

ผลกระทบบของตัวแปรในกระบวนการดำนรูปแบบเย็นดอสมบัติจิงกลของ
แท่งอลูมิเนียม

EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF
COLD EXTRUDED ALUMINIUM ROD

สมชัย ตันฑวิรพห์
SOMCHAI TUNTHAWIROON

วิทยานพณฉบับฉวนหนึ่งของกรหัดษาตามหลักฐตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิชาฉษ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าภุฒฑทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของ
แท่งอลูมิเนียม

EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF
COLD EXTRUDED ALUMINIUM ROD

สมชัย ตันทวิรุพห์

SOMCHAI TUNTHAWIROON

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

74496
- 2 ต.พ. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2550

**EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL
PROPERTIES OF COLD EXTRUDED ALUMINIUM ROD**

SOMCHAI TUNTHAWIROON

**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**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดันขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม
นักศึกษา	นายสมชัย ตัณฑวิรุพห์
รหัสประจำตัว	46060410
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้วการดันขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียม ที่สภาวะอุณหภูมิห้องหรือดันขึ้นรูปแบบเย็น (cold extrusion) จะให้รูปร่างที่ดีกว่าการดันขึ้นรูปแบบร้อนและลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก ในงานวิจัยนี้นำเสนอ ผลกระทบเนื่องจากตัวแปรในกระบวนการดันขึ้นรูปแบบเย็น คือ ขนาดครึ่งมุมคาย อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความเร็วในการดันขึ้นรูป และสภาวะสารหล่อลื่นที่ต่างกัน โดยทำการพิจารณาคุณสมบัติเชิงกลดังนี้คือ ค่าความเค้นและแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป ความหนาแน่นและค่าความแข็งภายในหน้าตัดของชิ้นงาน โดยการดันขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษาเป็นการดันขึ้นรูปแบบดันไปหน้าหน้าผ่านคायรูปกรวย (conical dies) โดยใช้แท่งอลูมิเนียม 6063 เป็นวัสดุทดสอบ จากการทดลองพบว่า แรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปที่ขนาดครึ่งมุมคายเดียวกันจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น แต่เมื่อขนาดครึ่งมุมคายโตขึ้นแรงและความเค้นจะมีค่าน้อยลง การใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็งจะใช้แรงในการขึ้นรูปน้อยกว่าสารหล่อลื่นของเหลว ค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นมากในบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเท่านั้น และความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเพิ่มขึ้นจากสภาวะก่อนดันขึ้นรูปได้สูงสุด 4.6 เปอร์เซ็นต์

Thesis Title	Effects of Process Parameters on Mechanical Properties of Cold Extruded Aluminium Rod
Student	Mr.Somchai Tunthawiroon
Student ID.	46060410
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2007
Thesis Adviser	Assoc.Prof.Somchai Norasetthasopon
Thesis Co-Adviser	Asst.Prof.Dr.Kannachai Kanlayasiri

ABTRACT

Generally, cold extrusion of aluminum billet provides better shape and may reduce production cost of the extrusion process. This research presents effects of different variables in a cold extrusion process. The process variables are die half angle, reduction ratio in area, extrusion speed, and type of lubrication. The extrusion method used in this study is forward extrusion through conical die. The billet material 6063 aluminum rod. Results showed that force and stress in extrusion process at same die half angle increase when reduction ratio in area increases. When die half angle increases, force and stress in extrusion process decrease. Solid lubrication causes a lower extrusion force than liquid lubrication. Hardness of aluminum billet increases as reduction ratio in area increases, but it increase significantly only near the outer surface. After extrusion, maximum density of aluminum billet increase 4.6 percent compared to that of the original billet.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ไขปัญหาลดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ช่วยชี้แนวทางให้คำปรึกษารวมไปถึงข้อเสนอแนะที่ดีมากมาย

ผศ.มิ่ง โลกิจแสงทอง รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว ที่กรุณาที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนของเครื่องทดสอบ และช่วยแก้ปัญหาในด้านเทคนิค ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมพ์สาร ที่กรุณาให้คำปรึกษาส่วนทฤษฎีและแนะนำหนังสือเพื่อศึกษาค้นคว้าทฤษฎีเพิ่มเติม คุณมณฑา เทียมเมือง เจ้าหน้าที่ช่างเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนของเครื่องมือและช่วยแก้ปัญหาในด้านเทคนิค

คุณอาณัติ หาทรัพย์ นักวิจัยระดับ 6 และทีมงาน ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

รวมทั้งเพื่อน พี่ และน้อง ช่างยนต์ราชมงคล วิชาเขตเทคนิคกรุงเทพ ที่คอยถามไถ่สารทุกข์สุกดิบและยื่นผู้ด้วยกันมาตลอด

สุดท้ายนี้คุณงานความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและมารดาซึ่งเป็นที่เคารพรักยิ่ง คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนทุนการศึกษา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สมชัย ดัชนีวิรุฬห์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของปัญหา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
บทที่ 3 การขึ้นรูปวัสดุ.....	17
3.1 การหล่อโลหะ.....	17
3.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผง.....	18
3.3 กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยแรง.....	18
3.3.1 การดันขึ้นรูป.....	19
3.3.1.1 การดันขึ้นรูปโดยตรง.....	20
3.3.1.2 การดันขึ้นรูปโดยอ้อม.....	20
3.3.1.3 การดันขึ้นรูปแบบกระแทก.....	20
3.3.1.4 ทฤษฎีของการดันขึ้นรูปของการดันขึ้นรูปโดยตรง.....	22
1.การวิเคราะห์การดันขึ้นรูปโดยวิธีงานอุดมคติ.....	24
2.วิธีการสมดุคัลย์แรงหรือวิธีแบ่งช่วง	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 กระบวนการตัดเศษวัสดุ.....	28
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	30
4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	30
4.1.1 อลูมิเนียม.....	30
4.1.2 วัสดุสารหล่อลื่น.....	32
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและทดสอบ.....	33
4.2.1 เครื่องทดสอบวัสดุ.....	33
4.2.2 เครื่องทดสอบค่าความแข็ง.....	33
4.2.3 รางตั้งตึงจิกยึดและกระบอกตวง.....	34
4.2.4 ชุดคาลิป.....	35
4.2.5 ชุดจับยึดคาลิปและอุปกรณ์ในการดันขึ้นรูป.....	36
4.3 แผนการทดลอง.....	36
4.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
4.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานหรือแท่งอลูมิเนียม.....	39
4.4.2 ขั้นตอนระหว่างการดันขึ้นรูป.....	39
4.4.3 ขั้นตอนภายหลังการดันขึ้นรูป.....	39
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	41
5.1 ความเค้นในการดันขึ้นรูป.....	41
5.1.1 ผลการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา.....	42
5.1.1 ผลการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา.....	53
5.1.1 ผลการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 30 องศา.....	64
5.1.4 เปรียบเทียบความเค้นในการดันขึ้นรูปที่ขนาดครึ่งมุมคาย 15 22.5 และ 30 องศา.....	66
5.2 ความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม.....	71
5.2.2 ผลการทดสอบความแข็งที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา.....	72
5.2.2 ผลการทดสอบความแข็งที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา.....	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.2 ผลการทดสอบความแข็งที่สภาวะครึ่งมุมคาย 30 องศา.....	82
5.2.4 ผลการเปรียบเทียบความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมคาย 15 และ 22.5 องศา.....	82
5.3 ความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียม.....	84
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	86
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	86
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	92
ภาคผนวก ข. ความเค้นที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป.....	100
ภาคผนวก ค. ความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของ AI 6063 (% โดยน้ำหนัก).....	31
4.2 คุณสมบัติเฉพาะของ AI 6063.....	31
4.3 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของสบูโซเดียม.....	32
4.4 แผนการทดลองของกรณีक्रमมุดาย 15 องศา.....	37
4.5 แผนการทดลองของกรณีक्रमมุดาย 22.5 องศา.....	37
4.6 แผนการทดลองของกรณีक्रमมุดาย 30 องศา.....	38
5.1 การดันขึ้นรูปที่สภาวะ $\alpha = 15^\circ$ แยกตามชนิดของสารหล่อลื่นและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด.....	42
5.2 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 20\ 30\ 35$ และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	43
5.3 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_c = 20\ 30\ 35$ และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	47
5.4 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว $r_c = 20\ 30\ 35$ และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	50
5.5 การดันขึ้นรูปที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$ แยกตามชนิดของสารหล่อลื่นและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด.....	53
5.6 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 20\ 30\ 35$ และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	55
5.7 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_c = 20\ 30\ 35$ และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	58
5.8 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว $r_c = 20\ 30\ 35$ และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	61
5.9 การดันขึ้นรูปที่สภาวะ $\alpha = 30^\circ$ แยกตามชนิดของสารหล่อลื่น.....	64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะของการคั่นขึ้นรูปแบบไปด้านหน้าและแบบสวนทาง..... 5
2.2	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแรงและระยะการเคลื่อนที่ของแท่งอลูมิเนียม 40 มิลลิเมตร a) การคั่นขึ้นรูปไปด้านหน้า (b) การคั่นขึ้นรูปสวนทาง 5
2.3	แสดงแรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปความยาวแท่งอลูมิเนียม (a) 20 (b) 30 และ (c) 40 มิลลิเมตร 6
2.4	แสดงแรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปความยาวแท่งอลูมิเนียม 40 มิลลิเมตรจากการทดลอง 6
2.5	แสดงรูปร่างของคายที่ได้ออกแบบหารูปร่างที่ดีที่สุด (a) curve die (b) conical die..... 7
2.6	แสดงแรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปจากการทดลองและการจำลองทางไฟในตัดลิเมนต์ของ conical และ curve die..... 7
2.7	ผลการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูประหว่างการทดลองและการจำลองหาค่าด้วย โปรแกรมทางไฟในตัดลิเมนต์ของ conical die และ curve die 8
2.8	ภาพหน้าตัดของแท่งโลหะภายหลังการคั่นขึ้นรูป..... 9
2.9	แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของ อลูมิเนียมและตะกั่ว 9
2.10	การโค้งงอของชิ้นงานของตะกั่วเมื่อเทียบกับขนาดมุมคายที่ต่างกัน..... 10
2.11	การโค้งงอของชิ้นงานของเมื่อเทียบกับการลดขนาดหน้าตัดและความเร็ว 10
2.12	ความดันที่ใช้ในการคั่นเทียบกับอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็ว 11
2.13	ภาพตัดแสดงรูปแบบการไหลของชิ้นงาน 11
2.14	ขนาดและลักษณะของคายที่ใช้ในการทดลอง 12
2.15	แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปเมื่อความยาว die land มีขนาดต่างกัน 12
2.16	ความดันที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป..... 13
2.17	การโค้งงอของชิ้นงานหลังการคั่นขึ้นรูป..... 13
2.18	ความแข็งที่ผิวแท่งตะกั่วและรูปแบบการไหลหลังการคั่นขึ้นรูป..... 14
2.19	การจำลองทางไฟในตัดลิเมนต์และผลที่ได้จากการจำลองกรณีคายรูปกรวย..... 15
2.20	ความดันที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปเปรียบเทียบกับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด..... 15
2.21	การจำลองทางไฟในตัดลิเมนต์และผลที่ได้จากการจำลองกรณีมุมคาย 90 องศา..... 15
2.22	ความดันที่ได้จากการจำลองทางไฟในตัดที่มุมคาย 90 องศา..... 16
3.1	แสดงการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อ..... 18
3.2	แสดงการขึ้นรูปวัสดุผง 18

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แสดงกรรมวิธีการเปลี่ยนรูปด้วยแรง	19
3.4 แสดงกระบวนการขึ้นรูปวัสดุแบบต่างๆ โดยใช้แรงกระทำ	19
3.5 ลักษณะการดันขึ้นรูป (a) Direct (b) Indirect (c) Impact extrusion	21
3.6 กระบวนการขึ้นรูปแบบกระแทกในลักษณะต่างๆ	21
3.7 แสดงระบบที่ใช้แรงดันของเหลวแทนตัวกระทำ	22
3.8 การดันขึ้นรูปแบบ Hydrostatic ใช้ของเหลวร่วมกับตัวกระทำ	22
3.9 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานในการดันขึ้นรูปแบบ โดยตรง	23
3.10 แสดงตัวแปรพื้นฐานในกระบวนการดันขึ้นรูปแบบ โดยตรง	23
3.11 แสดงความเค้นหรือความดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการดันขึ้นรูป	25
3.12 ลักษณะของสแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรง	26
3.13 แสดงสแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรงเมื่อพิจารณาความเสียดทานระหว่าง แท่งโลหะกับเบ้าประคอง	28
3.14 แสดงการขึ้นรูปโดยการตัดเฉย (a) การกลึง (b) การเจาะ (c) การกัด	29
4.1 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ อลูมิเนียม 6063	31
4.2 แสดงไดอะแกรมและภาพด้านหน้าของเครื่องทดสอบวัสดุ	33
4.3 เครื่องทดสอบค่าความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์	34
4.4 ตารางเชิงจิตตอลและกระบอกตวง	35
4.5 ชุดคายที่ใช้ในการทดลอง	35
4.6 แสดงชุดจับยึดคายขณะทำการดันขึ้นรูป	46
4.7 แท่งอลูมิเนียมหลังจากหล่อร่วมกับเรซิน	40
5.1 ลักษณะของความเค้นหรือความดันที่เกิดขึ้นกับแท่งอลูมิเนียมในการดันขึ้นรูป	41
5.2 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสนูโซเดียม $r_c = 20, 30$ และ 35% ที่ความเร็ว $5, 10, 20, 30, 35, 40$ และ 50 mm/min	44
5.3 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดันขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสนูโซเดียม ความเร็ว 5 mm/min	44
5.4 แสดงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสนูโซเดียม $r_c = 20, 30$ และ 35% ระหว่างการทดลองกับทฤษฎี	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5	แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_e = 20$ และ 30% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min 47
5.6	แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 ความเร็ว 5 mm/min 49
5.7	แสดงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_e = 20$ และ 30% 49
5.8	แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว $r_e = 20\%$ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min 51
5.9	แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ความเร็ว 5 mm/min 51
5.10	เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 3 ชนิด $r_e = 20\%$ ความเร็ว 5 mm/min 52
5.11	เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 2 ชนิด $r_e = 30\%$ ความเร็ว 5 mm/min 53
5.12	แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_e = 20$ 30 และ 35% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min 55
5.13	แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม ความเร็ว 5 mm/min 57
5.14	แสดงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_e = 20$ 30 และ 35% 57
5.15	แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_e = 20$ และ 30% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min 59
5.16	แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 ความเร็ว 5 mm/min 60
5.17	แสดงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_e = 20$ และ 30% 60
5.18	แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว $r_e = 20\%$ ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min 62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการคั่นขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ความเร็ว 5 mm/min	62
5.20 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 3 ชนิด $r_c = 20\%$ ความเร็ว 5 mm/min	63
5.21 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 2 ชนิด $r_c = 30\%$ ความเร็ว 5 mm/min	63
5.22 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการคั่นขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 41\%$ ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	65
5.23 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการคั่นขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 30^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 41\%$ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	65
5.24 แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป $r_c = 20\%$ สบูโซเดียม $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	66
5.25 แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป $r_c = 30\%$ สบูโซเดียม $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	67
5.26 แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 35\%$ ที่ $\alpha = 15^\circ, 22.5^\circ$ และ $\alpha = 30^\circ$ ที่ $r_c = 41\%$ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	67
5.27 แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปจริง สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 35\%$ ที่ $\alpha = 15^\circ, 22.5^\circ$ และ $\alpha = 30^\circ$ ที่ $r_c = 41\%$ ความเร็ว 5 mm/min	68
5.28 แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป $r_c = 20\%$ สารหล่อลื่น SAE 40 $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	69
5.29 แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป $r_c = 30\%$ สารหล่อลื่น SAE 40 $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	70
5.30 แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป $r_c = 20\%$ สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min	70
5.31 ลักษณะรอยกดรูปปิรามิดที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็ง	72
5.32 ลักษณะค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 20\%$ ที่ความเร็ว 5 mm/min	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.33 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่สภาวะ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น สบู่โซเดียม $r_e = 20$ 30 และ 35% ที่ความเร็ว 5 mm/min	74
5.34 แสดงค่าความแข็งสูงสุดที่ $r_e = 20$ 30 และ 35% $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม	74
5.35 ลักษณะค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_e = 20\%$ ที่ความเร็ว 5 mm/min	75
5.36 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่สภาวะ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_e = 20$ และ 30% ที่ความเร็ว 5 mm/min	75
5.37 ลักษณะค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว $r_e = 20\%$ ที่ความเร็ว 5 mm/min	76
5.38 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 3 ชนิด $r_e = 20\%$ ความเร็ว 10 mm/min	76
5.39 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 2 ชนิด $r_e = 30\%$ ความเร็ว 10 mm/min	77
5.40 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม $r_e = 20$ 30 และ 35% ความเร็ว 5 mm/min	78
5.41 แสดงค่าความแข็งสูงสุดที่ $r_e = 20$ 30 และ 35% $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม	79
5.42 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE40 $r_e = 20$ และ 30% ความเร็ว 5 mm/min	80
5.43 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 3 ชนิด $r_e = 20\%$ ความเร็ว 10 mm/min	80
5.44 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 2 ชนิด $r_e = 30\%$ ความเร็ว 10 mm/min	81
5.45 ลักษณะค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$ สารหล่อลื่น สบู่โซเดียม $r_e = 41\%$ ที่ความเร็ว 5 mm/min	82
5.46 เปรียบเทียบความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15$ 22.5 และ 30° สารหล่อลื่น สบู่โซเดียม $r_e = 20\%$ ที่ความเร็ว 50 mm/min	83
5.47 เปรียบเทียบความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15$ 22.5 และ 30° สารหล่อลื่น สบู่โซเดียม $r_e = 30\%$ ที่ความเร็ว 50 mm/min	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.48 ความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งอลูมิเนียมที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_e = 20\ 30$ และ 35%	85
5.49 ความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งอลูมิเนียมที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_e = 20\ 30$ และ 35%	85

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์และคำย่อ	ความหมาย	หน่วย
α	ครึ่งมุมคาย	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	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางเข้า	m
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางทางออก	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	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในขั้นตอนการออกแบบหรือในขั้นตอนของกระบวนการผลิตนั้น จำเป็นต้องพิจารณาเลือกสรรวัสดุให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานและเหมาะสมกับกระบวนการผลิตนั้นๆ เพื่อให้การผลิตเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ วัสดุที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตนั้นมีให้เลือกใช้อย่างหลากหลายชนิด และมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางฟิสิกส์แตกต่างกันออกไป เช่น ทนต่อการสึกหรอ ทนการกัดกร่อน ความเหนียวและความอ่อนตัว เป็นต้น ซึ่งในการผลิตนั้นก็ต้องพิจารณาให้มีคุณสมบัติที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ให้ครบถ้วนและในขณะเดียวกัน ราคาต้นทุนต้องต่ำที่สุดด้วย วัสดุที่ใช้ในการผลิตทางวิศวกรรมถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ ในกลุ่มโลหะอาจเป็นกลุ่มที่วิศวกรเรารู้จักดีที่สุด ในกลุ่มโลหะนี้ก็ยังสามารถแบ่งออกได้อีกคือ โลหะกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก แม้ว่าโลหะกลุ่มเหล็กจะเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างกว้างขวางแต่ภายใต้เงื่อนไขหรือสภาวะบางอย่างเช่น ต้องการน้ำหนักต่อปริมาตรที่เบากว่า ทนการกัดกร่อน โลหะกลุ่มเหล็กก็ไม่สามารถใช้งานได้ โลหะนอกกลุ่มเหล็กจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ทดแทน ในปัจจุบัน 25 เปอร์เซ็นต์ ของการผลิตชิ้นงานในทางอุตสาหกรรมจะเป็น โลหะนอกกลุ่มเหล็ก ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยน้ำหนักแล้ว โลหะนอกกลุ่มเหล็กในสภาพบริสุทธิ์จะมีคุณสมบัติบางประการที่เป็นประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากโลหะนอกกลุ่มเหล็กนี้ขาดความแข็งแรงทางด้านโครงสร้าง จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้โลหะนอกกลุ่มเหล็กในสภาพดังกล่าวในทางอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้มันจึงถูกนำมาผสมกับสาร หรือ ธาตุอื่นๆ ตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไปเพื่อให้มีลักษณะของโลหะผสมที่จะทำให้ลักษณะเฉพาะแตกต่างกันออกไป ซึ่งมักจะมีคุณสมบัติทางด้าน ทนการกัดกร่อน การนำไฟฟ้า ความง่ายในการขึ้นรูป เป็นต้น เมื่อโลหะนอกกลุ่มเหล็กถูกผสมด้วยสารประกอบอื่นๆแล้ว ในกระบวนการต่อไปก็จะถูกนำไปทำการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีที่ต่างกัน เพื่อให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ ในกระบวนการขึ้นรูปนั้นเป็นการทำให้วัสดุมีรูปร่างและขนาดตามต้องการดังที่กล่าวมาแล้ว แต่นั่นไม่ได้หมายความว่าคุณสมบัติต่าง ๆ ไม่ว่าจะ เป็นคุณสมบัติทางกล เช่น ความเหนียว ค่าความต้านทานแรงดึง หรือลักษณะภายนอกที่สังเกตเห็นด้วยตาเปล่าได้ เช่น คุณภาพผิวจะยังคงสภาพเหมือนเดิมได้โดยไม่เปลี่ยนแปลง คุณสมบัติเหล่านี้อาจจะดีขึ้นเหมาะกับการนำไปใช้งานได้เลย หรือบางครั้งไม่สามารถนำไปใช้งานได้

ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกการขึ้นรูปวัสดุ ด้วยกรรมวิธีการดันขึ้นรูป (Extrusion) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการขึ้นรูปโลหะ ไม่ว่าจะ เป็นกลุ่มเหล็กหรือนอกกลุ่มเหล็กที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมปัจจุบันในการศึกษาครั้งนี้ ใช้อลูมิเนียมแท่งหน้าตัดกลมซึ่งเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เป็นวัสดุเพื่อศึกษา

และทดสอบ แท่งอลูมิเนียมถูกตัดออกเป็นชิ้นจากนั้นนำมาทำการดัดขึ้นรูปผ่านคายรูปกรวยที่อุณหภูมิห้องที่สภาวะตัวแปรต่างกัน คือ ขนาดของมุมคาย อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัด ความเร็วในการดัดขึ้นรูป และสารหล่อลื่น เพื่อศึกษาว่าตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการดัดขึ้นรูปนี้ ส่งผลอย่างไรต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาทำการขึ้นรูป เช่น ค่าความแข็ง ค่าความหนาแน่นทั้งนี้ผลที่ได้จากการทดลองอาจนำไปใช้หรือประยุกต์เข้ากับงานอุตสาหกรรมการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดียิ่งขึ้นหรือลดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ลง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูป คือ ขนาดครึ่งมุมคาย อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความเร็วในการดัดขึ้นรูป และสถานะสารหล่อลื่นที่ต่างกัน โดยทำการพิจารณาว่าตัวแปรดังกล่าวส่งผลกระทบต่อ แรงและความเค้นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป และคุณสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียมคือ ความแข็งภายในหน้าตัด และความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียม

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 ขณะทำการดัดขึ้นรูปเนื้อวัสดุไหลผ่านคายอย่างสม่ำเสมอ
- 1.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความต้านทานแรงมากกว่าแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจึงถือว่าอุปกรณ์การทดลองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขณะทำการดัดขึ้นรูป
- 1.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

เมื่อโลหะเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ (recrystallization) เราจะเรียกว่าโลหะเกิดการแปรรูปแบบเย็น (cold work) นอกจากการเปลี่ยนรูปทรงที่มักทำให้ความต้านทานแรงและค่าความแข็งเพิ่มขึ้นแล้ว คำว่า การทำให้แข็งด้วยความเครียด (work hardening หรือ strain hardening) หมายถึงการเพิ่มความแข็งแรงจากการแปรรูปแบบเย็น แต่ผลที่ตามมาหลังจากการแปรรูปแบบเย็นก็คือความเหนียวของโลหะจะลดลง

วิธีการปกติที่ใช้อธิบายพฤติกรรมกรรมการทำให้แข็งด้วยความเครียดของโลหะเหนียวในเชิงปริมาณก็คือการทดสอบด้วยการดึง การบิด การดึงอย่างเท่ากันในสองแกน และการกดอัดแบบความเครียดในระนาบ เนื่องจากการทดสอบแรงดึงสามารถทำได้ง่ายที่สุดจึงเป็นวิธีที่นิยมกันมาก

ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้นว่างานวิจัยนี้ทำการดัดขึ้นรูปอลูมิเนียมในสภาวะอุณหภูมิห้อง เพื่อความสมบูรณ์จึงทำการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปนี้ โดยการวัดค่าความแข็งภายในแท่งโลหะแทนการทดสอบด้วยแรงดึง เพราะไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากชิ้นงานที่ได้ภายหลังจากการทดสอบมีขนาดสั้นไม่สามารถทำการจับยึดชิ้นงานได้ ค่าความแข็งที่

เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆยังสามารถนำไปทำนาย ค่าความเค้นตกค้างในวัสดุได้อย่างคร่าวๆอีกด้วย รวมไปถึงหากค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นวัสดุที่ผ่านการแปรรูปแบบเย็นจะสามารถทนต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร จำกัดอยู่ที่ 10 ตัน 100 kN ความเค้นในการดัดขึ้นรูป $755 N/mm^2$
- 1.5.2 ศึกษาตัวแปรในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ โดยพิจารณาปัจจัยที่แตกต่างกัน 4 ตัวคือ เครื่องมุดาย สภาวะสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และ ความเร็วในการดัดขึ้นรูป
- 1.5.3 ศึกษาค่าความแข็งภายในของแท่งอลูมิเนียม โดยวัดบนพื้นที่หน้าตัดขวางของชิ้นงาน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.6.2 ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.3 ทำการออกแบบเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแท่งอลูมิเนียมในระหว่างการดัดขึ้นรูป โดยสร้างขึ้นมาเป็นกรณีพิเศษเพื่อใช้ในการทดลอง
- 1.6.4 ทำการทดลองดัดแท่งอลูมิเนียมผ่านด้าย
- 1.6.5 ทำการนำชิ้นงานที่ผ่านการดัดขึ้นรูปไปทำการทดสอบและวัดค่า
- 1.6.6 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.6.7 สรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยและทดลองเพื่อศึกษาถึง ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียมนี้ ได้ทำการศึกษาบทความและผลการวิจัยที่ผ่านมาเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของการศึกษางานวิจัย รวมทั้งใช้เป็นแนวทางเพื่อศึกษาและค้นคว้าเพิ่มเติมสำหรับการทดลองหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็น ที่ใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุทดสอบที่นำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของการศึกษางานวิจัย 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. การทดลองนี้ศึกษาถึงความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของชิ้นงานกับคานและเบ้าประคอง (container) ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุโดยวิธีดัดขึ้นรูป (extrusion) แบบดันไปด้านหน้า และแบบดันสวนทาง (forward and back ward extrusion) ใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุในการทดลองและทำการดัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง จากกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบดันไปด้านหน้าสามารถแสดงแรงที่ต้องการในการดัดขึ้นรูปเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ แสดงดังสมการที่ 2.1

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

เมื่อ F_t คือ แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป

F_{fc} คือ แรงเสียดทานระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคอง

F_{fd} คือ แรงเสียดทานระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับคาน

F_{dd} คือ แรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแท่งอลูมิเนียมภายในคาน

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

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

แรงเสียดทานระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองหาได้จากสมการ

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

โดยที่ τ คือ ความเค้นเฉือนระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองมีค่าคือ $\tau = mk$ เมื่อ m คือแฟคเตอร์ของความเสียดทาน, k คือความเค้นเฉือนจากแรงเสียดทาน, L คือความยาวของแท่งอลูมิเนียม, d_o คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบ้าประคอง แทนค่าสมการ 2.3 ลงในสมการที่ 2.2 จะได้ สมการของแรงทั้งหมดที่ใช้ในการขึ้นรูปใหม่คือ

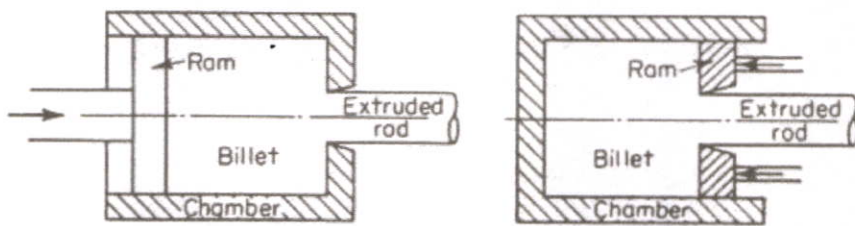
$$F_t = mk\pi d_o L + F_d \quad (2.4)$$

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

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

เมื่อ $a = mk\pi d_o$

แต่ถ้าเป็นการดันขึ้นรูปแบบสวนทาง แท่งอลูมิเนียมจะไม่มีเคลื่อนที่สมการที่ 2.4 จะลดรูปเหลือเพียง $F_t = F_d$ เท่านั้น



รูปที่ 2.1 ลักษณะของการดันขึ้นรูปแบบไปด้านหน้าและแบบสวนทาง

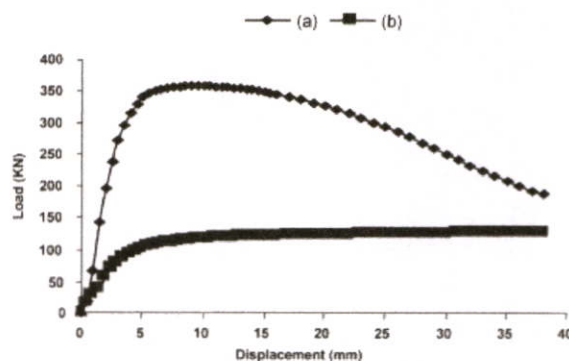


Fig. 7. Load-displacement curves of 40 mm length aluminum billets: (a) forward extrusion; (b) backward extrusion.

รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแรงและระยะการเคลื่อนที่ของแท่งอลูมิเนียม 40 มิลลิเมตร (a) การดันขึ้นรูปไปด้านหน้า (b) การดันขึ้นรูปสวนทาง [11]

จากสมการที่ 2.5 พบว่าแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปวัสดุ ขึ้นอยู่กับความยาวของชิ้นงาน แสดงผลในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นผลการคำนวณของการดันขึ้นรูปแบบ ไปด้านหน้าของแท่งอลูมิเนียมที่มีความยาว 20 30 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ

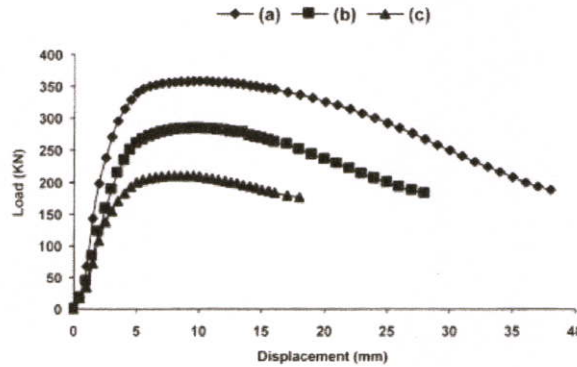


Fig. 8. Load-displacement curves in forward extrusion of aluminum billets of length: (a) 40 mm; (b) 30 mm; (c) 20 mm.

รูปที่ 2.3 แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปความยาวแท่งอลูมิเนียม (a) 20 (b) 30 และ (c) 40 มิลลิเมตร [11]

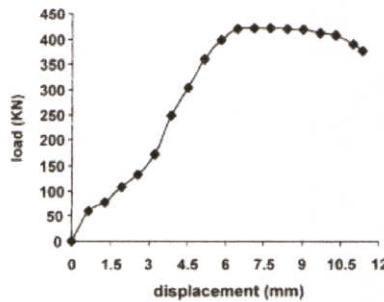


Fig. 10. Load-displacement curve of 40 mm length steel billet in forward extrusion.

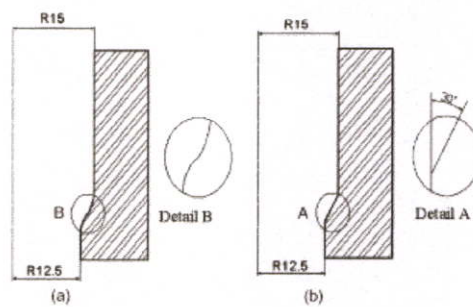
รูปที่ 2.4 แสดงแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปความยาวแท่งเหล็ก 40 มิลลิเมตรจากการทดลอง [11]

สรุปผลจากการทดลองดันขึ้นรูปโดยเปลี่ยนแปลงความยาวของแท่งอลูมิเนียมให้ต่างกัน พบว่าความยาวของแท่งอลูมิเนียมส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป โดยที่ความยาวของแท่งอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตาม และจากการดันขึ้นรูปแบบสวนทางนี้จะใช้เรงน้อยกว่าการดันขึ้นรูปไปด้านหน้า

2.2 การทดลองของ Noorani และคณะ (2005)

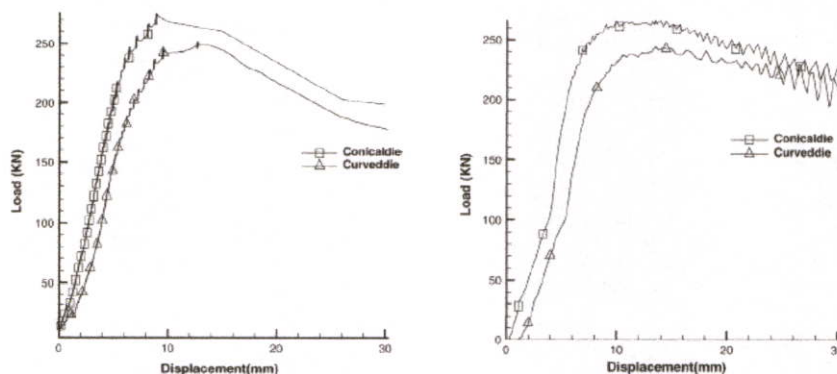
ในชื่อเรื่อง Experimental and numerical study of optimal die profile in cold forward rod extrusion of aluminum. ในบทความนี้ศึกษาถึงผลกระทบเนื่องจากรูปร่างของคายแบบ curve และ conical die ที่ส่งผลต่อความเค้นและแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปแบบดันไปด้านหน้าของแท่งอลูมิเนียม สิ่งที่ต้องการในการวิจัยนี้เพื่อลดแรงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลง และเพิ่มอายุการ

ใช้งานของคายเป็นเวลานานขึ้นโดยการหารูปร่างของคายที่เหมาะสม ในการหารูปร่างที่เหมาะสมในการดันขึ้นรูปไปด้านหน้าสำหรับ curve die ใช้วิธีแบ่งเป็นช่วง (slab method) โดยพิจารณาบนพื้นฐานคือให้ความเค้นและแรงที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดในการดันขึ้นรูป และใช้โปรแกรมทางไฟไนต์อีลิเมนต์ช่วยจำลองหาค่าความเค้นและแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป และสำหรับ conical die เช่นเดียวกัน ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการหามุมคายที่เหมาะสมบนเงื่อนไขและพื้นฐานเดียวกับ curve die คือให้ค่าความเค้นและแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปน้อยที่สุด จากนั้น ได้สร้างคายตามขนาดและรูปร่างที่ได้จากการหารูปร่างที่เหมาะสม โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองดันขึ้นรูปจริง



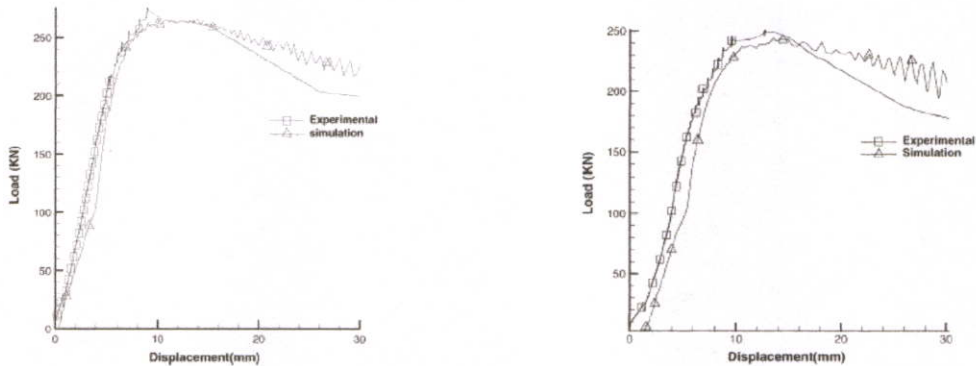
รูปที่ 2.5 แสดงรูปร่างของคายที่ได้ออกแบบหารูปร่างที่ดีที่สุด (a) curve die (b) conical die

ผลจากการทดลอง ได้มุมคายที่ทำให้ความเค้นในการดันขึ้นรูปที่น้อยสุด เท่ากับ 30 องศา การดันขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมที่อุณหภูมิห้อง จากนั้น ได้สร้างคายตามขนาดและรูปร่างที่ได้จากการหารูปร่างที่เหมาะสมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปของ curve die ให้แรงในการดันขึ้นรูปน้อยกว่า conical die ถึง 12%



รูปที่ 2.6 แสดงแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปจากการทดลองและการจำลองทางไฟไนต์อีลิเมนต์ของ conical และ curve die [9]

และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง ผลที่ได้จากการทดลองและผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าความเค้นและแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป ได้ผลของความเค้นและแรงที่ใกล้เคียงกันมากแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูประหว่างการทดลองและการจำลองหาค่าด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของ conical die และ curve die [9]

สรุปผลจากการทดลอง บนพื้นฐานของการคำนวณ โดยใช้วิธีแบ่งช่วงเพื่อหารูปปร่างที่เหมาะสมของ curve die และใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหารูปปร่างที่เหมาะสมของ conical die รวมทั้งจำลองค่าความเค้นที่เกิดขึ้น ได้แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการเคลื่อนที่ของแท่งอลูมิเนียมผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ถึงแม้ว่าในการผลิต curve die จะยากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ conical die แต่มันก็สามารถลดแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตได้อย่างมาก

2.3 การทดลองของ Onuh และคณะ (2002)

เรื่อง Effect of die geometry and extrusion speed on the cold extrusion of aluminum and lead alloys ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการทดลองบนพื้นฐานตัวแปรในการดัดขึ้นรูปแบบเย็นทั้งหมดคือการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด มุมคาย อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรง โดยทำการพิจารณาถึง คุณภาพของชิ้นงานที่ได้ ความดันที่เกิดขึ้นขณะทำการดัดขึ้นรูป รูปแบบการไหลของแท่งโลหะที่ใช้ดัดขึ้นรูป และขนาดที่ได้หลังการดัดขึ้นรูป โดยรูปร่างของแท่งโลหะภายหลังการดัดขึ้นรูปมีหน้าตัดที่สมมาตรกันแสดงในรูปที่ 2.8

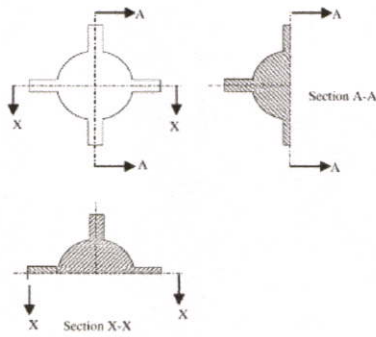
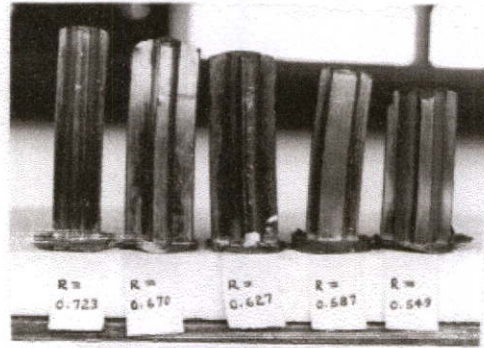
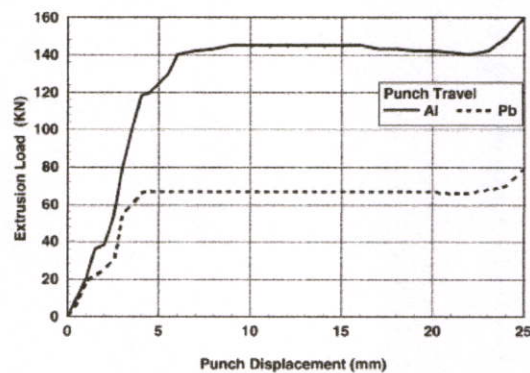


Fig. 2. A cross-section schematic view of the extruded section.



รูปที่ 2.8 ภาพหน้าตัดและชิ้นงานของแท่งโลหะภายหลังการดันขึ้นรูป [10]

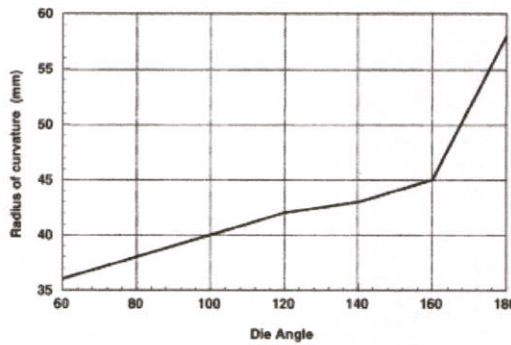
โลหะที่ใช้ในการทดลองดันขึ้นรูปใช้โลหะ 2 ชนิด คือ อลูมิเนียมและตะกั่ว ขนาดของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองดันขึ้นรูปมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.3 มิลลิเมตร ยาว 32 มิลลิเมตร และขนาดของแท่งตะกั่วที่ใช้ในการทดลองดันขึ้นรูป เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.3 มิลลิเมตร ยาว 25.4 มิลลิเมตร สำหรับการศึกษานิคมของรูปแบบการไหลของแท่งโลหะ ขณะทำการดันขึ้นรูป ได้ทำการแบ่งแท่งอลูมิเนียมและตะกั่วออกเป็น 2 ชิ้น ตามแนวยาวเพื่อสร้างรอยบากในลักษณะรูปดาวสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 4 ตารางมิลลิเมตรไว้ภายใน และความเร็วที่ใช้ในการดันขึ้นรูปใช้ความเร็วระหว่าง 0.4 ถึง 8 มิลลิเมตรต่อนาที



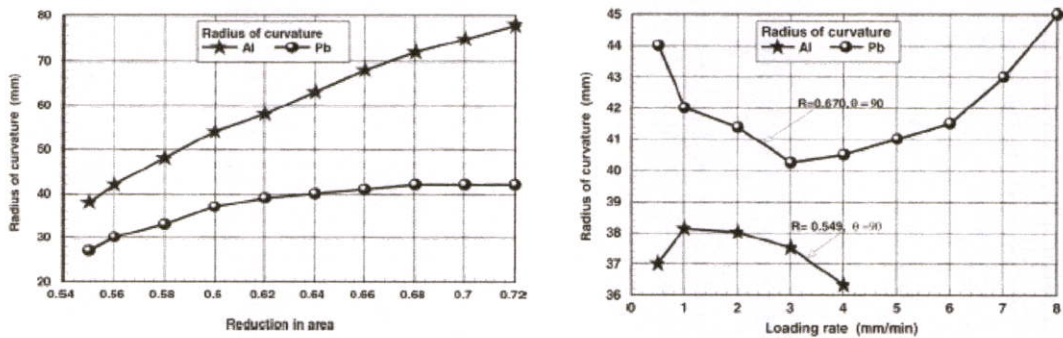
รูปที่ 2.9 แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปที่เปลี่ยนไปตามระยะทางของ อลูมิเนียมและตะกั่ว [10]

ผลการทดลองที่ได้ ในรูปที่ 2.9 แสดงแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป อลูมิเนียมและตะกั่วซึ่งแปรผันตามระยะการเคลื่อนที่ของตัวกด ซึ่งในรูปนี้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมมีค่าสูงกว่าแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปตะกั่ว ซึ่งแรงที่มีค่าสูงในการดันขึ้นรูปอลูมิเนียมนี้เนื่องจากอลูมิเนียมมีแรงต้านทานในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่มากกว่าเทียบได้จาก ค่าความเค้นจุดครากของอลูมิเนียมที่มีค่ามากกว่าตะกั่ว ในส่วนของขนาดภายหลังการดันขึ้นรูป มีค่าความแม่นยำอยู่ระหว่าง ± 0.105 มิลลิเมตร ในรูปที่ 2.8 ชิ้นงานที่ได้บางชิ้นเกิดการโก่งซึ่งเนื่องมาจากความแตกต่างของความเสียด

ทานระหว่างคายทั้งสองข้าง ในรูปที่ 2.10 และ 2.11 แสดงผลกระทบเนื่องจาก อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด มุมคาย และความเร็วในการคั่นขึ้นรูป กับการโค้งงอของชิ้นงาน ซึ่งผลที่ได้พบว่า ที่มุมคาย 60 ถึง 120 องศา การโค้งงอของชิ้นงานมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 120 องศา การโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึง 160 องศา หลังจากนั้นการ โค้งงอของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลของอัตราการลดขนาดหน้าตัด ในรูปที่ 2.11 การโค้งงอมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ หากอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมีค่ามากทั้งอลูมิเนียมและตะกั่ว และผลเนื่องจากความเร็วพบว่าความเร็วไม่ส่งผลต่อการ โค้งงอของแท่งอลูมิเนียมและตะกั่ว

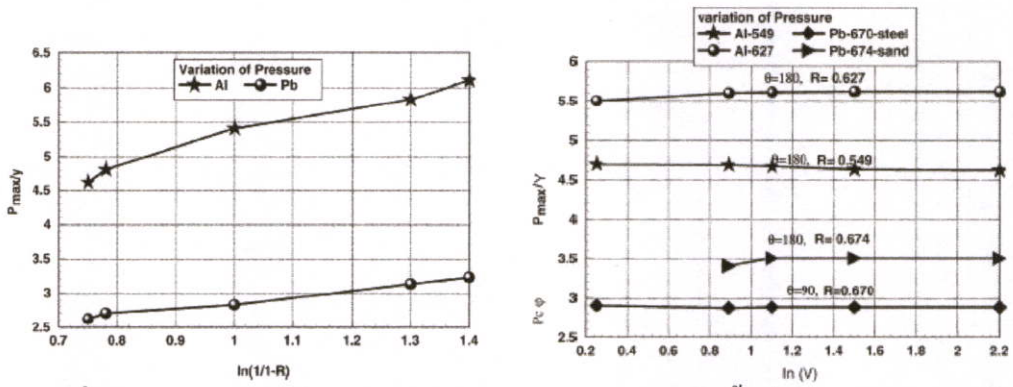


รูปที่ 2.10 การ โค้งงอของชิ้นงานของตะกั่วเมื่อเทียบกับขนาดมุมคายที่ต่างกัน [10]

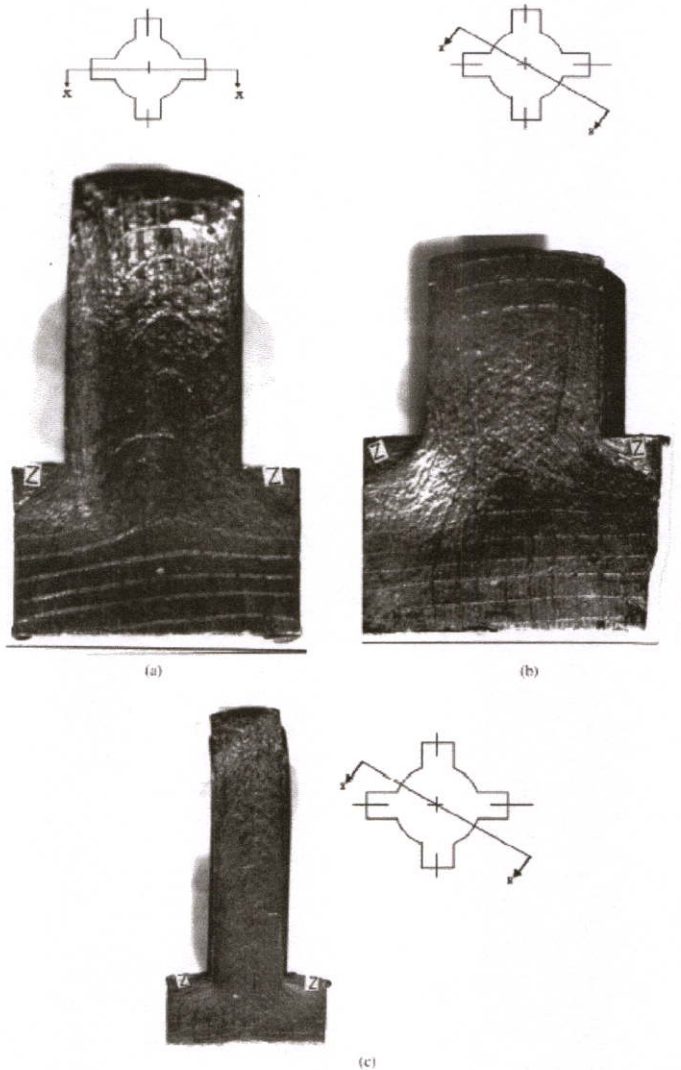


รูปที่ 2.11 การ โค้งงอของชิ้นงานเมื่อเทียบกับการลดขนาดหน้าตัดและความเร็ว [10]

รูปที่ 2.12 แสดงความคั่นที่เกิดขึ้นในการคั่นขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมและตะกั่ว เมื่อเทียบกับอัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และความเร็วจากรูปพบว่า เมื่ออัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น ความคั่นที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นตาม ไปด้วยแต่ความคั่นที่เกิดขึ้นมีลักษณะเกือบคงที่กราฟเป็นเส้นตรง เมื่อความเร็วมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 2.12 ความดันที่ใช้ในการดันเทียบกับอัตราการผลิตขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็ว [10]



รูปที่ 2.13 ภาพตัดแสดงรูปแบบการไหลของชิ้นงาน [10]

รูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบการไหลของชิ้นงาน ที่มุมตาย 180 องศาทั้งหมด อัตราการผลิตขนาดพื้นที่หน้าตัด ต่างกัน 3 ขนาด พบว่าที่บริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิด Dead metal คือ โลหะจะไม่

เกิดการเคลื่อนที่ในทุกๆ การทดลอง สรุปผลการทดลองโดยรวม ในการศึกษาผลเนื่องจากตัวแปรในการดันขึ้นรูป คือ มุมตาย อัตราการลดขนาดและความเร็วในการดันขึ้นรูป พบว่า การโค้งงอของแท่งอลูมิเนียมและตะกั่วจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น และความเร็วไม่มีผลกระทบต่อ การโค้งงอ

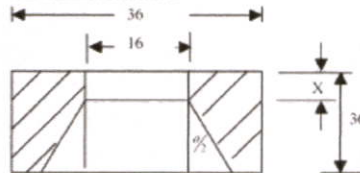
2.4 การทดลองของ Ajiboye และ Adeyemi (2005)

เรื่อง Effect of die land on the cold extrusion of lead alloy ซึ่งบทความทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากความยาวของ die land ต่อ แรงและความดันในการดันขึ้นรูป โดยเปรียบเทียบกันระหว่างการทดลองและการประมาณค่าจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีขอบเขตบน วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นตะกั่ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.82 มิลลิเมตร ยาว 15 และ 26 มิลลิเมตร

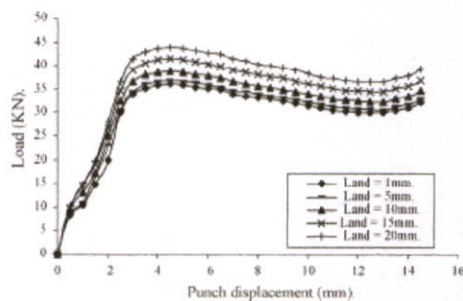
Dimensions of dies used die opening: circular $\varnothing 16\text{mm}$, die type: split dies; included die angle (2α) = 180°

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.



