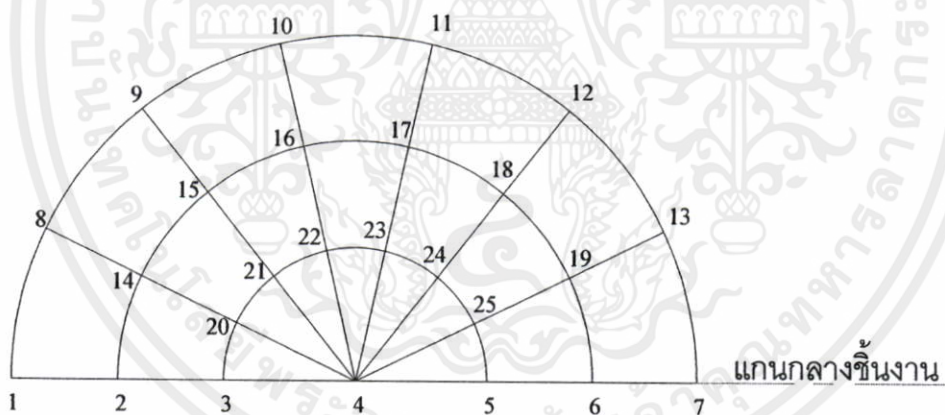
5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MARC รุ่น 2000 ในครั้งนี้นั้น ได้ทำการจำลองแบบตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยผลของความเค้นที่ต้องการนั้น หาจากค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานตามหน้าตัดขวางตลอดกระบวนการจำลองของระบบ และค่าแรงอัดรีดสูงสุดที่ใช้ในการอัดรีดหาจากการรวมแรงกระทำ (reaction force) ที่ด้านท้ายของชิ้นงาน ซึ่งเป็นแรงที่หัวกดกระทำต่อชิ้นงาน โดยในรูปที่ 5.27 เป็นรูปตัวอย่างแสดงจุดต่อ (node) ของเอลิเมนต์ที่ด้านท้ายของแท่งชิ้นงานหน้าตัดกลมที่ผ่าครึ่งตามแนวยาว ซึ่งหลักการหาแรงกระทำเต็มแท่งหน้าตัดกลมนั้น จะรวมแรงที่กระทำในแต่ละจุด (node) ตั้งแต่จุดที่ 1 จนถึงจุดที่ 7 รวมด้วยสองเท่าของแรงที่กระทำในจุดที่ 8 ถึง จุดที่ 25 หรือเขียนสูตรได้ว่า

$$\text{แรงอัดรีดชิ้นงาน} = F = \sum_{N=1}^7 F_N + 2 \sum_{N=8}^{25} F_N \quad (5.2)$$

เมื่อ F คือแรงที่ใช้อัดรีด

F_N คือแรงที่กระทำที่จุดต่อเอลิเมนต์ในแต่ละจุด



รูปที่ 5.35 แสดงจุดต่อเอลิเมนต์ที่ภาคตัดขวางของแท่งชิ้นงาน

5.2.1 ผลการวิเคราะห์การอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 8 องศา ($\alpha = 8^\circ$)

ในการอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 8 องศา นี้ มีได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไว้ 2 ค่าคือ 0.07 และ 0.3 สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมุม 8 องศา มีทั้งหมด 2 ขนาด คือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ และในการวิเคราะห์ที่อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดแต่ละค่า นั้นทำการอัดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์นั้นหมายถึงไม่มีการหมุน

ของแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปผลการทดลองการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมมของแม่พิมพ์ 8 องศา ที่ได้แสดงแยกตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.07 และ 0.3 ตามตารางที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.13 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.07$ $r_e = 20\%$ และ 30%
ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.940 | 1.232 | 9.549 | 47.746 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 72.17 | 70.32 | 70.12 | 53.90 | 46.33 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 543.73 | 529.80 | 528.28 | 406.08 | 349.02 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 77.32 | 76.82 | 76.23 | 62.85 | 59.86 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 582.54 | 578.74 | 574.31 | 473.48 | 451.01 |

ตารางที่ 5.14 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.3$ $r_e = 20\%$ และ 30%
ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.940 | 1.232 | 9.549 | 47.746 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 79.39 | 77.35 | 77.15 | 59.29 | 50.96 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 598.10 | 582.78 | 581.25 | 446.69 | 383.92 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 85.05 | 84.50 | 83.10 | 69.13 | 65.85 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 640.80 | 636.62 | 631.35 | 520.83 | 496.11 |

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในงาน เปรียบเทียบกับความเค้นไหลเฉลี่ย โดยขอบเขตของจุดครากของวัสดุใช้ Von Mises Yield Criterion ซึ่งจะหาความเค้นไหลเฉลี่ย (mean flow stress) ได้จาก

$$\bar{\sigma} = 2k \quad (5.3)$$

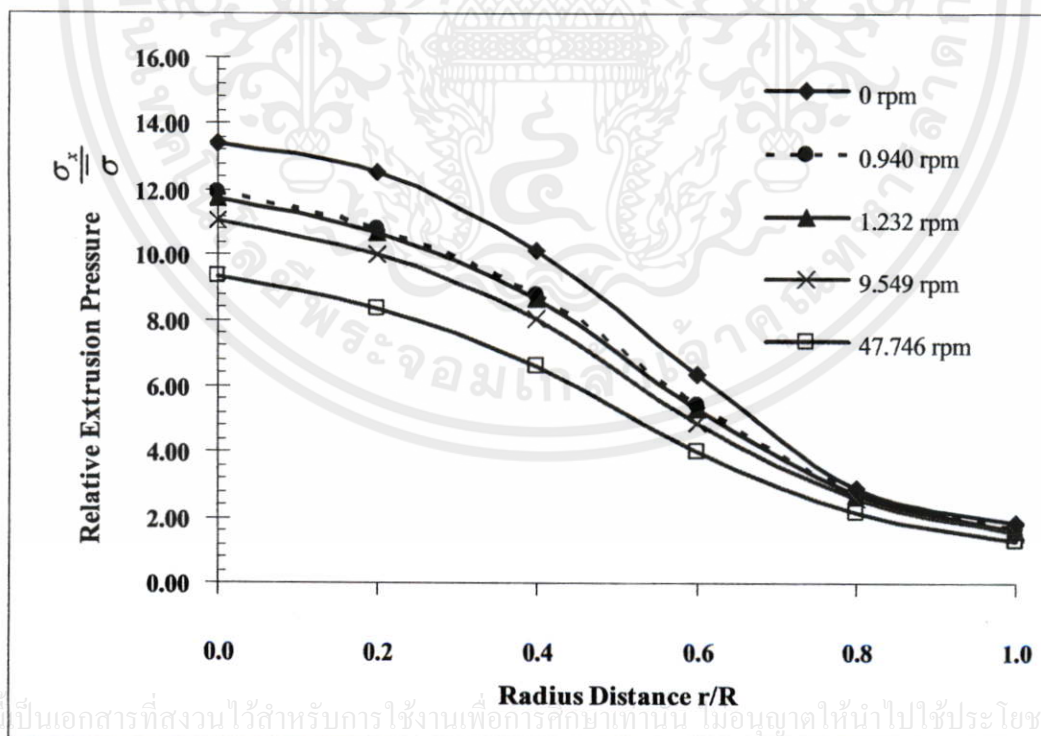
$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (5.4)$$

เมื่อ $\bar{\sigma}$ คือ ความเค้นไหลเฉลี่ย

k คือ ความเค้นเฉือนที่จุดคราก (Shear Yield Stress)

σ_y คือ ความเค้นที่จุดคราก

รูปที่ 5.28 และ 5.29 แสดงแรงอัดรีดต่อความเค้นไหลเฉลี่ยเปรียบเทียบกับระยะตามแนวรัศมีของแท่งอลูมิเนียมจากการวิเคราะห์การอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 8 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.07 และ 0.3 ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ 20 และมีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อ นาที หรือ 0, 0.098, 0.129, 1.0 และ 5.0 เรเดียนต่อวินาที

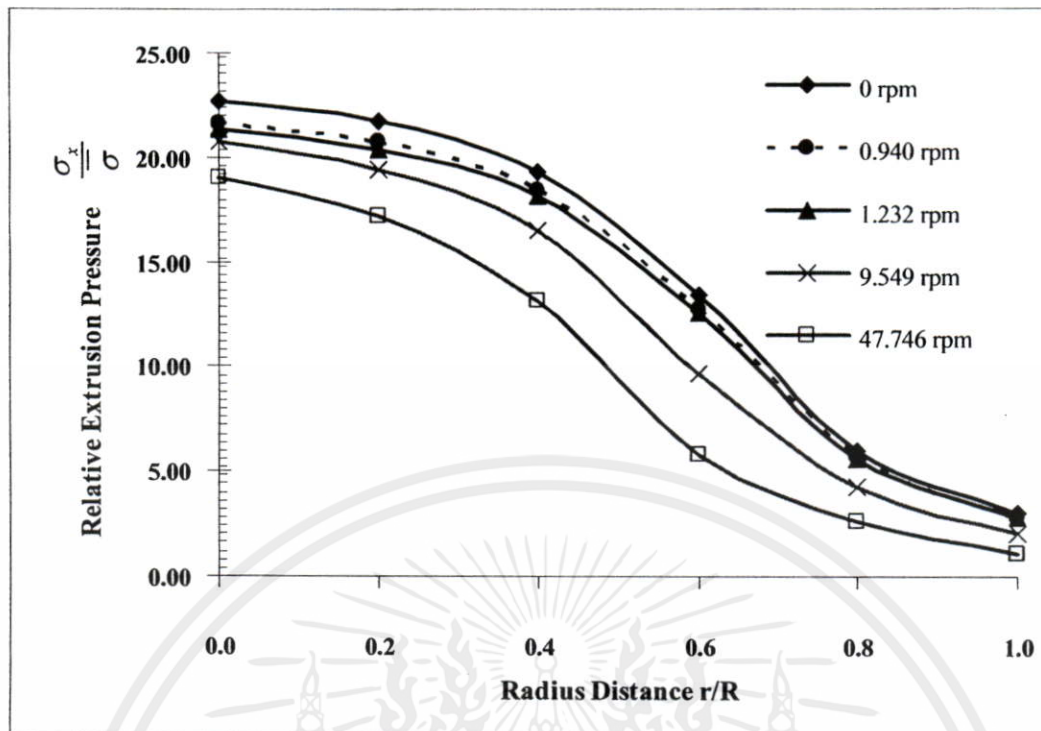


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม

รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม

ขนาดครึ่งมมแม่พิมพ์ 8 องศา $\mu = 0.07$



รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความอืดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมมแม่พิมพ์ 8 องศา $\mu = 0.3$

5.2.2 ผลการวิเคราะห์การอืดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 15 องศา ($\alpha = 15^\circ$)

ในการอืดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 15 องศา นี้ ได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไว้ 2 ค่าคือ 0.07 และ 0.3 สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 15 องศา มีทั้งหมด 2 ขนาด คือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ และในการวิเคราะห์ที่อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดแต่ละค่านั้นทำการอืดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์นั้นหมายถึงไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งสรุปผลการทดลองการอืดรีดที่ขนาดครึ่งมมของแม่พิมพ์ 15 องศา ที่ได้แสดงแยกตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.07 และ 0.3 ตามตารางที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.15 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 15^\circ$ $\mu = 0.07$ $r_c = 20\%$ และ 30%
ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที

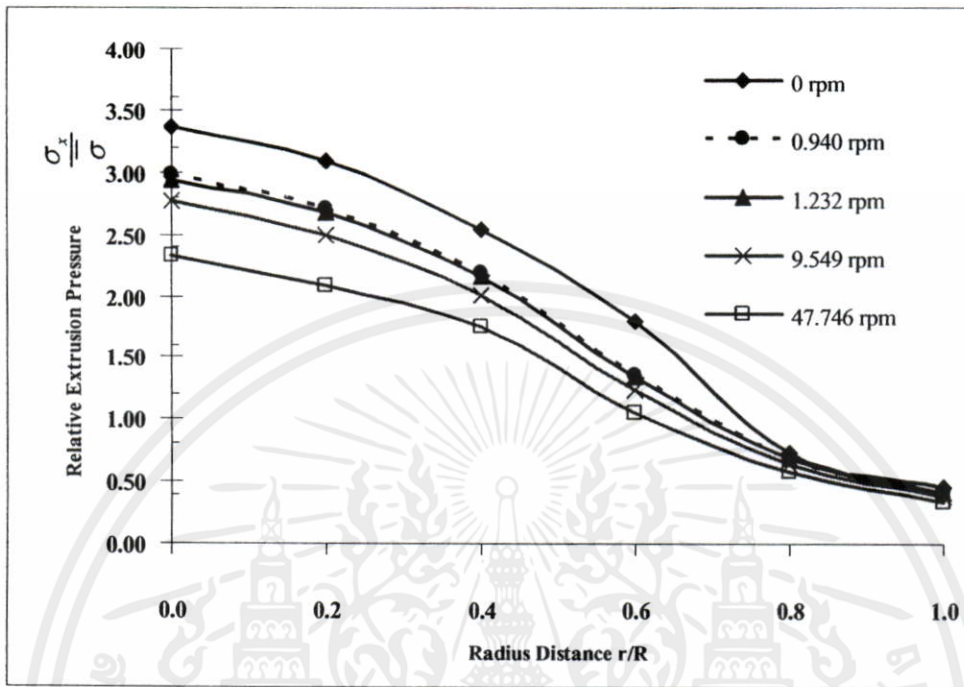
| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.940 | 1.232 | 9.549 | 47.746 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 51.55 | 50.23 | 50.09 | 38.50 | 33.09 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 388.39 | 378.43 | 377.38 | 298.07 | 249.32 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 55.23 | 54.87 | 54.17 | 44.89 | 42.76 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 416.10 | 413.39 | 408.11 | 338.20 | 322.15 |

ตารางที่ 5.16 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 15^\circ$ $\mu = 0.3$ $r_c = 20\%$ และ 30%
ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที

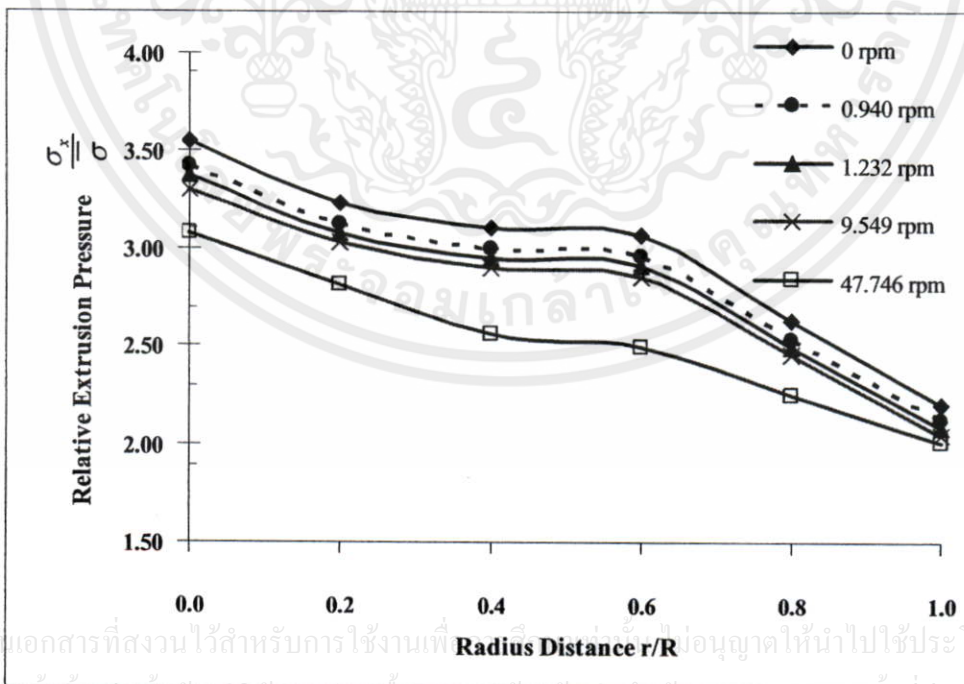
| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.940 | 1.232 | 9.549 | 47.746 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 56.71 | 55.25 | 55.12 | 42.35 | 36.40 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 598.10 | 582.78 | 415.27 | 446.69 | 383.92 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 60.75 | 60.21 | 59.55 | 49.40 | 46.95 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 457.71 | 454.73 | 448.65 | 372.02 | 354.37 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.30 และ 5.31 แสดงแรงอัดรีดต่อความเค้นไหลเฉลี่ยเปรียบเทียบกับระยะตามแนวรัศมี
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ของแห่งอุทกนิเวศวิทยาจากการวิเคราะห์การอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 15 องศา ค่าสัมประสิทธิ์
แรงเสียดทานเท่ากับ 0.07 และ 0.3 ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของ