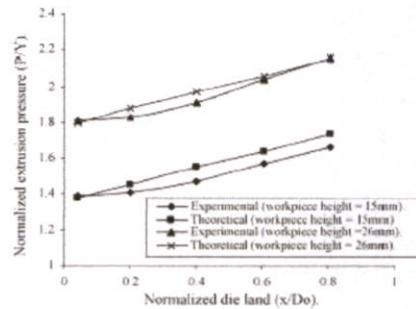
รูปที่ 2.14 ขนาดและลักษณะของคายนที่ใช้ในการทดลอง [8]



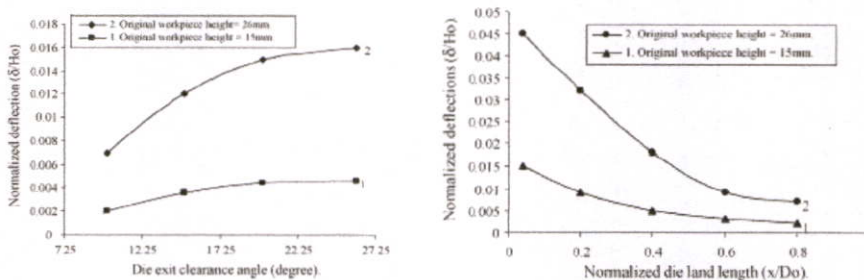
รูปที่ 2.15 แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเมื่อความยาว die land มีขนาดต่างกัน [8]

รูปที่ 2.15 แสดง ลักษณะและขนาดของคายนที่ใช้ในการทดลอง คายนที่ใช้ในการทดลองมีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทั้งหมดคือ 58 เปอร์เซ็นต์ และมุมตาย 180 องศา และในรูปที่ 2.15 แสดงมุมคายนด้านทางออกที่ใช้ในการทดลอง 4 มุมคือ 10 15 20 และ 26 องศา ความยาว

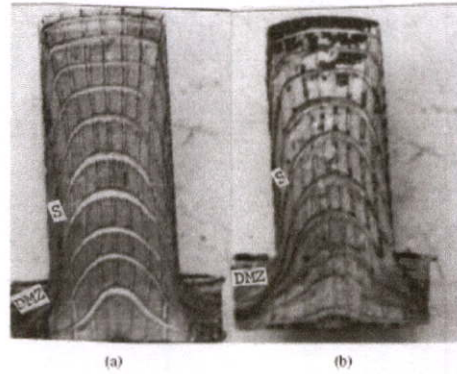
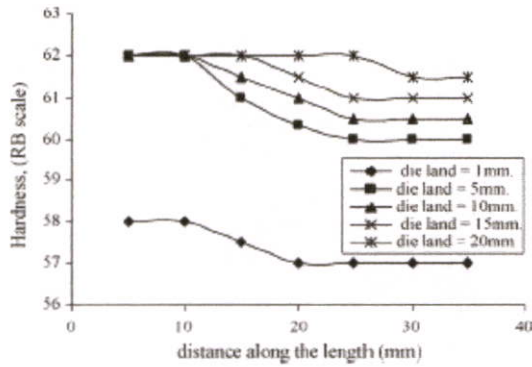
ของ die land 5 ขนาด คือ 1 5 10 15 และ 20 มิลลิเมตร ผลการค้นขึ้นรูปที่ขนาดความยาวของ die land ต่างกัน แสดงในรูปที่ 2.15 ในรูปที่ 2.15 แสดงแรงที่ใช้ในการค้นขึ้นรูปที่ มุมคาย 180 องศา ขนาดของ die land 1 5 10 15 และ 20 มิลลิเมตร ความยาวแท่งตะกั่ว 15 มิลลิเมตร และมุมคายทางออก 10 องศา ผลการทดลองพบว่า เมื่อขนาดความยาวของ die land มากขึ้นต้องใช้แรงในการค้นขึ้นรูปมากขึ้น เมื่อพิจารณาความดันที่ใช้ในการค้นขึ้นรูป ที่ความยาวแท่งตะกั่ว 15 และ 26 มิลลิเมตร ในรูปที่ 2.16 พบว่า ความดันที่เกิดขึ้นในการค้นขึ้นรูปที่ความยาว 26 มิลลิเมตร ที่ค่าสูงกว่า 15 มิลลิเมตร ซึ่งผลที่ได้ระหว่างการทดลองและการประมาณค่าด้วยวิธีขอบเขตบนมีค่าใกล้เคียงกันมาก และรูปที่ 2.17 พิจารณาการโค้งงอของชิ้นงานหลังการค้นขึ้นรูป ผลที่ได้พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งตะกั่ว 26 มิลลิเมตร เกิดการโค้งงอน้อยกว่าแท่งตะกั่วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ที่ขนาด die land และมุมคายทางออกที่เท่าๆกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงความยาวของ die land เพียงอย่างเดียวแล้ว ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความยาวของ die land ที่เพิ่มขึ้นทำให้ การโค้งงอของชิ้นงานลดลงได้อย่างมาก



รูปที่ 2.16 ความดันที่ใช้ในการค้นขึ้นรูป [8]



รูปที่ 2.17 การโค้งงอของชิ้นงานหลังการค้นขึ้นรูป [8]

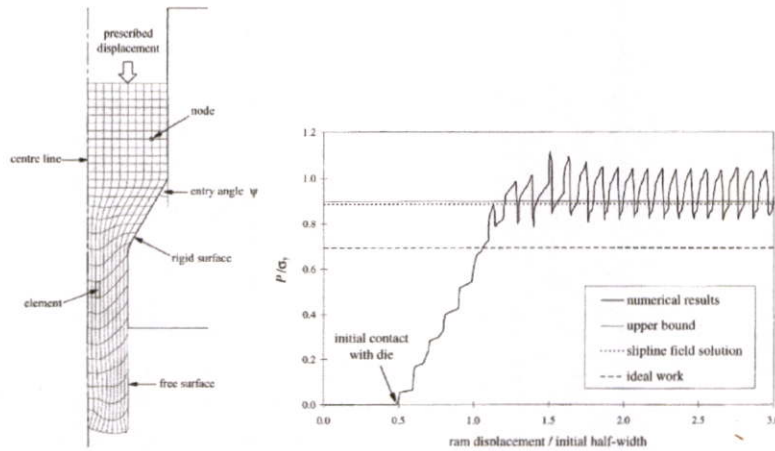


รูปที่ 2.18 ความแข็งที่ผิวแท่งตะกั่วและรูปแบบการไหลหลังการดันขึ้นรูป [8]

ในรูปที่ 2.18 แสดงค่าความแข็งของแท่งตะกั่วหลังการดันขึ้นรูป ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ดันขึ้นรูปที่ ความยาว die land มากขึ้นค่าความแข็งที่ผิวของแท่งตะกั่วเมื่อวัดตามความยาวมีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลของตะกั่ว รูป a และ b เป็นการดันขึ้นรูปที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 58 เท่ากันแต่ความยาวของ die land ต่างกันคือ a และ b มีความยาว 20 และ 1 มิลลิเมตรตามลำดับ จากลักษณะของการไหลของแท่งตะกั่วในการดันขึ้นรูปที่ die land 20 มิลลิเมตร เกิดการเนียนบริเวณผิวแท่งตะกั่วมากกว่า 1 มิลลิเมตร การเนียนนี้จึงทำให้ค่าความแข็งที่ผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น สรุปการทดลองนี้ทำให้ทราบว่า เมื่อ die land มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ความดันและแรงที่ให้ในการดันขึ้นรูปมีค่ามากขึ้น และมีผลคือ ทำให้การโค้งงอของชิ้นงานลดลง และเมื่อมุมทางออกของคายนี้ออกมากขึ้นทำให้เกิดการโค้งงอได้มากกว่าขนาดมุมคายทางออกของคายนี้ออก

2.5 บทความของ Horrobin และ Nedderman (1998)

เรื่อง Die entry pressure drops in paste extrusion ในบทความนี้ทำการวิเคราะห์ ความดันที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูป วัสดุที่มีความอ่อนมากซึ่งสามารถทำให้วิเคราะห์เป็นแบบ พลาสติกสมบูรณ์ (perfectly plastic deformation) ได้ ซึ่งการวิเคราะห์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ABAQUS ในการคำนวณ และเปรียบเทียบกับ การคำนวณด้วยวิธี ขอบเขตบน และวิธีสนามเส้นเลื่อนไหล

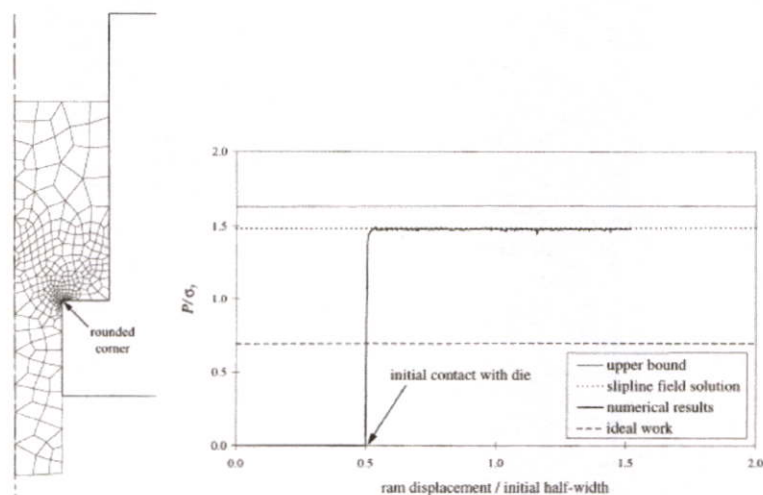


รูปที่ 2.19 การจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์และผลที่ได้จากการจำลองกรณีด้วยรูปกรวย [12]

ในรูปที่ 2.19 แสดงการจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์ที่สภาวะครึ่งมุมคาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 50 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง ผลที่ได้จากการคำนวณด้วย สนามเส้นเลื่อนไหลและวิธีขอบเขตบน และมีมีขนาดมุมคายมากขึ้น ความดันที่เกิดขึ้นในการคั่นขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นตาม แสดงในรูปที่ 2.20 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 2.20 ความดันที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น [12]



รูปที่ 2.21 การจำลองทางไฟไนต์อิลิเมนต์และผลที่ได้จากการจำลองกรณีมุมคาย 90 องศา [12]

เมื่อทำการจำลองที่สภาวะมุมคาย 90 องศา ผลที่ได้จากรูปที่ 2.21 พบว่าความดันที่ใช้ในการดันขึ้นรูป มีค่าเท่ากับผลที่ได้จากวิธีสนามเส้นเลื่อนไหล ซึ่งเมื่ออัตราส่วนการลดการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น ความดันที่ใช้ในการดันขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นตามแสดงผลไว้ในรูปที่ 2.22

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 2.22 ความดันที่ได้จากการจำลองทางไฟไนต์ที่มุมคาย 90 องศา [12]

สรุปการทดลองที่ได้ แสดงได้ว่าผลของมุมคายและ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้ความดันมากขึ้นเพื่อทำให้วัสดุ ที่มีความอ่อนไหลผ่านคายได้

2.6 สรุปจากบทความที่ได้ทำการศึกษา

ในการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปโลหะ ด้วยกรรมวิธีดันขึ้นรูปที่ผ่านมานั้น สิ่งที่ผู้วิจัยหลายๆ ท่านได้ทำการทดลองไว้แล้ว ส่วนมากจะเป็นการทำนายหรือประมาณแรงและความดันที่สามารถทำให้วัสดุที่ใช้ในการทดลองไหลผ่านคายได้ ในกรณีต่างๆ เช่น เมื่อมุมคาย หรืออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่ต่างกัน ในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติทางกลหลังการดันขึ้นรูปแล้วเท่าที่ผู้เขียนได้ค้นคว้าว่ามีผู้ทำการศึกษาน้อยมาก หรือแม้แต่การทดลองเปลี่ยนแปลงสภาพสารหล่อลื่นให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป อย่างที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่าสารหล่อลื่นจะช่วยลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสซึ่งสามารถทำให้แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปมีค่าลดลงได้

ในการศึกษาและวิจัยนี้จึงทำการพิจารณาในส่วนของการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ บนพื้นฐานตัวแปรในการดันขึ้นรูปทั่วไป คือ ขนาดครึ่งมุมคาย อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็วในการดันขึ้นรูป โดยพิจารณาคุณสมบัติทางกลคือ ค่าความแข็งแรงภายใน และค่าความหนาแน่น ของโลหะที่นำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการทดลองดันขึ้นรูป ในการทดลองนี้ใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุทดสอบ แต่ในการทดลองก็ไม่ได้ตัดในส่วนองแรงและความดันที่ใช้ในการดันขึ้นรูปทิ้งไป เนื่องจากทางผู้เขียนได้ทดลองเปลี่ยนแปลงสถานะของสารหล่อลื่นด้วย ซึ่งคาดว่าสถานะสารหล่อลื่นที่ต่างกันอาจแสดงผลในส่วนองแรงและความดันในการดันขึ้นรูปที่ต่างกัน ได้

บทที่ 3

การขึ้นรูปวัสดุ

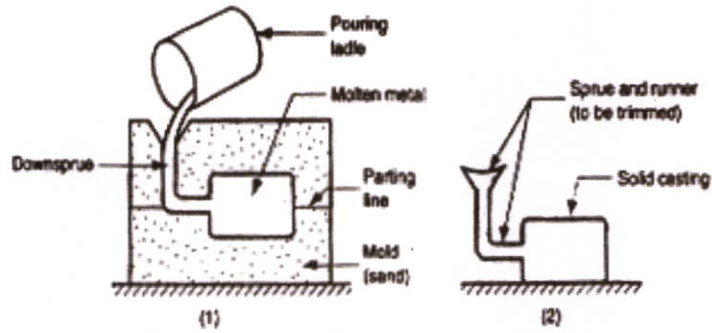
กระบวนการขึ้นรูปวัสดุ (Shaping Operation) เป็นการเปลี่ยนรูปวัสดุ ให้ได้รูปทรงตามต้องการ ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การหล่อ (Casting) การอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Forging) และการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร (Machining) เป็นต้น กระบวนการที่กล่าวมาอาจเป็นขั้นตอนการใช้ความร้อนหรือเครื่องจักรหรือรวมกันทั้งสองอย่างก็ได้ เพื่อให้วัสดุหรือชิ้นงานเกิดเปลี่ยนรูปทรงทางเรขาคณิต ซึ่งสามารถจำแนกได้หลายกระบวนการ ซึ่งโดยพื้นฐานมี 4 ลักษณะด้วยกันคือ

1. กระบวนการหล่อโลหะ
2. กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผง
3. กระบวนการขึ้นรูปด้วยแรง
4. กระบวนการตัดเศษวัสดุ

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาและวิจัยโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปโลหะซึ่งกระบวนการขึ้นรูปนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งของกระบวนการขึ้นรูปด้วยแรง เพื่อให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ฉะนั้นเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง รายละเอียดของกรรมวิธีการขึ้นรูปวัสดุซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของกระบวนการขึ้นรูปวัสดุด้วยแรงดังที่กล่าวมาเป็นหลัก เพื่อที่จะศึกษาถึงวิทยานิพนธ์นี้ให้ละเอียดยิ่งขึ้น ในส่วนของกระบวนการหล่อโลหะ กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผง และกระบวนการตัดเศษวัสดุจะกล่าวไว้อย่างย่อๆ เท่านั้น

3.1 กระบวนการหล่อโลหะ (Casting)

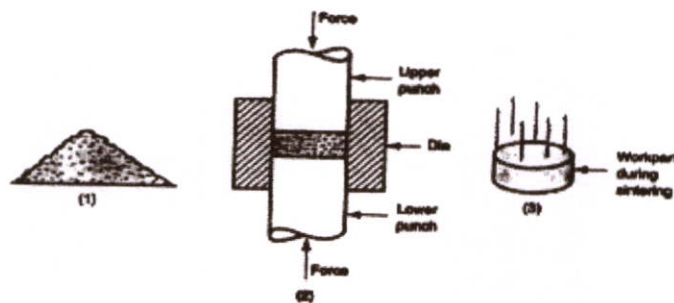
เป็นขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Molding) และกระบวนการอื่น ๆ ที่จะต้องให้ความร้อนกับวัสดุจนเป็นของเหลว หรือกึ่งของเหลว วัสดุที่ทำการผลิตในกระบวนการนี้ได้แก่ โลหะ เซรามิก แก้ว พลาสติก ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่ให้ความร้อนแล้วสามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้เมื่อวัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวหรือกึ่งของเหลวแล้วจะใช้แรงกดคั้นหรือน้ำหนักตัวของของเหลว ไหลเข้าสู่แบบหล่อและแข็งตัวภายในแบบหล่อได้รูปทรงตามต้องการ กระบวนการหล่อจะใช้กับวัสดุที่เป็นโลหะ การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จะใช้กับวัสดุพวกพลาสติก วัสดุจำพวกแก้วอาจจะมีทั้งสองกระบวนการ ส่วนวัสดุผสมพวกโพลีเมอร์อาจใช้กระบวนการเดียวกันกับพลาสติกดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อ

3.2 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผง (Particulate Processing)

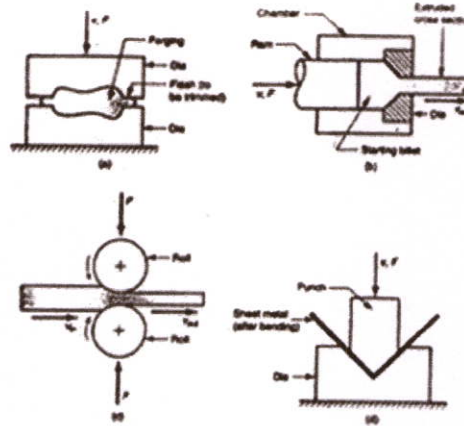
วัสดุเริ่มต้นจะมีลักษณะเป็นผง นำมาให้ความร้อนแล้วอัดขึ้นรูป ผงโลหะ หรือเซรามิก ซึ่งทั้งสองวัสดุนี้จะมีรายละเอียดของกระบวนการที่แตกต่างกัน กระบวนการขึ้นรูปโลหะผงนี้สามารถทำได้ง่าย คือการใช้แรงกดพร้อมกับการให้ความร้อน ดังรูปที่ 3.2 นำผงโลหะใส่แบบ แล้วอัดด้วยแรงดันสูง ทำให้ผงโลหะเกิดเป็นรูปร่างตามแบบ อุณหภูมิที่ให้กับวัสดุจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ซึ่งสามารถช่วยทำให้เกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ การเกิดการจับตัวกันของผงโลหะโดยวิธีนี้เรียกว่า ซินเตอร์ริง (Sintering)



รูปที่ 3.2 แสดงการขึ้นรูปวัสดุผง

3.3 กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยแรง (Deformation Processes)

วัสดุเริ่มต้นจะเป็นวัสดุแข็งแรงเหนียว (Ductile Solid) โดยทั่วไปเช่น การเปลี่ยนรูปของโลหะจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อของวัสดุซึ่งเกิดจากแรงกระทำ บางกระบวนการจะให้ความร้อนช่วยให้วัสดุสามารถยืดตัวออกได้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำกว่าจุดหลอมละลาย กระบวนการเหล่านี้ได้แก่ Forging Extrusion และ Rolling แสดงในรูปที่ 3.3 และกระบวนการขึ้นรูปเกี่ยวกับโลหะแผ่น คือ การพับ (Bending) ในรูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการขึ้นรูปวัสดุแบบต่างๆ โดยใช้แรงกระทำ



รูปที่ 3.3 แสดงกรรมวิธีการเปลี่ยนรูปด้วยแรง

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	12	Expanding	
	13	Stretch forming	
	14	Embossing	
Tension and compression	15	Wire drawing	
	16	Deep drawing	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>With blank-holder </div> <div>Without blank-holder </div> </div>
		17	Ironing
Bending	18	At straight axis	
	19	At curved axis	
Shear	20	Shear spinning	
		Shear pressing	
Torsion	21	Setting	

รูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการขึ้นรูปวัสดุโดยใช้แรงกระทำแบบต่างๆ

3.3.1 การดันขึ้นรูป (Extrusion)

เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะในสภาวะร้อนหรือเย็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้แรงอัดลงบนชิ้นงานให้ไหลออกมาจากแม่พิมพ์เป็นรูปร่างต่างๆ อาจจะเป็นแท่งตันหรือกลวงก็ได้ กรรมวิธีนี้จะกระทำได้โดยนำชิ้นงานเข้าไปในแม่แบบหรือเบ้าแบบปิด ซึ่งในเบ้าปิดนี้จะมีรูสำหรับให้วัสดุไหลหรือลอคออกตามปริมาตรที่ลดลงของเบ้าเนื่องจากแรงดันของตัวกระทำทั้ง วัสดุที่ถูกดันหรือลอคออกจากเบ้านี้

เนื่องจากแรงดันจะทำให้ชิ้นงานอาจติดอยู่กับแม่แบบ หรือติดออกมากับแกนป้อนก็ได้ และชิ้นงานจะมีหน้าตัดที่สม่ำเสมอตามลักษณะของทางออกซึ่งเรียกกันว่าคายนหรือแม่พิมพ์ ในการดันขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะใหญ่ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การดันขึ้นรูปโดยตรง (Direct Extrusion)

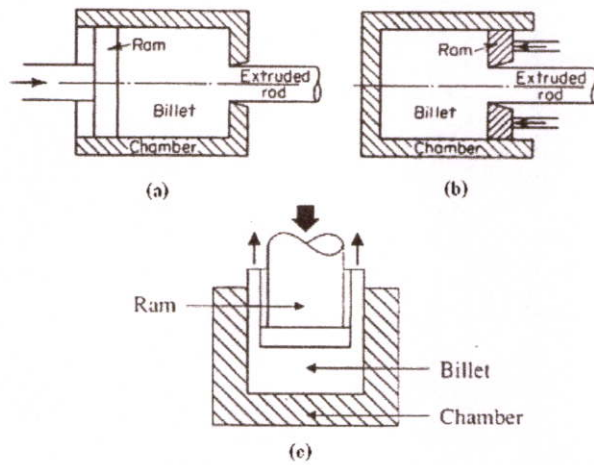
การดันขึ้นรูปด้วยวิธีนี้อาจเรียกอีกอย่างว่า การดันขึ้นรูปไปด้านหน้า (Forward Extrusion) ในรูปที่ 3.5 (a) แสดงการดันขึ้นรูปโดยตรง โดยตัวกระทัน (Punch) จะอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของบิลเล็ท และจะดันให้บิลเล็ทไหลออกมาจากเบ้าแม่พิมพ์ (Container) ผ่านแม่พิมพ์ (Dies) ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของบิลเล็ทเป็นรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ ไม่ว่าจะเป็นหน้าตัดกลมตัน หน้าตัดกลมกลวง หรือหน้าตัดรูปหลายเหลี่ยมขึ้นอยู่กับรูปร่างของคายนั่นเอง

3.3.1.2 การดันขึ้นรูปโดยอ้อม (Indirect Extrusion)

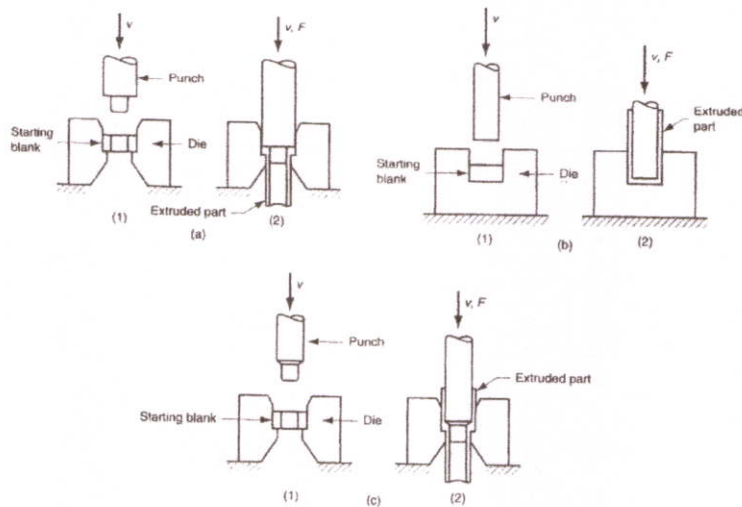
การดันขึ้นรูปวิธีนี้อาจเรียกตามลักษณะทิศทางการไหลออกของวัสดุจากแม่พิมพ์ได้อีกคือ การดันขึ้นรูปแบบสวนทาง (Backward Extrusion) ซึ่งในการดันแม่พิมพ์หรือคายนและตัวกระทันจะอยู่ที่ปลายของบิลเล็ทด้านเดียวกัน จึงดูเหมือนว่าใช้แม่พิมพ์เป็นตัวดันงานเอง ทิศทางการไหลของโลหะหรือวัสดุที่ออกจากคายนจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับวิธีแรก หรือตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของการดัน จึงเรียกว่าการดันขึ้นรูปแบบสวนทางได้ แสดงในรูปที่ 3.5 (b) ในการดันขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ใช้กับงานที่มีขนาดจำกัด และมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก ที่สำคัญใช้แรงในการดันน้อยกว่าวิธีแรก เนื่องจากผิวของบิลเล็ทที่สัมผัสกับเบ้าแม่พิมพ์จะไม่มี การเคลื่อนที่เหมือนการดันขึ้นรูปโดยตรง

3.3.1.3 การดันขึ้นรูปแบบกระแทก (Impact Extrusion)

เป็นการดันขึ้นรูปโดยในแรงกระแทกแสดงดังรูปที่ 3.5 (c) สามารถผลิตชิ้นงานที่ต้องการผิวบางมาก ๆ ได้ โดยทั่วไปวัสดุที่จะนำมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะต้องมีความอ่อน เช่น ตะกั่ว อลูมิเนียม ดีบุก และสังกะสี เป็นต้น ลักษณะของการดันกระแทกขึ้นรูปมี 3 แบบ คือ ดันไปด้านหน้า (Forward) ดันสวนทาง (Backward) และดันแบบผสม (Combination) แสดงดังรูปที่ 3.6

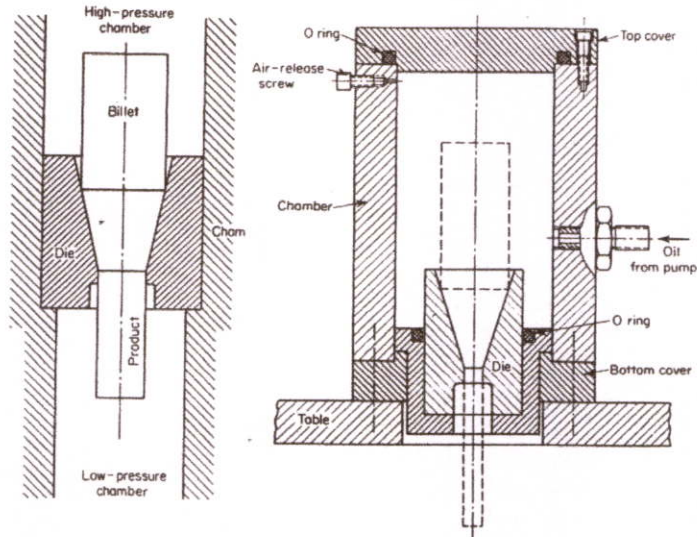


รูปที่ 3.5 ลักษณะการดันขึ้นรูป (a) Direct (b) Indirect (c) Impact extrusion

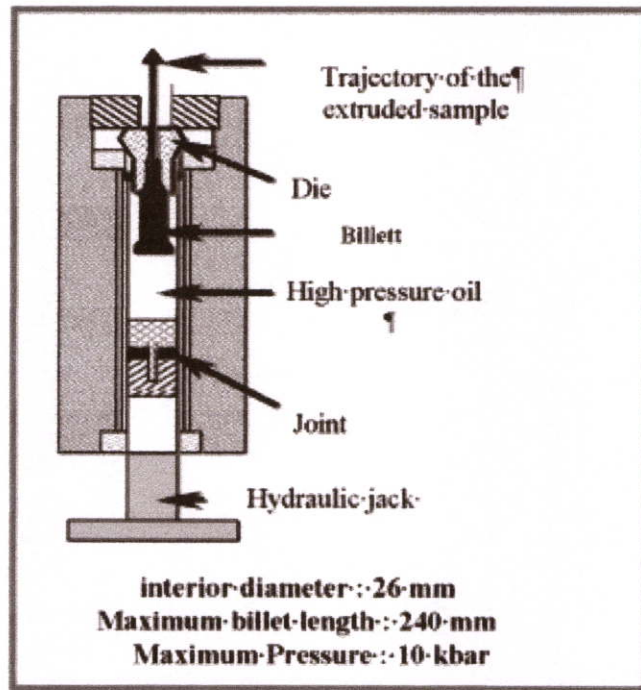


รูปที่ 3.6 กระบวนการขึ้นรูปแบบกระแทกในลักษณะต่างๆ

ในกระบวนการดันขึ้นรูปแบบโดยตรง (Direct Extrusion) นั้นมักจะพบปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็คือ ปัญหาเนื่องจากความเสียด (Friction) ระหว่างผิวสัมผัสของแท่งบิลเล็ตกับเบ้าแม่พิมพ์ (Container) จึงได้มีการนำเอาระบบที่มีของเหลวมาพร้อมกับตัวกระทุ้ง หรือใช้แรงดันของของเหลวดันให้บิลเล็ตไหลผ่านคานแทนตัวกระทุ้ง เรียกว่าการดันขึ้นรูปแบบ Hydrostatic Extrusion มาใช้แทน ซึ่งสามารถลดปัญหาดังกล่าวไปได้ รูปที่ 3.7 แสดงการดันขึ้นรูปโดยใช้ของเหลวแทนตัวกระทุ้ง ส่วนรูปที่ 3.8 ใช้ของเหลวร่วมกับตัวกระทุ้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าผิวของบิลเล็ตหรือวัสดุที่นำมาทำการขึ้นรูปนั้นจะไม่สัมผัสกับเบ้าแม่พิมพ์เลย



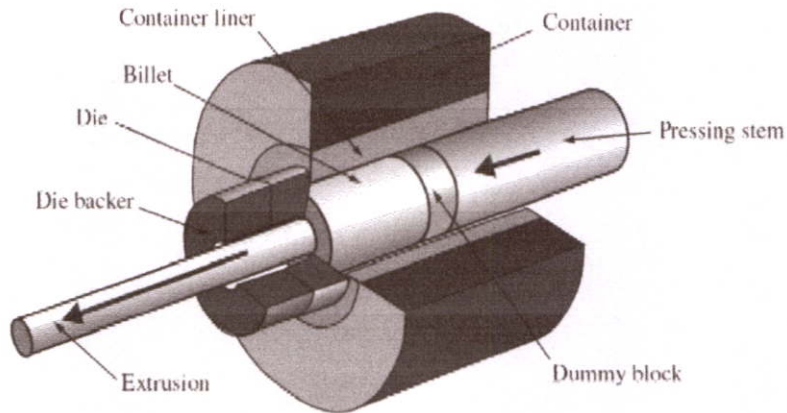
รูปที่ 3.7 แสดงระบบที่ใช้แรงดันของเหลวแทนตัวกระทุ้ง



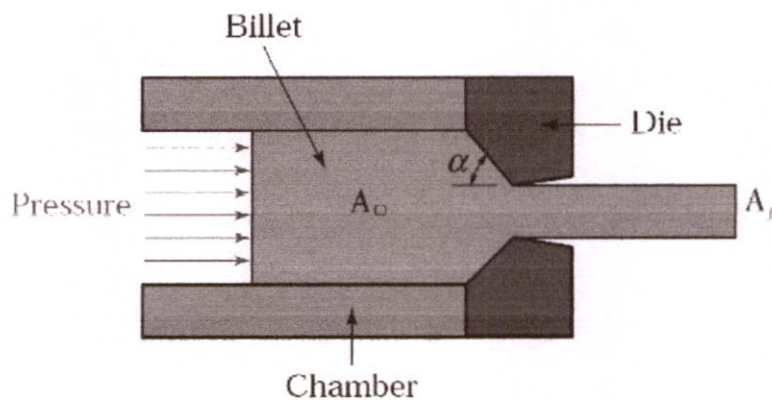
รูปที่ 3.8 การดันขึ้นรูปแบบ Hydrostatic ใช้ของเหลวร่วมกับตัวกระทุ้ง

3.3.1.4 ทฤษฎีของการดันขึ้นรูปแบบการดันขึ้นรูปโดยตรง

ในรูปที่ 3.9 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานสำหรับการดันขึ้นรูปวิธีนี้ ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจับยึดชุดจับตาย เบ้าแม่พิมพ์ ตัวกระทุ้ง และอุปกรณ์เสริมต่างๆ รูปที่ 3.10 แสดงตัวแปรพื้นฐานในกระบวนการดันขึ้นรูปแบบโดยตรง เช่น มุมตาย (Dies angle) อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัด (Reduction ratio of cross section area) ความเร็วในการดันขึ้นรูป (Extrusion speed) อุณหภูมิของบิลเล็ต และสารหล่อลื่นที่มีผลต่อความเสียดทานทุกๆ ผิวสัมผัส



รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์พื้นฐานในการดัดขึ้นรูปแบบโดยตรง



รูปที่ 3.10 แสดงตัวแปรพื้นฐานในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบโดยตรง

เมื่อกล่าวถึงการขึ้นรูปโลหะสิ่งหนึ่งที่มีจะต้องพิจารณาคือ การทำนายโหลดที่กระทำจากภายนอก เพื่อให้โลหะเกิดการไหลและเปลี่ยนแปลงรูปทรงตามที่ต้องการ เนื่องจากในความจริงมักมีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดขึ้นจาก ผลของความเสียดทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่เป็นเอกพันธ์ และการทำให้แข็งด้วยความเครียดที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการเปลี่ยนรูปที่ซับซ้อน จึงเป็นการยากที่จะทำนายแรงหรือภาระที่ต้องการในการขึ้นรูปได้อย่างแม่นยำ โดยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคต่าง และใช้สมมติฐานที่เหมาะสมกับปัญหา ทำให้สามารถประมาณค่าแรงที่ต้องการได้ ในการวิเคราะห์ได้พยายามคำนึงถึง ความไม่แน่นอน ที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยรวมไว้ในสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อให้สามารถประมาณค่าแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป แรงที่เป็นเงื่อนไขบังคับและวิธีการที่โลหะไหลได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่สุด โดยทั่วไปแล้วเทคนิคเหล่านี้ก็มีจุดอ่อนเช่นกันคือ ไม่สามารถที่จะทำนายคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผ่านการเปลี่ยนรูป การเปลี่ยนรูปสูงสุดที่เป็นไปได้ จนกระทั่งแตก หรือการแปรผันของผลจากความเสียดทานระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูป

ในปัจจุบันการคาดคะเนหรือประมาณค่าความเค้นที่ใช้ในการคั่นขึ้นมีอยู่ 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 วิธีดังที่กล่าวมา วิธีที่ 1 นั้นเป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปอย่างง่ายที่สุด วิธีที่ 2 เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างมากเพราะมีความที่แน่นอนในระดับหนึ่งและง่ายต่อการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ 4 ซึ่งมีค่าซับซ้อนและยุ่งยากให้การคำนวณแต่จะให้ผลที่แม่นยำมาก ส่วนในวิธี 3 นั้นเป็นการประมาณค่าสูงสุดในระบบการคั่นขึ้นรูปซึ่งค่าที่คำนวณได้จากวิธีที่ 1 2 และ 4 จะไม่สามารถมีค่ามากกว่านี้ได้

1. การวิเคราะห์การคั่นขึ้นรูปโดยวิธีงานอุดมคติ (Ideal work)

วิธีการง่ายที่สุดสำหรับการทำนายแรงก็คือ การสมดุลงานหรือสมดุลพลังงาน โดยให้งานภายนอกเท่ากับพลังงานที่ใช้ในระหว่างการเปลี่ยนรูปขึ้นงาน กรรมวิธีนี้เป็นการสมมติทางอุดมคติว่า งานภายนอกทั้งหมดใช้ไปในการเปลี่ยนรูปเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ทั้งนี้ไม่ได้คิดถึงผลของความเสียดทานและการเปลี่ยนรูปที่ไม่เป็นเอกพันธ์ งานต่อหน่วยปริมาตรเท่ากับพื้นที่ได้เส้นโค้งความเค้นจริงกับความเครียดจริงภายใต้ขีดจำกัดของความเครียดที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากเป็นวิธีอุดมคติ งานต่อหน่วยปริมาตรมีค่าเท่ากับ

$$w_i = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (4.1)$$

เมื่อ $\epsilon = \ln(A_0/A_f)$

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

$$W_a = F_e\Delta l \quad (4.2)$$

เมื่อ F_e คือแรงที่กระทำกับแท่งโลหะ เพราะฉะนั้นงานต่อหน่วยปริมาตรจะมีค่าเท่ากับ

$$w_a = \frac{W_a}{A_0\Delta l} = \frac{F_e\Delta l}{A_0\Delta l} \quad (4.3)$$

เมื่อนิยามว่า F_e/A_0 คือความเค้นหรือความดันที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป σ_c จะได้

$$w_a = \sigma_c \quad (4.4)$$

สำหรับกรรมวิธีแบบอุดมคติ $w_a = w_i$ แต่ในความเป็นจริง $w_a > w_i$ เพราะฉะนั้นค่าความเค้นที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปเมื่อพิจารณาแบบอุดมคติจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\sigma_C}{\bar{\sigma}} = \ln \frac{A_o}{A_f} = \ln \left(\frac{1}{1-r_e} \right) \quad (4.5)$$

เมื่อ σ_C = ค่าความเค้นดึงหรือคั่นขึ้นรูป

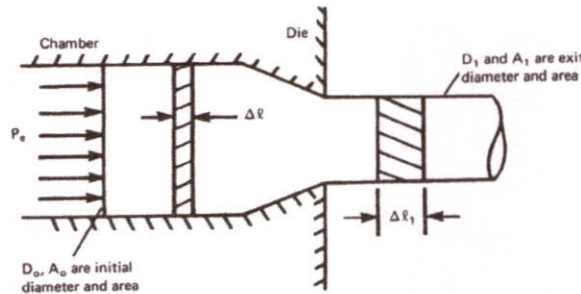
$\bar{\sigma}$ = ค่าความเค้นไหลเฉลี่ยของวัสดุ

A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนเข้าคายน

A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังออกจากคายน

r_e = อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด = $(A_o - A_f) / A_o$

ค่าความเค้นหรือความคั่นที่ได้ในวิธีนี้จะมีค่าต่ำที่สุดในบรรดาวิธีทั้งหมดที่มีอยู่หรือบางครั้งเรียกวิธีนี้ว่า วิธีขอบเขตล่าง (Lower bound solution) ในรูปที่ 3.11 แสดงลักษณะความเค้นหรือความคั่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการคั่นหรือคั่นขึ้นรูปผ่านคายนรูปกรวย เมื่อไม่คำนึงถึงแรงเสียดทานภายในและแรงเฉือนภายในที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.11 แสดงความเค้นหรือความคั่นที่เกิดขึ้นในกระบวนการคั่นขึ้นรูป

พิจารณาค่าแก้สำหรับแรงเสียดทานภายใน และแรงเฉือนภายนอกที่เกิดขึ้น จากสมการที่ 4.5 สามารถเขียนใหม่ได้โดยคูณตัวประกอบในการแก้ไข 2 ตัว ตัวแรกเป็นค่าแก้สำหรับแรงเสียดทานภายนอก $C_f(\alpha)$ ซึ่งฟังก์ชันนี้ขึ้นอยู่กับครึ่งมุมคายน (α) เป็นหลัก และค่าแก้สำหรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายใน $C_i(\alpha, r_e)$ ซึ่งฟังก์ชันนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับครึ่งมุมคายนเท่านั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (r_e) ด้วย โดยที่ครึ่งมุมคายนจะวัดที่ผิวของคายนเทียบกับแกนกลางของชิ้นงาน

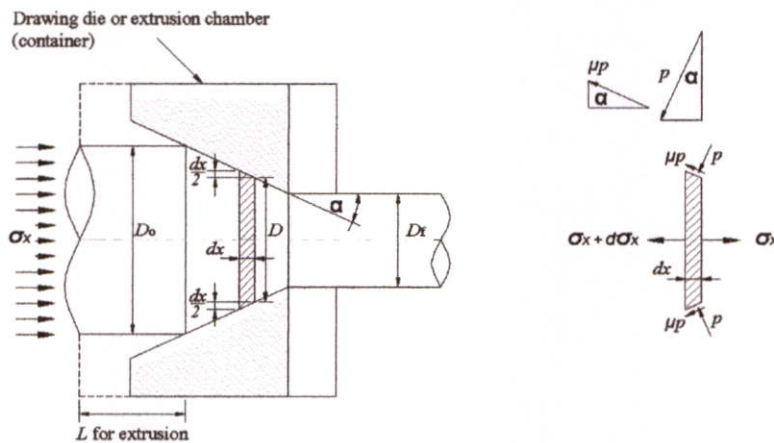
$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r_e) \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (4.6)$$

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r_e) \bar{\sigma} \ln \frac{1}{1-r_e} \quad (4.7)$$

เมื่อ C_f = ฟังก์ชันค่าปรับแก้สำหรับแรงเสียดทานภายนอก
 C_i = ฟังก์ชันค่าปรับแก้สำหรับแรงเฉือนภายใน
 α = ขนาดครึ่งมุมตาย

2. วิธีการสมดุลแรงหรือวิธีแบ่งช่วง (Free-body equilibrium or slab method)

วิธีนี้เรียกว่า วิธีสมดุลวัตถุอิสระ โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นบนโลหะหรือสแลบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน วิธีนี้จะให้สมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งพิจารณาการแปรผันเฉพาะทิศทางเดียวเท่านั้น เมื่อใช้เงื่อนไขที่เหมาะสม การอินทิเกรตสมการนี้จะให้ผลเฉลยของปัญหาซึ่งสมมติฐานที่เหมาะสมประกอบไปด้วย ทิศทางของไหลที่กระทำและระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางนี้ นิยามว่าเป็นทิศทางหลัก และความเค้นหลักไม่แปรผันบนระนาบเหล่านี้ ผลของความเสียดทานที่ผิวรวมอยู่ในสมการสมดุลของแรงแต่ไม่มีผลกระทบต่อการบินเบี่ยงภายในของโลหะ และภาคตัดของระนาบยังคงเป็นระนาบเดิมหลังจากการเปลี่ยนแปลงรูปไปแล้ว ในรูปที่ 3.12 แสดงแท่งโลหะทรงกระบอกถูกดันให้ไหลผ่านดาวยรูปกรวย และสแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรง เนื่องจากความเค้นไม่แปรผันบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ การเปลี่ยนแปลงใดของ σ_x ที่เกิดขึ้นเทียบกับ dx จึงมีเพียงทิศทางเดียวคงรูป ความดันที่เกิดขึ้นที่ดาวยตั้งฉากกับชิ้นงานคือ P และผลของความเสียดทานที่ผิวคือ μP เมื่อ μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน



รูปที่ 3.12 ลักษณะของสแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรง

พิจารณาการสมดุลของแรงในทิศทางแกน x จะได้

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 + P \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \mu P \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 \quad (4.8)$$

จัดรูปสมการให้ง่ายขึ้น และไม่คิดเทอมอนุพันธ์อันดับสูงจะได้

$$\sigma_x dD + Dd\sigma_x + 2Pdx \tan \alpha + 2\mu Pdx = 0 \quad (4.9)$$

แทนค่า $2dx = \frac{dD}{\tan \alpha}$ สมการ 4.9 เขียนใหม่ได้เป็น

$$Dd\sigma_x + 2[\sigma_x + P(1 + \mu \cot \alpha)]dD = 0 \quad (4.10)$$

ก่อนทำการอินทิเกรตสมการ 4.10 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

$$\sigma_y (\pi D dx) + P \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha - \mu P \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = 0 \quad (4.11)$$

จัดรูปสมการ 4.11 ให้ง่ายขึ้นจะได้

$$\sigma_y = -P(1 - \mu \tan \alpha) \quad (4.12)$$

โดยทั่วไปแล้ว $\mu \tan \alpha \ll 1$ ในเทอม $\mu \tan \alpha$ จึงไม่จำเป็นต้องนำมาคิดสมการ 4.12 จะเหลือ

$$\sigma_y = -P \quad (4.13)$$

ซึ่งในสมการที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า σ_y เป็นความเค้นอัด ในพจน์ของความเค้นหลัก เนื่องจากเห็นได้ชัดว่า σ_x เป็นความเค้นดึง ดังนั้น

$$\sigma_x = \sigma_1, \sigma_y = \sigma_3 = -P, \sigma_z = \sigma_2 \quad (4.14)$$

เมื่อพิจารณาเป็นความเครียดในระนาบ จากเกณฑ์การครากของ Von Mises และ Trasca จะได้

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \sigma_x - (-P) \quad (4.15)$$

เมื่อความเค้นเฉือนคราก k คือ $Y/2$ จากเกณฑ์ของ Trasca และ $Y/\sqrt{3}$ จากเกณฑ์ของ Von Mises ดังนั้น เมื่อ Y คือ ความเค้นที่จุดครากของวัสดุ

$$P = 2k - \sigma_x \quad (4.16)$$

แทนค่าสมการ 4.16 ในสมการที่ 4.10 และจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\frac{d\sigma_x}{B\sigma_x - 2k(1+B)} = 2 \frac{dD}{D} \quad (4.17)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 4.17 โดยมีสมมติฐานดังต่อไปนี้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าคงที่ตลอดบริเวณผิวสัมผัสทั้งหมด ในการค้นขึ้นรูปถือว่าค่า $2k$ มีค่าคงที่ และมุมคานยมีค่าคงตัว จะได้ความเค้นที่ใช้ในการค้นขึ้นรูปดังนี้

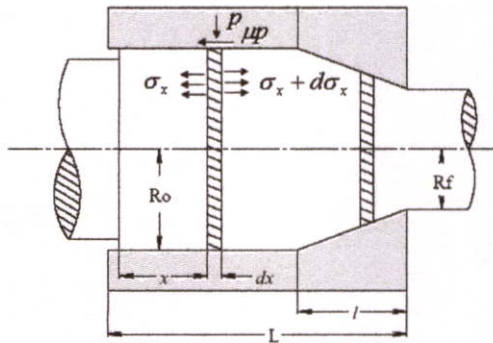
$$\frac{\sigma_c}{2k} = \frac{(1+B)}{B} \left[1 - \left(\frac{D_o}{D_f} \right)^{2B} \right] \quad (4.18)$$

เมื่อ $B = \mu \cot \alpha$

D_o, D_f คือ เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนและหลังการค้นขึ้นรูป

หากทำการพิจารณาความยาวของแท่งอูมิเนียมและเบ้าประคองแล้ว ในรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะทำการดันขึ้นรูป ไม่ได้เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของแท่งโลหะกับคายเพียงอย่างเดียว แต่จะเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของแท่งโลหะกับเบ้าประคองด้วยซึ่งสมการที่ใช้ทำนายหรือประมาณค่าแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปซึ่งมีวิธีและที่มาคล้ายคลึงกับกรณีไม่คิดความเสียดทานระหว่างแท่งโลหะกับเบ้าประคองแสดงดังนี้

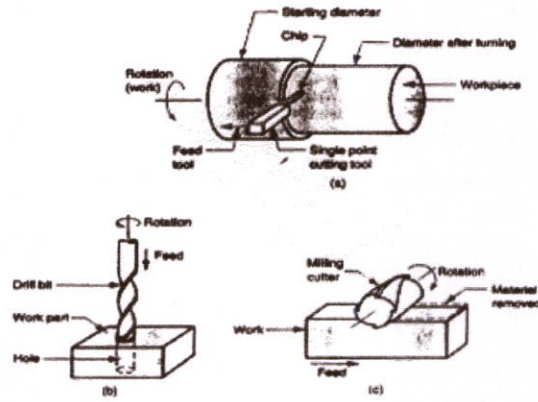
$$\frac{\sigma}{2k} = \left\{ 1 + \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{R_o}{R_f} \right)^{2B} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ 2B \left[\frac{L}{R_o} \tan \alpha - \left(1 - \frac{R_f}{R_o} \right) \right] \right\} - 1 \quad (4.19)$$



รูปที่ 3.13 แสดงสแลบที่ใช้ในการวิเคราะห์การสมดุลแรงเมื่อพิจารณาความเสียดทานระหว่างแท่งโลหะกับเบ้าประคอง

3.4 กระบวนการตัดเศษวัสดุ (Material removal processes)

วัสดุเริ่มต้นจะเป็นของแข็ง ซึ่งจะนำบางส่วนที่ไม่ได้ใช้งานออกไปทำให้เกิดเป็นชิ้นส่วนมีรูปทรงตามต้องการ กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีเครื่องจักรในการทำงาน เช่น การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัด (Milling) ดังรูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนการตัดอย่างง่ายที่ใช้กับวัสดุแข็ง ซึ่งจะต้องมีเครื่องมือตัด (Tooling) ที่แข็งกว่าวัสดุที่นำมาทำการตัด การเจียรใน (Grinding) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งซึ่งจะต้องใช้ล้อหินขัดตัดเศษวัสดุออก ส่วนกระบวนการอื่น ๆ เป็นกระบวนการพิเศษ ได้แก่ การตัดด้วยลำแสงเลเซอร์หรือลำอิเล็กตรอน การใช้สารเคมีกัด การตัดโดยใช้กระแสไฟฟ้า และการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับสารเคมี



รูปที่ 3.14 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 เครื่องจักรเป็นสิ่งแรกที่จะต้องพิจารณา ซึ่งเป็นตัวกำหนดเวลาทำการตัด เครื่องจักรเหล่านี้หลายอย่างเรียกรวมว่า Machine Tool ซึ่งจะทำหน้าที่จับเครื่องมือขึ้นรูปงานโดยมีคนควบคุม ในปัจจุบันเครื่องจักรที่ทันสมัยขึ้นจะเป็นแบบอัตโนมัติ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรมาจากไฟฟ้า หรือไอน้ำ เครื่องจักรที่นำมาใช้ควรเลือกให้สามารถใช้งานได้หลายอย่าง เครื่องจักรในการผลิตอื่น ๆ เช่น เครื่องกดอัด (Press) ใช้ในขั้นตอนการกดขึ้นรูป Forge hammer ใช้สำหรับการรีดขึ้นรูปด้วยความร้อน Rolling mills ใช้สำหรับการรีดโลหะแผ่น เครื่องเชื่อม (Welding Machines) ใช้สำหรับทำการเชื่อม Insertion Machines ใช้สำหรับการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจรถอกจากนี้ชื่อของเครื่องจักรจะเป็นไปตามชื่อกระบวนการ

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

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในงานวิจัยและทดลองเพื่อศึกษาถึง ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบยื่นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียมนี้ทำการทดลองและพิจารณาตัวแปรดังนี้คือ ขนาดครึ่งมุมคาย อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความเร็วของการดัดขึ้นรูป และสารหล่อลื่นที่ใช้ลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ภายหลังจากการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมแล้วนำแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการดัดขึ้นรูปนั้นไปทำการทดสอบและวัดค่า เพื่อบันทึกเป็นผลการทดลองและใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลต่อไป ในขั้นตอนการดัดขึ้นรูปตลอดจนกระทั่งถึงขั้นตอนในการทดสอบและวัดค่า มีการนำเครื่องมือ เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆมาใช้ในการทดลอง การทดสอบและเก็บผลการทดลอง ซึ่งในวิทยานิพนธ์บทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาตั้งแต่วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง อุปกรณ์เครื่องมือเครื่องจักรรวมถึงวิธีและขั้นตอนในการทดลอง ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อหลัก ๆ ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและทดสอบ
3. ตัวแปรในการทดลอง แผนการทดลองและคุณสมบัติที่วิเคราะห์ภายหลังการดัดขึ้นรูป
4. ขั้นตอนและวิธีในการทดลอง

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบยื่นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม เลือกใช้อลูมิเนียมที่สามารถหาซื้อได้ในบริษัทจำหน่ายโลหะทั่วไป และใช้วัสดุสารหล่อลื่น 2 แบบ คือ สารหล่อลื่นแบบของแข็งและแบบของเหลว ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ของอลูมิเนียมและสารหล่อลื่นที่เลือกใช้แสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 อลูมิเนียม

อลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองเลือกใช้อลูมิเนียมแท่ง หน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว หรือประมาณ 13 มิลลิเมตร ชื่อที่ใช้เรียกตามมาตรฐานของ Aluminum Association Number คือ Al6063 หรือ Aluminum Alloy 6063 มีส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และค่าคุณสมบัติเฉพาะแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ส่วนค่าความแข็งแรงของวัสดุ ได้มีการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติเหล่านี้โดยการทดสอบด้วยแรงอัด ขนาดของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดสอบใช้ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Material (ASTM) ความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงทดสอบ (Gauge length) 10 และ 9 มิลลิเมตร ตามลำดับ ความเร็วในการอัด 1

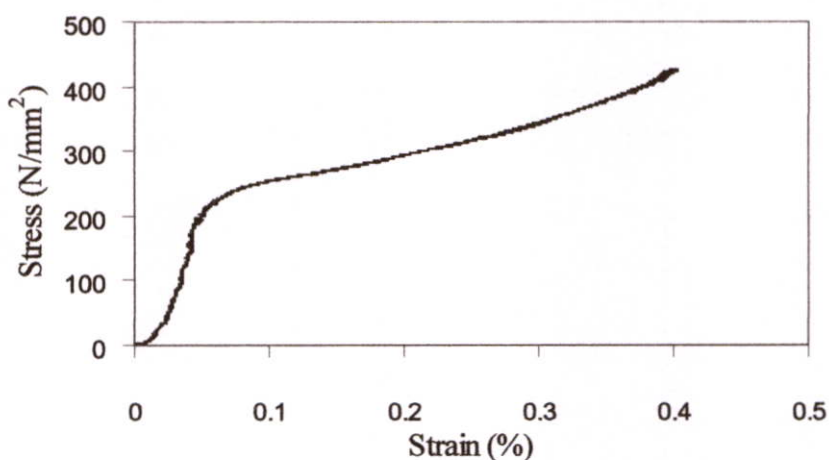
มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดสอบแสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แสดงในรูปที่ 4.1 จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ได้ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield strength Y) เท่ากับ 210 Mpa

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของ Al 6063 (% โดยน้ำหนัก)

ส่วนผสม	Al	Cu	Mg	Si	Cr
% โดย นน.	95.85	0.30	1.0	0.60	0.20

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเฉพาะของ Al 6063

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



รูปที่ 4.1 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบด้วยการอัด (Compression Test) ของอลูมิเนียม 6063

4.1.2 วัสดุสารหล่อลื่น

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปวัสดุนั้น เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเลือกใช้เครื่องจักรเพื่อให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่าง หากแรงเสียดทานมีค่ามากเครื่องจักรจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่หรือใช้กำลังงานมากเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานดังกล่าว หากทำให้แรงเสียดทานดังกล่าวมีค่าลดลงหรือหายไปได้ การขึ้นรูปวัสดุก็จะสามารถทำได้ง่ายขึ้น โดยใช้พลังงานน้อยลงหรือขนาดของเครื่องจักรที่เล็กลงได้ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้วัสดุหล่อลื่นเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสให้มีคุณสมบัติที่ต่างกันทั้งหมด 3 ชนิดดังนี้

1. สบู่โซเดียมผง (Sodium Stearate Soap Na-ST)

สบู่โซเดียมมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวคล้ายแป้ง ซึ่งสบู่โซเดียมนี้เป็นสารหล่อลื่นที่ใช้เพื่อลดความเสียดทานในอุตสาหกรรมดึงและดันขึ้นรูปโลหะในปัจจุบัน ซึ่งได้รับการสนับสนุนจาก บ.อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมิคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับคุณสมบัติเฉพาะของสบู่โซเดียมนี้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของสบู่โซเดียม