แม่พิมพ์ 20 และมีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที หรือ 0, 0.098, 0.129, 1.0 และ 5.0 เรเดียนต่อวินาที



รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความอืดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมูมแม่พิมพ์ 15 องศา $\mu = 0.07$



รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความอืดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมูมแม่พิมพ์ 15 องศา $\mu = 0.3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ผลการวิเคราะห์การอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 45 องศา ($\alpha = 45^\circ$)

ในการอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 45 องศา นี้ได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไว้ 2 ค่าคือ 0.07 และ 0.3 สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 45 องศา มีทั้งหมด 2 ขนาด คือ 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ และในทำการอัดรีดที่มีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที ซึ่งสรุปผลการทดลองการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมมของแม่พิมพ์ 45 องศา ที่ได้แสดงแยกตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.07 และ 0.3 ตามตารางที่ 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.17 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 45^\circ$ $\mu = 0.07$ $r_e = 20\%$ และ 30%
ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที

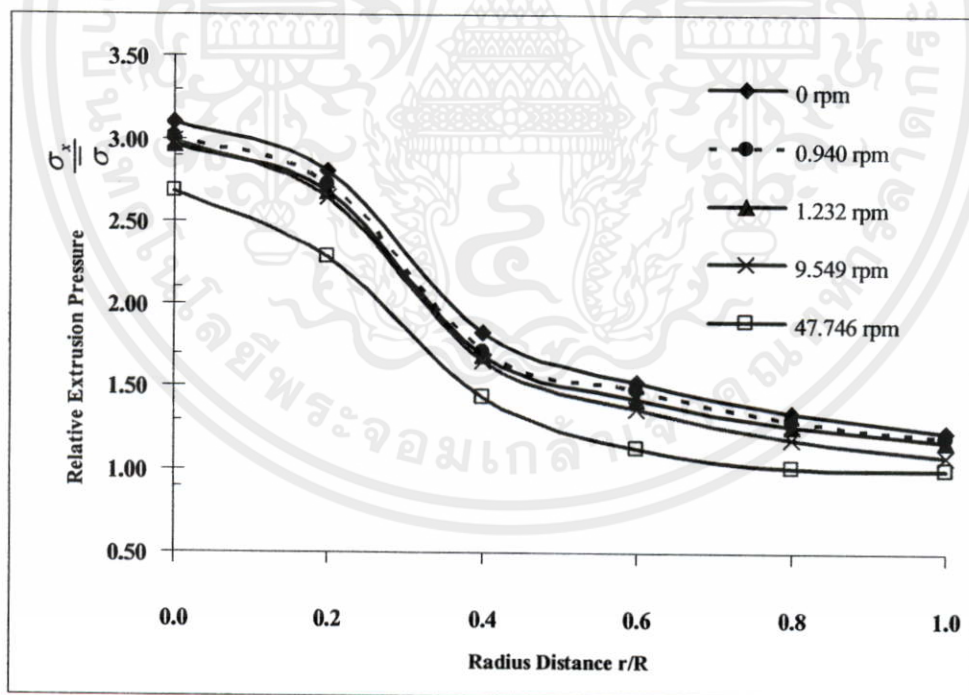
| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.940 | 1.232 | 9.549 | 47.746 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 59.28 | 57.76 | 57.59 | 44.28 | 38.05 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 446.63 | 435.20 | 433.88 | 333.57 | 286.69 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 63.51 | 63.10 | 62.29 | 51.62 | 49.17 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 478.52 | 475.40 | 469.29 | 388.93 | 370.48 |

รูปที่ 5.30 และ 5.31 แสดงแรงอัดรีดต่อความเค้นไหลเฉลี่ยเปรียบเทียบกับระยะตามแนวรัศมีของแท่งอลูมิเนียมจากการวิเคราะห์การอัดรีดที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดครึ่งมม 45 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.07 และ 0.3 ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ 20 และมีการหมุนแม่พิมพ์ด้วยความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที หรือ 0, 0.098, 0.129, 1.0 และ 5.0 เรเดียนต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

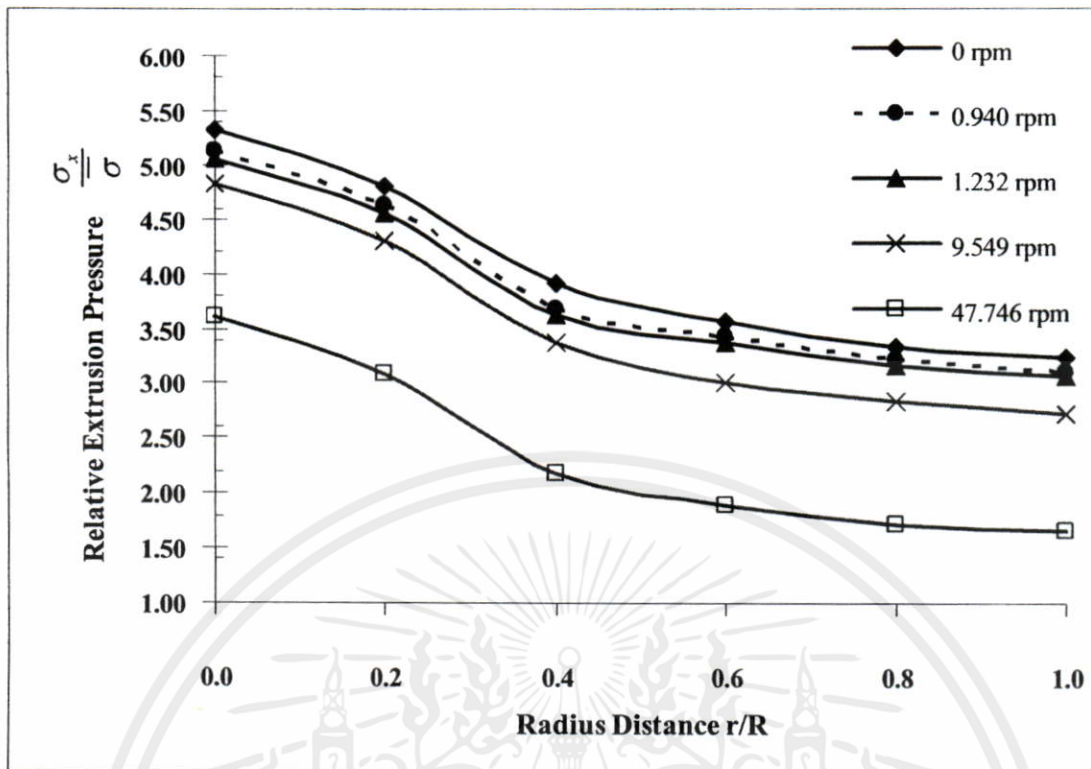
ตารางที่ 5.18 แรงและความเค้นสูงสุดจากการอัดรีดที่ $\alpha = 45^\circ$ $\mu = 0.3$ $r_c = 20\%$ และ 30%
ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที

| ความเร็วรอบ แม่พิมพ์ (rpm) | 0 | 0.940 | 1.232 | 9.549 | 47.746 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% | | | | | |
| แรง (kN) | 69.75 | 67.96 | 67.80 | 52.09 | 44.77 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 525.47 | 512.02 | 510.80 | 392.45 | 337.30 |
| อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% | | | | | |
| แรง (kN) | 74.73 | 74.24 | 73.25 | 60.74 | 57.85 |
| ความเค้น (N/mm ²) | 562.98 | 559.31 | 551.86 | 457.58 | 435.87 |



รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความอัดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารขนาดเล็กพิมพ์แม่พิมพ์ 45 องศา $\mu = 0.07$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความอืดรีดกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของแท่งอลูมิเนียม ขนาดครึ่งมมแม่พิมพ์ 45 องศา $\mu = 0.3$

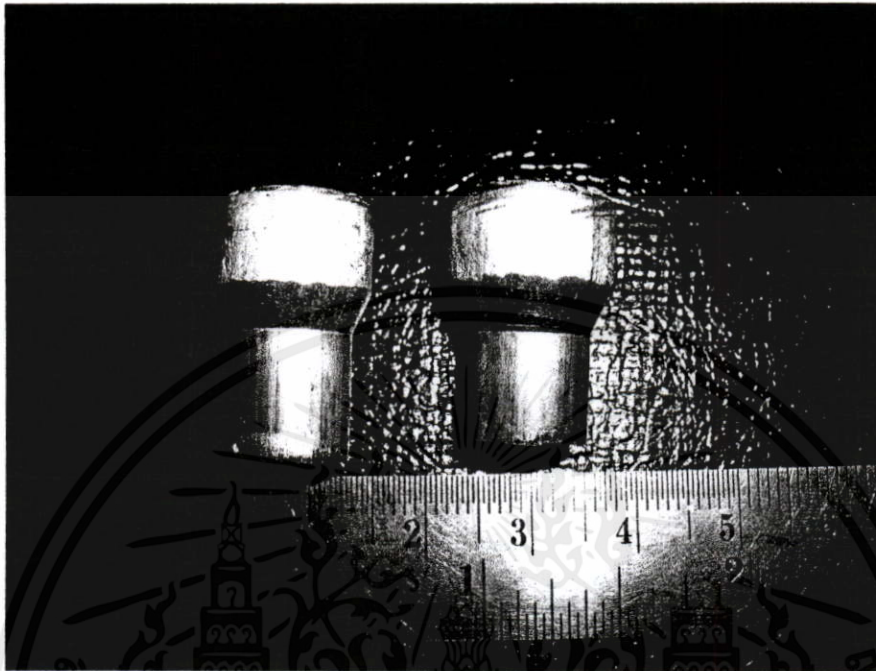
5.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถวิเคราะห์ผลที่ได้โดยมีรายละเอียดดังนี้

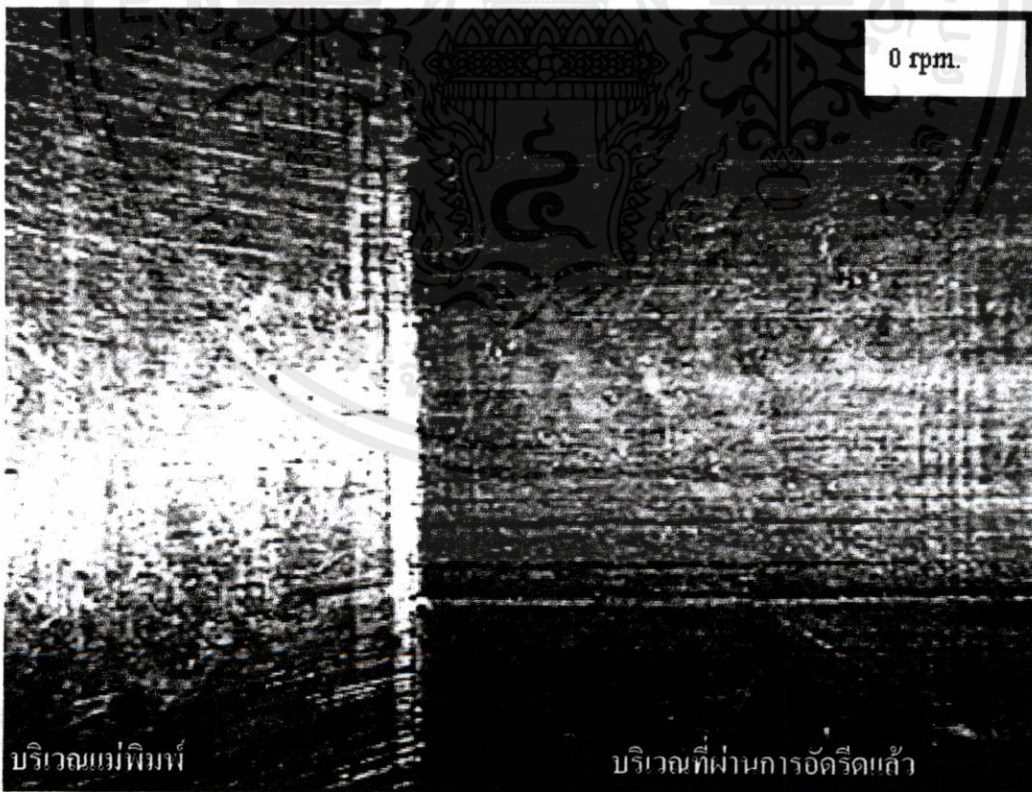
5.3.1 ลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองอัดรีดแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์ ทั้งที่มีการหมุนและไม่หมุนนั้น จะได้ชิ้นงานที่มีลักษณะตามรูปที่ 5.42 โดยแท่งอลูมิเนียมที่ถูกอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุนจะเกิดการหมุนบิดตามการหมุนของแม่พิมพ์เข้าไปในเข้าประคอง สังเกตได้จากรูปที่ 5.42 ชิ้นงานทางด้านซ้ายเป็นชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่ไม่มีการหมุน และชิ้นงานทางด้านขวาเป็นการอัดรีดที่มีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งจะเห็นรอยที่ชิ้นงานเกิดการหมุนภายในเข้าประคอง แต่เมื่อชิ้นงานผ่านแม่พิมพ์ไปแล้วรอยนี้ก็ไม่เห็นด้วยตาเปล่า สังเกตได้โดยเมื่อนำชิ้นงานมาทำการถ่ายภาพขยาย 60 เท่า ตามรูปที่ 5.43 และ 5.44 ซึ่งเป็นการอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่ไม่หมุนและหมุนที่ความเร็วรอบ 0.940 รอบต่อนาทีตามลำดับ โดยใช้ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรท ซึ่งจากรูป 5.44 จะเห็นว่ามียอยหมุนบิดที่ชิ้นงานที่เกิดจากการหมุนของแม่พิมพ์

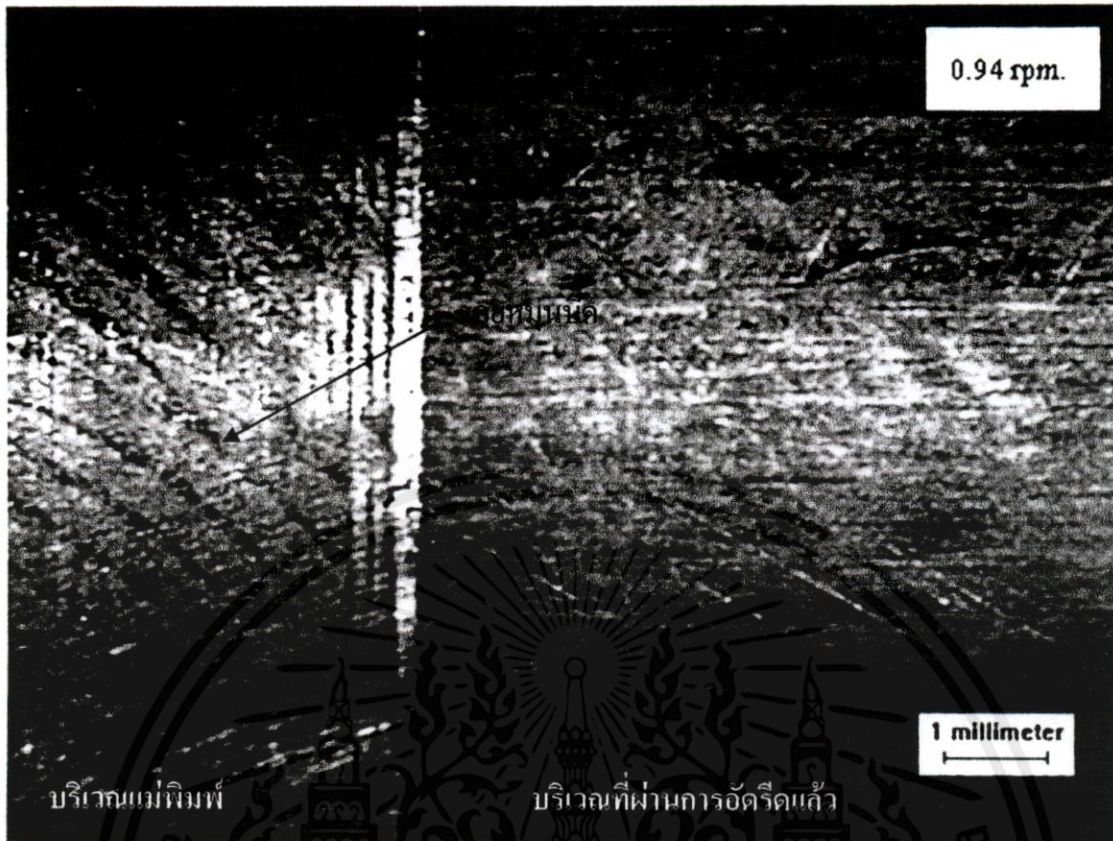
แม่พิมพ์แต่เมื่อขึ้นงานผ่านแม่พิมพ์แล้ว ชิ้นงานถูกดันรีดออกมาโดยไม่มีแรงบิดจากการเสียดทานไปกระทำ จึงทำให้ไม่เห็นรอยหมุนบิดดังกล่าว



รูปที่ 5.42 ลักษณะแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการอัดรีด



รูปที่ 5.43 ภาพขยาย 60 เท่าของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการอัดรีดที่แม่พิมพ์ไม่หมุน ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรต



รูปที่ 5.44 ภาพขยาย 60 เท่าของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการอัดรีดที่แม่พิมพ์หมุนด้วยความเร็วรอบ 0.940 รอบต่อนาที ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรท

5.3.2 ผลของแรงอัดรีดขึ้นรูปที่ลดลงจากการทดลอง

สรุปแรงอัดรีดที่ใช้ในการทดลองสูงสุด โดยไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์และแรงอัดรีดที่ใช้ต่ำสุด จากการหมุนแม่พิมพ์ที่ความเร็วรอบ 1.232 รอบต่อนาที ที่อัตราส่วนการลดขนาด 20% และ 30% แสดงในตารางที่ 5.19 และ 5.20 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.19 สรุปแรงอัดรีดที่ใช้สูงสุดและต่ำสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ ที่อัตราส่วนการลดขนาด $r_c = 20\%$

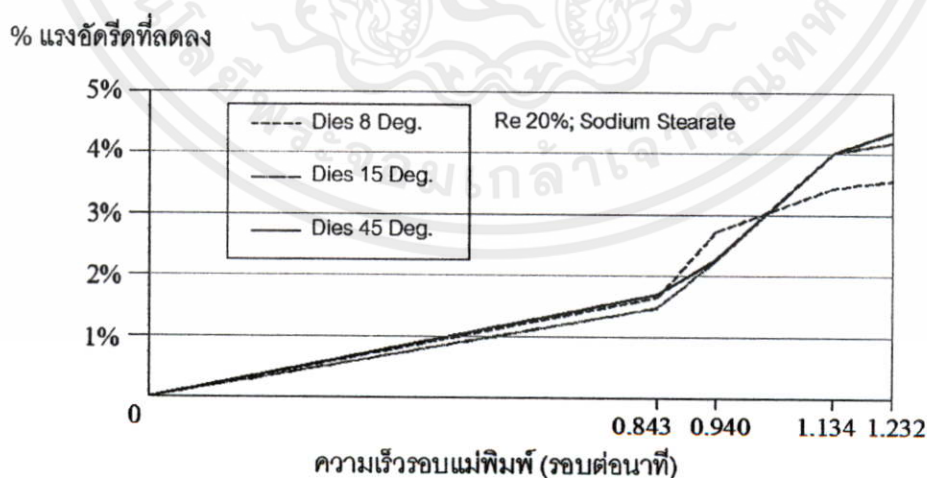
| สารหล่อลื่น | แรงอัดรีดที่ใช้สูงสุดและต่ำสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ (kN) | | | | | |
|--------------|---|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| | มุมแม่พิมพ์ 8 องศา | | มุมแม่พิมพ์ 15 องศา | | มุมแม่พิมพ์ 45 องศา | |
| | 0 rpm | 1.232rpm | 0 rpm | 1.232rpm | 0 rpm | 1.232rpm |
| Na-ST | 58.12 | 56.05 | 51.18 | 49.04 | 52.31 | 50.04 |
| น้ำมัน SAE40 | 75.44 | 72.01 | 66.59 | 63.62 | 68.64 | 65.62 |

ตารางที่ 5.20 สรุปแรงอัดรีดที่ใช้สูงสุดและต่ำสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ ที่อัตราส่วนการลดขนาด $r_c = 30\%$

| สารหล่อลื่น | แรงอัดรีดที่ใช้สูงสุดและต่ำสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ (kN) | | | | | |
|--------------|---|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| | มุมแม่พิมพ์ 8 องศา | | มุมแม่พิมพ์ 15 องศา | | มุมแม่พิมพ์ 45 องศา | |
| | 0 rpm | 1.232rpm | 0 rpm | 1.232rpm | 0 rpm | 1.232rpm |
| Na-ST | 76.21 | 73.32 | 67.32 | 64.63 | 69.30 | 66.50 |
| น้ำมัน SAE40 | 98.74 | 94.15 | 87.48 | 83.57 | 89.57 | 85.91 |

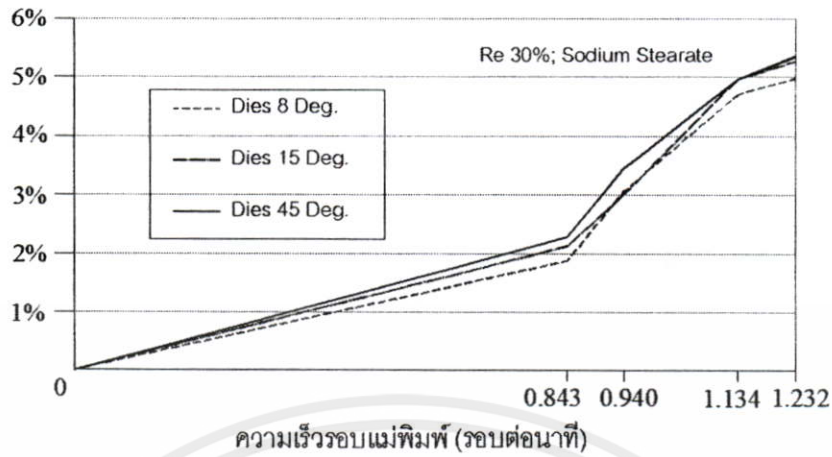
จากแรงอัดรีดแห่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองที่มีตัวแปรต่างกัน นำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์ที่ความเร็วรอบค่าต่างๆ เปรียบเทียบกับการอัดรีดที่ไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ แสดงตามรูปที่ 5.45 ถึง รูปที่ 5.48 จากรูปกราฟทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าแรงดันขึ้นรูปลดลงสูงสุด 5.35% โดยใช้แม่พิมพ์ขนาด 45 องศา สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต และความเร็วยรอบของแม่พิมพ์ 1.232 รอบต่อนาที

สาเหตุที่ทำให้แรงอัดรีดขึ้นรูปลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์นั้น เกิดจากแห่งอลูมิเนียมถูกแรงกระทำขึ้นรูปสองอย่างพร้อมกันคือแรงอัดและแรงบิด ทำให้เนื้อวัสดุอูมิเนียมถึงจุดครากด้วยแรงอัดที่น้อยกว่าการอัดรีดธรรมดาที่ไม่มีการหมุนของแม่พิมพ์ที่มีแต่แรงอัดเพียงอย่างเดียว โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของแม่พิมพ์และชิ้นงาน และการเพิ่มความเร็วยรอบของแม่พิมพ์นั้นเป็นการเพิ่มแรงบิดในแห่งอลูมิเนียมเช่นกัน



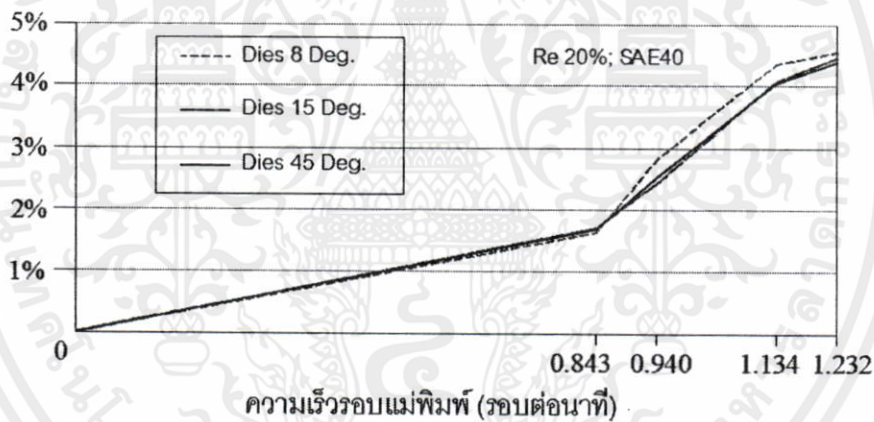
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.45 แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ไม่หมุน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อัดทั้งหมดให้ดูแปลงบนหัว และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ที่ $r_c = 20\%$ ใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต

% แรงอัดรีดที่ลดลง



รูปที่ 5.46 แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ไม่หมุน
ที่ $r_c = 30\%$ ใช้สารหล่อลื่น โซเดียมสเตียเรท

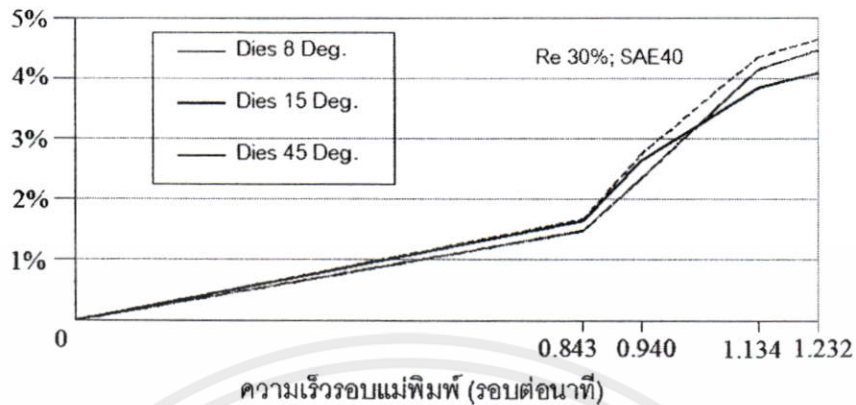
% แรงอัดรีดที่ลดลง



รูปที่ 5.47 แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ไม่หมุน
ที่ $r_c = 20\%$ ใช้สารหล่อลื่น SAE40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% แรงอัดรีดที่ลดลง



รูปที่ 5.48 แรงอัดรีดที่ลดลงเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ไม่หมุน ที่ $r_e = 30\%$ ใช้สารหล่อลื่น SAE40

5.3.3 ผลของความแข็งของชิ้นงานจากการทดลอง

สรุปผลของความแข็งที่ผิวของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการอัดรีด จะมีค่าต่ำสุดเมื่ออัดรีดผ่านแม่พิมพ์ที่ไม่มี การหมุนและความแข็งที่ได้จะมีค่าสูงสุดจากการหมุนแม่พิมพ์ที่ความเร็วรอบ 1.232 รอบต่อนาที ที่อัตราส่วนการลดขนาด 20% และ 30% แสดงในตารางที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.21 สรุปความแข็งที่ผิวต่ำสุดและสูงสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ ที่อัตราส่วนการลดขนาด $r_e = 20\%$

| สารหล่อลื่น | ความแข็งที่ผิวต่ำสุดและสูงสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ (HV) | | | | | |
|--------------|---|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| | มุมแม่พิมพ์ 8 องศา | | มุมแม่พิมพ์ 15 องศา | | มุมแม่พิมพ์ 45 องศา | |
| | 0 rpm | 1.232rpm | 0 rpm | 1.232rpm | 0 rpm | 1.232rpm |
| Na-ST | 100.7 | 125.1 | 95.9 | 119.1 | 97.8 | 121.5 |
| น้ำมัน SAE40 | 129.2 | 171.8 | 112.4 | 137.0 | 125.5 | 166.9 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.22 สรุปความแข็งที่ผิวต่ำสุดและสูงสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบของแม่พิมพ์
ที่อัตราส่วนการลดขนาด $r_c = 30\%$

| สารหล่อลื่น | ความแข็งที่ผิวต่ำสุดและสูงสุดตามขนาดมุมและความเร็วรอบของแม่พิมพ์ (HV) | | | | | |
|-------------|--|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|
| | มุมแม่พิมพ์ 8 องศา | | มุมแม่พิมพ์ 15 องศา | | มุมแม่พิมพ์ 45 องศา | |
| | 0 rpm | 1.232rpm | 0 rpm | 1.232rpm | 0 rpm | 1.232rpm |
| Na-ST | 129.2 | 167.9 | 102.0 | 125.8 | 125.5 | 163.1 |
| น้ำมันSAE40 | 129.1 | 173.7 | 123.0 | 151.7 | 125.6 | 168.7 |

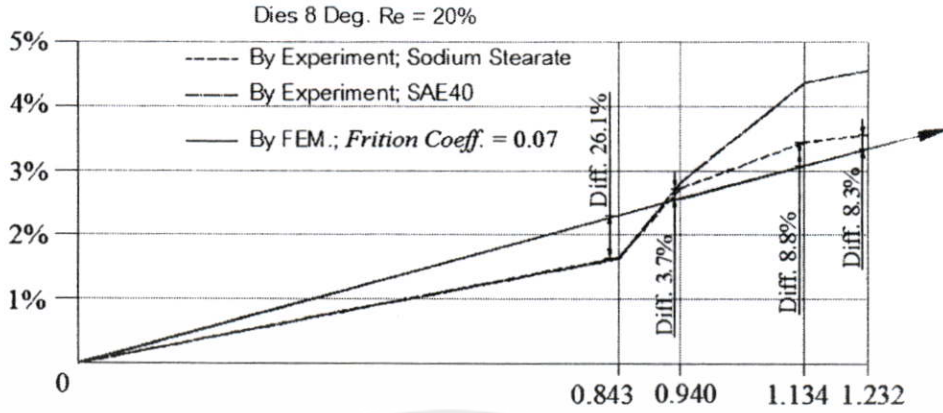
สาเหตุที่ทำให้ความแข็งที่ผิวลูมิเนียมเพิ่มขึ้น เมื่อมีการอัดรีดลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์ที่มีการหมุนนั้น เนื่องจากแท่งชิ้นงานลูมิเนียมถูกแรงบิดกระทำในระหว่างการอัดรีด ทำให้เกิดความเค้นบิดขึ้นในชิ้นงานและความเค้นบิดนี้ยังเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ด้วย โดยเมื่อชิ้นงานถูกอัดรีดไหลผ่านแม่พิมพ์แล้วที่ผิวชิ้นงานยังคงมีความเค้นตกค้างจากแรงบิดดังกล่าว ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งจึงทำให้ค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้ทำให้ความแข็งที่บริเวณแกนกลางแท่งลูมิเนียมเพิ่มขึ้น เพราะแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากแรงเสียดทานที่ผิวชิ้นงานและแม่พิมพ์

5.3.4 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อนำผลของแรงที่ใช้ในการอัดรีดแท่งลูมิเนียมที่ได้จากการทดลอง และจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกันแล้วพบว่า แรงอัดรีดที่ใช้จะมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์ที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น โดยหากเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงอัดรีดที่ลดลงระหว่างการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ตามรูปที่ 5.49 ซึ่งเป็นการทดลองที่ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 8 องศา อัตราส่วนการลดขนาด 20% ได้แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบ 0.940 รอบต่อนาที ผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยมีผลแตกต่างกัน 3.7% ซึ่งการทดลองใช้สารหล่อลื่นโซเดียมสเตียเรต และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.07 ในการวิเคราะห์ และตามรูปที่ 5.50 เป็นการทดลองที่ขนาดมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา อัตราส่วนการลดขนาด 20% ผลจากการทดลองและผลจากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยมีผลแตกต่างกัน 7.7% ซึ่งการทดลองใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.07 ในการวิเคราะห์ ที่ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ 0.940 รอบต่อนาที เช่นเดียวกันกับรูปที่ 5.49

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ ห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง

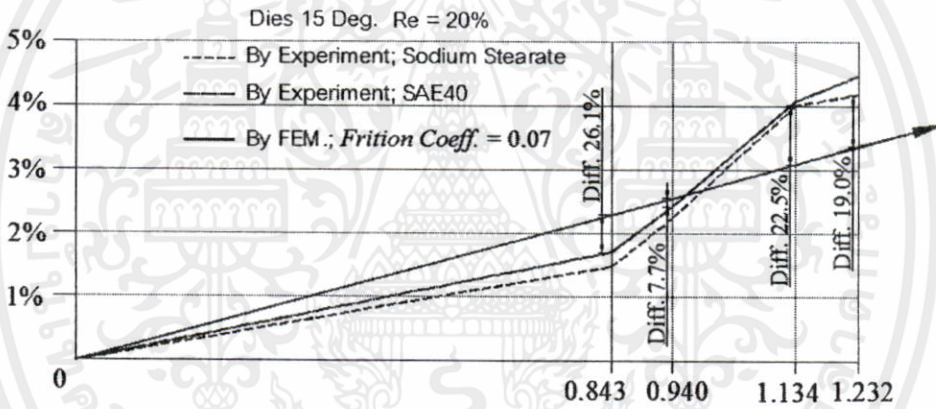
% แรงอัดรีดที่ลดลง



ความเร็วรอบแม่พิมพ์ (รอบต่อนาที)