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

2. น้ำมันหล่อลื่น SAE 40

น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 (Society of Automotive Engineer) เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สำหรับหล่อลื่นชิ้นส่วนในเครื่องจักรกลทั่วไป ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 สามารถหาได้จากหนังสือทั่วไป และคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น SEA 40 มีใช้โดยทั่วไปจะมีค่าความหนาแน่นประมาณ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 °C มีค่าประมาณ 0.11405 (Pa·s)

3. น้ำมันมะพร้าวดิบ

น้ำมันมะพร้าวที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำมันมะพร้าวดิบที่ยังไม่ได้ผ่านการกำจัดไขมันออก ซึ่งสามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาด ในราคาลิตรละ 23-25 บาท ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันมะพร้าว

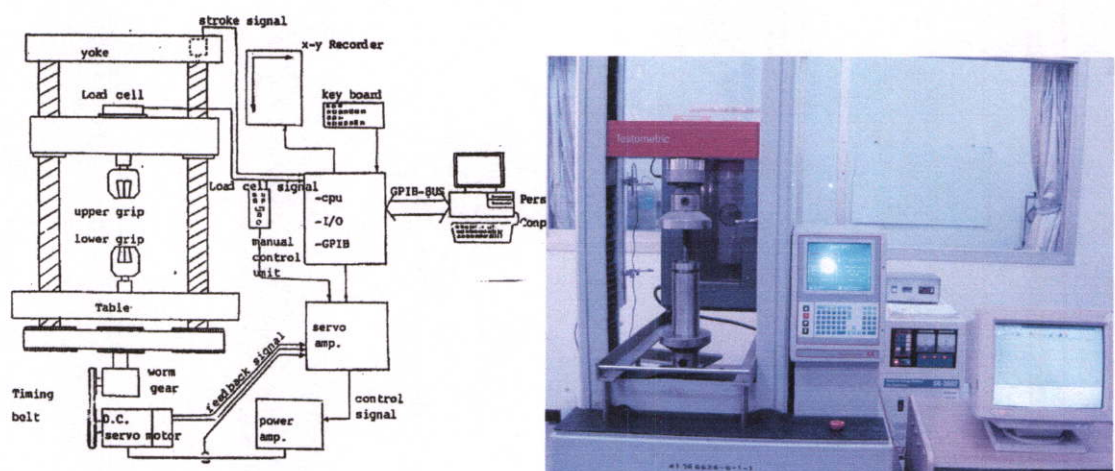
ที่ใช้โดยทั่วไปจะมีค่าความหนาแน่นประมาณ $915 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ $40 \text{ }^\circ\text{C}$ มีค่าประมาณ $0.03159 \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$ และแรงตึงผิว 0.0348 (N/m)

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและทดสอบ

ในการคั้นขึ้นรูป แท่งโลหะจะถูกคั้นให้ไหลผ่านคายนด้วยแรงกดผ่านทางหัวกด (Punch หรือ Ram) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีรูปร่างตามรูปแบบของคายนที่ใช้ ซึ่งในการคั้นขึ้นรูปต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์อีกหลายชนิด นอกเหนือจากคายนและหัวกดแล้วยังต้องมีเครื่องจักรสำหรับสร้างแรงขับเคลื่อนให้หัวกดอีก และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังการคั้นขึ้นรูปด้วย เพื่อให้ได้ผลการทดลองและทดสอบที่มีค่าแม่นยำ จึงมีการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ทันสมัยช่วยในการทดสอบซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 เครื่องทดสอบวัสดุ

ในการทดลองเพื่อศึกษาถึง ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรในกระบวนการคั้นขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม ใช้เครื่องทดสอบวัสดุรุ่น Testometric machine test Model AX-100 kN เพื่อสร้างแรงกดให้แท่งอลูมิเนียมไหลผ่านคายนผ่านทางหัวกด (punch) ซึ่งเครื่องทดสอบวัสดุนี้สามารถสร้างแรงกดได้สูงสุด 10 ตัน หรือ 10000 กิโลกรัม และสามารถควบคุมการทำงานต่างๆ รวมถึงการประมวลผล และบันทึกผลได้โดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งโคอะแกรมการทำงานและลักษณะของเครื่องทดสอบวัสดุแสดงในรูปที่ 4.2

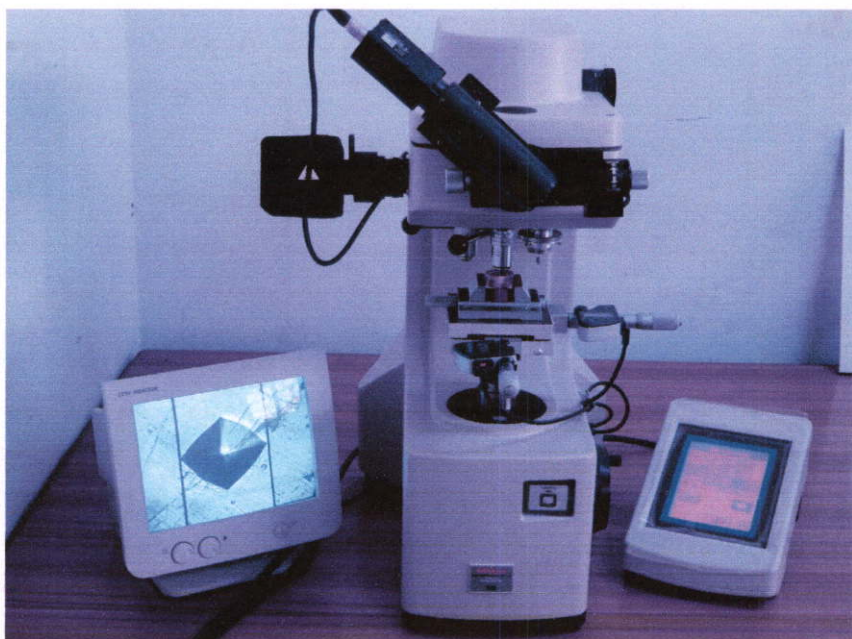


รูปที่ 4.2 แสดงโคอะแกรมและภาพด้านหน้าของเครื่องทดสอบวัสดุ

4.2.2 เครื่องทดสอบค่าความแข็ง

ภายหลังจากการทดลองคั้นขึ้นรูปแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบค่าความแข็ง โดยการทดสอบและวัดค่าความแข็งทดสอบและวัดค่าโดยเครื่องทดสอบค่าความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์

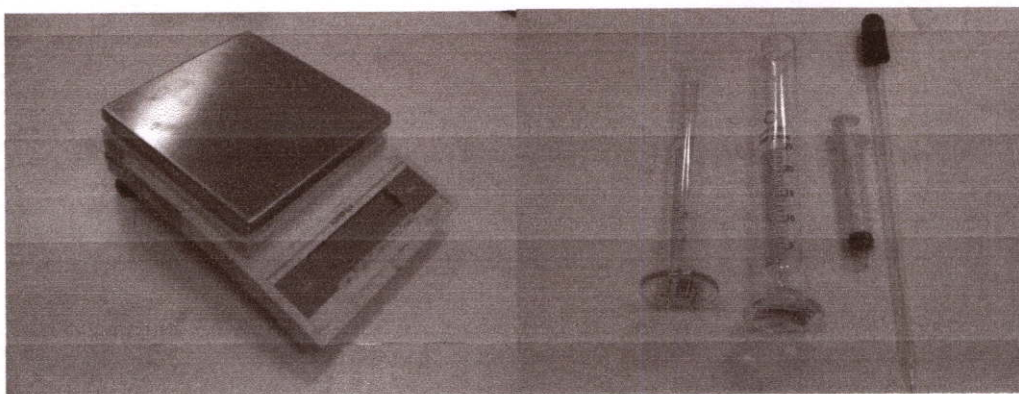
(Micro Vickers Hardness Testing) หรือที่เรียกกันว่า วิคเกอร์สเกล (HV) Model H-M113 ของ บริษัท Mitutoyo ใช้น้ำหนักในการกดชิ้นงาน 0.3 กิโลกรัม หรือประมาณ 3 นิวตัน และเวลาในการกด 10 วินาที ซึ่งการทดสอบแบบไมโครวิคเกอร์นี้รอยกดที่ได้จะมีขนาดเล็ก การวัดขนาดของรอยกดต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ ในการวัดขนาด ซึ่งวิธีการวัดแบบนี้เหมาะสำหรับการวัดและทดสอบในบริเวณพื้นที่แคบและพื้นที่ที่ต้องการความละเอียดสูงอย่างเช่น บนพื้นที่หน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการดัดขึ้นรูปแล้ว ซึ่งเครื่องทดสอบค่าความแข็งนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เครื่องทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิคเกอร์

4.2.3 ตราชั่งตติจิจดอลและกระบอกตวง

ตราชั่งน้ำหนักแบบตติจิจดอลและกระบอกตวง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการดัดขึ้นรูปแล้ว โดยการใช้หลักการจากสมการค่าความหนาแน่นของสสาร คือ $\rho = \frac{m}{V}$ (g/cm^3) เมื่อ m คือ มวลของแท่งอลูมิเนียมซึ่งได้จากการชั่งและอ่านค่าจากตราชั่ง และ V คือ ปริมาตรของแท่งอลูมิเนียมซึ่งได้จากการเพิ่มขึ้นของน้ำในกระบอกตวงหลังจากใส่แท่งอลูมิเนียมลงไป ซึ่งอุปกรณ์ในการหาค่าความหนาแน่นแสดงไว้ในรูปที่ 4.4

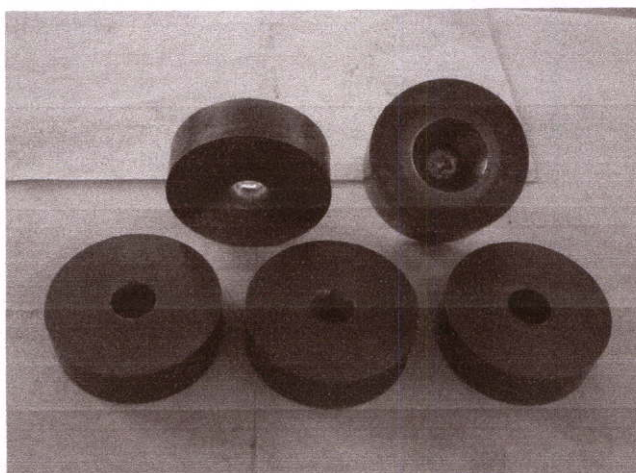


รูปที่ 4.4 ตราชั่งดิจิตอลและกระบอกดวง

4.2.4 ชุดคาย

ชุดคายที่ใช้ในการทดลองทำขึ้นจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับทำแม่พิมพ์ในงานขึ้นรูปเย็น ซึ่งภายหลังจากผ่านกระบวนการตัดกลึงเพื่อให้ได้รูปทรงตามแบบแล้วนำไปผ่านกระบวนการชุบแข็งเพื่อให้วัสดุมีความแข็งและทนต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น หลังจากการชุบแข็งแล้วค่าความแข็งของคายมีค่าอยู่ระหว่าง 59-60 HRC ลักษณะของชุดคายที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5 ชุดคายที่ใช้ในการทดลองมีขนาดครึ่งมมคาย 3 ขนาดดังนี้

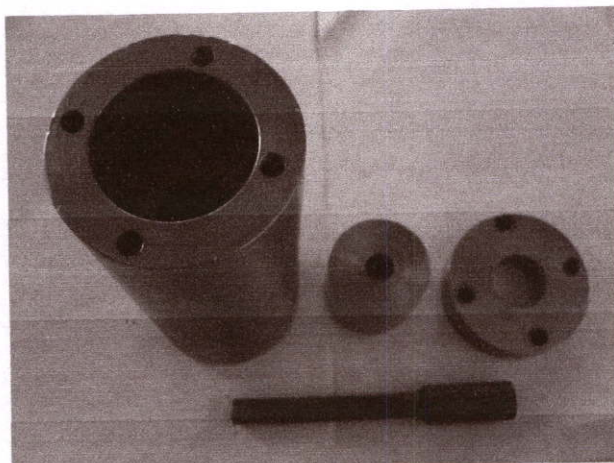
1. ครึ่งมมคาย 15 องศา โดยแบ่งออกเป็น 4 ตัว ตามอัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดคือ 20 30 35 และ 43 เปอร์เซ็นต์
2. ครึ่งมมคาย 22.5 องศา โดยแบ่งออกเป็น 4 ตัว ตามอัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดคือ 20 30 35 และ 43 เปอร์เซ็นต์
3. ครึ่งมมคาย 30 องศา 1 ตัว อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัด 41 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.5 ชุดคายที่ใช้ในการทดลอง

4.2.5 ชุดจับยึดตายและอุปกรณ์ในการดัดขึ้นรูป

ในรูปที่ 4.6 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดชุดตายขณะทำการดัดขึ้นรูป ซึ่งประกอบไปด้วย ชุดจับตาย (Die holder) เบ้าประคอง (Container) แหวนล็อกเบ้าประคอง (Ring holder) และตัวกด (Punch) ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดทำขึ้นจากเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 และผ่านกรรมวิธีชุบแข็ง เช่นเดียวกับกับชุดตาย



รูปที่ 4.6 แสดงชุดจับยึดตายขณะทำการดัดขึ้นรูป

4.3 แผนการทดลอง

ในกระบวนการดัดขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษาและทดลองนี้ ได้ทำการเลือกตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปมาทั้งหมด 4 ตัวแปรคือ

1. ขนาดครึ่งมุมตาย
2. อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด
3. ความเร็วในการดัดขึ้นรูป
4. สารหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส

ซึ่งตัวแปรที่ทำการเลือกมาข้างต้นนั้น จะทำการเปลี่ยนแปลงให้สถานะที่ใช้ในการทดลองมีสถานะที่แตกต่างกันเพื่อจะสามารถทำการศึกษาได้ชัดเจนว่า ตัวแปรดังกล่าวที่เลือกมานั้นส่งผลอย่างไรกับคุณสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียมตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สรุปเป็นตารางแผนการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 แผนการทดลองของกรณีเครื่องมุดาย 15 องศา

เครื่องมุดาย (องศา)	สารหล่อลื่น	อัตราส่วนการลดขนาด พื้นที่หน้าตัด (%)	ความเร็วในการดันขึ้นรูป (mm / min)
15	1.สบูโซเดียม 2.SAE 40 3.น้ำมันมะพร้าว	20	5
		20	10
		35	20
		43	30
			35
			40
			50

จากตารางแผนการทดลองที่ 4.4 เครื่องมุดายที่ใช้ในการทดลองคือขนาด 15 องศา ใช้สารหล่อลื่นสำหรับเครื่องมุดายนี้ทั้งหมด 3 ชนิด และสารหล่อลื่นแต่ละชนิดจะทำการทดลองที่อัตราส่วนการลดขนาดทั้งหมด 4 ขนาดคือ 20 30 35 และ 43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแต่ละขนาดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการดันขึ้นรูปทั้งหมด 7 ความเร็ว ซึ่งค่าที่น้อยที่สุดในการทดลอง มีค่าน้อยกว่าค่ามากที่สุดในการทดลอง 10 เท่า และในการทดลองในแต่ละครั้งมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้งเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแน่นอน สรุปจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลอง (คิดจำนวนครั้งแบบไม่มีการทำซ้ำ) 84 ครั้ง

ตารางที่ 4.5 แผนการทดลองของกรณีเครื่องมุดาย 22.5 องศา

เครื่องมุดาย (องศา)	สารหล่อลื่น	อัตราส่วนการลดขนาด พื้นที่หน้าตัด (%)	ความเร็วในการดันขึ้นรูป (mm / min)
22.5	1.สบูโซเดียม 2.SAE 40 3.น้ำมันมะพร้าว	20	5
		30	10
		35	20
		43	30
			35
			40
			50

จากตารางแผนการทดลองที่ 4.5 เครื่องมุดคายที่ใช้ในการทดลองคือขนาด 22.5 องศา ใช้สารหล่อลื่นสำหรับเครื่องมุดคายนี้นี้ทั้งหมด 3 ชนิด และสารหล่อลื่นแต่ละชนิดจะทำการทดลองที่อัตราส่วนการลดขนาดทั้งหมด 4 ขนาดคือ 20 30 35 และ 43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดแต่ละขนาดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการดันขึ้นรูปทั้งหมด 7 ค่าซึ่งค่าที่น้อยที่สุดในการทดลอง มีค่าน้อยกว่าค่ามากที่สุดในการทดลอง 10 เท่า และในการทดลองในแต่ละครั้งมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้งเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแน่นอน สรุปจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลอง (คิดจำนวนครั้งแบบไม่มีการทำซ้ำ) 84 ครั้ง

ตารางที่ 4.6 แผนการทดลองของกรณีเครื่องมุดคาย 30 องศา

เครื่องมุดคาย (องศา)	สารหล่อลื่น	อัตราส่วนการลดขนาด พื้นที่หน้าตัด (%)	ความเร็วในการดันขึ้นรูป (mm / min)
30	1.สนูโซเดียม 2.SAE 40 3.น้ำมันมะพร้าว	41	5
			10
			20
			30
			35
			40
			50

จากตารางแผนการทดลองที่ 4.6 เครื่องมุดคายที่ใช้ในการทดลองคือขนาด 30 องศา ใช้สารหล่อลื่นสำหรับเครื่องมุดคายนี้นี้ทั้งหมด 3 ชนิด และสารหล่อลื่นแต่ละชนิดจะทำการทดลองที่อัตราส่วนการลดขนาดเพียง 1 ขนาดคือ 41 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการดันขึ้นรูปทั้งหมด 7 ค่าซึ่งค่าที่น้อยที่สุดในการทดลองมีค่าน้อยกว่าค่ามากที่สุดในการทดลอง 10 เท่า และในการทดลองในแต่ละครั้งมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้งเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแน่นอน สรุปจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลอง (คิดจำนวนครั้งแบบไม่มีการทำซ้ำ) 21 ครั้ง

ภายหลังจากการดันขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมตามแผนการทดลองแล้ว ผลที่ได้จากการดันขึ้นรูปที่จะทำการศึกษาและบันทึกผลการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไปนั้นมีดังนี้

1. ความเค้นในการดันขึ้นรูป
2. ความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมหลังจากการดันขึ้นรูป
3. ความแข็งภายในของแท่งอลูมิเนียมหลังจากการดันขึ้นรูป

4.4 ขั้นตอนการทดลอง

เพื่อให้การทดลองเป็นไปตามขั้นตอนและถูกต้องมากที่สุด ในการทดลองแต่ละครั้งจึงต้องมีการเตรียมชิ้นงานหรือแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองให้มีขนาดเท่าๆกัน รวมไปถึงสภาวะที่ใช้ในการทดลองหรือวิธีที่ใช้ในการทดสอบและวัดค่าแต่ละครั้ง ก็ต้องอยู่ในสภาวะและวิธีเดียวกันด้วย ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนของการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

4.4.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานหรือแท่งอลูมิเนียม

แท่งอลูมิเนียมที่กำหนดไว้ในร้านวัสดุโดยปกติจะมีความยาว 6 เมตร นำมาตัดให้มีความยาวมากกว่า 40 มิลลิเมตรเพียงเล็กน้อยด้วยเลื่อยกลขณะตัดใช้น้ำมันตัดกลึงช่วยหล่อเย็นเพื่อให้คุณสมบัติทางกลของแท่งอลูมิเนียมไม่เปลี่ยนแปลง ภายหลังจากการตัดให้เป็นท่อนสั้นแล้วทำการปาดหน้าแท่งอลูมิเนียมที่ได้ให้เรียบโดยเครื่องกลึงให้มีขนาด 40 มิลลิเมตร จากนั้นทำความสะอาดแท่งอลูมิเนียมที่ได้ให้ปราศจากคราบน้ำมันเพื่อนำไปทำการทดลองต่อไป

4.4.2 ขั้นตอนระหว่างการดัดขึ้นรูป

1. ประกอบชุดจับยึดคาน คาย เบ้าประคองแท่งอลูมิเนียม และแหวนล็อกเบ้าประคองเข้าด้วยกันแล้วขันน็อตล็อกให้แน่น
2. นำแท่งอลูมิเนียมที่ตัดไว้ชุบเคลือบผิวด้วยสารหล่อลื่นชนิดโคซนิคหนึ่ง ใส่ลงในเบ้าประคองตามด้วยตัวกด
3. วางชุดทดลองทั้งหมดลงบนแท่นของเครื่องทดสอบวัสดุ จากนั้นเริ่มทำการกดแท่งอลูมิเนียมโดยควบคุมการทำงานของเครื่องผ่านทางคอมพิวเตอร์ควบคุม
4. เมื่อกดให้แท่งอลูมิเนียมไหลออกจากคานแล้วบันทึกผลการทดลองค่าความเค้นในการดัดขึ้นรูปนำชิ้นงานออกมาทำความสะอาดเพื่อทำการทดสอบในขั้นต่อไป
5. ทำความสะอาดชุดทดลองเพื่อทำการดัดขึ้นรูปในครั้งต่อไป

4.4.3 ขั้นตอนภายหลังการดัดขึ้นรูป

4.4.3.1 ขั้นตอนการหาค่าความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียม

ภายหลังจากการทำความสะอาดแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการดัดขึ้นรูปแล้ว นำแท่งอลูมิเนียมที่ได้มาทำการชั่งน้ำหนักด้วยตราชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล แสดงผลของน้ำหนักหน่วยเป็นกรัม (g) จากนั้นทำการหาปริมาตรของแท่งอลูมิเนียมโดยใช้หลักการแทนที่ของน้ำในกระบอกตวง ซึ่งกระบอกตวงจะมีสเกลบอกปริมาตรน้ำมีหน่วยเป็นมิลลิลิตร (ml) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) ซึ่งเมื่อทำการหาค่าความหนาแน่นโดยการนำน้ำหนักหารด้วยปริมาตรของแท่งอลูมิเนียมหน่วยที่ได้มีค่าเท่ากับ (g/cm^3) ซึ่งก็คือหน่วยของค่าความหนาแน่น

4.4.3.2 ขั้นตอนการวัดค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม

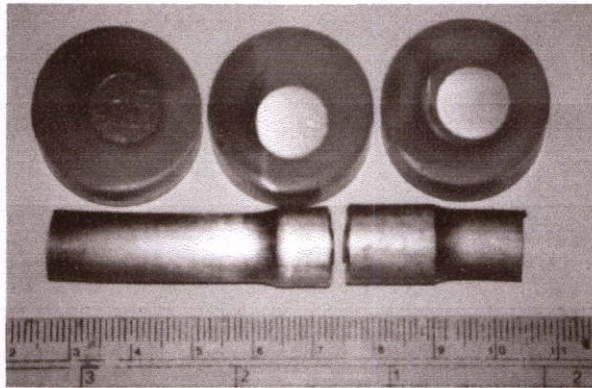
ภายหลังการคั้นขึ้นรูปและหาค่าความหนาแน่นแล้ว

1. นำแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการคั้นขึ้นรูปมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ความยาวประมาณ 10-15 มิลลิเมตร หล่อเย็นด้วยน้ำขณะทำการตัด

2. นำชิ้นอลูมิเนียมที่ตัดแล้วไปใส่ในเบ้าหล่อเรซินเทอร์ซินเหลวลงไปเมื่อเรซินแข็งตัวจะทำให้สามารถจับชิ้นงานเพื่อขัดผิวได้ง่ายขึ้น

3. นำอลูมิเนียมที่หล่ออยู่ในเรซินไปทำการขัดผิวด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 1200 เพื่อลบรอยที่เกิดจากการตัดให้หายไป จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดและผงอลูมินาเพื่อให้รอยที่เกิดขึ้นจากกระดาษทรายหายไป จุดประสงค์ของการขัดผิวบริเวณที่จะทำการวัดค่าความแข็งเพื่อ ให้สามารถมองเห็นรอยกดได้ชัดเจนเกิดความผิดพลาดในการวัดน้อยที่สุด และกำจัดค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการตัด ซึ่งรอยจากการตัดจะเกิดความเครียดซึ่งค่าความเครียดเหล่านี้ส่งผลกับค่าความแข็งที่ได้ทำให้ค่าความแข็งมีค่าไม่แน่นอน

4. นำชิ้นงานที่ขัดแล้วไปทดสอบค่าความแข็ง โดยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมรโครวิกเกอร์ ใช้น้ำหนักในการกดชิ้นงาน 0.3 กิโลกรัม หรือประมาณ 3 นิวตัน และเวลาในการกด 10 วินาที ในการวัดค่าความแข็งทำการวัดจากจุดศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมจนถึงขอบของแท่งอลูมิเนียม ทำการบันทึกผล



รูปที่ 4.7 แท่งอลูมิเนียมหลังจากหล่อรวมกับเรซิน

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในการดำเนินการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองตามตัวแปรในกระบวนการดันขึ้นรูป 4 ตัวแปรคือ ขนาดครึ่งมุมตาย สภาวะสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และความเร็วในการดันขึ้นรูป ซึ่งหลังจากการทดลองดันขึ้นรูปและทดสอบค่าต่างๆแล้ว มีการบันทึกผลการทดลองโดยผลการทดลองที่บันทึก คือ ความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูป ค่าความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียม และค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ความเค้นในการดันขึ้นรูป (Extrusion stress)

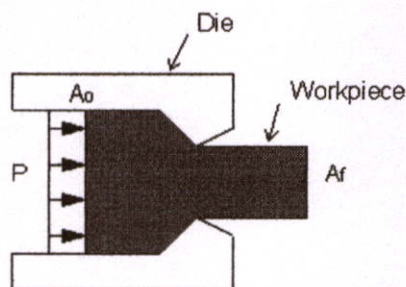
ความเค้นในการดันขึ้นรูปหรือเรียกว่าความดันในการขึ้นรูป (Extrusion pressure) ค่าความเค้นในการดันขึ้นรูปนี้สามารถบันทึกผลได้โดยตรง ผ่านทางโพลีเซลล์ของเครื่องทดสอบวัสดุ ซึ่งแรงที่กระทำผ่านทางโพลีเซลล์จะถูกส่งไปประมวลผลร่วมกับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมในคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมเครื่อง ก่อนทำการทดลองจะต้องกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมเข้าไปด้วย ซึ่งขนาดของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้น ค่าความเค้นที่ได้ขณะดันขึ้นรูปจากเครื่องทดสอบวัสดุจะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับ แรงที่ใช้ในการกดแท่งอลูมิเนียม แสดงตามสมการที่ 5.1 คือ

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

เมื่อ σ_c, P คือ ความเค้นหรือความดันที่ใช้ในการดันขึ้นรูป

F คือ แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป

A_o คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมก่อนการทดลอง มีค่าประมาณ 132.732 mm^2



รูปที่ 5.1 ลักษณะของความเค้นหรือความดันที่เกิดขึ้นกับแท่งอลูมิเนียมในการดันขึ้นรูป

5.1.1 ผลการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา ($\alpha = 15^\circ$)

ในการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา มีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทั้งหมด 3 ชนิดด้วยกัน คือ สบู่โซเดียมผง น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และ น้ำมันมะพร้าวดิบ สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของครึ่งมุมคาย 15 องศา มีทั้งหมด 4 ขนาด คือ 20 30 35 และ 43 เปอร์เซ็นต์ และในการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดแต่ละค่านี้ทำการดัดขึ้นรูปที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็วคือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที สรุปผลการทดลองการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศาแสดงในตารางที่ 5.1 และผลที่ได้แสดงแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

ตารางที่ 5.1 การดัดขึ้นรูปที่สภาวะ $\alpha = 15^\circ$ แยกตามชนิดของสารหล่อลื่นและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด

$\alpha = 15^\circ$		อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (%)			
		20	30	35	43
สารหล่อลื่น	สบู่โซเดียม	O	O	O	-
	SAE 40	O	O	-	-
	น้ำมันมะพร้าว	O	-	-	-
	ไม่ใช้สารหล่อลื่น	-	-	-	-

O = ดัดขึ้นรูปได้, - = ดัดขึ้นรูปไม่สำเร็จ

5.1.1.1 ใช้สบู่โซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น

1. ดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา ใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% จากการดัดที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 58.31 58.42 56.94 58.43 59.24 58.55 และ 59.77 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 439.305 440.134 428.983 440.209 446.311 441.113 และ 450.304 N/mm^2 ตามลำดับ

2. ดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา ใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% จากการดัดที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 73.98 75.86 76.52 75.89 75.49 78.6 และ 77.06 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 557.362 571.526 576.498 571.752 568.738 592.169 และ 580.567 N/mm^2 ตามลำดับ

3. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมตาย 15 องศา ใช้สไปซ์เทียม เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35% จากการดันที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 93.68 98.42 98.36 97.56 97.95 98.76 และ 98.73 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 705.781 741.492 741.04 735.013 737.951 744.054 และ 743.828 N/mm^2 ตามลำดับ

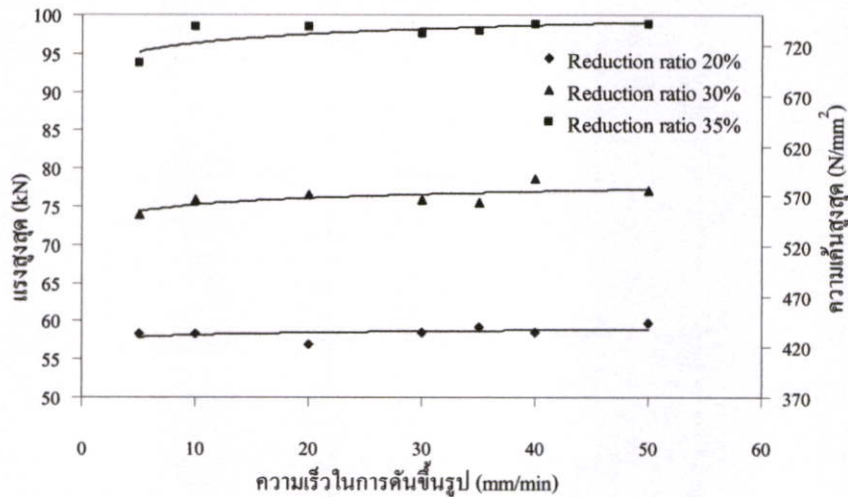
4. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมตาย 15 องศา ใช้สไปซ์เทียม เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43% ไม่สามารถทำการดันขึ้นรูปได้ ซึ่งเกินขีดความสามารถของโพลีเอทิลีน เครื่องทดสอบวัสดุ

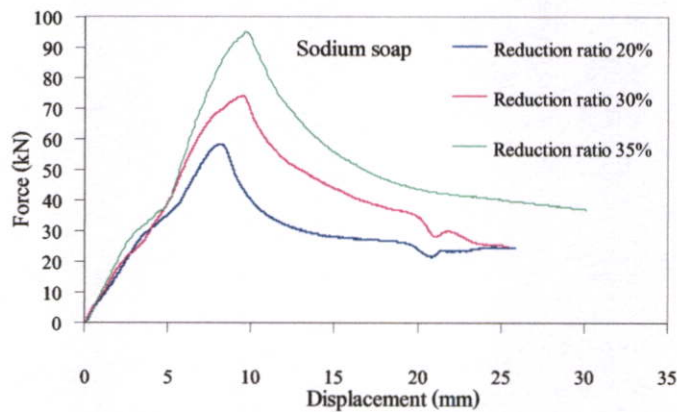
ตารางที่ 5.2 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสไปซ์เทียม

$r_e = 20$ 30 35 และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

ความเร็ว (mm/min)	5	10	20	30	35	40	50
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%							
แรง (kN)	58.31	58.42	56.94	58.43	59.24	58.55	59.77
ความเค้น (N/mm^2)	439.305	440.134	428.983	440.209	446.311	441.113	450.304
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%							
แรง (kN)	73.98	75.86	76.52	75.89	75.49	78.6	77.06
ความเค้น (N/mm^2)	557.362	571.526	576.498	571.752	568.738	592.169	580.567
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35%							
แรง (kN)	93.68	98.42	98.36	97.56	97.95	98.76	98.73
ความเค้น (N/mm^2)	705.781	741.492	741.04	735.013	737.951	744.054	743.828
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43%							
แรง (kN)	เกิน 100 kN						
ความเค้น (N/mm^2)	-						



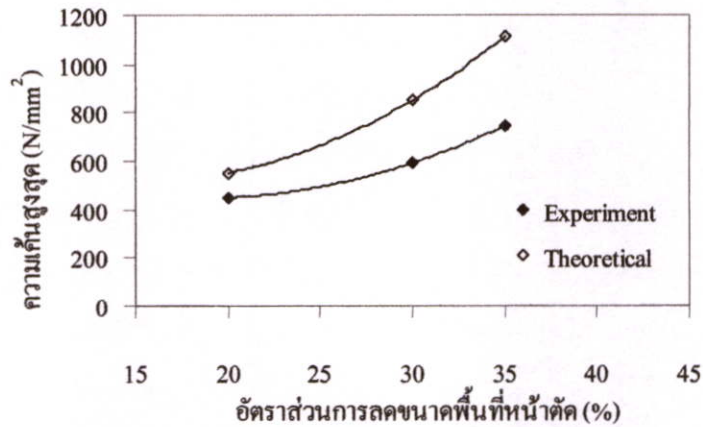
รูปที่ 5.2 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม $r_c = 20\ 30$ และ 35% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ $50\ mm / min$



รูปที่ 5.3 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม ความเร็ว $5\ mm / min$

ในรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการดัดขึ้นรูปที่สภาวะ ครึ่งมุมตาย 15 องศา ใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด $20\ 30$ และ 35 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการดัดขึ้นรูป $5\ 10\ 20\ 30\ 35\ 40$ และ 50 มิลลิเมตรต่ออนาที จากผลการทดลองเมื่อทำการดัดขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่ออนาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ช้าที่สุดที่ใช้ในการทดลอง แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ แรงและความเค้นที่ได้จากการดัดขึ้นรูปที่ความเร็วสูงขึ้นอีก 10 เท่าคือที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่ออนาทีเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.2 นั้นจะเห็นได้ว่าผลของความเร็วที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปส่งผลกระทบต่อขนาดของแรงและความเค้นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป

และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้น แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการค้ำขึ้นรูปก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ในการค้ำขึ้นรูปสามารถค้ำขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดเพียง 35 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เนื่องจากการค้ำขึ้นรูปที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43 เปอร์เซ็นต์ ใช้แรงในการค้ำขึ้นรูปสูงเกินกว่าขีดจำกัดของเครื่องทดสอบวัสดุ รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการค้ำขึ้นรูปกับระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวกด ซึ่งจากรูปพบว่าเมื่อเริ่มค้ำขึ้นรูปแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดเนื่องจากการอัดแท่งอลูมิเนียมค้ำขึ้นรูปจนเต็มเบ้า ประกอบรวมกับการค้ำขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมที่ยังไม่เปลี่ยนรูปร่างบางส่วน เมื่อแรงถึงจุดสูงสุดแท่งอลูมิเนียมเริ่มไหลออกจากค้ำขึ้นรูปได้สถานะคงที่และแท่งอลูมิเนียมเริ่มเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้แรงลดลงเป็นผลจากการลดความเสียดทานที่ผิวสัมผัส ระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประกอบอย่างสม่ำเสมอ เมื่อแท่งอลูมิเนียมรับการค้ำขึ้นรูปมากขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสลดลงอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำให้แรงเสียดทานรวมลดลง ส่วนในรูปที่ 5.4 เป็นการเปรียบเทียบความเค้นที่เกิดขึ้นขณะทำการค้ำขึ้นรูประหว่างการทดลองกับทฤษฎี โดยที่ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ มีค่าดังนี้ จากการทดลองค้ำขึ้นรูปจริงเท่ากับ 450.304 592.169 และ 744.054 N/mm^2 และจากการคำนวณทางทฤษฎี ที่ความยาวของแท่งอลูมิเนียมยาวที่สุด 40 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุด มีค่าเท่ากับ 552 851 และ 1113 N/mm^2 ตามลำดับ จากรูปพบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการคำนวณเนื่องจาก สบู่โซเดียมผงซึ่งเป็นสารหล่อลื่นชนิดที่เป็นของแข็งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมที่สูง ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งในการทดลองนั้นสบู่โซเดียมสามารถช่วยลดความเสียดทานในการค้ำขึ้นรูปได้ดีเนื่องจากสบู่โซเดียมเมื่ออยู่ภายใต้การอัดตัวหรืออยู่ภายใต้ความดันที่สูง จะไม่สามารถไหลหรือเคลื่อนตัวออกจากผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประกอบได้



รูปที่ 5.4 แสดงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 20$ 30 และ 35% ระหว่างการทดลองกับทฤษฎี

5.1.1.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

1. ค้นขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการค้นขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมดาบ 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 % จากการค้นที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการค้นขึ้นรูปเท่ากับ 75.93 76.66 79.23 76.32 78.09 76.93 และ 80.07 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการค้นขึ้นรูป เท่ากับ 572.053 577.553 596.915 574.992 588.327 579.587 และ 603.244 N/mm^2 ตามลำดับ

2. ค้นขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการค้นขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมดาบ 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 % จากการค้นที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการค้นขึ้นรูปเท่ากับ 94.3 92.25 98.9 93.77 92.79 98.08 และ 95.07 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการค้นขึ้นรูป เท่ากับ 710.452 695.008 745.108 706.46 699.076 738.931 และ 716.253 N/mm^2 ตามลำดับ

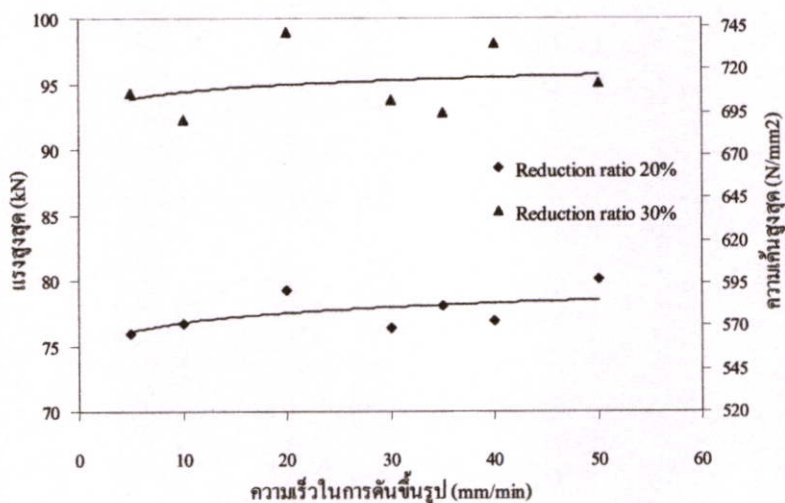
3. ค้นขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 และ 43%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการค้นขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมดาบ 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 และ 43% ไม่สามารถทำการค้นขึ้นรูปได้ ซึ่งเกินขีดความสามารถของโพลดเชลล์ เครื่องทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 5.3 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40

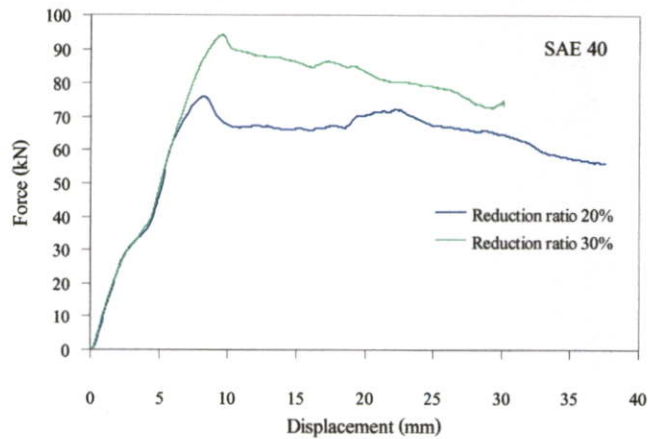
$r_e = 20$ 30 35 และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

ความเร็ว (mm/min)	5	10	20	30	35	40	50
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%							
แรง (kN)	75.93	76.66	79.23	76.32	78.09	76.93	80.07
ความเค้น (N/mm ²)	572.053	577.553	596.915	574.992	588.327	579.587	603.244
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%							
แรง (kN)	94.3	92.25	98.9	93.77	92.79	98.08	95.07
ความเค้น (N/mm ²)	710.452	695.008	745.108	706.46	699.076	738.931	716.253
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 และ 43%							
แรง (kN)	เกิน 100 kN						
ความเค้น (N/mm ²)	-						

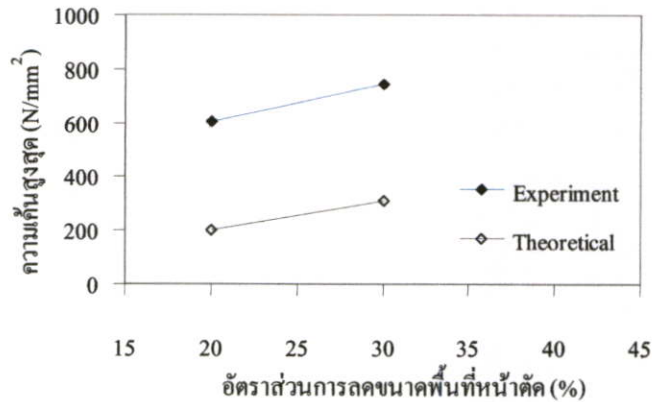


รูปที่ 5.5 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_e = 20$ และ 30% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

ในรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการค้ำขึ้นรูป กับความเร็วในการค้ำขึ้นรูป ที่สภาวะครึ่งมุมตาย 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้ม จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการค้ำขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ช้าที่สุดที่ใช้ในการทดลอง จะให้ค่าแรงและความเค้นสูงสุดในการค้ำขึ้นรูปต่ำเมื่อเทียบกับการค้ำขึ้นรูปที่ความเร็วสูงขึ้นอีก 10 เท่าคือที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที และเมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.6 นั้นจะเห็นได้ว่าผลของความเร็วที่ใช้ในการค้ำขึ้นรูปส่งผลกระทบต่อผลกระทบน้อยมาก กับแรงและความเค้นที่ใช้ในการค้ำขึ้นรูป และเมื่อมีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้น แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการค้ำขึ้นรูปก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ในการค้ำขึ้นรูปสามารถค้ำขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดเพียง 30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เนื่องจากการค้ำขึ้นรูปที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 เปอร์เซ็นต์ ใช้แรงในการค้ำขึ้นรูปสูงเกินกว่าขีดจำกัดของเครื่องทดสอบวัสดุ ในรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการค้ำขึ้นรูปกับระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวกด ซึ่งผลที่ได้จากการใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่นนั้นจะต่างกับการใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่นคือ หลังจากค้ำแท่งอลูมิเนียมจนแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึงจุดสูงสุดแล้ว แรงจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จะไม่ลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น รูปที่ 5.7 ทำการเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการค้ำขึ้นรูปจากการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี โดยผลที่ได้คือ ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่าดังนี้ จากการทดลองค้ำขึ้นรูปจริงเท่ากับ 603.244 และ 745.108 N/mm^2 และจากการคำนวณทางทฤษฎีที่ความยาวของแท่งอลูมิเนียมยาวที่สุด 40 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุด เท่ากับ 200 และ 313 N/mm^2 ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้เห็นได้ชัดว่า ค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองและค่าจากการคำนวณมีค่าแตกต่างกันมาก เนื่องจากการค้ำขึ้นรูปจริงเกิดความเค้นขณะค้ำขึ้นรูปมาก ความคั้นภายในเบ้าประคองแท่งอลูมิเนียมจึงมีค่ามากขึ้นตาม น้ำมันหล่อลื่นบางส่วนที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสถูกบีบอัดให้ไหลออกจากผิวสัมผัส ทำให้ค่าแรงและความเค้นที่ได้จากการค้ำขึ้นรูปจริงมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณมาก



รูปที่ 5.6 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการคั่นขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 ความเร็ว 5 mm/min



รูปที่ 5.7 แสดงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_c = 20$ และ 30%

5.1.1.3 ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น

1. คั่นขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการคั่นขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 % จากการคั่นที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป เท่ากับ 82.19 81.73 85.641 81.94 83.84 80.65 และ 84.34 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป เท่ากับ 619.216 615.751 641.291 617.333 631.647 607.614 และ 635.414 N/mm^2 ตามลำดับ

2. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 35 และ 43%

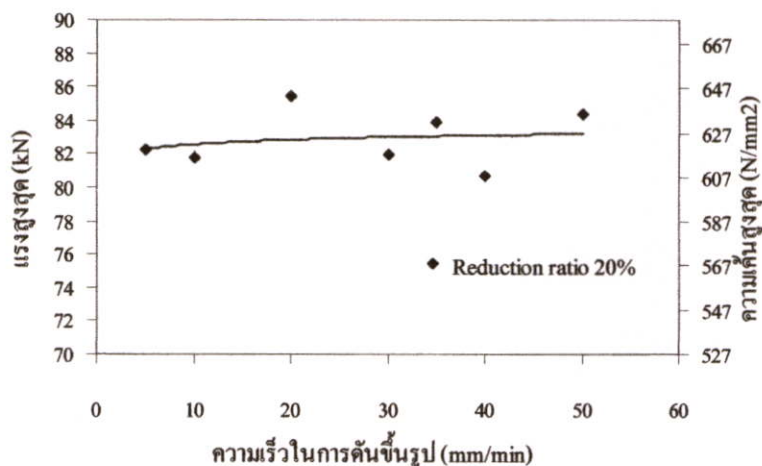
ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 35 และ 43% ไม่สามารถทำการดันขึ้นรูปได้ ซึ่งเกินขีดความสามารถของโพลีคาร์บอเนต เครื่องทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 5.4 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว $r_e = 20$ 30 35 และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

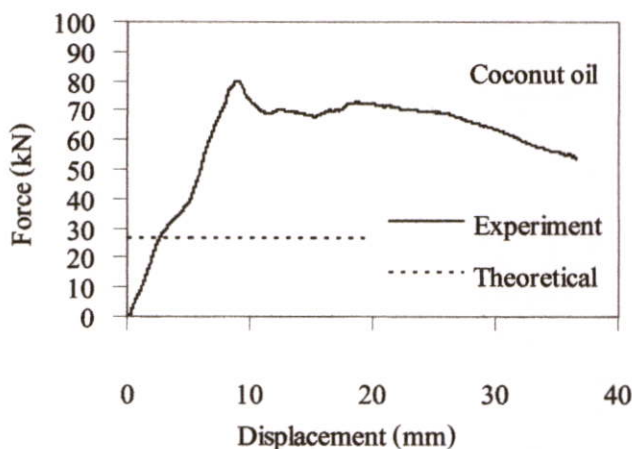
ความเร็ว (mm/min)	5	10	20	30	35	40	50
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%							
แรง (kN)	82.19	81.73	85.42	81.94	83.84	80.65	84.34
ความเค้น (N/mm ²)	619.216	615.751	642.5	617.333	631.647	607.614	635.414
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 35 และ 43%							
แรง (kN)	เกิน 100 kN						
ความเค้น (N/mm ²)	-						

ในการดันขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันมะพร้าว ค่าแรงและความเค้นในการดันขึ้นรูปมีลักษณะคล้ายกับการใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่นคือ เมื่อเริ่มดันแท่งอลูมิเนียมแรงและความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด แรงและความเค้นจะลดลงเพียงเล็กน้อยจนเกือบจะคงที่ไปตลอดการดันขึ้นรูปแสดงในรูปที่ 5.9 ในรูปนี้ที่ระยะทางของตัวกด 15 ถึง 20 มิลลิเมตร แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปมีค่าลดลงแล้วแต่กลับเพิ่มขึ้นอีก เนื่องจากความหนืดของน้ำมันมะพร้าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และเมื่อแท่งอลูมิเนียมถูกอัดทำให้น้ำมันที่แทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัสไหลออกทำให้เกิดความเสียดทานที่ผิวมากกว่าขณะที่น้ำมันยังคงอยู่ ทำให้ความเค้นที่ได้จากการทดลองจริงมีค่ามากกว่าการคำนวณเหมือนกับการใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น โดยที่แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปจริงที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์มีค่าเท่ากับ 85.42 kN และ 642.5 N/mm² ตามลำดับ และจากการคำนวณที่ความยาวของแท่งอลูมิเนียมยาวที่สุด 40 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 26.54 kN และ 200 N/mm² ตามลำดับ และในการดันขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น สามารถดันขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพียง 20 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และเมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.8 ความเร็วที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 5

มิลลิเมตรต่อนาทีเป็น 50 มิลลิเมตรต่อนาที ส่งผลน้อยมากกับค่าความเค้นที่ใช้ในการคั้นขึ้นรูป จึงสามารถบอกได้ว่าความเร็วที่ใช้ในการคั้นขึ้นรูปที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อความเค้น และแรงที่ใช้ในการคั้นขึ้นรูป



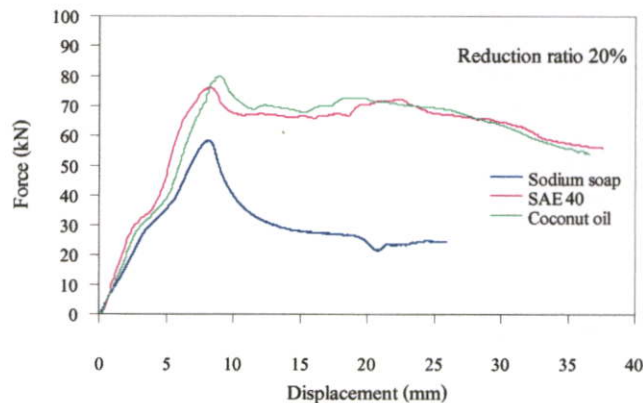
รูปที่ 5.8 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว $r_c = 20\%$ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min



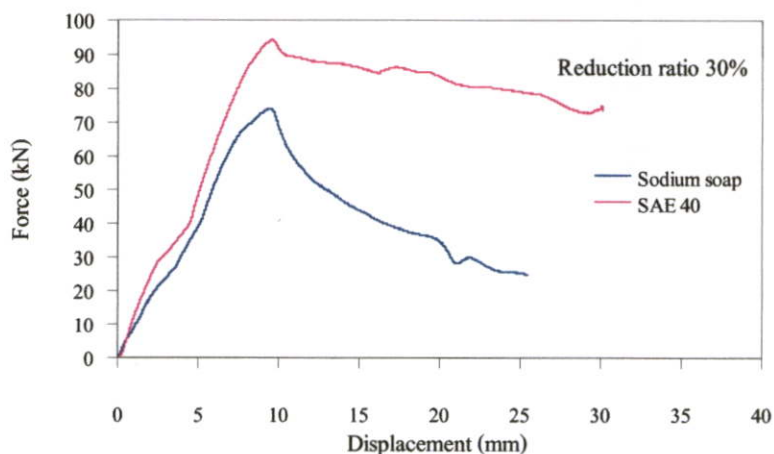
รูปที่ 5.9 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการคั้นขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ความเร็ว 5 mm/min

เมื่อทำการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการคั้นขึ้นรูปจริง ที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา โดยพิจารณาที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็วในการคั้นขึ้นรูปเดียวกัน ในรูปที่ 5.10 และ 5.11 เป็นผลที่ได้จากการคั้นขึ้นรูปที่สภาวะ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30% ตามลำดับและความเร็วในการคั้นขึ้นรูป 5 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่ากัน พบว่าเมื่อใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น แรงที่ใช้ในการคั้นขึ้นรูปมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ สารหล่อลื่นอีก 2 ชนิด คือ

น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าว ส่วนแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปของ น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน น้ำมันมะพร้าวมีค่าสูงอยู่กว่าน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาลักษณะการเกิดขึ้นของแรงทั้งก่อนและหลังจากจุดที่มีค่าสูงสุดในการทดลองแต่ละครั้งแล้ว จะพบว่าก่อนที่แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปจะมีค่าสูงสุดนั้นการเพิ่มขึ้นของแรงมีลักษณะราบเรียบและมีลักษณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด แต่เมื่อแรงผ่านค่าสูงสุดแล้วแรงนั้นจะมีค่าลดลง แต่การลดลงในกรณีการใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็ง คือสบู่โซเดียม การลดลงของแรงจะเกิดขึ้นอย่างราบเรียบและรวดเร็ว แต่ในกรณีการใช้สารหล่อลื่นแบบของเหลวทั้ง 2 ชนิด คือน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าวนั้น เมื่อแรงผ่านค่าสูงสุดแล้วการลดลงของแรงจะไม่ราบเรียบและลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งผลที่ได้เป็นเช่นนี้เพราะ การใช้สบู่โซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่นซึ่งสบู่โซเดียมผงนี้เป็นสารหล่อลื่นชนิดของแข็ง เมื่อถูกบีบอัดเนื่องจาก การดันขึ้นรูปสบู่โซเดียมผงจะเกาะติดอยู่ที่ผิวแท่งอลูมิเนียมไม่สามารถไหลออกไปจากผิวสัมผัสได้ต่างกับ สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวซึ่งจะไหลออกเมื่อถูกบีบอัด ทำให้แรงต้านทานที่เกิดจากความเสียดทานมีค่ามากกว่าการใช้สารหล่อลื่นชนิดที่เป็นของแข็ง แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเมื่อใช้สบู่โซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่นจึงมีค่าน้อยกว่าน้ำมันทั้ง 2 ชนิด จากผลการทดลองที่ได้นี้สามารถบอกแนวโน้มได้ว่า การยึดเกาะของสารหล่อลื่นกับวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในสภาวะที่มีความดันหรือแรงกดอัดสูงนั้น สารหล่อลื่นแบบของเหลวไม่สามารถยึดเกาะผิวสัมผัสได้ดีเมื่อเทียบกับสารหล่อลื่นแบบของแข็ง



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 3 ชนิด $r_c = 20\%$ ความเร็ว 5 mm/min



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 2 ชนิด $r_c = 30\%$ ความเร็ว 5 mm/min

5.1.2 ผลการดัดขึ้นรูปที่สถานะครึ่งมุมคด 22.5 องศา ($\alpha = 22.5^\circ$)