รูปที่ 5.49 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของแรงอัดรีดที่ลดลงตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์

% แรงอัดรีดที่ลดลง



ความเร็วรอบแม่พิมพ์ (รอบต่อนาที)

รูปที่ 5.50 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของแรงอัดรีดที่ลดลงตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในเรื่อง การอัดรีดของแท่งอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์หมุน โดยในการอัดรีดที่ใช้ในการทดลองเป็นการอัดรีดแบบดันไปด้านหน้า (Forward or direct extrusion) ที่อุณหภูมิห้อง ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 4 ตัวแปรดังนี้ ขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 3 ขนาดคือ 8, 15 และ 45 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วในการอัดรีด 10 มิลลิเมตรต่อนาที โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองจริงในห้องทดลอง และการจำลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการทดลองในห้องทดลองใช้ความเร็วรอบของแม่พิมพ์หมุนจำนวน 5 ค่าคือ 0, 0.843, 0.940, 1.134 และ 1.232 รอบต่อนาทีสภาวะสารหล่อลื่นใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็ง คือโซเดียมสเตียเรต และ สารหล่อลื่นแบบเหลวคือ น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ส่วนการจำลองและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ความเร็วรอบ 5 ค่า คือ 0, 0.940, 1.232, 9.549 และ 47.746 รอบต่อนาที สภาวะการหล่อลื่นใช้การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็น 0.07 และ 0.3 ซึ่งภายหลังจากการทดลองการอัดรีดในห้องทดลองจากตัวแปรดังกล่าวแล้ว ทำการศึกษาหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับแท่งอลูมิเนียม คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นขณะอัดรีด และความแข็งของแท่งอลูมิเนียมเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ต่างกันที่การวัดความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้การวัดความเค้นตกค้างเป็นตัวศึกษาเปรียบเทียบ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในห้องทดลองและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ในส่วนของการแรงและความเค้นที่ใช้ในการอัดรีด ได้ผลการทดลองและวิเคราะห์เป็นไปในทิศทางเดียวกันซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้คือ แรงที่ใช้อัดรีดลดลงเมื่อใช้การอัดรีดที่มีการหมุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่หมุน และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของแม่พิมพ์มากขึ้นแรงดันก็ลดลงมากขึ้นตามไปด้วย

ในสภาวะการหล่อลื่นในกระบวนการอัดรีดที่ต่างกันจะใช้แรงอัดรีดต่างกันด้วย โดยการทดลองที่ใช้สารหล่อลื่นใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็งคือผงโซเดียมสเตียเรตจะใช้แรงอัดรีดน้อยกว่าการใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE40 ซึ่งเป็นเพราะสารหล่อลื่นแบบแข็งเมื่อถูกแรงดันจากการอัดรีดแล้วไม่สามารถสร้างแรงดันสถิต (Hydrostatic Pressure) ได้เหมือนกับการใช้สารหล่อลื่นแบบของเหลว กล่าวคือสารหล่อลื่นแบบของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความดันที่สูง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่ามากขึ้นหรือเรียกได้อีกอย่างว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับความดันตาม

สมการของ Roland [13] ซึ่งแรงดันสถิตนี้เป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดแรงดันภายในเบ้าประคองและแม่พิมพ์ ทำให้เกิดแรงต้านการอัดรีดมากขึ้นตามไปด้วย

ในส่วนของภาวะวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้มีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจำนวน 2 ค่าคือ 0.07 และ 0.3 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่มีค่าน้อยกว่าหมายถึงมีสภาพการหล่อลื่นในกระบวนการอัดรีดที่มากกว่าการทดลองที่มีการใช้ไม่มีการหล่อลื่น โดยผลการทดสอบปรากฏว่าเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.07 จะใช้แรงอัดรีดน้อยกว่าเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.3

วัตถุประสงค์หนึ่งของงานวิจัยครั้งนี้คือ พิจารณาค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในแท่งอลูมิเนียมหลังจากกระบวนการอัดรีด โดยในส่วนของผลการทดลองจริงได้พิจารณาจากค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่เปลี่ยนไป โดยได้ข้อสรุปว่าแท่งอลูมิเนียมเมื่อผ่านกระบวนการอัดรีดแล้วจะมีค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อมีการใช้การหมุนของแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดรีดแล้ว ค่าความแข็งก็เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งมีการเพิ่มขึ้นแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการเพิ่มเนื่องจากการอัดตัวของวัสดุภายในเบ้าประคอง ส่วนที่สองเป็นการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการอัดตัวของวัสดุและการเลื่อนเนื่องจากความเสียดทานขณะที่วัสดุไหลผ่านแม่พิมพ์และเบ้าประคอง โดยที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม คือเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นบริเวณขอบของแท่งอลูมิเนียมและลึกเข้าไปในผิวของแท่งอลูมิเนียม 10-20 เปอร์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้น เนื่องจากบริเวณขอบจนถึงผิวของแท่งอลูมิเนียมเกิดแรงเลื่อนขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานขณะไหลผ่านเบ้าประคองและยังเกิดการอัดตัวอีกครั้งขณะบีบตัวไหลผ่านแม่พิมพ์ ทำให้บริเวณขอบเกิดความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมาก ความเครียดนี้ส่งผลต่อค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง และแรงเลื่อนภายในชิ้นงานที่เกิดขึ้นบริเวณแม่พิมพ์นี้จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่มากขึ้นด้วย จากการทดลองของ Petruska และ Janicek [14] เป็นการหาความสัมพันธ์ของความเครียดและความแข็งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่เกิดขึ้นจากการอัดรีดแบบเย็นของเหล็ก ผลที่ได้คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างความเครียดจะมีค่ามากขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งของเหล็กมีค่ามากขึ้นตาม แต่เมื่อทำการอัดรีดที่ขนาดครึ่งมุมแม่พิมพ์ต่างกันอัตราส่วนการลดขนาดที่เท่ากัน ความแข็งที่วัดได้บริเวณขอบของแท่งอลูมิเนียมมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงสถานะสารหล่อลื่นให้ต่างกันขณะทำการทดลอง การใช้โซเดียมสเตียเรตเป็นสารหล่อลื่น จะให้ค่าความแข็งที่ผิวน้อยกว่าการใช้สารหล่อลื่นแบบของเหลวคือน้ำมันหล่อลื่น SAE40

เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความเค้นตกค้างจากการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้ทราบว่าไม่่ว่ากรณีใดๆ ทางต้นสังกัดทางานให้คิดแถมเงินค่า และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณาไปใช้ ชิ้นงานหลังจากผ่านการอัดรีดแล้วมีความเค้นตกค้างอยู่ที่ผิวทุกเงื่อนไขที่ทำการวิเคราะห์ โดย

สอดคล้องกับการทดลองจริงกล่าวคือ เมื่อมีการใช้การหมุนของแม่พิมพ์ในกระบวนการอัดรีดแล้ว ค่าความเค้นตกค้างก็เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้น

ในส่วนของค่าครีงมุมของแม่พิมพ์ ผลของขนาดครีงมุมของแม่พิมพ์ก็มีผลต่อแรงอัดรีดเช่นกัน โดยที่ขนาดครีงมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา จะใช้แรงอัดรีดน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่มีค่าครีงมุม 8 องศา และ 45 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองของ Noorani และคณะ [9] พบว่าแรงที่ใช้ในการอัดรีดโดยวิธีการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ครีงมุมแม่พิมพ์ที่ให้ค่าแรงน้อยสุดในการอัดรีดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน มีค่าเท่ากับ 30 องศา ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำนายค่าแรงและความเค้นที่ใช้ในการอัดรีด เพื่อให้ได้โลหะเกิดการไหลและเปลี่ยนแปลงรูปทรงตามที่ต้องการ เนื่องจากในความจริงมักมีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดขึ้นจากผลของความเสียดทานเป็นส่วนมาก จึงเป็นการยากที่จะทำนายแรงหรือภาระที่ต้องการในการขึ้นรูปได้อย่างแม่นยำ จากงานวิจัยนี้ผลของแรงและความเค้นที่ได้จากการทดลองมีค่าไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เพราะเครื่องทดสอบที่จัดสร้างขึ้นนั้นมีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในตัวเครื่องทดสอบเองโดยไม่สามารถหาค่าได้ จึงเป็นผลให้แรงในการอัดรีดที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าน้อยกว่าการทดลองจริง เนื่องจากการสูญเสียพลังงานจากความเสียดทานของเครื่องมือ

แม้ค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต่างกัน แต่สิ่งที่ได้จากการศึกษาและวิจัยครั้งนี้ ไม่ว่าจะเป็นการทดลองจริงหรือการจำลองในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ก็ได้ค่ายืนยันว่า เมื่อมีอัดรีดอลูมิเนียมผ่านแม่พิมพ์ที่มีการหมุน จะทำให้แรงอัดรีดลดลง และผลของคุณภาพผิวของอลูมิเนียมที่ได้เมื่อคู่ด้วยตาเปล่าไม่เกิดรอยหมุนบิดจากการหมุนของแม่พิมพ์ เรื่องคุณภาพของผิวชิ้นงานที่ได้ควรมีการศึกษาให้ละเอียดกว่านี้เช่น การวัดความหยาบผิวของชิ้นงานอลูมิเนียมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถที่จะศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเพื่อที่จะศึกษาวิเคราะห์ในเรื่องดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ธนิต แต่งศรี. 2546. “การศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมคาย ความเร็วและความดันของสารหล่อลื่นในการดึงลวดทองแดงโดยการทดลอง” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ทวี เทศเจริญ. 2535. การออกแบบเครื่องมือกล : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ทวี เทศเจริญ. 2543. กรรมวิธีการผลิต : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] William F. Hosford and Robert M. Caddell, **Metal forming Mechanics and metallurgy**, 2nd ed. Prentice Hall, 1993
- [5] B. Avitzur, **Metal Forming Processes and Analysis**, McGraw-Hill, New York, 1986
- [6] Edward M. Mielnik, **Metalworking Science and Engineering**, McGraw-Hill, New York, 1991, pp. 397-463.
- [7] J. Chakrabaty, **Theory of Plasticity**, McGraw-Hill, New York, 1987
- [8] J.S. Ajiboye and M.B. Adeyemi, “Effects of die land on the cold extrusion of lead alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, pp.248-436.
- [9] M. Noorani, and S.J. Hosseinipour, “Experimental and numerical study of optimal die profile in coldforward rod extrusion of aluminum”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, pp. 1572-1577.
- [10] S.O. Onuh, M. Ekoja, and M.B. Adeyemi, “Effect of die geometry and extrusion speed on the cold extrusion of aluminum and lead alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, pp.274-285.
- [11] M. Bakhshi, “A theoretical and experiment study of friction in metal forming by the used of the forward extrusion process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, pp. 369-374.
- [12] D. J. Horrobin and R. M. Nedderman, “Die entry pressure drops in paste extrusion”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 18, 1998, pp.3215-3225.

เอกสารนี้ [13] L. Roeland, “Transient non-Newtonian elasto-hydrodynamic lubrication analysis of an involute spur gear”, *Journal of wear*, 1997, pp.67-73. ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] J. Petruska and L. Janicek, "On the evaluation of strain inhomogeneity by hardness measurement of formed products", *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, pp.300-305.
- [15] X. Ma, M.R. Barnett and Y.H. Kim, "Forward Extrusion Through Steadily Rotating Conical Dies. Part I: Experiments." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, 2004, pp. 449-464.
- [16] X. Ma, M.R. Barnett and Y.H. Kim, "Forward Extrusion Through Steadily Rotating Conical Dies. Part II: Theoretical Analysis." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, 2004, pp. 465-489.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

prince of songkla university

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ขอเชิญเข้าร่วม
การประชุมวิชาการเครื่องจักรวิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 10
วันที่ 19-21 ตุลาคม 2548

Energy Technology and Management
Thermal Systems and Fluid Mechanics
Applied Mechanics, Materials and Manufacturing
Dynamic Systems, Robotics and Control
Aerospace and Marine Engineering
Computational and Simulation Techniques
Other Related Topics

Development of Prototype of Wood Dust Solid Fuel Press

สถานที่ติดต่อ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
โทรศัพท์ 0-7428-7035-6
โทรสาร 0-7421-2893

E-mail : me-nett@me.psu.ac.th เว็บไซต์ : http://www.me.psu.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ ก.1 หน้าปกวารสารทางวิชาการที่ลงตีพิมพ์บทความ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| สารบัญ | | |
|---|--|------|
| หมวด | ชื่อเรื่อง | หน้า |
| <u>Aerospace and Marine Engineering (AME)</u> | | |
| AME001 | The CFD Investigation of Airframe Components and their Interactions on Aerodynamics Characteristics of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) | 1 |
| AME002 | A Decentralized Approach for Multi-vehicle Coordination | 6 |
| AME003 | Wind Tunnel Test of Automatic Pitch Control of UAV by Dynamical Technique | 15 |
| AME004 | Flight Condition Measurement System for Aerodynamic Model Acquisition of UAV | 20 |
| AME006 | Study of Aircraft Design Problem Using Multivariate Optimization | 24 |
| AME007 | Influences of Figure of Merit In Aircraft Design | 30 |
| AME009 | Design of Adaptive PI Momentum-Wheel Controllers for Friction Compensation of a Satellite Simulator | 34 |
| <u>Applied Mechanics, Materials, and Manufacturing (AMM)</u> | | |
| AMM051 | Development and Improvement of the Prototype Rubber Recycling Machine | 262 |
| AMM052 | A Design and Construction of Melt Spinning Apparatus in Laboratory Scale | 267 |
| AMM055 | THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF SILK GRASPING MACHINE FOR HANDED CARPET WEAVING | 271 |
| AMM057 | The Influence of Ply Orientation of Woven Fiber on Material Damping in Fiber-Reinforced Composites | 277 |
| AMM059 | Filling and Solidification Simulation of Aluminium Casting Process | 283 |
| AMM061 | Machining State Determination and Remote Monitoring for Intelligent Machining Center | 288 |
| AMM063 | Heat generation of particle filled natural rubber components during cyclic deformation | 293 |
| AMM064 | Methyl Ester Production from Mixed Crude Palm Oil by Using Esterification – Transesterification Process | 301 |
| AMM068 | A Discussion on the Role Played by Velocity in Impact Mechanics | 305 |
| AMM069 | Experimental Observations of Two Extreme Impact Conditions | 311 |
| AMM071 | Effects of drilling forces on burr formation | 317 |
| AMM073 | Study of Effects of Filling Angle on Product Quality in Aluminium Casting | 322 |
| AMM074 | Optimum Design of Spur and Helical Gear Trains | 327 |
| AMM075 | Development of In-process cutting condition monitoring system for turning operation | 333 |
| AMM076 | Productivity, Strip Thickness, Roll Velocity and Pool Depth Relationships for Twin-roll Casting Process | 339 |
| AMM079 | Effect of Short-term Temperature Changes on Force Exerted by Super-Elastic Ni-Ti Alloy Orthodontic Closed Coil Spring | 342 |
| AMM081 | Case Study of Finite Element Method and Photoelasticity for Contact Mechanics Problems | 347 |
| AMM082 | Optimization of Process Parameters In Sheet Metal Forming Using FEM | 353 |
| AMM083 | A small scale palm oil pressing machine for farmer usage | 360 |
| AMM084 | Analysis of Forward extrusion through steady rotating dies by Finite Element Method | 366 |
| AMM085 | Aseptic fresh coconut juice machine | 372 |
| AMM086 | Parameter estimation of the brake disk using a floating caliper disk brake model with respect to low frequency squeal | 378 |

รูปที่ ก.2 สารบัญวารสารทางวิชาการที่ลงตีพิมพ์บทความ

การวิเคราะห์การดันขึ้นรูปไปด้านหน้าผ่านแม่พิมพ์หมุนกับที่ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Analysis of Forward extrusion through steadily rotating dies by Finite Element Method

อดิศักดิ์ ชนมิ¹ * ว.สมชัย นรเศรษฐโสภณ¹ ศ.คาซุนาริ โยชิเดะ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น

*E-mail: cadisak@hotmail.com

Adisak Chommi¹ * Assoc. Prof. Somchai Norrasethsophon¹ Prof. Kazunari Yoshida²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

² School of Engineering, Tokai University, Japan

*E-mail: cadisak@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ การดันขึ้นรูปไปด้านหน้าของเส้นลวดอลูมิเนียม AA6063 รูปทรงกระบอก ผ่านแม่พิมพ์รูปกรวยที่หมุนอยู่กับที่ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทำให้แม่พิมพ์หมุนนั้นแสดงให้เห็นว่าแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปลดลง และทำให้เกิดความเครียดเฉือนบิดในส่วนของแท่งบิลเล็ต โดยการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ครั้งนี้ ได้เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีจากการวิจัยที่ผ่านมา นอกจากนี้แรงที่ใช้ดันขึ้นรูปแล้วยังได้ศึกษาอิทธิพลจากตัวแปรอื่นด้วยคือ ครึ่งมุมของแม่พิมพ์ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ และสภาพการหล่อลื่น

คำหลัก การดันขึ้นรูป, แม่พิมพ์หมุน, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This paper presents forward extrusion of a cylindrical rod aluminum alloy AA6063 carried out through steadily rotating conical dies by finite element method. Die rotation was shown to decrease the extrusion load and impose a twist shear strain into the partially extruded billet. This study was compared with other method of other researchers. The influences of various process parameters on the extrusion load are also studied, including die semi-cone angle, die rotating speed and lubrication condition.

Keywords: Forward Extrusion, Rotating Dies, Finite Element

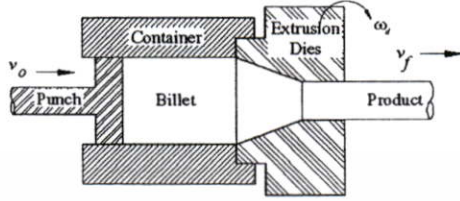
1. บทนำ

ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะนั้น ทฤษฎีพลาสติก ที่นำมาใช้มีอยู่หลายวิธี เช่น Slab Method, Exact Solution, Slip Line Theory, Upper Bound, Lower Bound, Hill's Method, Viscoplasticity, Finite Difference, Finite Element ซึ่งการจะเลือกใช้วิธีใดมาวิเคราะห์ ขึ้นอยู่

กับสถานะของการขึ้นรูป เช่น Slip Line Theory ใช้ได้กับปัญหาที่มีสภาวะความเครียดตามแนวระนาบ (plane-strain) เท่านั้น Upper Bound Method ไม่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบทางอุณหภูมิ จากการขึ้นรูปได้ เป็นต้น ในส่วนของ การดันขึ้นรูปหรือการอัดรีดขึ้นรูปนั้น เป็นการขึ้นรูปขึ้นพื้นฐาน ให้ได้ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแนวตรงยาว และมีรูปร่างของหน้าตัดตามแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูป วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปหรือที่เรียกว่าบิลเล็ต (billet) จะถูกแรงกระทำให้ไหลผ่านแม่พิมพ์แบบเปิด (open dies) ซึ่งมีแม่พิมพ์ (container) เป็นตัวประอบบิลเล็ตก่อนเข้าแม่พิมพ์ ตามที่แสดงในรูปที่ 1 โดยมีตัวแปรหนึ่งที่สำคัญคือ อัตราส่วนการดันขึ้นรูป (reduction ratio) มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ได้ต่อพื้นที่หน้าตัดของบิลเล็ต ซึ่งเป็นตัวแปรที่กำหนดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป เมื่ออัตราส่วนการขึ้นรูปมีค่าสูง แรงดันก็จะสูงตามด้วย แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงาน และเครื่องมือก็เป็นตัวกำหนดแรงดันด้วยเช่นกัน ดังนั้นด้วยข้อจำกัดนี้จึงเป็นตัวจำกัดความยาวของแท่งบิลเล็ต การศึกษาวิจัยมากมายจึงมุ่งเน้นไปที่ความพยายามในการลดแรงดันที่ใช้ขึ้นรูป และจะเป็นการเพิ่มอัตราส่วนการขึ้นรูป และแท่งบิลเล็ตที่ยาวขึ้น อย่างเช่นการวิจัยการขึ้นรูปแบบไฮโดรสแตติก (hydrostatic extrusion) การใช้แม่พิมพ์ที่มีลักษณะเพียว (streamlined dies) และการหมุนของตัวกด (punch) หรือแม่พิมพ์ โดยบทความนี้เน้นไปที่การศึกษาการดันขึ้นรูปไปด้านหน้าของเส้นลวดอลูมิเนียมเบอร์ AA6063 ผ่านแม่พิมพ์รูปกรวยที่หมุนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาว่าการหมุนของแม่พิมพ์หรือตัวกด จะทำให้ลดแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปได้ เช่น Sergeev ได้ทำการทดลองการหมุนของตัวกดและแม่พิมพ์ โดยหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงานหาโดย Mikhailenko และ Sergeev ต่อมา การศึกษาวิจัยของ Loginov และ Burgin ได้รายงานผลการวิจัยถึง

ความเร็วเชิงมุมของแม่พิมพ์ที่มีผลต่อสภาพการหล่อลื่น ที่แตกต่างกัน ขณะที่ทิศทางการหมุน ก็ได้มีการวิจัยเช่นกัน โดย Bochniak และ Korble ได้ศึกษาการหมุนของแม่พิมพ์ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ลักษณะโครงสร้างของวัสดุ ขณะที่ Hodgson และ Kong ได้ทดลองโดยใช้การดันขึ้นรูปร่วมกับแรงบิดหมุน [1]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบเครื่องมือการดันขึ้นรูปไปด้านหน้าผ่านแม่พิมพ์หมุนกับที่

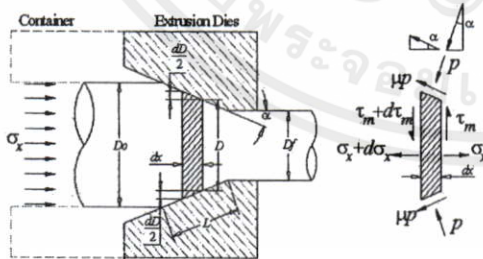
การศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นนี้ยืนยันว่า การหมุนของแม่พิมพ์ หรือตัวกด จะทำให้ลดแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปได้ อย่างไรก็ตามมี ปัญหาสำคัญที่ต้องศึกษาคือ ลักษณะการกระจายความเค้นของวัสดุใน แม่พิมพ์ที่หมุนระหว่างการขึ้นรูป และความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูป ค่าตอบของปัญหาเหล่านี้จะทำให้เข้าใจการขึ้น รูปที่มีการหมุนของแม่พิมพ์ได้ดียิ่งขึ้น และการวิเคราะห์ปัญหานี้ด้วยวิธี ไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถทำนายคำตอบนี้ได้ ซึ่งก็มีบางงานวิจัยที่ผ่านมา ได้ศึกษาถึงระดับโครงสร้างของวัสดุ (micro structure) เช่นกัน

2. การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

2.1 การวิเคราะห์แผนภาพสมดุลแรง (Freebody Equilibrium Approach)

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพสมดุลแรงที่เกิดขึ้นจากการดันขึ้นรูป ของ ชิ้นงานรูปกระบอกผ่านแม่พิมพ์ที่มีค่าครึ่งมุมของแม่พิมพ์ α สามารถ เขียนสมการสมดุลของแรงตามแนวแกน x ได้ตามสมการที่ (1)

$$\Sigma F = (\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 + p \left(\pi D \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = 0 \quad (1)$$



รูปที่ 2 แผนภาพสมดุลแรงในการดันขึ้นรูป

หากพิจารณาเทอมแรกของสมการมีค่าน้อย ไม่นำมาพิจารณา และกำหนดให้ τ คือความเค้นเฉือนเสียดทาน (friction shear stress) มีค่าเท่ากับ $m\bar{\sigma}/\sqrt{3}$ โดยที่ m คือ สัดส่วนความเค้นเฉือนคราก (frictional shear factor) และ $\bar{\sigma}$ คือความเค้นไหลเฉลี่ย (mean flow stress) แทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง D ด้วยรัศมี $2r$ และจัดรูปสมการ ใหม่ได้สมการที่ (2)

$$2r dr \sigma_x + r^2 d\sigma_x + 2pr dr + \frac{2r dr \tau}{\tan \alpha} = 0 \quad (2)$$

ในกรณีเดียวกันสำหรับแรงตามแนวเส้นรอบวง สามารถเขียน สมการสมดุลของแรงได้ว่า

$$\Sigma F_r = \sigma_r (\pi D dx) + \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha - \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = 0 \quad (3)$$

โดยที่ σ_r คือ die-breaking stress

$$\sigma_r = -p(1 - \mu \tan \alpha) \quad (4)$$

เมื่อรวมสมการที่ (2) และ (3) เข้าด้วยกันด้วยเงื่อนไข yield criterion และกำหนดให้ $B = \mu \cot \alpha$ แล้วอินทิเกรตได้สมการความเค้นเฉลี่ยที่ใช้ดันขึ้นรูป $\bar{\sigma}_x$ คือ

$$\frac{\bar{\sigma}_x}{\bar{\sigma}} = \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad (5)$$

D_0 และ D_f คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนและ หลังการดันขึ้นรูปตามลำดับ

2.2 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีขอบเขตบน (Upper Bound Approach)

การวิเคราะห์การขึ้นรูปด้วยทฤษฎีขอบเขตบน เป็นการวิเคราะห์ ทาพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยที่สุด ซึ่ง ผศ.ดร.อำไพศักดิ์ และคณะ [2] ได้ให้สมการสำหรับวิเคราะห์การดันขึ้นรูปด้วยทฤษฎีขอบเขตบนคือ

$$\frac{\bar{\sigma}_x}{\bar{\sigma}} = \left(\frac{1}{R_0 U_i} \right) \left(\frac{m}{2} \overline{AB} + \overline{AD} + \overline{DF} + \overline{DF} + \overline{AC} + \overline{DC} + \overline{DC} + \overline{CB} + \overline{CE} + \overline{FE} + \overline{FE} \right) \quad (6)$$

เมื่อ U_i คือ ความเร็วในแนวแกนที่ทางเข้าแม่พิมพ์

V^* คือ ความเร็วในแต่ละแนวระนาบการไหล ตามรูปที่ 3

และ Avitzur [3] ได้ทำการแก้สมการจากทฤษฎีขอบเขตบนได้ สมการการดันขึ้นรูปตามสมการ (7)

$$\frac{\bar{\sigma}_x}{\bar{\sigma}} = -2f(\sigma) \ln \frac{R_0}{R_f} - \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cos \alpha + m(\cos \alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} + m \frac{L}{R_0} \right] \quad (7)$$

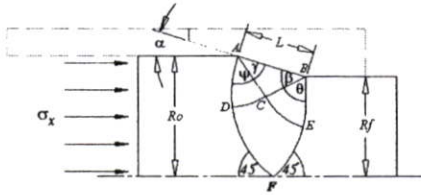
เมื่อ $\bar{\sigma}$ คือ ความเค้นไหลเฉลี่ยในสภาวะพลาสติกสมบูรณ์ (perfectly plastic) ซึ่งในกรณีนี้กำหนดให้ใช้ Von Mises yield criterion

m คือ สัดส่วนความเค้นเฉือน (frictional shear factor)

L คือ ความยาวของผิวสัมผัสแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f(\alpha)$ คือ ฟังก์ชันซึ่งขึ้นในเทอมของ $\sin^2 \alpha$ และ $\cos \alpha$ ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 1.666 สำหรับมุม α 30°, 40° และ 90° มีค่า $f(\alpha)$ คือ 1.000623, 1.0159 และ 1.0343 ตามลำดับ



รูปที่ 3 สนามเส้นเลื่อนไหลของการดันขึ้นรูป

2.3 การวิเคราะห์การดันขึ้นรูปในกรณีที่แม่พิมพ์หมุน ด้วยทฤษฎีขอบเขตบน

พลังงานรวมที่ใช้ในการดันขึ้นรูปจากทฤษฎีขอบเขตบนนั้นเขียนได้ว่า

$$J^* = \dot{W}_i + \dot{W}_f + \dot{W}_s \tag{8}$$

โดยที่ \dot{W}_i คือ งานที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation)

\dot{W}_f คือ งานที่เกิดจากแรงเสียดทาน

\dot{W}_s คือ งานสูญเสียจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วที่ผิว (discontinuity velocity)

X. Ma และ คณะ [4] ได้หาสมการพลังงานภายนอกที่ใช้ในการดันขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์หมุนได้ว่า

$$J^* = -\pi v_o R_o^2 \sigma_x - \frac{2\pi}{3\sqrt{3} \sin \alpha} m \sigma_o \omega_d h(R_o^3, R_f^3) \tag{9}$$

โดยเทอมแรกเป็นงานภายนอกจากการดันของตัวกด (punch)

ส่วนเทอมที่สองเป็นงานภายนอกจากการหมุนของแม่พิมพ์

เมื่อ v_o คือ ความเร็วในการดันขึ้นรูปหรือความเร็วของตัวกด

ω_d คือ ความเร็วเชิงมุมของแม่พิมพ์

$h(R_o^3, R_f^3)$ คือฟังก์ชันกำลัง 3 ที่เกิดจากการหมุนแม่พิมพ์

และส่งผ่านแรงบิดไปที่ชิ้นงานมีค่าตามสมการที่ (10)

$$h(R_o^3, R_f^3) = \left[\sqrt{X} - \left(\frac{b_1}{2} + \beta_1 R_f^3 \right) \sinh^{-1} \frac{2R^3}{\sqrt{4c_1 - b_1^2}} \right]_{R=R_o}^{R_o} \tag{10}$$

โดยที่

$$b_1 = -2\beta_1 R_f^3 \tag{11}$$

$$c_1 = \left(\beta_1 R_f^3 \right)^2 + \left(\frac{v_f R_f^2 \cos \alpha}{\omega_d} \right)^2 \tag{12}$$

$$X = R^6 + b_1 R^3 + c_1 \tag{13}$$

สมการที่ (8) พลังงานภายในจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างคือ

$$\dot{W}_i = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV \tag{14}$$

จากเอกสารอ้างอิง [4] ได้หาพลังงานภายในได้ตามสมการที่ (15)

$$\dot{W}_i = 2\pi \sigma_o R_o^2 v_o \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) f(\alpha, m_1) \tag{15}$$

ซึ่ง ฟังก์ชัน $f(\alpha, m_1)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่าที่เป็นบวกหรือลบตามสมการ

$$m_1 = \frac{1}{12} \left[\left(3\beta_1 \frac{\omega_d R_f^3}{v_o R_o^2 \sin \alpha} \right)^2 - 11 \right] \tag{16}$$

กรณีที่ค่า $m_1 = 0$ จะได้ค่า $f(\alpha, m_1)$ คือ

$$f(\alpha, m_1) = \frac{2(1 - \cos \alpha)}{\sin^2 \alpha} \tag{17}$$

งานที่เกิดจากแรงเสียดทาน \dot{W}_f เกิดขึ้นที่ผิวของแม่พิมพ์ หาได้จากกรณีอื่นที่เกรตแรงเสียดทานคู่กับความเร็ว ตลอดพื้นที่ผิวสัมผัสของแม่พิมพ์ได้ว่า

$$\dot{W}_f = \frac{2\pi}{3\sqrt{3} \sin \alpha} m \sigma_o v_o \frac{R_o^2}{R_f^2} g(U, R_f, R_o) \tag{18}$$

เมื่อ $g(U, R_f, R_o)$ คือฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกตามสมการ

$$g(U, R_f, R_o) = \left[\frac{b}{2\sqrt{a}} \sinh^{-1} \frac{2aR^3 + b}{\sqrt{4ac - b^2}} - \sqrt{c} \sinh^{-1} \frac{bR^3 + 2c}{R^3 \sqrt{4ac - b^2}} + U \right]_{R=R_f}^{R_o} \tag{19}$$

โดยที่

$$a = \frac{\omega_d^2}{v_f^2} \tag{20}$$

$$b = -2\beta_1 \frac{\omega_d^2 R_f^3}{v_f^2} \tag{21}$$

$$c = \left(R_f^2 \cos \alpha \right)^2 + \left(\frac{\beta_1 \omega_d}{v_f} \right)^2 R_f^6 \tag{22}$$

$$U = \sqrt{aR^6 + bR^3 + c} \tag{23}$$

เทอมสุดท้ายของสมการที่ (8) นั้นเป็นงานที่เกิดจากความไม่ต่อเนื่องของความเร็วที่ทางเข้าและทางออกของแม่พิมพ์ ทำให้เกิดแรงเฉือนสูญเสียภายในวัสดุ (internal shear force) ซึ่ง Avitzur [5] ได้หาสมการดังกล่าวคือ

$$\dot{W}_s = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sigma_o v_o R_o^2 \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \tag{24}$$