ในการดัดขึ้นรูปที่สถานะครึ่งมุมคด 22.5 องศา มีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทั้งหมด 3 ชนิดด้วยกัน คือ สบู่โซเดียมผง น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และ น้ำมันมะพร้าวดิบ สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของครึ่งมุมคด 22.5 องศา มีทั้งหมด 4 ขนาด คือ 20 30 35 และ 43 เปอร์เซ็นต์ และในการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดแต่ละค่านั้นทำการดัดขึ้นรูปที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็วคือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่ออนาที สรุปผลการทดลองการดัดขึ้นรูปที่สถานะครึ่งมุมคด 22.5 องศาแสดงในตารางที่ 5.5 และผลที่ได้แสดงแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

ตารางที่ 5.5 การดัดขึ้นรูปที่สถานะ $\alpha = 22.5^\circ$ แยกตามชนิดของสารหล่อลื่นและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด

$\alpha = 22.5^\circ$		อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (%)			
		20	30	35	43
สารหล่อลื่น	สบู่โซเดียม	O	O	O	-
	SAE 40	O	O	-	-
	น้ำมันมะพร้าว	O	-	-	-
	ไม่ใช้สารหล่อลื่น	-	-	-	-

O = ดัดขึ้นรูปได้, - = ดัดขึ้นรูปไม่สำเร็จ

5.1.2.1 ใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น

1. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 % จากการดันที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 43.73 44.27 42.16 44.33 47.74 48.27 และ 48.7 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 329.46 333.52 317.31 333.98 359.671 363.664 และ 366.904 N/mm^2 ตามลำดับ

2. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 % จากการดันที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 66.55 62.85 64.79 60.96 63.4 68.53 และ 67.72 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 501.385 473.509 488.125 459.27 477.653 516.302 และ 510.199 N/mm^2 ตามลำดับ

3. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35%

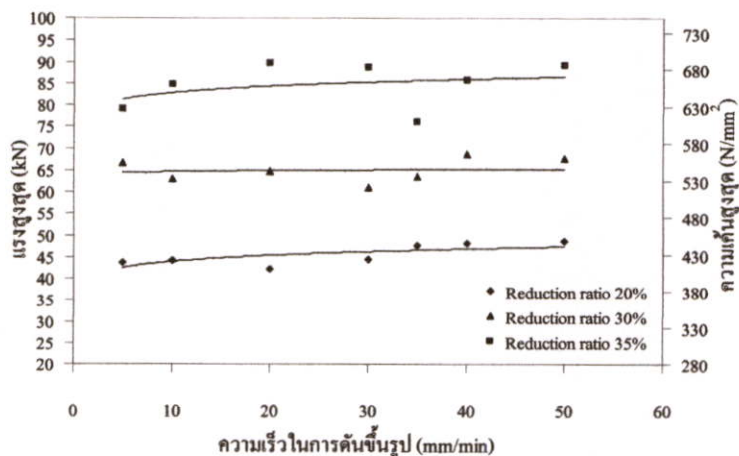
ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 % จากการดันที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 78.94 84.59 89.58 88.57 76.02 85.61 และ 89.13 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 594.731 637.297 674.892 667.283 572.731 644.982 และ 671.502 N/mm^2 ตามลำดับ

4. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43% ไม่สามารถทำการดันขึ้นรูปได้ ซึ่งเกินขีดความสามารถของโพลีคาร์บอเนต เครื่องทดสอบวัสดุ

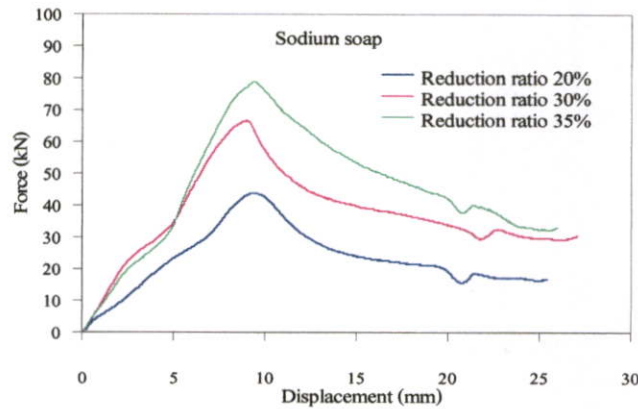
ตารางที่ 5.6 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม
 $r_e = 20\ 30\ 35$ และ 43% ที่ความเร็ว $5\ 10\ 20\ 30\ 35\ 40$ และ $50\ \text{mm/min}$

ความเร็ว (mm/min)	5	10	20	30	35	40	50
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%							
แรง (kN)	43.73	44.27	42.16	44.33	47.74	48.27	48.7
ความเค้น (N/mm^2)	329.46	333.52	317.31	333.98	359.671	363.664	366.904
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%							
แรง (kN)	66.55	62.85	64.79	60.96	63.4	68.53	67.72
ความเค้น (N/mm^2)	501.385	473.509	488.125	459.27	477.653	516.302	510.199
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35%							
แรง (kN)	78.94	84.59	89.58	88.57	76.02	85.61	89.13
ความเค้น (N/mm^2)	594.731	637.297	674.892	667.283	572.731	644.982	671.502
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43%							
แรง (kN)	เกิน 100 kN						
ความเค้น (N/mm^2)	-						

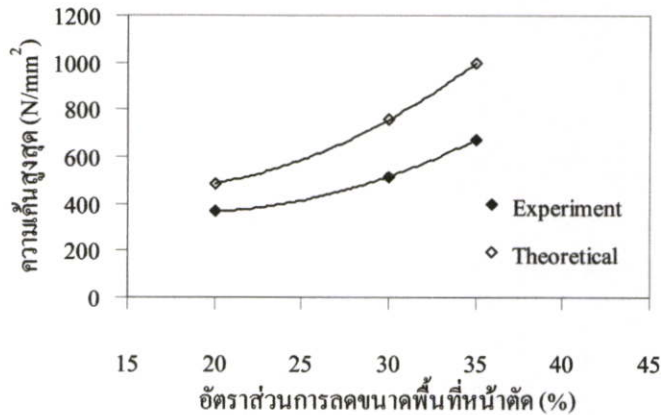


รูปที่ 5.12 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม
 $r_e = 20\ 30$ และ 35% ที่ความเร็ว $5\ 10\ 20\ 30\ 35\ 40$ และ $50\ \text{mm/min}$

ในรูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการดันขึ้นรูปที่ ครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้สไปซ์เดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการดันขึ้นรูป 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้มจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการดันขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ช้าที่สุดที่ใช้ในการทดลอง จะให้ค่าแรงและความเค้นสูงสุดในการดันขึ้นรูปต่ำเมื่อเทียบกับการดันขึ้นรูปที่ความเร็วสูงขึ้นอีก 10 เท่าคือที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที และเมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.12 นั้นจะเห็นได้ว่าผลของความเร็วที่ใช้ในการดันขึ้นรูปส่งผลกระทบน้อยมาก กับแรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูป และเมื่อมีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้น แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการดันขึ้นรูปก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ในการดันขึ้นรูปสามารถดันขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดเพียง 35 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เนื่องจากการดันขึ้นรูปที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43 เปอร์เซ็นต์ ใช้แรงในการดันขึ้นรูปสูงเกินกว่าขีดจำกัดของเครื่องทดสอบวัสดุ รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการดันขึ้นรูปกับระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวกด ซึ่งจากรูปพบว่า เมื่อเริ่มดันแท่งอลูมิเนียมแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด เนื่องจากการอัดแท่งอลูมิเนียมตอนเริ่มต้นจนเต็มเบ้าประคอง รวมกับการดันแท่งอลูมิเนียมที่ยังไม่เปลี่ยนรูปร่างบางส่วน เมื่อแรงถึงจุดสูงสุดแท่งอลูมิเนียมเริ่มไหลออกจากคายนายภายใต้สถานะคงที่และเริ่มเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำให้แรงลดลง เป็นผลจากการลดความเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองอย่างสม่ำเสมอ เมื่อแท่งอลูมิเนียมรับการดันมากขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสลดลงอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำให้แรงเสียดทานรวมลดลง ส่วนในรูปที่ 5.14 ทำการเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการดันขึ้นรูป จากการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี โดยที่ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ มีค่าดังนี้ จากการทดลองดันขึ้นรูปจริงเท่ากับ 366.904 516.302 และ 674.892 N/mm^2 และจากการคำนวณทางทฤษฎีที่ความยาวของแท่งอลูมิเนียมยาวที่สุด 40 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 486 757 และ 997 N/mm^2 ตามลำดับ จากรูปพบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าผลที่ได้จากการคำนวณเนื่องจาก สไปซ์เดียมผงซึ่งเป็นสารหล่อลื่นชนิดที่เป็นของแข็งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเหล็กและอลูมิเนียมที่สูง ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งในการทดลองนั้นสไปซ์เดียมสามารถช่วยลดความเสียดทานในการดันขึ้นรูปได้ดีเนื่องจากสไปซ์เดียมเมื่ออยู่ภายใต้การอัดตัวหรืออยู่ภายใต้ความดันที่สูง จะไม่สามารถไหลหรือเคลื่อนตัวออกจากผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองได้



รูปที่ 5.13 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดันขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม ความเร็ว 5 mm/min



รูปที่ 5.14 แสดงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม $r_c = 20 \text{ } 30$ และ 35%

5.1.2.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

1. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 % จากการดันที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่ออนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 68.87 71.89 69.17 71.27 70.78 68.94 และ 68.48 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูป เท่ากับ 518.863 541.616 521.124 536.945 533.253 519.391 และ 515.923 N/mm^2 ตามลำดับ

2. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 % จากการดันที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูปเท่ากับ 85.51 85.83 90.14 89.69 85.9 89.67 และ 88.67 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดันขึ้นรูป เท่ากับ 644.229 646.639 679.111 675.721 647.467 675.57 และ 668.036 N/mm^2 ตามลำดับ

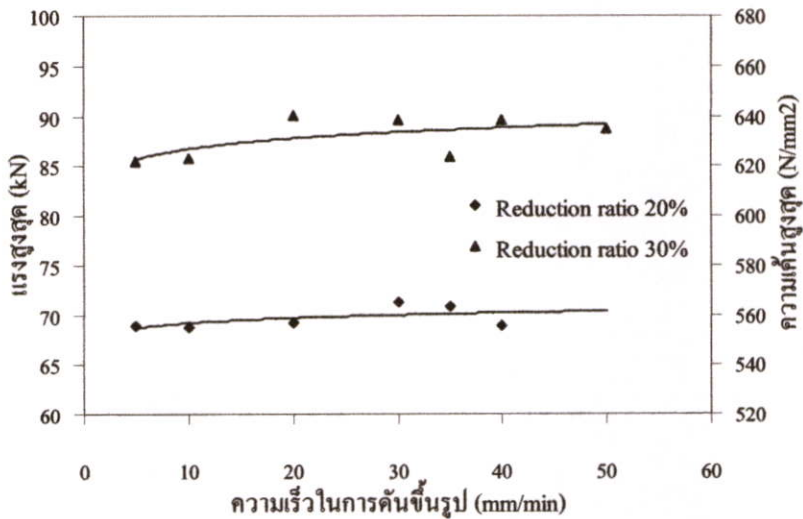
3. ดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 และ 43%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 และ 43% ไม่สามารถทำการดันขึ้นรูปได้ ซึ่งเกินขีดความสามารถของโพลคเชลล์ เครื่องทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 5.7 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40

$r_c = 20$ 30 35 และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

ความเร็ว (mm/min)	5	10	20	30	35	40	50
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%							
แรง (kN)	68.87	71.89	69.17	71.27	70.78	68.94	68.48
ความเค้น (N/mm^2)	518.863	541.616	521.124	536.945	533.253	519.391	515.923
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30%							
แรง (kN)	85.51	85.83	90.14	89.69	85.9	89.67	88.67
ความเค้น (N/mm^2)	644.229	646.639	679.111	675.721	647.467	675.57	668.036
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 และ 43%							
แรง (kN)	เกิน 100 kN						
ความเค้น (N/mm^2)	-						

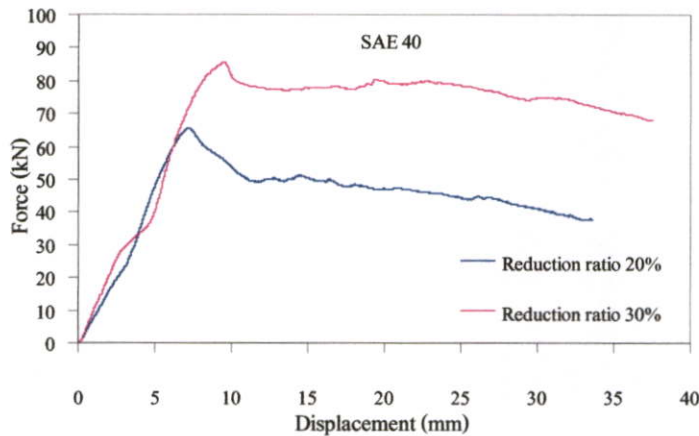


รูปที่ 5.15 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40

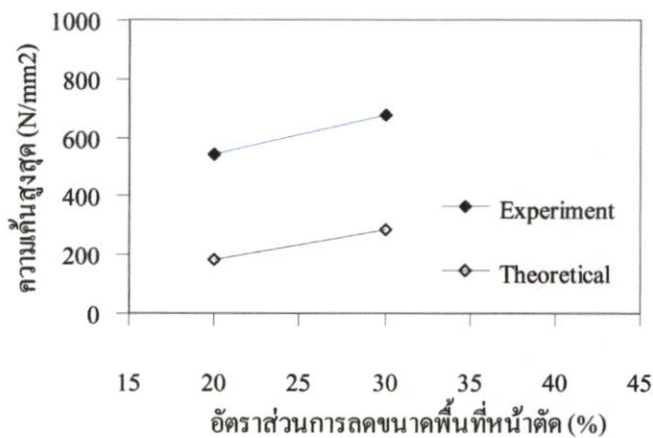
$r_c = 20$ และ 30% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

ในรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะทำการดัดขึ้นรูปที่ ครึ่งมุมดาบ 22.5 องศา ใช้ น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการดัดขึ้นรูปต่างกัน เมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้มจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการดัดขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่ออนาที ซึ่งเป็นความเร็วที่ช้าที่สุดที่ใช้ในการทดลอง จะให้ค่าแรงและความเค้นสูงสุดในการดัดขึ้นรูปต่ำเมื่อเทียบกับการดัดขึ้นรูปที่ความเร็วสูงขึ้นไปอีก 10 เท่าคือที่ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่ออนาที และเมื่อมีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้น แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดในการดัดขึ้นรูปก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่ในการดัดขึ้นรูปสามารถดัดขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดเพียง 30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เนื่องจากการดัดขึ้นรูปที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 เปอร์เซ็นต์ ใช้แรงในการดัดขึ้นรูปสูงเกินกว่าขีดจำกัดของเครื่องทดสอบวัสดุ ในรูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการดัดขึ้นรูปกับระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวกด ซึ่งการใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่นนั้นจะต่างกับการใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่นคือ เมื่อเริ่มดัดแท่งอลูมิเนียมแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดแรงจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จะไม่ลดลงอย่างรวดเร็วจะลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น รูปที่ 5.17 ทำการเปรียบเทียบความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น ขณะทำการดัดขึ้นรูปจากการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี ผลที่ได้มีค่าสอดคล้องกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่นเพียงแต่การใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 นี้ค่าแรงและความเค้นในการดัดขึ้นรูปมีค่ามากกว่า โดยที่ความเค้นสูงสุดที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่าดังนี้ จากการทดลองดัดขึ้นรูปจริงเท่ากับ 641.616 และ 679.111 N/mm² และจาก

การคำนวณทางทฤษฎีที่ความยาวของแท่งอลูมิเนียมยาวที่สุด 40 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 183 และ 288 N/mm^2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.16 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 ความเร็ว 5 mm/min



รูปที่ 5.17 แสดงค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในสภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_c = 20$ และ 30%

5.1.2.3 ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น

1. ดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคด 22.5 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 % จากการดัดที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป

เท่ากับ 74.85 77.75 76.71 76.09 77.94 79.21 และ 79.46 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป เท่ากับ 563.917 585.766 577.930 573.259 587.197 596.765 และ 598.649 N/mm^2 ตามลำดับ

2. ดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 35 และ 43%

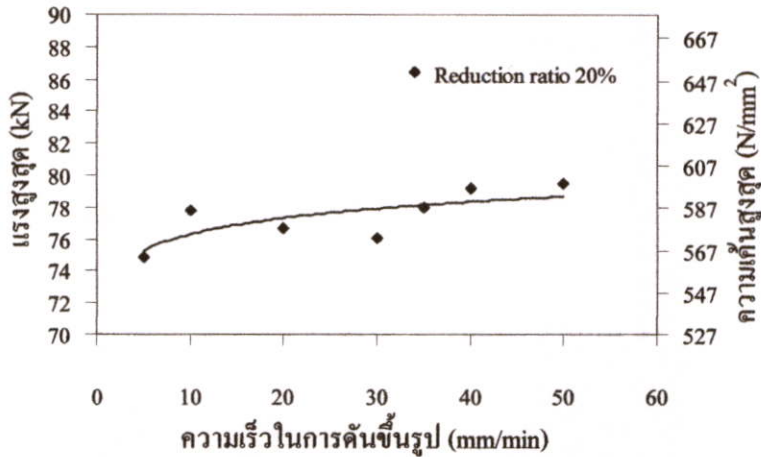
ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 35 และ 43% ไม่สามารถทำการดัดขึ้นรูปได้ ซึ่งเกินขีดความสามารถของโพลีเอทิลีน เครื่องทดสอบวัสดุ

ตารางที่ 5.8 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมัน

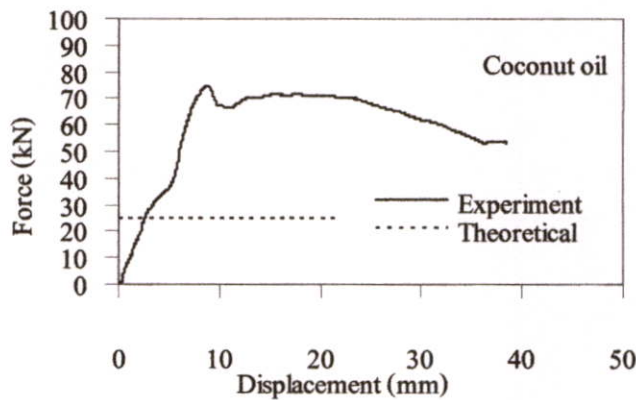
มะพร้าว $r_c = 20$ 30 35 และ 43% ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

ความเร็ว (mm/min)	5	10	20	30	35	40	50
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20%							
แรง (kN)	74.85	77.75	76.71	76.09	77.94	79.21	79.46
ความเค้น (N/mm^2)	563.917	585.766	577.930	573.259	587.197	596.765	598.649
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 35 และ 43%							
แรง (kN)	เกิน 100 kN						
ความเค้น (N/mm^2)	-						

ในการดัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันมะพร้าว ค่าแรงและความเค้นในการดัดขึ้นรูปมีลักษณะคล้ายกับการใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่นคือ เมื่อเริ่มดัดแท่งอลูมิเนียมแรงและความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด แรงและความเค้นจะลดลงเพียงเล็กน้อยจนเกือบจะคงที่ไปตลอดการดัดขึ้นรูปแสดงในรูปที่ 5.18 และในรูปที่ 5.19 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปจริง โดยที่แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูปจริงที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเท่ากับ 79.46 kN และ 598.649 N/mm^2 ตามลำดับ และจากการคำนวณที่ความยาวของแท่งอลูมิเนียมยาวที่สุด 40 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้แรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 24.29 kN และ 183 N/mm^2 ตามลำดับและเมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้มในรูปที่ 5.18 ความเร็วที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 5 มิลลิเมตรต่อนาทีเป็น 50 มิลลิเมตรต่อนาที ส่งผลน้อยมากกับค่าความเค้นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป จึงสามารถบอกได้ว่าความเร็วที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อความเค้น และแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป



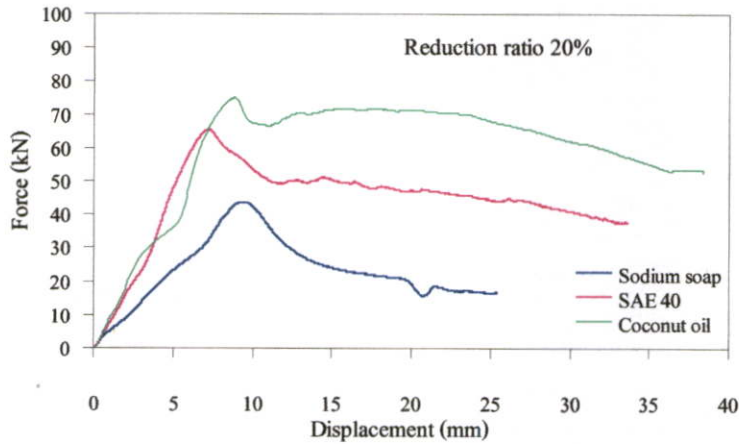
รูปที่ 5.18 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว $r_c = 20\%$ ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min



รูปที่ 5.19 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว ความเร็ว 50 mm/min

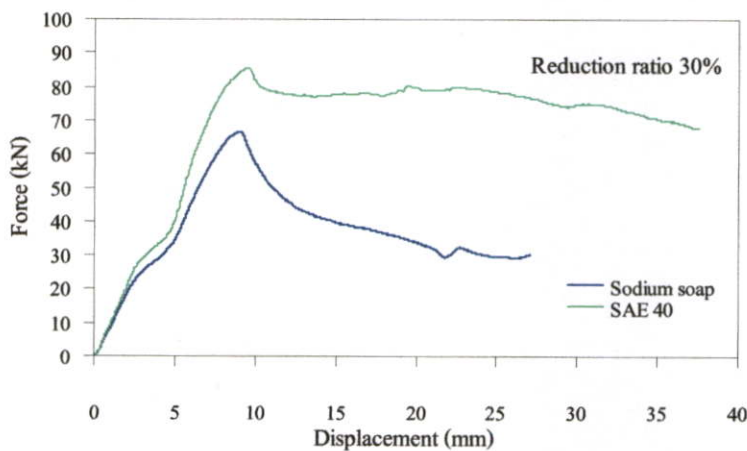
เมื่อทำการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปจริง ที่สภาวะครึ่งมุมดัด 22.5 องศา เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดและความเร็วในการดัดขึ้นรูปเดียวกัน ในรูปที่ 5.19 และ 5.20 แสดงแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30% ตามลำดับ ความเร็วในการดัดขึ้นรูป 5 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าเมื่อใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ สารหล่อลื่นอีก 2 ชนิด คือ น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าว ส่วนแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปของ น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าวมีค่าใกล้เคียงกัน น้ำมันมะพร้าวมีค่าสูงอยู่กว่าน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เพียงเล็กน้อย ซึ่งผลที่ได้เป็นเช่นนี้เพราะ การใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่นซึ่งสบูโซเดียมนี้เป็นสารหล่อลื่นชนิดของแข็ง เมื่อถูกบีบอัดเนื่องจากการดัดขึ้นรูปสบูโซเดียมไม่สามารถไหลออกไปจากผิวสัมผัสได้

เหมือนน้ำมันหล่อลื่น ทำให้แรงต้านทานที่เกิดจากความเสียดทานมีค่าน้อยกว่าการใช้สารหล่อลื่นชนิดของเหลว แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปจึงมีค่าน้อยกว่ามาก ซึ่งผลการทดลองดันขึ้นรูปที่เครื่องมุดาย 22.5 องศา นี้มีลักษณะคล้ายกับการทดลองที่เครื่องมุดาย 15 องศา เพียงแต่ความเค้นและแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปที่เครื่องมุดาย 22.5 องศา น้อยกว่าเครื่องมุดาย 15 องศา



รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 3 ชนิด

$r_e = 20\%$ ความเร็ว 5 mm / min



รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 2 ชนิด

$r_e = 30\%$ ความเร็ว 5 mm / min

5.1.3 ผลการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุดาย 30 องศา

ในการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุดาย 30 องศา มีการใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทั้งหมด 3 ชนิดเช่นเดียวกันกับที่สภาวะครึ่งมุดาย 15 และ 22.5 องศา คือ สบู่โซเดียมผง น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และ น้ำมันมะพร้าวคิบ สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของครึ่งมุดาย 30 องศา มีเพียงขนาดเดียว คือ 41 เปอร์เซ็นต์ และในการดัดขึ้นรูปนั้นทำการดัดขึ้นรูปที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็วคือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่ออนาที สรุปผลการทดลองการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุดาย 30 องศา ผลที่ได้แสดงแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

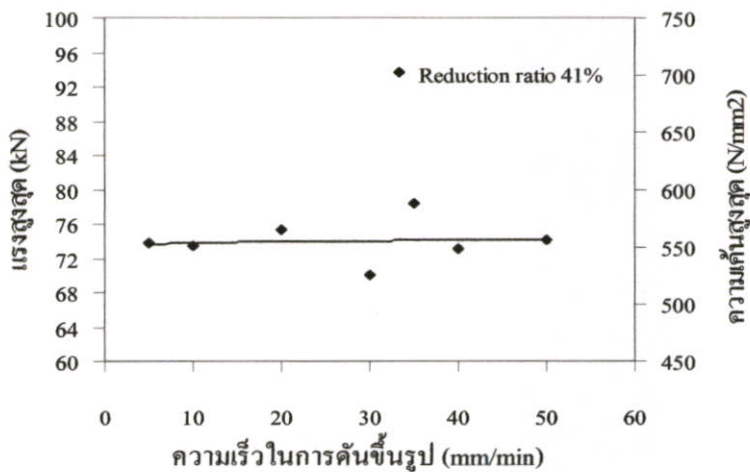
ตารางที่ 5.9 การดัดขึ้นรูปที่สภาวะ $\alpha = 30^\circ$ แยกตามชนิดของสารหล่อลื่น

ครึ่งมุดาย 30 องศา	สารหล่อลื่น			
	สบู่โซเดียม	SAE 40	น้ำมันมะพร้าว	ไม่ใช้
อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41 %	O	-	-	-

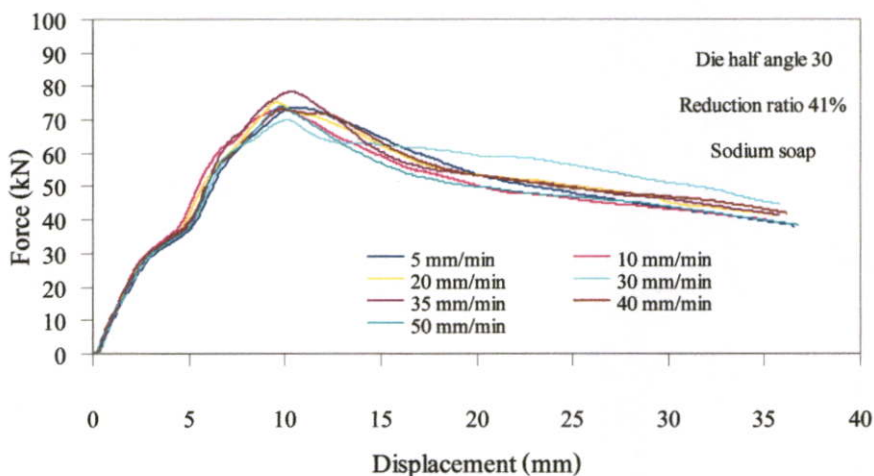
O = ดัดขึ้นรูปได้, - = ดัดขึ้นรูปไม่สำเร็จ

5.1.3.1 ใช้สบู่โซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น

ค่าแรงและความเค้นสูงสุดที่ในการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุดาย 30 องศา เมื่อใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41 % จากการดัดที่ความเร็วแตกต่างกัน 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่ออนาที ได้แรงสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 73.71 73.45 75.27 70.00 78.33 73.06 และ 74.08 kN และความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปเท่ากับ 555.328 553.37 567.081 527.377 590.135 550.431 และ 558.116 N/mm^2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.22 แรงและความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในการดัดขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม $r_e = 41\%$ ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min



รูปที่ 5.23 แสดงแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดัดขึ้นรูปจริงที่ $\alpha = 30^\circ$ สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม $r_e = 41\%$ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

5.1.3.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

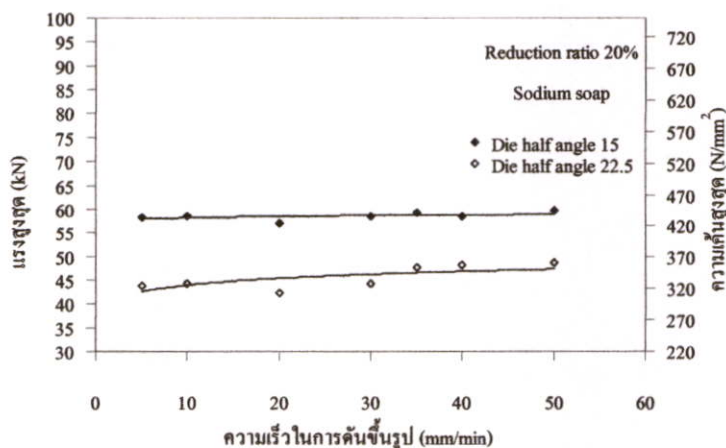
เมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น ในกรณีครึ่งมุมคด 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% นี้ ไม่สามารถทำการดัดขึ้นรูปได้เนื่องจากแรงที่ใช้ในการกดเพื่อให้แท่งอลูมิเนียมไหลผ่านคายนั้น ใช้แรงเกิน 100 kN ซึ่งมีค่าเกินขีดความสามารถของเครื่องทดสอบวัสดุจึงไม่สามารถแสดงผลการทดลองที่กรณีนี้ได้

5.1.3 ใช้น้ำมันมะพร้าว เป็นสารหล่อลื่น

เมื่อใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น ในกรณีครึ่งมุดคาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% นี้ ไม่สามารถทำการดัดขึ้นรูปได้เนื่องจากแรงที่ใช้ในการกดเพื่อให้แท่งอลูมิเนียมไหลผ่านคายนั้น ใช้แรงเกิน 100 kN ซึ่งมีค่าเกินขีดความสามารถของเครื่องทดสอบวัสดุ จึงไม่สามารถแสดงผลการทดลองที่กรณีนี้ได้

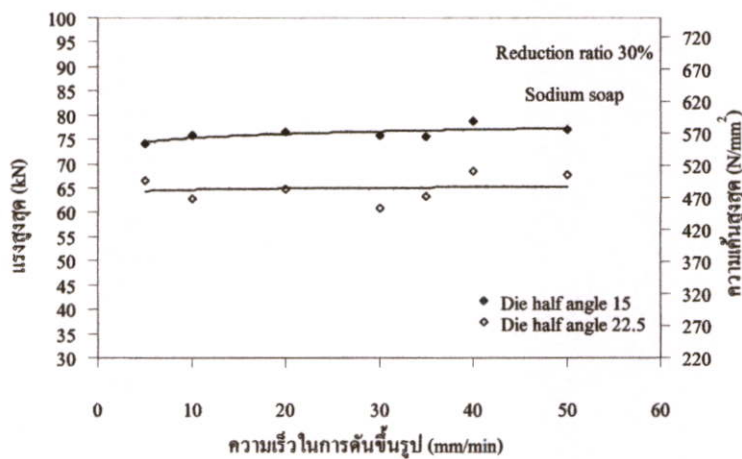
5.1.4 เปรียบเทียบความเค้นในการดัดขึ้นรูปที่ขนาดครึ่งมุดคาย 15 22.5 และ 30 องศา

จากผลการทดลองที่ผ่านมาในกรณี ครึ่งมุดคาย 15 22.5 และ 30 องศา เป็นผลการทดลองที่ทำการเปรียบเทียบที่ขนาดครึ่งมุดคายเท่ากัน ในหัวข้อนี้จึงทำการเปรียบเทียบแรงและความเค้นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป เมื่อขนาดครึ่งมุดคายต่างกัน รูปที่ 5.24 แสดงแรงและความเค้นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปที่ ครึ่งมุดคายต่างกัน คือ 15 และ 22.5 องศา ใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันคือ 20% และความเร็วในการดัดขึ้นรูป 7 ความเร็ว จากผลที่ได้พบว่าเมื่อดัดขึ้นรูปที่ครึ่งมุดคายที่มากขึ้นจาก 15 องศา เป็น 22.5 องศา แรงและความเค้นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปมีค่าลดลง โดยที่แรงและความเค้นจากการดัดขึ้นรูป โดยใช้สบู่โซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ครึ่งมุดคาย 15 องศา แรงและความเค้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 59.77 kN และ 450.304 N/mm² ตามลำดับ และที่ครึ่งมุดคาย 22.5 องศา แรงและความเค้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 48.7 kN และ 366.904 N/mm² ตามลำดับ ซึ่งแรงและความเค้นมีค่าลดลง 11.07 kN และ 83.4 N/mm² ตามลำดับ

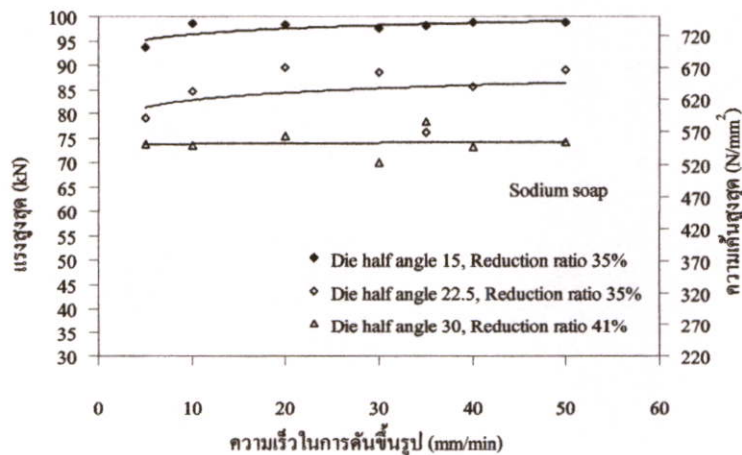


รูปที่ 5.24 แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป $r_e = 20\%$ สบู่โซเดียม $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

และในรูปที่ 5.25 แสดงสถานะการค้ำขึ้นรูปเช่นเดียวกับรูปที่ 5.24 ต่างกันเพียงอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% ผลที่ได้ก็มีลักษณะเดียวกันกับ สถานะอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% คือ เมื่อเครื่องมุดยที่มากขึ้นจาก 15 องศา เป็น 22.5 องศา แรงและความเค้นที่ใช้ในการค้ำขึ้นรูปมีค่าลดลงโดยที่แรงและความเค้นจากการค้ำขึ้นรูป โดยใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่เครื่องมุดย 15 องศา แรงและความเค้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 78.6 kN และ 592.169 N/mm² ตามลำดับ และที่เครื่องมุดย 22.5 องศา แรงและความเค้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 68.53 kN และ 516.302 N/mm² ตามลำดับ ซึ่งแรงและความเค้นมีค่าลดลง 10.07 kN และ 75.86 N/mm² ตามลำดับ

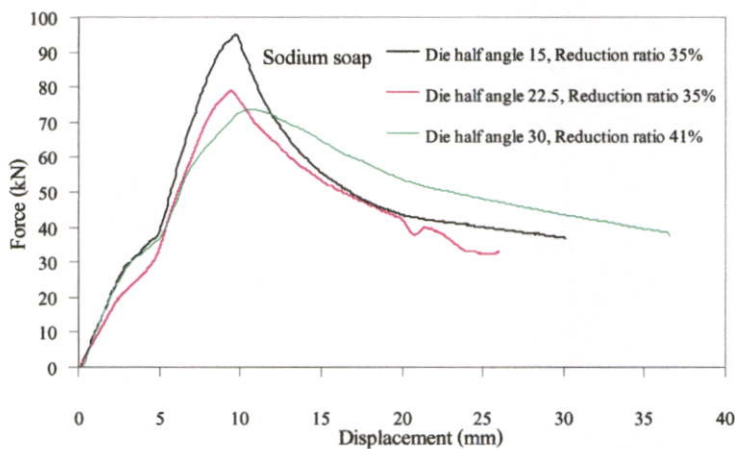


รูปที่ 5.25 แรงที่ใช้ในการค้ำขึ้นรูป $r_c = 30\%$ สบูโซเดียม $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min



รูปที่ 5.26 แรงที่ใช้ในการค้ำขึ้นรูป สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 35\%$ ที่ $\alpha = 15^\circ$ กับ 22.5° และ $\alpha = 30^\circ$ ที่ $r_c = 41\%$ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

ในรูปที่ 5.26 ทำการเปรียบเทียบแรงและความเค้นที่เกิดขึ้นในการคั่นขึ้นรูป เมื่อใช้ความเร็วในการคั่นขึ้นรูปต่างกัน ที่ขนาดครึ่งมุมคาย 15 องศา และ 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35% และ ขนาดครึ่งมุมคาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ซึ่งผลที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับสถานะอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30% คือเมื่อครึ่งมุมคายที่มากขึ้นจาก 15 องศา เป็น 22.5 องศา แรงและความเค้นที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปมีค่าลดลง โดยแรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าลดลงเท่ากับ 9.18 kN และ 69.16 N/mm^2 แต่เมื่อเพิ่มขนาดครึ่งมุมคาย ขึ้นเป็น 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ค่าแรงและความเค้นที่ใช้คั่นขึ้นรูปมีค่าต่ำกว่าทั้งกรณีครึ่งมุมคาย 15 และ 22.5 อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35% โดยที่แรงและความเค้นที่ได้จากการคั่นขึ้นรูปที่ครึ่งมุมคาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% มีค่าสูงสุดเท่ากับ 78.33 kN และ 590.135 N/mm^2 ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากรณีครึ่งมุมคาย 15 และ 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 เปอร์เซ็นต์ อยู่เท่ากับ 20.43 kN 153.91 N/mm^2 และ 11.25 kN 81.75 N/mm^2 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการทดลองของ Noorani [9] คือ ขนาดมุมคายที่ 60 องศาให้ค่าความเค้นในการคั่นขึ้นรูปต่ำสุดที่ได้จากการจำลองการคั่นขึ้นรูปด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์

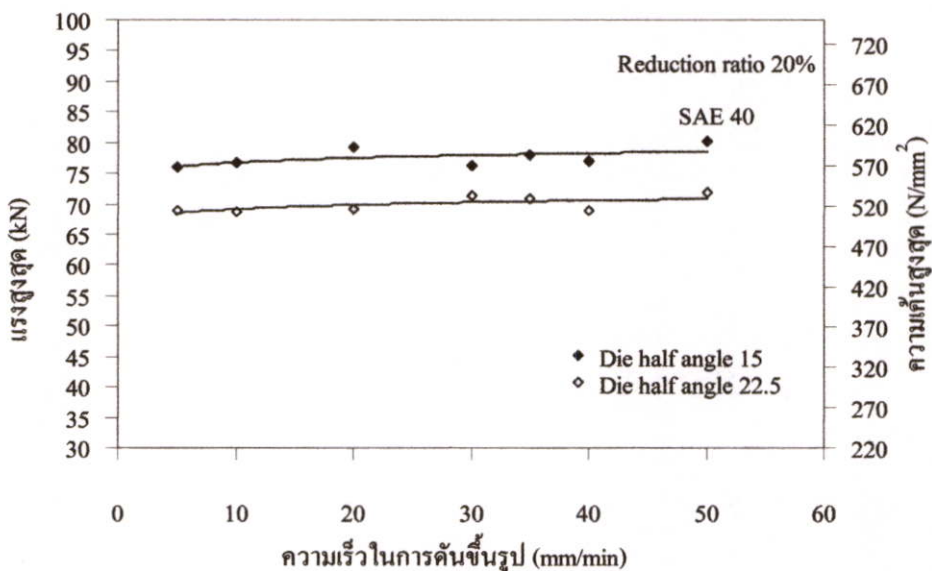


รูปที่ 5.27 แรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปจริง สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม $r_c = 35\%$ ที่ $\alpha = 15^\circ$ กับ 22.5° และ $\alpha = 30^\circ$ ที่ $r_c = 41\%$ ความเร็ว 5 mm/min

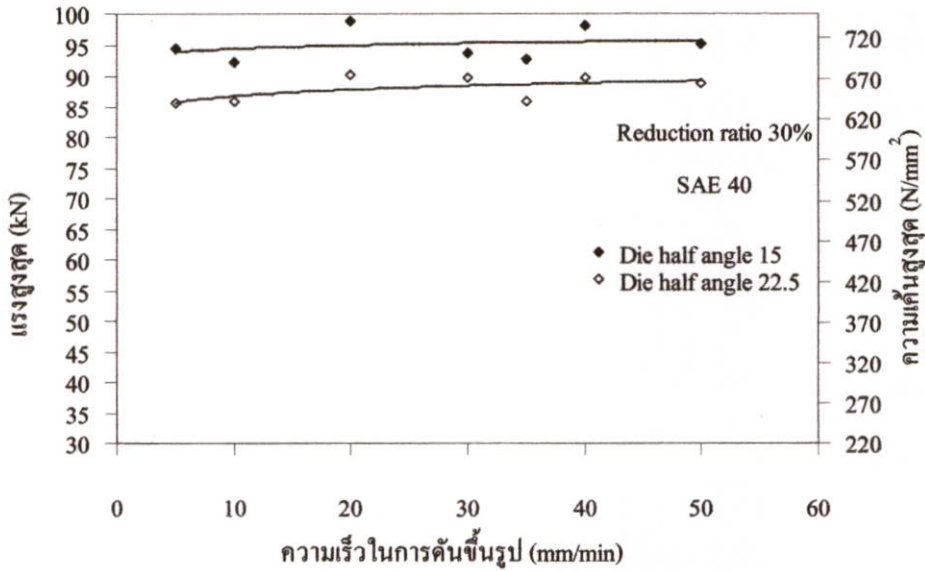
ในรูปที่ 5.27 แสดงแรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูปจริง ใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น เปรียบเทียบที่ขนาดครึ่งมุมคายต่างกัน คือขนาดครึ่งมุมคาย 15 องศา และ 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35% และ ขนาดครึ่งมุมคาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ลักษณะการเพิ่มขึ้นของแรงที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป และการลดลงของแรงหลังจะมีค่าสูงสุดแล้วมีลักษณะการลดลงที่เหมือนกัน คือเมื่อเริ่มคั่นแท่งอลูมิเนียมแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุดเนื่องจาก การอัดแท่งอลูมิเนียมตอนเริ่มต้นจนเต็มเบ้าประคอง รวมกับการคั่นแท่ง

อลูมิเนียมที่ค่อนข้างไม่เปลี่ยนรูปร่างบางส่วน เมื่อแรงถึงจุดสูงสุดแห่งอลูมิเนียมเริ่มไหลออกจาก คายภายใต้สถานะคงที่ทำให้ แรงลดลงเป็นผลจากการลดความเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแห่ง อลูมิเนียมกับเข้าประคองอย่างสม่ำเสมอ เมื่อแห่งอลูมิเนียมรับการดันมากขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำให้แรงเสียดทานรวมลดลง ดังที่เคยกล่าวไว้แล้ว

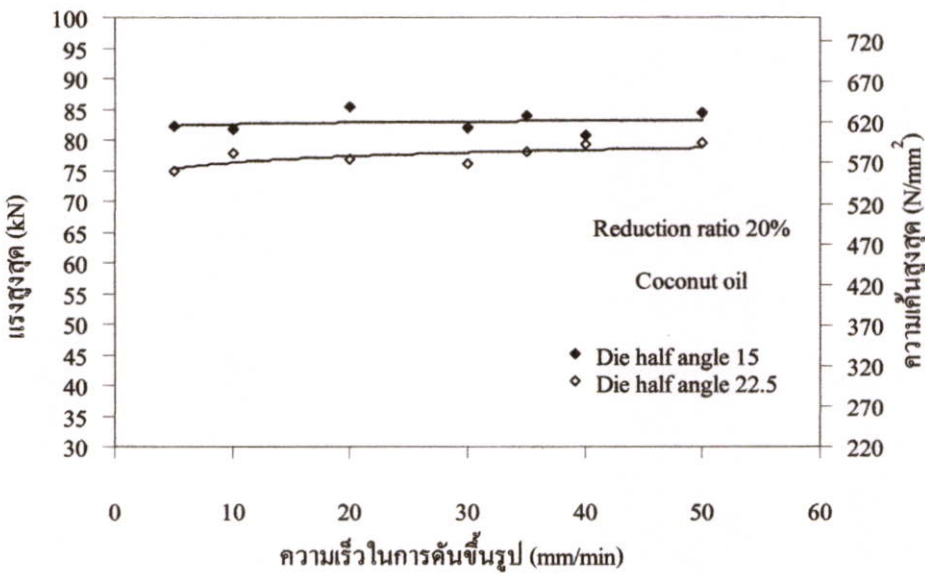
ในรูปที่ 5.28 และ 5.29 เป็นการเปรียบเทียบแรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปที่อัตราส่วน การลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30% ระหว่างขนาดครึ่งมุมคาย 15 องศา และ 22.5 องศา ใช้ น้ำมัน SAE 40 เป็นสารหล่อลื่นผลที่ได้ เป็นเช่นเดียวกับการเปรียบเทียบที่ผ่านมาคือ เมื่อขนาดครึ่ง มุมคายที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปลดลง โดยแรงและความเค้นที่เกิดขึ้น สูงสุดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% มีค่าลดลงเท่ากับ 8.18 kN และ 35.937 N/mm² ตามลำดับ โดยแรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30% มีค่าลดลงเท่ากับ 8.76 kN และ 65.99 N/mm² ตามลำดับ รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบแรงและ ความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20% ระหว่างครึ่งมุมคาย 15 และ 22.5 องศา โดยสารหล่อลื่นที่ใช้คือ น้ำมันมะพร้าว ผลก็เป็นเช่นเดียวกันกับในกรณีสารหล่อ ลื่นทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านมา คือ เมื่อขนาดครึ่งมุมคายที่มากขึ้นจาก 15 องศา เป็น 22.5 องศา ใช้แรงและ ความเค้นลดลงขณะทำการดันขึ้นรูป โดยแรงและความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดที่อัตราส่วนการลดขนาด พื้นที่หน้าตัด 30% มีค่าลดลงเท่ากับ 4.48 kN และ 36.765 N/mm² ตามลำดับ



รูปที่ 5.28 แรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูป $r_c = 20\%$ สารหล่อลื่น SAE 40 $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm / min



รูปที่ 5.29 แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป $r_c = 30\%$ สารหล่อลื่น SAE 40 $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min



รูปที่ 5.30 แรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป $r_c = 20\%$ สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว $\alpha = 15^\circ$ และ 22.5° ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 mm/min

เมื่อพิจารณาความเค้นที่ได้จากการดัดขึ้นรูปจริงเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทฤษฎี ในการดัดขึ้นรูปที่ครึ่งมุมตาย 15 และ 22.5 องศา จากการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด ผลที่ได้พบว่าค่าที่ได้ความเค้นที่ได้มีความแตกต่างกันเนื่องจาก ในกรณีใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อย ความเค้นที่ได้มีค่าไม่ต่างกันแต่เมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด

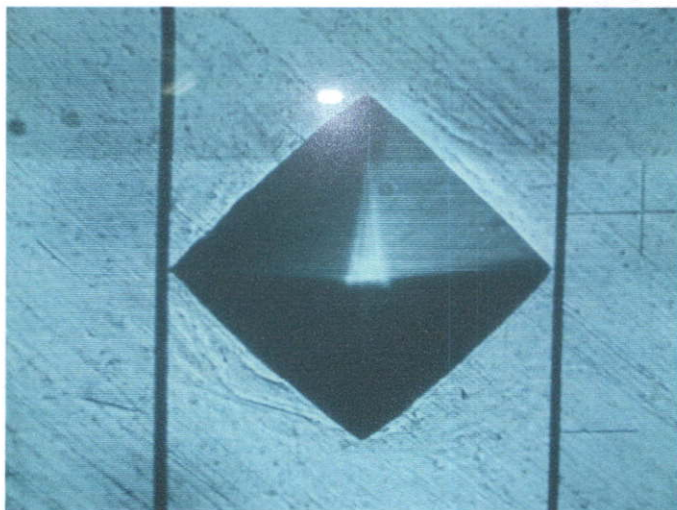
มากขึ้นเกิดความเค้นสูงในการคั่นขึ้นรูป ทำให้ความคั่นที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสมีมากขึ้นตาม ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายจึงมีค่ามากขึ้นตามสมการของ Noeland [13] ที่กล่าวไว้ว่า ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความคั่นที่เกิดขึ้น ในกรณีของการใช้สารหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าว ความเค้นที่ได้จากการคั่นขึ้นรูปที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ความเค้นที่ได้มีค่าแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและจากทฤษฎี เนื่องจากผลของความเสียหายที่เปลี่ยนแปลงไปตามความคั่นที่ดังกล่าวไว้ในกรณีใช้ สบู่โซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น

5.2 ความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม (Internal Hardness)

วิธีในการวัดค่าความแข็งนั้นมีมากมาย แต่วิธีที่นิยมกันมากที่สุด ในทางอุตสาหกรรม คือ การวัดค่าความต้านทานต่อการกดของเนื้อวัสดุต่อ วัตถุทรงกลม ทรงกรวย พีรามิดเล็ก ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและลักษณะของงานที่จะทำการทดสอบ เช่นการทดสอบแบบ ร็อกเวล ซึ่งการทดสอบแบบร็อกเวลสามารถวัดความแข็งในช่วงของวัสดุจากแผ่นฟิล์มบาง จนถึงเหล็กกล้าที่มีความแข็งสูงได้ รูปแบบของหัวกดเป็นหัวกดเพชร รับแรงกดได้สูงถึง 300 ปอนด์ แต่ในการวัดค่าความแข็งในงานวิจัยฉบับนี้ ใช้การวัดค่าความแข็งแบบ ไมโครวิกเกอร์ หลักการของการทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ จะใช้แรงกดขนาดน้อยๆ ตั้งแต่ 50 ถึง 1000 กรัม หรือ 0.49 ถึง 9.81 นิวตัน ในการทดสอบของงานวิจัยใช้แรงในการทดสอบ 300 กรัม หรือ 2.943 นิวตัน ใช้เวลาในการกด 10 วินาที ค่าความแข็งสามารถหาได้จากสูตรความสัมพันธ์ระหว่าง ขนาดของแรงกดที่ใช้ในการคั่นหัวกดรูปปิรามิด มุมระหว่างด้านยอดที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 136 องศา กับพื้นที่ของรอยกดที่เกิดบนผิวขึ้นทดสอบ 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)



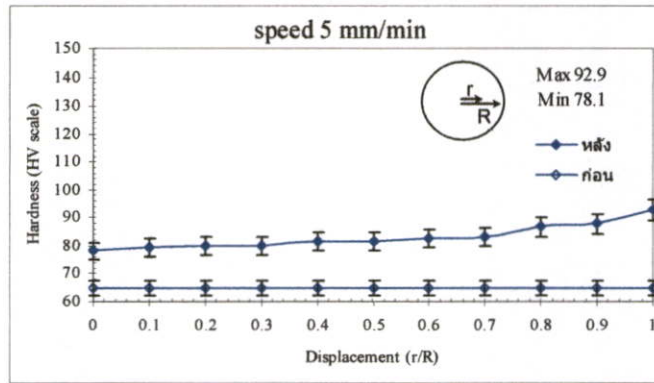
รูปที่ 5.31 ลักษณะรอยกดรูปปิรามิดที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็ง

5.2.1 ผลการทดสอบความแข็งที่สภาวะครึ่งมุมคาย 15 องศา ($\alpha = 15^\circ$)

จากการทดลองดัดขึ้นรูปที่ขนาดครึ่งมุมคาย 15 องศา ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่สามารถทำการดัดขึ้นรูปได้ 3 ขนาดคือ 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ใช้สารหล่อลื่น 3 ชนิด คือ สบู่โซเดียมผง น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าวดิบ ดัดขึ้นรูปที่ความเร็วต่างกัน 7 ความเร็วคือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดลองแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

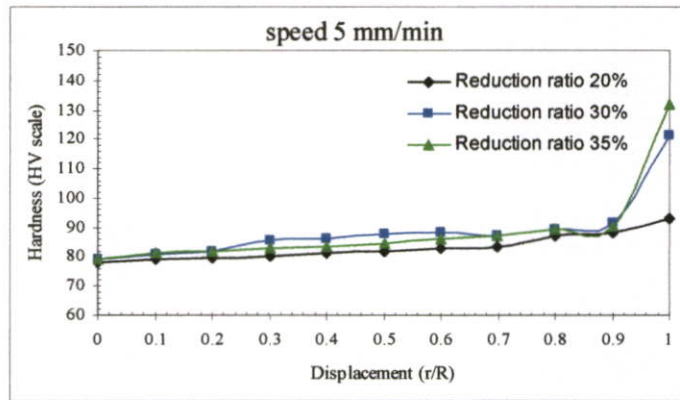
5.2.1.1 ใช้สบู่โซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น

ผลการวัดค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการดัดขึ้นรูปแล้ว ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ยังไม่ได้ผ่านการดัดขึ้นรูป โดยที่ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการดัดขึ้นรูปมีค่าเท่ากับ 65-67HV แต่ความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมไม่ได้เพิ่มขึ้นเท่ากันตลอดทั้งแท่ง จะมีการเพิ่มมากในบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมซึ่งลักษณะของการกระจายความแข็งแสดงในรูปที่ 5.32 ด้านซ้ายของรูปเป็นบริเวณศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียม ส่วนด้านขวาของรูปเป็นบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม ในรูป 5.32 เป็นค่าความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่สภาวะ ครึ่งมุมคาย 15 องศา ใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วในการดัดขึ้นรูป 5 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งเกิดขึ้นมากที่สุดบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 92.9HV ส่วนบริเวณศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อยคือจากเดิม 65-67HV เป็น 78.1HV