นำสมการที่ (9), (15), (18) และ (24) แทนลงในสมการที่ (8) ได้

$$\frac{\sigma_x}{\bar{\sigma}} = -2 \ln \left(\frac{R_o}{R_f} \right) f(\alpha, m_1) - \frac{2}{3\sqrt{3}} \frac{mg(U, R_f, R_o)}{R_f^2 \sin \alpha} - \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \frac{2}{3\sqrt{3} \sin \alpha} \frac{m \omega_d}{v_o R_o^2} h(R_o^3, R_f^3) \tag{25}$$

จากสมการที่ (10) เป็นต้นมาจะเห็นว่าตัวแปร β_1 คือ slippage parameter ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้หาสัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วเชิงมุม ของชิ้นงาน เทียบกับความเร็วเชิงมุมของแม่พิมพ์ตามสมการที่

$$\omega_f = \beta_1 \omega_d \left(\frac{R_f}{R} \right)^3 \tag{26}$$

โดยที่ ω_f คือความเร็วเชิงมุมชิ้นงานที่ตำแหน่งแม่พิมพ์ ซึ่งค่า β_1 หาได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสม (optimization procedure) ของสมการ (25) ซึ่งได้ค่าที่เหมาะสม คือ 0.3

2.4 สมการไฟไนต์อีลิเมนต์

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะเย็น (cold forming) วัสดุที่วิเคราะห์เป็นอีลิเมนต์นั้นเมื่ออยู่สองรูปแบบคือ Elastic-Plastic (E-P FEM) และ Rigid-Plastic (R-P FEM) การวิเคราะห์แบบ E-P นั้นจะวิเคราะห์วัสดุเป็นสองช่วงคือช่วงอีลาสติก ตามสมการ ที่ (27) และช่วงพลาสติกที่ใช้ขอบเขตจุดครากของ Von Mises ตามสมการ (28) ถึง (31)

$$d\epsilon_y^e = \frac{1+\nu}{E} \left(d\sigma_y - \frac{\nu}{1+\nu} \delta_y d\sigma_{xx} \right) \tag{27}$$

$$d\epsilon_y = d\epsilon_y^e + d\epsilon_y^p \tag{28}$$

$$d\epsilon_y^p = d\lambda \sigma_y' \tag{29}$$

$$\sigma_y' \sigma_y' = \frac{2}{3} \bar{\sigma}^2 \tag{30}$$

$$d\sigma_y = 2G \left[d\epsilon_y + \delta_y \frac{\nu}{1-2\nu} d\epsilon_{xx} - \sigma_y' \frac{\sigma_y' d\epsilon_{xx}}{S} \right] \tag{31}$$

ในส่วนของการวิเคราะห์แบบ R-P นั้นจะแบ่งวัสดุเป็นช่วงของวัสดุแข็งเกร็ง และช่วงพลาสติก ตามสมการที่ (32) ซึ่งจะเห็นว่า การวิเคราะห์แบบ E-P มีสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ซึ่งทำให้ใช้เวลาคำนวณ (computer time) สูง แต่ก็มีคอมพิวเตอร์ที่เร็วขึ้น สามารถวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง แรงดันกลับในวัสดุ (springback) ได้ ซึ่งจะไม่สามารถหาค่าได้หากใช้การวิเคราะห์ด้วยสมการของ R-P

$$\sigma_y = \frac{2}{3} \bar{\sigma} \epsilon_y^p \tag{32}$$

$\bar{\sigma} < \sigma_y \rightarrow$ rigid material, $\bar{\sigma} = \sigma_y \rightarrow$ plastic region

3. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์

ตารางที่ 1 เป็นคุณสมบัติของเส้นลวดอลูมิเนียม Al6063 ที่ใช้วิเคราะห์ขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรม MARC® ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้ เงื่อนไขและค่าที่แตกต่างกันในแต่ละกรณี จะถูกวิเคราะห์ด้วยเช่นกัน ได้แก่ ค่าครึ่งมุมของแม่พิมพ์ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ และสภาพการหล่อลื่น โดยวิเคราะห์ด้วยสมการแบบ E-P ที่ไม่คิดผลกระทบของอุณหภูมิ (isothermal)

ในการวิเคราะห์ จะวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์ในรูปแบบ 3 มิติ ที่มีลักษณะของชิ้นงานที่สมมาตรตามแนวแกน (axisymmetric) โดยวิเคราะห์ครึ่งหนึ่งของชิ้นงาน ถึงแม้ว่าในทางทฤษฎีแล้ว ปัญหาที่มีความสมมาตรตามแนวแกนจะสามารถวิเคราะห์เป็นรูปแบบ 2 มิติได้ [6] แต่การวิเคราะห์ครึ่งนี้จะมีแรงกระทำที่ผิวตามแนวเส้นรอบวง ตามที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน โดยในส่วนของความเค้นเฉือน τ_m ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งการขึ้นรูปปรกติจะไม่มีความเค้นเฉือนนี้

| | | | |
|---|-------|-----|----|
| Yield Stress, σ_y (MPa) | 130 | | |
| Modulus of Elasticity (GPa) | 67000 | | |
| Poisson's Ratio, ν | 0.34 | | |
| ความเร็วของการขึ้นรูป (mm/sec.) | 10 | | |
| ความยาวผิวสัมผัสแม่พิมพ์ = L/D_o (%) | 37 | | |
| Semi-Dies Angle (degree) | 8 | 15 | 45 |
| ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ (rpm.) | 0 | 1 | 5 |
| สภาพหล่อลื่น (friction coefficient, μ) | 0.07 | 0.3 | |

ตารางที่ 1 แสดงค่าสมบัติของวัสดุ และค่าที่ใช้ในแต่ละกรณี

ขั้นตอนเริ่มต้นจากการขึ้นรูปอีลิเมนต์ของชิ้นงาน โดยแบ่งออกเป็น 2550 อีลิเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยจุด 8 จุดของแต่ละอีลิเมนต์ เป็นอีลิเมนต์แบบ hexahedral ความยาวของเบ้าแม่พิมพ์ 20 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดบิลเล็ท 10 มิลลิเมตร

ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) นั้นได้กำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนตัว (fixed displacement) ที่แกนกลางของเส้นลวด และกำหนดให้แม่พิมพ์ และเบ้าของแม่พิมพ์ รวมถึงตัวกดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body)

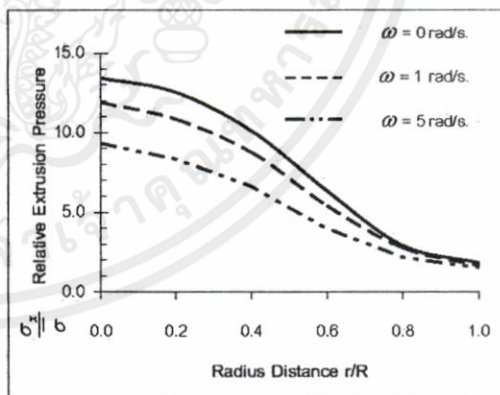
การวิเคราะห์ขอบเขตของจุดครากของวัสดุใช้ Von Mises yield criterion ซึ่งจะหาความเค้นไหลเฉลี่ย (mean flow stress) ได้จาก

$$\bar{\sigma} = 2k \tag{33}$$

$$k = \text{Shear Yield Stress} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \tag{34}$$

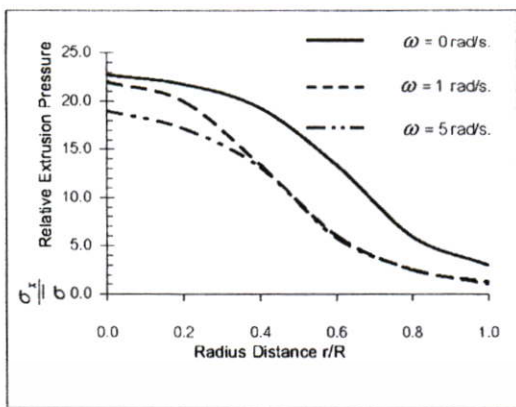
4. ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์

จากผลของการวิเคราะห์การขึ้นรูปด้วยไฟไนต์อีลิเมนต์ แรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ตามรูปที่ 4, 5 และ 6 เป็นการขึ้นรูปที่มีการหล่อลื่นขนาดครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 8, 15 และ 45 องศาตามลำดับ ที่มีความเร็วรอบต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันที่ใช้ในการขึ้นรูปเมื่อมีการหมุนของแม่พิมพ์โดยความเร็วรอบของแม่พิมพ์ที่เร็วกว่าจะลดแรงดันได้มากกว่า

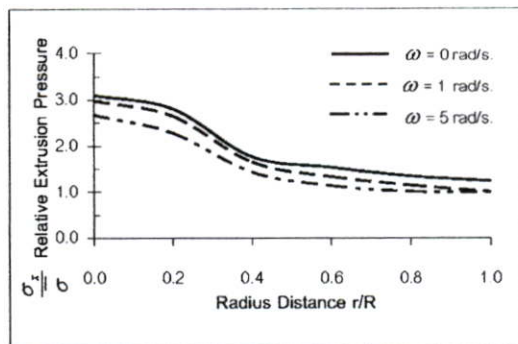


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่มุมแม่พิมพ์ 8 องศา ที่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.07$

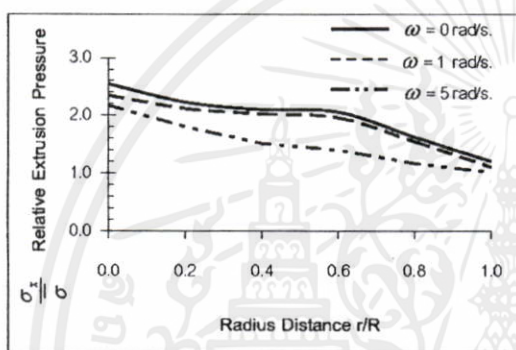
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



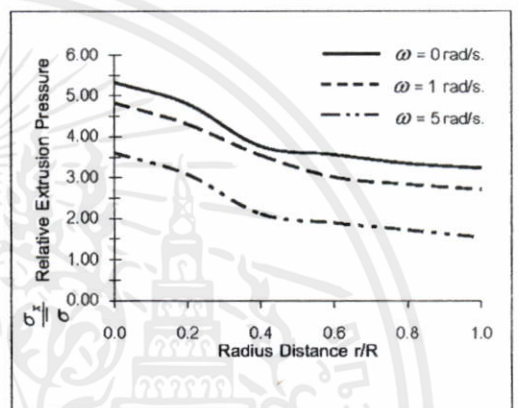
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่มุมแม่พิมพ์ 8 องศา ที่ไม่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.3$



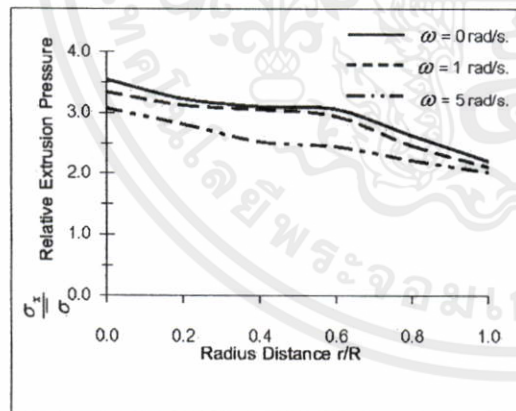
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่มุมแม่พิมพ์ 45 องศา ที่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.07$



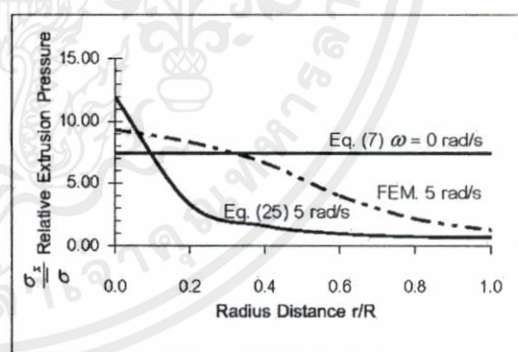
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่มุมแม่พิมพ์ 15 องศา ที่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.07$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่มุมแม่พิมพ์ 45 องศา ที่ไม่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.3$



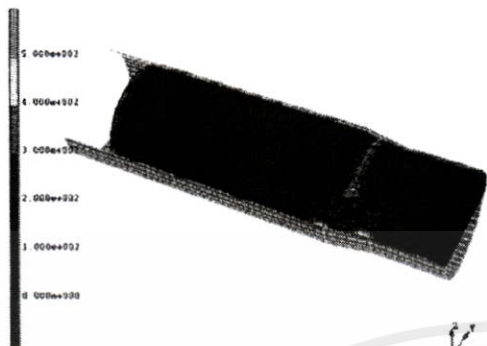
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่มุมแม่พิมพ์ 15 องศา ที่ไม่มีการหล่อลื่น $\mu = 0.3$



รูปที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความดันขึ้นรูปกับตำแหน่งตามระยะรัศมีของเส้นลวดอลูมิเนียมที่มุมแม่พิมพ์ 8 องศา $\mu = 0.07$ ความเร็วรอบแม่พิมพ์ 5 rad/s ด้วยวิธี FEM กับสมการที่ (7) และ (25)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า $\bar{\sigma}$ ที่ใช้ตามกราฟที่แสดงเป็นเป็นความเค้นเฉลี่ยเทียบเท่า ความเค้นของ Von Mises (equivalent mean Von Mises stress)



รูปที่ 11 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผิวของเส้นลวด $\omega = 0$ rad/s.



รูปที่ 12 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผิวของเส้นลวด $\omega = 1$ rad/s.



รูปที่ 13 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผิวของเส้นลวด $\omega = 5$ rad/s.

5. สรุป

จากผลการวิเคราะห์การดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์หมุนกับที่ด้วยวิธีไฟในตัดลิเมนต์ครั้งนี้สรุปได้ว่า แรงที่ไร้ด้นขึ้นรูปลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่หมุน และในสภาพที่มีการหล่อลื่นในกระบวนการดึงขึ้นรูปจะใช้แรงด้นน้อยกว่าที่ไม่มีการหล่อลื่น ในส่วนของค่าครึ่งมุมของแม่พิมพ์ 15 องศา จะใช้แรงด้นขึ้นรูปน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่มีค่าครึ่งมุม 8 องศา และ 45 องศา

จากผลการวิเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีของเขตบน ตามรูปที่ 10 แล้วจะได้ค่าที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

ตามรูปที่ 12 และ 13 เป็นการแสดงลักษณะการกระจายความเค้นเฉือนที่ผิวของเส้นลวดที่มีการหมุนของแม่พิมพ์ แสดงให้เห็นว่ามีมีการหมุนของแม่พิมพ์ จะทำให้เกิดความเค้นเฉือนที่ผิวที่ก่อให้เกิดเครียดเฉือนบิด จากบริเวณแม่พิมพ์เข้าไปถึงบริเวณบ่าแม่พิมพ์ ซึ่งต่างจากรูปที่ 11 ที่ไม่มีมีการหมุนของแม่พิมพ์ ซึ่งความเร็วรอบที่มากกว่า

อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ด้วยไฟในตัดลิเมนต์เพื่อทำนายการกระจายความเค้นภายในชิ้นงาน หรือการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของเขตบน ควรมีการทดลองจริงเพื่อดูแนวโน้มว่าเป็นไปในทางเดียวกันหรือไม่ นอกจากนั้นควรพัฒนาสมการจากทฤษฎีอื่นเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ เพื่อนำการวิเคราะห์นี้ไปใช้จริงในการปฏิบัติ และประยุกต์ใช้ได้กับการขึ้นรูปในงานอุตสาหกรรมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] X. Ma, M.R. Barnett and Y.H. Kim, "Forward Extrusion Through Steadily Rotating Conical Dies. Part I: Experiments." International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, 2004, pp. 449-464.

[2] อ่ำไพศักดิ์ ที่บุญมา ศิริศักดิ์ ทาญชูวงศ์ และ ชายู ฤกษ์งาน "การวิเคราะห์กระบวนการดึงขึ้นรูปและกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยทฤษฎีสถาปนเคลื่อนไหล" วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 11 ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2544 หน้า 33-39.

[3] E.M. Mielnik, Metal Working Science and Engineering, McGraw-Hill, 1991, pp. 409.

[4] X. Ma, M.R. Barnett and Y.H. Kim, "Forward Extrusion Through Steadily Rotating Conical Dies. Part II: Theoretical Analysis." International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 46, 2004, pp. 465-489.

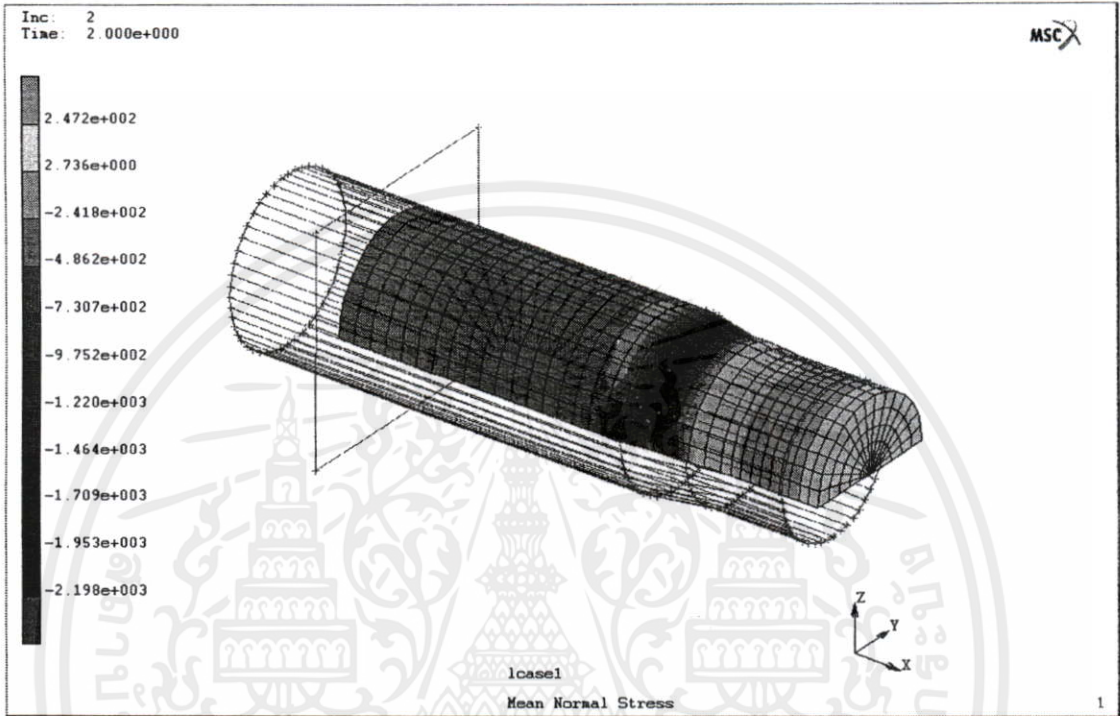
[5] B. Avitzur, Metal Forming: Process and Analysis, McGraw-Hill, 1968.

[6] T.R. Chandrupatla and A.D. Belegundu, Introduction to Finite Elements in Engineering, New Jersey, Prentice Hall, 1991, pp. 165-166.

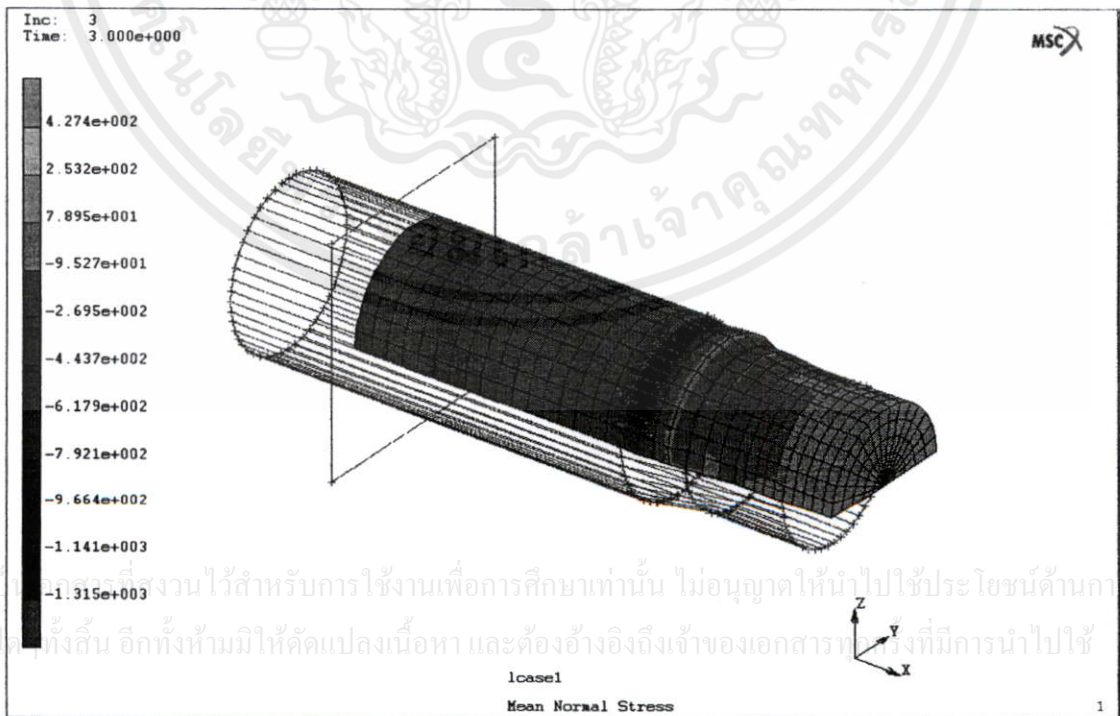
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ภาพการกระจายความเค้นในชิ้นงานจากการอัดรีดขึ้นรูป

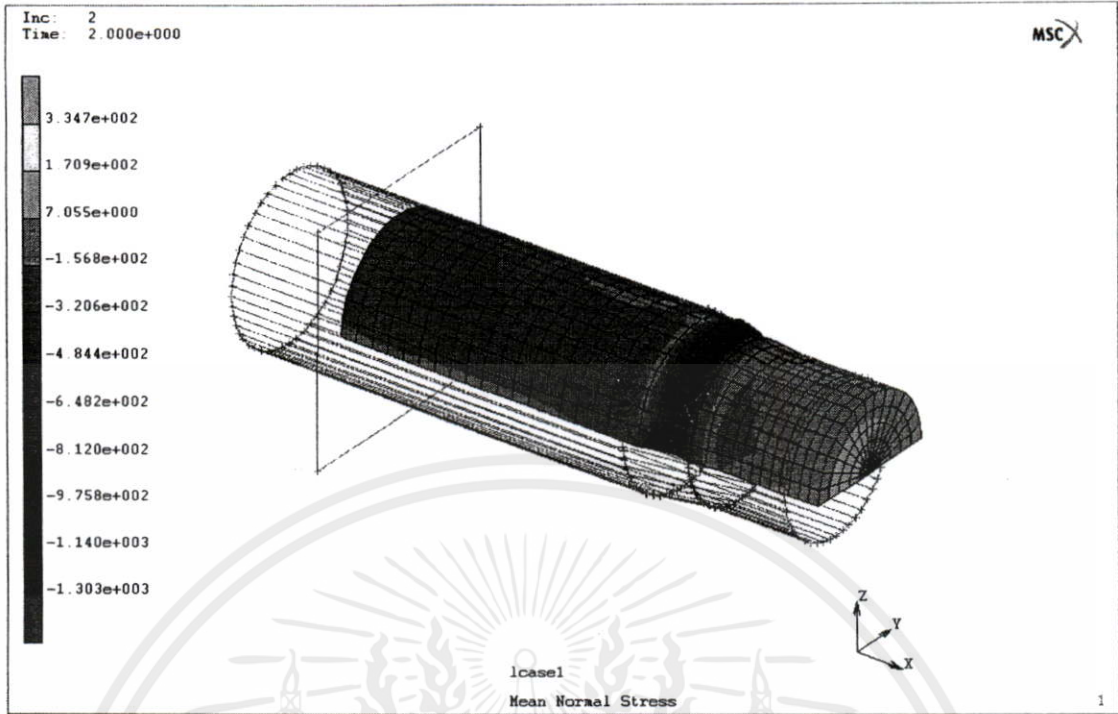


รูปที่ ข.1 ความเค้นขณะอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.07$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 0 rad/sec

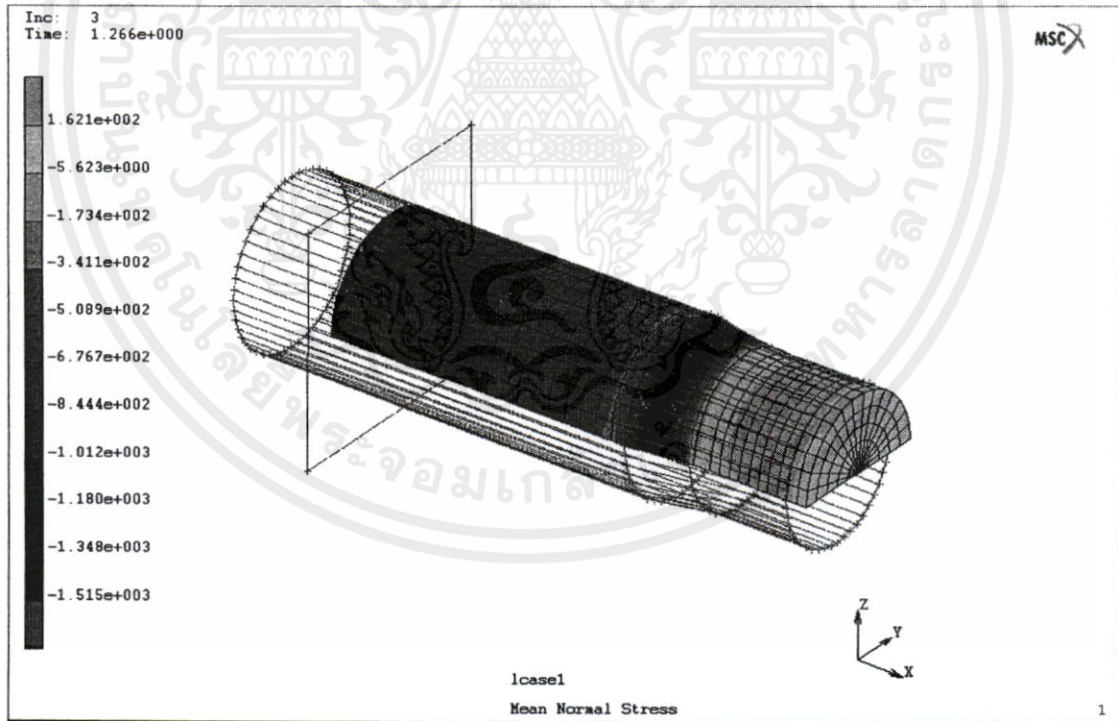


รูปที่ ข.2 ความเค้นขณะอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.07$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 1 rad/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

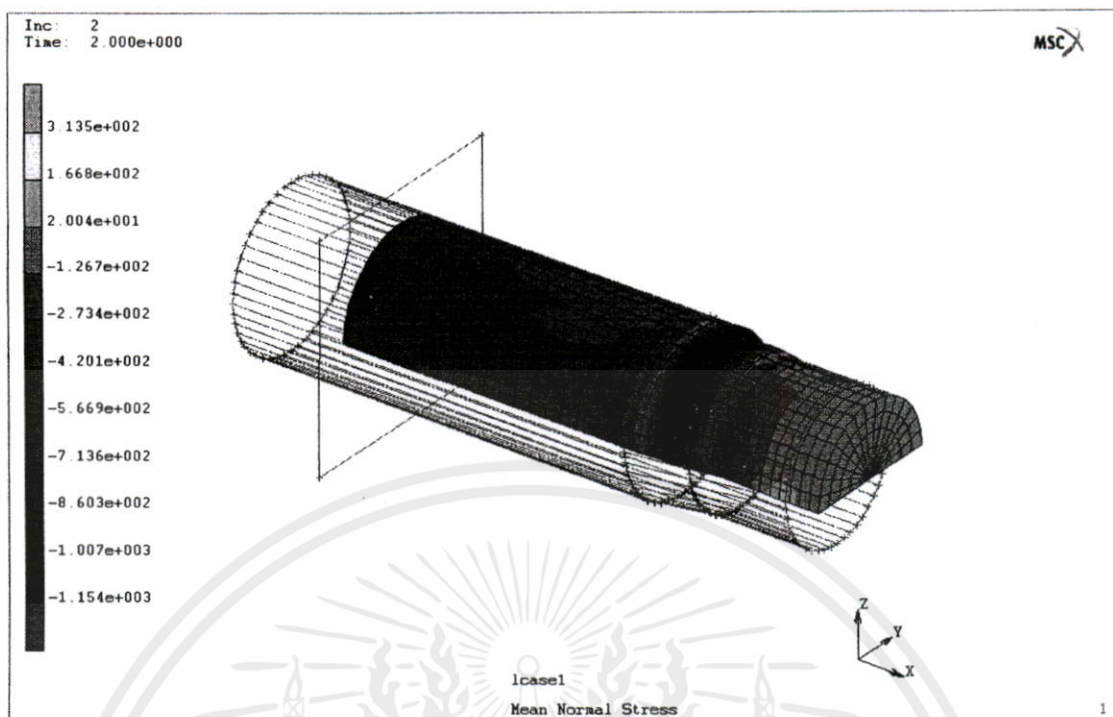


รูปที่ ข.3 ความเค้นขณะอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.07$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 5 rad/sec

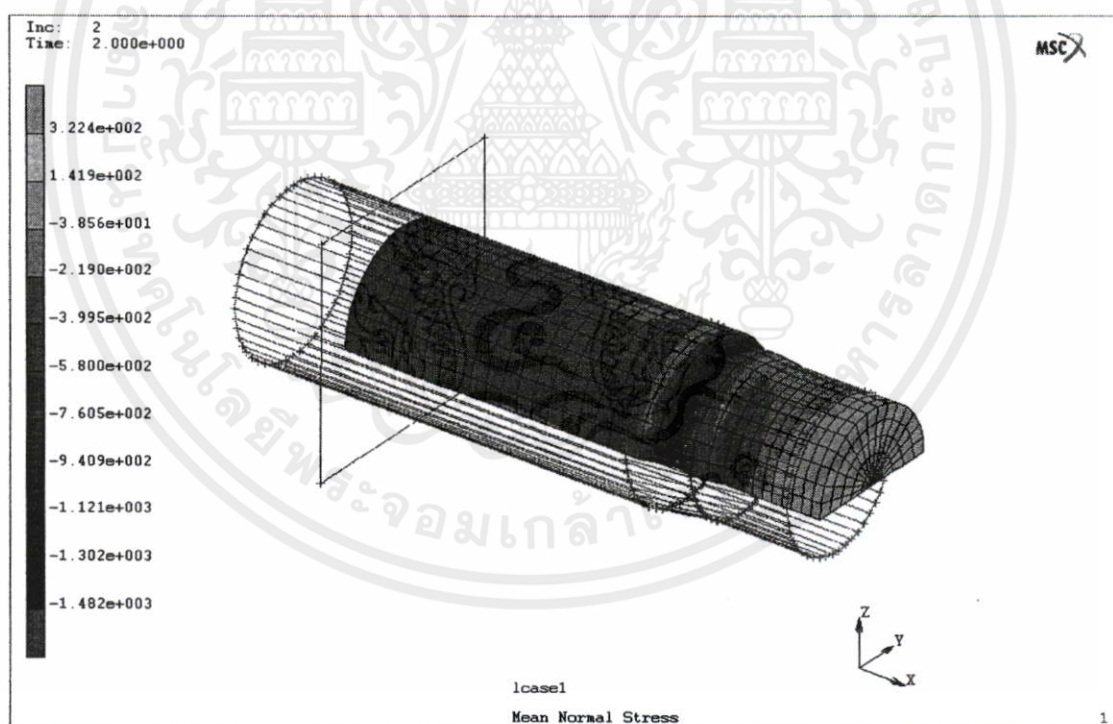


รูปที่ ข.4 ความเค้นขณะอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.3$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 0 rad/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