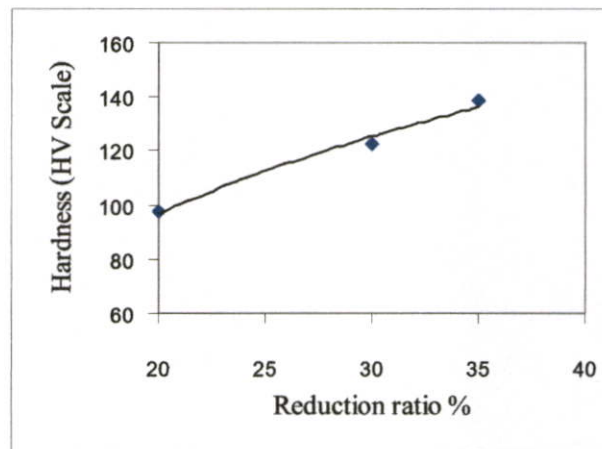


รูปที่ 5.32 ลักษณะค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม $r_c = 20\%$ ที่ความเร็ว 5 mm/min

ในส่วนของค่าความแข็งที่วัดได้จากการคั่นขึ้นรูปที่สภาวะ ครึ่งมุมคายน 15 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่น ที่ความเร็ว 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาทีนั้น ผลที่ได้มีลักษณะและค่าความแข็งเช่นเดียวกับกรณีคั่นขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที คือ ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมและมีค่ามากที่สุดที่บริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเท่านั้น โดยค่าความแข็งที่เกิดขึ้นที่ผิวของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการคั่นขึ้นรูปที่สภาวะดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 92.9 95.9 96.4 96.73 97.6 93 และ 96.5HV ตามลำดับ ซึ่งค่าโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 96HV เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดให้เป็น 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ แล้วค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกันกับ การคั่นขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นมากที่สุดบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ จากการคั่นขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาทีมีค่าเท่ากับ 121 118.6 116.6 122.4 120.6 115.1 และ 117.4 HV ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 เปอร์เซ็นต์ จากการคั่นขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาทีมีค่าเท่ากับ 132 136 129.8 131.5 138.4 133.2 และ 132.4 HV ตามลำดับ ในรูปที่ 5.33 เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการคั่นขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคายน 15 องศา ใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่น เปรียบเทียบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างกันคือ 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วที่ใช้ในการคั่นขึ้นรูป 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 5.33 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่สภาวะ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสไปซ์เคียม $r_c = 20$ 30 และ 35% ที่ความเร็ว 5 mm/min

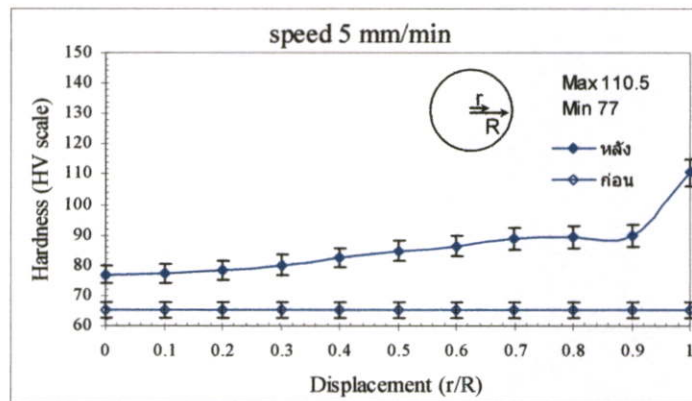


รูปที่ 5.34 แสดงค่าความแข็งสูงสุดที่ $r_c = 20$ 30 และ 35% $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสไปซ์เคียม

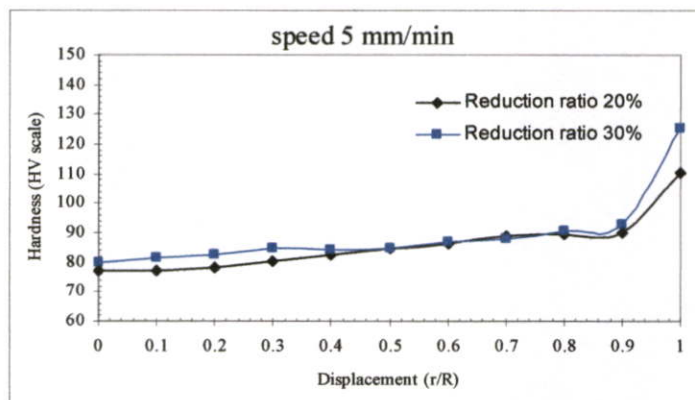
5.2.1.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

ในการทดสอบค่าความแข็งแท่งอลูมิเนียมหลังจากการดัดขึ้นรูปเมื่อเปลี่ยนสารหล่อลื่น จากสารหล่อลื่นของแข็งเป็นสารหล่อลื่นแบบเหลวโดยใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 จากการวัดค่าความแข็งที่เครื่องมูดาย 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ดัดขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ผลการทดลองที่มีลักษณะสอดคล้องกันกับกรณี ใช้สไปซ์เคียมผงเป็นสารหล่อลื่น คือค่าความแข็งมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนการทดลอง แต่จะมีค่ามากบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเท่านั้น ซึ่งค่าความแข็งมากที่สุดที่วัดได้ในการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อวินาที เท่ากับ 110.5 112.4 112.8 115.7 111.3 114.4 และ 115.87 HV ตามลำดับ และที่อัตราส่วนการลด

ขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งสูงสุดเท่ากับ 125.2 130.4 124.8 127.6 123.9 122.5 และ 128.7 HV ตามลำดับ ในรูปที่ 5.35 เป็นค่าความแข็งที่ได้จากการคั่นขึ้นรูปที่เครื่องมุดาย 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วในการคั่นขึ้นรูป 5 มิลลิเมตรต่ออนาที ค่าความแข็งสูงสุดเกิดขึ้นที่ผิวของแท่งอลูมิเนียม เท่ากับ 110.5 HV รูปที่ 5.36 เปรียบเทียบความแข็งที่เกิดขึ้นภายในแท่งอลูมิเนียม ที่เครื่องมุดาย 15 องศา ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ คั่นขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่ออนาที จากรูปพบว่าค่าความแข็งที่ผิวของแท่งอลูมิเนียมที่ได้จากการคั่นขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด มีค่ามากขึ้น



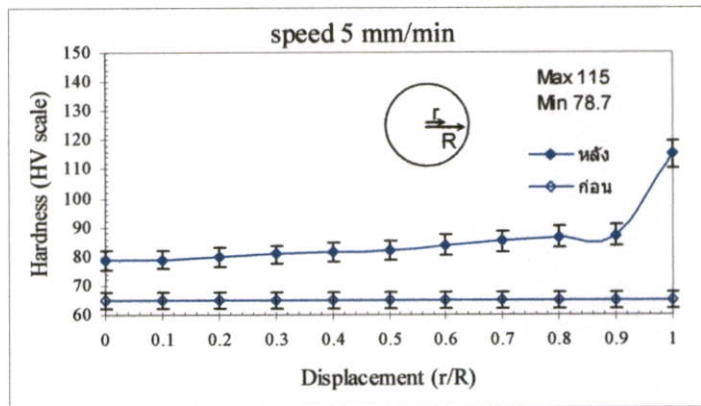
รูปที่ 5.35 ลักษณะค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_e = 20\%$ ที่ความเร็ว 5 mm/min



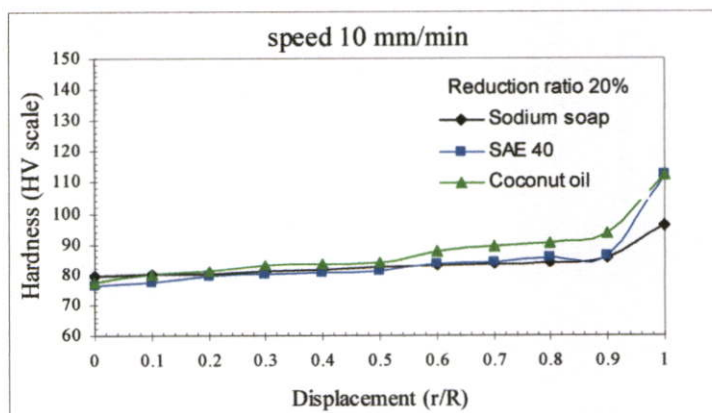
รูปที่ 5.36 ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่สภาวะ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น SAE 40 $r_e = 20$ และ 30% ที่ความเร็ว 5 mm/min

5.2.1.3 ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น

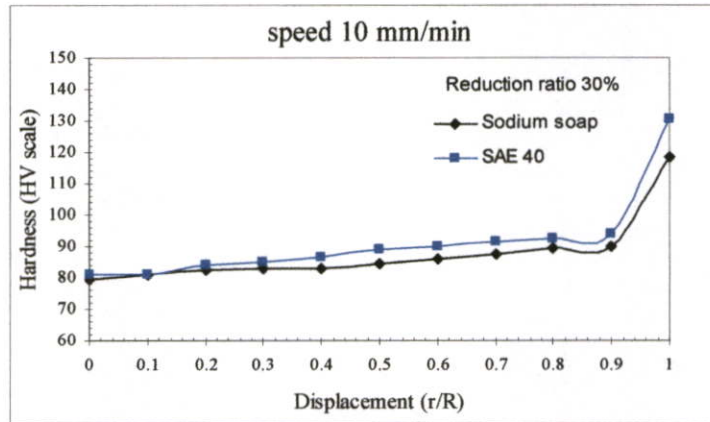
ในการดัดขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น สามารถดัดขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพียงขนาดเดียวคือที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ผลที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมภายหลังการดัดขึ้นรูปได้ผลลักษณะเดียวกับการใช้สารหล่อลื่นทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านมาคือ จะมีความแข็งเพิ่มขึ้นหลังผ่านการดัดขึ้นรูป แต่ค่าความแข็งไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเท่าๆกันตลอดทั้งหน้าตัดแท่งอลูมิเนียม จะเพิ่มขึ้นมากเฉพาะบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเท่านั้น ในรูปที่ 5.37 แสดง ความแข็งที่เกิดขึ้นภายในแท่งอลูมิเนียมที่ครึ่งมุมคาย 15 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ดัดขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความแข็งมากที่สุดเกิดขึ้นที่ผิวมีค่าเท่ากับ 115 HV ส่วนในการดัดขึ้นรูปที่ความเร็ว 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ลักษณะของค่าความแข็งที่ได้มีค่าเช่นเดียวกับโดยค่าสูงสุดที่ผิวในแต่ละความเร็วเท่ากับ 115.0 112.4 111.0 114.0 112.4 116.3 และ 114.2 HV ตามลำดับ



รูปที่ 5.37 ลักษณะค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่น น้ำมันมะพร้าว $r_c = 20\%$ ที่ความเร็ว 5 mm/min



รูปที่ 5.38 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 3 ชนิด $r_c = 20\%$ ความเร็ว 10 mm/min



รูปที่ 5.39 เปรียบเทียบความแข็งจากการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 2 ชนิด
 $r_c = 30\%$ ความเร็ว 10 mm/min

รูปที่ 5.38 และ 5.39 ทำการเปรียบเทียบความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ได้จากการดันขึ้นรูปที่ ครึ่งมุมตาย 15 องศา ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเร็วในการดันขึ้นรูป 10 มิลลิเมตรต่อนาที โดยเปรียบเทียบที่สภาวะการใช้สารหล่อลื่นที่ ต่างกัน จากรูปที่ 5.38 พบว่าเมื่อใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเมื่อ เทียบกับการใช้สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวทั้ง 2 ชนิด คือความแข็งที่ได้จากการใช้สบู่โซเดียมเป็น สารหล่อลื่นมีค่าเท่ากับ 95.9 HV และจากการใช้น้ำมัน SAE 40 และ น้ำมันมะพร้าว มีค่าอยู่ที่ 112.4 HV เท่ากัน ส่วนรูปที่ 5.39 ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ได้จากการใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อ ลื่นซึ่งมีค่าเท่ากับ 118.6 HV ก็มีค่าน้อยกว่าการใช้น้ำมัน SAE 40 เป็นสารหล่อลื่นที่มีค่า 130.4 HV

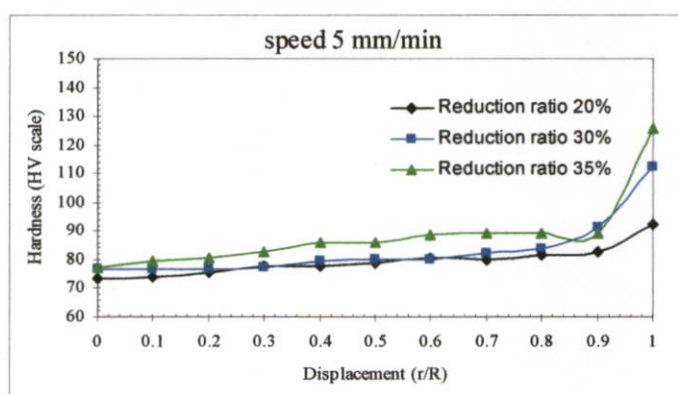
จากผลการทดลองทดสอบค่าความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมตาย 15 องศา อัตราส่วนการลดขนาด พื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ใช้สารหล่อลื่น 3 ชนิดคือ สบู่โซเดียมผง น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าว ที่ความเร็วขึ้นรูป 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า ความเร็วในการดันขึ้นรูปที่มากขึ้นไม่ทำให้ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมมีค่ามากขึ้นตาม ใน กรณีของอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น ทำให้เกิดการบีบอัดตัวของแท่งอลูมิเนียม มากทำให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด โดยหากใช้สบู่โซเดียม เป็นสารหล่อลื่นความแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลว เนื่องจากสบู่ โซเดียมเป็นสารหล่อลื่นแบบของแข็ง เมื่อถูกบีบอัดภายในเข้าประคองจะไม่สามารถไหลออกจาก ผิวสัมผัสได้ทำให้เกิดการเสียดที่ผิวน้อยกว่าการใช้น้ำมันเป็นสารหล่อลื่น ต่างจากน้ำมันเมื่อถูกอัด จะสามารถไหลออกจากผิวสัมผัสทำให้ความเค้นเฉือนที่ผิวเกิดขึ้นมาก เมื่อผิวของแท่งอลูมิเนียมถูก ความเค้นเฉือนกระทำ จะทำให้เกิดความเครียดที่ผิวขึ้นส่งผลให้ความแข็งที่ผิวมีค่ามากขึ้นตาม

5.2.2 ผลการทดสอบความแข็งที่สภาวะครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ($\alpha = 22.5^\circ$)

ในการทดสอบหาค่าความแข็งในการคั่นขึ้นรูปที่ครึ่งมุมคาย 22.5 องศา นี้ ได้ทำการทดสอบจากการคั่นขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่สามารถคั่นขึ้นรูปได้คือ 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ และมีการเปรียบเทียบสภาวะการใช้สารหล่อลื่น 3 ชนิดเช่นเดียวกับ กรณีครึ่งมุมคาย 15 องศา ความเร็วในการคั่นขึ้นรูป 7 ความเร็วเช่นเดียวกัน ค่าความแข็งที่ได้จากการคั่นขึ้นรูปที่ ครึ่งมุมคาย 22.5 องศา นี้ มีลักษณะการกระจายความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมเช่นเดียวกับกรณีครึ่งมุมคาย 15 องศา ผลการทดลองแยกตามชนิดของสารหล่อลื่นดังนี้

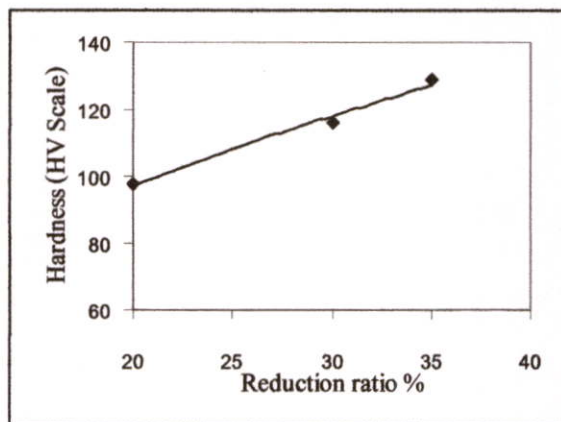
5.2.2.1 ใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น

ในการคั่นขึ้นรูปที่ครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้สบูโซเดียมผงเป็นสารหล่อลื่น สามารถคั่นขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะคล้ายกันทั้ง 3 อัตราส่วนการลดขนาดคือจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนการคั่นขึ้นรูป แต่จะเพิ่มขึ้นมากบริเวณผิวเท่านั้น ไม่ได้เพิ่มขึ้นทั้งหมด ค่าความแข็งที่ผิวได้จากการคั่นขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่ออนาทีที่มีค่าเท่ากับ 92.3 86.35 92.6 88.8 87.7 97.7 และ 86.2 HV ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่ออนาทีที่มีค่าเท่ากับ 112.4 110.3 115.6 116.2 115.0 113.4 และ 114.5 HV ตามลำดับที่ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่ออนาทีที่มีค่าเท่ากับ 126.0 120.2 124.5 124.3 126.3 125.4 และ 128.7 HV ตามลำดับ



รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบความแข็งจากการคั่นขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม

$r_c = 20$ 30 และ 35% ความเร็ว 5 mm / min

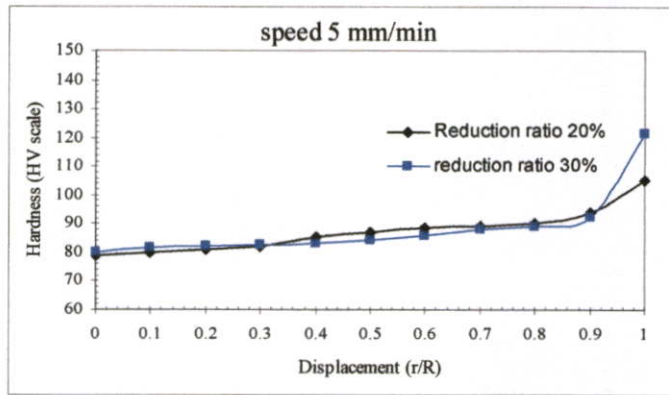


รูปที่ 5.41 แสดงค่าความแข็งสูงสุดที่ $r_c = 20$ 30 และ 35% $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม

จากรูปที่ 5.40 ความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมจากการดัดขึ้นรูปที่ครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ความเร็วในการดัดขึ้นรูป 5 มิลลิเมตรต่อนาทีเท่ากัน และโซสบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่นเหมือนกัน ค่าความแข็งที่ผิวของแท่งอลูมิเนียมมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมีค่ามากขึ้น

5.2.2.2 ใช้น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น

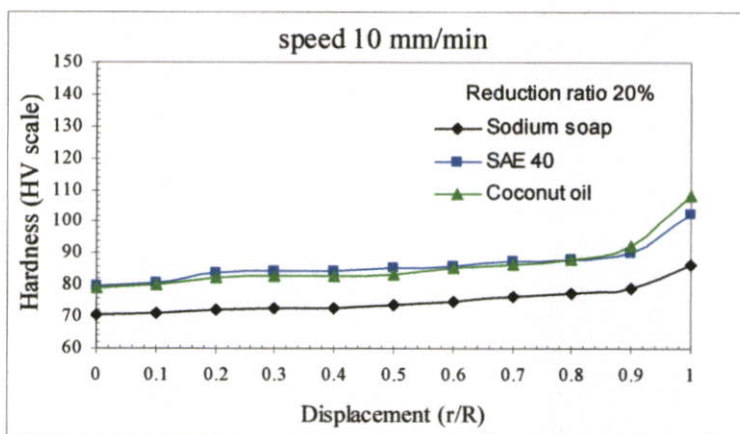
การดัดขึ้นรูปที่ครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ใช้น้ำมัน SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น สามารถดัดขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะคล้ายกันทั้ง 2 อัตราส่วนการลดขนาด ก็จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนการดัดขึ้นรูป แต่จะเพิ่มขึ้นมากบริเวณผิวเท่านั้นไม่ได้เพิ่มขึ้นทั้งหมด ค่าความแข็งที่ผิวได้จากการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาทีที่มีค่าเท่ากับ 105.3 102.4 105.6 107.4 105.3 104.9 และ 103.6 HV ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาทีที่มีค่าเท่ากับ 121.7 119.5 118.6 120.7 117.1 126.4 และ 118.2 HV ตามลำดับ โดยรูปที่ 5.42 แสดงความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมคาย 22.5 องศา ความเร็วในการดัดขึ้นรูป 5 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้น้ำมัน SAE 40 เป็นสารหล่อลื่น



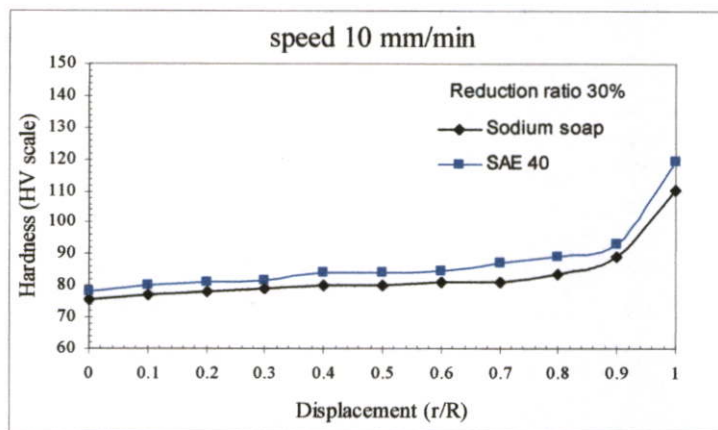
รูปที่ 5.42 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่น SAE40
 $r_c = 20$ และ 30% ความเร็ว 5 mm / min

5.2.2.3 ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น

การดัดขึ้นรูปที่ครึ่งมุมตาย 22.5 องศา ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารหล่อลื่น สามารถดัดขึ้นรูปได้ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ เพียงขนาดเดียว ซึ่งผลความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่ได้มีลักษณะคล้ายกันทั้งเมื่อดัดขึ้นรูปที่ความเร็วต่างกัน ก็จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนการดัดขึ้นรูป แต่จะเพิ่มขึ้นมากบริเวณผิวเท่านั้น ไม่ได้เพิ่มขึ้นทั้งหมด ค่าความแข็งที่ผิวได้จากการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 110.2 108.4 108.6 110.0 107.78 112.4 และ 109.8 HV ตามลำดับ



รูปที่ 5.43 เปรียบเทียบความแข็งจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 3 ชนิด
 $r_c = 20\%$ ความเร็ว 10 mm / min



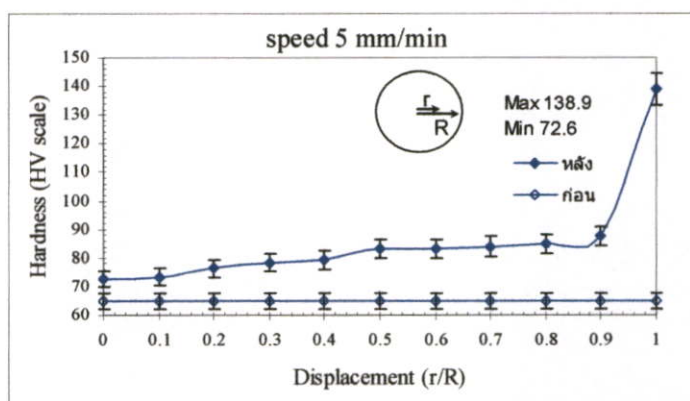
รูปที่ 5.44 เปรียบเทียบความแข็งจากการคั่นขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$ ใช้สารหล่อลื่นต่างกัน 2 ชนิด
 $r_c = 30\%$ ความเร็ว 10 mm / min

รูปที่ 5.43 และ 5.44 ทำการเปรียบเทียบความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ได้จากการคั่นขึ้นรูปที่ ครึ่งมุมคด 22.5 องศา ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความเร็วในการคั่นขึ้นรูป 10 มิลลิเมตรต่อนาที โดยเปรียบเทียบที่สภาวะการใช้สารหล่อลื่นที่ ต่างกัน จากรูปที่ 5.37 พบว่าเมื่อใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเมื่อ เทียบกับการใช้สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวทั้ง 2 ชนิด คือความแข็งที่ได้จากการใช้สบู่โซเดียมเป็น สารหล่อลื่นมีค่าเท่ากับ 86.35 HV และจากการใช้น้ำมัน SAE 40 และ น้ำมันมะพร้าว มีค่าอยู่ที่ 102.4 HV และ 108.5 HV ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 5.38 ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ได้จากการใช้ สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่นมีค่าเท่ากับ 110.3 HV มีค่าน้อยกว่าการใช้น้ำมัน SAE 40 เป็นสารหล่อ ลื่นที่มีค่า 119.5 HV

จากผลการทดลองทดสอบค่าความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมคด 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาด พื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ใช้สารหล่อลื่น 3 ชนิดคือ สบู่โซเดียมผง น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และน้ำมันมะพร้าว ที่ความเร็วขึ้นรูป 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า ความเร็วในการคั่นขึ้นรูปที่มากขึ้นไม่ทำให้ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมมีค่ามากขึ้นตาม ส่วน ในกรณีของอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น ทำให้เกิดการบีบอัดตัวของแท่งอลูมิเนียม มากทำให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด โดยหากใช้สบู่โซเดียม เป็นสารหล่อลื่นความแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลว เนื่องจากสบู่ โซเดียมเป็นสารหล่อลื่นแบบของแข็ง เมื่อถูกบีบอัดภายในเบ้าประคองจะไม่สามารถไหลออกจาก ผิวสัมผัสได้ทำให้เกิดการเสียดสีที่ผิวน้อยกว่าการใช้น้ำมันเป็นสารหล่อลื่น ซึ่งน้ำมันเมื่อถูกอัดจะ สามารถไหลออกจากผิวสัมผัสทำให้ความเค้นเสียดสีที่ผิวเกิดขึ้นมาก เมื่อผิวของแท่งอลูมิเนียมถูก ความเค้นเสียดสีกระทำจะทำให้เกิดความเครียดที่ผิวขึ้นส่งผลให้ความแข็งที่ผิวมีค่ามากขึ้นตาม

5.2.3 ผลการทดสอบความแข็งที่สภาวะครึ่งมุมคาย 30 องศา ($\alpha = 30^\circ$)

ในการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมที่ครึ่งมุมคาย 30 องศา ใช้อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพียงขนาดเดียว คือ 41 เปอร์เซ็นต์ และสารหล่อลื่นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปคือ สบู่โซเดียมผงเท่านั้น ผลที่ได้จากการทดสอบค่าความแข็งคือ ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับแท่งอลูมิเนียมก่อนการทดลอง แต่ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างเท่ากันทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นมากบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเท่านั้น โดยค่าความแข็งที่ผิวของแท่งอลูมิเนียมจากการดัดขึ้นรูปที่ความเร็ว 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าเท่ากับ 138.9 140.2 135.8 136.2 140.6 138.4 และ 137.5 HV ตามลำดับ โดยในรูปที่ 5.45 เป็นความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่ได้จากการดัดขึ้นรูปที่ครึ่งมุมคาย 30 องศา ความเร็วในการดัดขึ้นรูป 5 มิลลิเมตรต่อนาทีที่ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวแท่งอลูมิเนียมเท่ากับ 138.9 HV



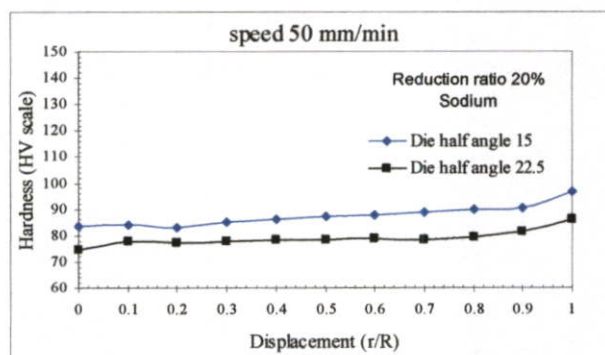
รูปที่ 5.45 ลักษณะค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$

สารหล่อลื่น สบู่โซเดียม $r_c = 41\%$ ที่ความเร็ว 5 mm/min

5.2.4 ผลการเปรียบเทียบความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมคาย 15 และ 22.5 องศา

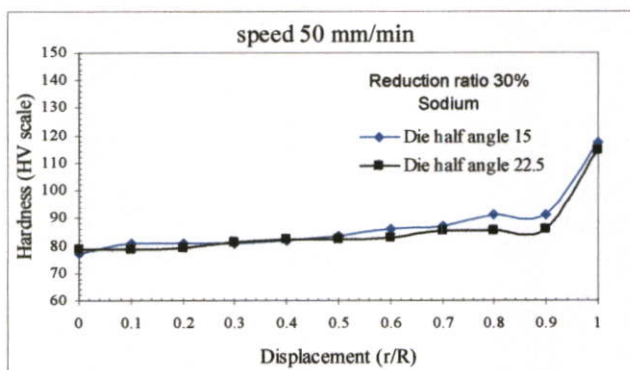
เมื่อทำการเปรียบเทียบความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ขนาดครึ่งมุมคายต่างกัน ที่ความเร็วในการดัดขึ้นรูปและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเดียวกันจากรูป 5.46 เป็นการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น ความเร็วในการดัดขึ้นรูป 50 มิลลิเมตรต่อนาที ผลที่ได้พบว่าที่ขนาดครึ่งมุมคาย 15 องศา ให้ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมที่มากกว่า ความแข็งที่ได้จากขนาดครึ่งมุมคาย 22.5 องศา เนื่องจากที่ขนาดครึ่งมุมคายที่มากขึ้นจาก 15 องศา เป็น 22.5 องศา ใช้แรงในการดัดขึ้นรูปน้อยลง การดัดขึ้นรูปที่ครึ่งมุมคาย 22.5 องศา นั้นแท่งอลูมิเนียมจะรับความเค้นอัดเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถไหลผ่านคายได้ ต่างกับที่ขนาดครึ่งมุมคาย 15 องศา ที่ต้องได้รับความเค้นอัดที่มากกว่าทำให้แท่งอลูมิเนียมเกิดการอัดตัวภายในแท่งอลูมิเนียมก่อนที่จะไหลผ่านคายได้ ทำให้ความแข็งที่เกิดขึ้นภายในแท่งอลูมิเนียมมี

ค่ามากกว่าเมื่อเทียบที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ความเร็วในการดัดขึ้นรูป และสารหล่อลื่นชนิดเดียวกัน



รูปที่ 5.46 เปรียบเทียบความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15$ และ 22.5° สารหล่อลื่น สบู่โซเดียม $r_c = 20\%$ ที่ความเร็ว 50 mm/min

รูปที่ 5.47 แสดงความแข็งที่ได้จากการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ ใช้สบู่โซเดียมเป็นสารหล่อลื่น ความเร็วในการดัดขึ้นรูป 50 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลที่ได้พบว่าที่ขนาดครึ่งมุมดัด 15 และ 22.5 องศา ความแข็งที่วัดได้ภายในแท่งอลูมิเนียมมีค่าใกล้เคียงกัน จะแตกต่างกับบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่ครึ่งมุมดัด 15 องศา ความแข็งอยู่ที่ 117.4 HV และที่ครึ่งมุมดัด 22.5 องศา อยู่ที่ 114.5 ซึ่งต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 5.47 เปรียบเทียบความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมจากการดัดขึ้นรูปที่ $\alpha = 15$ 22.5 และ 30° สารหล่อลื่น สบู่โซเดียม $r_c = 30\%$ ที่ความเร็ว 50 mm/min

จากผลการทดลองที่ได้ค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียมมีการเพิ่มขึ้น 2 ส่วน ส่วนแรกคือการเพิ่มขึ้นอย่างเท่าๆกันบริเวณรอบแกนกลางของแท่งอลูมิเนียม การเพิ่มขึ้นของความแข็งบริเวณรอบแกนกลางนี้เนื่องจากการอัดตัวของแท่งอลูมิเนียมภายในเบ้าประคองเนื่องจากแรงที่ใช้กดขณะทำการดัดขึ้นรูปก่อนที่แท่งอลูมิเนียมจะไหลผ่านดาด จะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียม

บริเวณนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 70-85 HV และส่วนที่สองคือการเพิ่มขึ้นของความแข็งบริเวณผิวหรือขอบของแท่งอลูมิเนียม ในการเพิ่มขึ้นของความแข็งในส่วนนี้เป็นการเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเลื่อนที่เกิดขึ้นจากความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างแท่งอลูมิเนียม เบ้าประคอง และคาน รวมทั้งการลดลงของขนาดแท่งอลูมิเนียมในแต่ละอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดนั่นเอง แต่ความแข็งนี้ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีสิ้นสุด จากการทดลองในกรณีครึ่งมุมคาน 15 22.5 และ 30 องศา ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นที่ทำการทดสอบได้มีค่าอยู่ที่ 141 HV เท่านั้น

5.3 ความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียม (Density of Billet)

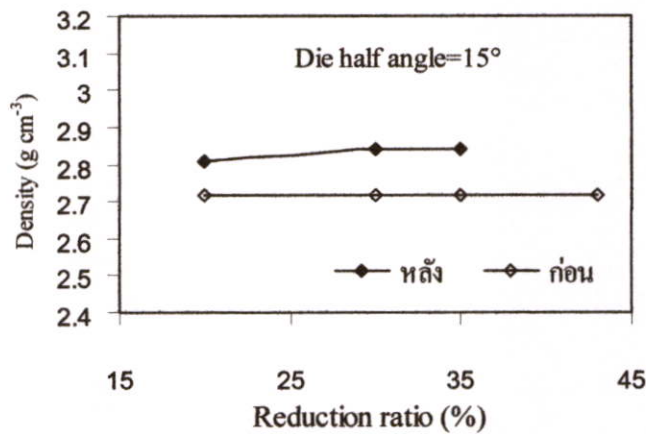
ในการหาค่าความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูปนี้ ใช้วิธีการชั่งแท่งอลูมิเนียมเพื่อหาน้ำหนักและ การวัดปริมาตรน้ำที่เพิ่มขึ้นหลังจากถูกแทนที่ด้วยแท่งอลูมิเนียมเพื่อหาปริมาตรของแท่งอลูมิเนียมดังที่กล่าวไว้ในวิธีการทดลองของบทที่ 4 ซึ่งหลักการของการหาความหนาแน่นนี้จะคำนึงการลดและการเกิดโพรงภายในแท่งวัสดุ คือหากในการดัดขึ้นรูปวัสดุเกิดความเค้นอัดไฮโดรสแตติกที่สูงจะช่วยกำจัดการเพิ่มขนาดของโพรง หรือลดขนาดความโตของโพรงลงได้ ทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกัน หากเกิดแรงดึงไฮโดรสแตติกจะเร่งการเกิดโพรงภายใน ทำให้ความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมลดลง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังนี้

5.3.1 ความหนาแน่นจากการดัดขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมคาน 15 22.5 และ 30 องศา

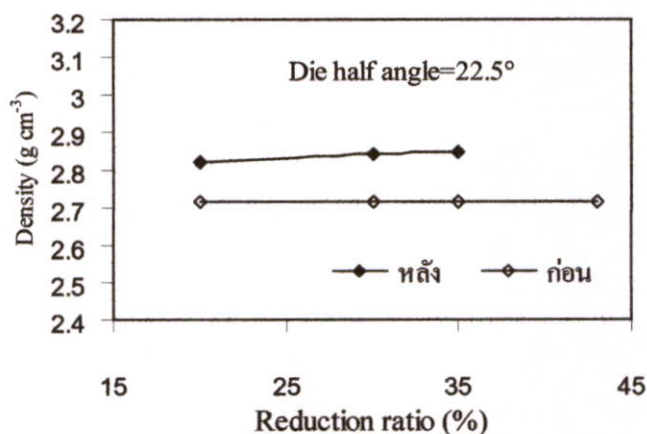
แท่งอลูมิเนียมที่นำมาใช้ในการดัดขึ้นรูป ก่อนทำการดัดขึ้นรูปทำการหาค่าความหนาแน่นได้ค่าความหนาแน่น 2.718 g/cm^3 ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากตารางคุณสมบัติของวัสดุ 2.7 g/cm^3 มีค่าใกล้เคียงกัน และจากการดัดขึ้นรูปในขนาดครึ่งมุมคาน 15 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งอลูมิเนียมจากการดัดขึ้นรูปที่ความเร็วต่างกัน 7 ความเร็ว ใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่นจะมีค่าความหนาแน่นมากกว่าแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการดัดขึ้นรูป โดยเมื่อทำการดัดขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.808 2.839 และ 2.83928 g/cm^3 ตามลำดับ แสดงผลในรูปที่ 5.48 จากรูปพบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้จากการดัดขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นจากเดิมเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 30 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดขึ้นไปอีกเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นที่ได้มีค่าเกือบจะคงที่เมื่อเทียบกับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองที่ได้นี้แสดงให้เห็นได้ว่าการดัดขึ้นรูปในกรณีนี้ทำให้ ค่าความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมมีค่ามากขึ้นจากเดิมได้สูงสุด 4.46 เปอร์เซ็นต์

และจากการดัดขึ้นรูปในขนาดครึ่งมุมคาน 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งอลูมิเนียมจากการดัดขึ้นรูปที่ความเร็วต่างกัน 7

ความเร็ว ใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่นจะมีค่าความหนาแน่นมากกว่าแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการ
 ดันขึ้นรูปเช่นเดียวกับกับกรณีครึ่งมุมคาย 15 องศา โดยเมื่อทำการดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลด
 ขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.819 2.84447 และ 2.8452 g/cm^3
 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 5.49 จากรูปพบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้จากการดันขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นจาก
 เดิมเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 30 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน
 การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดขึ้นไปอีกเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นที่ได้มีค่าเกือบจะคงที่เมื่อ
 เทียบกับอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 30 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองที่ได้นี้แสดงให้เห็น
 ได้ว่าการดันขึ้นรูปในกรณีนี้ทำให้ ค่าความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมมีค่ามากขึ้นจากเดิมได้
 สูงสุด 4.67 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.48 ความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งอลูมิเนียมที่ $\alpha = 15^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม
 $r_e = 20$ 30 และ 35%



รูปที่ 5.49 ความหนาแน่นเฉลี่ยของแท่งอลูมิเนียมที่ $\alpha = 22.5^\circ$ สารหล่อลื่นสบูโซเดียม
 $r_e = 20$ 30 และ 35%

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในเรื่อง ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดันขึ้นรูปแบบ เย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม โดยในการดันขึ้นรูปที่ใช้ในการทดลองเป็นการดันขึ้น รูปแบบดันไปด้านหน้า (Forward or direct extrusion) ที่อุณหภูมิห้อง ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี ทั้งหมด 4 ตัวแปรดังนี้ ขนาดครึ่งมุดคาย 3 ขนาด คือ 15 22.5 และ 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาด พื้นที่หน้าตัด 20 30 35 และ 43 เปอร์เซ็นต์ที่ครึ่งมุดคาย 15 และ 22.5 และ 41 เปอร์เซ็นต์ที่ครึ่งมุด คาย 30 องศา ความเร็วในการดันขึ้นรูป 7 ความเร็ว คือ 5 10 20 30 35 40 และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และ สภาวะสารหล่อลื่นโดยใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็ง คือสปูโซเดียมผง และ สารหล่อลื่นแบบ เหลว 2 ชนิดคือ น้ำมันหล่อลื่น SAE 40 และ น้ำมันมะพร้าวดิบ ภายหลังจากการทดลองดันขึ้นรูป จากตัวแปรดังกล่าวแล้วทำการศึกษาหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับแท่งอลูมิเนียม คือ ความเค้นที่เกิดขึ้น ขณะดันขึ้นรูป ความแข็งของแท่งอลูมิเนียม และความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียม จากผลการ ทดลองที่ได้จากการดันขึ้นรูปโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรให้การทดลองมีความน่าเชื่อถือ และนำมา วิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้ในส่วนของ แรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปสามารถสรุปได้ ดังนี้คือ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดส่งผลโดยตรงกับ แรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้น รูป โดยเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นแรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้น รูปจะมีค่ามากขึ้นตาม [5] และ [6] จากการทดลองของ Onuh และคณะ [10] และ Horrobin และ Nedderman [12] พบว่า เมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นทำให้ความเค้นที่ใช้ในการ ดันขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเช่นกัน และจากการดันขึ้นรูปที่ขนาดครึ่งมุดคายที่ใหญ่ขึ้นจาก 15 เป็น 22.5 และ 30 องศา ส่งผลต่อแรงและความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปให้มีค่าลดลง โดยในการดันขึ้นรูปที่ครึ่ง มุดคาย 15 และ 22.5 องศา สามารถดันขึ้นรูปได้โดยใช้แรงในการดันขึ้นรูปไม่เกิน 100 kN อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดอยู่ที่ 35% และการดันขึ้นรูปที่ครึ่งมุดคาย 30 องศา สามารถดัน ขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดได้ถึง 41% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Noorani และคณะ [9] พบว่าแรงที่ใช้ในการดันขึ้นรูปโดยวิธีการจำลองทางไฟไนต์อีลิเมนต์ ครึ่งมุด คายที่ให้ค่าแรงน้อยสุดในการดันขึ้นรูปที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน มีค่าเท่ากับ 30 องศาซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ในส่วนของความเร็วที่ต่างกันในการทดลองดันขึ้น รูปจากผลการทดลองที่ได้พบว่า ความเร็วไม่ทำให้แรงและความเค้นในการดันขึ้นรูปต่างกัน

เช่นเดียวกับการทดลองของ Onuh และคณะ [10] และผลเนื่องจากสภาวะสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง คือการใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็ง จะใช้แรงและความเค้นในการดันขึ้นรูปน้อยกว่าการใช้สารหล่อลื่นแบบของเหลว เมื่อครั้งมุดคาย อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และ ความเร็วในการดันขึ้นรูปที่เท่ากัน โดยการใช้อุณหภูมิของเหลวนั้นแรงและความเค้นที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการคำนวณมากเนื่องจาก สารหล่อลื่นแบบของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความดันที่สูง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่ามากขึ้นหรือเรียกได้อีกอย่างว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นอยู่กับความดันตามสมการของ Roland [13]

ในส่วนของความแข็งของแท่งอลูมิเนียม จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งมีการเพิ่มขึ้นแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการเพิ่มเนื่องจากการอัดตัวของวัสดุภายในเบ้าประคอง ส่วนที่สองเป็นการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการอัดตัวของวัสดุและการเลื่อนเนื่องจากความเสียดทานขณะที่วัสดุไหลผ่านเบ้าประคอง โดยที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งภายในแท่งอลูมิเนียม คือเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นบริเวณขอบของแท่งอลูมิเนียมและลึกเข้าไปในผิวของแท่งอลูมิเนียม 10-20 เปอร์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่านั้น เนื่องจากบริเวณขอบจนถึงผิวของแท่งอลูมิเนียมเกิดแรงเฉือนขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานขณะไหลผ่านเบ้าประคองและยังเกิดการอัดตัวอีกครั้งขณะบีบตัวไหลผ่านคาย ทำให้บริเวณขอบเกิดความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมาก ความเครียดนี้ส่งผลต่อค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง จากการทดลองของ Petruska และ Janicek [14] เป็นการหาความสัมพันธ์ของความเครียดและความแข็งด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการดันขึ้นรูปแบบเย็นของเหล็ก ผลที่ได้คือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างความเครียดจะมีค่ามากขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งของเหล็กมีค่ามากขึ้นตาม แต่เมื่อทำการดันขึ้นรูปที่ขนาดครั้งมุดคายต่างกันอัตราส่วนการลดขนาดและความเร็วที่เท่ากัน ความแข็งที่วัดได้บริเวณขอบของแท่งอลูมิเนียมมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงสภาวะสารหล่อลื่นให้ต่างกันขณะทำการทดลอง การใช้สบูโซเดียมเป็นสารหล่อลื่นจะให้ค่าความแข็งที่คือน้อยกว่าการใช้สารหล่อลื่นแบบของเหลวทั้งสองชนิด เมื่อพิจารณากลับไปดูในเรื่องของความเค้นที่ใช้ในการดันขึ้นรูปจะพบว่า การใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็งใช้แรงและความเค้นที่น้อยกว่าการใช้สารหล่อลื่นแบบของเหลว เสมือนว่าสารหล่อลื่นแบบของแข็งช่วยลดแรงเสียดทานได้ดีความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียมเกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้สารหล่อลื่นแบบของเหลว ที่ใช้ความเค้นในการดันขึ้นรูปที่สูง ความความแข็งเมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ใช้ในการดันขึ้นรูปแล้ว ความเร็วไม่ส่งผลใดๆต่อค่าความแข็งคือ ความเร็วที่ต่างกันค่าความแข็งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก

ความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมภายหลังจากการคั้นขึ้นรูป จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดที่มากขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียง 4.6 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดครึ่งมม. ความหนาแน่นที่วัดได้มีขนาดใกล้เคียงกัน

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำนายค่าแรงและความเค้นที่ใช้ในการคั้นขึ้นรูป เพื่อให้โลหะเกิดการไหลและเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามที่ต้องการ เนื่องจากในความจริงมักมีความไม่แน่นอนซึ่งเกิดขึ้นจากผลของความเสียดทานเป็นส่วนมาก จึงเป็นการยากที่จะทำนายแรงหรือภาระที่ต้องการในการขึ้นรูปได้อย่างแม่นยำ จากงานวิจัยนี้ผลของแรงและความเค้นที่ได้จากการทดลองมีค่าไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการทดลอง เพราะในสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นนั้นมีการตั้งสมมติฐานไว้หลายประการ และในสมการความเค้นในการคั้นขึ้นรูปไม่ได้มีการพิจารณาในส่วนของค่าความหยาบผิว และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เปลี่ยนแปลงตามความคั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถที่จะศึกษาเพิ่มเติมต่อไป เพื่อที่จะสร้างสมการที่ให้ค่าความเค้นที่ใช้ในการคั้นขึ้นรูปมีความแม่นยำมากกว่านี้ และสามารถใช้ในทางปฏิบัติได้จริง

บรรณานุกรม

- [1] ธนิต แต่งศรี. 2546. “การศึกษาผลกระทบของครี้งมุดคาย 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.
- [13] L. Roeland, “Transient non-Newtonian elastohydrodynamic lubrication analysis of an involute spur gear”, *Journal of wear*, 1997, pp.67-73.

- [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.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

ME NETT 20th
SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
EXTENDED ABSTRACT

การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20
วันที่ 18-20 ตุลาคม 2549
ณ แมนคาร์ม โกลเด้น วิลเลจ โฮเทล แอนด์ รีสอร์ท
เขาใหญ่ อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

Hitachi Global Storage Technologies

TNGC MTEC McGraw Hill BELTON TECHNOLOGY WILEY

รูปที่ ก.1 หน้าปกวารสารทางวิชาการที่ลงตีพิมพ์บทความ

สารบัญบทความ

Paper ID	Title	page
Aerospace and Marine Engineering (AME)		
AME004	แนวทางการควบคุมด้วยสัญญาณภาพสำหรับการบินสังเกตและติดตามของเครื่องบิน	16
AME005	Studies of Flow Characteristics of Injected Jet Fuel under Supercritical Conditions	17
AME006	UAV Path Planning for Maximum Coverage Surveillance of Area with Different Priorities	19
Applied Mechanics, Material and Manufacturing (AMM)		
AMM002	การศึกษาเชิงทดลองของมุมเอียงและความเร็วรอบของสายพานลำเลียงต่อการแยกคราบน้ำมันบนผิวน้ำที่ขัง	21
AMM003	ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบยื่นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม	23
AMM007	การปรับปรุงคุณภาพผิวชิ้นงานด้วยวิธีอะเบรซิฟมาซินนิ่ง	25
AMM009	การศึกษาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของจานเบรกรถยนต์	27
AMM010	Buckling analysis of composite laminate rectangular and skew plates with various edge support conditions	29
AMM012	สมมูลแรงเหวี่ยงรอบแกนหมุนของล้อขาคันสองชั้น	31
AMM013	อิทธิพลของอุณหภูมิผิวน้ำโลหะในกระบวนการหล่อโลหะอลูมิเนียม	33
AMM016	การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความถี่ธรรมชาติในเครื่องยนต์เส้นดาปภายในด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	35
AMM017	การออกแบบชิ้นส่วนรองรับการกระแทกสำหรับผลิตภัณฑ์	37
AMM018	ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องดักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ส่วนที่ 1: อนุภาคเขม่าควันและฝุ่นแป้ง	39
AMM019	ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคเขม่าควันของเครื่องดักตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต : ส่วนที่ 2 ผลกระทบของความต่างศักย์	41
AMM020	การวิเคราะห์และจำลองการทำงานไดนามิกส์ของข้อเข่ามนุษย์	43
AMM021	การคืนสภาพคุณสมบัติเชิงกลของปะเก็นโลหะทองแดงที่ใช้งานแล้ว	45
AMM022	การหาระยะการเยื้องศูนย์ของแกนเพลมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสโดยการวิเคราะห์กระแสเตอร์	47
AMM023	กราฟช่วยออกแบบหัวเชื่อมอุลตราโซนิคแบบครึ่งวงกลม	49
AMM026	การหาค่าความแกร่งพลศาสตร์และความหน่วงของยางธรรมชาติ โดยวิธีสั้นสะเทือนที่ฐาน	51
AMM027	การศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล	53
AMM028	Bending Analysis of Square Thin Plates with Two Beamed Edges and Two Free Edges Supported at Corners and Center-Column	55
AMM029	พฤติกรรมและกลไกการแตกหักของเทอร์โมเซททีฟที่ขึ้นรูปภายใต้สภาพความเค้นระนาบและความเครียดระนาบ	57
AMM030	การล้าของแผ่นล้อยึดคานกระดุกคานขาที่หัก	59

รูปที่ ก.2 สารบัญวารสารทางวิชาการที่ลงตีพิมพ์บทความ

ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม

EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF COLD EXTRUDED ALUMINIUM ROD

สมชัย ตันทวีรุพท์¹ สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ² กรรณชัย กัลยาศิริ³

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ³ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

*E-mail: smch46auto@yahoo.com

Somchai Tunthawiroon¹ Somchai Norasetthasophon² Kannachai Kanlayasiri³

^{1,2}Department of Mechanical Engineering ³Department of Industrial Engineering

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

*E-mail: smch46auto@yahoo.com

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้วการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียม ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง หรือดัดขึ้นรูปแบบเย็น (cold extrusion) จะให้รูปร่างและคุณภาพผิวที่ดีกว่าการดัดขึ้นรูปแบบร้อนและลดต้นทุนในการผลิตได้อย่างมาก งานวิจัยนี้นำเสนอ ผลกระทบเนื่องจากตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็น ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งภายในหน้าตัดของชิ้นงาน โดยการดัดขึ้นรูปที่ใช้ในการศึกษาเป็นการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียม (billet) ผ่านดายรูปกรวย (conical dies) ด้วยความเร็วในการดัดขึ้นรูปคงที่ จากการทดลองพบว่า ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบที่มุมดายต่างกัน แต่มีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกันพบว่า ค่าความแข็งภายในหน้าตัดของชิ้นงานมีค่าไม่แตกต่างกัน

Abstract

Generally, cold extrusion of aluminium billet provides better shape and surface finish than hot extrusion, and may reduce production cost of the extrusion process. This research presents effects of process parameters of cold extrusion on internal hardness of the aluminium billet. The billet was cold-extruded through a conical die at a constant extrusion speed. Result showed that internal hardness of aluminium billet increases as reduction ratio of area increases. When compared between two die angles, internal hardness of extruded aluminium billets are not different if area reduction ratio are not much different.