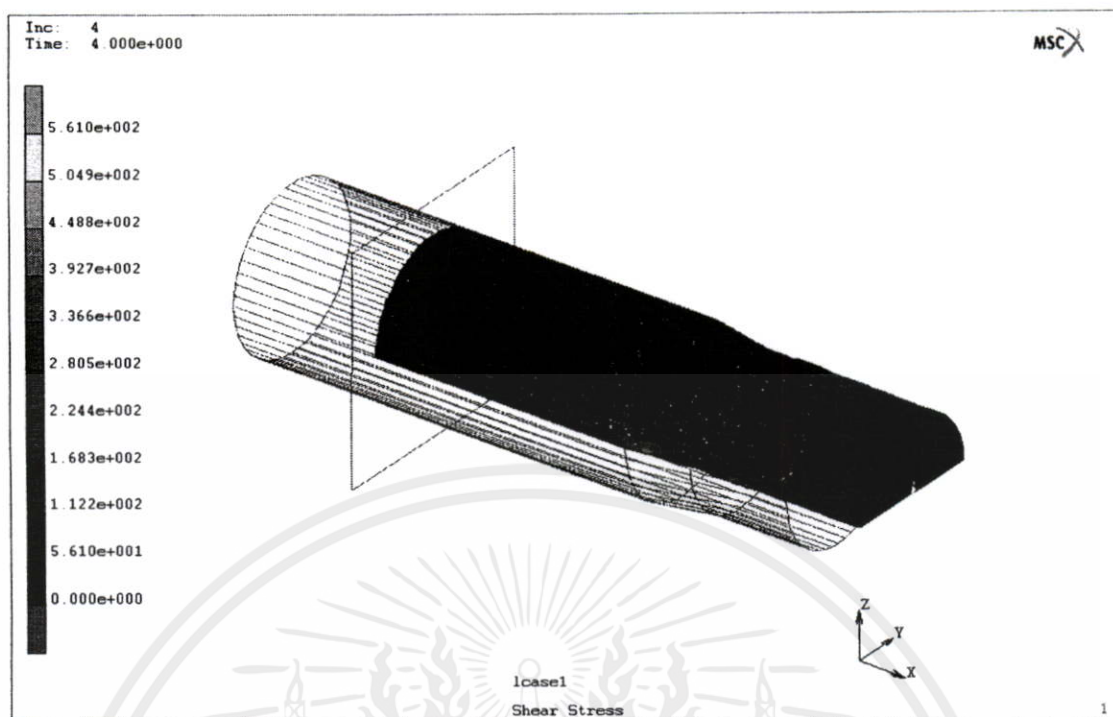


รูปที่ ข.5 ความเค้นขณะอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.3$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 1 rad/sec

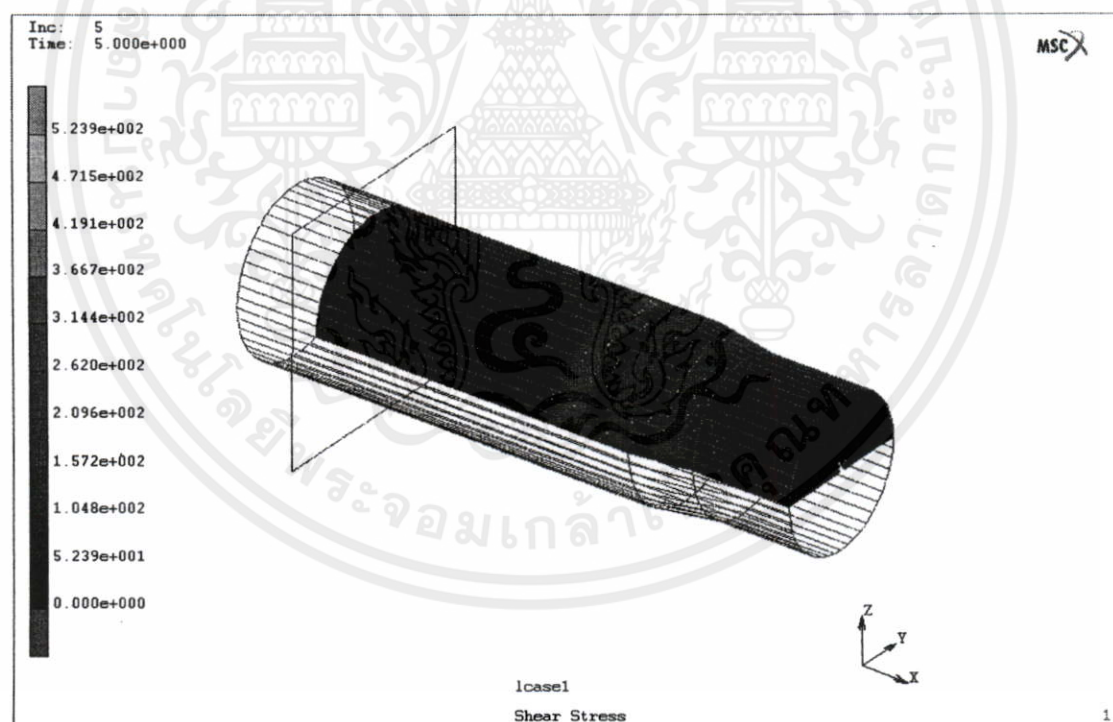


รูปที่ ข.6 ความเค้นขณะอัดรีดขึ้นรูปที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.3$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 5 rad/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

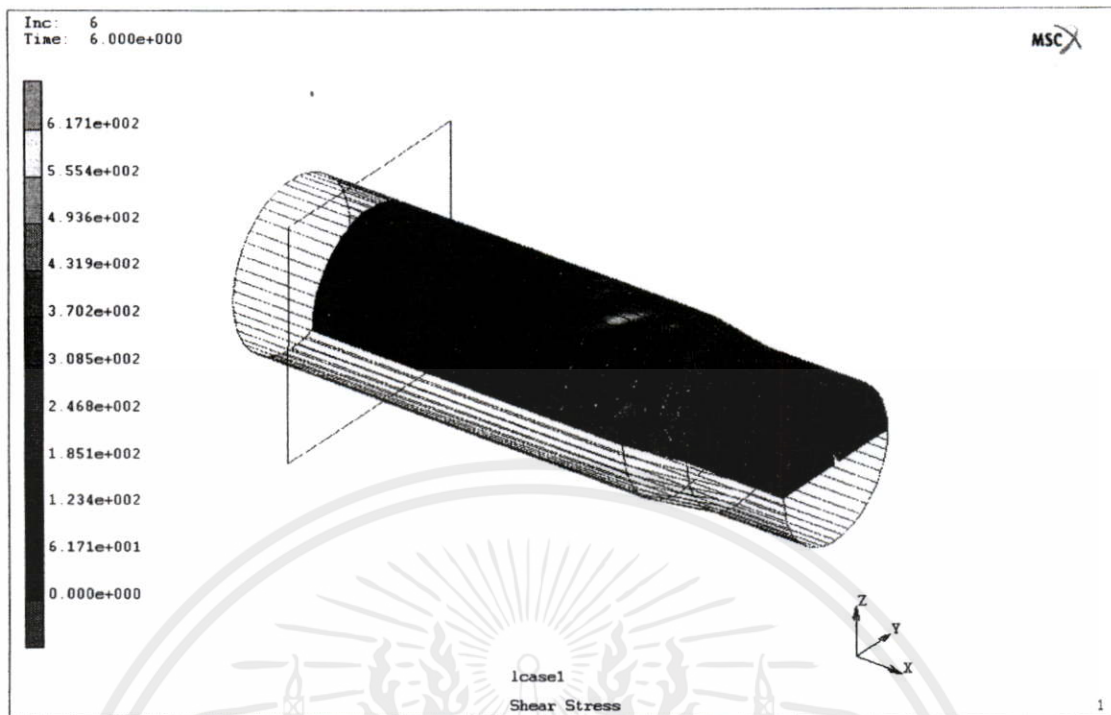


รูปที่ ข.7 ความเค้นเฉือนขณะอัตรัดที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.07$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 0 rad/sec

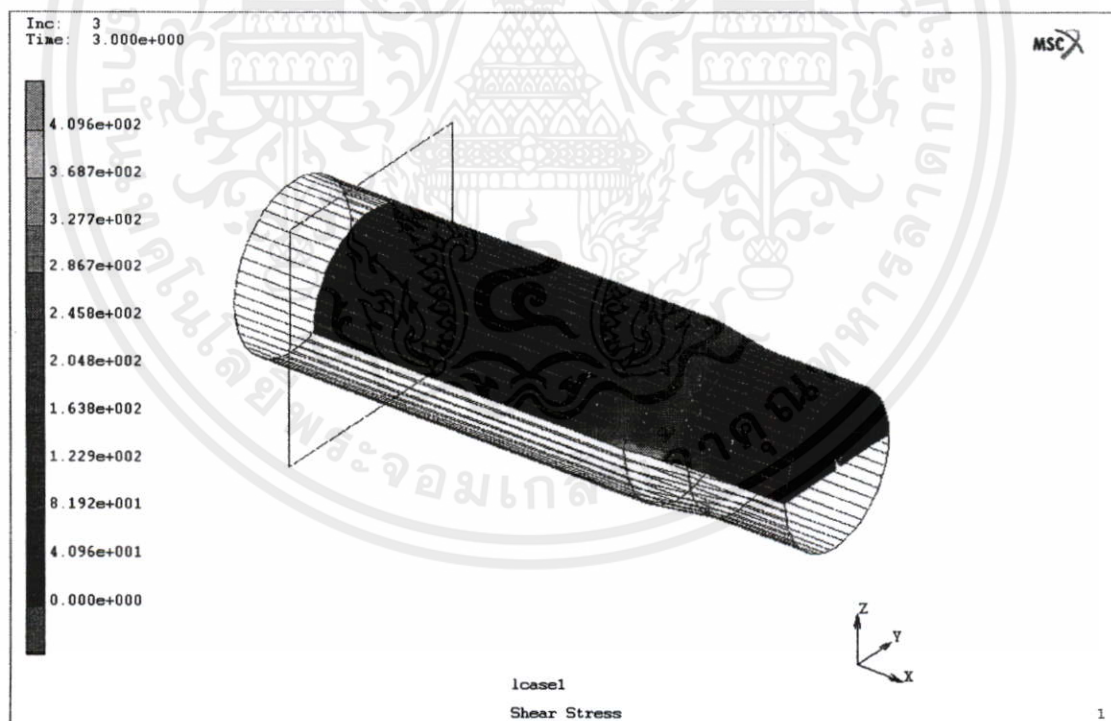


รูปที่ ข.8 ความเค้นเฉือนขณะอัตรัดที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.07$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 1 rad/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

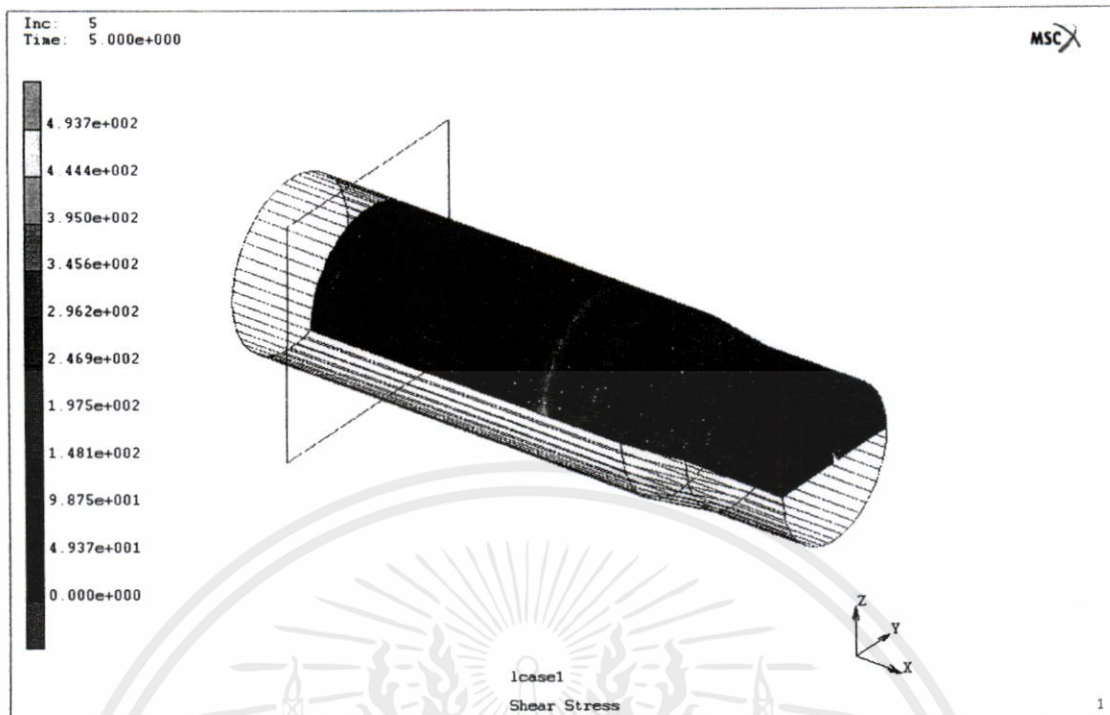


รูปที่ ข.9 ความเค้นเฉือนขณะอคริตที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.07$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 5 rad/sec

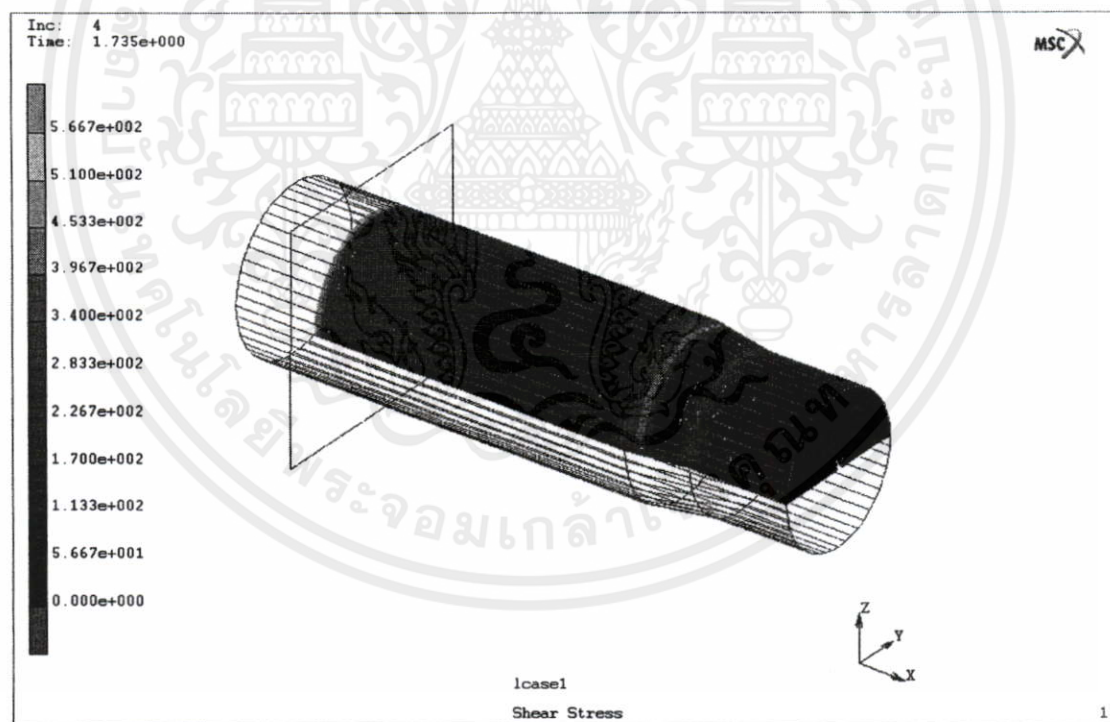


รูปที่ ข.10 ความเค้นเฉือนขณะอคริตที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.3$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 0 rad/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.11 ความเค้นเฉือนขณะอครีคที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.3$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 1 rad/sec



รูปที่ ข.12 ความเค้นเฉือนขณะอครีคที่ $\alpha = 8^\circ$ $\mu = 0.3$ ความเร็วรอบของแม่พิมพ์ = 5 rad/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายอดิศักดิ์ ชมมิ
- ที่อยู่ 75/20 ธนาเพลสลาดพร้าว ถ.นาคนิวาส แขวงลาดพร้าว เขตลาดพร้าว กรุงเทพมหานคร 10230
- ประวัติการศึกษา 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ประสบการณ์การทำงาน
- พ.ศ.2550-ปัจจุบัน ผู้จัดการหน่วยงานภาคสนาม บริษัท พัฒน์กล จำกัด (มหาชน)
ควบคุมและบริหาร โครงการ โรงกลั่นเอทานอลกำลังผลิต 1 ล้านลิตรต่อวัน
จังหวัดนครราชสีมา
- พ.ศ.2548-2550 วิศวกร โครงการ บริษัท ทรงชัยเอ็นจิเนียริ่ง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด
ควบคุมและออกแบบงานระบบเครื่องกล
โครงการก่อสร้างโรงงานปรับปรุงคุณภาพข้าวสารกำลังผลิต 5 พันตันต่อวัน
จังหวัดอ่างทอง
- พ.ศ.2547-2548 วิศวกร โครงการ บริษัท อัลโลด์ เมททัลส์ จำกัด
ควบคุมและออกแบบงานระบบเครื่องกล
โครงการก่อสร้างอาคารครุฑการบินไทย สนามบินสุวรรณภูมิ
- พ.ศ.2539-2547 วิศวกรเครื่องกล บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเมนต์ จำกัด (มหาชน)
ควบคุมงานเครื่องกล
โครงการก่อสร้างอาคารเทียบจอด สนามบินสุวรรณภูมิ
โครงการก่อสร้างทางรถไฟรางคู่ หัวหมาก-ฉะเชิงเทรา
โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดิน
โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าบีทีเอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้