Keywords: Cold extrusion, Hardness, Dies angle

1. บทนำ

ในกระบวนการดัดขึ้นรูป พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะจะถูกลด หรือถูกเปลี่ยน โดยใช้แรงกดให้แท่งโลหะไหลผ่านแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างแน่นอน ซึ่งสิ่งสำคัญที่ต้องการจากกระบวนการนี้คือ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมทางกลตามต้องการ คุณสมบัติของโลหะที่ปราศจากข้อบกพร่อง และ รูปร่างของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ กระบวนการดัดขึ้นรูปสามารถทำได้ทั้งอุณหภูมิปกติของวัสดุ คือ การดัดขึ้นรูปสภาพเย็น (cold extrusion) หรือทำให้วัสดุอุณหภูมิสูงขึ้น (hot extrusion) ตามสภาวะที่เหมาะสมในการดัดขึ้นรูป กระบวนการดัดขึ้นรูปในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การดัดขึ้นรูปโดยตรง (direct extrusion) และการดัดขึ้นรูปโดยอ้อม (indirect extrusion)

โลหะส่วนใหญ่สามารถทำการดัดขึ้นรูปได้หลายวิธี ตามความเหมาะสม ซึ่งโลหะทั่วไปที่สามารถดัดขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิปกติคือ ตะกั่ว อลูมิเนียม และทองแดง การดัดขึ้นรูปในสภาพเย็นของโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (cold extrusion of non-ferrous components) สามารถทำได้ง่าย เพราะ ใช้แรงในการขึ้นรูปหรือทำให้โลหะเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่าโลหะกลุ่มเหล็ก

ตัวแปรหลักๆในกระบวนการดัดขึ้นรูป คือ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด มุมดาย (dies angle) ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของดายกับชิ้นงาน และความเร็วในการดัดขึ้นรูป ในส่วนของมุมดายมีผลกระทบโดยตรงกับแรงที่ใช้ในการดัดขึ้นรูป และความเสียหายที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิดรอยร้าวภายในบางครั้ง เรียกว่า Chevron crack หรือรอยแตกร้าวรูปบั้งนายสิบ [1] ในทางทฤษฎีเราสามารถกำหนดอัตราส่วนการลดขนาด และสภาวะความเสียดทานที่แน่นอน เพื่อที่จะหามุมดายที่ใช้แรงในการดัดขึ้นรูป และความเค้นที่น้อยที่สุดได้ [2] แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ไม่สามารถนำกระบวนการดัดขึ้นรูปที่มุมดายนี้

ไปใช้ได้ เพราะจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติอย่างอื่นประกอบกันด้วย เช่น คุณภาพผิว ความเที่ยงตรงของขนาด การบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ภายหลังการดัดขึ้นรูป [3] ซึ่งกรณีนี้ถ้าการบิดเบี้ยวมีมากก็หมายความว่าชิ้นงานจะไม่สามารถใช้งานได้ ส่งผลต่อต้นทุนในกระบวนการผลิตที่เพิ่มขึ้นได้

ค่าความแข็งเป็นเกณฑ์อย่างหนึ่งที่ใช้ในการเลือกวัสดุ และการเลือกเครื่องมือให้เหมาะสมกับการผลิต เพื่อที่จะได้ชิ้นงานที่ทนต่อการสึกหรอและเครื่องมือที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมขนาดเส้นที่อุณหภูมิห้อง และใช้สารหล่อลื่นเพื่อลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ตัวแปรที่นำมาศึกษาคือ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และมุมคาย วัตถุประสงค์ในการทำงานวิจัยนี้เพื่อ ศึกษาว่าตัวแปรทั้ง 2 ชนิดที่ได้เลือกมาข้างต้นนั้นส่งผลกระหนบอย่างไร กับค่าความแข็งภายในหน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมหลังจากผ่านกระบวนการดัดขึ้นรูป

2. ทฤษฎีพื้นฐานของการดัดขึ้นรูป

สิ่งสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการดัดขึ้นรูปอลูมิเนียม จะต้องพิจารณาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยก็คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุขณะทำการดัดขึ้นรูป เพราะความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกับคุณสมบัติต่างๆของอลูมิเนียมที่นำมาทำการดัดขึ้นรูป เช่น ค่าความต้านทานแรงดึง หรือแรงเฉือนในวัสดุ หรือแม้กระทั่งความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้น การออกแบบคายและเครื่องมือที่ดีจะสามารถลดค่าความเค้นนี้ลงได้

ความเค้นที่เกิดขึ้นในแท่งอลูมิเนียมขณะไหลผ่านคาย จะ เป็นความเค้นที่มีคุณสมบัติอยู่ในช่วงพลาสติกของอลูมิเนียม นั้นๆ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ อลูมิเนียมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงพลาสติกเช่นกัน คือ เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ลักษณะของแท่งอลูมิเนียมที่ไหลผ่านคาย ความเค้นอัด และความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับคาย แสดงไว้ในรูปที่ 1

จะเขียนได้ดังสมการที่ 1

$$\sigma = \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} = \bar{\sigma} \ln \left(\frac{1}{1-r_e} \right) \tag{1}$$

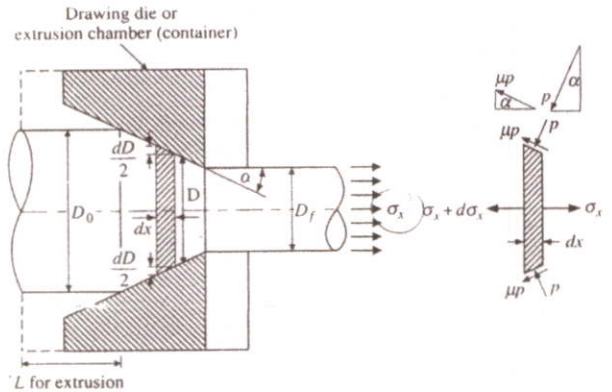
- เมื่อ σ = ความเค้นอัด
- $\bar{\sigma}$ = ความเค้นไหลเฉลี่ย (Mean flow stress)
- A_o, A_f = พื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้าและทางออกคาย
- r_e = อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด
= $(A_o - A_f) / A_o$

พิจารณาค่าแก้สำหรับแรงเสียดทานภายนอก และแรงเฉือนภายในที่เกิดขึ้น สมการที่ 1 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r_e) \bar{\sigma} \ln \frac{A_o}{A_f} \tag{2}$$

$$\sigma = C_f(\alpha) C_i(\alpha, r_e) \bar{\sigma} \ln \frac{1}{1-r_e} \tag{3}$$

- เมื่อ C_f = ฟังก์ชันค่าปรับแก้สำหรับแรงเสียดทานภายนอก
- C_i = ฟังก์ชันค่าปรับแก้สำหรับแรงเฉือนภายใน
- α = ขนาดครึ่งมุมคาย



รูปที่ 2 แสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นบนแท่งอลูมิเนียมในช่วงความยาว dx ขณะอลูมิเนียมสัมผัสกับคาย [4]

จากแผนภาพสมดุลแรงในรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการผลรวมของแรงในแนวแกน x ได้ คือ

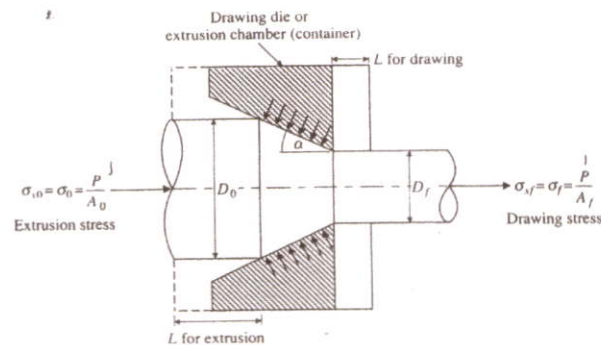
$$\begin{aligned} & (\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 + \dots \\ & \dots + p \left(\pi D \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha + \mu p \left(\pi D \cdot \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

และถ้าไม่คิดผลของเทอมที่มีค่าน้อย สมการจะลดรูปได้ดังนี้

$$D d\sigma_x + 2[\sigma_x + p(1 + \mu \cot \alpha) dD] = 0 \tag{5}$$

$$2r dr d\sigma_x + r^2 d\sigma_x + 2pr dr + \frac{2r dr \cdot \tau}{\tan \alpha} = 0 \tag{6}$$

เมื่อ D, r คือเส้นผ่านศูนย์กลางและรัศมีของช่วงความยาว dx



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของอลูมิเนียมที่ไหลผ่านคาย ความเค้นอัด และความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับคาย [4]

จากหลักสภาวะการแปรรูปของความเค้น การดัดขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมผ่านคายรูปกรวย เมื่อไม่คิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเฉือนภายใน และแรงเสียดทานภายนอก จาก [1] และ [4] สมการความเค้นที่เกิดขึ้นจากการดัดขึ้นรูปในกรณีที่เป็น การเปลี่ยนแปลงแบบโฮโมจีนีอัส

- p คือแรงปฏิกริยาระหว่างตายและแท่งอลูมิเนียม
- μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส
- τ คือความเค้นเฉือนจากแรงเสียดทาน

ในทำนองเดียวกัน พิจารณาผลรวมของแรงในแนวรัศมี จะได้ความเค้นที่จะทำให้ตายแตก (die-breaking stress) แสดงในสมการที่ 7 จัดรูปสมการใหม่ และไม่คิดเทอมที่มีค่าน้อยจะได้ความเค้นในแนวรัศมีแสดงในสมการที่ 8 คือ

$$\sigma_r (\pi D dx) + \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \cos \alpha - \mu p \left(\pi D \frac{dx}{\cos \alpha} \right) \sin \alpha = 0 \quad (7)$$

$$\sigma_r = -p(1 - \mu \tan \alpha) \quad (8)$$

ในกรณีที่มีมุมขนาดเล็ก $\mu \tan \alpha$ ไม่จำเป็นต้องนำมาคิดจะได้ $\sigma_r = -p$ และถ้าให้ $B = \mu \cot \alpha$ เมื่อทำการอินทิเกรตผลลัพธ์สมการเชิงอนุพันธ์และจัดรูปสมการใหม่ให้ง่ายขึ้น จะได้สมการความเค้นอัดเฉลี่ยเป็น

$$\frac{\sigma}{\sigma} = \left[1 + \frac{1}{B} \right] \left\{ 1 - \left[\frac{D_o}{D_f} \right]^{2B} \right\} \quad (9)$$

- เมื่อ $B = \mu \cot \alpha$
- $D_o, D_f =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป

3. การทดลอง

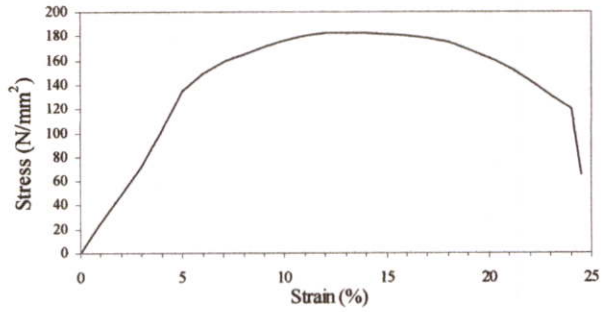
3.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง

อลูมิเนียม 6063 เป็นวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมชนิดนี้แสดงในตารางที่ 1 วัสดุก่อนการทดลองนั้นได้ทำการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางกล โดยทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบวัสดุ Testometric Testing Machine รับโหลดสูงสุด 10 ตัน ชิ้นงานทดสอบใช้ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Matrial (ASTM) ความยาวชิ้นงานทดสอบ (gauge length) 40 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดสอบได้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 3 ได้ค่า Yield stress เท่ากับ $\sigma_y = 140 \text{ MPa}$

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็น แท่งอลูมิเนียมหน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร ถูกตัดเป็นชิ้นสั้นๆ ในแต่ละชิ้นมีความยาว 20 มิลลิเมตร และก่อนทำการดัดขึ้นรูป จะเคลือบผิวแท่งอลูมิเนียมด้วยสารหล่อลื่น จากนั้นนำแท่งอลูมิเนียมที่ถูกเคลือบผิวด้วยสารหล่อลื่นนี้ไปใส่ไว้ในบ้ำประคอง (container) เพื่อทำการดัดขึ้นรูป

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบหลักของ Al 6063

ส่วนผสม (wt%)				
Cu	Mg	Si	Cr	Al
0.27	1.0	0.6	0.2	REM



รูปที่ 3 Stress-strain curve ของ Al 6063

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ ประกอบไปด้วย ชุดจับยึดตาย (die holder) บ้ำประคองแท่งอลูมิเนียม (container) ตั๊กกด (punch) และตาย แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดนี้ทำด้วยเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบเย็น ซึ่งตั๊กกดและตาย ได้ผ่านกระบวนการอบชุบเพื่อให้มีความแข็งและความแข็งแรงมากขึ้น ทนต่อการสึกหรอที่เกิดจากกระบวนการดัดขึ้นรูป และมีอายุการใช้งานนาน ค่าความแข็งของตั๊กกดและตาย ภายหลังจากการอบชุบแล้วมีค่าเท่ากับ 60 HRC

สารหล่อลื่นที่ใช้ในการดัดขึ้นรูปในการทดลองนี้ คือ Sodium stearate soap ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นชนิดผงที่ใช้ในอุตสาหกรรมการดึงและดัดขึ้นรูปโลหะเพื่อลดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ในตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของสารหล่อลื่นชนิดนี้

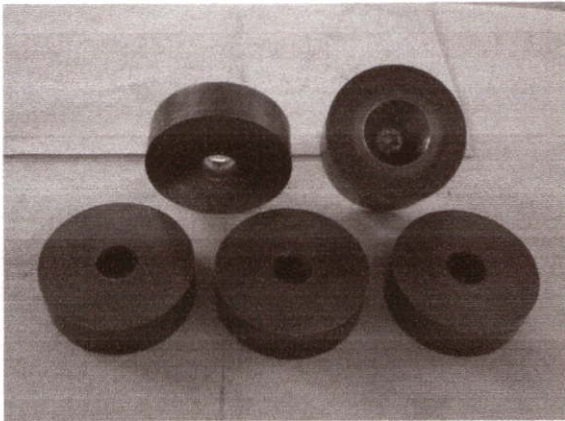


รูปที่ 4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง Die holder, container, ring holder และ punch

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเฉพาะของ Sodium stearate soap (Na-ST)

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

ชุดตายที่ใช้ในการทดลองมีขนาดครึ่งมมตาย (α) 2 มุมคือ (1) ครึ่งมม 22.5 องศา โดยมีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 4 ขนาดคือ 20 30 35 และ 43% (2) ครึ่งมม 30 องศา โดยมีอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41%



รูปที่ 5 ชุดตาย ครึ่งมม 22.5 และ 30 องศา

3.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ในการทดสอบคุณสมบัติค่าความแข็งของอลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปจากการทดลองนี้ ทำการทดสอบและวัดโดย เครื่องทดสอบความแข็ง Micro Vickers Hardness Testing (Vickers scale HV) น้ำหนักกด 0.3 กิโลกรัม ใช้เวลาทดสอบ 10 วินาที ซึ่งเหตุผลที่ใช้เนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กสามารถวัดค่าความแข็งได้อย่างละเอียดบนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน

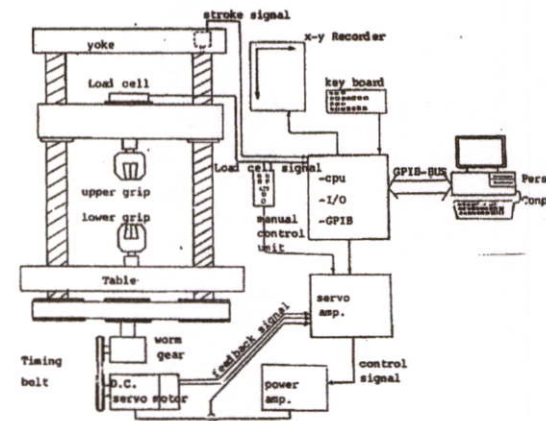
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองด้นขึ้นรูป ค่าความเค้นเฉลี่ยในการด้นขึ้นรูป (extrusion stress) แสดงผลไว้ในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ซึ่งในรูปเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเค้นเฉลี่ยในการด้นขึ้นรูปกับระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวกดและค่าความเค้นที่คำนวณได้จากสมการที่ 9 โดยที่ค่าความเค้นเฉลี่ยในการด้นขึ้นรูปนี้ได้จากเครื่องทดสอบวัสดุ ซึ่งรับแรงจากตัวกดผ่านทางโหลดเซลล์ และประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ ให้เปลี่ยนเป็นความเค้นขณะด้นขึ้นรูป โดยในรูปที่ 6 และ 7 แสดงเครื่องทดสอบวัสดุและไดอะแกรมการทำงานของเครื่องทดสอบวัสดุ รูปที่ 8 เป็นการด้นขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมมตาย 22.5 องศา ในอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างกัน 4 ขนาด พบว่า ความเค้นเฉลี่ยในการด้นขึ้นรูปมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น โดยค่าความเค้นเฉลี่ยในด้นขึ้นรูปสูงสุดที่เกิดขึ้นในอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 35 และ 43% คือ 254 318 330 และ 452 N/mm² ตามลำดับ และในรูปที่ 9 เป็นการด้นขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมมตาย 30 องศา ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ค่าความเค้นเฉลี่ยในการด้นขึ้นรูปสูงสุดคือ 440 N/mm² และเมื่อนำผลที่ได้จากรูปที่ 8 และรูปที่ 9 มาเปรียบกับสมการที่ 9 พบว่าค่าความเค้นอัดที่ได้จากสมการที่ 9 มีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นอัดที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้เพราะในสมการที่ 9 นั้น ไม่ได้พิจารณาถึงแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่าง แท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองขณะด้นขึ้นรูป จากการทดลองของ Bakhshi และ Jooybari (2002) [5] พบว่าผลเนื่องจากแรงเสียดทานนี้จะส่งผลต่อแรงที่ใช้ในการ

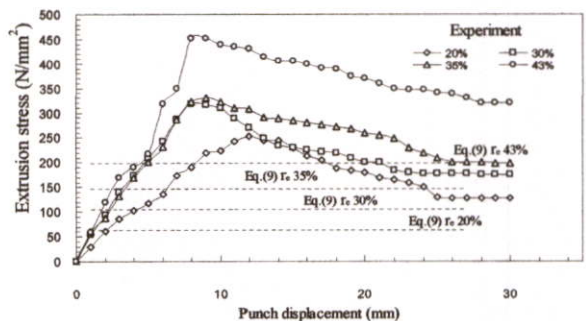
ด้นขึ้นรูปด้วย คือ เมื่อความยาวของแท่งอลูมิเนียมมาก ผิวสัมผัสระหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประคองก็จะมากขึ้นตาม ทำให้มีแรงเสียดทานมาก แรงเสียดทานนี้จึงส่งผลโดยตรง ทำให้แรงและความเค้นที่ใช้ในการด้นขึ้นรูปมากขึ้นไปด้วย ทำให้ผลที่ได้จากการทดลองและสมการที่ 9 ต่างกันค่อนข้างมาก



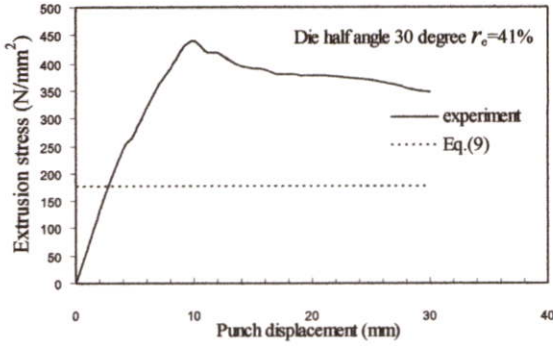
รูปที่ 6 ภาพด้านหน้าของเครื่องทดสอบวัสดุ



รูปที่ 7 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่องทดสอบวัสดุ

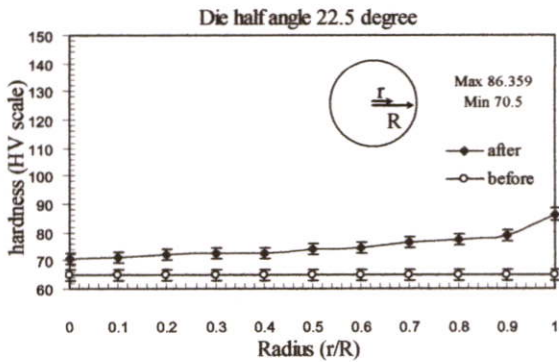


รูปที่ 8 แสดงความเค้นในการด้นขึ้นรูปที่ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20, 30, 35$ และ 43% เปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลอง และสมการที่ 9

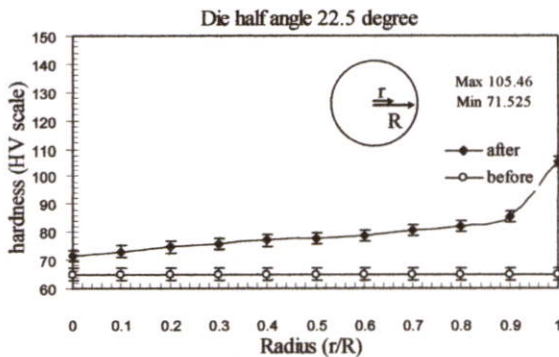


รูปที่ 9 แสดงความเค้นในการดันขึ้นรูปที่ $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$ เปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลอง และสมการที่ 9

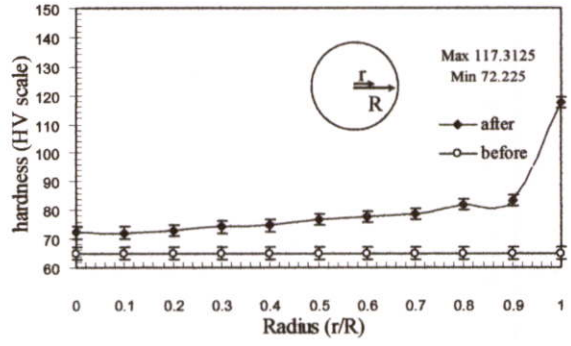
หลังจากการดันขึ้นรูป นำแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการดันขึ้นรูปแล้วไปทำการทดสอบค่าความแข็งภายในหน้าตัดเพื่อศึกษาถึง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง เทียบกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการดันขึ้นรูป จากนั้นสร้างกราฟเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางตามแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลาง จนถึงผิวของแท่งอลูมิเนียม (แกน x) เทียบกับค่าความแข็งที่ได้ (แกน y) แสดงในรูปที่ 10-14 โดยที่ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการดันขึ้นรูปมีค่าประมาณ 63-65 HV ทำการทดสอบโดยใช้น้ำหนักกด 0.3 กิโลกรัม เวลาในการกด 10 วินาที



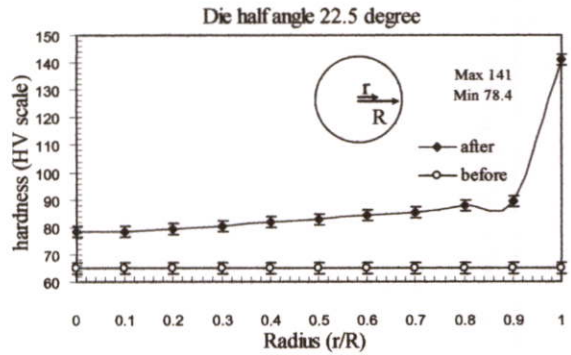
รูปที่ 10 ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$



รูปที่ 11 ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$



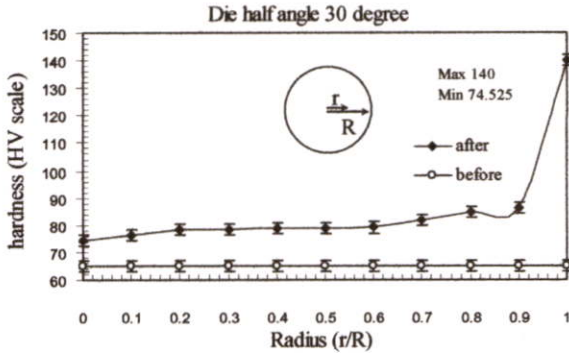
รูปที่ 12 ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$



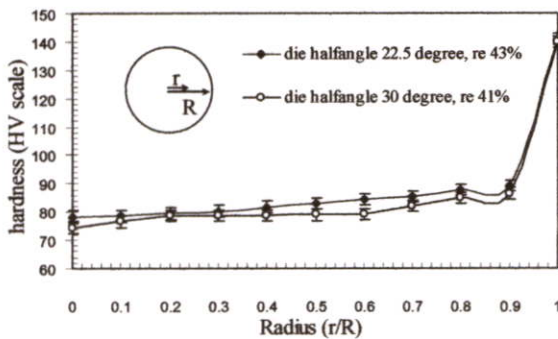
รูปที่ 13 ค่าความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 43\%$

ในรูปที่ 10-13 แสดงค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ผ่านการดันขึ้นรูปแล้วกับค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมก่อนทำการดันขึ้นรูป โดยทำการทดลองดันขึ้นรูปที่สภาวะครึ่งมุมตาย 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 35 และ 43% ตามลำดับ ผลที่ได้คือ ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยค่าความแข็งนี้ไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด แต่จะเพิ่มมากในบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม ลึกเข้าไป 10-20% จากผิวเท่านั้น และค่าความแข็งที่เกิดขึ้นมากที่สุดในสภาวะครึ่งมุมตาย 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 20 30 35 และ 43% นี้วัดได้ที่ผิวเท่ากับ 86.3 105.4 117.3 และ 141 HV ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้นี้ อาจคาดคะเนได้ว่า ที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดไม่มาก แท่งอลูมิเนียมจะไหลผ่านตายได้ง่าย โดยที่โครงสร้างภายในแท่งอลูมิเนียมบริเวณที่สัมผัสกับตาย เกิดการอัดตัวและเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมเพียงเล็กน้อย ทำให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มไม่มากนัก แต่เมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น แท่งอลูมิเนียมจะไหลผ่านตายผ่านได้ยากขึ้น สังเกตได้จากความเค้นอัดที่มีค่าสูงขึ้นในรูปที่ 6 ทำให้โครงสร้างภายในแท่งอลูมิเนียมบีบอัดมากขึ้นไหลผ่านตาย จึงทำให้ค่าความแข็งมีค่ามากขึ้นตาม และสาเหตุที่ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นมากเฉพาะบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม อาจเนื่องมาจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างตายกับผิวของแท่งอลูมิเนียมขณะดันขึ้นรูป แรงเสียดทานนี้จะทำให้เกิดบริเวณการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation zone) และความ

เค้นเฉือนภายในเนื้อวัสดุ หลังจากแท่งอลูมิเนียมถูกดันผ่านคายนอกมา ความเค้นเฉือนนี้จะกลับกลายเป็นความเค้นตกค้าง (residual stress) จึงทำให้ค่าความแข็งบริเวณผิวของแท่งอลูมิเนียม มีค่ามากกว่าบริเวณกลางหน้าตัด ในบริเวณที่แท่งอลูมิเนียมสัมผัสกับคายนอกเพียง 10-20% ของหน้าตัดเท่านั้น



รูปที่ 14 ค่าความแข็งบนหน้าตัดของแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป ที่สภาวะ $\alpha = 30^\circ$, $r_c = 41\%$



รูปที่ 15 แสดงค่าความแข็งเปรียบเทียบระหว่าง ครึ่งมุมตาย 22.5 และ 30 องศา ที่มีอัตราส่วนการลดขนาดใกล้เคียงกัน

ในรูปที่ 14 เป็นผลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะครึ่งมุมตาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ค่าความแข็งที่วัดได้สูงสุดเกิดขึ้นที่ผิว มีค่าเท่ากับ 140 HV เช่นเดียวกับที่สภาวะครึ่งมุมตาย 22.5 องศา คือความแข็งไม่ได้เพิ่มขึ้นเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัดของแท่งอลูมิเนียม ส่วนในรูปที่ 15 เป็นการเปรียบเทียบความแข็งที่ขนาดครึ่งมุมตายต่างกัน แต่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกันคือ ครึ่งมุมตาย 22.5 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 43% และ ครึ่งมุมตาย 30 องศา อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของมุมตายขึ้น แต่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกัน ค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียมที่ได้ก็มีใกล้เคียงกัน คือ มีค่าความแข็ง 141 และ 140 HV ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันเพียง 1 HV เท่านั้น ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นแนวโน้มว่า ขนาดของครึ่งมุมตายไม่ทำให้ค่าความแข็งในแท่งอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นตาม หากอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดยังคงเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองดันขึ้นรูปแท่งอลูมิเนียมที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความเค้นในการดันขึ้นรูป และค่าความแข็งของแท่งอลูมิเนียม โดยในการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 4 ขนาด คือ 20 30 35 และ 43% ที่มุมตาย 22.5 องศา และ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 41% ที่มุมตาย 30 องศา จากผลการทดลองพบว่าขนาดของอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้น ทำให้ค่าความเค้นในการดันขึ้นรูปมีค่ามากขึ้นตาม แต่เมื่อนำค่าความเค้นที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 9 ซึ่งในสมการที่ 9 นั้นไม่คิดแรงเสียดทานขณะดันขึ้นรูประหว่างแท่งอลูมิเนียมกับเบ้าประกอบ ทำให้ผลที่ได้จากการทดลองและสมการที่ 9 มีค่าต่างกันค่อนข้างมาก อันเนื่องมาจากแรงเสียดทานดังกล่าว และในส่วนของคุณค่าความแข็งในแท่งอลูมิเนียม หลังจากการทดลองดันขึ้นรูปที่ขนาดมุมตาย 22.5 องศา พบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่ออัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดมุมตายต่างกันคือที่มุม 22.5 และ 30 องศา แต่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดใกล้เคียงกัน ค่าความแข็งที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความเค้นในการดันขึ้นรูปในการทดลองนี้ คือ อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด และมุมตาย ส่วนในกรณีค่าความแข็ง ขนาดของมุมตาย 22.5 และ 30 องศา ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของชิ้นงานในกรณีนี้

6. กิตติกรรมประกาศ

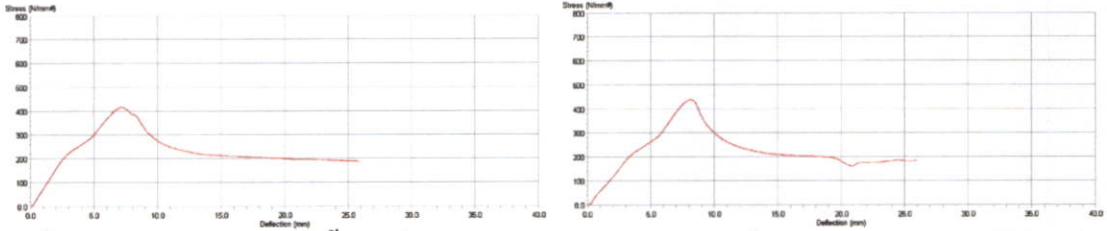
ขอขอบคุณ บ.อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมิคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนสารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง และคณะอาจารย์ทุกท่านที่ให้การปรึกษาและแนะนำจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

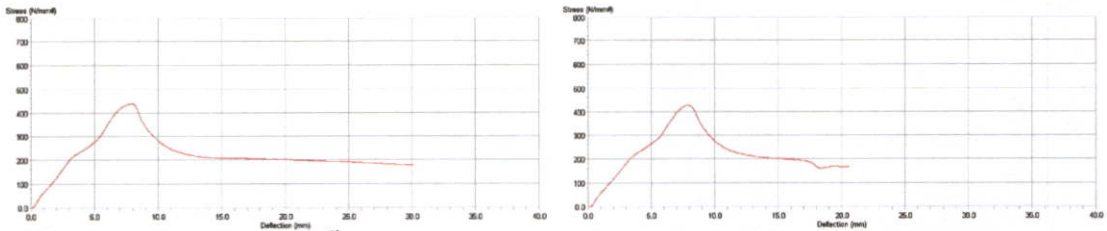
- [1] B. Avitzur, Metal Forming Processes and Analysis, McGraw-Hill, New York, 1986
- [2] M. Noorani, and S.J. Hosseini-pour, "Experimental and numerical study of optimal die profile in cold forward rod extrusion of aluminum", Journal of Materials Processing Technology, 2005, pp. 1572-1577.
- [3] S.O. 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.
- [4] Edward M. Mielnik, Metalworking Science and Engineering, McGraw-Hill, New York, 1991, pp. 397-463.
- [5] 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.

ภาคผนวก ข.

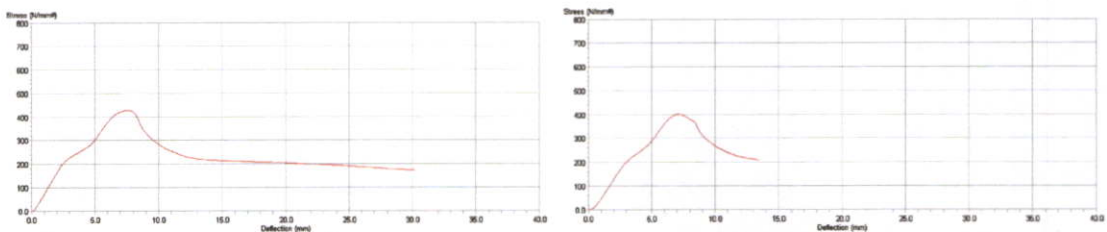
แผนภาพความเค้นในการคั่นขึ้นรูปกับระยะการเคลื่อนที่ของตัวกด



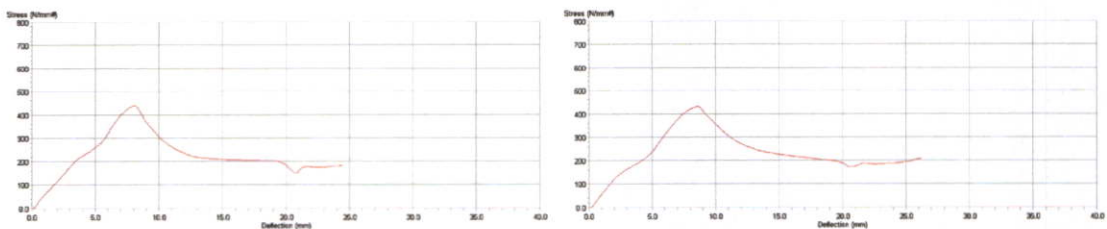
รูปที่ ข.1 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 5 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



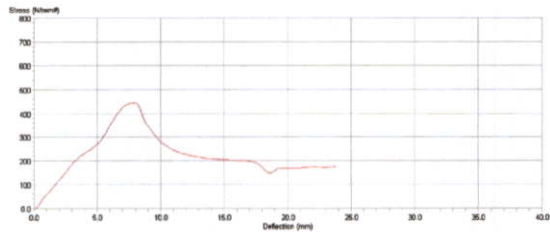
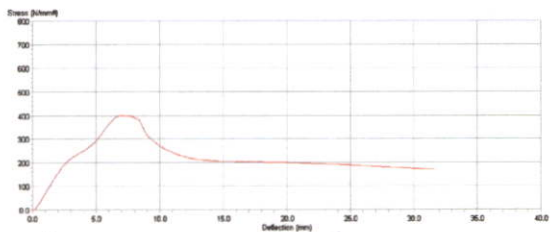
รูปที่ ข.2 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูปที่ $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 10 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



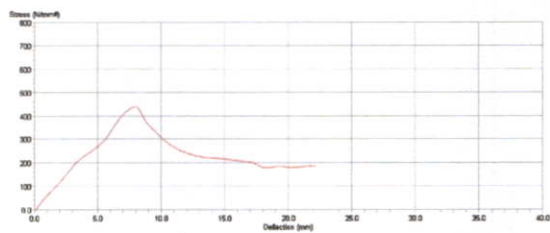
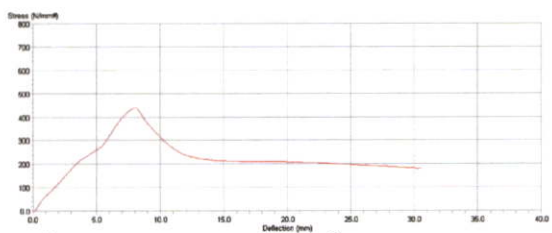
รูปที่ ข.3 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 20 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



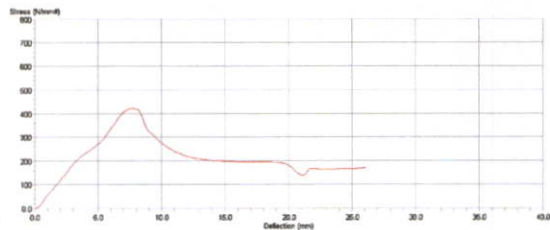
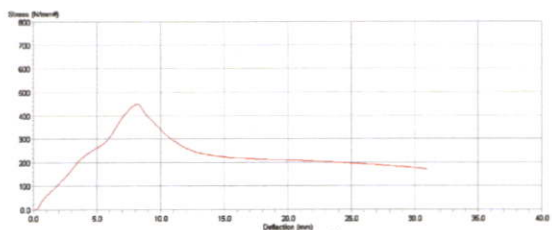
รูปที่ ข.4 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 30 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



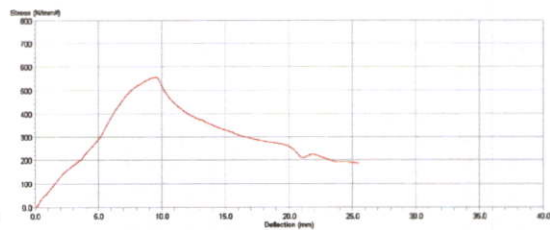
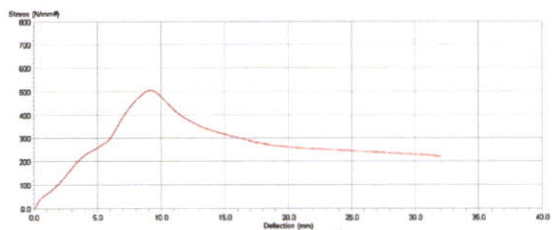
รูปที่ ข.5 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 35 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



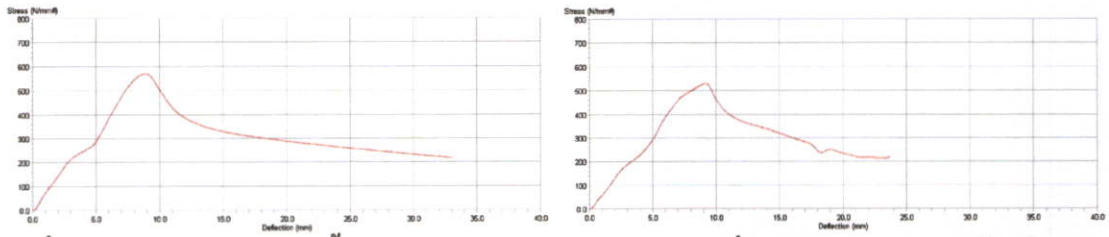
รูปที่ ข.6 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 40 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



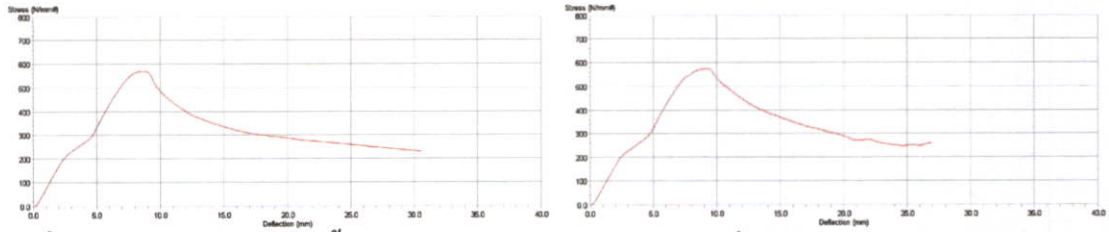
รูปที่ ข.7 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 50 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



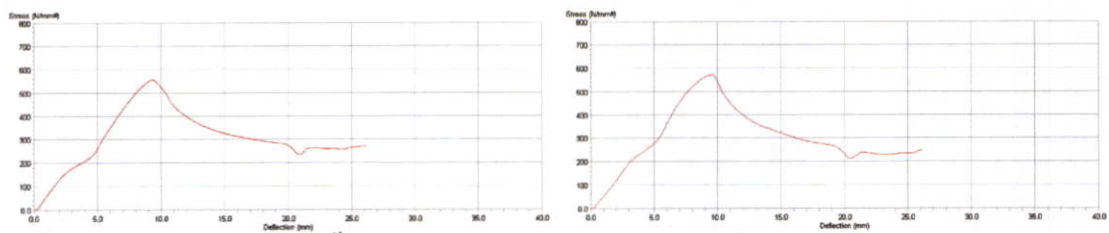
รูปที่ ข.8 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 5 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



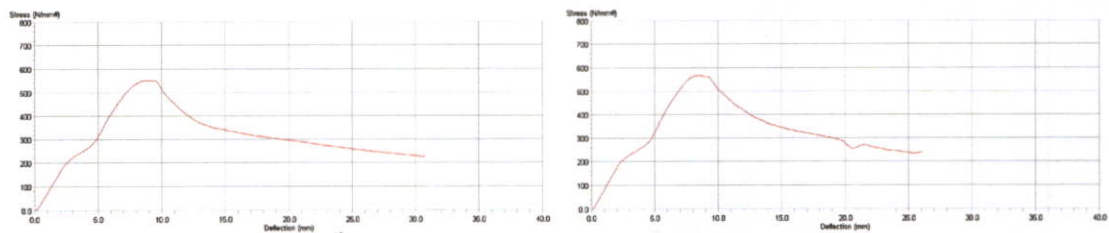
รูปที่ ข.9 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 10 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



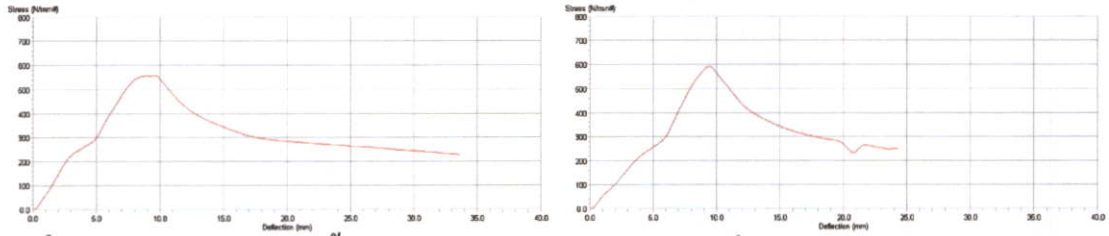
รูปที่ ข.10 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 20 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



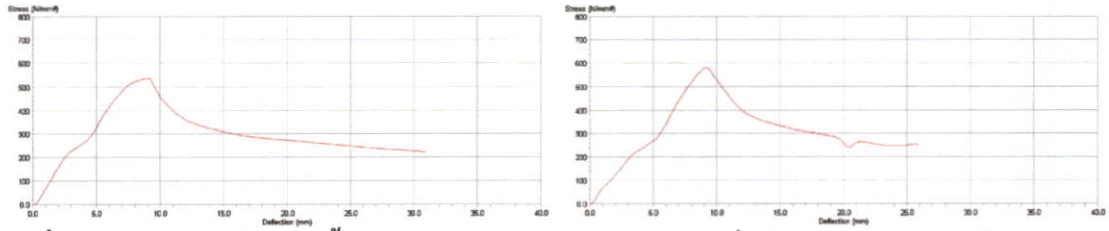
รูปที่ ข.11 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 30 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



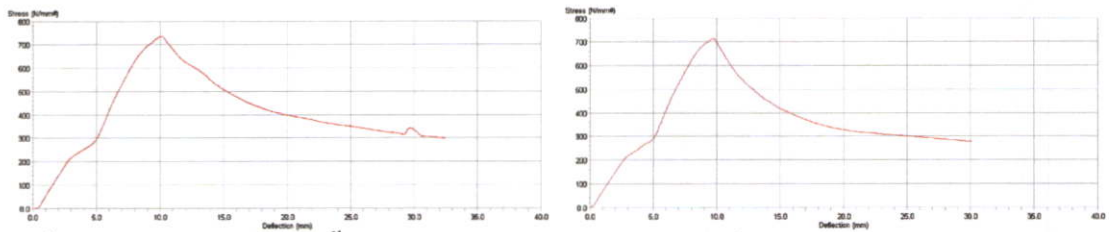
รูปที่ ข.12 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 35 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



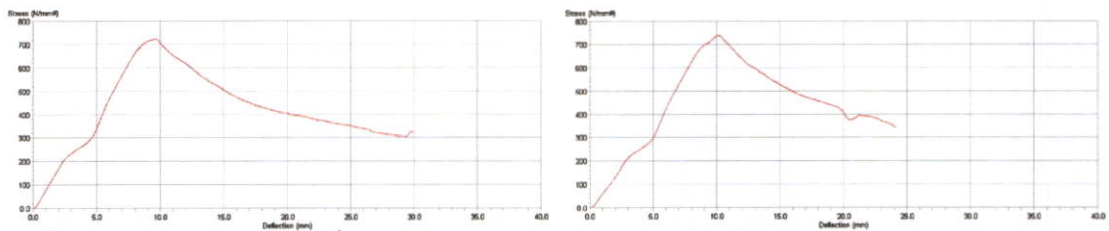
รูปที่ ข.13 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 40 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



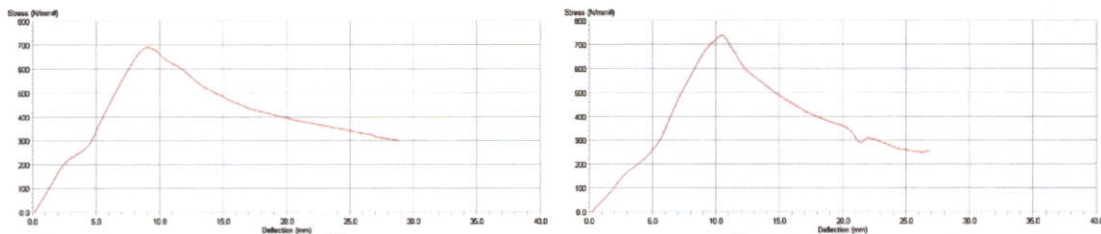
รูปที่ ข.14 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



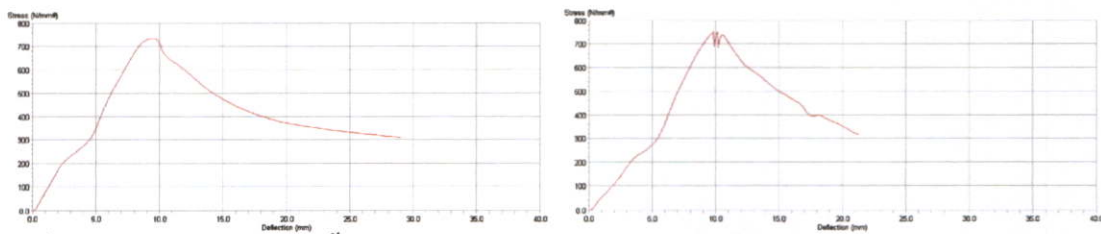
รูปที่ ข.15 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 5 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



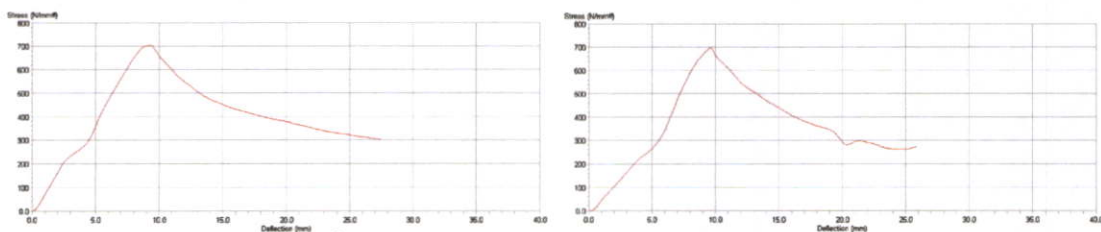
รูปที่ ข.16 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 10 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



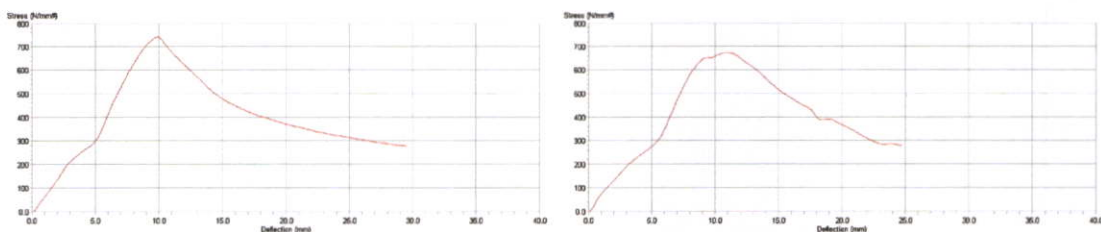
รูปที่ ข.17 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 20 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



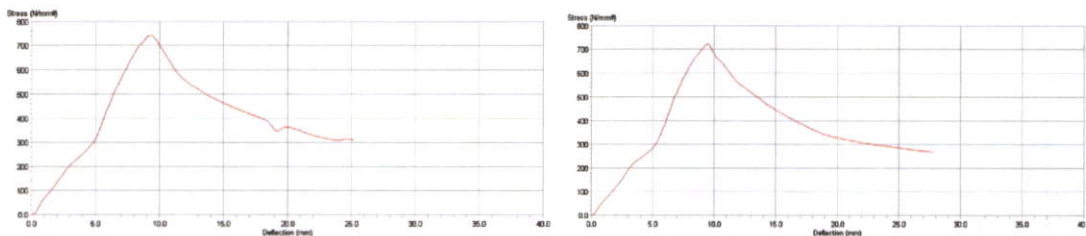
รูปที่ ข.18 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 30 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



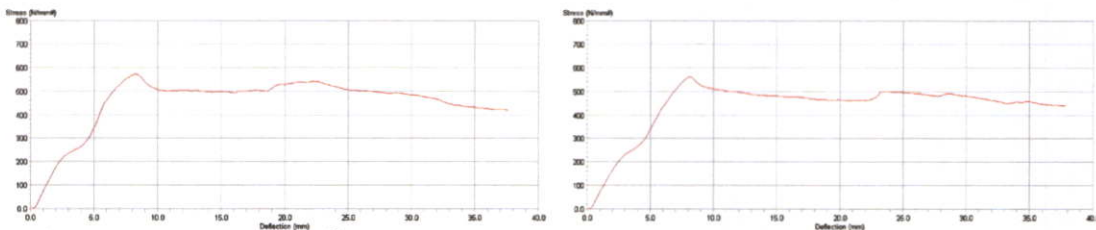
รูปที่ ข.19 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 35 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



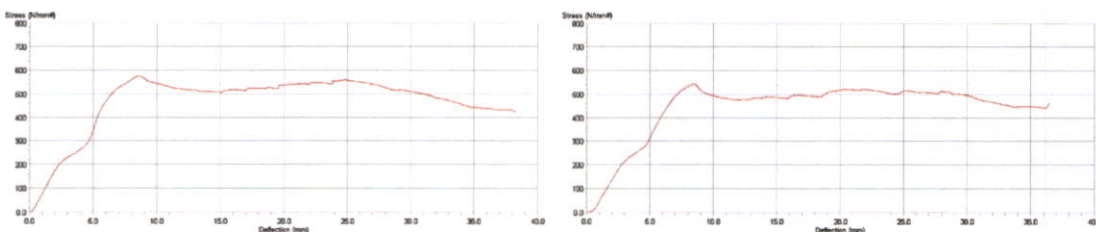
รูปที่ ข.20 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม, ความเร็ว 40 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



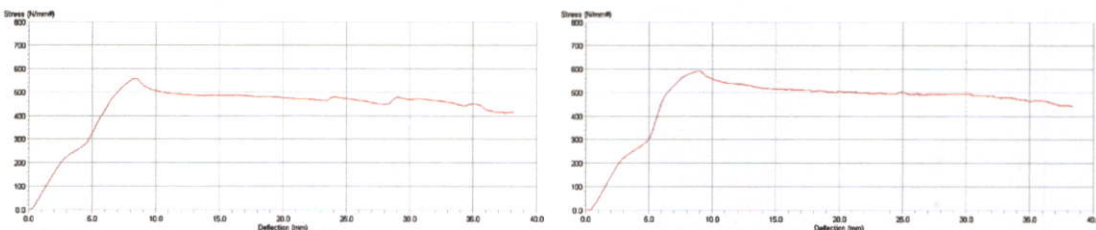
รูปที่ ข.21 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



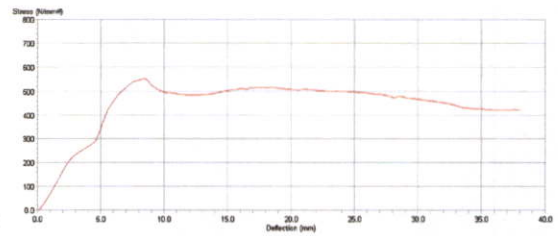
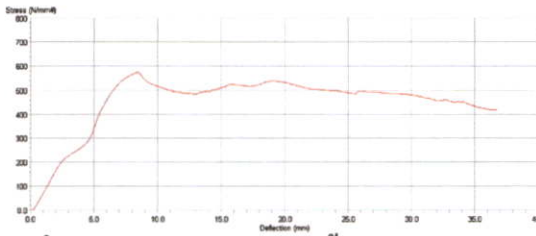
รูปที่ ข.22 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 5 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



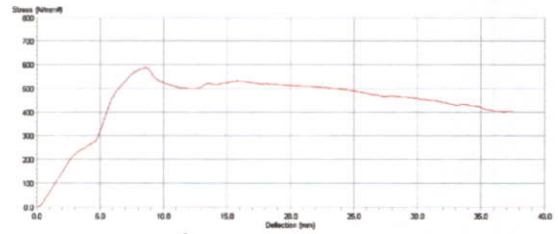
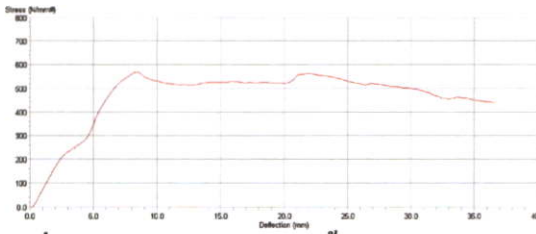
รูปที่ ข.23 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 10 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



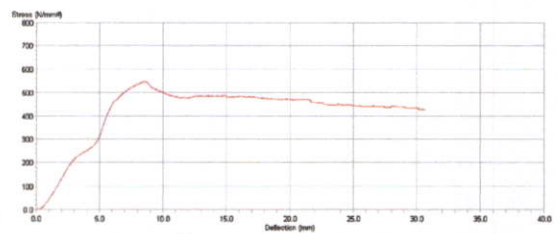
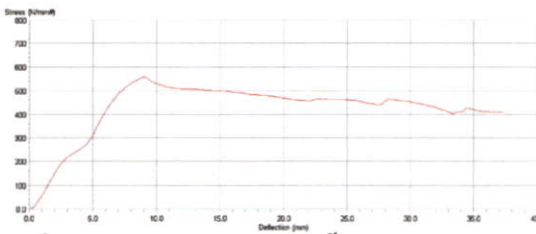
รูปที่ ข.24 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 20 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



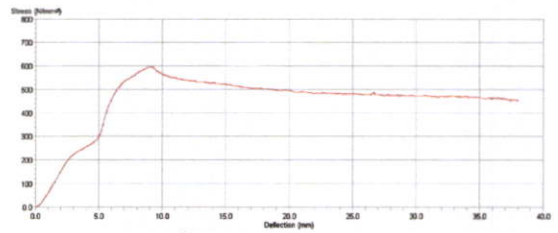
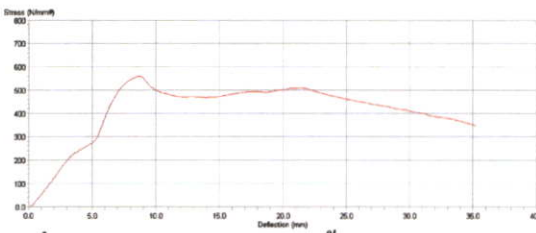
รูปที่ ข.25 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 30
mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



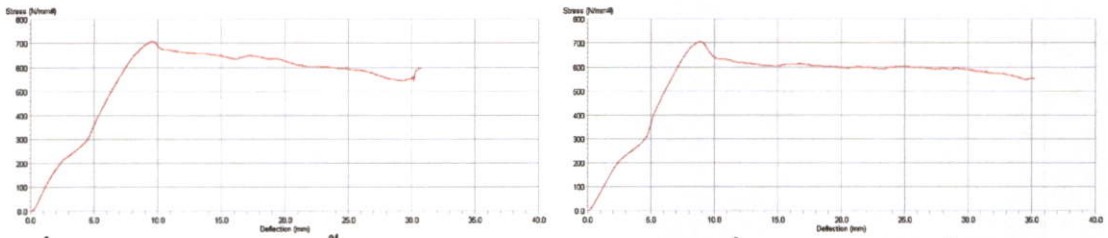
รูปที่ ข.26 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 35
mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



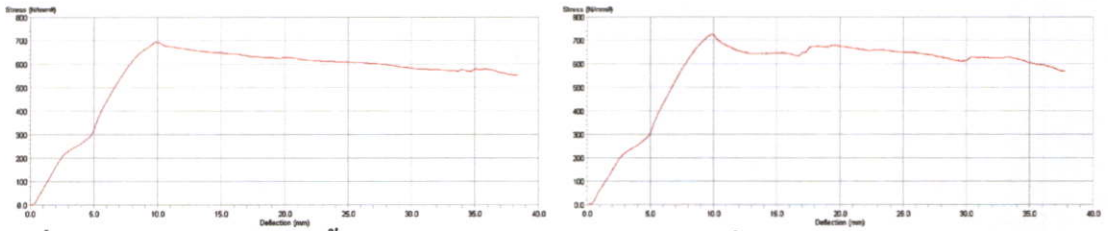
รูปที่ ข.27 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 40
mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



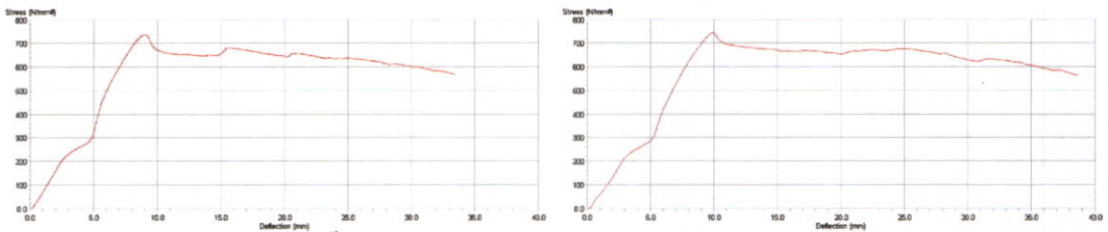
รูปที่ ข.28 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 50
mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



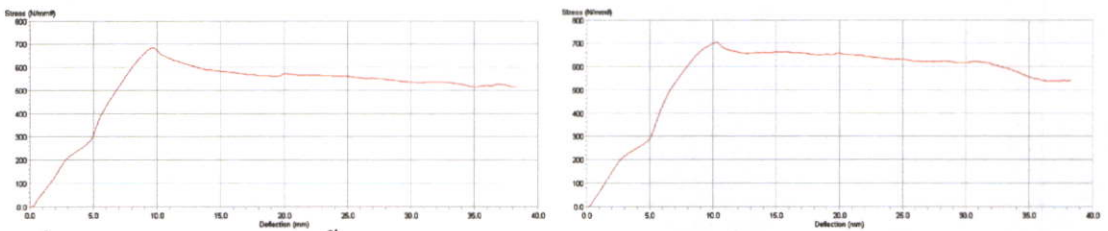
รูปที่ ข.29 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 5
mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



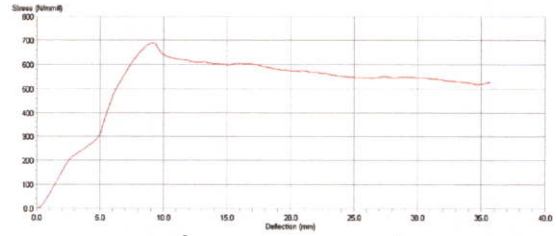
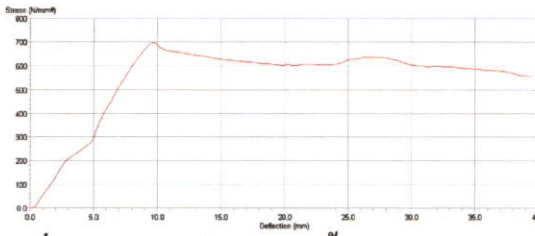
รูปที่ ข.30 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 10
mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



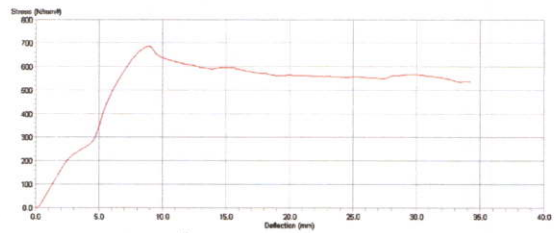
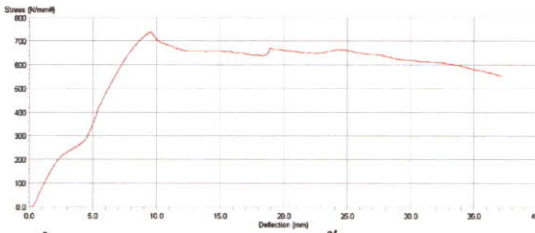
รูปที่ ข.31 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 20
mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



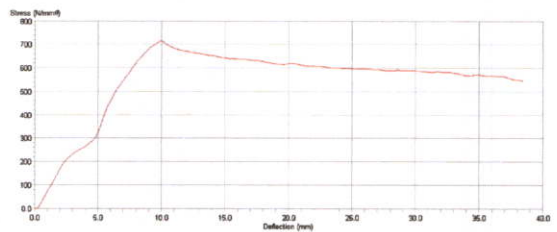
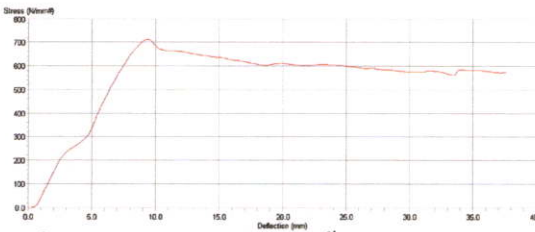
รูปที่ ข.32 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 30
mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



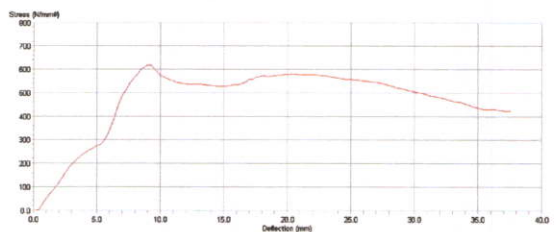
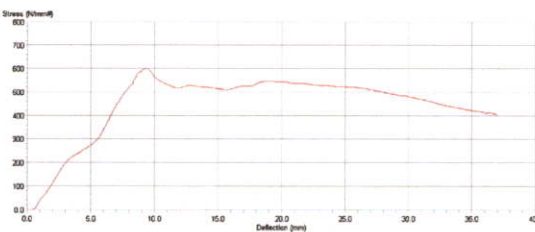
รูปที่ ข.33 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 35 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



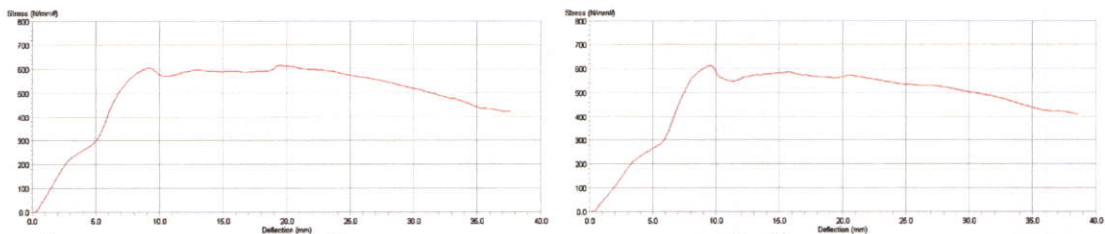
รูปที่ ข.34 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 40 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



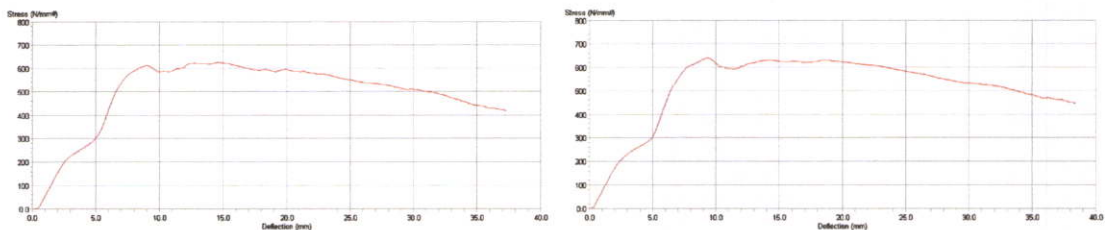
รูปที่ ข.35 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 50 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



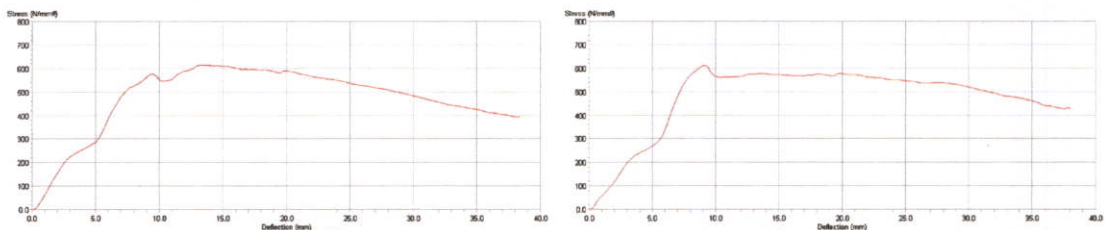
รูปที่ ข.36 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 5 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



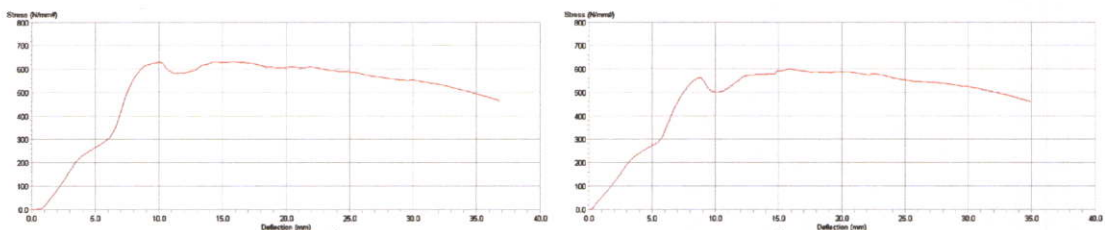
รูปที่ ข.37 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 10 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



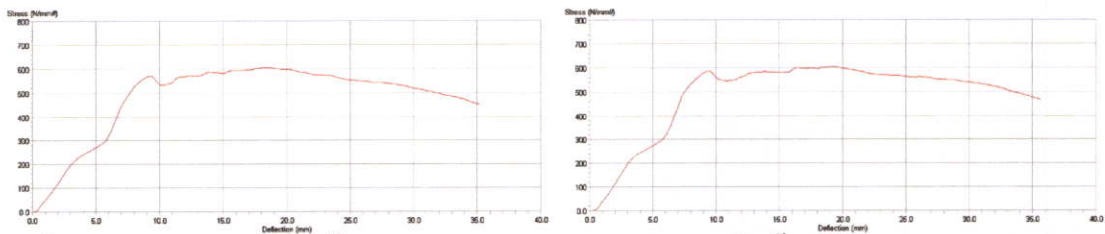
รูปที่ ข.38 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 20 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



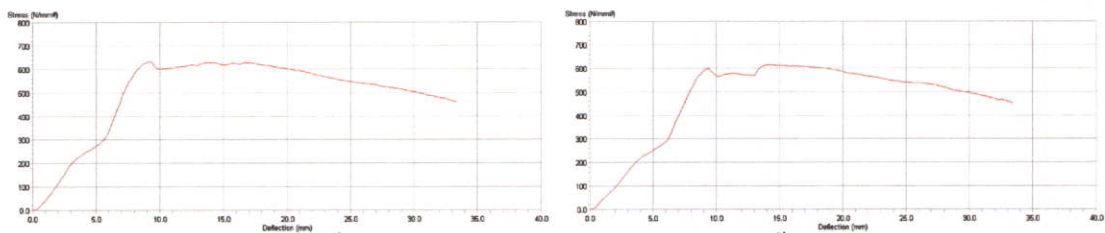
รูปที่ ข.39 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 30 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



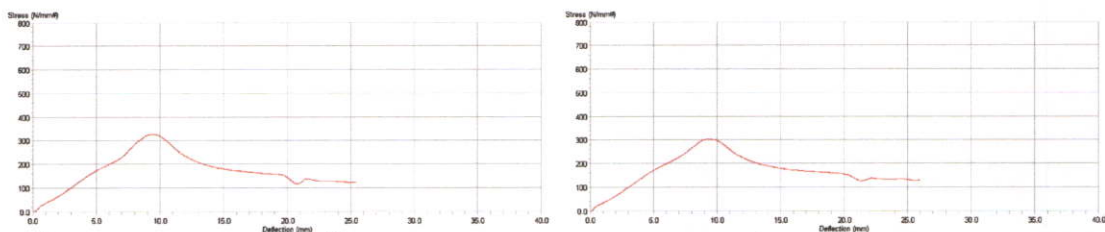
รูปที่ ข.40 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 35 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



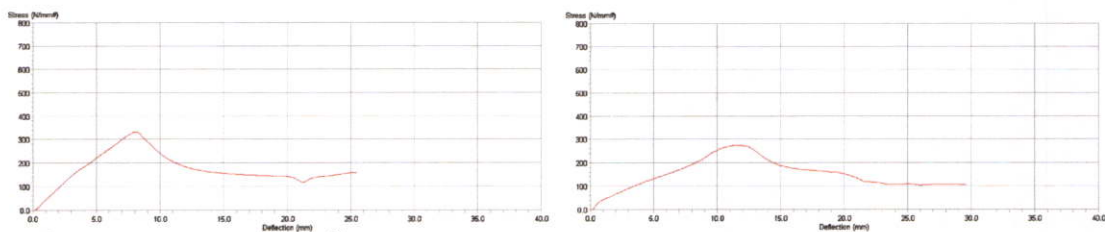
รูปที่ ข.41 ความเค้นขณะคืบขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 40 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



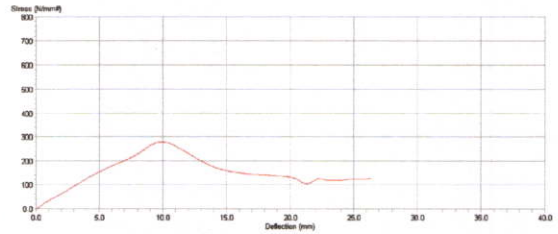
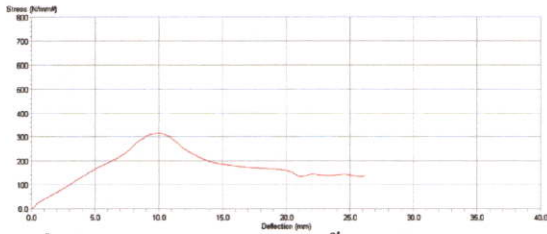
รูปที่ ข.42 ความเค้นขณะคืบขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 50 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



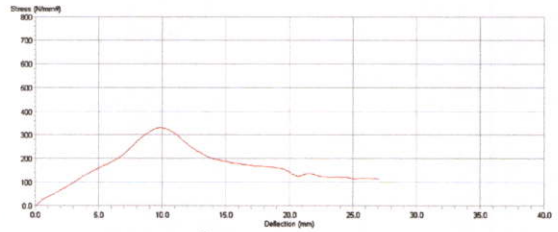
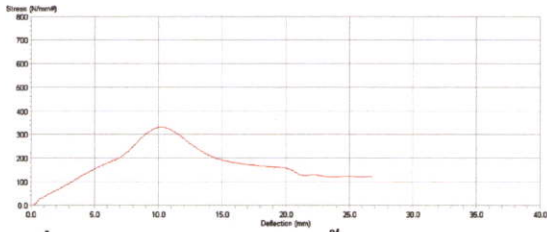
รูปที่ ข.43 ความเค้นขณะคืบขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 5 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



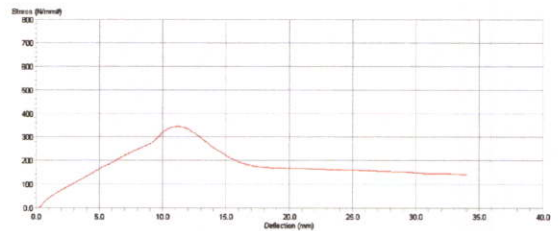
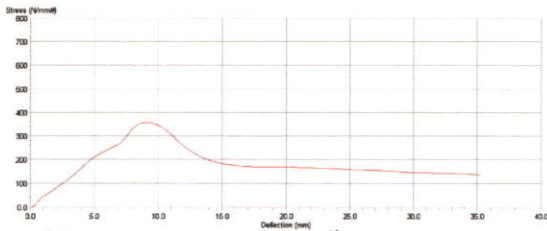
รูปที่ ข.44 ความเค้นขณะคืบขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 10 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



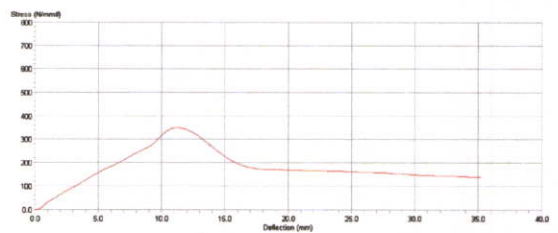
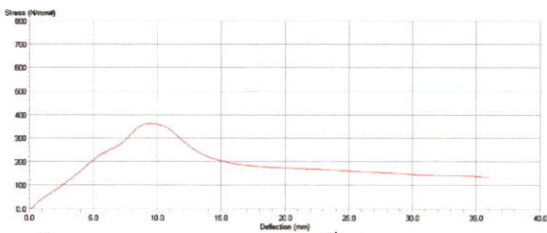
รูปที่ ข.45 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 20 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



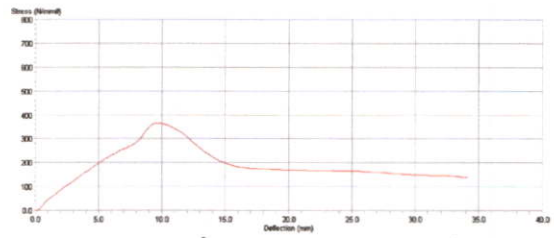
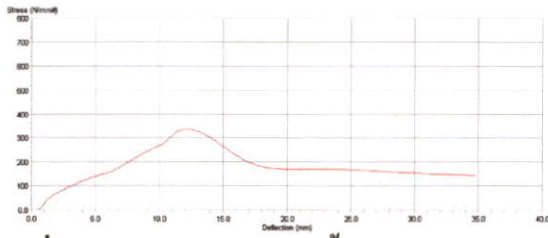
รูปที่ ข.46 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 30 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



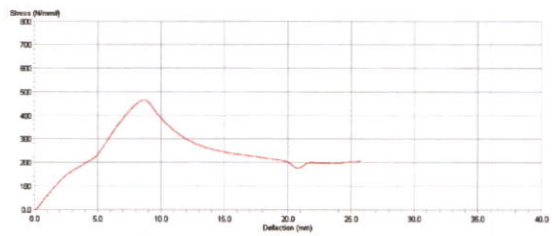
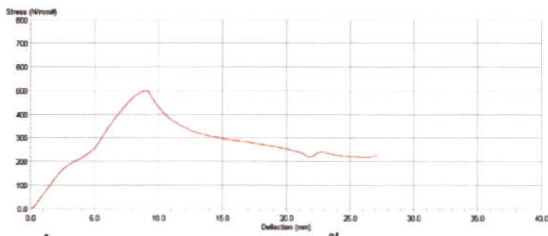
รูปที่ ข.47 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



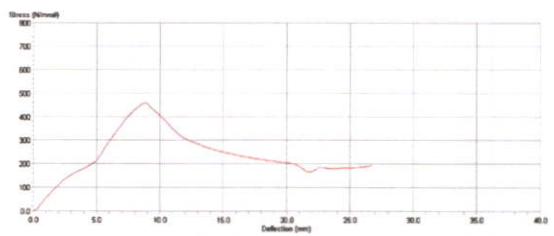
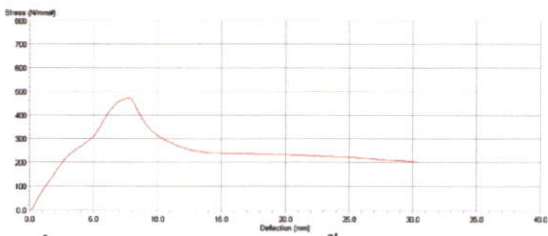
รูปที่ ข.48 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 40 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



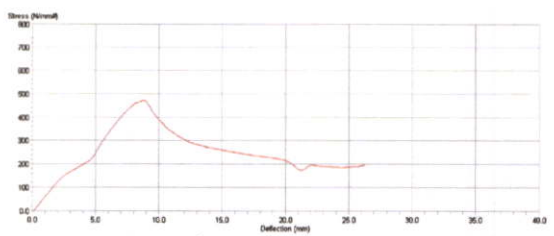
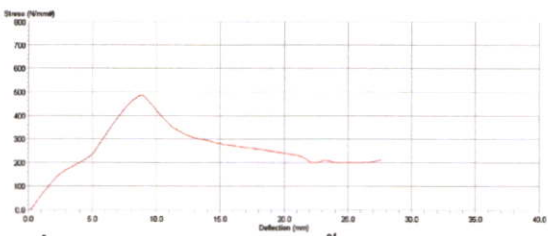
รูปที่ ข.49 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่นสไปโดเคมีม, ความเร็ว 50 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



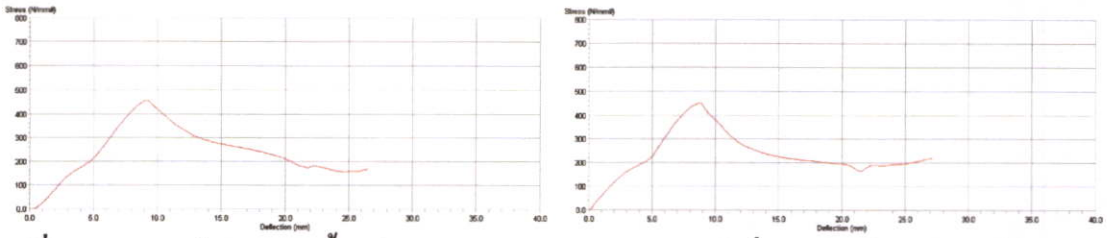
รูปที่ ข.50 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสไปโดเคมีม, ความเร็ว 5 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



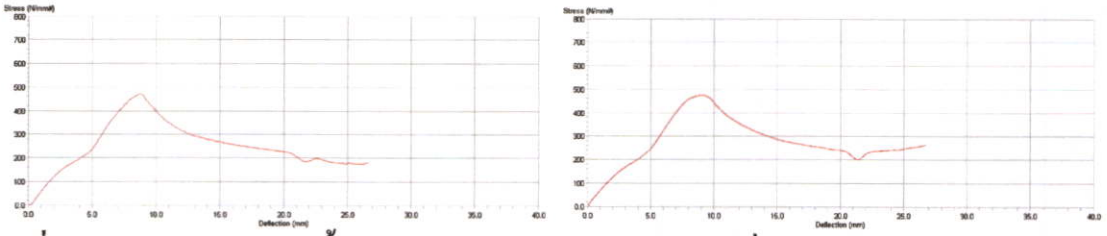
รูปที่ ข.51 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสไปโดเคมีม, ความเร็ว 10 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



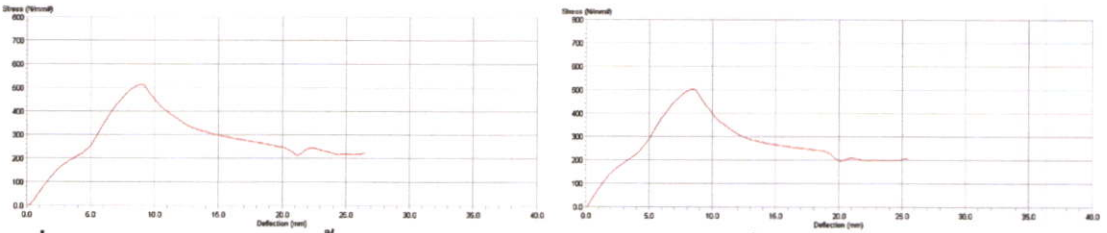
รูปที่ ข.52 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสไปโดเคมีม, ความเร็ว 20 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



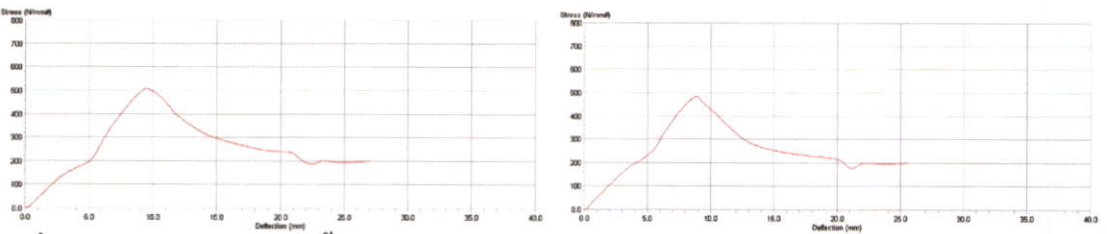
รูปที่ ข.53 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 30 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



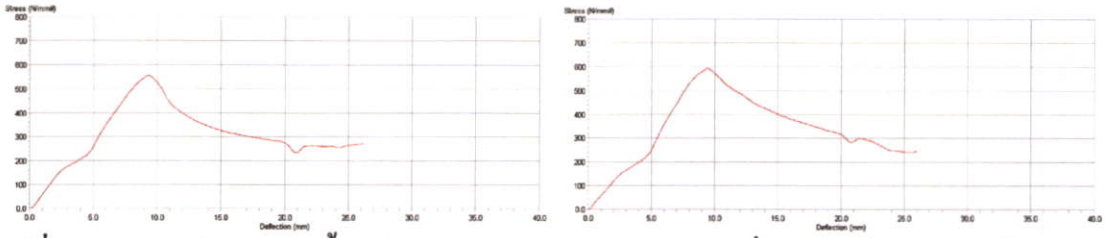
รูปที่ ข.54 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 35 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



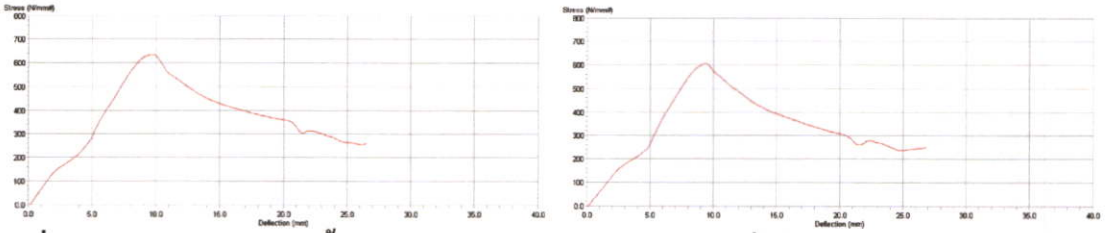
รูปที่ ข.55 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 40 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



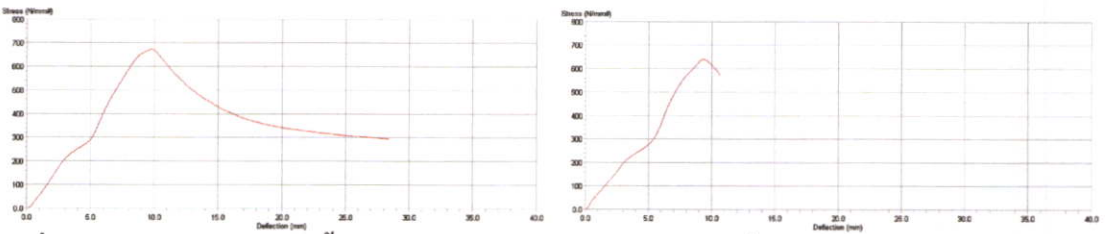
รูปที่ ข.56 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



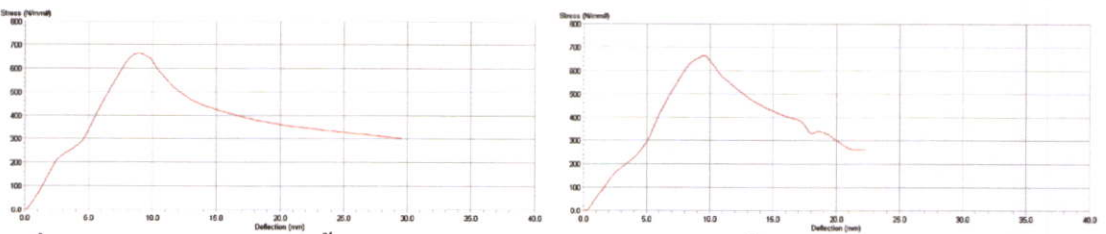
รูปที่ ข.57 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 5 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



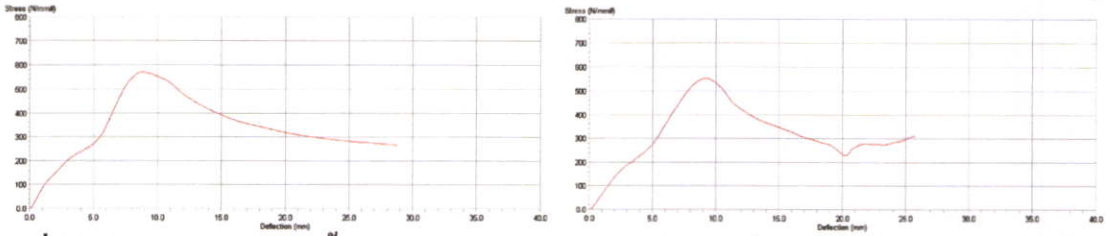
รูปที่ ข.58 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 10 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



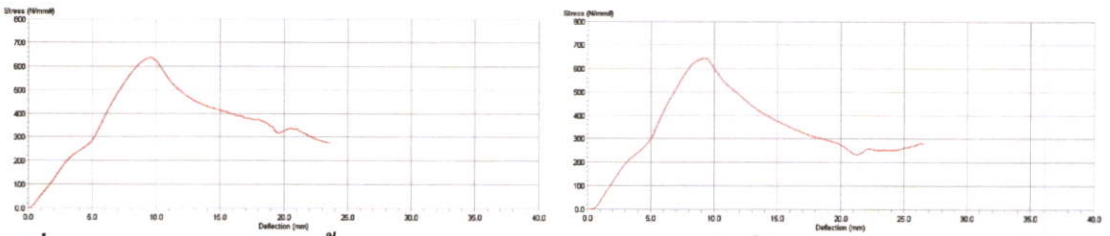
รูปที่ ข.59 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 20 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



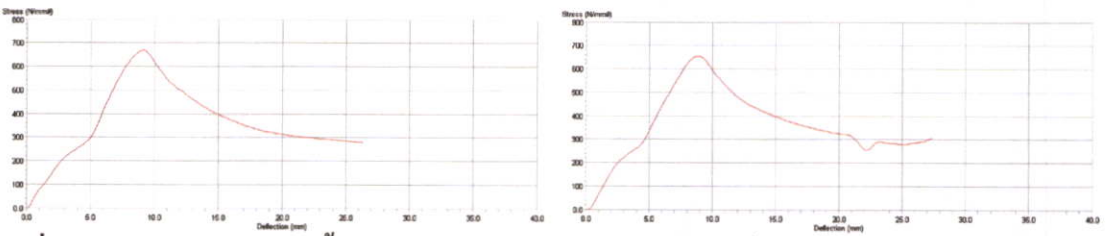
รูปที่ ข.60 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 35\%$, สารหล่อลื่นสนูโซเดียม, ความเร็ว 30 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



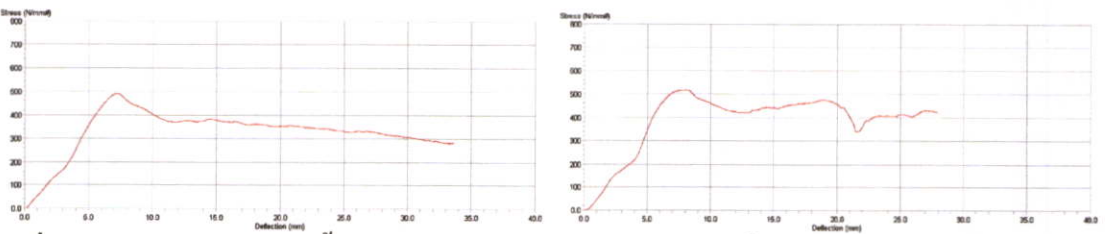
รูปที่ ข.61 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



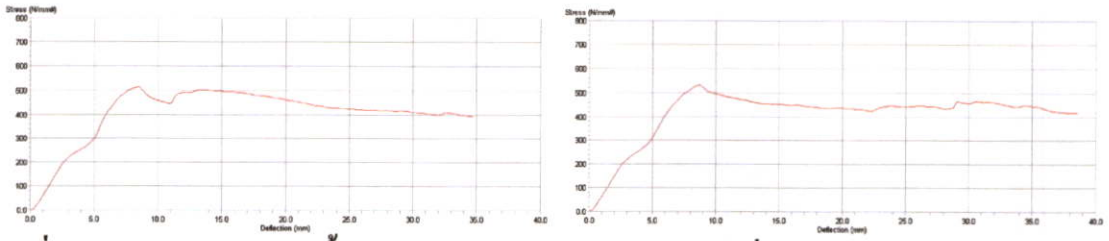
รูปที่ ข.62 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 40 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



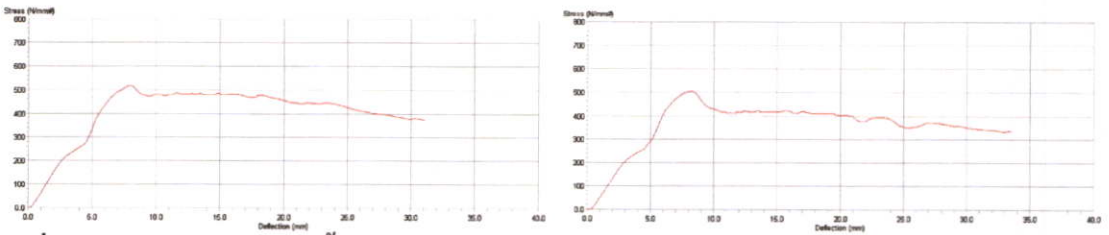
รูปที่ ข.63 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



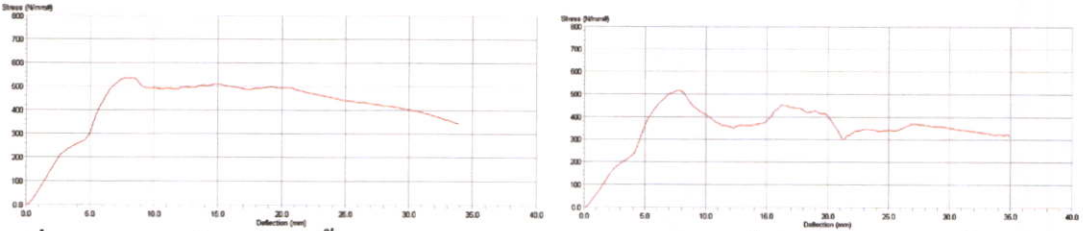
รูปที่ ข.64 ความเค้นขณะคั่นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 5 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



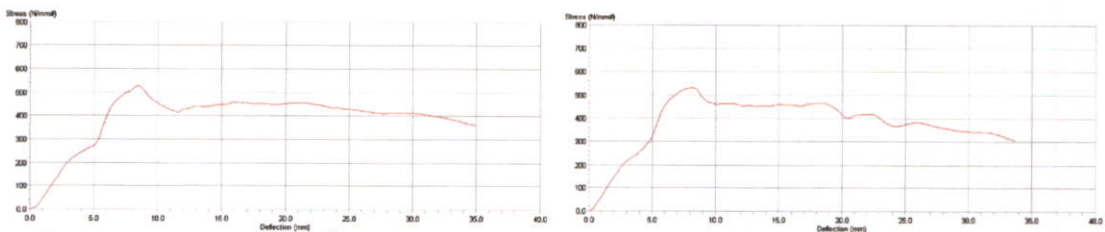
รูปที่ ข.65 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 10 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



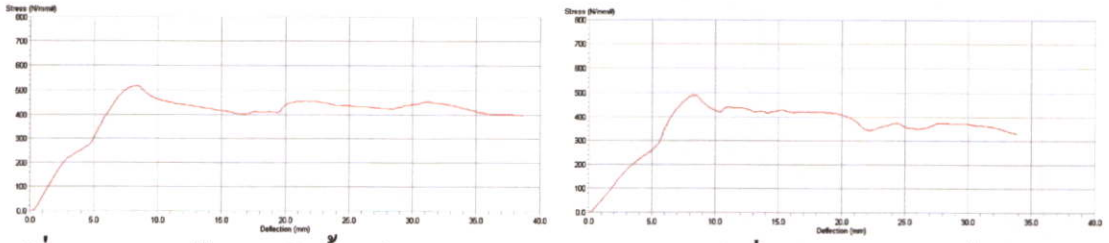
รูปที่ ข.66 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 20 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



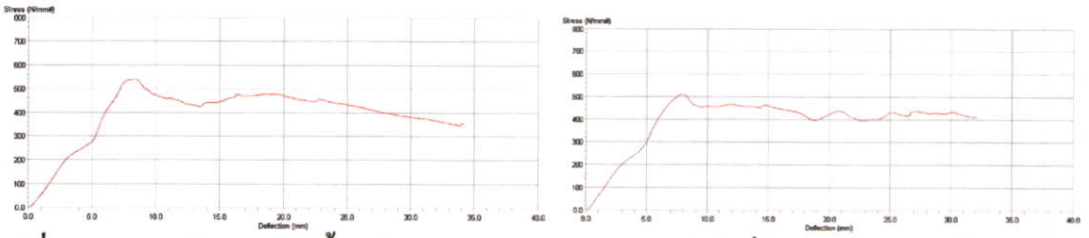
รูปที่ ข.67 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 30 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



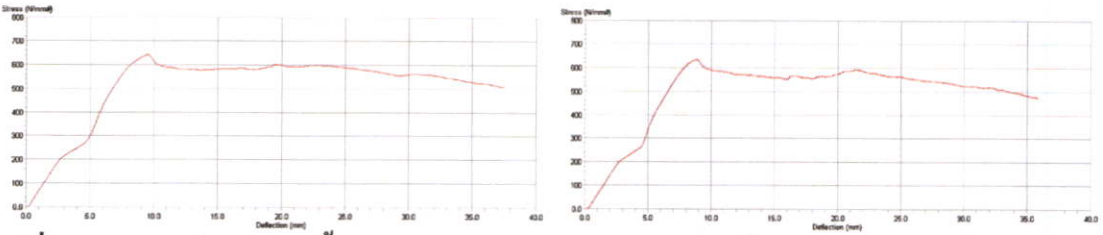
รูปที่ ข.68 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 35 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



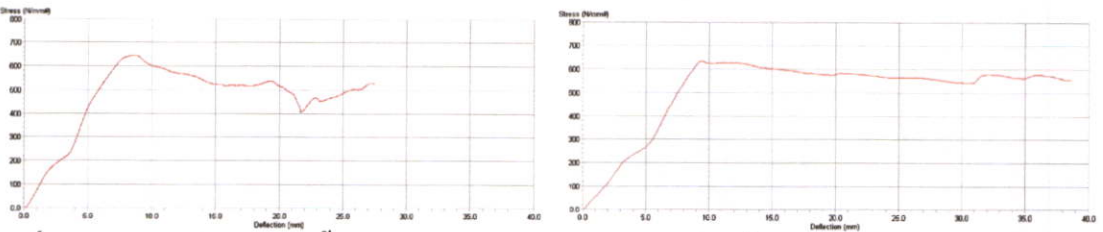
รูปที่ ข.69 ความเค้นขณะดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 40 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



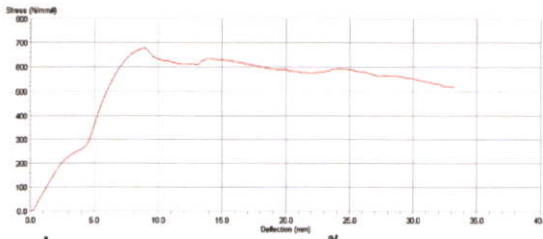
รูปที่ ข.70 ความเค้นขณะดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 50 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



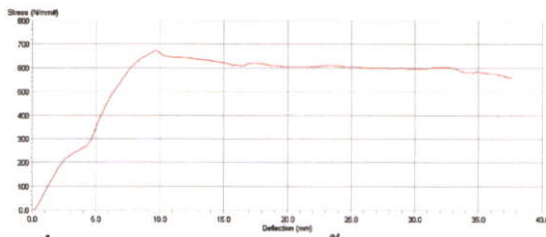
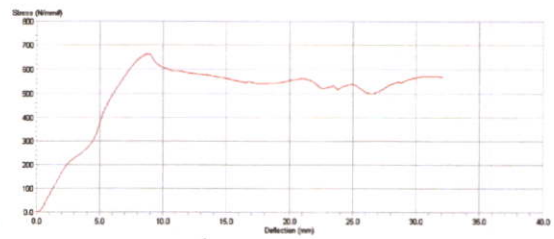
รูปที่ ข.71 ความเค้นขณะดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 5 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



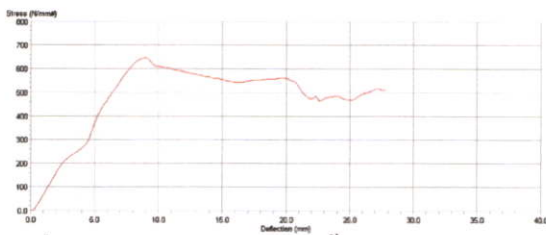
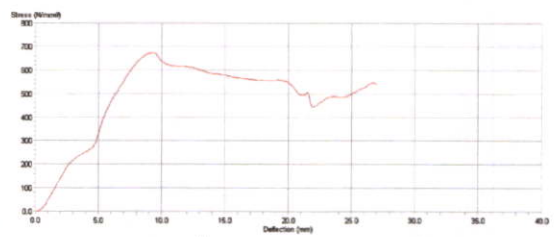
รูปที่ ข.72 ความเค้นขณะดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 10 mm / min ครั้งที่ 1 และ 2



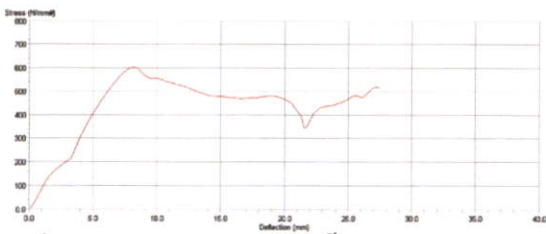
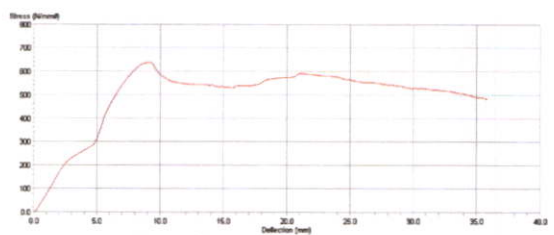
รูปที่ ข.73 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 20 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



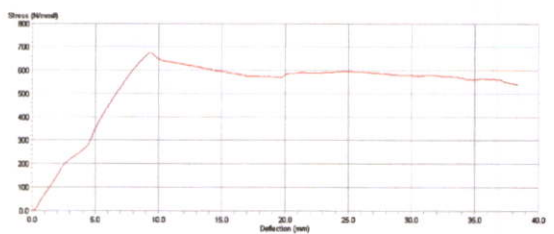
รูปที่ ข.74 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 30 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2

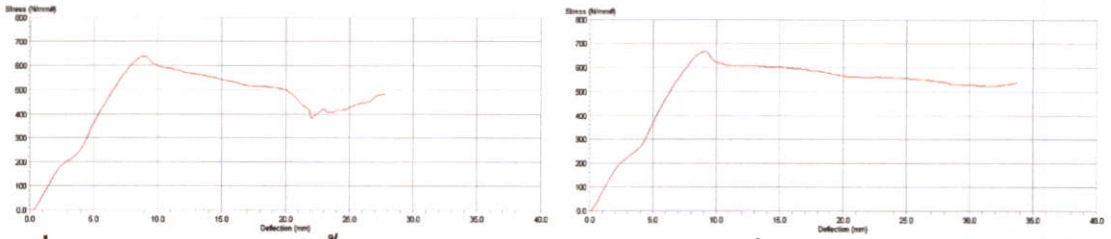


รูปที่ ข.75 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 35 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2

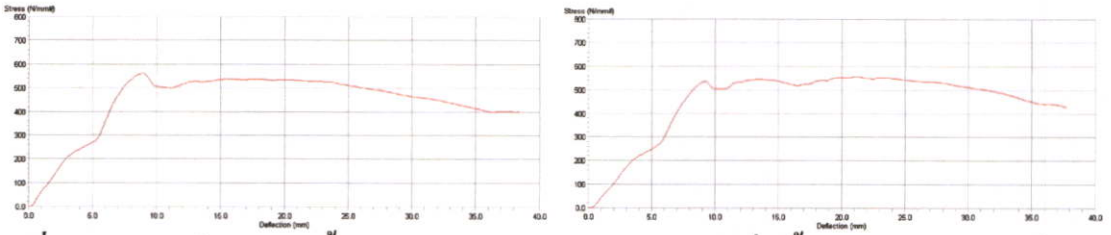


รูปที่ ข.76 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 40 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2

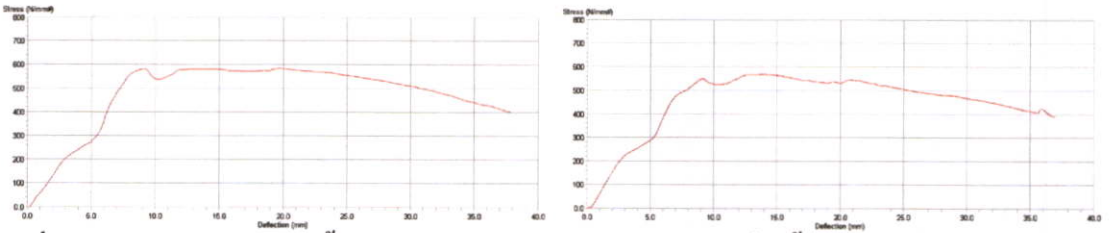




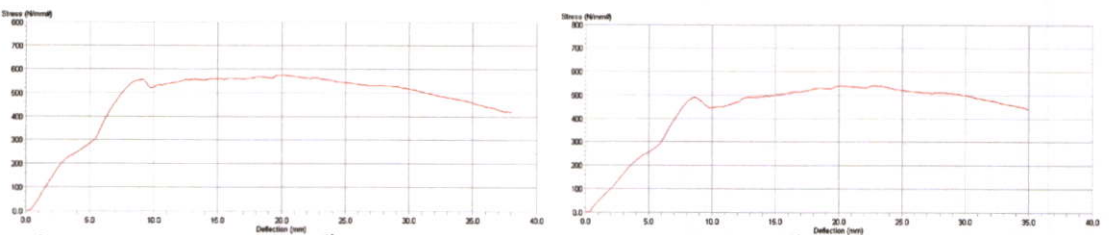
รูปที่ ข.77 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 50 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



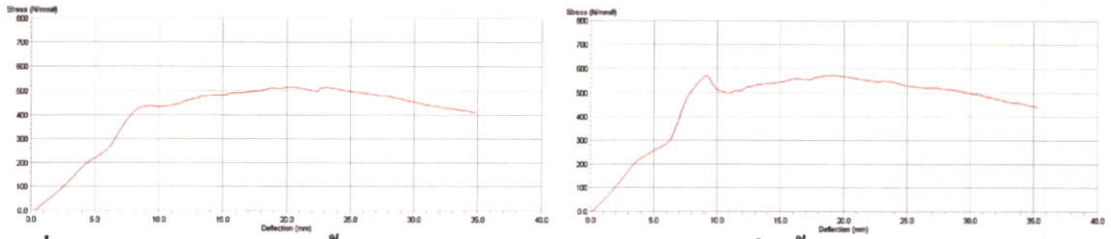
รูปที่ ข.78 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 5 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



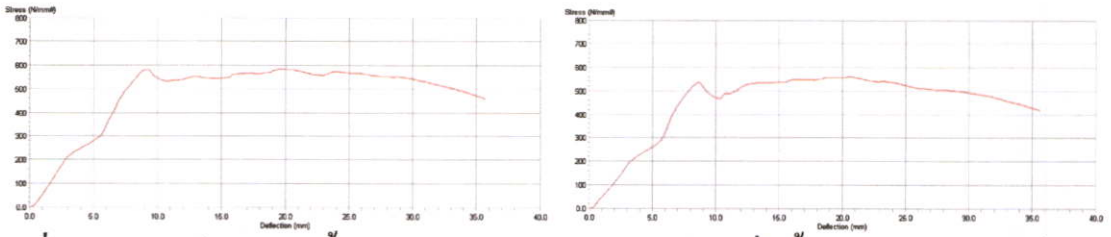
รูปที่ ข.79 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 10 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



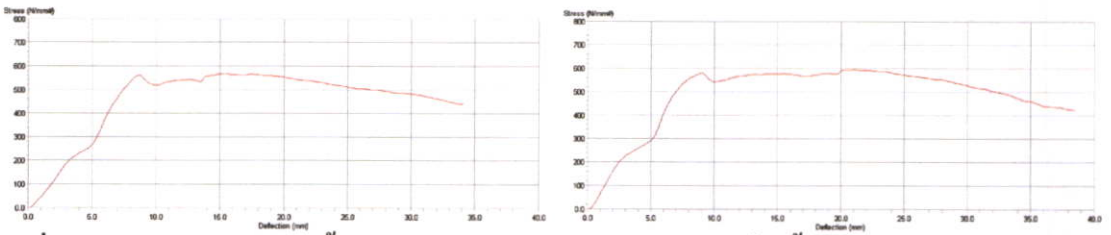
รูปที่ ข.80 ความเค้นขณะคั้นขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 20 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



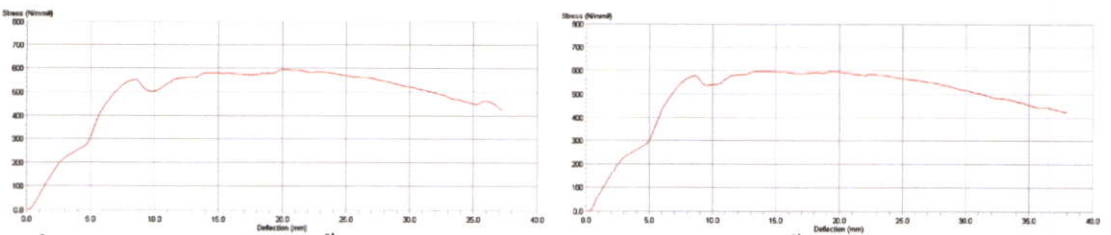
รูปที่ ข.81 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 30 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



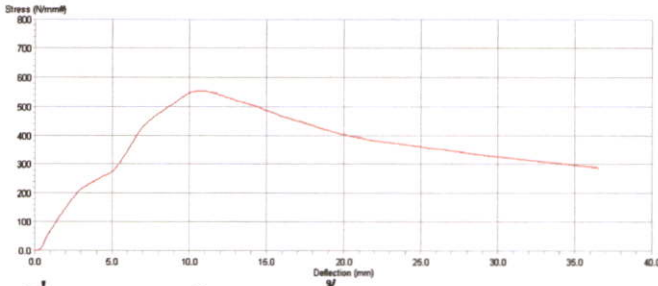
รูปที่ ข.82 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 35 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



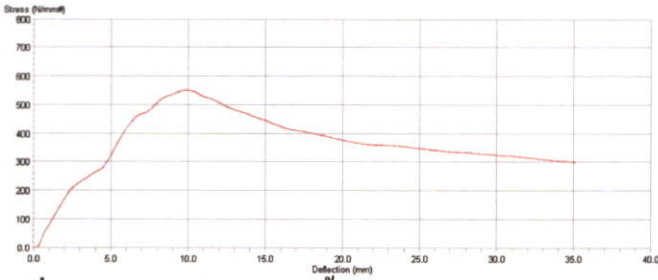
รูปที่ ข.83 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 40 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



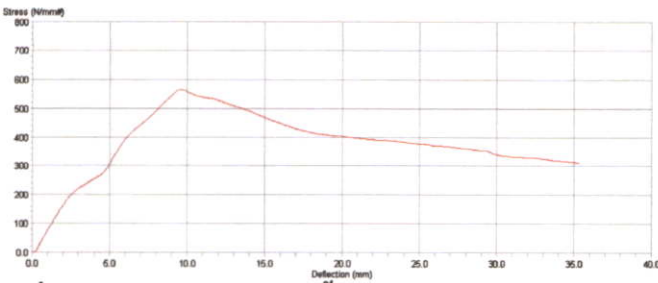
รูปที่ ข.84 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 50 mm/min ครั้งที่ 1 และ 2



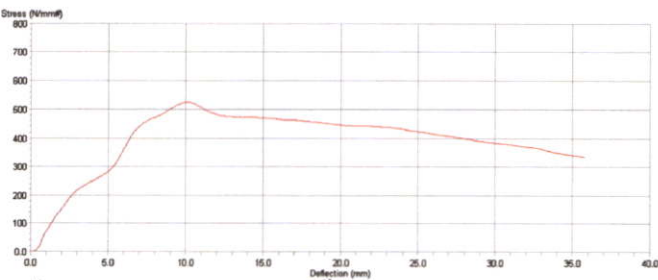
รูปที่ ข.85 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม,
ความเร็ว 5 mm/min



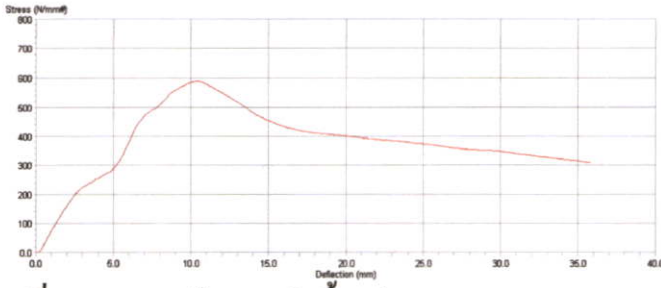
รูปที่ ข.86 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม,
ความเร็ว 10 mm/min



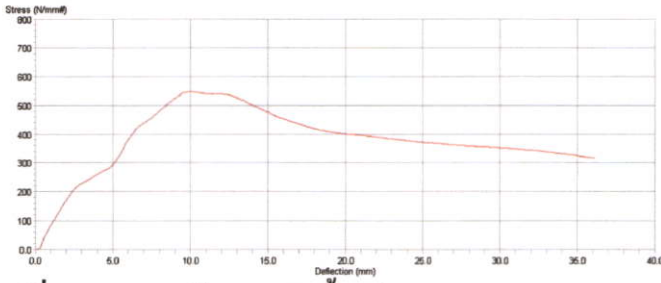
รูปที่ ข.87 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม,
ความเร็ว 20 mm/min



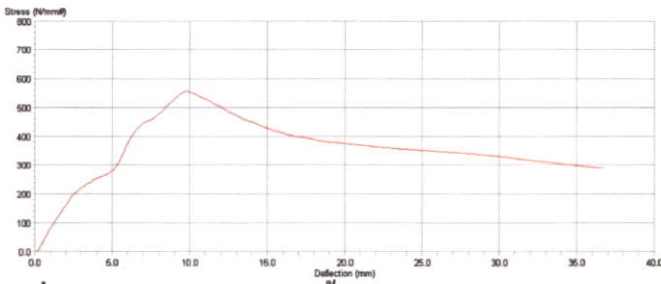
รูปที่ ข.88 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม,
ความเร็ว 30 mm/min



รูปที่ ข.89 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม,
ความเร็ว 35 mm/min



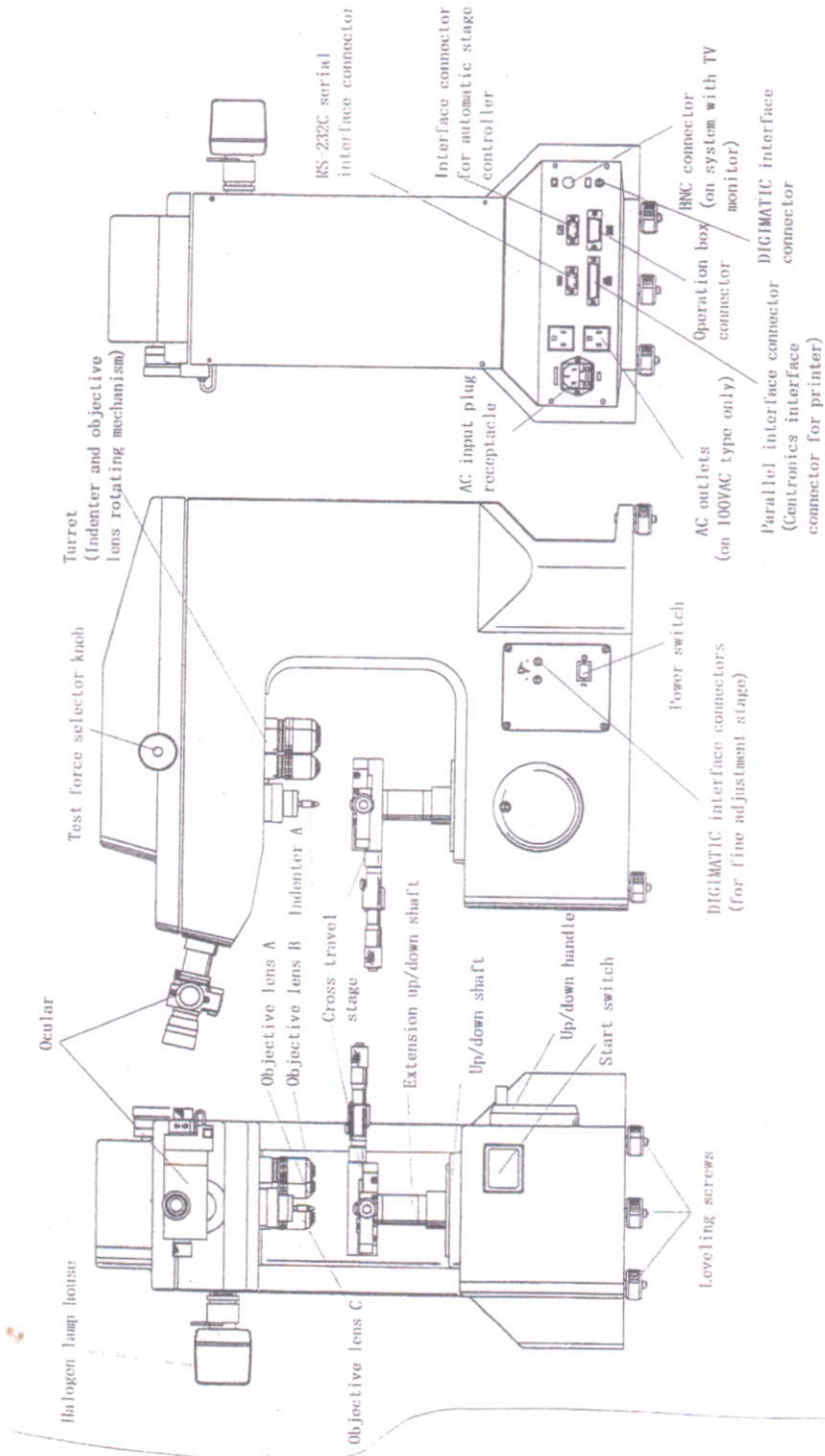
รูปที่ ข.90 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม,
ความเร็ว 40 mm/min



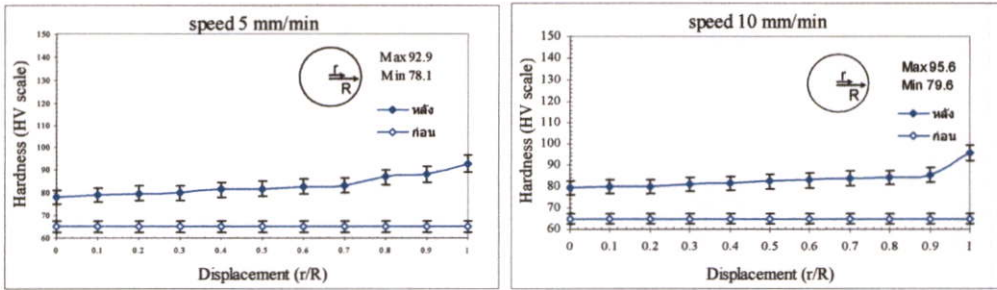
รูปที่ ข.91 ความเค้นขณะค้ำขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบู่โซเดียม,
ความเร็ว 50 mm/min

ภาคผนวก ค.

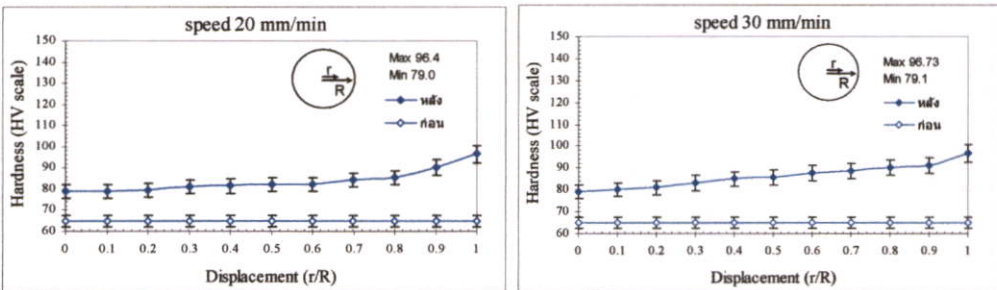
ความแข็งแรงภายในแท่งอูคูมิเนียน



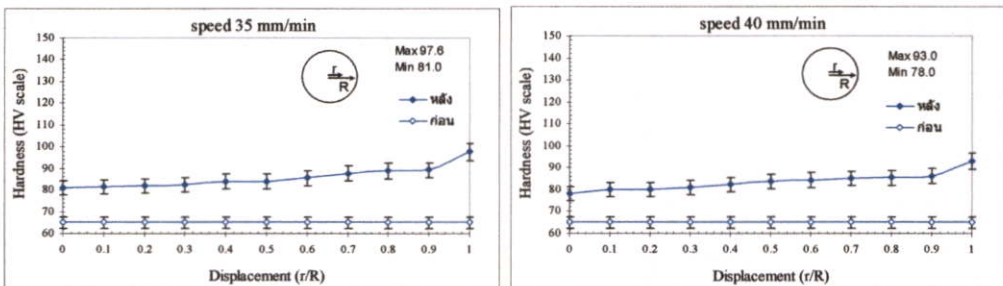
รูปที่ ค.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องทดสอบ Vickers Micro Hardness



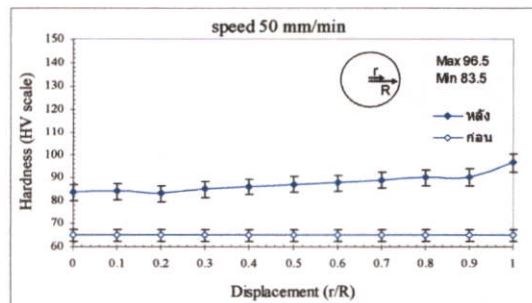
รูปที่ ค.2 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



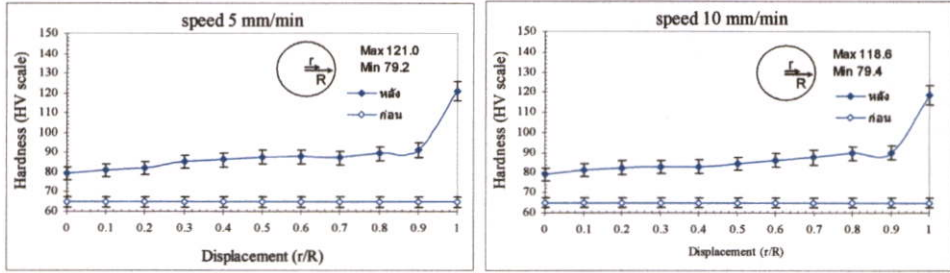
รูปที่ ค.3 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



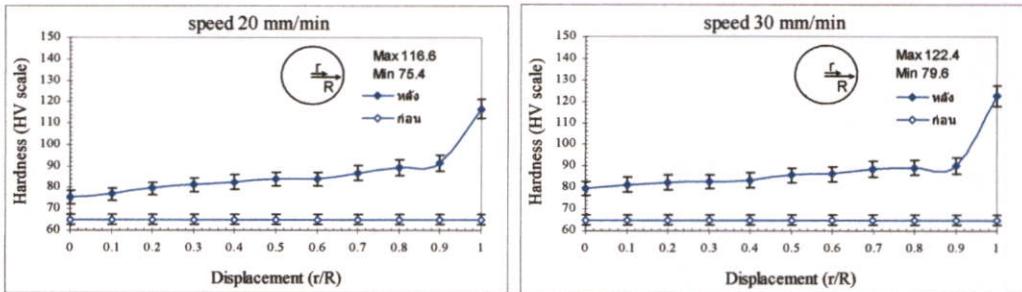
รูปที่ ค.4 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



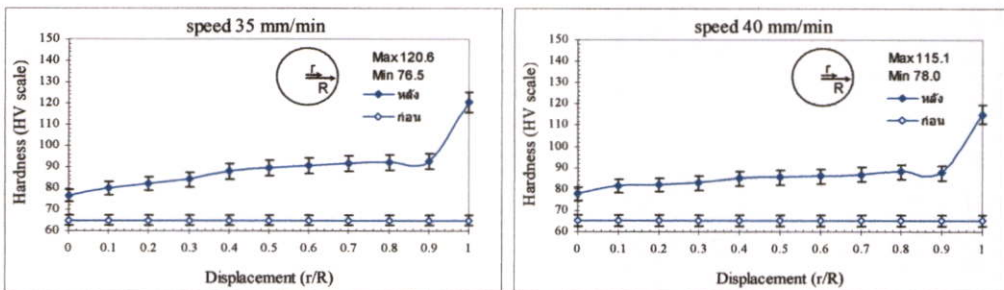
รูปที่ ค.5 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm/min



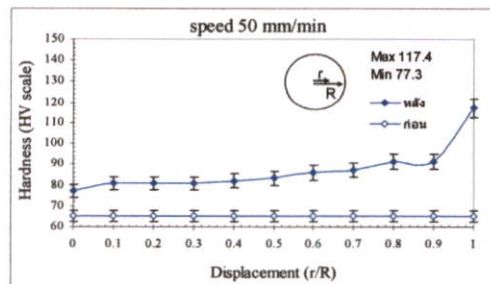
รูปที่ ค.6 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



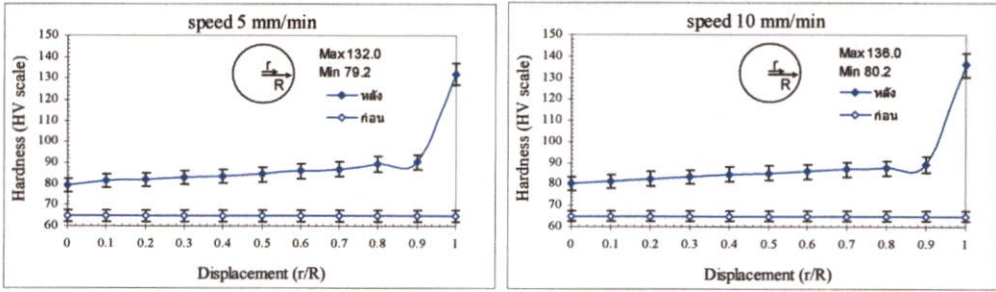
รูปที่ ค.7 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



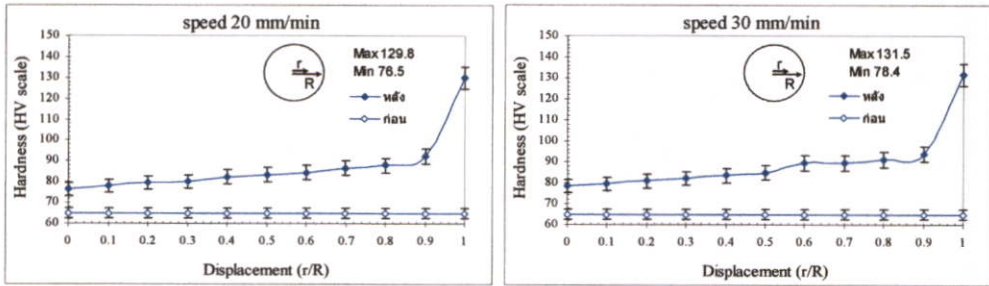
รูปที่ ค.8 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



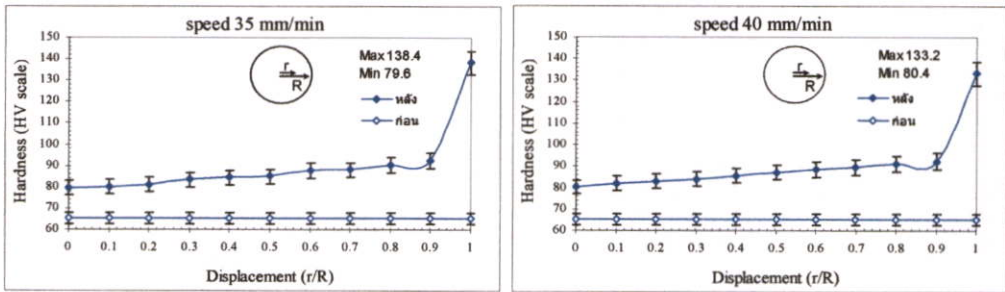
รูปที่ ค.9 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm/min



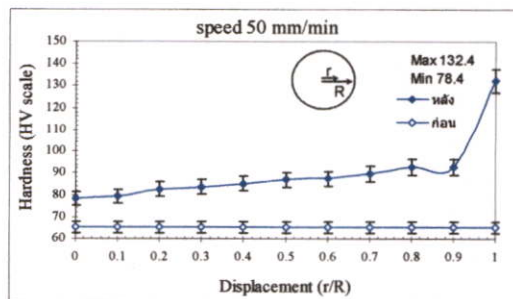
รูปที่ ค.10 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



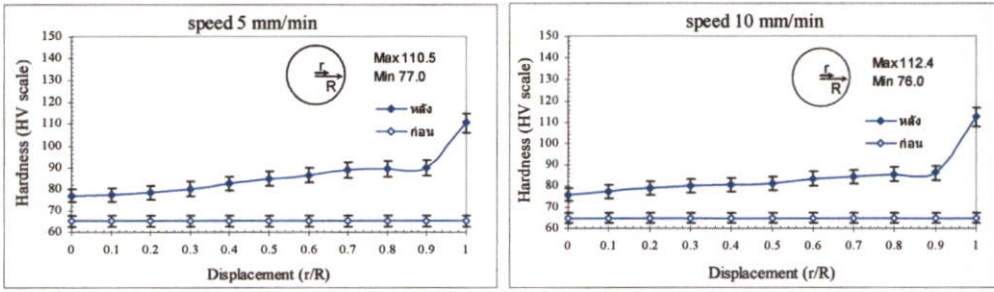
รูปที่ ค.11 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



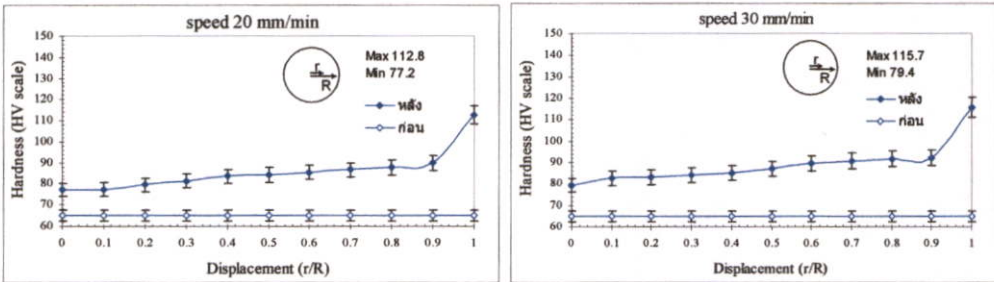
รูปที่ ค.12 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



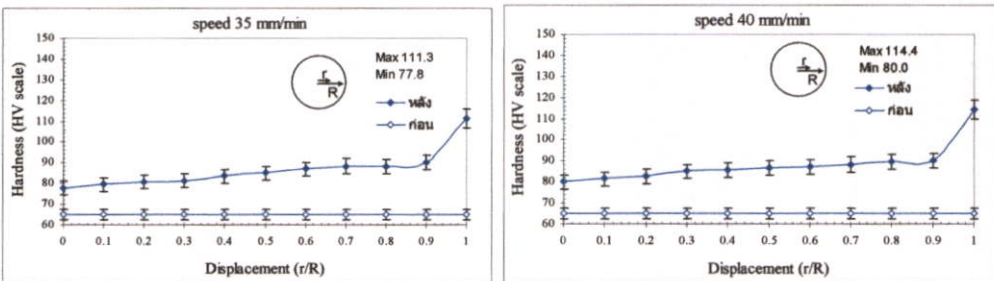
รูปที่ ค.13 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm/min



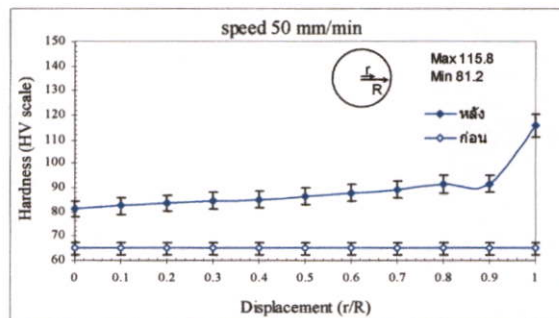
รูปที่ ค.14 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 5 และ 10 mm / min



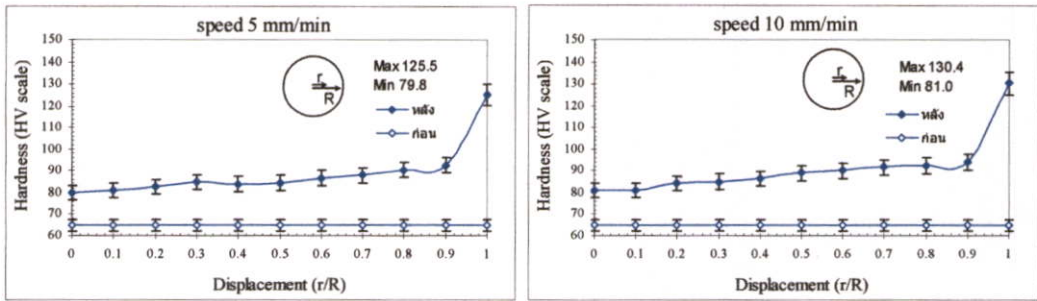
รูปที่ ค.15 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 20 และ 30 mm / min



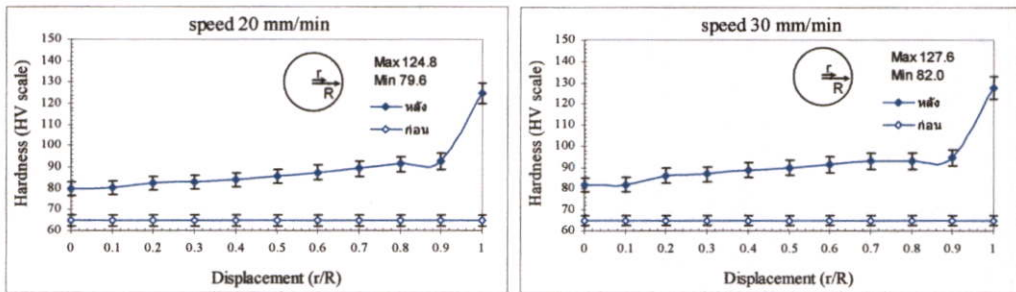
รูปที่ ค.16 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 35 และ 40 mm / min



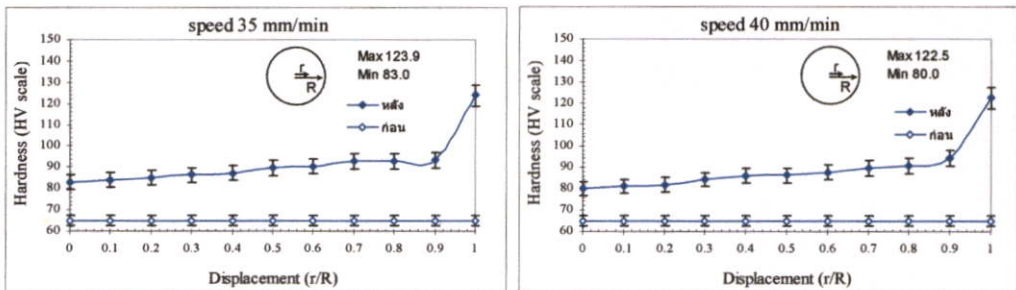
รูปที่ ค.17 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 50 mm / min



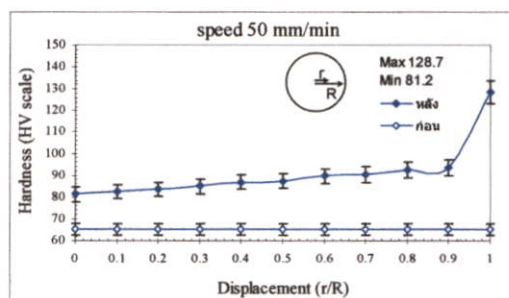
รูปที่ ค.18 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 5 และ 10 mm / min



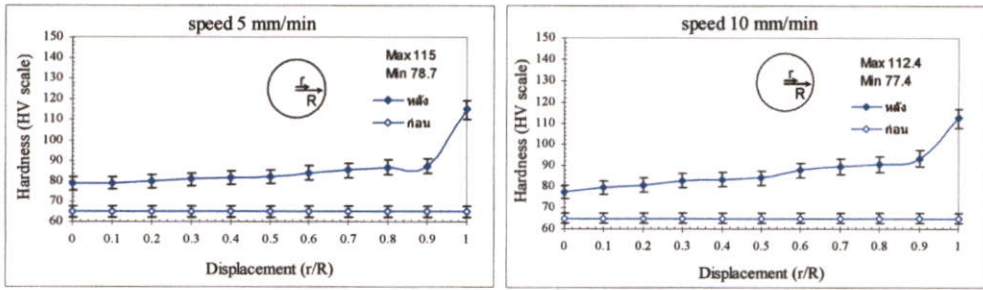
รูปที่ ค.19 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 20 และ 30 mm / min



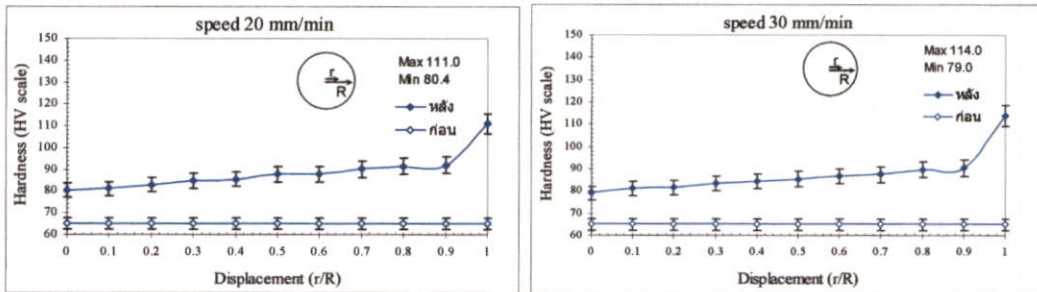
รูปที่ ค.20 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 35 และ 40 mm / min



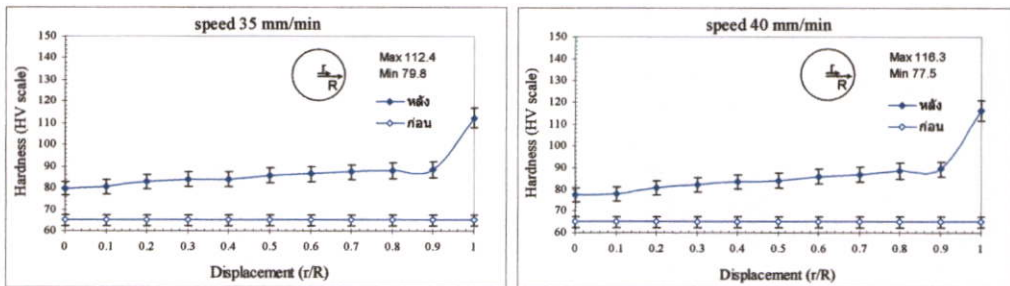
รูปที่ ค.21 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 50 mm / min



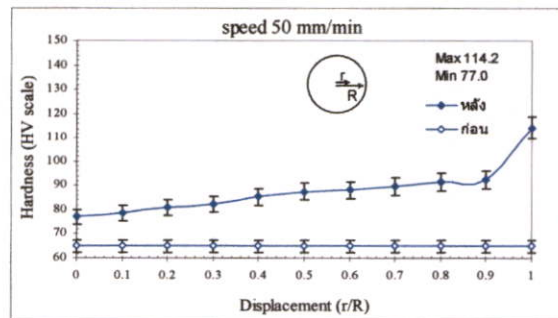
รูปที่ ค.22 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



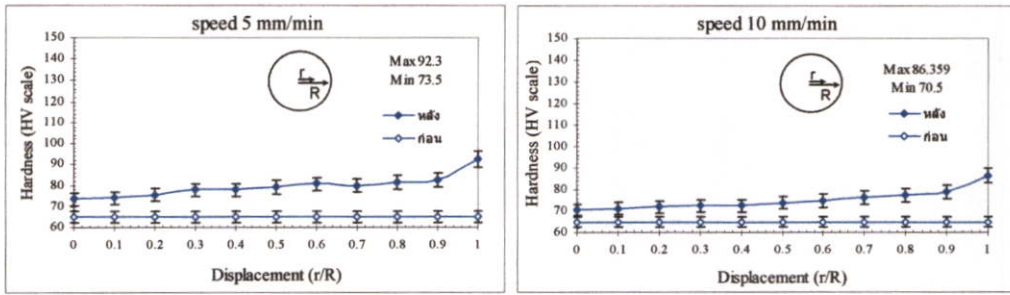
รูปที่ ค.23 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



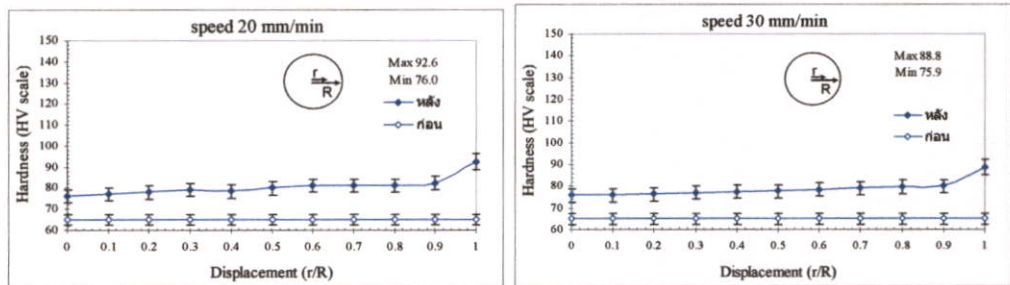
รูปที่ ค.24 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



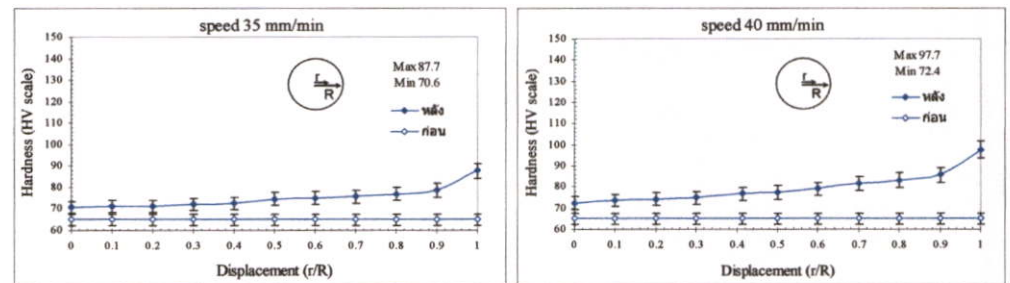
รูปที่ ค.25 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 15^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 50 mm/min



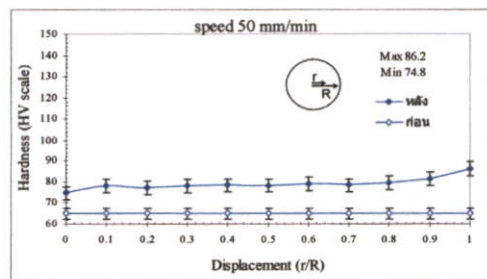
รูปที่ ค.26 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



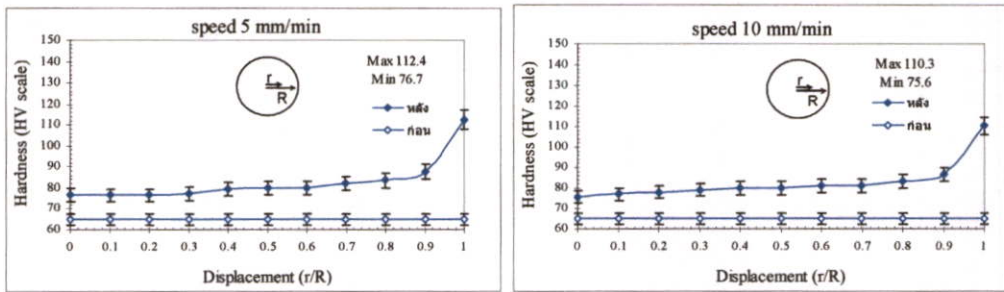
รูปที่ ค.27 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



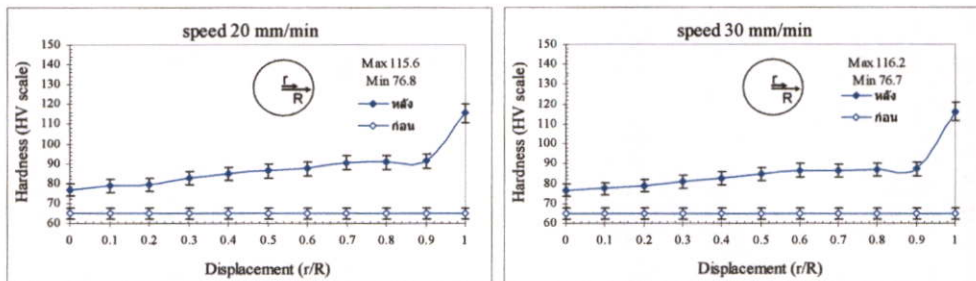
รูปที่ ค.28 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



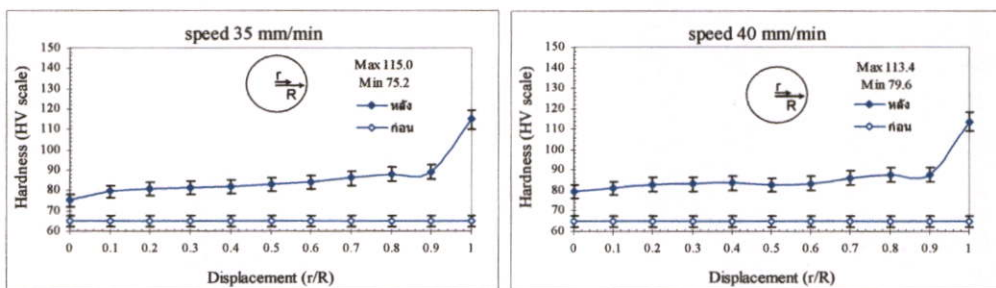
รูปที่ ค.29 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm/min



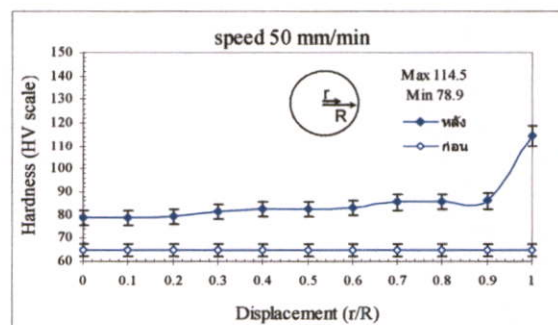
รูปที่ ๓.๓๐ ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



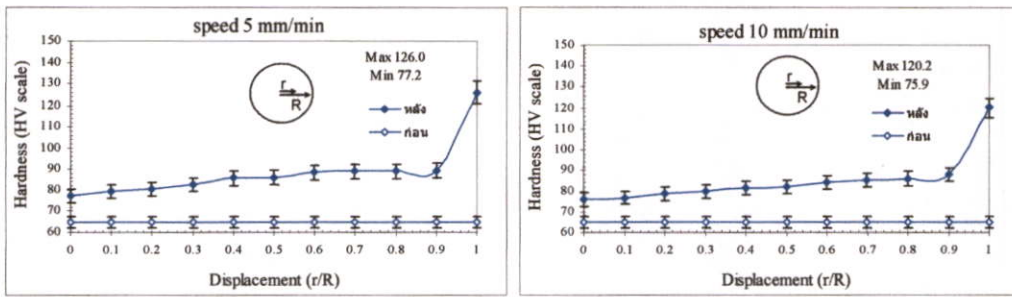
รูปที่ ๓.๓๑ ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



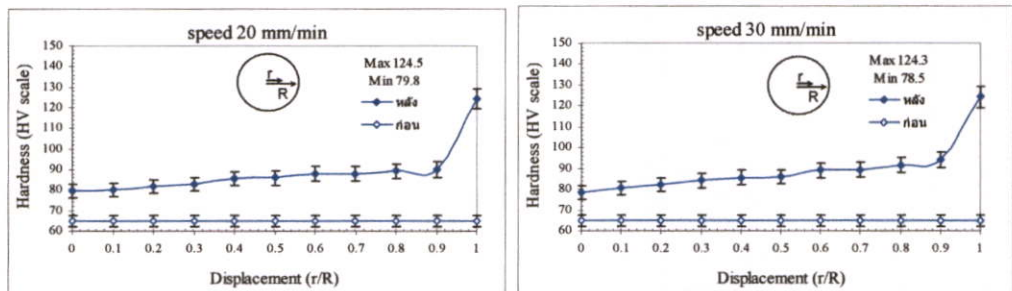
รูปที่ ๓.๓๒ ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



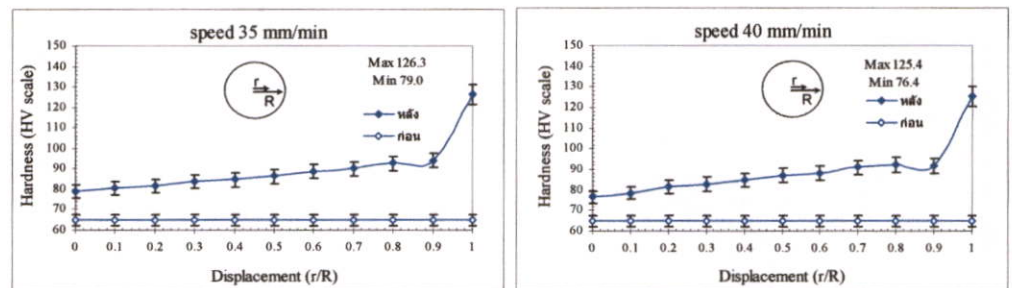
รูปที่ ๓.๓๓ ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 30\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm/min



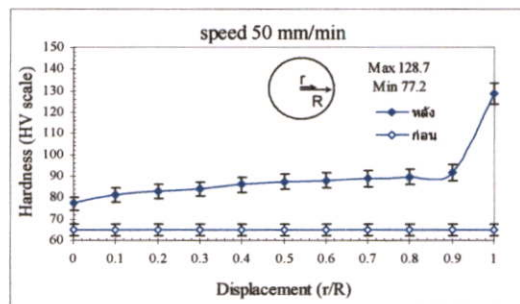
รูปที่ ค.34 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



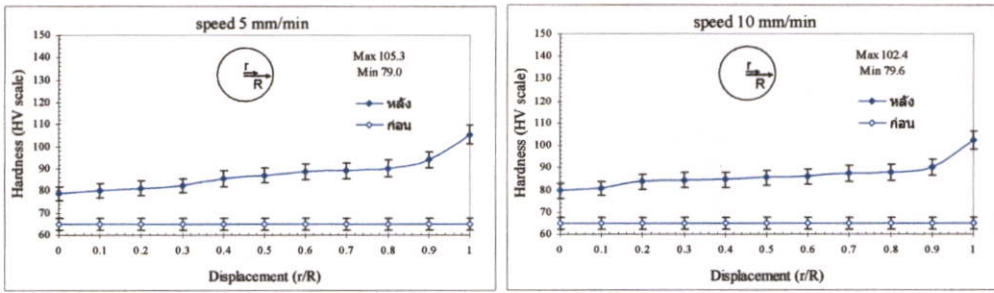
รูปที่ ค.35 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



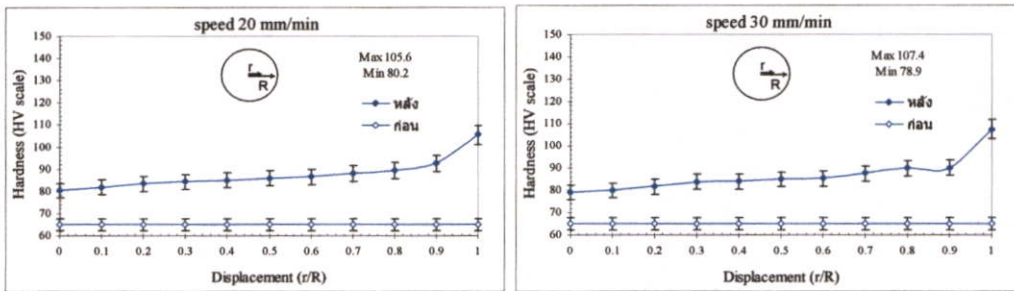
รูปที่ ค.36 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



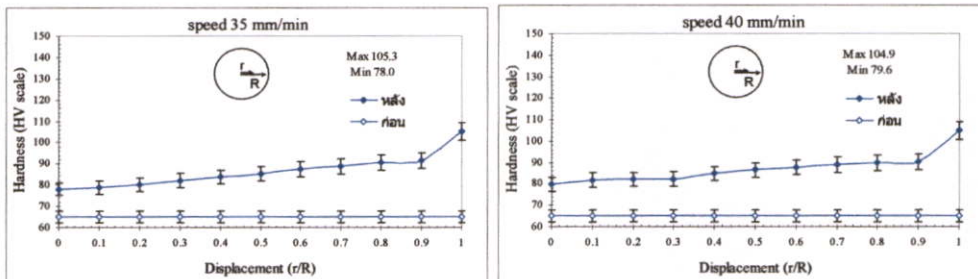
รูปที่ ค.37 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 35\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm/min



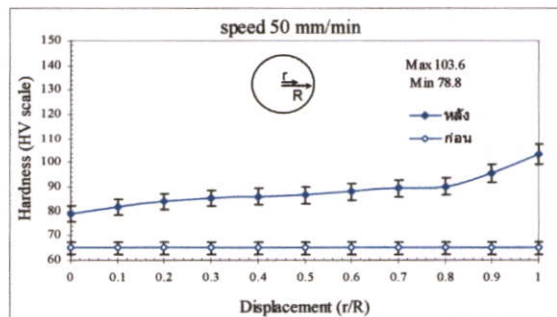
รูปที่ ๓.๓๘ ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 5 และ 10 mm / min



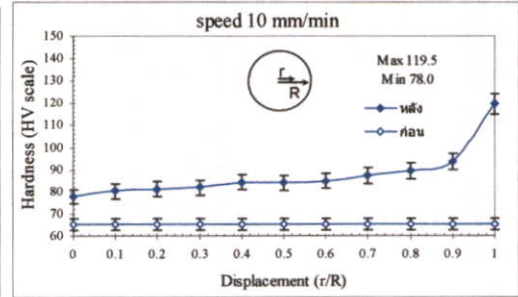
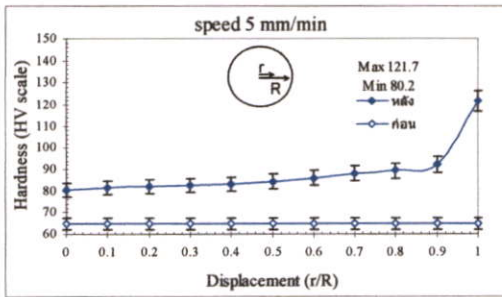
รูปที่ ๓.๓๙ ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 20 และ 30 mm / min



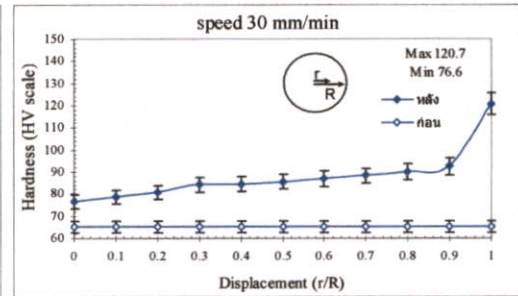
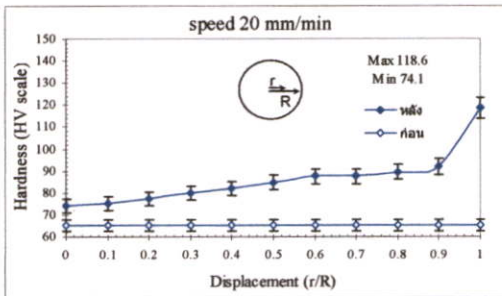
รูปที่ ๓.๔๐ ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 35 และ 40 mm / min



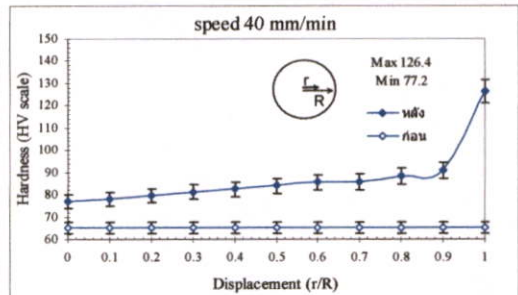
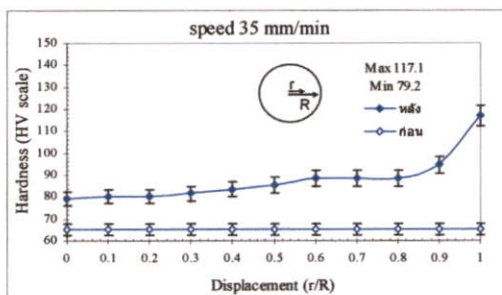
รูปที่ ๓.๔๑ ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดันขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 50 mm / min



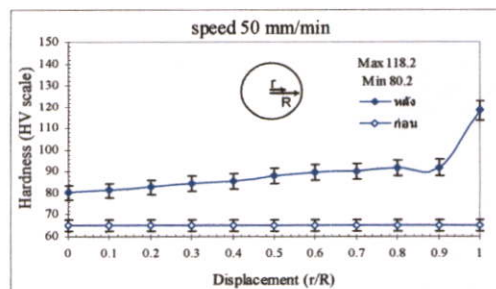
รูปที่ ค.42 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



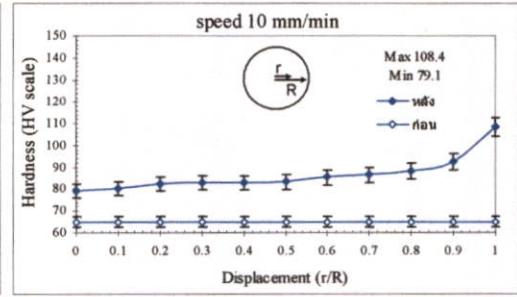
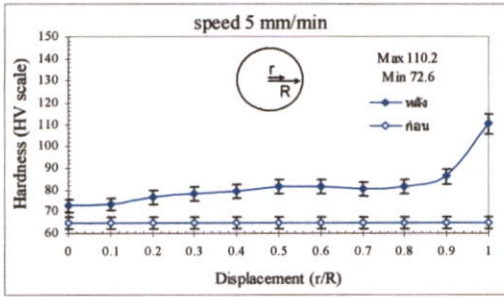
รูปที่ ค.43 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



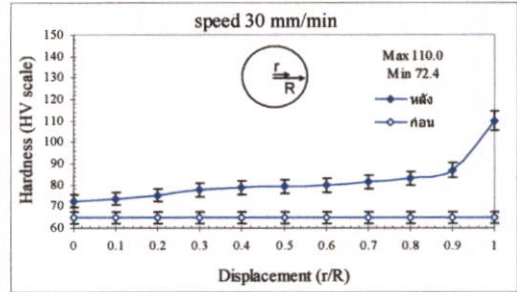
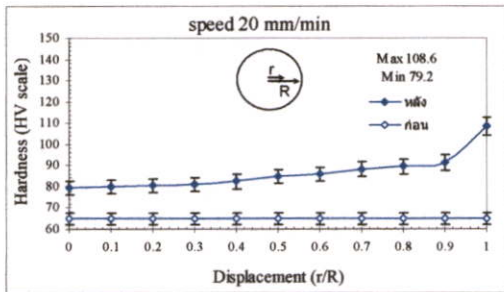
รูปที่ ค.44 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



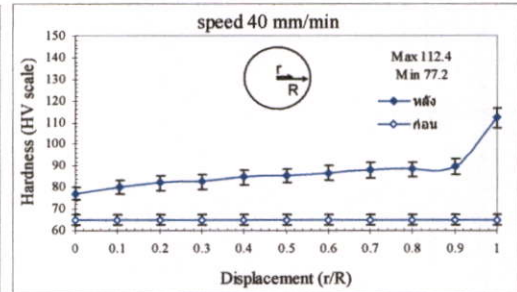
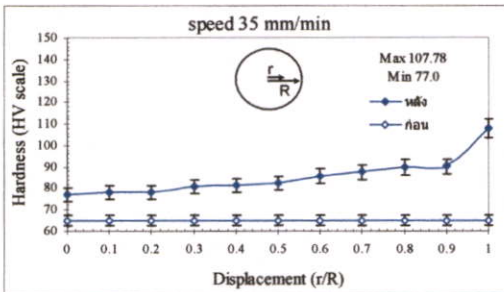
รูปที่ ค.45 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_c = 30\%$, สารหล่อลื่น SAE 40, ความเร็ว 50 mm/min



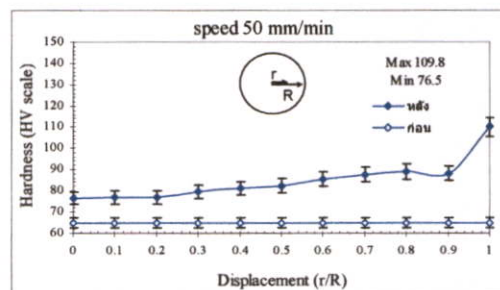
รูปที่ ค.46 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



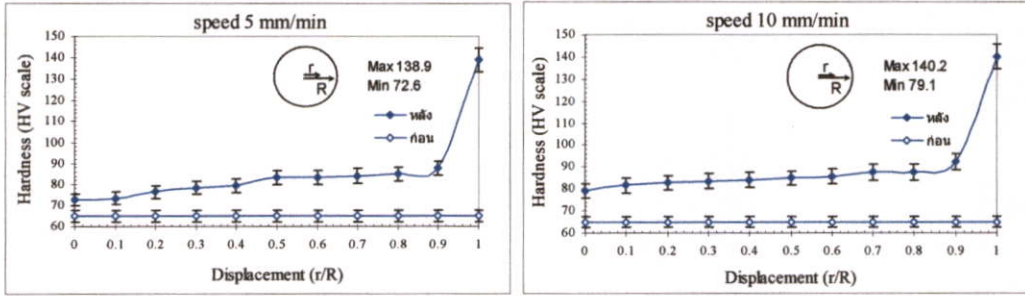
รูปที่ ค.47 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



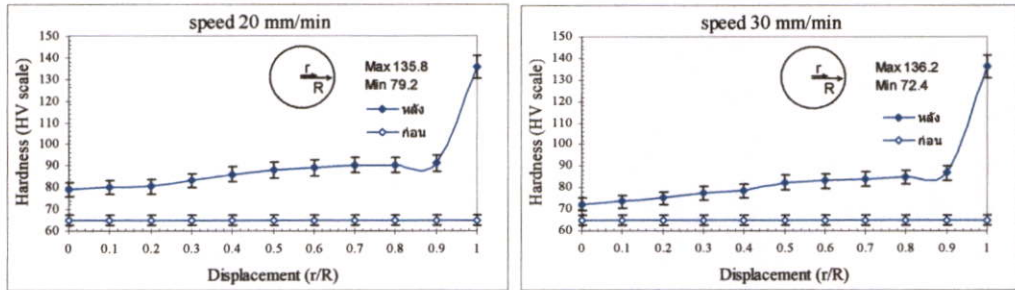
รูปที่ ค.48 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



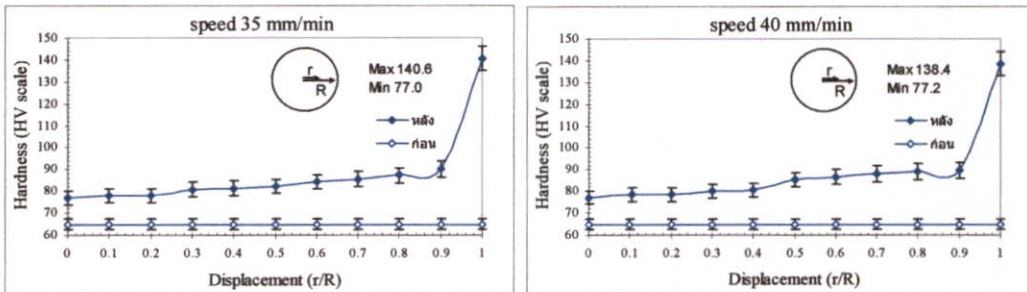
รูปที่ ค.49 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 22.5^\circ$, $r_e = 20\%$, สารหล่อลื่นน้ำมันมะพร้าว, ความเร็ว 50 mm/min



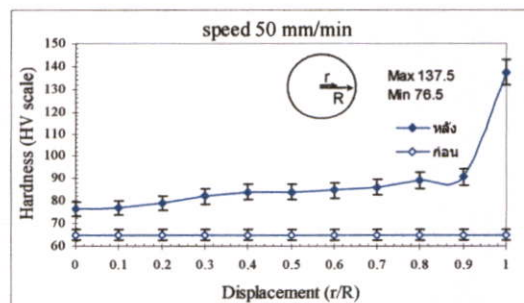
รูปที่ ค.50 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 5 และ 10 mm/min



รูปที่ ค.51 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 20 และ 30 mm/min



รูปที่ ค.52 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 35 และ 40 mm/min



รูปที่ ค.53 ความแข็งบนหน้าตัดแท่งอลูมิเนียมก่อนและหลังการดัดขึ้นรูป $\alpha = 30^\circ$, $r_e = 41\%$, สารหล่อลื่นสบูโซเดียม, ความเร็ว 50 mm/min

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายสมชัย ตัณฑวิรุพห์
- ที่อยู่ 33/262 หมู่บ้านปรีชาสุวินทวงศ์ ถ.สุวินทวงศ์ แขวงแสนแสบ เขตมีนบุรี
กรุงเทพฯ 10510
- ประวัติการศึกษา 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี จ.ปทุมธานี
2543 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ปว.ส. สาขาวิชา ช่างยนต์
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต เทคนิครุงเทพ
- ประสบการณ์การทำงาน
- พ.ศ.2546-ปัจจุบัน สอนพิเศษระดับปริญญาตรี ในสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
- วิชาที่สอน
1. กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคสถิตย์ศาสตร์ Engineering Mechanics (Static)
 2. กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคพลศาสตร์ Engineering Mechanics (Dynamics)
 3. กลศาสตร์เครื่องจักรกล Mechanics of Machinery
- พ.ศ.2546-2547 ผู้ช่วยสอนวิชากลศาสตร์วิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง