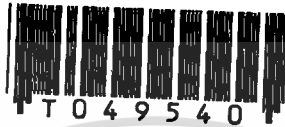


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมตาย ความเร็วและความดันของสารหล่อลื่น
ในการดึงลวดทองแดงโดยการทดลอง

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF HALF DIE ANGLE,
SPEED, AND LUBRICANT PRESSURE IN COPPER WIRE DRAWING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

พ.ศ.2546

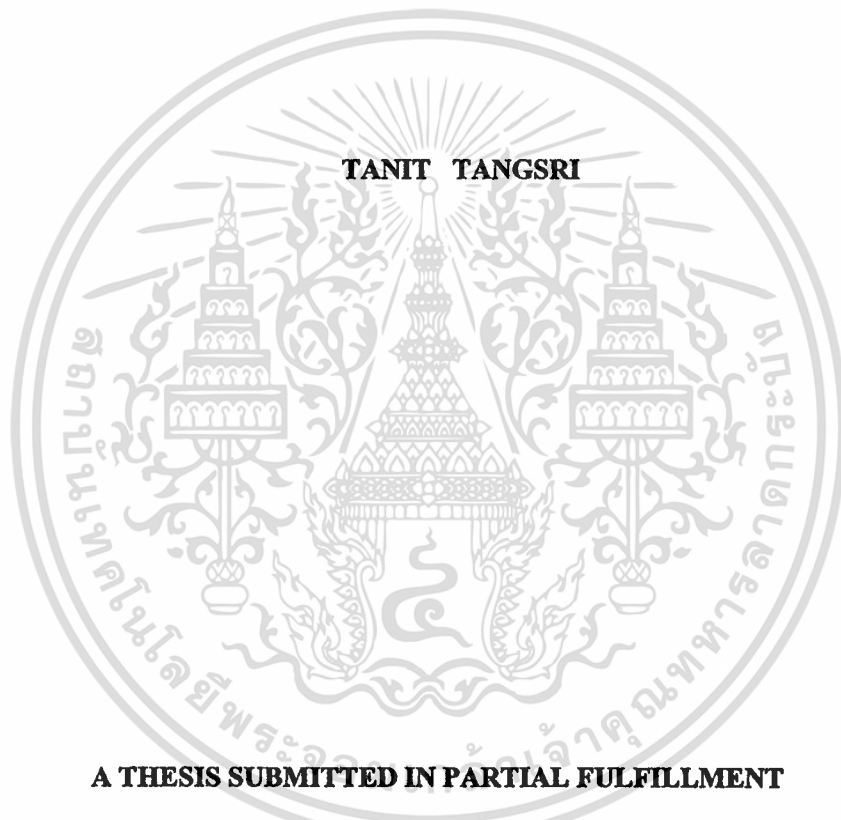
ISBN 974-324-367-4

เลขที่.....
เลขทะเบียน..... 49540
วัน, เดือน, ปี 24 ก.พ. 2547

b.....
i.....

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาต และสงวนลิขสิทธิ์ไว้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF HALF DIE ANGLE,
SPEED, AND LUBRICANT PRESSURE IN COPPER WIRE DRAWING**



TANIT TANGSRI

**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**

2003

ISBN 974-324-367-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมคาย ความเร็วและความดันของสารหล่อลื่นในการดิ่งลวดทองแดง โดยการทดลอง
นักศึกษา	นาย ธนิต แต้ศรี
รหัสประจำตัว	44062033
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมคายที่มีต่อความเค้นดิ่งในกระบวนการดิ่งลดขนาดของเส้นลวด, อิทธิพลของความเร็วในการดิ่งลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด, วิธีการแบบใหม่โดยการดิ่งเส้นลวดที่ใช้สารหล่อลื่นที่ความดันสูง, ความแข็งของชิ้นงานที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลในกระบวนการดิ่งลวด, ความเรียบผิวของชิ้นงานที่มีผลกระทบมาจากการใช้สารหล่อลื่นที่ความดันสูง, ความเค้นและความเครียดของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการดิ่งขึ้นรูปลวดโลหะด้วยวิธีทดลอง จากผลของการทดลองที่ได้รับจะช่วยให้ผู้ผลิตลวดสามารถใช้เป็นข้อมูลที่ดีในการพัฒนา กำหนดกระบวนการผลิตที่เหมาะสมต่อไป

Thesis Title An Experimental Study on the Effect of Half Die
Angle, Speed, and Lubricant Pressure in Copper
Wire Drawing.
Student Mr. Tanit Tangsri
Student ID. 44062033
Degree Master of Engineering
Programme Mechanical Engineering
Year 2003
Thesis Advisor Assoc. Prof. Somchai Norsethasopon

ABSTRACT

This research studies the effect of half die angle on the drawing stress during wire drawing process, influence of wire drawing speed to decrease the cross section area, new apparatus for wire drawing with lubricant under high pressure, the effects of work pieces hardness has to the mechanical properties of wire drawing process, the effects of smooth work pieces surface has to drawing with lubricant under high pressure, stress and strain of the work pieces on metal wire during drawing process by experiment. This experiment results will be used to the development of production fields.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยการให้คำแนะนำและคำปรึกษารวมทั้งข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานและการแก้ปัญหาต่างๆที่พบในระหว่างการศึกษาวิจัยรวมทั้งได้ทดสอบการตรวจเทียบจาก รศ. สมชัย นรเศรษฐ์ โสภณ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ Professor. Kazunari Yoshida พร้อมคณะจาก Tokai University Japan ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจต่อผู้วิจัยและขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา คณะครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและผู้ที่ให้การสนับสนุนเป็นอย่างยิ่งที่ช่วยเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธนิต แด่งศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุ.....	5
2.1 คุณสมบัติของวัสดุ.....	5
2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์.....	5
2.1.2 คุณสมบัติทางเคมี.....	5
2.1.3 คุณสมบัติทางกล.....	5
2.1.3.1 ความเครียด.....	6
2.1.3.2 ความเค้น.....	7
2.1.3.2.1 ความเค้นแรงดึง.....	8
2.1.3.2.2 ความเค้นแรงอัด.....	8
2.1.3.2.3 ความเค้นแรงเฉือน.....	8
2.1.3.3 แรงเฉือน.....	9
2.1.3.4 ความยืดหยุ่น.....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.5	คุณสมบัติช่วงการเปลี่ยนรูป.....	10
2.1.3.6	ความเหนียว.....	10
2.1.3.7	ความแกร่ง.....	12
2.1.3.8	แรงกดหรือแรงอัด.....	12
2.1.3.9	ความอ่อนของวัสดุ.....	13
2.1.3.10	ความแข็งแรงสถิติของวัสดุเหนียว.....	13
2.1.3.11	แรงสลั.....	13
2.1.3.11.1	การดูดซับพลังงานกล.....	14
2.1.3.11.2	ความล้า.....	14
2.1.3.11.2.1	วัสดุเกิด Work Hardening.....	15
2.1.3.11.2.2	ในเนื้อโลหะทุกชนิดจะมีจุดที่ผิดปกติหรือไม่สมบูรณ์.....	15
2.1.3.11.2.3	การลดผลของแรงสลัที่ทำให้เกิดความล้า.....	15
2.1.3.11.2.3.1	การออกแบบ.....	15
2.1.3.11.2.3.2	ในการผลิตชิ้นส่วน.....	15
2.1.3.11.2.3.3	การออกแบบเพื่อลดแรงกระทำ.....	15
2.1.3.12	คุณสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิสูง-ความเค้น.....	16
2.1.3.13	Stress-Rupture Test.....	17
2.2	ทองแดง.....	17
บทที่ 3	การดึงขึ้นรูปโลหะ.....	19
3.1	การพัฒนาของการดึงขึ้นรูปโลหะ.....	19
3.2	การพัฒนากรรมวิธีของสารหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูป.....	22
3.2.1	การหล่อลื่น.....	23
3.2.2	การวัดความเสียดทาน.....	27
3.3	การพัฒนาของวัสดุเครื่องมือ.....	28
3.4	การออกแบบทางกลของเครื่องดึงขึ้นรูป.....	28
3.5	การวิเคราะห์ในทางทฤษฎี.....	30
3.5.1	บทนำ.....	30
3.5.2	ทฤษฎี.....	31
3.5.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกรณีศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของครีมนวด.....	34
3.5.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกรณีศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความดันสารหล่อลื่น.....	39

3.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกรณีศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความเร็ว.....	41
บทที่ 4 วิธีการทดลอง.....	45
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	45
4.2 วิธีทดลอง.....	49
4.2.1 วิธีทดลองการศึกษาผลกระทบของครึ่งมูมคาย.....	49
4.2.1.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	50
4.2.2 วิธีทดลองการศึกษาผลกระทบของความเร็ว.....	50
4.2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	51
4.2.3 วิธีทดลองการศึกษาผลกระทบของความดันของสารหล่อลื่น.....	51
4.2.3.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	52
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	53
5.1 ผลที่ได้จากการทดลอง.....	53
5.1.1 ผลการทดลองการศึกษาผลกระทบของครึ่งมูมคาย.....	53
5.1.2 ผลทดลองการศึกษาผลกระทบของความดันสารหล่อลื่น.....	60
5.1.3 ผลทดลองการศึกษาผลกระทบของความเร็ว.....	68
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	73
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	74
6.1 บทสรุป.....	74
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ข. ลวดที่ใช้ในการทดสอบ.....	80
ภาคผนวก ค. องค์ประกอบของคายนที่ใช้ในการทดลอง.....	81
ภาคผนวก ง. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การรีดขึ้นรูปสภาพเย็น : สารหล่อลื่นชนิดทั่วไป.....	25
3.2 การรีดขึ้นรูปสภาพร้อน : สารหล่อลื่นชนิดทั่วไป.....	25
3.3 การดึงขึ้นรูปแห้ง : สารหล่อลื่นชนิดทั่วไป.....	26
3.4 การดึงขึ้นรูปแบบเปียก : สารหล่อลื่นชนิดทั่วไป.....	26
3.5 ค่าแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปชิ้นงาน.....	33
3.6 มุมคายที่คี่ที่สุด (โดยแรงที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง) ในการดึงขึ้นรูปเย็น.....	33
4.1 แสดงค่าคุณสมบัติของคายที่ใช้ในการทดลอง.....	46
4.2 แสดงค่าคุณสมบัติของทองแดงที่ใช้ในการทดลอง.....	48
4.3 แสดงสัดส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดที่ใช้ทดสอบ.....	49
4.4 แสดงสัดส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดและความเร็วที่เปลี่ยนแปลง.....	50
4.5 แสดงสัดส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดและความดันของสารหล่อลื่น.....	51

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงชิ้นส่วนที่ถูกแรงเฉือน.....	7
2.2 แสดงความเค้นดึงบนพื้นที่หน้าตัดขวาง.....	8
2.3 แสดงความเค้นอัดบนพื้นที่หน้าตัดขวาง.....	8
2.4 แสดงความเค้นเฉือนบนพื้นที่หน้าตัดขวาง.....	9
2.5 แสดงแนวพื้นที่รับแรงเฉือน.....	9
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุเปราะ.....	11
2.7 เปรียบเทียบความเค้น-ความเครียดแสดงการทดสอบแรงดึง – แรงอัดของเหล็ก.....	12
2.8 แสดงการรับแรงในลักษณะต่างๆ.....	14
3.1 แสดงการดึงขึ้นรูป.....	27
3.2 แม่พิมพ์ดึงลวด (Drawing die).....	32
3.3 ความเค้นและแรงในการดึงขึ้นรูป.....	32
3.4 แสดงการกระจายของ Hydrostatic pressure (Mpa) ระหว่างการดึงขึ้นรูป.....	34
3.5 แสดงพื้นฐานของงานวิจัยของการดึงลวดในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด.....	35
3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครึ่งมุมคาน.....	36
3.7 แสดงผลกระทบของครึ่งมุมคานและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่.....	37
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด.....	38
3.9 ชุดจับคานที่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นสูง.....	39
3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงลวดเหล็กและความดัน.....	40
3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงลวดอะลูมิเนียมและความดัน.....	40
3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างครึ่งมุมคานและแรงรวมในการดึงขึ้นรูป.....	41
3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงลวดและความเร็ว.....	42
3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเส้นลวดและความเร็ว.....	42
3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดและความเร็ว.....	43
3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดและความเร็ว.....	44
4.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องทดลอง.....	45
4.2 เครื่อง Testometric Mico 500 และชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษ.....	45
4.3 เครื่องทดสอบความแข็ง.....	46

4.4	คายที่ใช้ในการทดสอบทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์.....	46
4.5	เครื่องกำเนิดความดัน.....	47
4.6	ชุดจับคายที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลอง.....	47
4.7	แสดงไดอะแกรมของชุดกำเนิดความดัน.....	47
4.8	กราฟแสดงค่าความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของลวดทองแดงก่อนการทดลอง.....	48
4.9	กราฟแสดงค่าความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของลวดทองแดงหลังการทดลอง.....	48
5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครึ่งมุมคาย.....	53
5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและขนาดของครึ่งมุมคายที่ได้จากการคำนวณ.....	54
5.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงลวดทองแดงและระยะยืด (1).....	55
5.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงลวดทองแดงและระยะยืด (2).....	55
5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (1).....	56
5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (2).....	57
5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (3).....	58
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (4).....	59
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความคืนสารหล่อลื่น.....	60
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (5).....	62
5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (6).....	63
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (7).....	64
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (8).....	65
5.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะความลึก.....	66
5.15	แสดงความสัมพันธ์ความเรียบผิวกับความดัน.....	66
5.16	กราฟแสดงค่าการเปรียบเทียบระหว่าง R_a (μm) กับความคืนสารหล่อลื่น.....	67
5.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเร็วในการดึงขึ้นรูป.....	68
5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (9).....	69
5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (10).....	70
5.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (11).....	71
5.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (12).....	72

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

α	ครึ่งมุมคาย
μ	แรงเสียดทาน
v	ความเร็ว (mm/min)
T	แรงดึง (N)
σ	ความเค้น (N/mm ²)
E	โมดูลัสความยืดหยุ่น
ϵ	ความเครียด
g	ความถ่วงจำเพาะ
F	แรง (N)
D_0	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น (mm)
D_1	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนไป (mm)
A_0	ขนาดพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (mm ²)
A_1	ขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไป (mm ²)
L_0	ขนาดความยาวเริ่มต้น (mm)
L_1	ขนาดความยาวที่เปลี่ยนไป (mm)
Cu	ทองแดง
Al	อะลูมิเนียม
η	ประสิทธิภาพ
RE	สัดส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (%)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตของกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก จากการพัฒนาดังกล่าวได้กระทำกัน ในหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการทดลองเพื่อหาค่าของตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาออกแบบที่เหมาะสมและได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณ หรือการใช้วิธีสร้างรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาแก้ปัญหา อย่างไรก็ตามจากการสอบถามผู้ประกอบการผลิตในอุตสาหกรรมการดึงลวดสิ่งที่ยังไม่ได้มีการพัฒนา ก็คือการนำเอาสารหล่อลื่นที่ความดันสูงมาใช้งานเพื่อให้คุณภาพผิวของชิ้นงานดีขึ้นและต้นทุนการใช้พลังงานในการดึงเส้นลวดลดลง อีกทั้งยังไม่ได้ศึกษาผลกระทบของครีมนุมคายที่มีอิทธิพลต่อความแข็งของชิ้นงานซึ่งจะมีความสำคัญมากต่อขบวนการผลิตซึ่งในปัจจุบันจะทำการตรวจสอบเฉพาะทดสอบดึง ทดสอบบิดและความหนาของการชุบสังกะสีในบางงานเท่านั้น ส่วนอิทธิพลของความดันสารหล่อลื่นและความแข็งที่จุดต่างๆภายในเส้นลวดที่ดึงขึ้นรูปตลอดจนอิทธิพลของความเร็วที่มีผลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปซึ่งค่าตัวแปรต่างๆที่สำคัญเหล่านี้ที่มีความสำคัญมากยังไม่มีการทดสอบอย่างจริงจังจึงเป็นเหตุจูงใจให้มีการศึกษาถึงผลกระทบเหล่านี้เพื่อที่จะนำไปเป็นแบบอย่างที่ดีในการพัฒนาออกแบบและตัดสินใจเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในโอกาสต่อไป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของครีมนุมคาย ความดันของสารหล่อลื่นตลอดจนอิทธิพลของความเร็วที่มีผลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปขึ้นด้วยวิธีทดลอง โดยทำการทดลองดึงลวดทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.20, 5.60, 6.00 และ 11.50 มม ตามลำดับ โดยทำการลดขนาดลงเหลือ 5 และ 9 มม ทำการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 7.54, 20.28, 30.56 และ 38.7 % ที่ครีมนุมคาย 4, 6, 8, 10 และ 12 องศาตามลำดับ หลังจากนั้นตรวจสอบความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นว่าขนาดของครีมนุมคายเท่าใดเป็นขนาดของครีมนุมคายที่เหมาะสมต่อกระบวนการดึงขึ้นรูปที่ทำให้เกิดความเค้นและความเครียดต่ำสุด ต่อจากนั้นจะใช้ครีมนุมคายที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองข้างต้นนั้นมาทำการทดลองต่อ โดยทำการทดลองดึงลดขนาดของเส้นลวดขนาด 20.0, 20.0, 10.5, 11.5 มม โดยลดขนาดลงเหลือ 17.88, 15.0, 9.0 และ 9.0 ตามลำดับ โดยลดพื้นที่หน้าตัดลง 20, 43.8, 26.5 และ 38.7% จากนั้นทดลองปรับเปลี่ยนความเร็วที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ หลังจากนั้นตรวจสอบว่าระดับของความเร็วเท่าใดจะเป็นความเร็วที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดความเค้นและความเครียดของเส้นลวดที่ได้ออกมาอยู่ในระดับดีที่สุดและใช้เวลาในการดึงได้เหมาะสมที่สุด หลังจากนั้นทำการทดลองต่อโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้ความดันของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หล่อลื่นอัดเข้าที่ช่องทางเข้าของโซนการคิงขึ้นรูปโดยขนาดของความดันที่ใช้ในการทดลองเริ่มตั้งแต่จากที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นที่ความดัน 0, 30, 60, และ 100 บาร์ตามลำดับ หลังจากนั้นจะทำการทดสอบความแข็งที่บริเวณจุดต่างๆของชิ้นงานตั้งแต่ผิวภายนอกจนถึงจุดกึ่งกลางของชิ้นงานและตรวจสอบสภาพผิวของชิ้นงานว่ามีความเรียบผิวแตกต่างกันอย่างไรเพื่อหาข้อสรุปว่าความดันของสารหล่อลื่นที่อัดเข้าในช่องทางเข้าของโซนการคิงขึ้นรูปที่ความดันเท่าใดเหมาะสมที่สุดที่ทำให้คุณสมบัติทางกลที่ได้ออกมาดีที่สุด สำหรับกรณีศึกษาครั้งนี้จะทำให้ทราบว่าผลกระทบของตัวแปรที่ศึกษาผ่านมาจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางกลของเส้นลวดที่ผ่านกระบวนการคิงขึ้นรูปเปลี่ยนไปอย่างไร จากผลของการทดลองที่ได้ในครั้งนี่จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาเพื่อเป็นข้อมูลในการแก้ไขและปรับปรุงกระบวนการผลิตในโอกาสต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้มีความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อ

- 1.2.1 ศึกษาครั้งมุดคายที่เหมาะสมต่อกระบวนการคิงขึ้นรูปที่ทำให้เกิดความเค้นและความเครียดต่ำสุด
- 1.2.2 ศึกษาความเร็วที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้คุณภาพของเส้นลวดที่ได้ออกมาดีที่สุดและใช้เวลาน้อยที่สุด
- 1.2.3 ศึกษาความดันของสารหล่อลื่นที่อัดเข้าในช่องทางเข้าของโซนการคิงขึ้นรูปที่ความดันเท่าใดเหมาะสมที่สุดที่ทำให้คุณสมบัติทางกลที่ได้ออกมาดีที่สุด

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้มีสมมุติฐานของการศึกษาว่า

- 1.3.1 คาดว่าขนาดของครั้งมุดคายจะมีผลต่อความเค้นและความเครียดเป็นอย่างมาก จากครั้งมุดคายที่แคบและทำการลดขนาดทันทีทันใดจะทำให้เกิดความเค้นสูงมากจนทำให้วัสดุขาดได้และที่ครั้งมุดคายที่กว้างมากจะทำให้ความเค้นสูงขึ้นเรื่อยๆเช่นกันเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างผิวของลวดกับช่วงลาดของคายมีพื้นที่ในการสัมผัสกันมาก ดังนั้นจะมีขนาดของครั้งมุดคายที่เหมาะสมที่มุดคายหนึ่งที่ทำให้เกิดความเค้นและความเครียดต่ำสุดจากการทดลองครั้งนี้
- 1.3.2 คาดว่าความเร็วที่ใช้คิงจะมีผลต่อการคิงลวดเช่นกัน เนื่องจากความเร็วที่สูงจะทำให้ภายในเนื้อวัสดุเกิดความเค้นและความเครียดที่สูงมากกว่าแต่ถ้าความเร็วน้อยเกินไปก็จะทำให้เสียเวลาในกระบวนการผลิตเช่นกัน ดังนั้นจะมีขนาดของความเร็วหนึ่งที่เหมาะสมต่อการคิงลดขนาดของเส้นลวดมากที่สุดจากการทดลองครั้งนี้

1.3.3 คาดว่าความดันของสารหล่อลื่นที่อัดเข้าในช่วงทางเข้าของโซนการดึงขึ้นรูปจะมีผลทำให้แรงเสียดทานระหว่างเส้นลวดกับสายลวดน้อยลงขณะความดันสูงขึ้นแผ่นฟิล์มบางๆจะแทรกเข้าไปได้ลึกกว่าก็จะทำให้แรงเสียดทานลดลงไปอีกเป็นผลให้ความเค้นและความเครียดลดลงไปด้วย ดังนั้นจะมีขนาดของความดันของสารหล่อลื่นหนึ่งที่ทำให้ความเค้นและความเครียดลดลงต่ำสุด และต้องเป็นความดันที่เหมาะสมกับการใช้งาน ได้จริงในอุตสาหกรรมด้วยจากการทดลองครั้งนี้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยคือการพัฒนาของการดึงขึ้นรูปโลหะ การพัฒนากรรมวิธีของสารหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูปและการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีจากหนังสือและจากผลการวิจัยของผู้วิจัยที่ทำมาก่อนหน้านี้เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีหนังสือและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1.4.1 Edward M. Mielenik, Metalworking Science and Engineering, 397-463

1.4.2 J. Charkrabarty, Theory of Plasticity, Mc Graw-Hill International Editions, 1987

1.4.3 Kurt Lange, Handbook of Metal Forming, Editor in chief, Mc Graw-Hill Book Company

1.4.4 S. Norasatsopon and T.Tangsri, "Experimental study of the effect of a half die angle on drawing stress during wire drawing" Ladkrabang Engineering Journal, March 2001, pp.134-139.

1.4.5 P. Kaewtatip, "A study on the effect of drawing speed on the performances of wire drawing process "Conference for ME NETT 15th, Thailand, 2001, pp.151-155.

1.4.6 D.V. Yanaki, "Feeding commercial lubricant under pressure into the deformation zone in drawing" Stal in English, 1963(6), pp.492-493.

1.4.7 K. Yoshida, H. Tanaka, "The drawability of Ni-Ti shape memory alloy wires" Wire and Bar, 89-94(1995) 2,45.

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้คือทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเส้นลวดระหว่างการดึงลวดทองแดงที่เกิดจากสัดส่วนการลดขนาดของลวดและมุมคด

- 1.5.1 ขนาดของครึ่งมุมคดที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง
- 1.5.2 ขนาดของความเร็วที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง
- 1.5.3 ขนาดของความคดที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้มีขั้นตอนของการศึกษา ดังนี้

- 1.6.1 ทำการศึกษาทางด้านทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยให้ครอบคลุมเนื้อหาทั้งหมด
- 1.6.2 ทำการศึกษายทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยของตนเอง
- 1.6.3 ทำการออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลวดทองแดงในระหว่างการดึงขึ้นรูปโดยสร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทดลอง
- 1.6.4 ทำการทดลองหาขนาดของครึ่งมุมคดที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง
- 1.6.5 ทำการทดลองหาขนาดของความเร็วที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง
- 1.6.6 ทำการทดลองหาขนาดของความคดที่เหมาะสมในการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง
- 1.6.7 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.6.8 สรุปผลของการทดลอง

บทที่ 2

คุณสมบัติของวัสดุ

2.1 คุณสมบัติของวัสดุ (Properties of Materials)

คุณสมบัติของวัสดุต่างๆอาจจะพิจารณาแบ่งออกเป็นประเภทได้ 3 ประเภทด้วยกันคือ

2.1.1. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties) เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่ได้ถูกกระทำโดยแรงภายนอกแต่เป็นการตอบสนองจากภายในตัวของวัสดุเองซึ่งบ่งบอกถึงชนิดและขนาดของวัสดุเช่น คุณสมบัติที่มีต่อความร้อน ความต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่น สี ความถ่วงจำเพาะ สัมประสิทธิ์ของการยืด - หดตัว เป็นต้น

2.1.2. คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) เป็นคุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถที่จะต่อต้านหรือตอบสนองปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุนั้นๆ เช่น ปฏิกิริยาและลักษณะของการเกิดสนิม การสึกกร่อน การเคลือบและการชุบผิวโลหะ เป็นต้น

2.1.3. คุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) เป็นคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อแรงกระทำจากภายนอก เช่น ต่อต้านการยืดออกเมื่อมีแรงดึงมากกระทำหรือรับแรงกระทำต่างๆได้โดยไม่เปลี่ยนสภาพไปทำให้สามารถใช้งานต่างๆได้

คุณสมบัติทางกลเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับ ความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Ductility) ความล้า (Fatigue) เป็นต้น วิศวกรจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติเหล่านี้ในการเลือกใช้วัสดุหรือกำหนดขนาดของวัสดุในการออกแบบการผลิตซึ่งข้อมูลเหล่านี้มักได้มาจากการทดสอบในห้องทดลอง ผู้ใช้จะต้องรู้ว่าข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากลักษณะและวิธีการทดลองอย่างไรเพราะถ้าหากไม่เข้าใจวิธีการทดลองเพื่อหาข้อมูลต่างๆอย่างแท้จริงแล้วอาจนำไปใช้ผิดพลาดทำให้การใช้งานไม่ตรงกับข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองซึ่งอาจเกิดความเสียหายขึ้นได้หรืออาจจะต้องมีปัจจัยอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งจะปลอดภัย ดังนั้นผู้ใช้จะต้องทำความเข้าใจให้ชัดเจนถึงสถานการณ์ที่ทดลองหาข้อมูลและการนำไปใช้งานให้เหมาะสมกันจึงจะเกิดประโยชน์สูงสุด คุณสมบัติของวัสดุที่จะกล่าวถึงในที่นี้ได้แก่ ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) ความเค้นแรงอัด (Compressive) ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) ความแข็ง (Hardness) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เป็นต้น

ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องจักร โครงสร้างและผลิตภัณฑ์ทำด้วยวัสดุหลายชนิดซึ่งมีขนาดต่างๆกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน ส่วนประกอบต่างๆเหล่านี้โดยทั่วไปมักจะต้องรับแรงภายนอก (External forces) มากกระทำซึ่งทำให้เกิดแรงด้านภายใน (Internal forces) และการเปลี่ยนรูป

ของวัตถุ (Deformation) แรงต้านภายในที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

2.1.3.1 ความเครียด (Strain)

ความเครียดเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุอันเนื่องมาจากวัตถุได้รับแรงกระทำเช่น แรงดึง แรงกดหรือแรงเฉือน อัตราส่วนของส่วนที่ยืดออก หดเข้าหรือบิดเบี้ยวไปหารด้วยความยาวเดิมเรียกว่าความเครียดใช้สัญลักษณ์ ϵ ความเครียดนั้นไม่มีหน่วย การที่วัตถุมีความเครียดก็แสดงว่าวัตถุนั้นเกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากมีแรงภายนอกมากระทำ ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ความเครียด } (\epsilon) &= \frac{\Delta L}{L_0} \\ &= \frac{L - L_0}{L_0} \end{aligned}$$

โดยที่ ϵ = ความเครียด

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป

L = ความยาวใหม่

L_0 = ความยาวเดิม

ความเครียดที่เป็นจากแรงดึง แรงกดอัดและแรงเฉือนมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ความเครียดดึง (Tensile strain), ความเครียดอัด (Compressive) และความเครียดเฉือน (Shear strain) สำหรับความเครียดเฉือนเป็นความเครียดที่เกิดจากแรงเฉือน

ก่อนที่วัสดุจะรับแรงกระทำจะมีความยาวของด้านที่ตั้งฉากกับแรงกระทำเท่ากับ h เมื่อรับแรงกระทำจะเกิดเบี่ยงเบนไปเป็นระยะทาง a โดยที่เบี่ยงเบนเป็นมุม θ สำหรับความเครียดเฉือนนั้นจะหาได้จาก

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{a}{h} \\ &= \tan \theta \\ &\approx \theta \end{aligned}$$

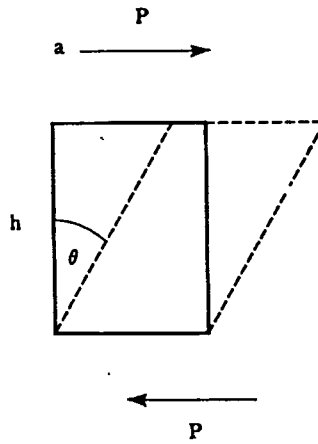
เมื่อ θ เป็นมุมที่เล็กมากๆ

โดยที่ ϵ_s = ความเครียดเฉือน

a = ระยะทางที่เบี่ยงเบนไป

h = ความยาวของด้านที่ตั้งฉากกับแรงกระทำ

θ = มุมที่เบี่ยงเบนไป



รูปที่ 2.1 แสดงชิ้นส่วนที่ถูกแรงเฉือน

2.1.3.2 ความเค้น (Stress)

เมื่อวัตถุถูกแรงภายนอกกระทำซึ่งทำให้เกิดความเครียดขึ้นก็หมายถึงว่าจะตอมต่างๆที่ประกอบขึ้นเป็นวัตถุนั้นต้องเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมหรือตำแหน่งที่สมดุลออกไป เนื่องจากอะตอมภายในถูกกระทำให้ห่างออกจากกันหรือถูกบีบให้หดตัวซึ่งทำให้เกิดแรงต้านภายใน (Internal force) โดยพยายามดึงหรือผลักอะตอมให้อยู่ในสถานะที่สมดุลตามเดิม แรงภายในที่พยายามต้านการเปลี่ยนรูป (Deformation) นี้เรียกว่าความเค้น

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

โดยที่ σ = ความเค้น

P = แรงที่กระทำ

A = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแรงที่มากกระทำในกรณีของแรงดึงหรือแรงกดและขนานกับแรงที่กระทำในกรณีของแรงเฉือน

หน่วยของความเค้น : ในระบบอังกฤษใช้ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi)

ในระบบเมตริก ใช้ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2)

หรือ กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร (kg/mm^2)

ในระบบ SI ใช้ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2), (Pascal)

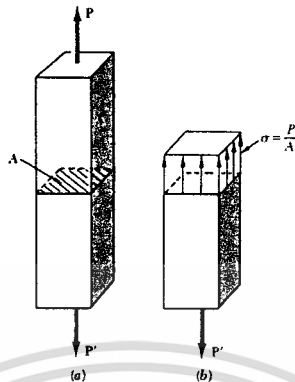
โดยที่ 1 ปาสคาล (Pa) = 1 นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)

$$= 145 \times 10^{-6} \text{ psi}$$

$$= 0.102 \times 10^{-6} \text{ kg}/\text{mm}^2$$

ความเค้น โดยทั่วไปจะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากกระทำคือ

2.1.3.2.1. ความเค้นแรงดึง (Tensile stress: σ_t) คือความเค้นที่เกิดจากแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามดึงเนื้อวัสดุหรืออะตอมให้แยกออกจากกัน โดยที่แรงต้านนี้จะตั้งฉากกับทิศทางของแรงที่มากระทำดังรูป

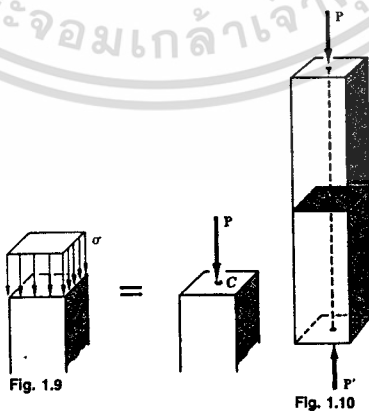


รูปที่ 2.2 แสดงความเค้นดึงบนพื้นที่หน้าตัดขวาง

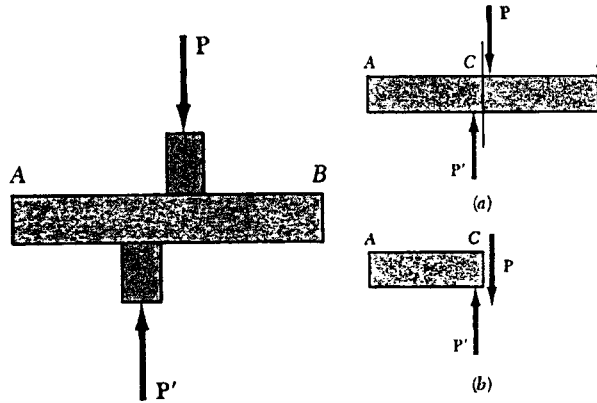
2.1.3.2.2. ความเค้นแรงอัด (Compressive stress: σ_c) คือความเค้นที่เกิดจากกดหรือการบีบวัสดุให้เล็กลงหรือสั้นลง ความต้านทานแรงกดหรือการบีบนี้จะตั้งฉากกับทิศทางของแรงที่มากระทำดังรูป

2.1.3.2.3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress: τ) คือความเค้นที่เกิดจากแรงดึงหรือกดให้อะตอมของวัสดุนั้นเลื่อนผ่านกันหรือเคลื่อนออกจากกันคิดเป็นแรงต่อพื้นที่ซึ่งขนานกับทิศทางของแรง แรงที่กระทำในลักษณะเช่นนี้แรงเฉือน (Shear force)

ในทางปฏิบัติเมื่อวัตถุถูกแรงกระทำมักจะมีเค้นเกิดขึ้นหลายชนิดพร้อมๆกันเช่น ในการคัดแท่งโลหะให้โค้งงอ (Bending) ในบริเวณที่โค้งบางส่วนจะเกิดแรงดึง (Tension) บางส่วนจะเกิดแรงอัด (Compression) บางส่วนจะเกิดแรงเฉือน (Shear) และการบิด (Torsion) เช่น การหมุนของเพลาก็จะมีแรงเฉือน แรงอัด และแรงดึงเกิดขึ้นพร้อมๆกัน



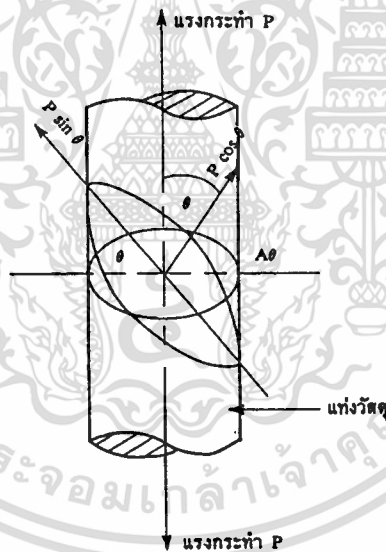
รูปที่ 2.3 แสดงความเค้นอัดบนพื้นที่หน้าตัดขวาง



รูปที่ 2.4 แสดงความเค้นเฉือนบนพื้นที่หน้าตัดขวาง

2.1.3.3 แรงเฉือน

แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากแรงค้ำหรือแรงกดในทิศทางของแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear) ในกรณีที่วัตถุชิ้นหนึ่งถูกแรงกดหรือแรงค้ำในแนวเดียวกันก็จะมีแรงเฉือนเกิดขึ้นในเนื้อวัตถุนั้น เราอาจจะแยกแรงที่กดหรือค้ำออกได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 แสดงแนวพื้นที่รับแรงเฉือน

$$P \text{ (Tension force)} = \text{แรงค้ำ}$$

$$A \text{ (Sectional area)} = \text{หน้าตัดของแท่งโลหะ}$$

$$\sigma_T \text{ (Tension stress)} = \frac{P}{A}$$

$$A\theta = \text{พื้นที่ๆทำมุม } \theta \text{ กับ } A = \frac{A}{\cos \theta}$$

ในทำนองเดียวกันเราอาจแยกแรง P ออกเป็นแรงย่อย 2 แรง แรงหนึ่งขนานกับพื้นที่ $A\theta$

อีกแรงหนึ่งตั้งฉากกับพื้นที่ $A\theta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงที่ขนานกับ $A\theta$ ก็คือ $P \sin \theta$

แรงที่ตั้งฉากกับ $A\theta$ ก็คือ $P \cos \theta$

แรงเฉือนในแนวนอน $A\theta$ ก็คือ $\frac{P \sin \theta}{(A / \cos \theta)}$

หรือ $\tau = P \sin \theta \times (\cos \theta / A)$

$$\tau = \sigma_T \sin \theta \times \cos \theta$$

ในกรณีนี้ τ จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\theta = 45^\circ$ หรือ

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2}$$

ถ้า P เป็นแรงกดก็สามารถใช้สมการข้างบนได้เช่นกัน

2.1.3.4 ความยืดหยุ่น (Elasticity)

คุณสมบัติในการคืนรูปเดิมของวัสดุนั้นเป็นผลมาจากแรงกระทำจากภายนอก ช่วงระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงของอะตอมเป็นไปตามขนาดและทิศทางของแรงที่มากระทำ ในขณะที่เดียวกันก็จะมีแรงต้านทานภายในซึ่งเกิดจากความพยายามจะกลับคืนสู่สภาพเดิมของอะตอม อะตอมจะมีความเครียดเกิดขึ้นถ้าเอาแรงภายนอกออกอะตอมก็จะเลื่อนกลับมาสู่ที่เดิมจะทำให้วัตถุกลับคืนสู่รูปร่างเดิม วัตถุแทบทุกชนิดจะมีการยืดหยุ่นไม่เท่ากันซึ่งไม่มากก็น้อย เช่น หินจะมีการยืดหยุ่นน้อย ยางจะมีการยืดหยุ่นมาก เป็นต้น

2.1.3.5 คุณสมบัติช่วงการเปลี่ยนรูป (Plasticity)

คุณสมบัติช่วงการเปลี่ยนรูปเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ถูกแรงกระทำจนกระทั่งผ่านจุดของการยืดหยุ่นไปทำให้วัสดุนั้นเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวร โดยมีอะตอมเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนกลับที่เดิมแต่อะตอมส่วนใหญ่ยังคงเคลื่อนไกลไปทั้งๆที่ได้เพิ่มแรงกระทำ แม้ปล่อยแรงกระทำแล้วก็ยังมีผลทำให้รูปร่างของวัสดุผิดไปจากเดิมเรียกการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า การแปรรูปถาวร (Permanent deformation) ซึ่งกรณีนี้วัสดุยังไม่ขาดออกจากกัน ดังนั้นวัตถุที่เปลี่ยนรูปอย่างถาวรอย่างสมบูรณ์จะไม่มีคุณสมบัติแบบยืดหยุ่นเลย โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ในงานวิศวกรรมจะมีช่วงยืดหยุ่นอยู่บ้างเสมอ

2.1.3.6 ความเหนียว (Ductility)

ความเหนียวหมายถึงคุณสมบัติของวัสดุต่อความสามารถที่จะยืดออกได้หรือถูกดึงออกได้ ในช่วงของช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรและส่วนมากค่าของความเหนียวมักจะคิดกันเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัว (Percent of Elongation หรือ %Elongation) ของชิ้นทดสอบถูกดึงขาด

$$\%Elongation = \frac{L}{L_0} \times 100\%$$

L = ความยาวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_0 = ความยาวเดิม (Gage length)

วิธีวัดเปอร์เซ็นต์ของการยืดออกกระทำโดยการดึงชิ้นทดสอบจนขาดออกจากกันแล้วเอาส่วนที่ขาดนั้นมาวางต่อกันแล้ววัดหาค่าความยาวที่เพิ่มขึ้นคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดออกปกติค่าของความยาวเดิมมักจะกำหนดเป็น 2 นิ้วแต่บางคราวอาจจะเป็น 8 นิ้ว โดยทั่วไปค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดออกจากความยาวเดิมที่สั้นกว่าจะมีค่าสูงกว่าที่ยืดออกจากความยาวเดิมที่ยาวทำให้เปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวออกสูงขึ้นถ้าชิ้นทดสอบสั้นมากๆ ฉะนั้นในการบอกค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดออกควรบอกค่าความยาวเดิมของชิ้นทดสอบด้วยส่วนที่คอดเข้า (Necking) จะมีขนาดเท่าๆกันไม่ว่าชิ้นทดสอบนั้นจะยาวหรือสั้น แต่เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วก็จะให้ค่าของการยืดออกสูงขึ้นสำหรับชิ้นทดสอบที่สั้นๆ

ค่าความเหนียวอาจกล่าวได้อีกแบบหนึ่งคือเป็น % Reduction of area

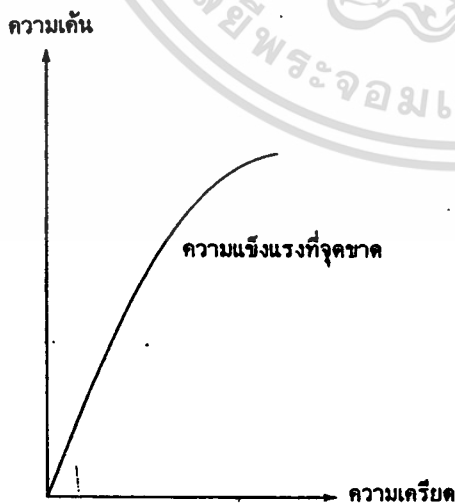
$$\% \text{ Reduction of area} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\%$$

เมื่อ A_0 = หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนดึง

A = หน้าตัดตรงรอยที่ขาดออกจากกัน

วิธีการตรวจความเหนียวอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การทดสอบการดัดโค้ง (Bend Test) คือนำวัสดุมาดัดให้โค้งได้รัศมีที่กำหนดโดยไม่มีรอยแตกร้าว รัศมีหรือมุมที่จะต้องดัดแล้วแต่จะกำหนดโดยทั่วไปมักจะดัดเป็นรูปเกือกม้า

วัสดุที่เปราะ (Brittle) จะมีความเหนียวต่ำตัวอย่างเช่น เหล็กหล่อจะมีความเหนียวต่ำเกือบจะเป็นศูนย์ เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของมันจะมีแต่ช่วงการยืดหยุ่นเท่านั้น พ้นจากพิสัยการยืดหยุ่นนี้ไปเล็กน้อยก็จะเกิดการแตกหัก ดังแสดงในรูป



ตามปกติเราถือว่าวัสดุที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดออก = 5 หรือมากกว่า โดยความยาวเดิมเท่ากับ 2 นิ้ว เป็นวัสดุเหนียว และต่ำกว่า 5% เป็นวัสดุเปราะ

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุเปราะ

ตามปกติเราถือว่าวัสดุที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดออก = 5 หรือมากกว่า โดยความยาวเดิมเท่ากับ 2 นิ้วเป็นวัสดุเหนียวและต่ำกว่า 5 % เป็นวัสดุเปราะ

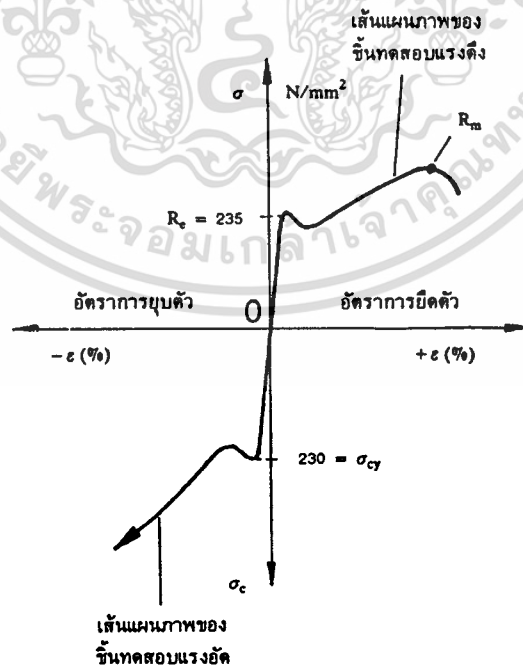
2.1.3.7 ความแกร่ง (Toughness)

ความแกร่งคือคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถจะรับแรงกระทำภายนอกได้โดยไม่หักขาดออกจากกัน ซึ่งวัดกันเป็นปริมาณพลังงาน (Energy) ที่วัสดุทนได้ก่อนหัก ค่าของความแกร่งวัดได้เป็น (Modulus of Toughness) โดยผลของความแกร่งได้มาจากการทดลองดึงโลหะและใช้เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด ที่ได้จากการทดลองนี้หาค่าของความแกร่งซึ่งได้มาจากผลคูณของความเค้นกับความเครียด ถ้าดูเส้นโค้งของวัสดุเหนียวจะเห็นว่าพื้นที่ใต้โค้งมากแสดงว่ารับพลังงานจากภายนอกได้มาก ส่วนวัสดุที่มีความเหนียวต่ำจะรับพลังงานได้น้อย

แต่เมื่อพูดถึงความแข็งแรง วัสดุที่มีความเหนียวสูงจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุดต่ำกว่าวัสดุที่มีความเหนียวต่ำกว่า ซึ่งแสดงว่าวัสดุที่มีความเหนียวสูงจะทนต่อแรงกระทำภายนอกได้น้อยกว่า

2.1.3.8 แรงกดหรือแรงอัด (Compressive)

วัสดุที่ถูกแรงกดกระทำจะมีค่า E (โมดูลัสความยืดหยุ่น) เท่ากันกับเมื่อถูกแรงดึงซึ่งแสดงว่าเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดตรงช่วงการยืดหยุ่นจะเหมือนกันทั้งในกรณีแรงกดและแรงดึงแต่วัสดุส่วนมากจะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดเมื่อรับแรงกดสูงกว่าความแข็งแรงสูงสุดเมื่อรับแรงดึงมาก นอกจากนี้เมื่อวัสดุถูกกดเนื้อที่หน้าตัดของมันจะเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดไม่โค้งลงดังรูป



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแสดงการทดสอบแรงดึง - แรงอัดของเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 เป็นวัสดุที่มีความเหนียว (ductile) เมื่อถูกกดจะมีช่วงการยืดหยุ่นเช่นเดียวกับเมื่อถูกดึงในช่วงของการเปลี่ยนรูป วัสดุจะถูกกดแบนเข้าทุกๆที่โดยไม่หักหรือแตกออกจากกัน ปลายของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดยาวต่อไปไม่มีกำหนด ส่วนที่เป็นวัสดุเปราะ (brittle) เมื่อถูกกดจะมีช่วงของการเปลี่ยนรูปช่วงสั้นๆหรือแทบจะไม่มีเลย วัสดุจะแตกออกจากกันเมื่อความเค้นเท่ากับความแข็งแรง ณ จุดประลัยของวัสดุและก็จะมีความเท่ากับความแข็งแรงสูงสุดเมื่อรับแรงกด

2.1.3.9 ความอ่อนของวัสดุ (Malleability)

ความอ่อนของวัสดุเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุที่สามารถจะรับแรงกดจนกระทั่งยืดออกหรือแปรรูปในช่วงของการเปลี่ยนรูปได้ วัสดุที่มีความอ่อนของวัสดุสูงจะถูกตีหรือรีดออกได้มากมายโดยไม่หัก เมื่อเปรียบเทียบกับความเหนียวจะหมายถึงคุณสมบัติในการดึง ส่วนความอ่อนของวัสดุจะหมายถึงคุณสมบัติในการกดหรืออัด คุณสมบัติทั้ง 2 อย่างนี้เป็นดัชนีวัดว่า วัสดุมีคุณสมบัติของการเปลี่ยนรูปมากน้อยเพียงใด

2.1.3.10 ความแข็งแรงสถิตของวัสดุเหนียว

จะเห็นได้ว่าค่า E ของวัสดุแต่ละอย่างจะเหมือนกันทั้งในกรณีแรงดึงและแรงกด แต่ค่าพิกัดการยืดหยุ่นและค่าจุดครากหรือความแข็งแรงที่จุดครากในกรณีรับแรงกดจะสูงกว่าในกรณีรับแรงดึงประมาณ 10-15 % ส่วนค่าความแข็งแรงประลัย ในการกดจะไม่มีกำหนดเพราะวัสดุจะไม่ขาดจากกันแต่จะแบนราบไปเฉยๆ ส่วนค่า Shear Modulus (G) ของวัสดุเหนียว (Ductile Material) ส่วนมากจะเท่ากับประมาณ 40 % ของค่า E ส่วนค่าแรงเฉือนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของแรงดึงสูงสุดจะเป็นดังนี้

อิทธิพลของโลหะผสมและการขึ้นรูปเย็น โลหะผสมส่วนมากจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นกว่าในโลหะบริสุทธิ์แต่คุณสมบัติช่วงการเปลี่ยนรูปจะต่ำลง

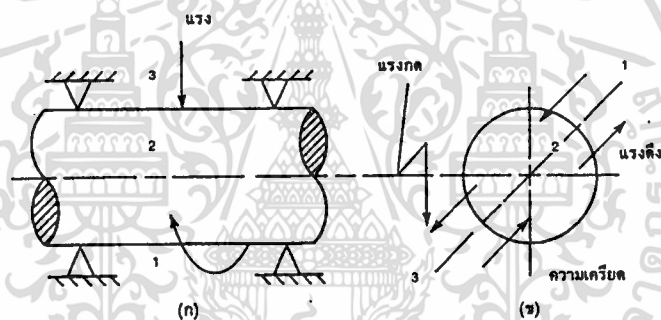
2.1.3.11 แรงสลับ (Cyclic Load)

โลหะที่นำมาประกอบเป็นเครื่องจักรหรือสิ่งก่อสร้างส่วนมากไม่ได้รับแรงคงที่ตลอดเวลา ตัวอย่างเช่น เสาหรือค่อมอสะพานจะได้รับความที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอตามปริมาณการจราจรที่ทับถม หรือแรงลม เป็นต้น โลหะที่ใช้ทำสิ่งก่อสร้างหรือเครื่องจักรเมื่อรับแรงกระทำมากบ้างน้อยบ้างจะเกิดลักษณะเหมือนกันกับการที่โลหะถูกดึงบ้างกดบ้างซ้ำๆกันถ้าสลับกันไปนานๆ โลหะนั้นอาจจะหักออกจากกันได้ทั้งๆที่แรงกระทำมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้นเช่น การหักลวดโดยการงอพับกลับไปกลับมาเป็นต้น คุณสมบัติที่น่าสนใจของโลหะในเรื่องนี้คือการดูดซับพลังงานกล (Mechanical hysteresis) และความล้า (Fatigue)

2.1.3.11.1. การดูดซับพลังงานกล ในทางทฤษฎีถ้าเราคำนึงถึงสารที่มีการยืดหยุ่นสมบูรณ์ เมื่อถูกแรงกระทำในลักษณะแรงกดหรือแรงดึงแล้วปล่อยมันจะกลับสู่สภาพเดิมทันทีไม่ว่าการปล่อยแรงจะเร็วหรือช้าเพียงไร

จากรูปที่ 3.26 (ก) เพลาหมุนที่เป็นวัสดุที่มีการยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ในตำแหน่งที่ 1 วัสดุจะรับแรงดึงและเกิดความเครียดขึ้นแต่เมื่อหมุนไปถึงตำแหน่งที่ 2 แรงดึงจะหายไป (เพราะเพลาหมุนไปจนตำแหน่งที่ 1 มาอยู่ด้านข้าง) ในขณะที่เดียวกันความเครียดก็จะมีค่าเป็นศูนย์ด้วยในตำแหน่งที่ 3 เมื่อวัสดุถูกแรงกด (หมุนไปจากตำแหน่งที่ 2) จะเกิดความเครียดขึ้นอีก ซึ่งความเครียดส่วนนี้จะหายไปทันทีที่เมื่อวัสดุนั้นไม่ถูกแรงกระทำ จากกราฟเปรียบเทียบจะได้ดังรูปที่ 3.26 (ข)

แต่เนื่องจากว่าวัสดุทุกอย่างไม่มีการยืดหยุ่นโดยสมบูรณ์ พลังงานที่เราให้กับวัสดุในการกดหรือดึงไม่สามารถคายออกทันทีเมื่อปล่อยแรง วัสดุจะต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อปล่อยพลังงานที่เราให้กับวัสดุในการกดหรือดึงเมื่อปลดแรงกระทำแล้ว โดยมากวัสดุมักจะคืนพลังงานออกมาไม่หมด พลังงานส่วนนี้จะกลายเป็นความร้อนหรือสูญหายไปในลักษณะอื่นๆเช่น อาจจะทำให้ผลึกโครงสร้างบิดเบี้ยวหรืออาจจะถึงขั้นเลื่อนไถลจากกันจนอาจจะทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปไป



รูปที่ 2.8 แสดงการรับแรงในลักษณะต่างๆ

ในวัสดุที่หมุนเมื่อเราใส่แรงกดเข้าไปจะทำให้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดมี Hysteresis Loop หมายถึงพลังงานที่วัสดุคืนออกมาไม่หมด Loop นี้เทียบเป็น Damping Quality หรือคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานของวัสดุ Loop ที่กว้างก็คือมี Damping Quality สูงซึ่งแสดงว่าเมื่อถูกแรงกระทำจะดูดกลืนพลังงานไว้ได้มาก ฉะนั้นวัสดุประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับทำแท่นรับเครื่องจักรซึ่งจะช่วยลดการสั่นสะเทือนของเครื่องได้มาก ในทางตรงกันข้ามวัสดุที่มี Loop แคบ เมื่อถูกแรงกระทำมันจะคืนออกมาหมดเป็นส่วนใหญ่วัสดุจะสั่นได้มากเช่นทองเหลืองใช้ทำเป็นระฆังเมื่อตีจะมีเสียงดังกังวานดี

2.1.3.11.2 ความล้า (Fatigue)

เป็นการที่โลหะจะต้องหักหรือขาดเนื่องจากถูกแรงประเภทแรงสลับ (แรงแบบต่างๆ กระทำกลับไปกลับมา) กระทำอยู่เรื่อยๆจนกระทั่งโลหะเกิดความล้าต่างๆที่แรงกระทำมีค่าน้อยกว่าความแข็งแรงสูงสุด ที่เป็นเช่นนี้เกิดจาก

2.1.3.11.2.1 วัสดุเกิด Work Hardening เป็นการแข็งตัวจากแรงกระทำ ทำให้มีความแข็งสูงขึ้นแต่ความเหนียวต่ำลงคือกลายสภาพจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะผลึกต่างๆ เลื่อนขัดกันเองจนกระทั่ง ไม่มีโอกาสที่จะปรับหรือเคลื่อนที่เพื่อลดความเค้นเหลือค้างได้อีก

2.1.3.11.2.2 ในเนื้อโลหะทุกชนิดจะมีจุดที่ผิดปกติหรือไม่สมบูรณ์ (Imperfection) จุดเหล่านี้อาจจะเป็นรอยขีดข่วน รอยตะไบ รอยมีดกลึงเป็นต้น ภายในเนื้อวัสดุ จะมีจุดหรือรอยแตกร้าวเล็กๆ (Microscopic crack) ซึ่งจะทำให้เกิดการเรียงตัวเป็นผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ จุดเหล่านี้เรียกว่าความเค้นตกค้าง (Stress Raisers) กล่าวคือ ความเค้นที่บริเวณนี้ จะมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นเฉลี่ย (ซึ่งคิดตามเนื้อที่ทั้งหมด) ดังนั้นจุดเหล่านี้มีโอกาที่จะเกิดการแข็งตัวเนื่องจากการใช้งาน ได้มากและเป็นไปอย่างรวดเร็วทำให้วัสดุเปราะมาก ค่าความเค้นที่สูงผิดปกติตามจุดเหล่านี้จะทำให้วัสดุเริ่มมีรอยแตกร้าวกว้างขึ้น รอยขาดจะเป็นแบบเปราะในที่สุด โลหะก็จะหักขาดออกจากกันความเค้นตกค้างอาจจะเกิดจากรอยบากหรือแง่มุมภายในชิ้นส่วนของโลหะเองก็ได้

โดยที่วัสดุกลายสภาพเป็นวัสดุเปราะเฉพาะแห่ง ดังนั้นแรงที่กระทำทำให้หักขาดได้ง่ายที่สุดได้แก่แรงดึงหรือแรงเฉือน ฉะนั้นวัสดุที่ถูกแรงสลับเป็นประเภทแรงกดอย่างเดียว (คือกดแล้วปล่อยสลับกันแต่ไม่มีแรงดึง) ก็จะรับแรงอยู่ได้นาน ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงสลับเป็นแรงประเภทกดและดึงสลับกัน โดยมีแรงกดและแรงดึงเท่าๆกัน วัสดุจะเกิดความล้าได้มากที่สุดเพราะในกรณีนี้ผลึกจะต้องเคลื่อนไหวยามากกว่าการใช้แรงสลับประเภทอื่นๆ

2.1.3.11.2.3 การลดผลของแรงสลับที่ทำให้เกิดความล้า ความเค้นตกค้างจะมีความเค้นสูงกว่าความเค้น โดยเฉลี่ยทั่วไปในเนื้อโลหะและจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดความล้า ดังกล่าวแล้วจุดเหล่านี้อาจจะอยู่ภายในวัสดุก็ได้ เราไม่มีทางที่จะขจัดความเค้นตกค้างให้หมดไปได้ แต่อย่างน้อยที่สุดผู้ออกแบบควรจะมีครีโวมอดูลและกระทำดังต่อไปนี้

2.1.3.11.2.3.1 การออกแบบ (Design) ควรจะออกแบบชิ้นส่วนเพื่อลดบริเวณที่เป็นแ่งหรือมุมคมออกให้เหลือน้อยที่สุด

2.1.3.11.2.3.2 ในการผลิตชิ้นส่วน จะต้องพยายามรักษาผิวของงานหรือโลหะนั้นๆ ให้เรียบร้อยที่สุดเพราะรอยขีดข่วน รอยตะไบล้วนๆจะทำให้เกิดความเค้นอยู่ภายในทำให้เกิดความเปราะในบริเวณนั้นๆ

2.1.3.11.2.3.3 ต้องพยายามออกแบบเพื่อลดแรงกระทำที่โลหะได้รับ จะทำให้ความเค้นหรือพลังงานตามบริเวณแ่งมุมต่างๆของชิ้นงานที่จะเกิดขึ้นลดลงด้วยจะทำให้การใช้งานได้นานขึ้น

ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดความล้าลงเรียกว่า Shot peening วิธีการก็คือทำการพ่นด้วยทรายหรือเม็ดโลหะแข็งๆ ไปยังผิวของชิ้นงานนั้นๆด้วยความเร็วสูง ผิวของชิ้นส่วนจะเกิดเป็นรอย

นุบอยู่ทั่วไปซึ่งเท่ากับว่าผิวของโลหะนั้นเกิดมีความเค้นจากแรงกดขึ้น ถ้านำชิ้นงานนี้ไปใช้งานที่มีแรงสลับ เมื่อเกิดแรงกระทำเป็นแรงดึง ความเค้นเกิดขึ้นนี้จะต้องเอาชนะความเค้นจากแรงกดที่มีอยู่ตามผิวของวัตถุก่อนคั้งนั้นจึงเท่ากับว่าแรงดึงที่ผิววัตถุได้รับจริงๆก็จะลดลงและก็จะทำให้เกิดความล้าช้าลง ในทางตรงกันข้ามถ้าเกิดแรงกดบนวัตถุนั้นๆ โลหะก็จะถูกแรงกดมากกว่าธรรมดา แต่แรงกดจะไม่ทำให้เกิดความล้าได้ง่ายๆเหมือนกับแรงดึง ฉะนั้นชิ้นส่วนนั้นก็จะทนอยู่ได้นานในทำนองเดียวกันการชุบผิวให้แข็งก็จะช่วยป้องกันความล้าได้บ้าง

2.1.3.12 คุณสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิสูง-ความคืบ

เมื่อโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้นคุณสมบัติต่างๆของโลหะจะเปลี่ยนไป ที่เห็นได้ชัดก็คือโลหะจะมีคุณสมบัติของการเปลี่ยนรูปสูงขึ้นแต่จะมีความแข็งและความแข็งแรงต่ำลงซึ่งเรื่องนี้เป็นปัญหาสำคัญในการออกแบบสร้างเครื่องจักรต่างๆที่ต้องทนต่ออุณหภูมิสูงเช่น หม้อไอน้ำ โลหะที่ใช้ทำนอกจากจะมีความแข็งแรงลดลงและยังมีปรากฏการณ์อีกอย่างหนึ่งเรียกว่า ความคืบ (Creep) เกิดขึ้นกล่าวคือ เมื่อโลหะถูกแรงกระทำที่อุณหภูมิสูงมันจะบิดตัวออกอย่างช้าๆทั้งๆที่แรงที่กระทำมีค่าต่ำกว่ามาก โลหะจะบิดตัวออกตลอดเวลาที่มีแรงกระทำ จนในที่สุดมันจะหักขาดจากกัน ในความจริงแล้วปรากฏการณ์ความคืบนี้มีอยู่ที่อุณหภูมิธรรมดาเหมือนกัน แต่สำหรับโลหะส่วนมากมันจะบิดออกน้อยจนวัดไม่ได้ มีข้อยกเว้นสำหรับโลหะบางอย่างเช่น ตะกั่วจะแสดงอาการคืบให้เห็นได้ที่อุณหภูมิธรรมดา

ความคืบต่างจากการเลื่อนไหล (Slip) ตรงที่ว่าความคืบจะเกิดขึ้นตลอดเวลาที่มีแรงกระทำ ส่วนวัตถุที่เกิดการเลื่อนไหลจะบิดออกจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วก็หยุด ทั้งๆที่ยังมีแรงกระทำอยู่ ฉะนั้นความคืบจึงเป็นอันตรายต่อชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมากกว่า

การเกิดความคืบของโลหะที่อุณหภูมิตั้งที่อื่นหนึ่ง ในขั้นแรกจะเป็นเขตความคืบปฐมภูมิ โลหะจะบิดออกค่อนข้างเร็วแต่อัตราการบิด (ซึ่งเท่ากับความลาดของเส้นโค้ง) จะไม่คงที่ระยะนี้จะเป็นช่วงที่ผลึกของโลหะเกิดการเลื่อนและปรับตัวกันภายใน ในขั้นที่ 2 หรือความคืบทุติยภูมิวัตถุจะบิดตัวออกด้วยอัตราคงที่ (คือความลาดคงที่) ในช่วงนี้วัตถุจะเกิดความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากการใช้งานซึ่งจะทำให้ความคืบน้อยลง แต่ในขณะที่เดียวกันเนื่องจากอุณหภูมียังสูงอยู่มันก็อาจจะเกิดการอบอ่อนทำให้การเกิดความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องจากการใช้งานหมดไปมีผลทำให้วัตถุบิดตัวออกไปได้อีก ในขั้นที่ 3 หรือความคืบตติยภูมิ วัตถุจะบิดตัวออกโดยเร็วจนกระทั่งออกจากกัน ลักษณะการบิดตัวหรือคืบที่ได้มาจากการทดลองดังตัวอย่างโลหะที่อุณหภูมิและแรงดึงคงที่ ถ้าแรงดึงหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการบิดออก (Creep Rate) จะสูงขึ้นด้วยซึ่งหมายความว่าวัตถุจะขาดจากกันเร็วเข้า ปกติในการทดลองแบบนี้เราใช้แรงดึงที่มีค่าต่ำจึงทำให้ต้องทำการทดลองเป็นเวลานานๆ เช่น 1,000-10,000 ชั่วโมง ฉะนั้นส่วนมากการทดลองจะกระทำถึงขั้นการคืบทุติยภูมิ (ซึ่งมีอัตรา

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความเค้นหรือความลาดคองที่) จากนั้นก็จะต่อเส้นโค้งออกไปเองโดยประมาณเพื่อหาค่ามาตรฐานอันหนึ่งซึ่งเรียกว่าพิคคความเค้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

พิคคความเค้นที่อุณหภูมิใดหมายถึง ความเค้นค่าหนึ่งที่สามารถดึงโลหะให้ยืดออกได้ 1 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 100,000 ชั่วโมงที่อุณหภูมินั้น (อุณหภูมิคงที่)

การหาค่าพิคคความเค้นไม่จำเป็นต้องทำการทดลองถึง 100,000 ชั่วโมง (ซึ่งเท่ากับ 11.4 ปี) แต่เราจะทำการทดลองเพียงขั้นความเค้นทุติยภูมิ ในช่วงนี้เส้นโค้งที่ได้จะเป็นเส้นตรงซึ่งแสดงว่า อัตราการยืดออกหรือความลาดคองของเส้นตรงนี้จะมีค่าคงที่ ฉะนั้นเราอาจจะต่อเส้นตรงนี้ออกไปได้จนถึงจุด 100,000 ชั่วโมง ซึ่งถ้าที่จุดนี้ส่วนที่ยืดออกหรือความเค้นมีค่าเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ แรงดึงที่ใช้จะเป็นพิคคความเค้น

2.1.3.13 Stress-Rupture Test

การทดลองหาพิคคความเค้นที่อธิบายมาในหัวข้อที่ 3.2.3.12 ปกติต้องใช้เวลาในการทดลองมากนอกจากนี้ค่าพิคคความเค้นที่ได้ก็ไม่แน่ว่าจะต้องถูกกับความเป็นจริงเสมอไป เพราะต้องอาศัยการต่อเส้นตรงออกไปเฉยๆมีการทดลองอีกอย่างหนึ่งเกี่ยวกับเรื่องนี้เรียกว่า Stress-Rupture Test ซึ่งการทดลองกระทำได้สะดวกมากกว่า ซึ่งวิธีการนี้กระทำโดยการทดลองดึงตัวอย่างโลหะหลายๆชิ้นด้วยแรงดึงที่มีค่าต่างๆกัน (แต่อุณหภูมิเท่ากัน) โดยใช้แรงดึงค่อนข้างสูง ประมาณว่าสามารถทำให้โลหะขาดภายในเวลาไม่เกิน 1,000 ชั่วโมง

ข้อแตกต่างระหว่างการทดสอบความเค้นกับ Stress-Rupture Test ก็คือ Stress-Rupture Test จะใช้ตัวอย่างหลายๆชิ้นและวัดขนาดของแรงดึงที่ทำให้วัสดุขาดเทียบกับเวลาที่ขาดที่อุณหภูมินั้นๆ แต่การทดสอบความเค้นใช้ตัวอย่างชิ้นเดียว อย่างไรก็ตาม Stress-Rupture อย่างเดียวก็ไม่อาจให้ความรู้ที่แน่นอนที่จะนำไปใช้ในการออกแบบได้ เพราะเรารู้จักแต่เพียงว่าแรงดึงเท่าไรที่จะทำให้วัสดุขาดภายในเวลาเท่าไรเท่านั้น ซึ่งเวลานำไปใช้ในการออกแบบแรงที่วัสดุจะรับได้ก็ต้องน้อยลงไปกว่านี้มาก

2.2 ทองแดง (Copper)

ทองแดงเป็นธาตุที่พบปริมาณน้อยมากบนผิวโลก (Earth's crust) แต่เป็นธาตุหนึ่งในจำนวนสองหรือสามธาตุที่ปรากฏพบในสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติซึ่งเรียกว่า พบในสภาพโลหะ (Metallic state) หรือในสภาพเป็นทองแดงคั้งแต่กำเนิด (Native copper) ซึ่งปรากฏพบกระจัดกระจายตามแหล่งต่างๆจากหลักฐานที่พบอนุสาวรีย์ของชาวอียิปต์โบราณ ที่ทำด้วยทองแดงบริสุทธิ์ประมาณกันว่าสร้างมาหลายพันปีก่อนคริสต์ศตวรรษ (2,000-4,000 B.C.) ซึ่งในสมัยนั้นเชื่อแน่ว่ายังไม่รู้จักวิธีถลุงแร่ทองแดงจากแร่แต่มนุษย์ในสมัยนั้นสามารถหาทองแดงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพบริสุทธิ์ในสภาพที่เป็น Native form มารวมกันและหลอมละลายให้ละลายได้ แต่ในระยะหลังที่เป็นยุคบรอนซ์ มนุษย์สามารถนำแร่ทองแดงและแร่คิงมาถลุงในเตาที่ใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงทำให้ได้โลหะผสมทองแดงกับคิงซึ่งเรียกว่าบรอนซ์ ประเทศไทยเคยพบเครื่องประดับที่ทำด้วยโลหะบรอนซ์บริเวณบ้านเชียงมีอายุประมาณ 6,000 ถึง 7,000 ปี ซึ่งเป็นยุคที่มนุษย์เริ่มมีการพัฒนาการถลุงแร่ด้วยถ่านไม้แม้จะเป็นการถลุงในลักษณะของการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ก็ตามแต่ก็เป็นจุดเริ่มต้นให้มีการวิวัฒนาการไปสู่การถลุงเหล็กในโอกาสต่อมา

แร่ทองแดงที่ปรากฏพบมีมากมายหลายชนิดมีทั้งที่อยู่ในรูปของซัลไฟด์ออกไซด์คาร์บอเนตซัลเฟต ซิลิเกตและที่อยู่ในลักษณะผสมกันและยังปนอยู่กับแร่อื่นๆเช่น แร่ निकелเงิน พลวงและบิสมีทปริมาณของทองแดงในแร่จะอยู่ในช่วงไม่เกิน 10% แร่ทองแดงที่จัดว่ามีความสำคัญในเชิงอุตสาหกรรมผลิตทองแดงส่วนมากจะเป็นประเภทซัลไฟด์ซึ่งมีอยู่สองชนิดที่สำคัญคือ แร่ทองแดง คาลโคไซต์ (Chalcocite: Cu_2S) เป็นแร่ที่มีสีเทา-ดำมีความถ่วงจำเพาะ 5.5 ถึง 5.8 มีปริมาณทองแดง 79.9% อีกชนิดหนึ่งคือ แร่คาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite: $Cu.Fe.S_2$) เป็นแร่ที่มีสีเหลืองความถ่วงจำเพาะประมาณ 4 มีปริมาณทองแดงประมาณ 35%

นอกจากนี้ยังมีแร่ทองแดงออกไซด์ (Cuprites: Cu_2O) มีทองแดงปริมาณสูงกว่าแร่ที่กล่าวมาแล้วมีปริมาณทองแดง 88.8% เป็นแร่ที่มีสีแดงปริมาณที่พบน้อยมาก แร่ทองแดงอีกชนิดหนึ่งที่มีสีเขียวสวยงามมากสามารถจะทำการเจียรไนให้เป็นเครื่องประดับเป็นแร่ทองแดงคาร์โบเนตเรียกว่า Malachite ($CuCO_3.Cu(OH)_2$) มีปริมาณทองแดง 58%

แหล่งแร่ของโลกที่สำคัญที่ควรทราบมีหลายแหล่งเช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซิลิเปรู ในอาฟริกามีหลายประเทศเช่น แซมเบียและซูดาน ในทวีปยุโรปมีแหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญในประเทศฟินแลนด์ สเปน ยูโกสลาเวียและเยอรมัน ในทวีปเอเชียพบแร่ทองแดงในประเทศตุรกี อินเดีย อิหร่านและในประเทศจีน นอกจากนี้ยังมีแหล่งแร่ที่สำคัญในประเทศสหภาพรัสเซียและในประเทศออสเตรเลีย

สำหรับประเทศไทยพบแหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญคือ ที่อำเภอเชียงคานบริเวณภูทองแดง จังหวัดเลยและจังหวัดขอนแก่น แต่ปริมาณแร่ที่พบมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

บทที่ 3

การดึงขึ้นรูปโลหะ

3.1 การพัฒนาของการดึงขึ้นรูปโลหะ

(Developments in the Drawing of Metal)

ชาวอียิปต์โบราณอาจเป็นชนชาติแรกที่ทำกรดึงเส้น โลหะเพื่อทำเป็นเส้นใยทองคำซึ่งได้นำไปทอกับเส้นใยอื่นๆเพื่อทำเป็น "ผ้าทองคำ" โดยมีหลักฐานจากภาพเขียนในพีระมิด Tuthmosis III, ปี ค.ศ. 1460 และพีระมิด Tutankhamum, ปี ค.ศ. 1350 และจากสถานที่อื่นๆ ซึ่งก่อนทองคำจะถูกดึงขึ้นรูปกลายเป็นแผ่น โดยมีลักษณะเป็นแผ่นบางยาวหรือเศษของทองคำจะถูกตัดและต่อ จากนั้นจะถูกดึงโดยการดึงผ่านช่องหินที่เป็นแม่แบบซึ่งเชื่อกันว่าแม่แบบต่างๆถูกทำขึ้น โดยการขุดก้อนหินให้เป็นช่องที่แข็งแรง ดังนั้นรูปโครงสร้างของแนวการเปลี่ยนรูปจึงคล้ายกันกับท่อเวนจูรี (Venturi) ในการดึงท่อทองคำผ่านแม่แบบหิน โดยมีการหล่อลื่นด้วยเทียนไขและขีดด้วยตัวจับ ต่อจากนั้นก็ทำการดึงจะได้เส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สม่ำเสมอตลอดความยาวของการดึง

ในศตวรรษที่ 5 ชาวเปอร์เซียสามารถดึงลวดทองแดงจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.022 นิ้ว (0.55 มิลลิเมตร) โดยดึงผ่านแผ่นเหล็ก คุณสมบัติของเหล็กที่ใช้เป็นแม่แบบและลำดับขั้นตอนของการดึงเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณา แต่ไม่มั่นใจว่าพวกเขาสนใจรูปร่างของแนวการเปลี่ยนรูปที่มีผลต่อแรงดึงที่กระทำหรือ ไม่ใช่ในเวลาต่อมาได้ค้นพบสายเคเบิลทองแดงขนาดความยาว 9 ฟุต (3 เมตร) ซึ่งประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ 9 มิลลิเมตร โดยประกอบด้วยเส้นลวดพันกันจำนวน 3 เส้นซึ่งแต่ละขดจะมีทั้งหมด 15 เกลียว

จนกระทั่งเมื่อการดึงขึ้นรูปแบบแผ่นได้ถูกนำมาใช้ในยุโรปโดยวิธีการเดิมของการดึงแผ่นโลหะผ่านลูกกลิ้งที่หมุนอย่างอิสระซึ่งเป็นที่เชื่อกันว่าเครื่องรีดด้วยมือเครื่องแรกที่ทำกรรีดโลหะในจำนวนน้อยๆให้อยู่ในรูปของแผ่นโลหะ จากนั้นได้ถูกนำมาใช้ในโบสถ์ที่ประเทศอังกฤในปี 1050 ต่อมาในปี 1535 (Biringuccio) และปี 1556 (George Bauer Agricola) ได้แสดงถึงกรรมวิธีที่ลวดขนาดเล็กหรือใหญ่สามารถดึงได้อย่างไรโดยการดึงด้วยมือและกำลังน้ำ การกว้านหรือการหมุนและการเหวี่ยง ซึ่งยังคงไม่มีหลักฐานชัดเจนว่าพวกเขาเหล่านั้นได้สนใจถึงรูปร่างของแนวการเปลี่ยนรูปว่าเป็นส่วนที่สำคัญเพื่อการดึงขึ้นรูปไม่เกิดการผิดพลาด

กรรมวิธีของการลดขนาดท่อ โดยการดึงท่อผ่านแม่แบบที่ไม่มีตัวยึดอยู่ภายในเครื่อง ได้เกิดขึ้นในศตวรรษที่ 19 ซึ่งการผลิตส่วนใหญ่จะเป็นท่อขนาดสั้นทั้งท่อเชื่อมและท่อไม่มีตะเข็บ โดยได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อควบคุมทั้งขนาดรูและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ สำหรับวิธีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดศูนย์กลางของแนวการเปลี่ยนรูปจะรวมอยู่กับปลอกสวมและแนวขนานท่อ ซึ่งทำให้ได้การดึงลดขนาดปานกลางหรือได้แนวผ่านขึ้นรูปแบบปิดที่ใช้ในทางทฤษฎีแล้วขนาดจะ ไม่ถูกลดในเส้นผ่านศูนย์กลาง การดึงขึ้นรูประยะลึก (Deep drawing) ของปลอกกระสุนทองเหลืองได้ถูกนำมาใช้โดย G. Kynoch ในปี 1876 (ปลอกกระสุนซึ่งเป็นส่วนลักษณะคล้ายคลึงกับท่อความยาวสั้นปลายปิดทำขึ้น โดยการผลักช่องบนแนวแกนท่อหรือป้อนผ่านแม่แบบสำเร็จรูปเขาได้คำนึงถึงความสำคัญของโครงสร้างแม่แบบและขั้นตอนการผ่าน) เนื่องจากกรรมวิธีการทำท่อไร้ตะเข็บของการเจาะหมุนและกรรมวิธี Pilger ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยตระกูล Mannesmann ในปี 1885 และ 1891 ตามลำดับ ดังนั้นการดึงขึ้นรูปเหล็กจึงยังไม่ใช้กันอย่างกว้างขวางนักจนกระทั่งถึงปลายศตวรรษที่ 19 การอัดรีดร้อนของท่อทองแดงหลายชนิดเพื่อให้เหมาะสมต่อการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมและตลาดท้องถิ่น

การพัฒนาอย่างรวดเร็วในการดึงขึ้นรูปท่อได้เกิดขึ้นประมาณช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง เมื่อปลอกสวมแบบขกลอย (Floating plug) ได้ถูกใช้สำหรับครั้งแรก ในเวลานั้นท่อยาวตรงได้ถูกดึงบนแท่นดึง (Draw bench) ซึ่งใช้แนวแกนท่อหรือปลอกสวมอยู่กับที่ (Fixed plug) แต่ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สองได้ใช้เพียงพินตรง (Spur) ในการดึงท่อจากท่อหนึ่งไปยังอีกท่อหนึ่ง ตำแหน่งของปลอกสวมบนแท่นสวมไม่อาจมีขึ้นได้เมื่อฐานการดึงท่อขึ้นรูปแล้ว ดังนั้นการออกแบบปลอกสวมจึงเปลี่ยนจากรูปทรงกระบอกไปเป็นรูปกรวยแทนซึ่งวิธีนี้ทำให้ปลอกสวมยังคงอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องโดยเป็นผลของความสมดุลในแรงต่างๆที่กระทำบนปลอกสวม ความสำคัญของการออกแบบปลอกสวมแบบขกลอย ซึ่งได้ใช้และเป็นส่วนที่จำเป็นของการลดขนาดเช่นเดียวกันกับการลดความหนาของผนังและเป็นผลดีทางด้านเศรษฐกิจในการใช้ปลอกสวมเหล่านี้ ดังนั้นปลอกสวมแบบขกลอยจึงสัมพันธ์กับแท่นสวมและใช้ในการดึงขึ้นรูปท่อในทางตรงบนแท่นดึง ปลอกสวมขกลอยแบบนี้เป็นในลักษณะของปลอกสวมขกลอยจับยึด (Captive floating plug) ซึ่งปลอกจะสัมพันธ์อย่างหลวมๆกับแท่นสวมเพื่อว่าปลอกสวมยังคงลอยตัวอยู่จริง ในช่วงการดึงแต่แท่นสวมจะทำให้ปลอกถูกนำไปยังแนวการเปลี่ยนรูปแท่นสวมแบบมีรู (Hollow plug bar) ช่วยเพิ่มข้อดีที่ซึ่งการหล่อลื่นสามารถมีได้มากบนผิวงานระหว่างท่อและปลอกสวม ภายในเวลาต่อมาหลักการของปลอกสวมแบบขกลอยได้ถูกใช้กับปลอกสวมยึดกับที่ (Fixed plug) เช่นปลอกสวมแบบขกลอยสัมพันธ์อย่างแน่นกับแท่นสวมซึ่งเครื่องมือแบบนี้ได้ถูกใช้ในแท่นดึง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อท่อเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กได้ถูกดึงและมีความยุ่งยากเกิดขึ้น โดยปลอกสวมแบบขกลอยขนาดเล็กสามารถทำให้เกิดความเสียหายที่ตอนปลายของการดึง นอกจากนี้ปลอกสวมขกลอยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กไม่สะดวกที่จะนำมาทำงานซ้ำๆกันในแนวการเปลี่ยนรูปที่จุดเริ่มของการดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดึงขึ้นรูปตามแนวแกนท่อเช่นการดึงท่อบนแกน ได้ถูกใช้เมื่อต้องการท่อแบบคุณภาพสูงและมีช่องว่างน้อย อย่างไรก็ตามวิธีนี้เสียค่าใช้จ่ายสูงมากในการทำงานเพราะว่าจำนวนแรงดึงและคุณภาพที่สูงมากของแกนท่อจะต้องถูกรักษาและป้องกันการเสียหาย ผิวกว้างที่ไม่สมบูรณ์และสิ่งสกปรกที่มาจากอากาศหรือลักษณะเฉพาะอื่นๆเมื่อท่อบนแนวแกน ได้ถูกดึงผ่านแม่แบบแล้วจากนั้นจำเป็นต้องถอนแกนท่อออกจากท่อซึ่งปกติสามารถทำได้โดยการปิดช่องเหนือแกนท่อโดยการดึงมัน ส่วนปลายของท่อบนแกนท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลางขนาดใหญ่กว่าขนาดของช่องจะไม่สามารถผ่านไปได้นั้น ดังนั้นโดยทำการดึงอย่างต่อเนื่องแกนท่อจะถูกถอนออกมาจากท่อซึ่งอาจเป็นส่วนสำคัญในการหมุนท่อที่รวมกับแกนก่อนที่จะทำการถอนออกมาเพื่อขยายท่อและคลายความเค้นปกติทำให้เกิดความเค้นเสียดทานกระทำระหว่างแกนและท่อ สำหรับเหตุผลเหล่านี้ท่อเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กขนาดยาวเช่นท่อที่ใช้ในการผลิตเข็มฉีดยาไม่สามารถดึงบนแนวแกนได้ ดังนั้นท่อที่มีขนาดต่ำกว่าจะใช้แกนซึ่งมีลักษณะเหมือนเส้นลวดที่ถูกกำหนดโดยความเค้นและความเสียดทานปกติระหว่างแกนและท่อ ความยาวของท่อและความแข็งแรงในการดึงของแกนท่อ เช่นเดียวกันควรพิจารณาด้วยว่ามีความหนาของผนังที่ต่ำกว่าข้อจำกัดซึ่งอาจจะถูกเลื่อนตำแหน่งไปจากแกนท่อเพราะว่าท่อผนังบางจะเสียหายในช่วงการถอนของแกนท่อทำให้ท่อเกิดรอยรั่วขึ้นได้

จากในช่วงเวลาเริ่มต้นซึ่งเป็นส่วนสำคัญเมื่อการดึงขึ้นรูปเช่น เส้นลวด แผ่นโลหะหรือท่อเพื่อกำหนดขึ้นงาน ในตอนต้นเส้นลวดจะถูกตีเพื่อทำให้เกิดจุดหรือตำแหน่งที่สามารถนำผ่านแม่แบบและถูกจับยึดโดยเครื่องมือบางอย่างที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเกิดความเค้นแรงดึงโดยไม่มี การลื่นไถล เป็นความบังเอิญสำหรับเครื่องดึงในตอนต้น การตีขึ้นงานตอนปลายให้แข็งซึ่งสามารถลดพื้นที่ทำให้เกิดความเค้นแรงดึงที่จำเป็นต่อการดึงเส้นลวดผ่านแม่แบบได้ จวบจนกระทั่งถึงศตวรรษนี้เมื่อวิธีที่ยุ่งยากกว่าในการดึงโลหะผสม ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยสนใจที่จะนำไปใช้ในการผลิตโลหะกลม (Tag) ทั้งนี้เนื่องจากได้มีการพิจารณาถึงการ pick up ที่เกิดขึ้นบ่อยๆตามแนวต่างๆในโลหะกลมที่ขัดกันไม่ดีเพื่อหลีกเลี่ยงการผลิตโลหะกลมที่หยาบ เครื่องดอกโลหะแบบหมุน (Rotary swaggers) ได้ถูกปรับปรุงขึ้นซึ่งเครื่องจักรต่างๆเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่เรียบจากเส้นผ่านศูนย์กลางของขึ้นงานเริ่มต้น ไปยังเส้นผ่านศูนย์กลางของขึ้นงานที่ต้องการ โดยการตีขึ้นงานด้วยแม่แบบรูปร่างเรียบอย่างไรก็ตามเครื่องดอกโลหะแบบหมุนส่วนใหญ่แล้วมีเสียงรบกวนและการสั่นที่ค่อนข้างดังดังนั้น เครื่อง push pointers จึงถูกพัฒนาขึ้น ในเครื่องแบบนี้ขึ้นงานจะได้รับแรงตามแนวแกนต่อเนื่องตลอดภายในชุดแม่แบบที่มีขนาดเล็กไปตามลำดับจนกระทั่งทำให้เกิดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดเล็กพอเพื่อขึ้นงานสามารถผ่านแม่แบบดึงขึ้นรูปได้ เครื่องแบบนี้มีเสียงค่อนข้างเงียบและสามารถผลิตโลหะกลมได้ดี ถึงแม้ว่ามีบางชุดของขึ้นงานต่างๆได้ตอบสนองกับตำแหน่งที่ได้เป็นอย่างดีก็ตาม โลหะกลมแท่งอาจจะไม่ใช้การผลิตโดยวิธีทำซ้ำหลายๆครั้งโดยที่ใช้เครื่อง push pointers เป็นเพราะว่าการเปลี่ยนแปลงในสภาวะความ

เสียดทานรอบแม่แบบมีผลกระทบต่อความเร็วในการเคลื่อนตัว อย่างไรก็ตามปัญหานี้อาจถูกจำกัดได้ในห้องซึ่งทำได้โดยการนำท่อใส่เข้าไปยังแม่แบบบนแนวแกนของท่อ

การทำโลหะกลมทั้งหมดตำแหน่งช่องทางเข้าของแท่งลวดจะทำให้เกิดการสูญเสียวัสดุที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตเพราะว่าต้องให้มีขนาดยาวพอเพื่อนำผ่านแม่แบบและถูกจับยึดโดยขาของเครื่องดึง เมื่อลวดเป็นวัสดุที่มีค่าสูงหรือเมื่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ การสูญเสียวัสดุที่ปลายนี้ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ไม่สามารถยอมรับได้ดังนั้นจึงพบจนปลายศตวรรษที่ 19 การดึงหมุด (Pulling pins) ได้ถูกคิดขึ้นเพื่อให้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดการดึงหัวสลักด้วยแรงดึงสูงหัวสลักจะถูกแรงดึงลงไปในห้องโลหะของแท่นสวมจนกระทั่งหัวสลักผ่านเข้าไปถึงปลายของท่อก็จะถูกดันออกมา ก้านของสลักที่ถูกดันผ่านหัวฉลิดจะเคลื่อนไปข้างหน้ามากพอที่ก้านหมุดจะถูกยึดโดยเครื่องดึง เนื่องจากหัวฉลิดนั้นสั้นเมื่อเทียบกับโลหะกลมดังนั้นจึงลดการสูญเสียของวัสดุลงได้มาก หลังจากผ่านกระบวนการของการดึงขึ้นรูปสลักจะต้องถูกนำกลับมาจากท่อที่ถูกดึงเพื่อเตรียมสำหรับการดึงครั้งต่อไป

3.2 การพัฒนากรรมวิธีของสารหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูป

(Developments in Drawing Lubricants)

การพัฒนาต่างๆ ได้ถูกคิดขึ้นเป็นจำนวนมากในการหล่อลื่นของการขึ้นรูปโลหะและผลงานวิจัยส่วนใหญ่ได้ทำเกี่ยวกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เคมีและทางกลของการหล่อลื่นในเครื่องขึ้นรูปโลหะและขึ้นงาน เป็นที่ทราบกันว่าไขน้ำมัน (Tallow) ได้ถูกใช้ในช่วงเวลาแรกสุดของกรรมวิธีการดึงลวดและถึงแม้ว่าการหล่อลื่นจะยังคงใช้เป็นครั้งคราวแต่คุณสมบัติทางเคมีของสารหล่อลื่นได้ถูกพัฒนาขึ้นไปจนถึงจุดสามารถกำหนดคุณสมบัติสารหล่อลื่นเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องมือและขึ้นงาน โลหะเหล็ก โลหะไม่ใช่อเหล็ก ความเร็ว อุณหภูมิ ความเค้นที่ผิว ลักษณะผิวและชนิดของกรรมวิธีการขึ้นรูปซึ่งหน้าที่หลักของสารหล่อลื่นคือเพื่อให้เกิดการแยกตัวของเครื่องมือจากขึ้นงานควบคุมเพื่อให้ได้พื้นผิวตามที่กำหนด แต่อย่างไรก็ตามหน้าที่อื่นๆของสารหล่อลื่นได้รวมถึงการลดของแรงในการเปลี่ยนรูป อัตราการถ้ำของเครื่องมือและค่าใช้จ่ายของการดึงขึ้นรูปด้วยฟิล์มสารหล่อลื่นที่แยกจากผิวเป็นผลมาจากน้ำมันจะแยกอยู่เป็นจุดหรือเกิด pick up ขึ้นหรือใช้แรงในการดึงสูงต่อตำแหน่งที่กระทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นหรือเกิดอัตราการถ้ำของเครื่องมือมีค่าสูงขึ้นด้วย

ไขน้ำมันสัตว์เคี้ยวเคี้ยวเคี้ยวใช้ในรูปแบบของไขมันภายหลังถูกพบว่าไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น เมื่อวิธีการของการผลิตโลหะได้ถูกพัฒนาขึ้นและเมื่อพิจารณาถึงการแยกตัวของผิวว่าเป็นส่วนสำคัญหลักวัสดุชนิคมพิเศษจะถูกผสมลงไปในการหล่อลื่นไขน้ำมันในรูปแบบของปูนขาว คาร์บอนดำ

น้ำมันดิน ผงถ่านและแกรไฟต์เป็นต้นซึ่งบางครั้งวัสดุเหล่านี้ได้มีการใช้โดยไม่ได้ผสมกับส่วนที่เป็นไขมันเลย

เมื่อความเค้นจุดคราก (Yield stress) ของโลหะเพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าจะไม่พิจารณาที่จุดนั้นแต่ปฏิกิริยาของสารหล่อลื่นจะพบว่ายังคงอยู่ที่ความเค้นและอุณหภูมิสูง ซึ่งควรคำนึงถึงผิวที่เกิดกับเครื่องมือและชิ้นงานเป็นสิ่งสำคัญเช่นเมื่อสังเกตลวดบางส่วนที่ได้ตากแดดตากฝนเป็นเวลานานจะดูคืดได้คืดกว่าส่วนอื่นๆของกลุ่มลวดอันเดียวกันที่ไม่ได้รับสภาพอากาศแบบนี้ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการกระทำของสภาพอากาศทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กที่ผิวโดยจะเป็นที่ดักจับสารหล่อลื่น ข้อสังเกตต่างๆเหล่านี้นำไปสู่การเตรียมชั้นคอนการควบคุมผิวชิ้นงานก่อนคืด โดยการแช่กรด (Pickling) หรือโดยการยิง (Shot) หรือโดยการพ่นเม็ดทราย (Sand blasting) แต่กรดฟอสฟอริกและสารต่างๆที่ใช้ได้พบว่าจะมีผลกระทบไม่เพียงแต่ทำให้ผิวที่ได้ไม่เป็นมันและพันชะทางกลแล้ว สารหล่อลื่นบางตัวยังให้ได้พื้นชะทางเคมีด้วย

เพื่อป้องกันสภาวะต่างๆของความเค้น อุณหภูมิและปฏิกิริยาสูงสุดระหว่างเครื่องมือและชิ้นงาน ได้มีการใช้โลหะผสมเข้าไปในผิวของชิ้นงานซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ทองแดงกับตะกั่ว แต่โลหะเหล่านี้จะถูกนำออกไปเมื่อการคืดขึ้นรูปเสร็จสิ้นแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ากรรมวิธีการคืดใช้สำหรับวัสดุเพื่อประกอบการเตรียมอาหาร ดังนั้นจึงให้ความสนใจเป็นอย่างมากโดยเน้นถึงการกำจัดสารหล่อลื่นทุกประเภทเพื่อให้เกิดสิ่งสกปรก การกัดกร่อน การสึกหรอจากความเค้นให้น้อยที่สุดหรือไม่ให้มีสี แล็กเกอร์หรือสิ่งเคลือบป้องกันอื่นๆหลงเหลืออยู่สำหรับการนำสารหล่อลื่นออกโดยทันทีภายหลังจากการคืด เมื่อสารหล่อลื่นมีส่วนผสมของสารคลอรีนหรือซัลเฟอร์แยกตัวออกมาในระหว่างการคืดและผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพได้ทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศทำให้เกิดสารประกอบของกรดซึ่งจะกัดกร่อนหรือทำให้เกิดรูกับชิ้นงาน เช่นเดียวกันสารหล่อลื่นความดันสูงบางชนิดได้ทำปฏิกิริยากับแนวของเดาเผาด้วย บริเวณส่วนทำความร้อนและส่วนอื่นๆของเดาเผาซึ่งเหตุผลเหล่านี้ทำให้สารหล่อลื่นจะต้องถูกกำจัดออกไปทันทีภายหลังการคืดขึ้นรูป โดยเครื่องกำจัดสารหล่อลื่นออกไปเป็นผลให้ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น

3.2.1 การหล่อลื่น (Lubrication)

สารหล่อลื่นสำหรับกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะนั้นสารหล่อลื่นควรจะมีหน้าที่ต่างๆที่กระทำซึ่งหน้าที่นั้นจะต้องลดความเสียดทาน ป้องกันการเกิด pick up ระหว่างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน บางทีกระทำเปรียบเสมือนเย็นบนชิ้นส่วนเครื่องมือ บางเวลามีหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนซึ่งเป็นหน้าที่ที่สำคัญที่สุด

สารหล่อลื่นนั้นจะต้องไม่กัดกร่อนชิ้นงาน ชิ้นส่วนเครื่องมือหรือเครื่องจักรซึ่งจำเป็นต้องล้างออกไปได้โดยง่ายและไม่มียันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน

ลักษณะของสารหล่อลื่นนี้มีหน้าที่ลดแรงเสียดทาน สารหล่อลื่นต่างๆสามารถเป็นของเหลวได้เช่นเดียวกับที่เป็นของแข็งและสารหล่อลื่นนี้โดยพื้นฐานจำแนกได้เป็น

Solid phase

- Metallic film
- Non metallic film

Fluid phase

- Boundary lubrication
- Lubricant trapping
- Hydrodynamic lubrication

ฟิล์มของโลหะสามารถใช้ในสภาวะที่ยุ่งยากบางอย่างได้ซึ่งโลหะต่างๆเช่นทองแดง ตะกั่วและ indium

เนื่องจากแรงเฉือนได้เกิดขึ้นในฟิล์มด้วยความเค้นเฉือน k_r และจะไม่เกิดขึ้นในวัสดุชิ้นงานด้วยความเค้นเฉือน k จะได้

$$\tau_n = f k \alpha = k_r \cdot \alpha$$

หรือ

$$f = \frac{k_r}{k}$$

(3.1)

ฟิล์มสารหล่อลื่นที่ไม่ใช่โลหะ (Non-metallic film) จะถูกใช้ที่อุณหภูมิและความดันปกติซึ่งจะมีค่ามาก วัสดุต่างๆเช่น กราไฟต์หรือโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum disulphide) ปกติจะมีการใช้กันที่บ่อยมากและโพลีเมอร์ก็จะมีใช้ด้วยเช่นกัน

ในการหล่อลื่นที่ขอบ (Boundary lubrication) ปฏิกริยาเคมีจะเกิดขึ้นระหว่างสารหล่อลื่นและโลหะซึ่งโดยทั่วไปโลหะสปูจะนำมาใช้โดยถูกดูดซึมที่บริเวณผิวของโลหะความแข็งแรงของฟิล์มสารหล่อลื่นจากการเฉือนจะมีค่าน้อยเป็นผลให้ความเสียดทานต่ำ

การดัก (Trapping) สารหล่อลื่นพบได้บ่อยในการขึ้นรูปโลหะ เมื่อชิ้นงานและเครื่องมือมาสัมผัสกันซึ่งสารหล่อลื่นควรจะส่งเข้าไปด้วยความเร็วสูง ความดันต่างๆที่เกี่ยวข้องสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการคงรูปบนผิวชิ้นงานโดยสารหล่อลื่นที่ถูกดักไว้บนชิ้นงาน ในทำนองเดียวกันสารหล่อลื่นต่างๆสามารถถูกดักไว้ในผิวชิ้นงานที่หยาบในขณะที่เริ่มขึ้นซึ่งการดักสารหล่อลื่นเป็นผลให้ความเค้นเสียดทานต่ำและทำให้ผิวที่ด้านและหยาบบนชิ้นงานลดความเสียดทานลง

ในการหล่อลื่นแบบใช้ของเหลวอย่างเฉียว ผิวทั้งสองถูกแยกออกจากกันทั้งหมดโดยชั้นของสารหล่อลื่นซึ่งความดันเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของผิว การเริ่มต้นและการหยุดเป็น

ช่วงเวลาที่สำคัญซึ่งจำเป็นต้องให้ความระมัดระวังมากเพราะจะเกิดการเสียดสีที่สูงมากโดยการเพิ่มสารหล่อลื่นเข้าไปที่บริเวณขอบของชิ้นงานและเครื่องมือ

สำหรับในการดึงขึ้นรูปความต้องการสารหล่อลื่นมีมากกว่าในการรีดขึ้นรูปซึ่งความยาวของการลื่นไหลมีค่าสูงกว่า มีการใช้โดยทั่วไปในการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกเนื่องจากความเร็วปกติมีค่ามากกว่าระหว่างชิ้นส่วนเครื่องมือและชิ้นงาน โดยมากสารหล่อลื่นต่างๆสำหรับการดึงขึ้นรูปถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ

- การดึงขึ้นรูปแบบแห้ง (Dry drawing)
- การดึงขึ้นรูปแบบเปียก (Wet drawing)

ตารางที่ 3.1 การรีดขึ้นรูปสภาพเย็น : สารหล่อลื่นชนิดทั่วไป

Workpiece material	Lubricant
Steel	Emulsions, oil in water with boundary Lubricants and EP-additives
Stainless steel	High viscosity oils with EP-additives
Copper alloys	Mineral oil Emulsions with mineral oil in water
Aluminum	Mineral oil with boundary lubricants Emulsions

ตารางที่ 3.2 การรีดขึ้นรูปสภาพร้อน : สารหล่อลื่นชนิดทั่วไป

Workpiece material	Lubricant
Steel and stainless steel	Oxides and cooling water Glass Graphite in cooling water
Copper alloys	Oxides Mineral oil for cooling
Aluminum	Emulsions with mineral oil in water with boundary lubricant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการดึงขึ้นรูปแบบแห้งสารหล่อลื่นสามารถทำให้ลดความเสียดทานและการสึกหรอซึ่งเส้นลวดจะถูกทำให้เย็นแยกจากกันโดยการหล่อเย็นภายในของ (Capstan) การดึงขึ้นรูปแบบแห้งถูกใช้สำหรับการดึงเส้นลวดเหล็กกล้ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร

ในการดึงขึ้นรูปแบบเปียกสารหล่อลื่นจะไม่เพียงลดความเสียดทานและการสึกหรอเท่านั้น แต่ยังให้การหล่อเย็นของเส้นลวดด้วย การดึงขึ้นรูปแบบเปียกในทางปฏิบัติมิใช้ทั่วไปสำหรับโลหะที่ไม่ใช่เหล็กทั้งหมดและสำหรับเส้นลวดเหล็กกล้าขนาดน้อยกว่า 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร ให้กำหนดสารหล่อลื่นบางชนิดสำหรับการดึงขึ้นรูปแบบแห้งและแบบเปียก

ตารางที่ 3.3 การดึงขึ้นรูปแห้ง : สารหล่อลื่นชนิดทั่วไป

Workpiece material	Dry drawing lubricants
Steel	Coating of Ca-Na stearate on lime borax Soap phosphating
Stainless steel	Coating of metal stearates on lime, borax or oxalate possibly combined MoS ₂ or EP-additives Metallic coating (Cu) with emulsions or graphite Chlorinated wax

ตารางที่ 3.4 การดึงขึ้นรูปแบบเปียก : สารหล่อลื่นชนิดทั่วไป

Workpiece material	Wet drawing lubricants
Steel	Emulsions with soap, fatty oils, mineral oil and water
Stainless steel	Vegetable oils, fat, mineral oils with EP-additives
Copper alloys	Emulsions with soap, fatty acids, boundary lubricants and EP-additives
Aluminum	Mineral oils with boundary lubricants and EP-additives

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การวัดความเสียดทาน (Measurement of Friction)

การหาค่าความเสียดทานโดยใช้สารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ในกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้ในการวัดแรงหรือกำลังที่ต้องการเพื่อนำมาใช้ในกรรมวิธีการผลิต อย่างไรก็ตามการคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจากการวัดค่าเหล่านี้ส่วนใหญ่ทำได้ยากมาก (Schey) แบบจำลองทางทฤษฎีที่เที่ยงตรงมากสำหรับรูปแบบของความเค้นความเครียดซึ่งอธิบายถึงอิทธิพลของความเสียดทานต่อการเปลี่ยนรูปนั้นไม่เหมือนกัน ดังนั้นความเสียดทานที่ประมาณได้จะเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งอาจเป็นการอธิบายที่ไม่ดีนักของสภาวะความเสียดทานต่างๆ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงมากในแต่ละบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างผิวของเครื่องมือกับชิ้นงาน

นอกจากนี้การกระจายในความเค้นจุดครากของวัสดุชิ้นงานอาจมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยความเสียดทานจะเปลี่ยนแปลงโดยสารหล่อลื่นที่ต่างชนิดกัน

การวัดค่าต่างๆตามตำแหน่งแต่ละจุดที่เกิดขึ้นและความเสียดทานที่ได้ แต่ค่าเหล่านี้เป็นเพียงค่าในทางปฏิบัติในห้องทดลองเท่านั้น Schey ได้ให้การพิสูจน์ที่ดีของวิธีการเหล่านี้ซึ่งรวมทั้งจำนวนความเสียดทานที่จำลองขึ้นมาและการทดสอบการหล่อลื่นของสารหล่อลื่นต่างๆ

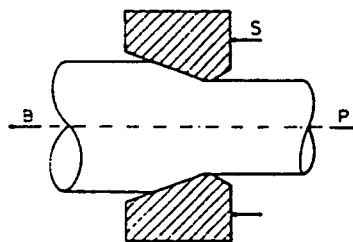
สำหรับการวัดความเสียดทาน โดยตรงในกรรมวิธีการดึงขึ้นรูปเป็นวิธีที่ยุ่งยากมาก การเปรียบเทียบสารหล่อลื่นต่างๆสามารถแสดงได้โดยการวัดแรงดึงขึ้นรูป (Drawing force) ซึ่งทำการเปรียบเทียบแรงดึงกลับ (Back tension) การหาค่าโดยตรงของความเสียดทานสามารถหาได้ถ้าแรงดึง P แรงดึงกลับ B และแรงที่กระทำบนแท่นรองแม่แบบ S หาค่าได้ (รูป 7.1) ซึ่งแรงดึงจะถูกวัดในตอนแรกโดยไม่มีแรงดึงกลับ ($P_0 = S_0$) และจากนั้นค่อยเพิ่มแรงดึงกลับ ตัวประกอบแรงดึงกลับ (Back pull factor) สามารถกำหนดได้คือ

$$b = \frac{P_0 - S}{B} \quad (3.2)$$

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคำนวณได้คือ

$$\mu = \left(\frac{\ln(1-b)}{\ln(1-r)} - 1 \right) \tan \beta \quad (3.3)$$

เมื่อ β = เป็นมุมครึ่งแม่แบบ r = การลดขนาด



รูปที่ 3.1 แสดงการดึงขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การพัฒนาของวัสดุเครื่องมือ

(Development of Tool Materials)

การพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำแม่แบบอาจกล่าวได้ว่าเติบโตขึ้นอย่างครบวงจรซึ่งแม่แบบในช่วงแรกสุดได้ผลิตจากสารประกอบซิลิกอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของเศษหรือผงของหินภูเขาไฟ จนกระทั่งบัดนี้แม่แบบบางอย่างได้ทำจากสารประกอบซิลิกอนหรือคาร์บอนทั้งหมด ซึ่งให้คุณสมบัติที่เหมาะสมของความแข็ง ความเหนียว ความเฉื่อยสูงสุดและความต้านทานการขีดจากอุณหภูมิ เพชรสังเคราะห์และเพชรตามธรรมชาติได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในแม่แบบสำหรับอุตสาหกรรมผลิตลวดและสำหรับอุตสาหกรรมผลิตท่อขนาดเล็ก

ในระยะเวลาอันสั้นภายหลังได้มีการพบแร่เหล็ก โดย Hittites ส่วนที่อยู่ในรูปของเหล็กบริสุทธิ์ได้ถูกใช้สำหรับแม่แบบแผ่นหรือแม่แบบ wortle plates เช่น ชุดของท่อขนาดช่องที่จัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กไปใหญ่ได้ถูกเจาะในแม่แบบแผ่นเหล็ก ซึ่งชิ้นงานจะถูกดึงโดยผ่านช่อง orifices ที่มีขนาดเล็กลงไปตามลำดับเมื่อมีการใช้โลหะผสมของเหล็กได้ดียิ่งขึ้น แม่แบบเหล็กกล้าและคาร์บอนได้ถูกใช้แทนแม่แบบ wortle plate ความต้องการสำหรับแม่แบบที่มีความแข็งมากกว่ายังคงมีมากขึ้น ซึ่งได้มีการพัฒนาแม่แบบเผาที่ใช้ทั้งสแตนคาร์ไบด์หรือโครเมียมคาร์ไบด์ โคบอลต์ได้ถูกใช้ในการผสมกับผงโลหะที่ถูกเผาเพื่อให้เกิดแม่แบบเป็นรูปกลมนอกจากนี้ผิวแม่แบบได้มีการทำให้แข็งโดยเพิ่มสารโครเมียมหรือเพิ่มกรรมวิธีเช่น Nitriding, Boronising หรือ Titanium nitriding ในปัจจุบันแม่แบบเพชรหรือแม่แบบทั้งสแตนคาร์ไบด์แบบต่างๆได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางแต่แม่แบบ Sialon ที่ผลิตจากสารประกอบโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกอน อะลูมิเนียม ออกซิเจนและไนโตรเจน ได้พบว่ามีการใช้กันมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแม่แบบเหล่านี้ผ่านกรรมวิธีทางเคมีเพื่อให้ได้โลหะผสมต่างชนิดมากขึ้นและสารหล่อลื่นที่ทำงานในช่วงของอุณหภูมิแตกต่างกันด้วย

3.4 การออกแบบทางกลของเครื่องดึงขึ้นรูป

(The Mechanical Design of Draw Tools)

การออกแบบทางกลของแม่แบบดึงขึ้นรูปที่ประกอบรวมกันจำเป็นต้องใช้ความละเอียดอ่อนมากซึ่งแม่แบบอย่างง่ายที่ประกอบด้วยออริฟิศ (Orifice) ในแผ่นกลม (circular disc) ก็สามารถนำไปใช้ได้แล้วแต่แม่แบบรุ่นใหม่มีลักษณะคล้ายกับท่อทรงกระบอกประกอบรวมกัน ซึ่งปกติจะประกอบจากท่อกลมหรือปากกาจับที่ล้อมรอบด้วยวงแหวนหรือส่วนรองรับ (bolster) ไว้

อย่างแน่นพอดี โดยความแน่นนั้นเกิดขึ้นจากระยะสำคัญระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อกลมและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของส่วนรองรับและจำเป็นต้องทำให้เกิดความเค้นอัดที่ขอบในท่อกลมและเพื่อป้องกันการแตกที่ความเค้นหลักสูงสุด ได้กลายเป็นแรงดึงจนกระทั่งเมื่อเร็ว ๆ นี้ แม่แบบต่างๆ ได้ถูกออกแบบ โดยอาศัยพื้นฐานของสมการความหนาที่ทรงกระบอกของ Lamé (Lamé's thick cylinder equations) เพราะว่าสมการเหล่านั้นสามารถหาได้เกือบทั้งหมดแต่เนื่องจากแม่แบบต่างๆ มีความสัมพันธ์กันอย่างสิ้นเชิงกับสมการเส้นผ่านศูนย์กลางของ Lamé ที่ไม่สามารถนำไปใช้ได้ นอกจากนี้มีการสมมุติว่าความเค้นในแนวรัศมีภายในเกิดขึ้นในท่อกลมโดยขึ้นงานที่ตอบสนองกับความเค้นของๆ โหลหรือ hydrostatic ซึ่งกรณีนี้ไม่ถูกต้องและความเค้นเฉือนที่ผิวระหว่างชิ้นงานและแม่แบบก็ไม่นำมาคิดด้วยเหมือนกัน นอกจากนี้แรงผลัก (thrust) ของแม่แบบกับแท่นตั้งแม่แบบแผ่นไม่ต้องนำมาคิดซึ่งในทางปฏิบัติแม่แบบมีลักษณะโค้งนูนคล้ายกับไดอะแฟรม (diaphragm) เช่น การคัดเกิดขึ้นเนื่องจากมีโมเมนต์และแรงเฉือนแต่ก็ไม่นำมาคิดเช่นเดียวกัน ดังนั้นวิธีในปัจจุบันของการออกแบบแม่แบบซึ่งคล้ายกับแผ่นหนาที่ถูกเจาะโดยออริฟิตตรงกลางจึงไม่มีความแน่นอนซึ่งบางทีวิธีทางตัวเลขและการคำนวณทาง Finite element จะสามารถออกแบบแม่แบบตั้งขึ้นรูปเพื่อให้เกิดความละเอียดขึ้นดังนั้นจึงลดค่าใช้จ่ายและการใช้วัสดุในการผลิตได้

ความคิดปกติสำหรับปลอกสวมที่ใช้ในกรรมวิธีการดึงท่อทำให้เกิดความผิดพลาดของทาง การออกแบบทางกล ซึ่งด้วยเหตุผลนี้จึงไม่มีการออกแบบปลอกสวมที่เปลี่ยนแปลงเพื่อป้องกัน ความอ่อนตัว (Weakness) อย่างไรก็ตามการออกแบบปลอกสวมเพื่อให้เหมาะสมกับความ ต้องการของการขึ้นรูปโลหะได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก เพื่อที่ว่าจะได้มีการจำแนกออกไป อย่างชัดเจนของปลอกสวมทั้งสี่แบบดังนี้คือ

- ปลอกสวมยึด (Fixed plug)
- ปลอกสวมแบบขกลอยตลอด (Fully floating plug)
- ปลอกสวมขกลอยจับ (Captive floating plug)
- ปลอกสวมขกลอยอยู่กับที่ (Fixed floating plug)

ปลอกสวมยึดมีลักษณะเพียงท่อทรงกระบอกทำจากโลหะแข็ง โดยถูกยึดที่ปลายของแท่นสวมซึ่งป้องกันความเค้นเฉือนที่ผิวระหว่างรูของท่อและปลอกสวม จากการดึงผ่านแม่แบบบาง ครั้งปลอกสวมยึดถูกหมุนโดยมีการเอียงเล็กน้อยเช่น ปลอกสวมที่ไม่จำเป็น รูปทรงกระบอกแต่มี กรวยที่ลึกมาก โดยมียอดแหลมลึกลงไปแม่แบบการออกแบบลักษณะนี้สามารถทำให้ความหนา ของผนังท่อมีการปรับได้และบางที่อาจเพิ่มผลดีของการลดการเกิด Pick up ได้ในทางตรงข้าม ปลอกสวมขกลอยตลอดถูกทำให้เอียงมากหรือเป็นรูปกรวยเช่น มุม 28 องศาได้รวมมุมซึ่งนำเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปในส่วนของท่อทรงกระบอกซึ่งเรียกว่า “land” หรือ “bearing” ปลอกสวมแบบนี้ไม่ได้ถูกยึดโดยวิธีต่างๆ แต่มันมีลักษณะลอยในบริเวณการเปลี่ยนรูป ซึ่งเป็นผลของความสมดุลในการดึงปลอกสวมไปยังแม่แบบและแรงอัดรีดปกติไปยังผิวกรวยโดยพยายามที่จะผลักปลอกสวมออกมา อุปกรณ์แบบนี้เหมาะสมสำหรับท่อค้ำขึ้นรูปในแบบกรวยซึ่งได้ออกแบบไว้เป็นครั้งแรกสุด ปลอกสวมขกลอยจับมีรูปร่างลักษณะทั่วไปเหมือนกับปลอกสวมขกลอย เว้นเสียแต่ว่าปลอกสวมถูกยึดไว้อย่างหลวมๆ บนปลายของแท่งสวม ปลอกสวมขกลอยได้ถูกใช้ในวิธีที่ปลอกสวมสามารถนำเข้าไปได้ง่ายในบริเวณการเปลี่ยนรูปโดยวิธีของแท่งนำ (bar) ซึ่งแม่แต่แท่งนำยังไม่ได้ขัดขวางลักษณะการขกลอยของปลอกสวมเลย เพราะว่าปลอกสวมขกลอยควบคุมความหนาผนังและการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้นปลอกสวมขกลอยจึงได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางและได้ถูกใช้แทนวิธีของปลอกสวมยึดสำหรับการดึงท่อผ่านจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้การใช้อย่างต่อเนื่องของปลอกสวมขกลอยได้เพิ่มการใช้แทนปลอกสวมยึด ซึ่งในที่สุดปลอกสวมขกลอยได้กลายเป็นปลอกสวมยึดเช่น ปลอกสวมขกลอยถูกยึดไว้แน่นหนาโดยแท่งยึด การพัฒนาในลักษณะนี้ทำให้ปลอกสวมขกลอยที่ควรจะเรียกในเทอมของปลอกสวมรูกรวย (conical plug) มากกว่าได้ถูกออกแบบและใช้ในลักษณะที่ปลอกสวมขกลอยธรรมดาอาจจะไม่เสถียรและอาจเกิดการ “chatter” หรือ “swallowed” นอกจากนี้ปลอกสวมกรวยยึดแบบเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กบนปลายของแท่งสวมเป็นเพียงการนำเข้าไปในท่อและเป็นเพียงป้องกันจากการเสียหายที่ตอนปลายของการดึง “chatter” เป็นคำที่ใช้อธิบายถึงการแกว่งตามแนวแกน (axial oscillation) ของท่อซึ่งเกิดขึ้นบ่อยจากสถานะของการยึดไม่แน่น

3.5 การวิเคราะห์ในทางทฤษฎี

(Theoretical Considerations)

3.5.1 บทนำ (General Introduction)

การวิเคราะห์ในทางทฤษฎีของกรรมวิธีการค้ำขึ้นรูปในสภาพเย็นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบทั่วไปคือ การวิเคราะห์สมดุลแรงและการวิเคราะห์พลังงาน ในอดีตการวิเคราะห์สมดุล และได้พิจารณาาก่อนทฤษฎีพลังงานแต่วิธีพลังงานค่อนข้างละเอียดครอบคลุมมากกว่าและยังช่วยในการแก้ปัญหาของการค้ำขึ้นรูปด้วยซึ่งวิธีสมดุลแรงไม่สามารถทำได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์สมดุลค่อนข้างทำได้ง่ายและมีความถูกต้องพอสำหรับจุดมุ่งหมายในการทดลองและทางอุตสาหกรรม โดยให้ค่าต่างๆของความเค้นจุดครากและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิดไปการวิเคราะห์สมดุลแรงได้สมมุติว่าไม่มีงานปลิกข้อยเช่น งานที่ไม่จำเป็นในการเปลี่ยนรูปร่างและสมมุติว่าระนาบในตอนแรกที่ตั้งฉากกับแนวแกนดึงจะยังคงที่อยู่ไปตลอดการเปลี่ยนรูปซึ่งความเสียดทาน

เป็นค่าคงที่และโลหะไม่ได้ถูกทำให้แข็ง จะเห็นว่าไม่มีข้อสมมุติฐานเหล่านี้เหมาะสมเลยแต่ในการดึงขึ้นรูปอยู่ในสภาพเย็น งานปลีกล้อยมีค่าน้อย ระบายยังคงอยู่ในระนาบเดิมและตั้งฉากกับแนวแกนดึง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่คิดไปมีค่าน้อยมากและการเปลี่ยนแปลงในค่าเฉลี่ยแสดงถึงผลของความเสียดทานที่มีต่อกรรมวิธี ในทำนองเดียวกันการเปลี่ยนแปลงในค่าเฉลี่ยของความเค้นจุดครากแสดงถึงผลของความเค้นจุดครากต่อแรงดึงและการเลือกของความเค้นจุดครากเฉลี่ยที่ชดเชยสำหรับการทำให้แข็ง (Work hardening)

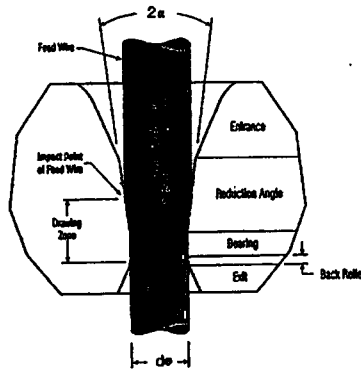
เป็นระยะเวลาไม่นานมาแล้วที่การวิเคราะห์สมดุลแรงของกรรมวิธีการดึงขึ้นรูปโดยพื้นฐานไม่มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะทำเพื่อแก้ปัญหาของการประมาณแรงโดยหากำงานภายใน (Internal work) ต่อภายนอก (external work) ซึ่งลักษณะเช่นนี้สามารถทำได้ในลักษณะวิธีต่างๆกันตัวอย่างเช่น การดึงแผ่นโลหะในระนาบความเครียดสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาของสนามแรงเฉือนซึ่งคำตอบเฉพาะทำให้ได้พลังงานต่ำที่สุดเพื่อใช้ในการเปลี่ยนรูปเป็นคำตอบที่มีค่าเดียวอีกทางหนึ่ง วิธีพลังงานทางตัวเลข (numerical energy method) ก็สามารถใช้ได้ซึ่งโดยวิธีนี้สามารถจะใช้เทคนิคของ finite element หรือวิธีเชิงตัวเลข (numerical) โดยพิจารณาไปตามเส้นทางและการเลือกรูปของส่วนต่างๆตลอดแนวการเปลี่ยนรูปและหาค่าของงานที่ทำภายในต่องานที่ทำภายนอก ไม่มีวิธีใดที่จำเป็นต้องสมมุติรูปร่างของผิวแม่แบบและรูปร่างเฉพาะของทางเข้าหรือระนาบที่เกิดขึ้นซึ่งวิธีการคำนวณทางตัวเลขจริง ได้อินทิเกรตพลังงานที่ถูกกระจายและเลือกขอบเขต (boundary conditions) ที่ต้องการใช้พลังงานน้อยที่สุดวิธีเชิงตัวเลขสามารถใช้อย่างได้ผลในการวิเคราะห์ตัวอย่างเช่น การดึงโดยตรงของส่วนวงกลมไปเป็นส่วนที่มีหลายเหลี่ยมหรือการดึงขึ้นงานโลหะสองชนิดในแนวแกนสมมาตร ถึงแม้ว่าคำตอบของสนามแรงเฉือนจะดีมากแต่ความเข้าใจสำหรับการศึกษาของวิศวกรขึ้นรูปโลหะซึ่งการใช้ประโยชน์ของเขาเป็นแบบทางปฏิบัติได้ถูกจำกัดในการให้ข้อมูลในการอ่าน

Johnson ได้คิดวิธี upper bound energy method ซึ่งคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์สนามแรงเฉือน โดยเป็นเพียงในแบบขั้นตอนและการใช้งานและสามารถใช้ได้กว้างมากในการดึงการอัดรีดและกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแบบอื่นๆ

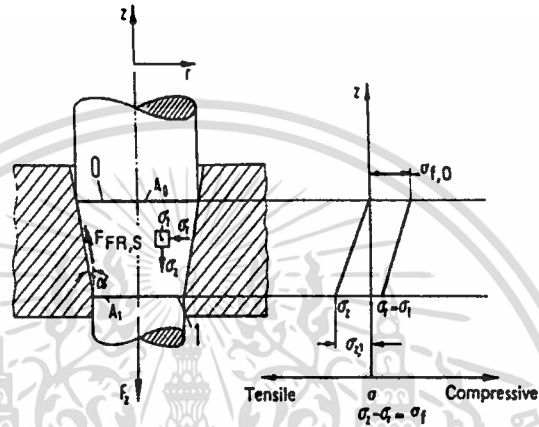
3.5.2 ทฤษฎี

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงในการดึงขึ้นรูปขึ้นงาน

แรงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกรณีของกระบวนการดึงขึ้นรูปนั้นเกิดขึ้นในช่วงของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเกิดขึ้นทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปนั้นเป็นแม่พิมพ์แบบเปิด โดยปกติจะเกิดทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัดเกิดขึ้นภายในช่วงที่เรียกว่า โซนการดึงขึ้นรูป (Drawing Zone) แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์ดึงลวด (Drawing die)



รูปที่ 3.3 ความเค้นและแรงในการดึงขึ้นรูป

งานและแรงที่ต้องการในกระบวนการดึงขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ด้วย Siebel's Method เทอมของงานและแรงจะพิจารณาที่พื้นที่ภาคตัดที่ทางออกของช่วงลาดของคาย (A_1) สมการของแรงในการดึงขึ้นรูปและแรงเสียดทานสามารถที่จะเขียนได้คล้ายคลึงกับการอัดขึ้นรูปตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ดังนี้

$$F_{D,tot} = F_{fd} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (3.4)$$

$$F_{D,tot} = \sigma_{z,1} A_1 = A_1 \sigma_{f,m} \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (3.5)$$

ที่มุม 2α เล็กๆ $\sin 2\alpha \cong 2\alpha$ แรงเสียดทานในคายจะเป็น

$$F_{FR,S} = A_1 \sigma_{f,m} \varphi_{max} \frac{\mu}{\alpha} \quad (3.6)$$

งานทั้งหมดในการเปลี่ยนรูปร่างสามารถคำนวณได้จาก

$$W_{D,tot} = W_{fd} + W_{FR,S} + W_{sh} \quad (3.7)$$

โดยที่

$F_D (W_D)$ = แรง (งาน) ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป

$F_{fd} (W_{fd})$ = แรงอุดมคติ (งานอุดมคติ) ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $F_{FR,S}(W_{FR,S})$ = แรงเสียดทาน (งานเสียดทาน) บนช่วงลาดของคายน
 $F_{sh}(W_{sh})$ = แรงเฉือน (งานเฉือน)
 $\sigma_z, \sigma_{f,m}$ = ความเค้นในแนวแกน z, ความเค้นของการไหลเฉลี่ย $\sigma_z - \sigma_r = \sigma_f$
 A_1 = พื้นที่ภาคตัดที่ทางเข้าช่วงเบริง
 μ = สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน
 α = ครึ่งมุมคายน
 φ_{max} = ความเครียดธรรมชาติ

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหาได้จากตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปขึ้นงาน

Process	Solid forward extrusion	Hollow forward extrusion	Drawing bar and tubes	Ironing	Drawing hollow bodies
Coefficient of friction μ	0.04-0.08	0.1-0.125	0.02-0.05	0.02-0.07	0.08-0.02

ตารางที่ 3.6 มุมคายนที่ดีที่สุด (โดยแรงที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง) ในการดึงขึ้นรูปเย็น

Rod forward extrusion		Tube forward extrusion		Bar drawing		Ironing	
φ_{max}	$2\alpha_{pot}$	φ_{max}	$2\alpha_{pot}$	φ_{max}	$2\alpha_{pot}$	φ_{max}	$2\alpha_{pot}$
0.3-1.0	20°-32°	0.3-	40°-70°	0.15-	10°-20°	0.15-	10°-12°
		1.33		0.50		0.50	20°-24°

แรงรวม F_{tot} เป็นฟังก์ชันของมุมทางเข้าของคายน 2α และแรงต่ำสุดที่ได้จากการคำนวณ

$$F_{tot} = A_0 \sigma_{f,m} \left[\frac{2}{3} \alpha + \left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} \right] + \pi d_0 \sigma_{f,0} \mu l \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

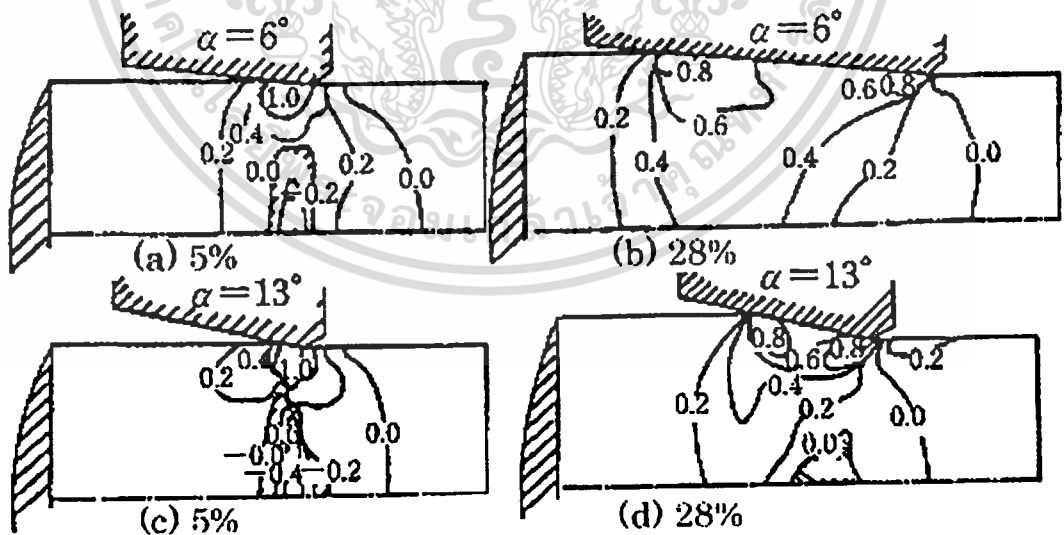
เมื่อ A_0 เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางทางเข้าของครึ่งมุมคายและ / เป็นความยาวของช่วงลาดของคาย และ

$$\cos \alpha_{opt} = -3\mu\phi_{max} \pm \sqrt{9\mu^2\phi_{max}^2 + 1} \quad (3.9)$$

ด้านขวามือของสมการจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าของมุม 2α น้อยที่สุดของแรงในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงาน

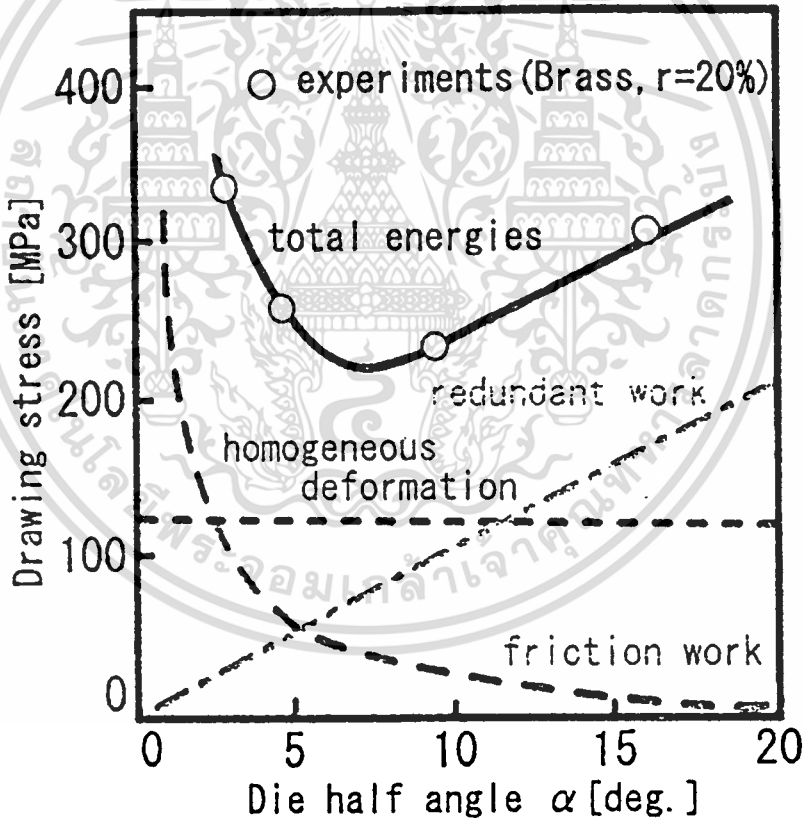
3.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกรณีศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของครึ่งมุมคาย

ในหลายๆงานวิจัยได้ค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการดึงขึ้นรูปลวดซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆไม่ว่าจะเป็นมุมทางเข้าของคาย การลดขนาดและความไม่สมบูรณ์ของการใช้สารหล่อลื่น โดย Avitzur, Rogers และ Yoshida ได้เสนอแนะการพิจารณาภายใต้สภาวะของการแตกร้าวที่เกิดขึ้นด้วยวิธีพลังงาน Yoshida ยังใช้การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ในรูปที่ 3.4 แสดงการกระจายของ hydrostatic pressure (σ_m / Y) โดยพิจารณาที่ครึ่งมุมคาย 6 และ 13 องศาและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัด/ครึ่ง (R/P) ที่ 5 และ 28 เปอร์เซ็นต์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในตัวอย่างทั้งสี่ตัวอย่างค่า σ_m / Y นั้นเกิดขึ้นน้อยมากที่จุดกึ่งกลางของโซนการดึงขึ้นรูปซึ่งมีค่าน้อยกว่าศูนย์ [เว้นแต่ในรูป (b)] ความเค้นที่จุดกึ่งกลางจะเป็นความเค้นดึงซึ่งมีผลให้เกิดรอยแตกภายในได้ง่าย จากการเปลี่ยนค่าของมุม α และค่า R/P จะได้ผลตามรูปที่ 3.4 [9].



รูปที่ 3.4 แสดงการกระจายของ Hydrostatic pressure (Mpa) ระหว่างการดึงขึ้นรูป [9]

ในรูปที่ 3.4 แสดงการกระจายของ Hydrostatic pressure ระหว่างการดึงขึ้นรูปจากกึ่งกลางจนถึงผิวของเส้นลวดตามภาคตัดแนวแกนระหว่างการดึงขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะต่างๆ, ความกดดันของ Hydrostatic pressure นั้นเกิดขึ้นรอบๆผิวของลวดในช่วงของการเปลี่ยนรูป Hydrostatic pressure จะเป็นความเค้นดิ่งที่กึ่งกลางของลวดสังเกตุการดึงขึ้นรูปจากการทดลองเมื่อครึ่งมุมคายที่มีค่ามากและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อย, ความเค้นดิ่ง (Hydrostatic pressure จะมีค่าติดลบ) จะมีค่ามากที่บริเวณกึ่งกลางของวัสดุซึ่งอาจเกิดรอยแตกร้าวในวัสดุได้ สำหรับในกรณีที่ครึ่งมุมคายมีค่าน้อยและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากการกระจายของ Hydrostatic pressure ในเส้นลวดนั้นการกระจายความเค้นจะกระจายครอบคลุมทั่วบริเวณในกรณีนี้จะเห็นว่าภายหลังการดึงจะเกิดความเสียหายบริเวณกึ่งกลางของวัสดุโดยจะเกิดรอยร้าวขึ้น

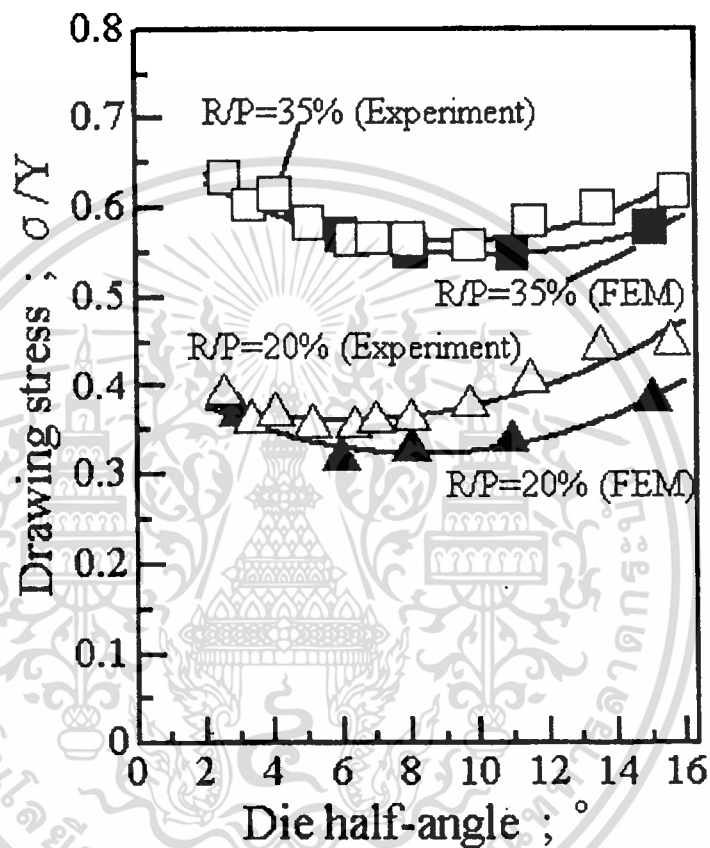


รูปที่ 3.5 แสดงพื้นฐานของงานวิจัยของการดึงลวดในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด [8]

ในรูปที่ 3.5 ในหลายๆงานวิจัยจะกล่าวหาถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการดึงลวดในกรณีของมุมคายและการดึงผ่านเพียงเทียวเดียวของการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด พลังงานที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนจะเป็นความเค้นในการดึงขึ้นรูปนั้นจะมีความเสียหาย, การเปลี่ยนรูปของวัสดุที่เป็น

เนื้อเดียวกันและแรงเฉือนภายใน (หรือ Redundant work) มุมคายนที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะกำหนดโดยค่าความเค้นในการดึงขึ้นรูปน้อยที่สุด ค่าของมุมคายนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดและแรงเสียดทาน พิจารณารูปแบบของกระบวนการและความเค้นตกค้างในการดึงลดมุมคายนที่เล็กมากๆและใหญ่มากๆจะเกิดความเค้นที่สูงมากด้วย

ความเค้นในการดึงขึ้นรูป = การเปลี่ยนรูปของวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน + แรงเฉือนภายใน + ความเสียดทาน



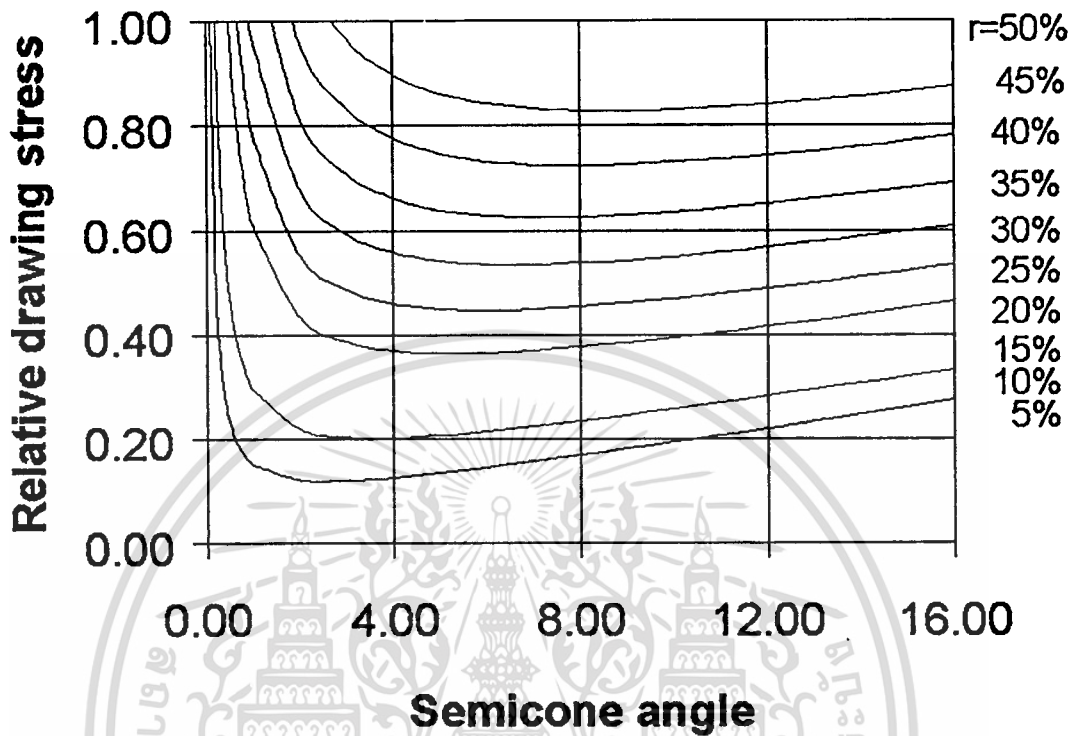
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครึ่งมุมคายนโดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผลของการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ [11]

จากรูปที่ 3.6 เป็นผลที่ได้จากการทดลองใช้ขนาดครึ่งมุมคายนที่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14 และ 16 องศา ค่าความเค้นระหว่างการดึงขึ้นรูปของลวดทองแดงที่อุณหภูมิห้องในแต่ละครึ่งมุมคายนที่ได้นั้นแสดงในรูป ค่าความเค้นต่ำสุดของการลดพื้นที่หน้าตัดลง 20 เปอร์เซ็นต์อยู่ที่ครึ่งมุมคายน 6 องศาและที่ครึ่งมุมคายน 8 องศาสำหรับการลดพื้นที่หน้าตัดลง 35 เปอร์เซ็นต์

ผลกระทบของครึ่งมุมคายนและความเค้นในระหว่างการดึงขึ้นรูปลวดทองแดงด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (FEA) โดยทำการเปรียบเทียบให้เห็นในรูปผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะสูงกว่าผลที่ได้จากวิธี (FEA) แต่แนวโน้มที่เกิดขึ้นของการดึงขึ้นรูปจะมีลักษณะเดียวกันคือค่าความเค้นต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการลดพื้นที่หน้าตัดลง 20 เปอร์เซ็นต์อยู่ที่ครึ่งมุมคาย 6 องศาและที่ครึ่งมุมคาย 8 องศาสำหรับการลดพื้นที่หน้าตัดลง 35 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นขนาดของครึ่งมุมคายที่เหมาะสมที่สุดในการดึงขึ้นรูปหลอดทองแดง

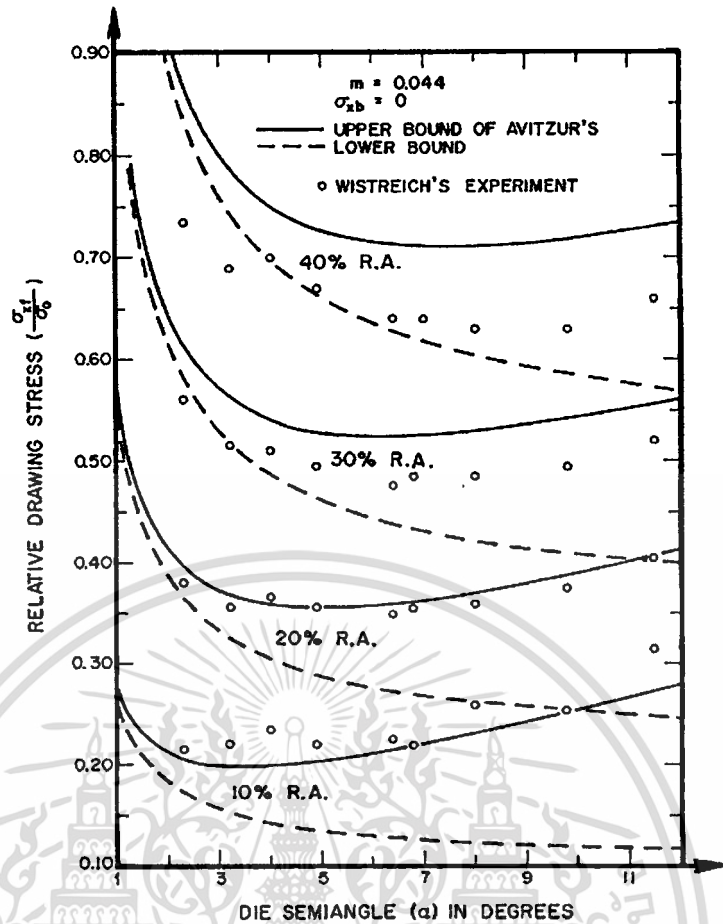


รูปที่ 3.7 แสดงผลกระทบของครึ่งมุมคายและเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์กับความเค้นในการดึงขึ้นรูป [14]

พื้นที่ซึ่งถูกกระทำและการเคลื่อนตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อของหลอดซึ่งมุมคายที่เล็กมาก ความยาวของช่วงที่สัมผัสกันระหว่างคายและหลอดนั้นมีมากและความเสียดทานนี้มีอำนาจครอบคลุมแรงที่กระทำอย่างทั่วถึง ขณะที่มุมคายเพิ่มขึ้นแรงเสียดทานจะลดลงอย่างมากและเกิดแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป มุมคายที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะดูจากกำลังงานที่ใช้ การเพิ่มขึ้นของมุมคายที่ใหญ่มากจะทำให้เกิดการผิครูปร่างไปคังนั้นมุมที่เหมาะสมที่สุดจะมีแรงเสียดทานและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเส้นหลอดซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญน้อยลง การเพิ่มขึ้นของมุมคายทำให้กำลังงานรวมเพิ่มขึ้น โดยที่การลดขนาดมากจะมีค่าความเค้นเฉือน (τ) ที่สูงขึ้นแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปจะมีค่าน้อยในช่วงของมุมคายที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดจากค่าตัวแปรแรงเสียดทาน (m)

สมมุติว่ารูปแบบของการเปลี่ยนรูปร่างนั้นเป็นพื้นฐานที่สำคัญอันหนึ่งของการไหลที่เกิดขึ้นจริงซึ่งรูปแบบที่สมมุตินั้นคล้ายคลึงกันแต่จะไม่เกิดขึ้นในรูปแบบที่สมมุติ นักแนวคิดนี้เกิดจากพื้นฐานประสบการณ์ รูปแบบและชนิดของวัสดุและโดยเหตุผลสามัญทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด [14]

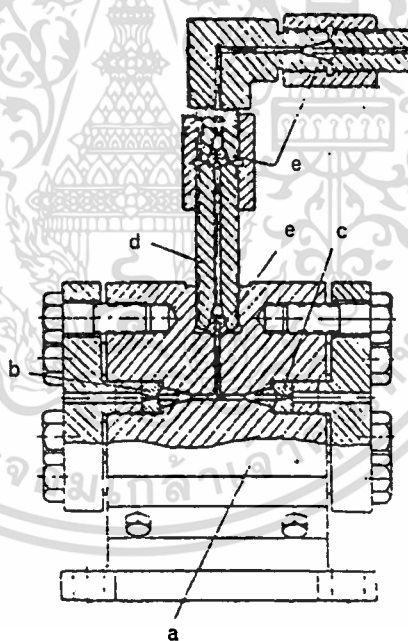
จากการพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดดังรูปที่ 3.8 จากการสังเกตการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุความเค้นที่เกิดขึ้นจริงเป็นส่วนหนึ่งในคุณลักษณะของการเคลื่อนตัวแต่เมื่อเคลื่อนการไหลตัวในเนื้อวัสดุนั้นลักษณะการเคลื่อนตัวมีเพิ่มสูงมากขึ้นในขณะที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นขนาดการลดพื้นที่หน้าตัดที่มีเปอร์เซ็นต์การลดขนาดน้อยขนาดของครึ่งมุมคายจะมีค่าน้อยตามไปด้วย ในขณะที่ขนาดของครึ่งมุมคายจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยเริ่มตั้งแต่ครึ่งมุมคายประมาณ 3 องศาจนถึงขนาดครึ่งมุมคาย 8 องศาขนาดครึ่งมุมคายจะเพิ่มขึ้นอีกอย่างต่อเนื่องโดยแปรผันกับเปอร์เซ็นต์การลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ R.A = 10 % จนถึง R.A = 40% ซึ่งไม่เกิดการแตกร้าวและแตกหัก รูปร่างของสวดทอลองที่ใช้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งจะผันแปรตามการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด, มุมคาย, ความเสียดทาน, วัสดุและตัวแปรอื่นๆ ขั้นตอนแรกในการพิจารณาของค่าต่างๆ ที่ได้นั้นโดยสมมุติว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่อยู่ในช่วงของการเปลี่ยนรูปของวัสดุตลอดแนวของการดึงขึ้นรูป

3.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกรณีศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความดันสารหล่อลื่น

การอัดสารหล่อลื่นซึ่งเป็นของเหลวในช่วงของการเปลี่ยนรูปภายใต้ความดันสูง (สูงถึง 5000 kg/cm^2) เพื่อลดแรงในการดึงขึ้นรูปลวดเหล็กถึง 20% และอะลูมิเนียม 25% โดยปรับปรุงความแข็งแรงและเพิ่มผลผลิตในการดึงขึ้นรูป [7].

การลดแรงในการดึงขึ้นรูปและเพิ่มอายุการใช้งานของคานยเมื่อการอัดสารหล่อลื่นที่ความดันสูงนั้นเป็นการปรับปรุงสภาวะของการหล่อลื่น แต่จะมีผลกระทบของแรงดึงด้านหลังอยู่บ้างและเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการอ่อนตัวของวัตถุและการเพิ่มของแรงดันที่สูงขึ้นในช่วงของการเปลี่ยนรูป การกำหนดค่าแฟกเตอร์ต่างหากที่มีผลกระทบต่อแรงดึงลวดทำให้สามารถเลือกการทำงานที่เหมาะสมที่สุดและเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการต่อไปในอนาคต [12].

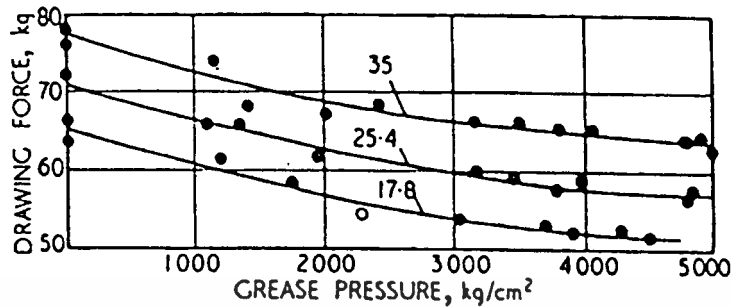
ท่อความดันสูงที่ใช้แรงกดอัดของสารหล่อลื่น (ค่าความดันของสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 5000 kg/cm^2) ที่ส่งมาจากภายนอกกระบวนการซึ่งแยกออกต่างหาก ลวดที่ถูกดึงจะผ่านตลอดคานยโดยวัสดุที่ใช้ทดลองจะเป็นอะลูมิเนียมและทองแดงและสารหล่อลื่นที่ใช้เป็น Daphne oil No. 44 [13].



รูปที่ 3.9 ชุดจับคานยที่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นสูง [7].

จากรูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นชุดหัวจับคานยที่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นจากภายนอกอัดความดันเข้าไปในช่วงของโซนการดึงขึ้นรูปซึ่งจะมีผลต่อแรงที่ด้านท้ายอยู่บ้างโดยความดันของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการอัดเข้าไ้มีความดันสูงสุดถึง 5000 kg/cm^2 ซึ่งเป็นความดันที่สูงมากในการทดลองแต่การนำมาปรับปรุงกระบวนการผลิตนั้นค่อนข้างยากและไม่คุ้มกับการลงทุน

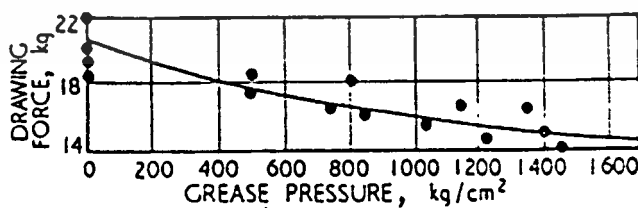
ความดันสารหล่อลื่นเกิดจากปั๊มไฮดรอลิกส์โดยใช้ส่วนผสมของน้ำมันก๊าดกับน้ำมันเครื่อง
ในสัดส่วนของน้ำมันก๊าด 30 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงลวดเหล็กและความดันสารหล่อลื่นก่อน
เข้าช่วงของการเปลี่ยนรูปซึ่งแสดงความแตกต่างของสัดส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด,
ความดันของสารหล่อลื่นและแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป [7].

จากรูปที่ 3.10 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของการดึงลวดขนาดลวดเหล็กโดยใช้ความ
ดันของสารหล่อลื่นอัดเข้าไปในโซนของการดึงขึ้นรูปจะเห็นได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่
หน้าตัดต่างกันค่าของแรงจะลดลงเป็นสัดส่วนกัน โดยแรงที่ใช้ดึงขึ้นรูปจะลดลงตามแรงดันของ
สารหล่อลื่นที่อัดเข้าไป ที่ความดันของสารหล่อลื่นน้อยๆค่าของแรงที่ใช้ดึงจะสูงมากและลดต่ำลง
เรื่อยๆค่าแรงที่ใช้ดึงต่ำสุดในกรณีนี้อยู่ที่ความดันสูงสุด 5000 kg/cm² ซึ่งความดันของสารหล่อลื่น
ในช่วง 4000 ถึง 5000 kg/cm² แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปจะลดลง 18 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ (ความเร็วที่
ใช้ในการดึงขึ้นรูปกรณีนี้มีค่า 5 เมตรต่อวินาที)

Oil pressure, kg/cm ²	0	1350	1950	3200	3800	4800
Drawing force, kg	71	65.5	61.5	60	57.5	57
Drawing speed, m/s	0.33	0.47	0.57	0.72	0.76	0.75

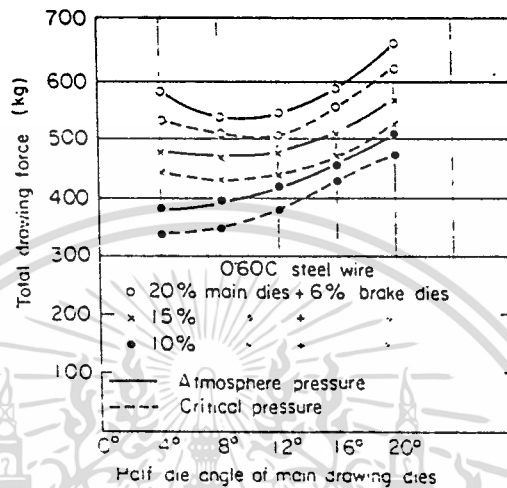


รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงลวดอะลูมิเนียมและความดันสารหล่อลื่น
ก่อนเข้าช่วงของการเปลี่ยนรูป (ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 17.7%) [7].

จากรูปที่ 3.11 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของการดึงลวดขนาดลวดอะลูมิเนียมโดยใช้
ความดันของสารหล่อลื่นอัดเข้าไปในโซนของการดึงขึ้นรูปโดยที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดลดลง 17.7 เปอร์เซ็นต์ ความดันเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 ถึง 1600 kg/cm^2 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของแรงที่ใช้ในการดึงจะสูงมากที่ความดันของสารหล่อลื่นต่ำๆและจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆแรงดึงต่ำสุดจะอยู่ที่ความดัน 1600 kg/cm^2 โดยค่าของแรงดึงจะลดลงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าแรงดึงต่ำสุดในกรณีการทดลองนี้



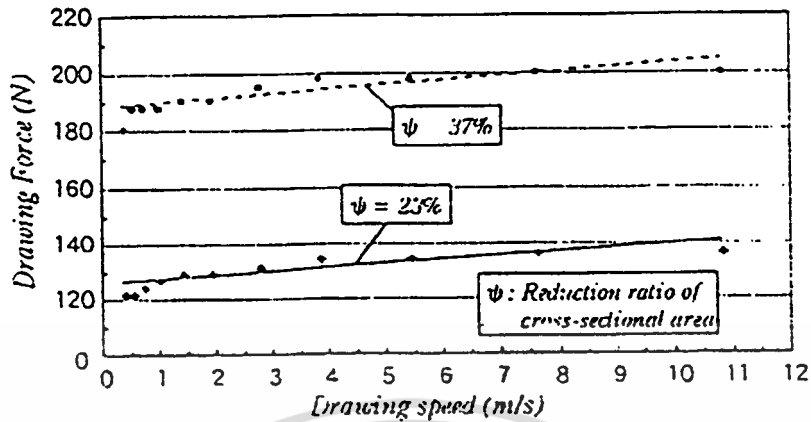
รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างครึ่งมุมตายและแรงรวมในการดึงขึ้นรูป [12].

จากรูปที่ 3.12 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างครึ่งมุมตายและแรงรวมในการดึงขึ้นรูปเป็นการดึงขึ้นรูปหลอดเหล็กที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดต่างกันโดยใช้ครึ่งมุมตายต่างๆตั้งแต่ 4 องศาจนถึง 20 องศาและใช้ความดันในการดึงลดขนาด 2 กรณีคือที่ความดันบรรยากาศและความดันวิกฤติ (5500 kg/cm^2) จะเห็นได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยๆครึ่งมุมตายที่ใช้ในการดึงที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 4 องศาและที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นครึ่งมุมตายที่ใช้ในการดึงที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 8 องศาและเมื่อพิจารณาที่ความดันของสารหล่อลื่นที่อัดเข้าไปในโซนการดึงขึ้นรูปที่ความดันบรรยากาศและความดันวิกฤติจะเห็นว่าค่าของแรงรวมจะลดลงเป็นสัดส่วนกับความดันสารหล่อลื่นค่าของแรงรวมที่ความดันสูงจะมีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดดังนั้นพอจะพิจารณาได้ว่าที่ความดันสูงและครึ่งมุมตายระหว่าง 4 องศาจนถึง 8 องศาจะเป็นความดันและครึ่งมุมตายที่เหมาะสมในกรณีของการทดลองนี้

3.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกรณีศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของความเร็ว

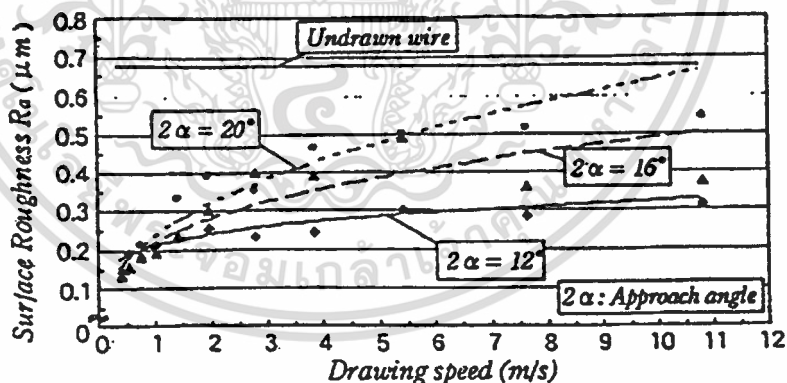
สำหรับความเร็วในการดึงขึ้นรูปนั้นแรงที่ใช้ในการดึงของหลอดทองเหลืองจะมีค่ามากกว่าหลอดทองแดงประมาณ 40% เนื่องมาจากการทำการทดสอบการดึงเส้นลวดทั้งสองชนิดจะได้ว่าหลอดทองเหลืองมีความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างสูงกว่าทองแดงและสำหรับลวดทั้งสองชนิดเมื่อความเร็วในการดึงลวดเพิ่มมากขึ้นแรงที่ใช้ในการดึงลวดก็เพิ่มมากขึ้นในสัดส่วนที่สามารถอนุมาน

ได้ว่าเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับความเร็ว เมื่อเทียบระหว่างความเร็วสูงสุดกับความเร็วต่ำสุดจะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการดึงลวดเพิ่มมากขึ้นถึงประมาณ 7 ถึง 15% [6].



รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงลวดและความเร็วในการดึงของลวดทองแดง ($2\alpha=12^\circ$) [6].

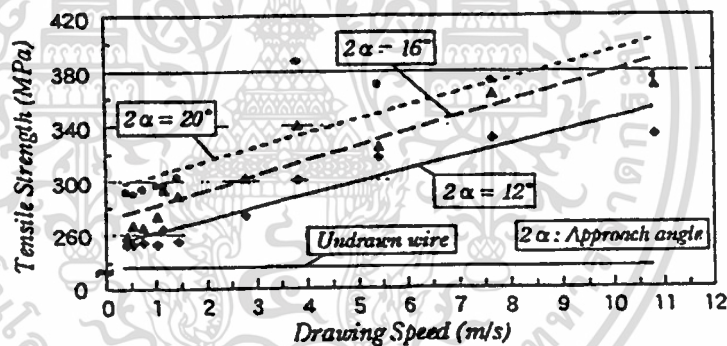
จากรูปที่ 3.13 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการดึงกับความเร็วของลวดทองแดง ที่มีมุมไหลเข้า $2\alpha=12^\circ$ และอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด $\psi = 23$ และ 37% จากรูปจะเห็นว่าเมื่อ ψ เพิ่มจาก 23% เป็น 37% แรงที่ใช้ในการดึงลวดจะเพิ่มขึ้นสูงถึง 50% โดยประมาณ เนื่องมาจากแรงที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปร่างเพิ่มมากขึ้นแนวโน้มดังกล่าวจะคล้ายคลึงกับในกรณีที่มีมุมไหลเข้า $2\alpha=16^\circ$ และ 20° และในกรณีที่ใช้ลวดทองเหลืองเป็นวัสดุทดลอง



รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวของเส้นลวดและความเร็วในการดึงของลวดทองแดงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 23 เปอร์เซ็นต์ ($\varnothing 1.2-\varnothing 0.95$ มม.) [6].

จากรูปที่ 3.14 กราฟแสดงค่าของความเรียบผิวเป็นค่าเฉลี่ย (R_a) และได้จากการวัดในแนวแกนของเส้นลวด จากกราฟจะเห็นว่าโดยรวมแล้วความเรียบผิวของชิ้นงานหลังการดึงจะดีขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นลวดก่อนดึงนั่นคือค่า R_a จะอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง $0.5 \mu\text{m}$ ในขณะที่เส้นลวดก่อนดึงมีค่า R_a ใกล้เคียงกับ $0.7 \mu\text{m}$ จากกราฟเดียวกันยังสามารถเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วในการดึงเพิ่ม

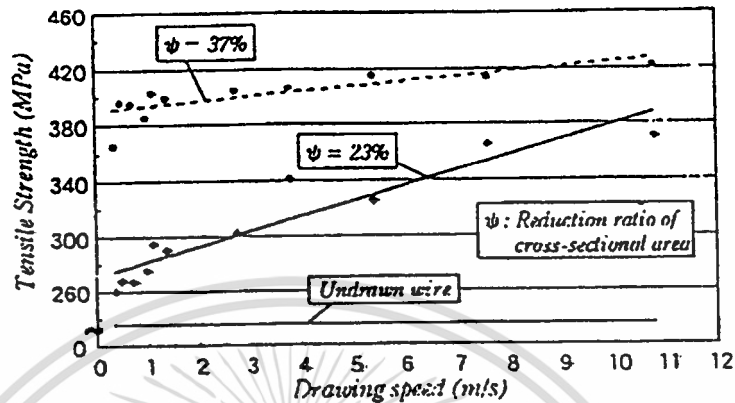
มากขึ้นความเรียบผิวของเส้นลวดจะหายาบเนื่องมาจากเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นระยะเวลาในการสัมผัสของลวดกับคายจะสั้นลงทำให้การถ่ายผิวระหว่างคายไปยังลวดได้น้อยลง ความเรียบผิวของเส้นลวดจึงไม่ดีเท่ากับกรณีของความเร็วต่ำๆและเมื่อมุมไหลเข้า 2α แคบลงความเรียบผิวของเส้นลวดหลังการดึงก็มีแนวโน้มที่จะดีขึ้นเนื่องมาจากเมื่อมุมไหลเข้า 2α แคบลงจะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างเส้นลวดกับคายเพิ่มมากขึ้น การถ่ายผิวของคายไปยังลวดเกิดขึ้นได้มากขึ้นความเรียบผิวของเส้นลวดหลังการดึงจึงมีแนวโน้มที่จะดีขึ้นส่วนอิทธิพลของอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ϕ ไม่ได้แสดงให้เห็นในที่นี้แต่จากผลการทดสอบจะได้ว่า ϕ ไม่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานมากนัก อาจเนื่องมาจากค่า ϕ ที่กำหนดในการทดลองครั้งนี้คือ 23 และ 37 เปอร์เซ็นต์ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูงทั้งสองค่า ดังนั้นความแตกต่างของค่าดังกล่าวที่มีต่อความเรียบผิวของชิ้นงานจึงเห็นได้ไม่ชัดเจน ส่วนกรณีของลวดทองเหลืองไม่ได้แสดงให้เห็นในที่นี้เช่นกันแต่จากผลการทดลองที่ได้พบว่าไม่ว่าภายใต้เงื่อนไขในการดึงใดๆก็ตามความเรียบผิวของชิ้นงานหลังการดึงจะดีขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับเส้นลวดก่อนดึง นั่นคือค่า R_a จะอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.3 μm ในขณะที่เส้นลวดก่อนดึงมีค่า R_a มากกว่า 0.6 μm ดังนั้นในกรณีของลวดทองเหลืองอิทธิพลของตัวแปรต่างๆจะเห็นได้ไม่ชัดเจนเหมือนกับในกรณีของทองแดง



รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดและความเร็วในการดึงลวดทองแดงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 23 เปอร์เซ็นต์ (ϕ 1.2- ϕ 0.95 มม.) [6].

จากรูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับความเร็วที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 23 เปอร์เซ็นต์และครั้งมุมคาย 6, 8 และ 10 องศาสำหรับลวดทองแดง จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วในการดึงเพิ่มมากขึ้นค่าความเค้นดึงสูงสุดของเส้นลวดหลังการดึงจะเพิ่มขึ้นหรือมีแนวโน้มที่ระดับการเกิด Strain hardening จะเพิ่มขึ้นทั้งที่อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อความเร็วในการดึงเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงที่กระทำต่อเส้นลวดมีค่ามากขึ้นและ Strain rate มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ระดับของการเกิด Strain hardening ในลวดเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาอิทธิพลของมุมคายจะเห็นว่าเมื่อมุมคายแคบลงค่าความเค้นดึงสูงสุดของเส้นลวดหลังการดึงจะน้อยลงทั้งที่แรงที่ใช้ในการดึงลวดจะมากกว่าในกรณี

ที่มุมคายกว้างก็ตาม สาเหตุดังกล่าวอาจเนื่องมาจากในกรณีมุมคายกว้างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายในของเส้นลวดจะมีแนวโน้มที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัด (Nonuniform deformation) มากกว่ากรณีของมุมคายแคบทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังจากผ่านกระบวนการดึงมาแล้วเกิดขึ้นได้ยากกว่าส่งผลให้ความเค้นดึงที่ได้จากการทำ Tensile test มีค่าสูงกว่ากรณีมุมคายแคบนั่นเอง



รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดและความเร็วในการดึงลวดทองแดง ($2\alpha=12^\circ$) [6].

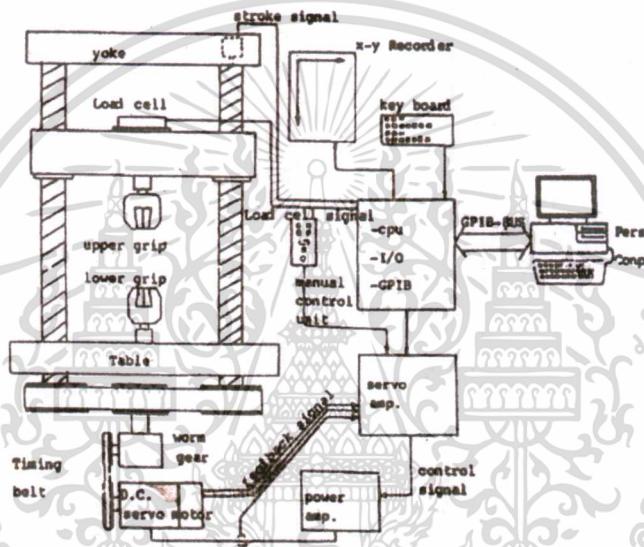
จากรูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงสูงสุดกับความเร็วที่มุมไหลเข้า 16 องศาและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 23 เปอร์เซ็นต์และ 37 เปอร์เซ็นต์ สำหรับลวดทองแดง จากกราฟจะเห็นได้ว่าการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นค่าความเค้นดึงสูงสุดของเส้นลวดหลังการดึงจะเพิ่มขึ้นหรือมีแนวโน้มที่ระดับการเกิด Strain hardening จะเพิ่มขึ้น ความแตกต่างดังกล่าวสามารถเห็นได้ชัดเจนที่ความเร็วในการดึงลวดต่ำๆ แต่เมื่อความเร็วในการดึงลวดเพิ่มมากขึ้นความแตกต่างกลับน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด แนวโน้มดังกล่าวนี้สอดคล้องกับในกรณีที่มุมทางเข้าของคาย 12 และ 20 องศาเช่นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเร็วสูงอิทธิพลของความเร็วที่มีต่อการเกิด Strain hardening จะเด่นชัดมากทำให้ความแตกต่างของการเกิด Strain hardening จากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลดน้อยลงไป ผลการทดลองโดยใช้ลวดทองเหลืองไม่ได้แสดงให้เห็นในที่นี้แต่แนวโน้มที่ได้จะใกล้เคียงกับลวดทองแดง

บทที่ 4

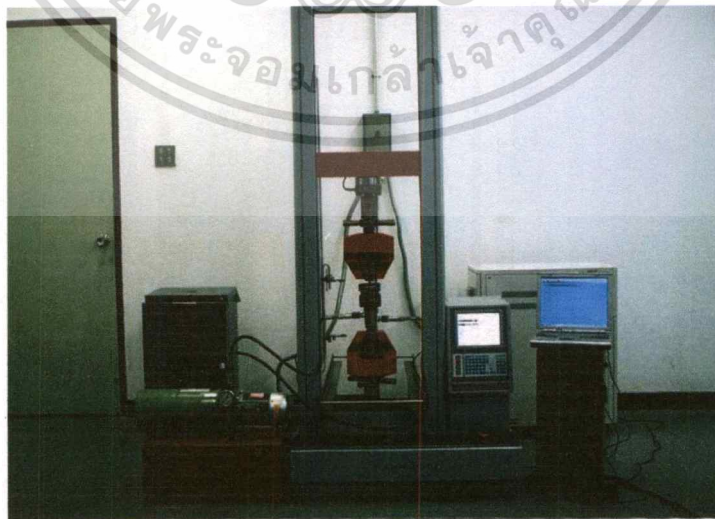
วิธีการทดลอง

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เป็นเครื่อง Testometric Mico 500 ระบบขับเคลื่อนวัดผลและบันทึกผลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์แรงดึงสูงสุด 100 KN.และแรงดึงที่ใช้ในการทดลอง 50 KN.



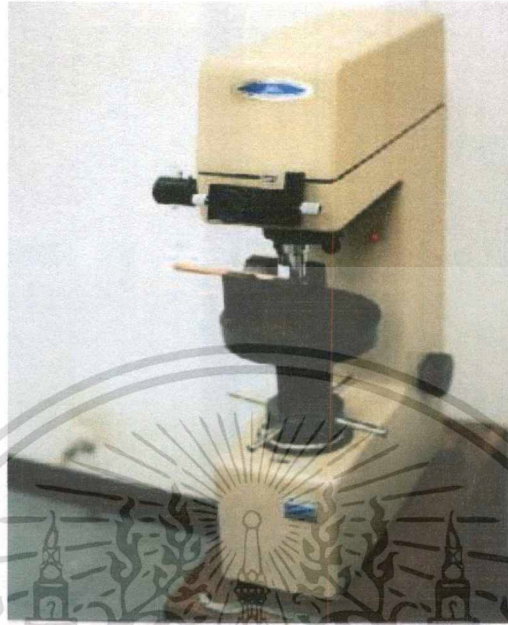
รูปที่ 4.1 แสดงไดอะแกรมของเครื่องทดลอง



รูปที่ 4.2 เครื่อง Testometric Mico 500 และชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เครื่องทดสอบความแข็งเป็นเครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวลที่ใช้ทดสอบความแข็งของลวดทองแดงหลังการดัดขึ้นรูป



รูปที่ 4.3 เครื่องทดสอบความแข็ง

4.1.3 ชุดหัวจับคายนและชุดกำเนิดความดันซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทดลอง

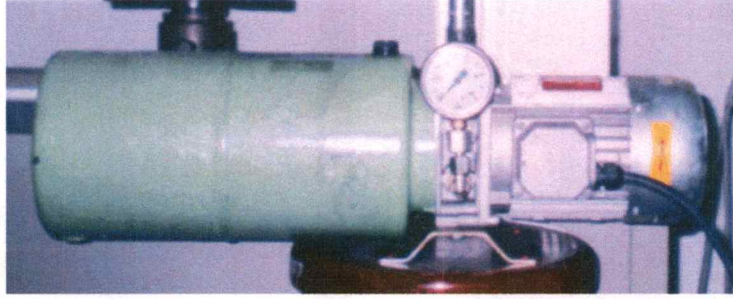


รูปที่ 4.4 คายที่ใช้ในการทดสอบทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์

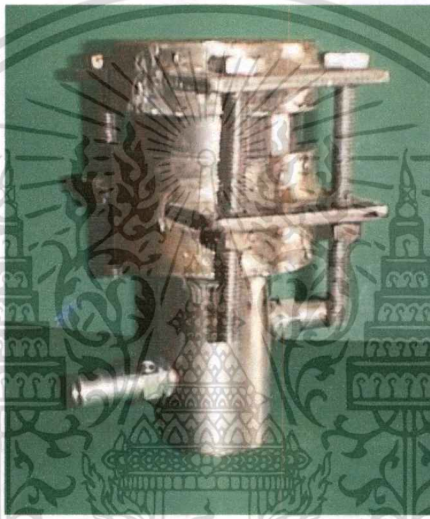
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคุณสมบัติของคายนที่ใช้ในการทดลอง

GRADE	WC (%)	CO (%)	HARDNESS (HRA)	TRS (Kg/mm ²)	PARTICLE SIZE (μm)
E 10	94	6	89.6-90.7	260 over	3

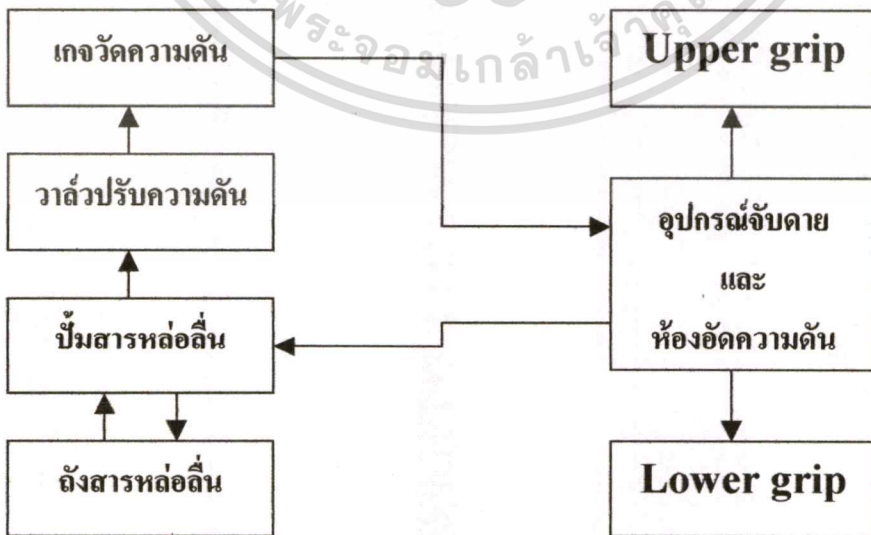
เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 เครื่องกำเนิดความดัน

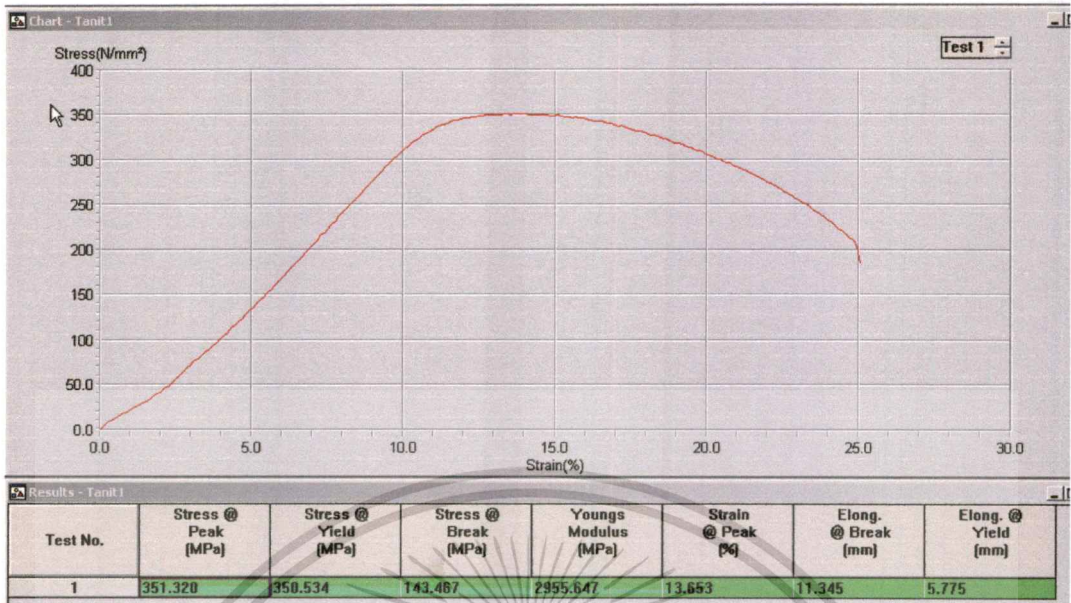


รูปที่ 4.6 ชุดจับคายที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลองอัดความดันสารหล่อลื่น

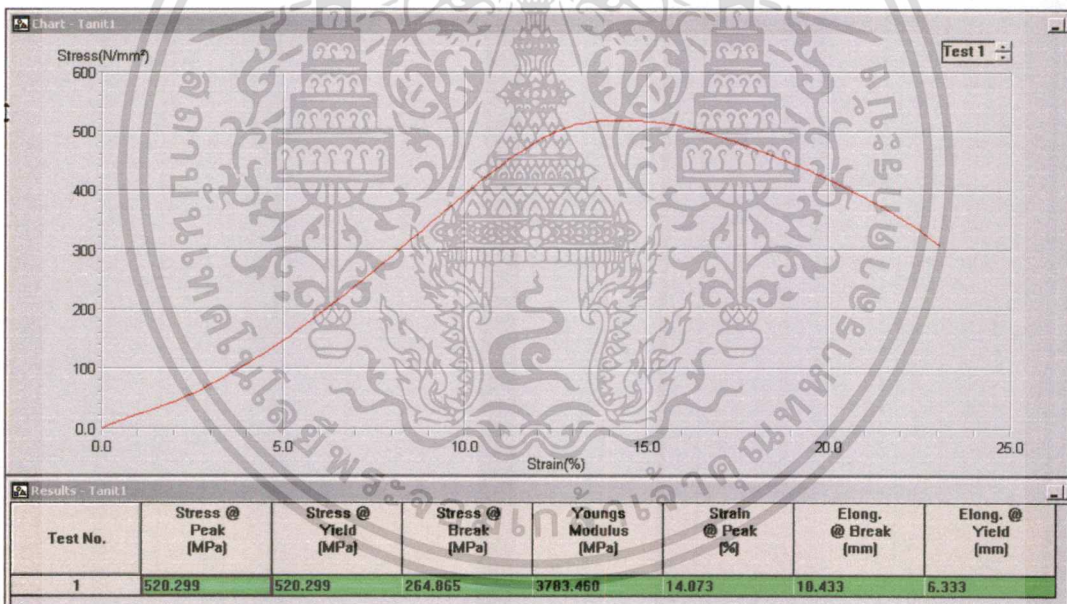


รูปที่ 4.7 แสดงไคอะแกรมของชุดกำเนิดความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของลวดทองแดงก่อนการทดลอง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของลวดทองแดงหลังการทดลอง

4.1.4 ลวดทองแดง (CuZn4Pb2) ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคุณสมบัติของทองแดงที่ใช้ในการทดลอง

GRADE	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Density (kg/dm ³)
CuZn4Pb2	94	4	2	8.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 สารหล่อลื่นชนิดน้ำ LUBRIOL V 719

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะคิดค่าเปอร์เซ็นต์การลดขนาดของพื้นที่หน้าตัด (Reduction Area) ของลวดดังนี้

$$RE = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (4.1)$$

เมื่อ RE = สัดส่วนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของลวด

A_1 = ขนาดพื้นที่หน้าตัดสุดท้ายของลวด (mm^2)

A_0 = ขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เริ่มต้นของลวด (mm^2)

D_1 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายของลวด (mm)

D_0 = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของลวด (mm)

4.2 วิธีทดลอง

4.2.1 วิธีทดลองการศึกษามลกระทบของครีชมุดคาย

ติดตั้งอุปกรณ์และชุดทดลองที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษทั้งหมดลงบนเครื่อง Testometric Mico 500 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเรียบร้อยแล้วนำลวดทดสอบใส่ในเครื่องมือดังกล่าวจากนั้นทำการตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทำการทดสอบ โดยตั้งค่าต่างๆ ที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ค่าความเร็วในการทดลอง = 2 mm/min
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามตารางที่ 8.1
3. กำหนดสเกลวัดแรงดึงสูงสุดไว้ = 50 kN
4. ตั้งชนิดการทดสอบไว้เป็นทดสอบดึง
5. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียสคงที่

ตารางที่ 4.3 แสดงสัดส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดที่ใช้ทดสอบ

Item	α ($^{\circ}$)	D_1 (mm)	A_1 (mm^2)	D_0 (mm)	A_0 (mm^2)	RE (%)
1	4, 6, 8, 10 and 12 $^{\circ}$	5.00	19.63	5.20	21.24	7.54
2	4, 6, 8, 10 and 12 $^{\circ}$	5.00	19.63	5.60	24.63	20.28
3	4, 6, 8, 10 and 12 $^{\circ}$	5.00	19.63	6.00	28.27	30.56
4	4, 6, 8, 10 and 12 $^{\circ}$	9.00	63.62	11.50	103.87	38.70

4.2.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการดึงเส้นลวดที่มีครีงมุดคาย 4, 6, 8, 10 และ 12 องศาตามลำดับ โดยใช้สารหล่อลื่นที่ไม่มีมีความดันเพื่อหาค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจากผลกระทบของครีงมุดคายที่แตกต่างกัน โดยลดเปอร์เซ็นต์ของขนาดพื้นที่หน้าตัดจำนวนทั้งสิ้น 4 ขนาดที่ 7.54, 20.28, 30.56 และ 38.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับดังตารางที่ 8.1
2. ตลอดจนการทดลองเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการพล็อตกราฟและผลของการทดลองลงในคอมพิวเตอร์
3. ทำซ้ำๆ หลายๆ ครั้งสำหรับแต่ละตัวอย่างจนแน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
4. นำลวดทดสอบที่ผ่านการดึง ผลการทดลองและกราฟที่ได้หลังจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลต่อไป

4.2.2 วิธีทดลองการศึกษาผลกระทบของความเร็ว

ติดตั้งอุปกรณ์และชุดทดลองที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษทั้งหมดลงบนเครื่อง Testometric Mico 500 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเรียบร้อยแล้วนำลวดทดสอบใส่ในเครื่องมือดังกล่าวจากนั้นทำการตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทำการทดสอบ โดยตั้งค่าต่างๆ ที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ค่าความเร็วในการทดลองที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 mm/min ตามลำดับ
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งทดสอบทั้งสิ้น 4 ขนาดตามตารางที่ 8.2
3. กำหนดสเกลวัดแรงดึงสูงสุดไว้ = 50 kN
4. ตั้งชนิดการทดสอบไว้เป็นทดสอบดึง
5. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียสคงที่

ตารางที่ 4.4 แสดงสัดส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดและความเร็วที่เปลี่ยนแปลงของลวดที่ใช้ทดสอบ

Item	V (mm/min)	D_1 (mm)	A_1 (mm ²)	D_0 (mm)	A_0 (mm ²)	RE (%)
1	30,60,90,120,150	17.88	251.09	20.00	314.16	20.0
2	30,60,90,120,150	9.00	63.62	10.50	86.59	26.5
3	30,60,90,120,150	9.00	63.62	11.50	103.87	38.7
4	30,60,90,120,150	15.00	176.72	20.00	314.16	43.8

4.2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการดึงเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและลดขนาดพื้นที่หน้าตัดตามตารางที่ 8.2 โดยทำการปรับเปลี่ยนความเร็วที่ 30, 60, 90, 120 และ 150 mm/min ตามลำดับ
2. ตลอดจนการทดลองเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการพล็อตกราฟและผลของการทดลองลงในคอมพิวเตอร์
3. ทำซ้ำๆหลายๆครั้งสำหรับแต่ละตัวอย่างจนแน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
4. นำลวดทดสอบที่ผ่านการดึง ผลการทดลองและกราฟที่ได้หลังจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลต่อไป

4.2.3 วิธีทดลองการศึกษาผลกระทบของความดันของสารหล่อลื่น

ติดตั้งอุปกรณ์และชุดทดลองที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษทั้งหมดลงบนเครื่อง Testometric Mico 500 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเรียบร้อยแล้วนำลวดทดสอบใส่ในเครื่องมือดังกล่าวจากนั้นทำการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทำการทดสอบโดยตั้งค่าต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ค่าความเร็วในการทดลอง = 30 mm/min
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามตารางที่ 8.3
3. กำหนดสเกลวัดแรงดึงสูงสุดไว้ = 50 kN
4. ตั้งชนิดการทดสอบไว้เป็นทดสอบดึง
5. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียสคงที่

ตารางที่ 4.5 แสดงสัดส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวดและความดันของสารหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงในการทดสอบ

Item	P (bar)	D_1 (mm)	A_1 (mm ²)	D_0 (mm)	A_0 (mm ²)	RE (%)
1	ไม่ใช้,0,30,60,100	5.00	19.62	5.20	21.24	7.54
2	ไม่ใช้,0,30,60,100	5.00	19.62	5.60	24.63	20.28
3	ไม่ใช้,0,30,60,100	5.00	19.62	6.00	28.27	30.50
4	ไม่ใช้,0,30,60,100	9.00	63.62	12.50	112.72	48.00

4.2.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการดึงเส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและลดขนาดพื้นที่หน้าตัดตามตารางที่ 8.3 โดยไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่น โดยขณะใช้สารหล่อลื่นได้ปรับเปลี่ยนความดันของสารหล่อลื่นที่ 0, 30, 60 และ 100 บาร์ตามลำดับ
2. ตลอดจนการทดลองเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการ พล็อตกราฟและผลของการทดลองลงในคอมพิวเตอร์
3. ทำซ้ำๆหลายๆครั้งสำหรับแต่ละตัวอย่างจนแน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
4. นำลวดทดสอบที่ผ่านการดึง ผลการทดลองและกราฟที่ได้หลังจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลต่อไป



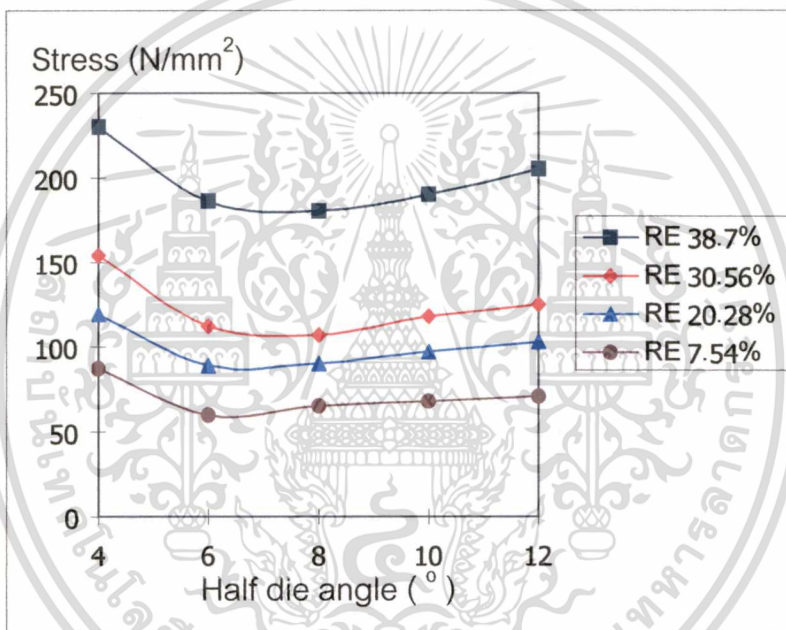
บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 ผลที่ได้จากการทดลอง

5.1.1 ผลทดลองการศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมคาย

จากการทดลองดิ่งขึ้นทดสอบลวดทองแดง โดยใช้ครึ่งมุมคายขนาดต่างๆกันจะได้ผลทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครึ่งมุมคาย

ในรูปที่ 5.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครึ่งมุมคายที่ได้จากการทดลองดิ่งเส้นลวดทองแดงที่มี \varnothing 5.20 mm ลดขนาดลงเหลือ \varnothing 5.00 mm , RE 7.54%, Speed 2 mm/min, Angle 4°, 6°, 8°, 10° and 12° โดยใช้สารหล่อลื่นที่ไม่มี ความดันจะเห็นว่าครึ่งมุมคายที่น้อยมากๆจะมีผลให้เกิดความเค้นที่ใช้ในการดิ่งสูงทั้งนี้ เป็นผลมาจากครึ่งมุมคายแคบมากจนก่อให้เกิดแรงต้านที่สูงมากในบริเวณที่เส้นลวดสัมผัสกับผิวคายสำหรับที่ครึ่งมุมคาย 4°, 6°, 8°, 10° และ 12° จะเห็นว่าความเค้นที่ใช้ดิ่งสูงสุดจะเกิดที่ครึ่งมุมคาย 4° และที่ครึ่งมุมคาย 6° จะใช้แรงที่ดิ่งในเส้นลวดต่ำที่สุดซึ่งถือเป็นขนาดของครึ่งมุมคายที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้

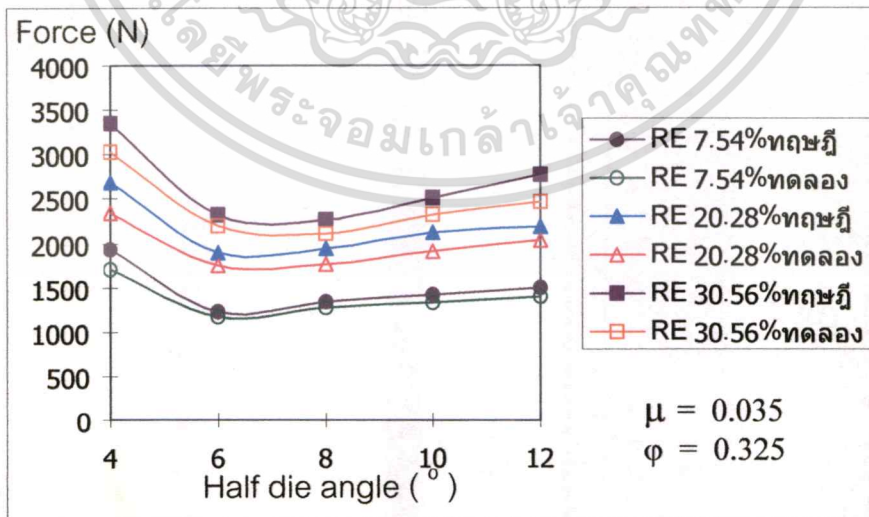
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครี้งมุดคายที่ได้จากการทดลองดิ่งเส้นลวดทองแดงที่มี \varnothing 5.60 mm ลดขนาดลงเหลือ \varnothing 5.00 mm , RE 20.28%, Speed 2 mm/min, Angle 4° , 6° , 8° , 10° and 12° ความเค้นที่ใช้ดิ่งสูงสุดจะเกิดที่ครี้งมุดคาย 4° และที่ครี้งมุดคาย 6° จะใช้แรงที่ดิ่งเส้นลวดต่ำที่สุดซึ่งถือเป็นขนาดของครี้งมุดคายที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้

สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครี้งมุดคายที่ได้จากการทดลองดิ่งเส้นลวดทองแดงที่มี \varnothing 6.00 mm ลดขนาดลงเหลือ \varnothing 5.00 mm , RE 30.56%, Speed 2 mm/min, Angle 4° , 6° , 8° , 10° and 12° ความเค้นที่ใช้ในการดิ่งสูงสุดจะเกิดที่ครี้งมุดคาย 4° และที่ครี้งมุดคาย 8° จะใช้แรงที่ดิ่งเส้นลวดต่ำที่สุดซึ่งถือเป็นขนาดครี้งมุดคายที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้

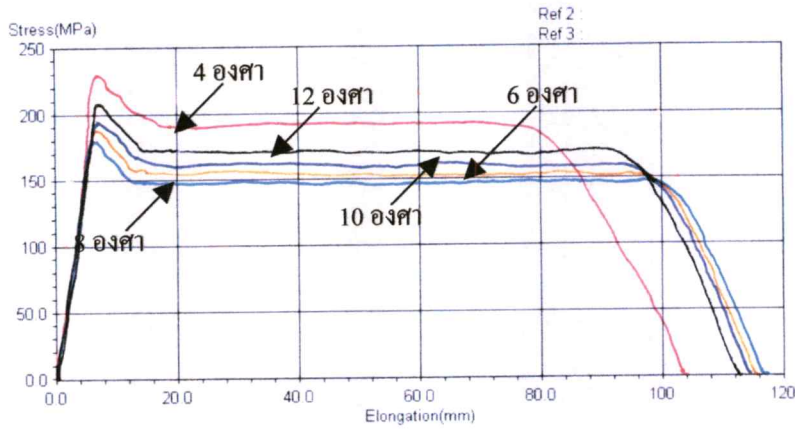
สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครี้งมุดคายที่ได้จากการทดลองดิ่งเส้นลวดทองแดงที่มี \varnothing 11.50 mm ลดขนาดลงเหลือ \varnothing 9.00 mm , RE 38.7%, Speed 2 mm/min, Angle 4° , 6° , 8° , 10° and 12° ความเค้นที่ใช้ในการดิ่งสูงสุดจะเกิดที่ครี้งมุดคาย 4° และที่ครี้งมุดคาย 8° จะใช้แรงที่ดิ่งเส้นลวดต่ำที่สุดซึ่งถือเป็นขนาดครี้งมุดคายที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้

ดังนั้นพอจะสรุปแนวโน้มได้ว่าครี้งมุดคายที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6° ถึง 8° โดยที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยมุดคายที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6° และ 8° สำหรับการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดมากๆ โดยจะแสดงให้เห็นในกราฟดังต่อไปนี้



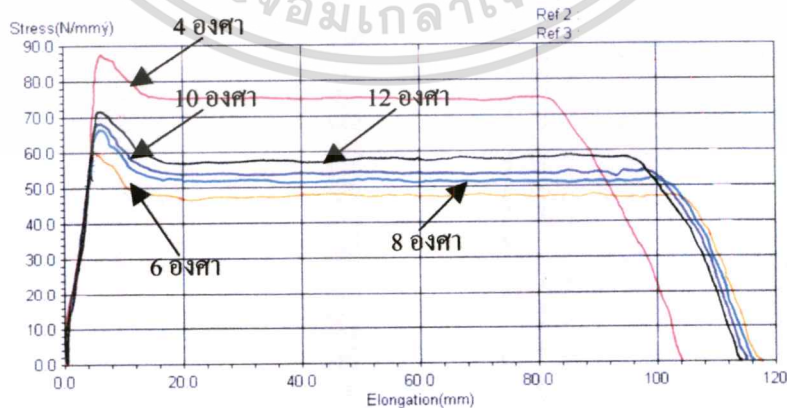
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและขนาดของครี้งมุดคายที่ได้จากการคำนวณหาค่าจาก Seibel's Method และผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงลวดทองแดงและระยะยืดที่ RE = 38.7%

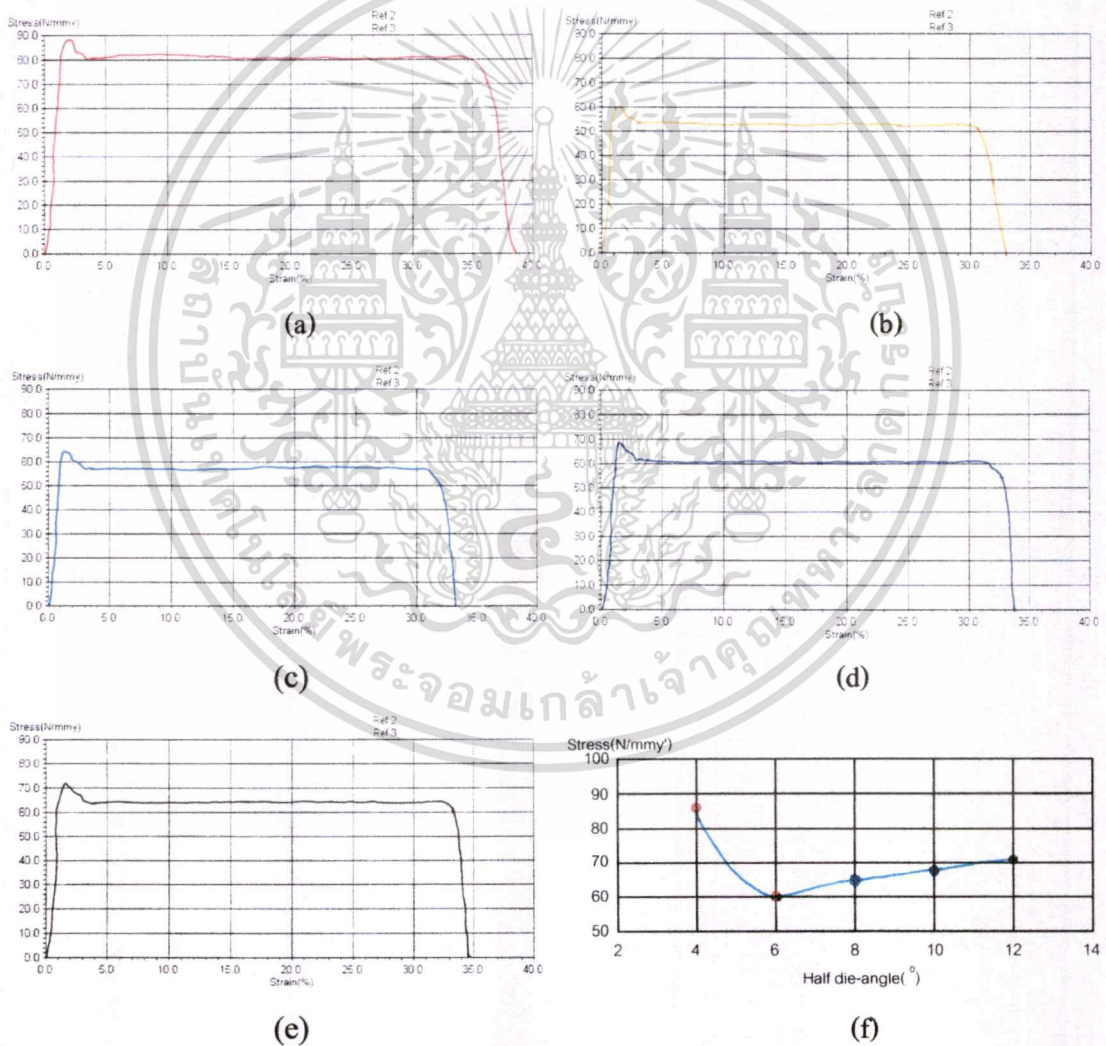
จากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ชัดเจนจากชิ้นงานที่ผ่านการดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 38.7 % ผลกระทบของครึ่งมุมคดที่มีต่อแรงที่ใช้ดึงกับระยะยืด พบว่าขนาดของครึ่งมุมคดมีผลอย่างมากในการดึงลวดผ่านคดจากผลของการทดลองที่ครึ่งมุมคด 4° จะมีผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดที่ 230 MPa และระยะยืดจะมีเพียง 0.5 % เท่านั้น ทั้งนี้มีผลมาจากการที่ครึ่งมุมคดมีขนาดแคบจนก่อให้เกิดแรงต้านที่สูงมากในบริเวณที่เส้นลวดสัมผัสกับผิวคด สำหรับคดที่มีขนาดครึ่งมุมคด 6° ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าที่ 186 MPa และระยะยืดจะมีค่า 7.24 % สำหรับคดที่มีขนาดครึ่งมุมคด 8° ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าที่ 180 MPa และระยะยืดจะมีค่า 8.98 % สำหรับคดที่มีขนาดครึ่งมุมคด 10° ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าที่ 190 MPa และระยะยืดจะมีค่า 6.26 % สำหรับคดที่มีขนาดครึ่งมุมคด 12° ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าที่ 205 MPa และระยะยืดจะมีค่า 6.10 % จะเห็นว่าความเค้นต่ำสุดจะมีระยะยืดสูงสุดดังนั้นจากการทดลองครั้งนี้ที่การดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 38.7 % ขนาดของมุมคดที่เหมาะสมจะอยู่ที่ครึ่งมุมคด 8° ความเค้นดึงมีค่าที่ 180 MPa และระยะยืดจะมีค่า 8.98 % นั่นเอง



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงลวดทองแดงและระยะยืดที่ RE = 7.54%

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ชัดเจนจากชิ้นงานที่ผ่านการดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 7.54 % ผลกระทบของครึ่งมุมคดที่มีต่อแรงที่ใช้ดึงกับระยะยืด พบว่าขนาดของครึ่งมุมคดมีผลอย่างมากในเอกสารนี้เขียนเนื้อหาที่ละเอียดและให้ตัวอย่างการเขียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขและบริบทเช่นนี้หากมีคำถามใดๆ โปรดติดต่อผู้จัดทำเอกสารนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

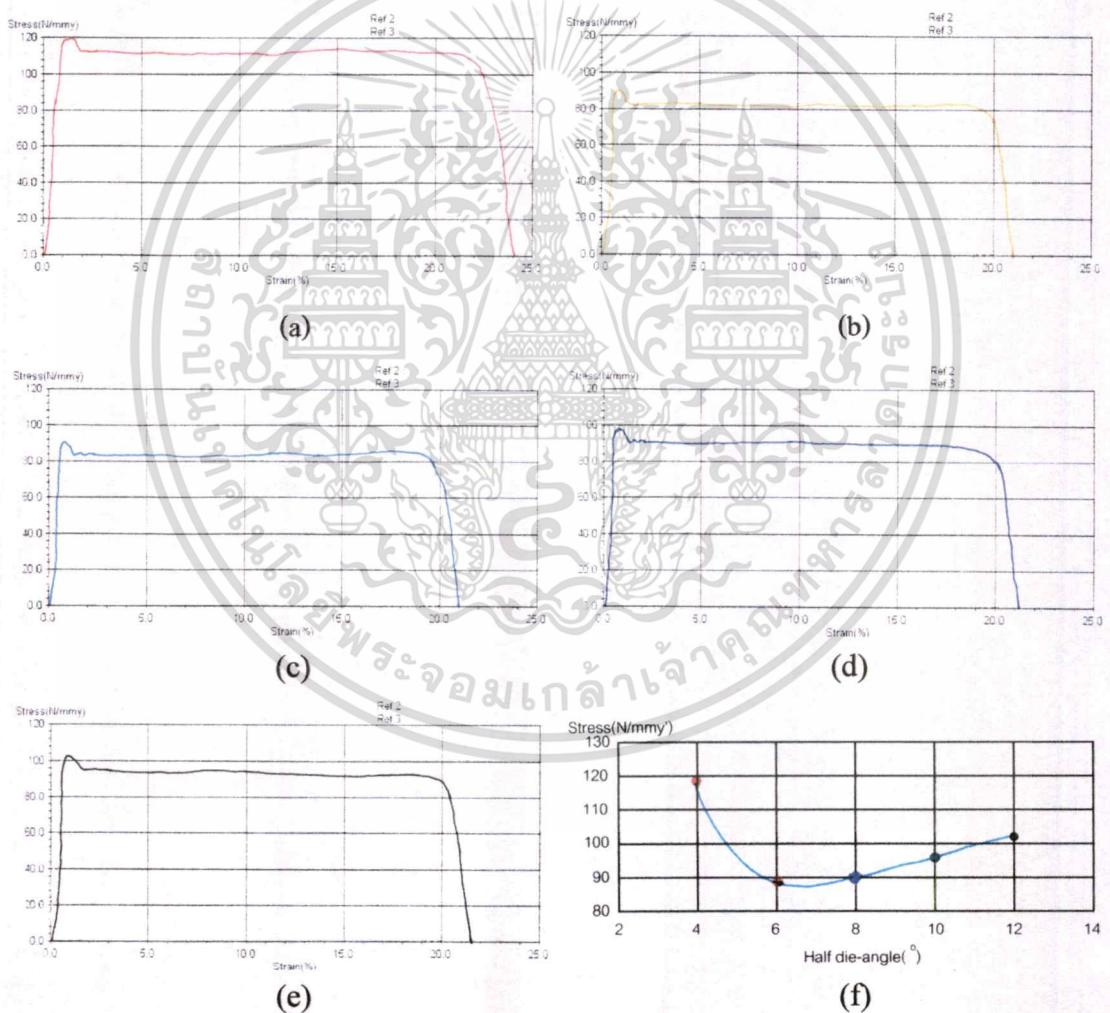
การดึงลวดผ่านคายจากผลของการทดลองที่ครึ่งมุมคาย 4° จะมีผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดที่ 87 MPa และระยะยืดจะมีเพียง 0.1 % เท่านั้น ทั้งนี้มีผลมาจากการที่ครึ่งมุมคายมีขนาดแคบจนก่อให้เกิดแรงต้านที่สูงมากในบริเวณที่เส้นลวดสัมผัสกับผิวคาย สำหรับคายที่มีขนาดครึ่งมุมคาย 6° ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าที่ 60 MPa และระยะยืดจะมีค่า 7.28 % คายที่มีขนาดครึ่งมุมคาย 8° ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าที่ 65 MPa และระยะยืดจะมีค่า 5.87 % คายที่มีขนาดครึ่งมุมคาย 10° ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าที่ 68 MPa และระยะยืดจะมีค่า 4.96 % คายที่มีขนาดครึ่งมุมคาย 12° ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าที่ 71 MPa และระยะยืดจะมีค่า 4.49 % จะเห็นว่าความเค้นต่ำสุดจะมีระยะยืดสูงสุด ดังนั้นจากการทดลองครั้งนี้ที่การดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 7.54 % ขนาดของมุมคายที่เหมาะสมจะอยู่ที่ครึ่งมุมคาย 6° ความเค้นดึงมีค่าที่ 60 MPa และระยะยืดจะมีค่า 7.28 % นั่นเอง



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด $\varnothing 5.20$ mm ลดขนาดลงเหลือ $\varnothing 5.00$ mm , RE 7.54%, Speed 2 mm/min, Angle 4° , 6° , 8° , 10° and 12°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.5 (a) ครึ่งมุมคด 4 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 87 Mpa (b) ครึ่งมุมคด 6 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 60 Mpa (c) ครึ่งมุมคด 8 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 65 Mpa (d) ครึ่งมุมคด 10 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 68 Mpa (e) ครึ่งมุมคด 12 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 71 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของครึ่งมุมคดที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ครึ่งมุมคด 4 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 87 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองครั้งนี้ และจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ครึ่งมุมคด 6 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 60 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ครึ่งมุมคด 6 องศา จะเป็นขนาดครึ่งมุมคดที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 7.54 % ซึ่งทำให้ความเค้นลดลงถึงประมาณ 31.03 %

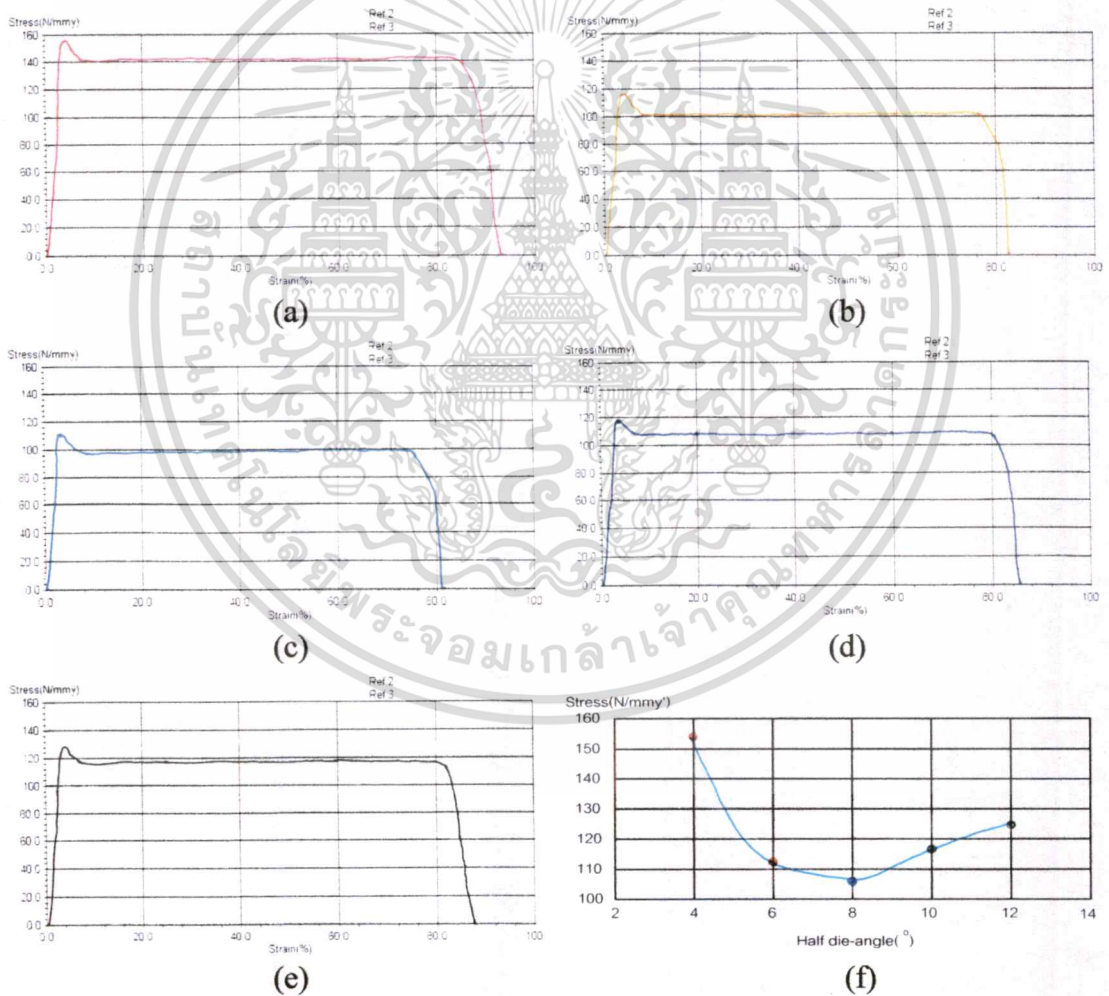


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด \varnothing 5.60 mm ลด

ขนาดลงเหลือ \varnothing 5.00 mm , RE 20.28%, Speed 2 mm/min, Angle 4° ,6° ,8° ,10° and 12°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6 (a) ครึ่งมุมตาย 4 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 119 Mpa (b) ครึ่งมุมตาย 6 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 89 Mpa (c) ครึ่งมุมตาย 8 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 90 Mpa (d) ครึ่งมุมตาย 10 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 97 Mpa (e) ครึ่งมุมตาย 12 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 103 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของครึ่งมุมตายที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ครึ่งมุมตาย 4 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 119 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองครั้งนี้ และจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ครึ่งมุมตาย 6 องศา จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 89 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ครึ่งมุมตาย 6 องศา จะเป็นขนาดครึ่งมุมตายที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 20.28 % ซึ่งทำให้ความเค้นลดลงถึงประมาณ 25.21 %



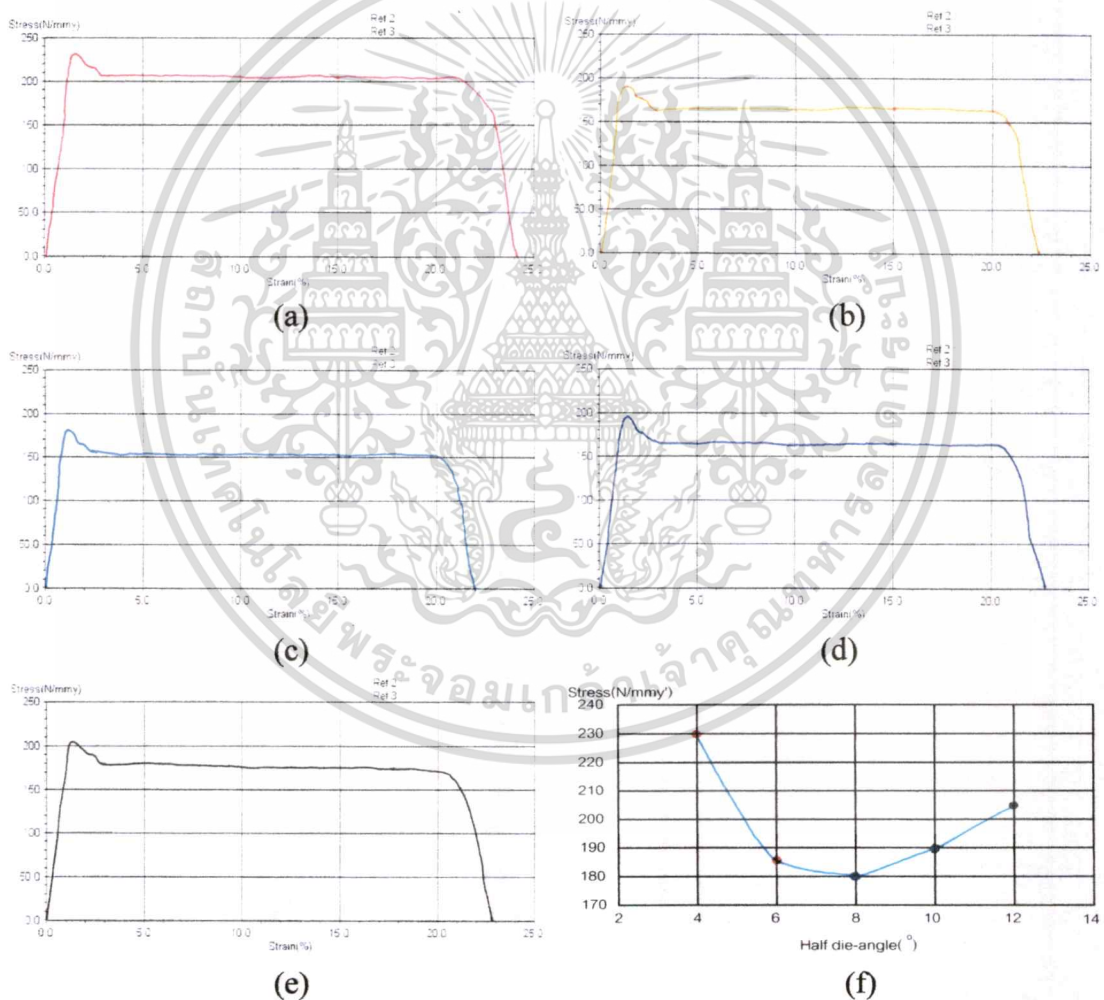
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด $\varnothing 6.00$ mm ลด

ขนาดลงเหลือ $\varnothing 5.00$ mm , RE 30.56%, Speed 2 mm/min, Angle 4° , 6° , 8° , 10°

and 12°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.7 (a) ครึ่งมุมตาย 4 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 154 Mpa (b) ครึ่งมุมตาย 6 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 112 Mpa (c) ครึ่งมุมตาย 8 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 107 Mpa (d) ครึ่งมุมตาย 10 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 118 Mpa (e) ครึ่งมุมตาย 12 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 125 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของครึ่งมุมตายที่นำมาพิจารณา จะเห็นว่าที่ครึ่งมุมตาย 4 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 154 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองครั้งนี้ และจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ครึ่งมุมตาย 8 องศา จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 107 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ครึ่งมุมตาย 8 องศา จะเป็นขนาดครึ่งมุมตายที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 30.56 % ซึ่งทำให้ความเค้นลดลงถึงประมาณ 30.52 %



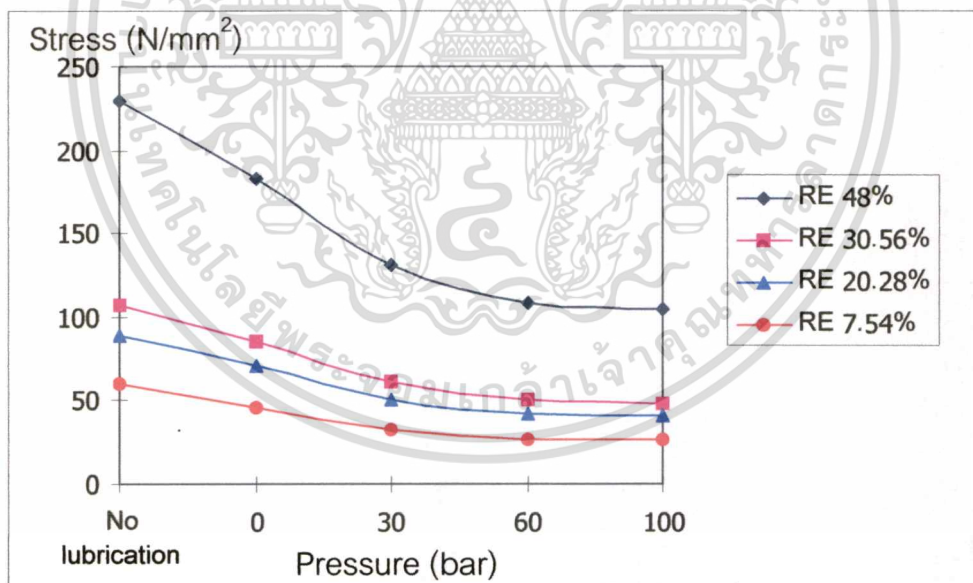
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด \varnothing 11.50 mm ลดขนาดลงเหลือ \varnothing 9.00 mm , RE 38.7%, Speed 2 mm/min, Angle 4° ,6° ,8° ,10° and 12°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.8 (a) ครึ่งมุมคาย 4 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 230 Mpa (b) ครึ่งมุมคาย 6 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 186 Mpa (c) ครึ่งมุมคาย 8 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 180 Mpa (d) ครึ่งมุมคาย 10 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 190 Mpa (e) ครึ่งมุมคาย 12 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 205 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของครึ่งมุมคายที่นำมาพิจารณา จะเห็นว่าที่ครึ่งมุมคาย 4 องศา มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 230 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองครั้งนี้ และจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ครึ่งมุมคาย 8 องศา จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 180 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ครึ่งมุมคาย 8 องศา จะเป็นขนาดครึ่งมุมคายที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 38.7 % ซึ่งทำให้ความเค้นลดลงถึงประมาณ 21.74 %

5.1.2 ผลทดลองการศึกษาผลกระทบของความดันสารหล่อลื่น

จากการทดลองดึงชิ้นทดสอบลวดทองแดงโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นที่ความดันต่างๆกันจะได้

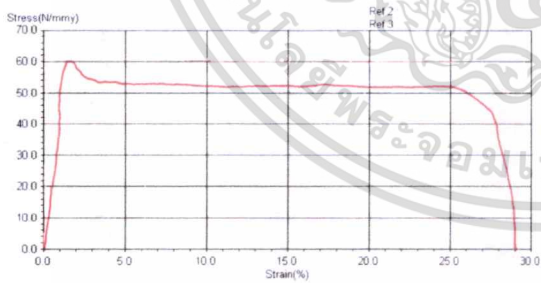


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอิทธิพลของความดันสารหล่อลื่น

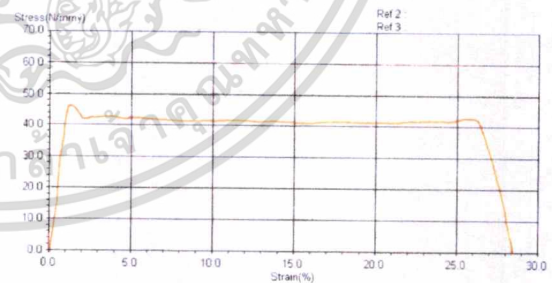
ในรูปที่ 5.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอิทธิพลของความดันสารหล่อลื่น โดยความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากในขณะดึงลวดทองแดงที่ใช้ในการทดลองโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นและความเค้นจะลดต่ำลงในขณะที่ความดันสูงขึ้น โดยจะมีค่าลดลงมาเรื่อยๆ พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

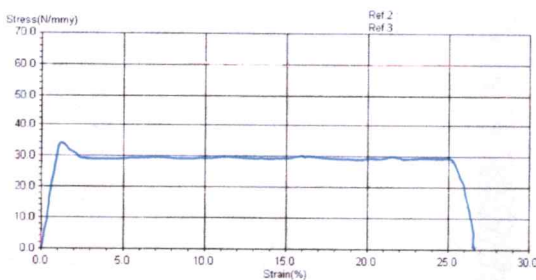
ที่เปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดจะเห็นว่าในกรณีการลดพื้นที่หน้าตัดที่สูงมากความเค้นในการดึงขึ้นรูปก็จะลดลงอย่างมากเช่นกันและในกรณีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดน้อยๆความเค้นในการดึงขึ้นรูปก็จะลดน้อยลงด้วยแต่ถ้าเปรียบเทียบในลักษณะของการลดลงในรูปของเปอร์เซ็นต์จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีแนวโน้มในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นความเค้นในการดึงจะสูงมากเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างลวดที่สัมผัสกับผิวคายที่ใช้ดึงและแรงเฉือนภายในเนื้อวัสดุก็จะสูงตามไปด้วย สำหรับในกรณีของการใช้สารหล่อลื่นความเค้นในการดึงจะลดลงเป็นอย่างมากเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างลวดที่สัมผัสกับผิวคายลดลงเนื่องจากฟิล์มสารหล่อลื่นจะแทรกเข้าไปในโชนของการดึงขึ้นรูปทำให้แรงเฉือนภายในเนื้อวัสดุลดลงเป็นอย่างมากด้วยเมื่อเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วพอจะประมาณค่าการลดลงของความเค้นในการดึงขึ้นรูปขณะที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นกับการใช้สารหล่อลื่นที่ความดัน 0 บาร์ค่าความเค้นจะลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ใช้ความดันสารหล่อลื่นที่ 30 บาร์ค่าความเค้นจะลดลงอีกประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ส่วนที่ความดันสารหล่อลื่นที่ 60 บาร์ค่าความเค้นจะลดลงอีกประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์และที่ความดัน 100 บาร์ค่าความเค้นจะลดลงอีกประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าความเค้นต่ำที่สุดในการทดลองครั้งนี้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความดันของสารหล่อลื่นที่สูงมากในโชนการดึงขึ้นรูปจะทำให้ค่าความเค้นลดลงและเป็นที่น่าสังเกตว่าที่ความดันสารหล่อลื่นระหว่าง 60 บาร์และ 100 บาร์ค่าความเค้นในการดึงขึ้นรูปจะแตกต่างกันไม่มากถือเป็นช่วงของความดันที่เหมาะสมในการดึงลดขนาดลวดทองแดงที่สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตได้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตลวดในโอกาสต่อไป



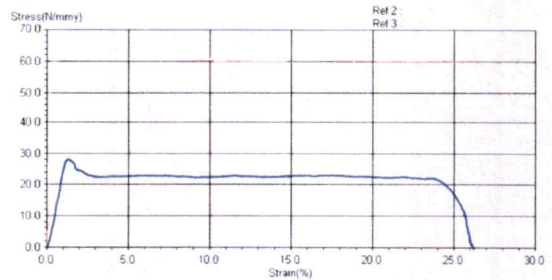
(a)



(b)

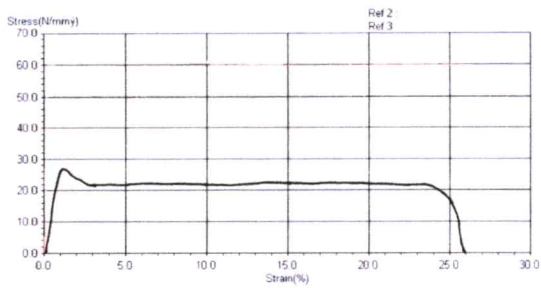


(c)

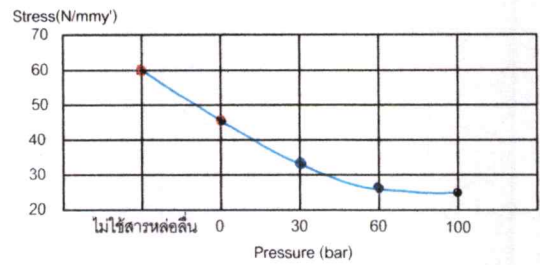


(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



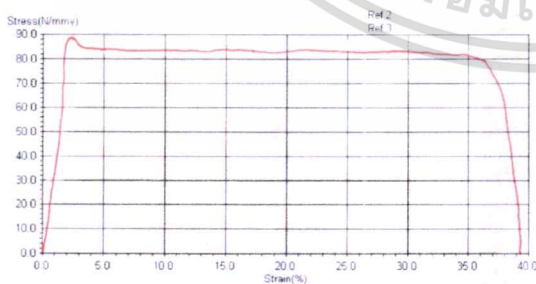
(e)



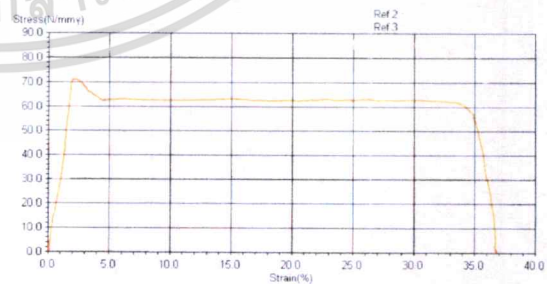
(f)

รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด $\varnothing 5.20$ mm ลดขนาดลงเหลือ $\varnothing 5.00$ mm , RE 7.54%, Speed 30 mm/min, ไม่ใช้ความดัน, ใช้ความดัน 0, 30, 60 และ 100 บาร์

จากรูปที่ 5.10 (a) ไม่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นจะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 60 Mpa (b) ความดัน 0 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 46 Mpa (c) ความดัน 30 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 33 Mpa (d) ความดัน 60 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 27 Mpa (e) ความดัน 100 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 26 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นของการไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นที่ความดันขนาดต่างๆที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ไม่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 60 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองกรณีนี้และจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นขนาด 100 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 26 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ความดัน 100 บาร์จะเป็นขนาดความดันของสารหล่อลื่นที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 7.54 % ซึ่งทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงประมาณ 56.67 %

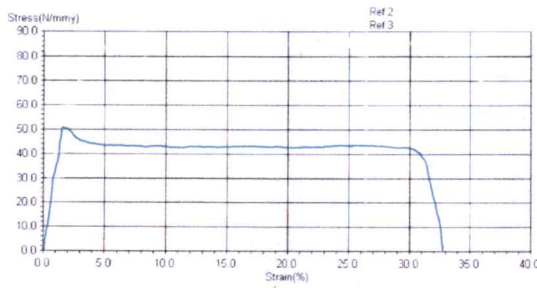


(a)

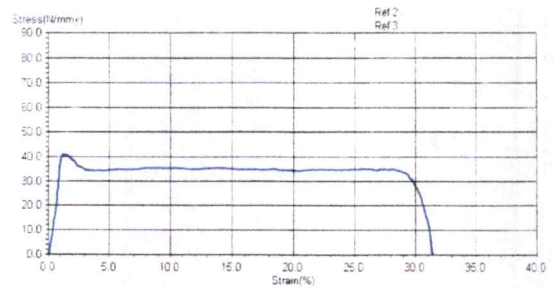


(b)

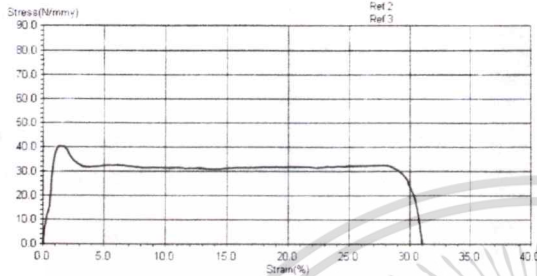
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



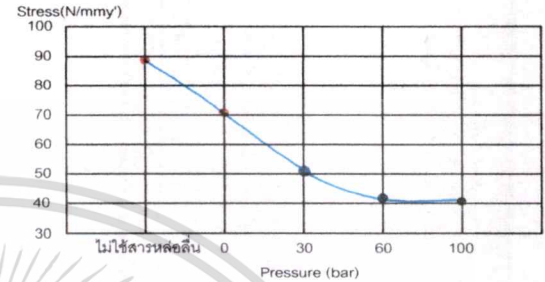
(c)



(d)



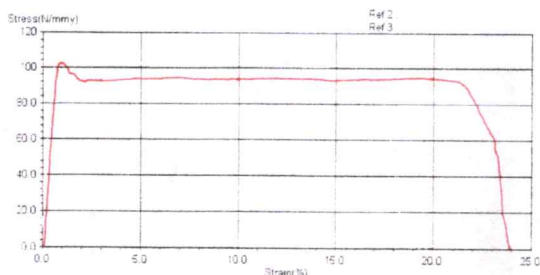
(e)



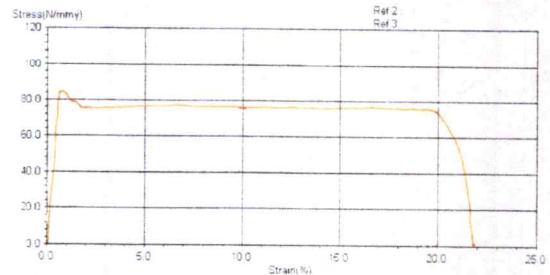
(f)

รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด \varnothing 5.60 mm ลดขนาดลงเหลือ \varnothing 5.00 mm , RE 20.28% , Speed 30 mm/min, ไม่ใช้ความดัน, ใช้ความดัน 0, 30, 60 และ 100 บาร์

จากรูปที่ 5.11 (a) ไม่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นจะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 89 Mpa (b) ความดัน 0 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 71 Mpa (c) ความดัน 30 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 51 Mpa (d) ความดัน 60 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 42 Mpa (e) ความดัน 100 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 40.7 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นของการไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นที่ความดันขนาดต่างๆที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ไม่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 89 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองกรณีนี้และจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นขนาด 100 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 40.7 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ความดัน 100 บาร์จะเป็นขนาดความดันของสารหล่อลื่นที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 20.28 % ซึ่งทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงประมาณ 54.27 %

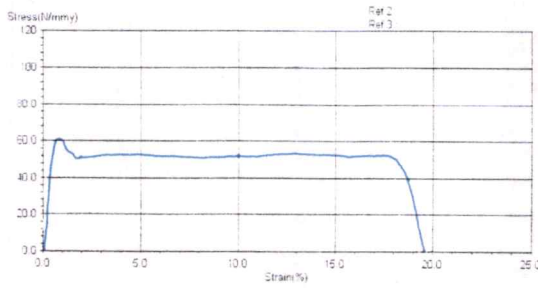


(a)

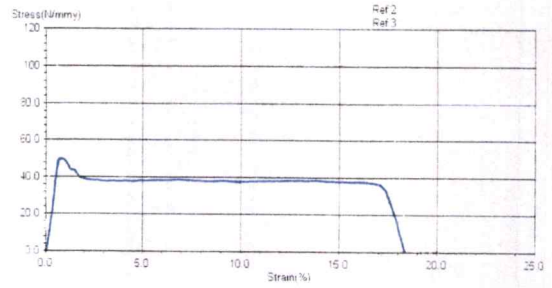


(b)

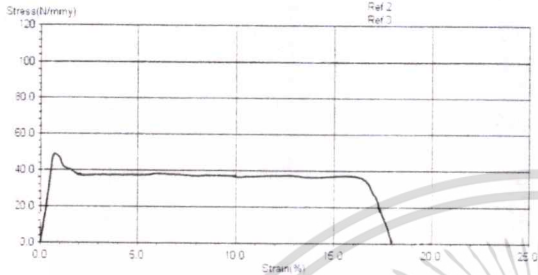
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



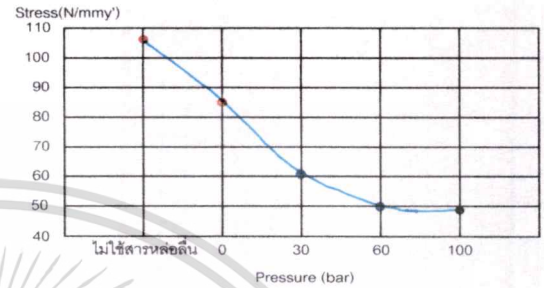
(c)



(d)



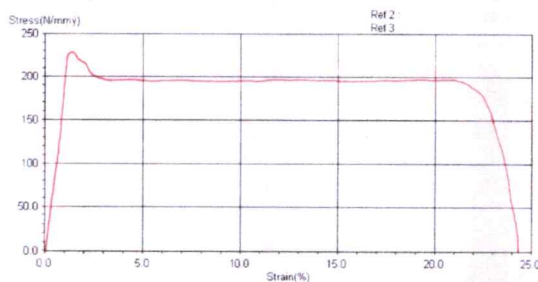
(e)



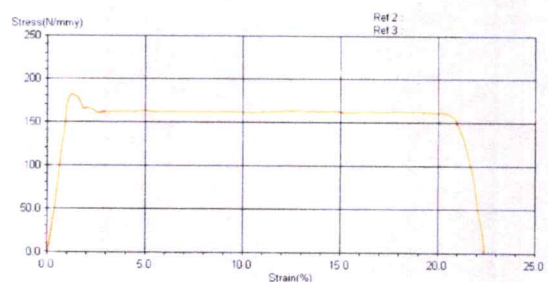
(f)

รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด $\varnothing 6.00$ mm ลดขนาดลงเหลือ $\varnothing 5.00$ mm , RE 30.50% , Speed 30 mm/min, ไม่ใช้ความดัน, ใช้ความดัน 0, 30, 60 และ 100 บาร์

จากรูปที่ 5.12 (a) ไม่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นจะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 107 Mpa (b) ความดัน 0 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 85 Mpa (c) ความดัน 30 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 61 Mpa (d) ความดัน 60 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 50 Mpa (e) ความดัน 100 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 48.5 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นของการไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นที่ความดันขนาดต่างๆที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ไม่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 107 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองกรณีนี้และจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นขนาด 100 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 48.5 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ความดัน 100 บาร์จะเป็นขนาดความดันของสารหล่อลื่นที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 30.56 % ซึ่งทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงประมาณ 54.67 %

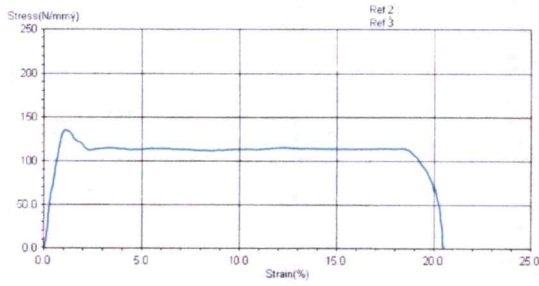


(a)

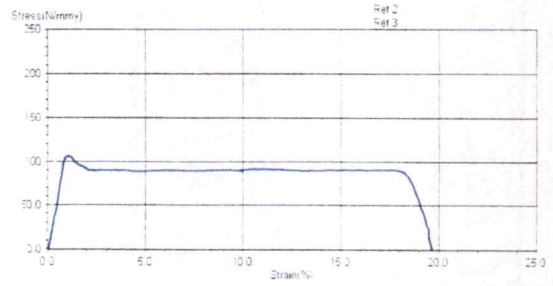


(b)

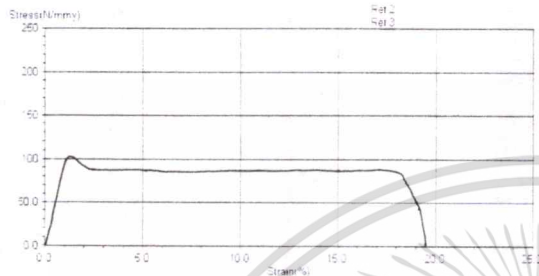
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



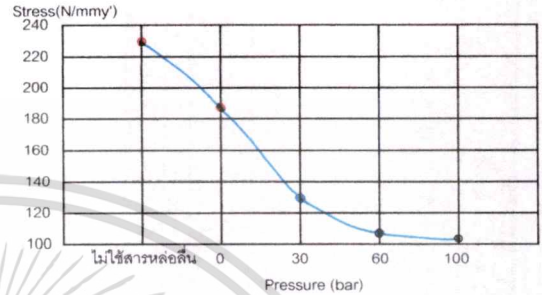
(c)



(d)



(e)

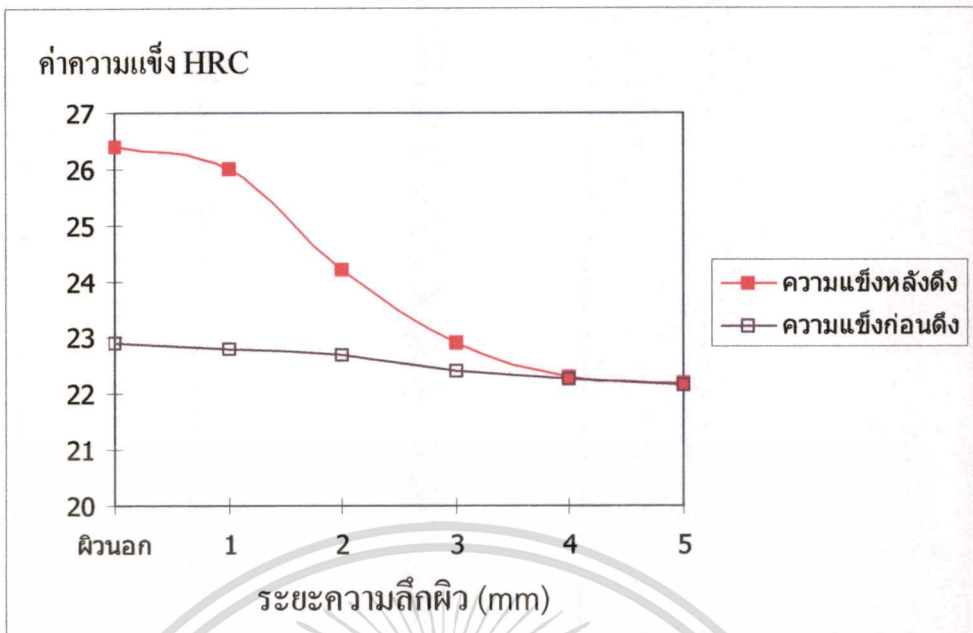


(f)

รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด \varnothing 12.50 mm ลด

ขนาดลงเหลือ \varnothing 9.00 mm , RE 48% , Speed 30 mm/min, ไม่ใช้ความดัน, ใช้ความดัน 0, 30, 60 และ 100 บาร์

จากรูปที่ 5.13 (a) ไม่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นจะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 230 Mpa (b) ความดัน 0 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 183 Mpa (c) ความดัน 30 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 131 Mpa (d) ความดัน 60 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 108 Mpa (e) ความดัน 100 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 104.5 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นของการไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นที่ความดันขนาดต่างๆที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าไม่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 230 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองกรณีนี้และจะเห็นว่าค่าความเค้นที่ใช้ความดันของสารหล่อลื่นขนาด 100 บาร์จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 104.5 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ความดัน 100 บาร์จะเป็นขนาดความดันของสารหล่อลื่นที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 48 % ซึ่งทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงประมาณ 54.57 %



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะความลึกจากผิวนอกสุดของลวดทองแดงที่ผ่านการดิ่งที่ความดันสารหล่อลื่น 100 บาร์

จากรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นว่าค่าของความแข็งที่บริเวณผิวของชิ้นงานจะมีความแข็งสูงสุดและที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานจะมีค่าของความแข็งต่ำสุด โดยที่ความแข็งที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการอัดตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณนอกสุดและจะค่อยๆ ลดต่ำลงจนถึงบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ความแข็งของและเนื้อโลหะที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของวัสดุก่อนการดิ่งขึ้นรูปเนื่องจากทองแดงเป็นวัสดุอ่อนแ่จะลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงถึง 36 %

[100 bar] [60 bar] [30 bar] [0 bar] [ไม่ใช้สารหล่อลื่น]



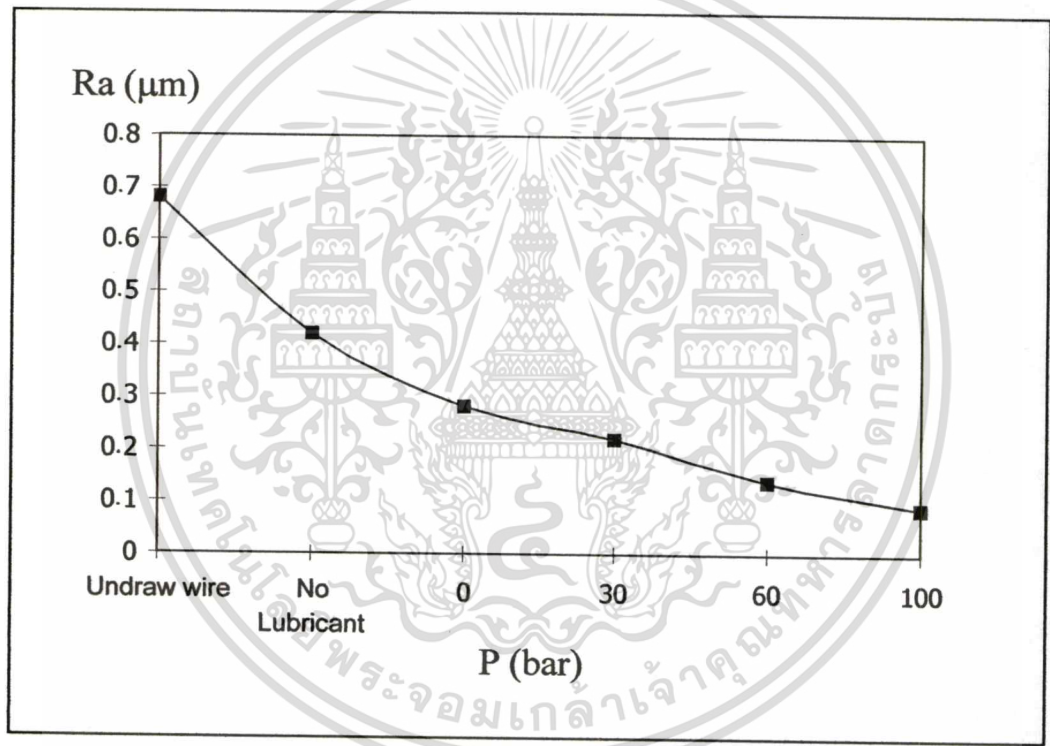
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ความเรียบผิวกับความดัน

สำหรับการหาค่า Surface Roughness : Ra (μm) สามารถหาค่าได้จากตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ตารางการหาค่า Surface Roughness : Ra (μm)

Item	P (bar)	Ra (μm)
1	Undrawn Wire	0.68
2	No Lubricant	0.42
3	0	0.28
4	30	0.22
5	60	0.14
6	100	0.09

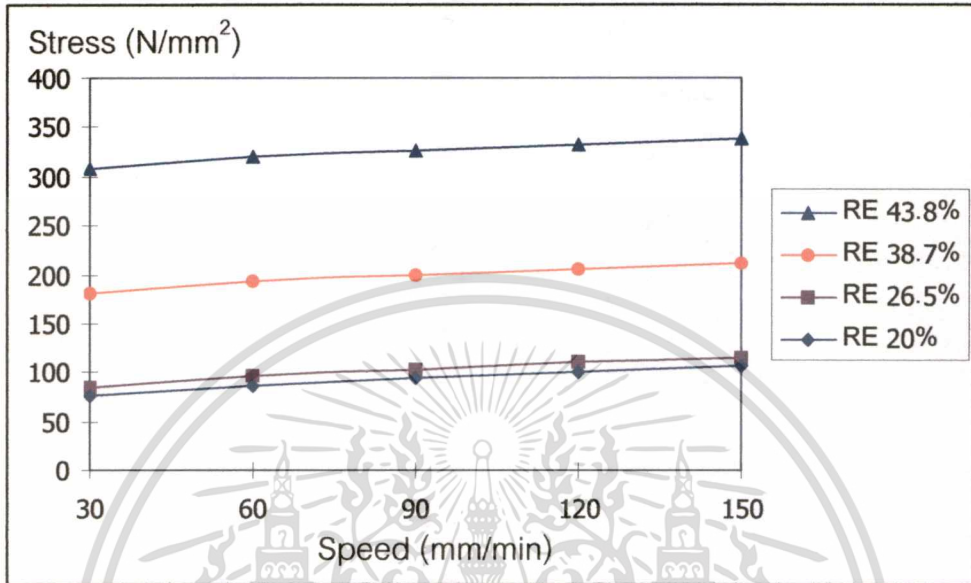


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าการเปรียบเทียบระหว่าง Surface Roughness : Ra (μm) กับความดันสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นว่าค่า Ra ของชิ้นงานหลังการดึงขึ้นรูปที่ความดันสูงจะมีความเรียบผิวดีขึ้นเรื่อยๆ และดีที่สุดที่ความดัน 100 บาร์ โดยจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับค่า Ra ที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นสาเหตุเนื่องมาจากที่ความดันสูงสารหล่อลื่นจะแทรกตัวเข้าไปได้ดีมากกว่าทำให้แรงเสียดทานที่ผิวของเส้นลวดทองแดงขณะดึงสัมผัสกับผิวของคานเกิดขึ้นน้อยกว่าเป็นเหตุให้เกิด Strain hardening ลดน้อยลง

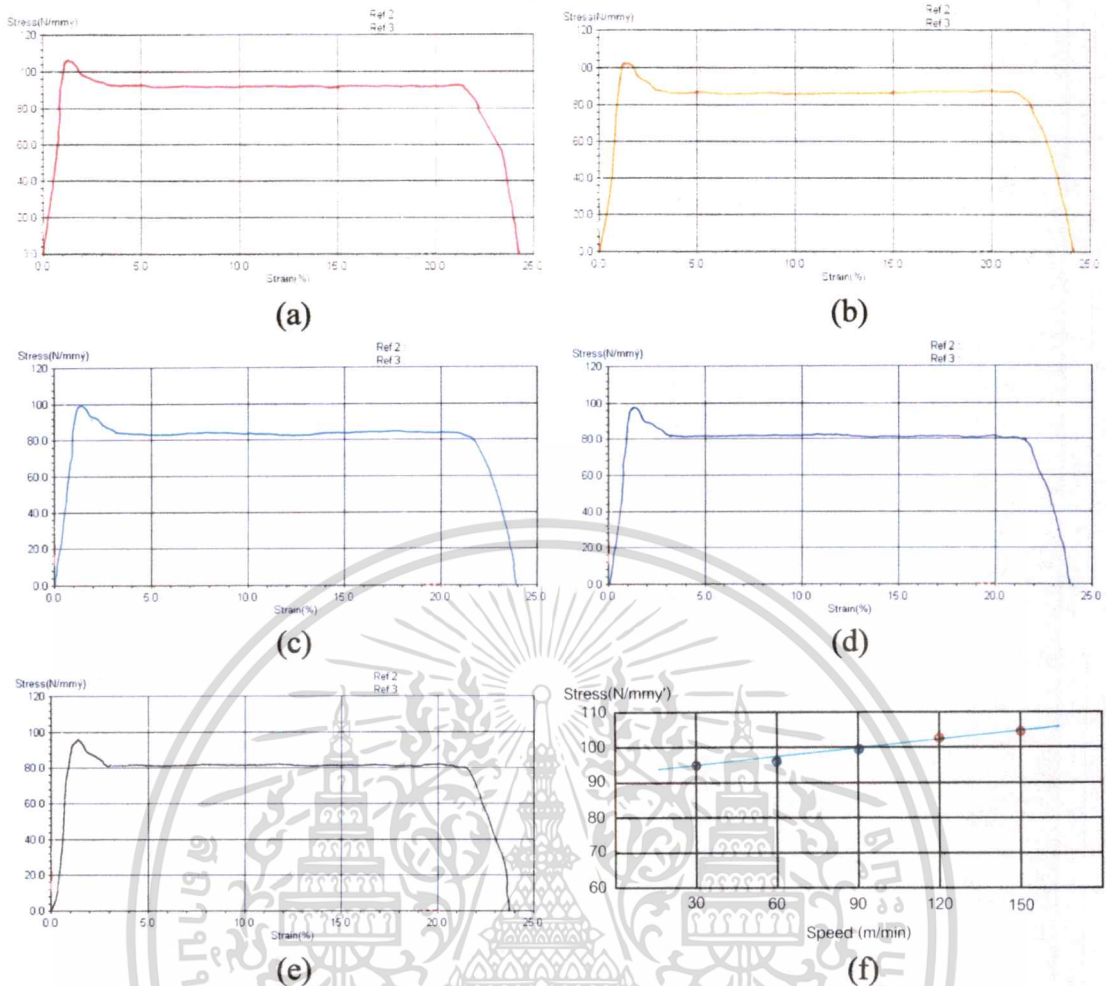
5.1.3 ผลทดลองการศึกษาผลกระทบของความเร็

จากการทดลองดิ่งขึ้นทดสอบลวดทองแดงโดยใช้ความเร็วในการดิ่งลวดขนาดต่างๆกันจะ
ได้



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเร็วในการดิ่งขึ้นรูป

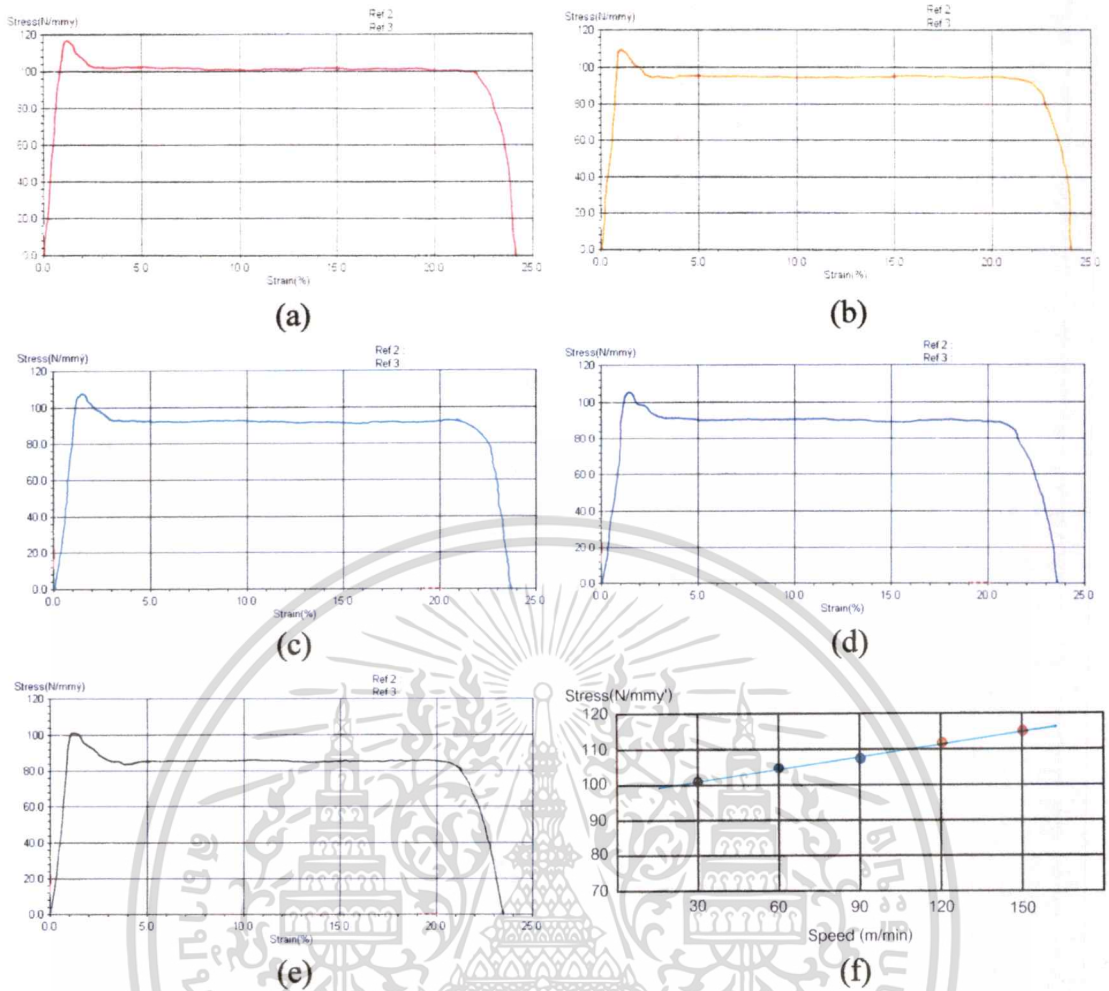
ในรูปที่ 5.17 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเร็วในการดิ่งขึ้นรูปลวดทองแดง ในขณะที่ใช้ความเร็วสูงความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขณะเดียวกันถ้าใช้ความเร็วต่ำความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงด้วย ความเร็วที่ใช้ในการทดลองจะเริ่มตั้งแต่ 30, 60, 90, 120 และ 150 (mm/min) ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆในลักษณะเชิงเส้น การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 43.8 เปอร์เซ็นต์ความเค้นที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นโดยความเค้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 15.63 เปอร์เซ็นต์ ในทำนองเดียวกันที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 38.7 เปอร์เซ็นต์ความเค้นจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยความเค้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 14.22 เปอร์เซ็นต์และขณะที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 26.5 เปอร์เซ็นต์ความเค้นจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยความเค้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 12.17 เปอร์เซ็นต์และที่การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 20 เปอร์เซ็นต์ความเค้นจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยความเค้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10.38 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความเร็วมีผลในการดิ่งขึ้นรูปลวดทองแดงเช่นกันขณะที่ความเร็วสูงขึ้นค่าความเค้นก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยและที่ขนาดของเปอร์เซ็นต์การลดขนาดพื้นที่หน้าตัดยิ่งสูงขึ้นผลต่างของความเค้นก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด $\varnothing 20.00$ mm ลดขนาดลงเหลือ $\varnothing 17.88$ mm , RE 20%, Speed 30, 60, 90, 120 และ 150 mm/min

จากรูปที่ 5.18 (a) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 150 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 106 Mpa (b) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 120 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 103 Mpa (c) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 90 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 99 Mpa (d) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 60 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 97 Mpa (e) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 30 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 95 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นของการใช้ความเร็วขนาดต่างๆที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ความเร็วในการดึงลด 150 mm/min มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 106 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองกรณีนี้และจะเห็นว่าค่าความเร็วที่ใช้ในการดึงลด 30 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 95 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็ว 30 mm/min จะเป็นขนาดความเร็วที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 20 % ซึ่งทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงประมาณ 10.38 %

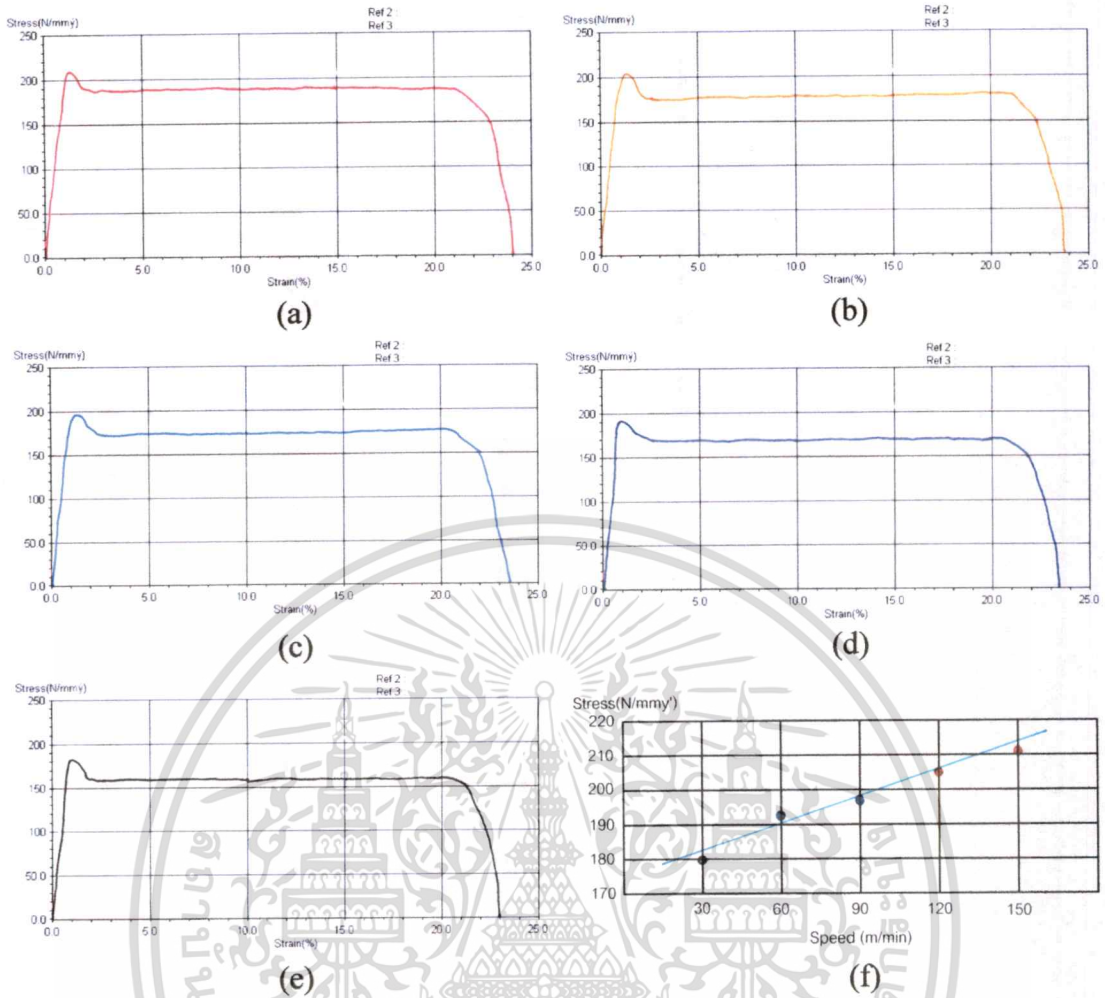
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด \varnothing 10.50 mm ลดขนาดลงเหลือ \varnothing 9.00 mm , RE 26.5% , Speed 30, 60, 90, 120 และ 150 mm/min

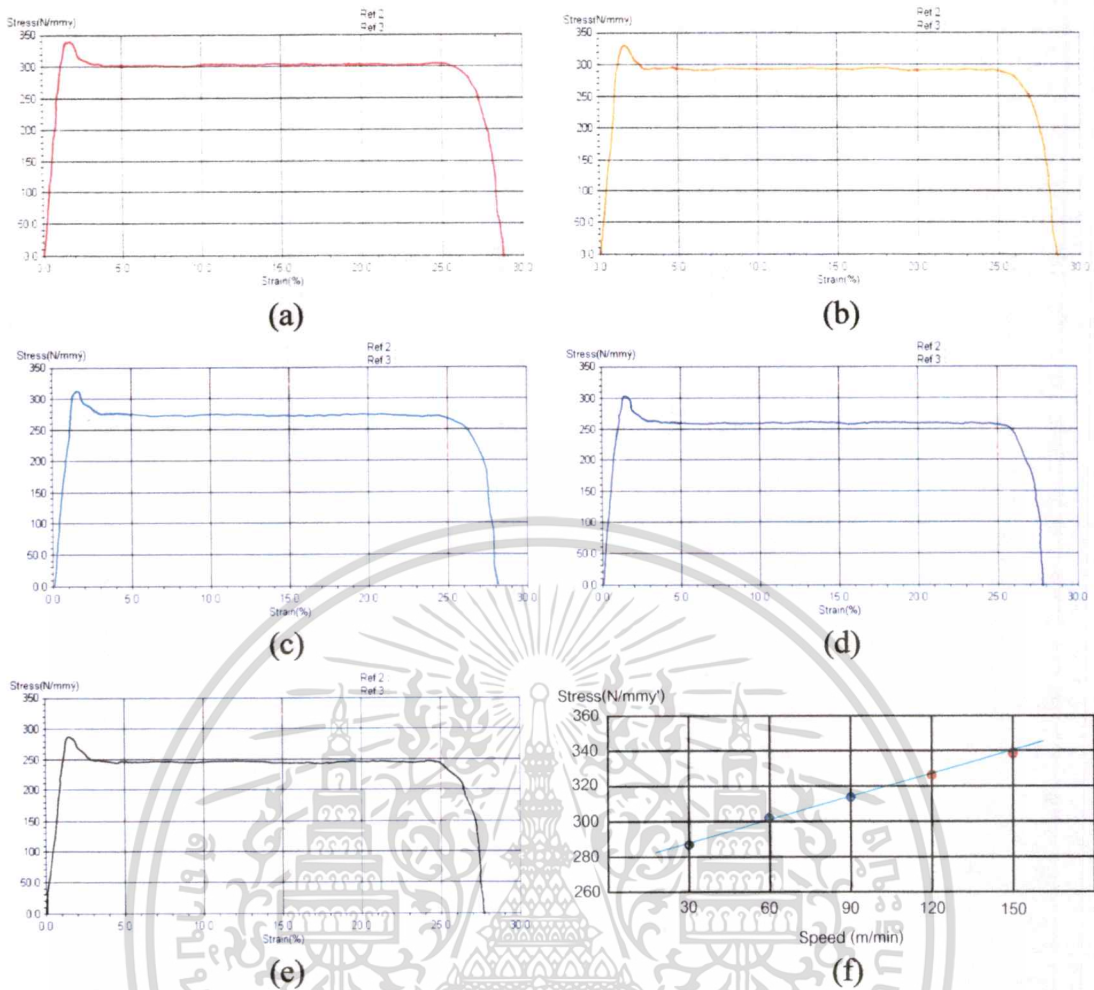
จากรูปที่ 5.19 (a) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 150 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 115 Mpa (b) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 120 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 112 Mpa (c) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 90 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 108 Mpa (d) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 60 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 105 Mpa (e) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 30 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 101 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นของการใช้ความเร็วขนาดต่างๆที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ความเร็วในการดึงลดขนาด 150 mm/min มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 115 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองกรณีนี้และจะเห็นว่าค่าความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 30 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 101 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็ว 30 mm/min จะเป็นขนาดความเร็วที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 26.5 % ซึ่งทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงประมาณ 12.17 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด $\varnothing 11.50$ mm ลดขนาดลงเหลือ $\varnothing 9.00$ mm , RE 38.7%, Speed 30, 60, 90, 120 และ 150 mm/min จากรูปที่ 5.20 (a) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 150 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 211 Mpa (b) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 120 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 205 Mpa (c) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 90 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 198 Mpa (d) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 60 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 192 Mpa (e) ความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 30 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 181 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นของการใช้ความเร็วขนาดต่างๆที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ความเร็วในการดึงลดขนาด 150 mm/min มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 211 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดในการทดลองกรณีนี้และจะเห็นว่าค่าความเร็วที่ใช้ในการดึงลดขนาด 30 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 181 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็ว 30 mm/min จะเป็นขนาดความเร็วที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 38.7 % ซึ่งทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงประมาณ 14.22 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ขนาด $\varnothing 20.0$ mm ลดขนาดลงเหลือ $\varnothing 15.0$ mm , RE 43.8% , Speed 30, 60, 90, 120 และ 150 mm/min จากรูปที่ 5.21 (a) ความเร็วที่ใช้ในการดัดขนาด 150 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 339 Mpa (b) ความเร็วที่ใช้ในการดัดขนาด 120 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 327 Mpa (c) ความเร็วที่ใช้ในการดัดขนาด 90 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 314 Mpa (d) ความเร็วที่ใช้ในการดัดขนาด 60 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 302 Mpa (e) ความเร็วที่ใช้ในการดัดขนาด 30 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 286 Mpa (f) แสดงการเปรียบเทียบขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นของการใช้ความเร็วขนาดต่างๆที่นำมาพิจารณาจะเห็นว่าที่ความเร็วในการดัดขนาด 150 mm/min มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้น 339 Mpa ซึ่งเป็นความเค้นสูงที่สุดในการทดลองกรณีนี้และจะเห็นว่าค่าความเร็วที่ใช้ในการดัดขนาด 30 mm/min จะมีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นเพียง 286 Mpa แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็ว 30 mm/min จะเป็นขนาดความเร็วที่ดีที่สุดในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 43.8 % ซึ่งทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นลดลงถึงประมาณ 15.63 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลของการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

5.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของครึ่งมุมคายที่ได้จากการทดลองคิงเส้นลวดทองแดงที่ RE 7.54 % และ RE 20.28 % ครึ่งมุมคายที่เหมาะสมอยู่ที่ 6° และที่ RE 30.56 % และ RE 38.7 % ครึ่งมุมคายที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 8° ดังนั้นครึ่งมุมคายที่เหมาะสมในการคิงลวดทองแดงจะอยู่ที่ 6° ถึง 8° ซึ่งถือเป็นขนาดของครึ่งมุมคายที่เหมาะสมที่สุด

5.2.2 ขนาดของครึ่งมุมคายมีผลอย่างมากในการคิงลวดผ่านคายการทดลองครั้งนี้ที่การคิงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 7.54 % ขนาดของมุมคายที่เหมาะสมจะอยู่ที่ครึ่งมุมคาย 6° และระยะบีคจะมีค่า 7.28 % และการคิงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 38.7 % ขนาดของมุมคายที่เหมาะสมจะอยู่ที่ครึ่งมุมคาย 8° และระยะบีคจะมีค่า 8.98 %

5.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอิทธิพลของความดันสารหล่อลื่น โดยความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากในขณะที่คิงลวดทองแดงที่ใช้ในการทดลองโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นและความเค้นจะลดต่ำลงในขณะที่ความดันสูงขึ้นโดยจะมีค่าลดลงมาเรื่อยๆ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความดันของสารหล่อลื่นที่สูงมากในโซนการคิงขึ้นรูปจะทำให้ค่าความเค้นลดลงและความดันสารหล่อลื่น 100 บาร์ค่าความเค้นในการคิงขึ้นรูปจะต่ำสุดถือเป็นช่วงของความดันที่เหมาะสมในการคิงลดขนาดลวดทองแดง

5.2.4 สภาพผิวของเส้นลวดหลังการคิงขึ้นรูปผลของความดันจะทำให้สภาพผิวของเส้นลวดที่ผ่านการคิงดีที่สุดที่ความดันสูงสุดที่ทำการทดลองที่ 100 บาร์เนื่องจากความดันของสารหล่อลื่นยิ่งสูงความเสียหายบริเวณผิวงานก็ยิ่งลดลง

5.2.5 ความแข็งของเส้นลวดที่เพิ่มขึ้นนั้นจะอยู่ที่บริเวณผิวด้านนอกส่วนตรงกลางของเส้นลวดจะมีความแข็งของเนื้อทองแดงใกล้เคียงกับค่าก่อนการคิงลดขนาดเนื่องจากเกิดการอัดตัวที่บริเวณผิวของงานทำให้เนื้อโลหะอัดตัวแน่นขึ้นจึงทำให้ผิวชิ้นงานแข็งขึ้นด้วย

5.2.6 ความเร็วในการคิงขึ้นรูปลวดทองแดงในขณะที่ใช้ความเร็วสูงความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขณะเดียวกันถ้าใช้ความเร็วต่ำความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงความเค้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 ถึง 16 เปอร์เซ็นต์ตามขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขณะทำการดึงลวดทองแดง ด้วยวิธีทดลองโดยทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูป ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมคายที่มีต่อความเค้นดึงในกระบวนการดึงลดขนาดของเส้นลวดทองแดง วิธีการดึงเส้นลวดทองแดงโดยการนำเอาสารหล่อลื่นที่ความดันสูงมาใช้ในกระบวนการดึงขึ้นรูปโดยให้สารหล่อลื่นที่ความดันสูงอัดเข้าไปในช่วงลาดของครึ่งมุมคายในโซนของการดึงขึ้นรูป ความแข็งของชิ้นงาน ความเรียบผิวของชิ้นงานที่มีผลกระทบมาจากการใช้สารหล่อลื่นที่ความดันสูง อิทธิพลของความเร็วในการดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดที่มีต่อความเค้นและความเครียดของชิ้นงานที่เกิดขึ้น สำหรับกรณีศึกษาครั้งนี้จะทำให้ทราบว่าผลกระทบของตัวแปรที่ศึกษาผ่านมาจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางกลของเส้นลวดที่ผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปเปลี่ยนไปอย่างไร ผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขนาดของครึ่งมุมคายที่เหมาะสมในการดึงลวดทองแดงตั้งแต่การลดขนาดเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าตัดน้อยที่ 7.54 % ถึงการลดขนาดเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าตัดมาก 38.7 % อยู่ที่ครึ่งมุมคาย 6 องศาถึง 8 องศาตามลำดับ

2. ขนาดของครึ่งมุมคายที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงที่สุดนั้นที่เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าตัดน้อย 7.54 % อยู่ที่ครึ่งมุมคาย 6 องศาโดยมีความยาวของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นประมาณ 7.28% และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงที่สุดที่เปอร์เซ็นต์ของการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 38.7 % อยู่ที่ครึ่งมุมคาย 8 องศาโดยมีความยาวของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นประมาณ 8.98%

3. ค่าความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบที่ทำให้เกิดความเค้นน้อยที่สุดอยู่ที่ความเร็วต่ำและจะเกิดความเค้นสูงขึ้นเรื่อยๆที่ความเร็วสูงขึ้น เนื่องจากค่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเรียบผิวของเส้นลวดจะลดลงเนื่องจากความเร็วที่เพิ่มมากขึ้นนั้นทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสกันของเส้นลวดกับคายจะสั้นลงและทำให้การรีดผิวของคายกับลวดเกิดขึ้นน้อยลงความเรียบของผิวของเส้นลวดจึงไม่ตีเท่ากับกรณีของความเร็วต่ำ

4. ค่าความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดมีแนวโน้มลดลงแต่ความแตกต่างค่อนข้างน้อยจะอยู่ในช่วงประมาณ 5 μm เนื่องมาจากเมื่อความเร็วในการดึงเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงดึงลวดที่กระทำตามแนวแกนของเส้นลวดเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นเส้นลวด

จึงมีแนวโน้มที่จะขีดตัวออกในแนวแกนหรือทำให้เกิดการหดตัวในแนวรัศมีเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดมีแนวโน้มที่จะลดลงนั่นเอง

5. ในการทดลองใช้สารหล่อลื่นที่ความดันสูง โดยเริ่มทดลองตั้งแต่ที่ไม่ใช้สารหล่อลื่น และใช้สารหล่อลื่นที่ไม่ใช้ความดันและใช้ความดันตั้งแต่ 30, 60 และ 100 บาร์ ในการทดลอง ความเค้นต่ำสุดจะอยู่ที่กรณีที่ใช้ความดันสารหล่อลื่นที่ความดัน 100 บาร์ซึ่งจะเป็นความดันของสารหล่อลื่นที่ดีที่สุดในการทดลองครั้งนี้

7. สภาพผิวของเส้นลวดหลังการดึงขึ้นรูปผลของความดันจะทำให้สภาพผิวของเส้นลวดที่ผ่านการดึงดีที่สุดที่ความดันสูงสุดที่ทำการทดลองที่ 100 บาร์เนื่องจากความดันของสารหล่อลื่นยิ่งสูงความเสียหายบริเวณผิวงานก็จะยิ่งลดลง

8. ความแข็งของเส้นลวดที่เพิ่มขึ้นนั้นจะอยู่ที่บริเวณผิวด้านนอกส่วนตรงกลางของเส้นลวดจะมีความแข็งของเนื้อทองแดงใกล้เคียงกับค่าก่อนการดึงลดขนาดเนื่องจากเกิดการอัดตัวที่บริเวณผิวของงานทำให้เนื้อโลหะอัดตัวแน่นขึ้นจึงทำให้ผิวชั้นงานแข็งขึ้นด้วยแต่ที่บริเวณกึ่งกลางของลวดแทบจะไม่เกิดการอัดตัวเลย

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลของการทดลองที่ได้พบว่าแนวโน้มของกระบวนการดึงขึ้นรูปจะได้ผลออกมาดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ค่าของตัวแปรต่างๆที่เหมาะสม แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและคุณสมบัติที่ยอมรับได้ของผลิตภัณฑ์ที่นำเส้นลวดจากการดึงขึ้นรูปไปใช้งานตลอดจนความคุ้มค่าของหลักเศรษฐศาสตร์ด้วย สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิจัยครั้งนี้คือ

1. สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าเปรียบเทียบระหว่างความเค้นกับความดันของสารหล่อลื่นและความเค้นกับความเร็วในการดึงขึ้นรูปยังมีได้มีการเผยแพร่จึงมิได้ทำการเปรียบเทียบผลไว้ ณ. ที่นี้

2. ในการสร้างชิ้นทดสอบความเที่ยงตรงของขนาดเป็นสิ่งที่สำคัญมากถ้าชิ้นทดสอบมีขนาดที่คลาดเคลื่อนผลที่ได้ก็จะคลาดเคลื่อนตามไปด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทวี เทศเจริญ. การออกแบบเครื่องมือกล: โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535
- [2] Edward M. Mielnik, Metalworking Science and Engineering, 397-463
- [3] J. Charkrabarty, Theory of Plasticity, Mc Graw-Hill International Editions, 1987
- [4] Kurt Lange, Handbook of Metal Forming, Editor in chief, Mc Graw-Hill Book Company
- [5] S. Norasatsopon and T.Tangsri, "Experimental study of the effect of a half die angle on drawing stress during wire drawing" Ladkrabang Engineering Journal, March 2001, pp.134-139.
- [6] P. Kaewtatip, "A study on the effect of drawing speed on the performances of wire drawing process "Conference for ME NETT 15th, Thailand, 2001, pp.151-155.
- [7] D.V. Yanaki, "Feeding commercial lubricant under pressure into the deformation zone in drawing" Stal in English, 1963(6), pp.492-493.
- [8] K. Yoshida, H. Tanaka, "The drawability of Ni-Ti shape memory alloy wires "Wire and Bar, 89-94(1995) 2,45.
- [9] K. Yoshida, "FEM analysis of wire breakage in drawing of superfine wire with an inclusion," Wire Journal International, March 2000, pp.102-107.
- [10] K. Yoshida, "Metal Forming and Finite Element Method" Wire Journal International, March 2002, pp.92-97.
- [11] S. Norasethasopon, and K. Yoshida, "Finite Element Simulation on Wire Breakage Induced by Eccentric Inclusion in Shaped Wire Drawing" Wire Journal International, Vol.27, 27, 2002, pp.19-26.
- [12] V.F. Moseev and A.A. Korostelin "New method of feeding lubricant to the deformation zone in wire drawing" Stal in English, 1962, (3) 237-239.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Hiroshi Nakamura and Shigetada Inada "A Study on the Wire Drawing with Forced Lubrication Method" The Wire Drawing (Vol.6) no.57 (1965-10) 548-556.
- [14] Avitzur, B. "Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Dies of Large Cone Angle" Trans. ASME, Eng. for Ind, Series B, Vol.86, pp.305-316, Nov. 1964.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

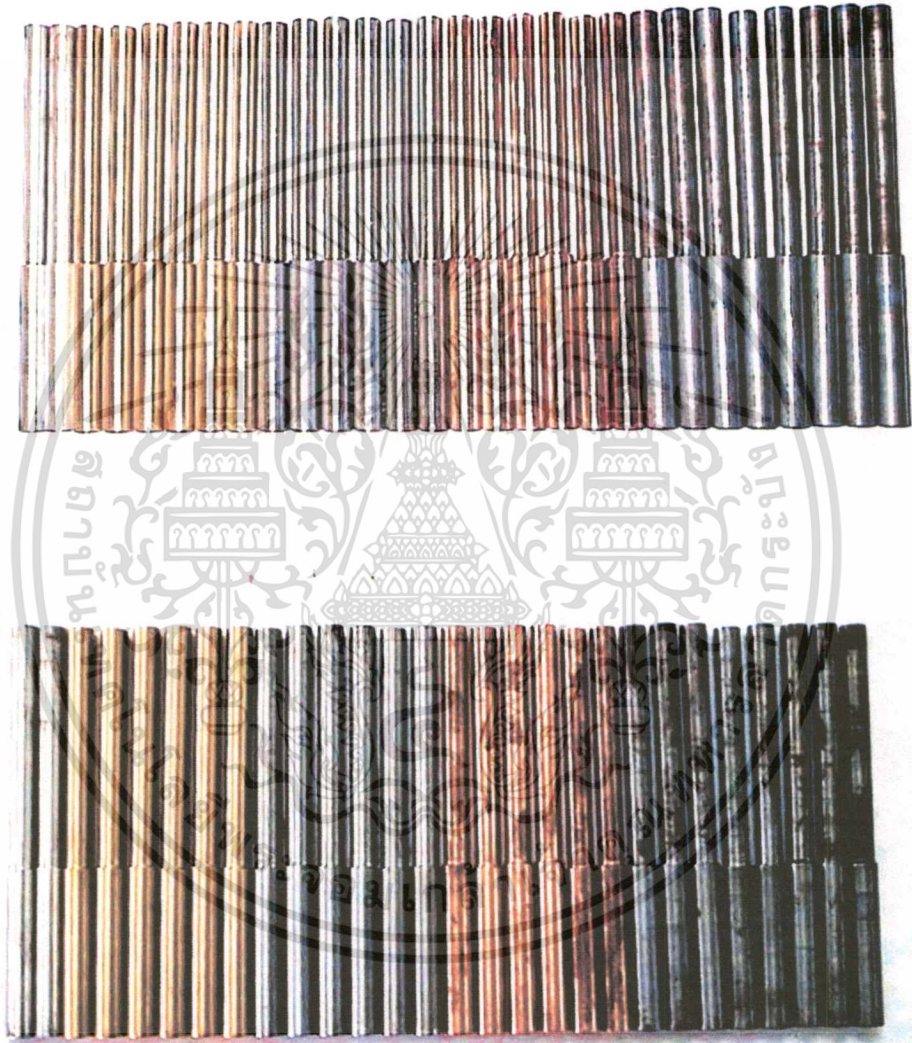
ภาคผนวก ก.

อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทดลองอัดความดันสารหล่อลื่น



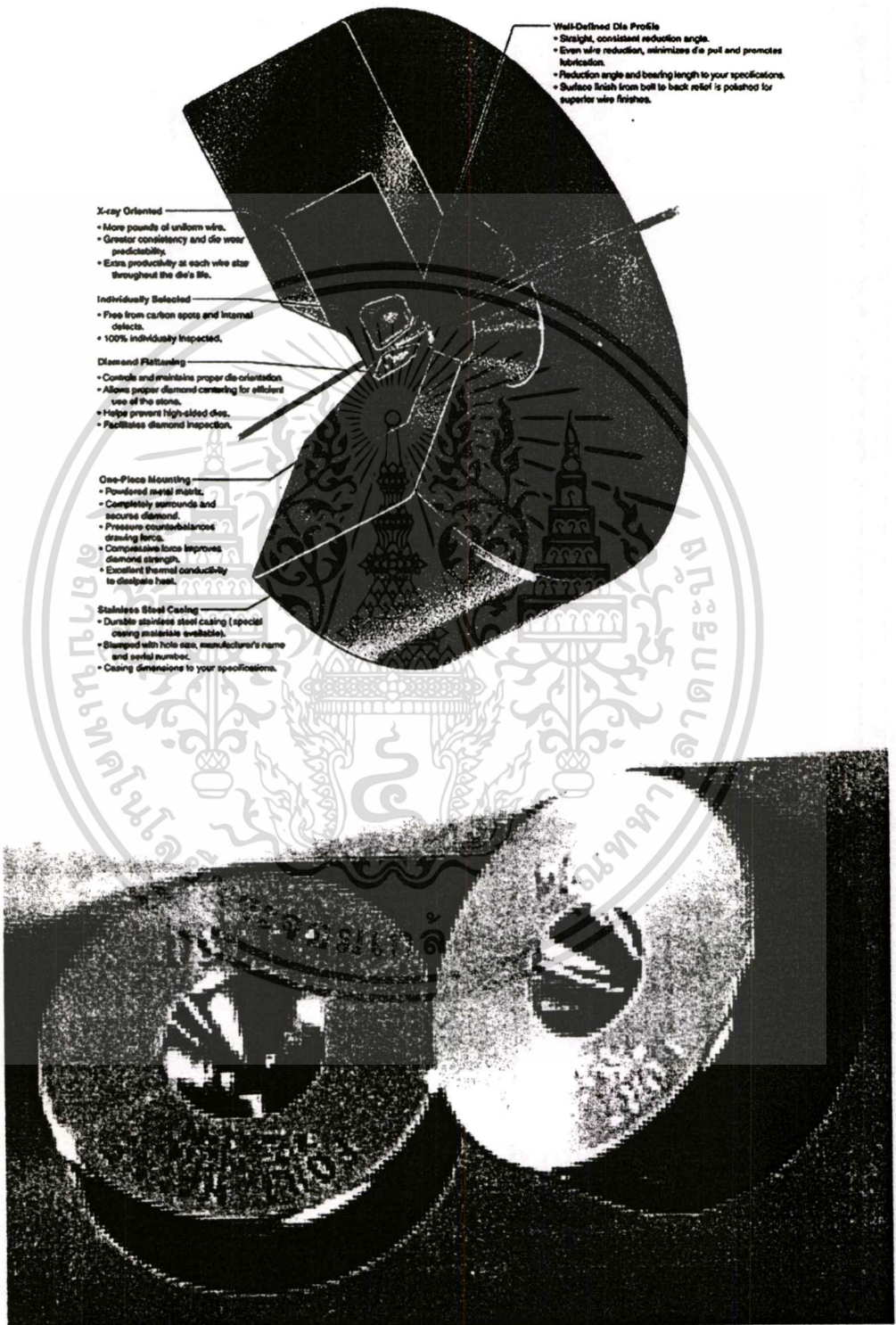
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
ลวดที่ใช้ในการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. องค์ประกอบของคायที่ใช้ในการทดลอง

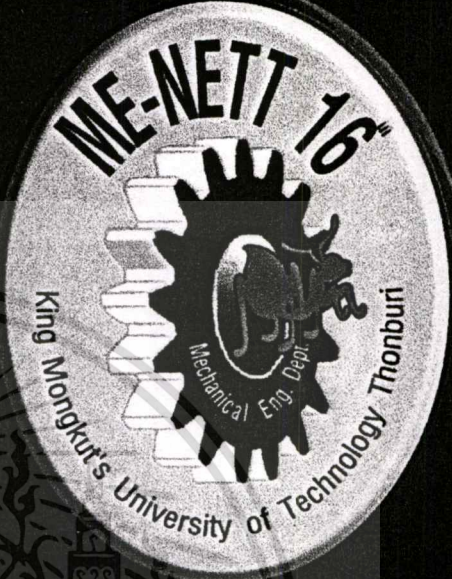


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




การประชุม
วิชาการเครือข่าย
วิศวกรรมเครื่องกล
แห่งประเทศไทย

ME-NETT 16th
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Mechanical Eng. Dept.

Mechanical Engineering
Network of Thailand
The 16th Conference

14-16 ตุลาคม 2545 จังหวัดภูเก็ต
October 14-16, 2002 Phuket



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MM139	A Numerical Experiment for Sound Transmission in a Circular Duct of Continuously Varying Cross-sectional Area <i>Ming Lokitsangtong</i>	511
MM140	การพัฒนากระบวนการตรวจสอบอุลตราโซนิกและการประเมินผลอย่างอัตโนมัติ <i>สมนึก วัฒนศรียกูล ประมุข เจนภักดียนต์ และ ประกาศิต สกานเมือง</i>	515
MM242	ผลกระทบของครึ่งมุมคายและความดันของสารหล่อลื่นต่อความแข็งแรงของลวดทองแดงเมื่อผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีทดลอง <i>สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ และ ธนิต แต่งศรี</i>	521
MM244	การหาเงื่อนไขการตัดไม้ที่เหมาะสมของใบมีด PCD <i>กุศล พร้อมมูล พงศ์พันธ์ แก้วดาทิพย์ สุรพันธ์ สุวรรณกฎ และ เทิดศักดิ์ อาลัย</i>	526
MM245	การวิเคราะห์หาแรงในการไฟน์แบล็กโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ <i>สุรวุฒิ ยะนิล ชาญ ถนังงาน และ ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์</i>	531
MM247	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงของแม่พิมพ์ที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนในกระบวนการลากขึ้นรูปปลีของโลหะผสมแมกนีเซียม <i>วิชณี ไทศาล และ Nobuhiro Koga</i>	537
MM151	การหาขนาดรูเจาะที่เหมาะสมในการออกแบบโหลดเซลล์ประเภทกานย่นโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ <i>สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์ และ สำราญ อินแบน</i>	542
MM152	Finite Element Analysis of Disk-Spindle Vibration in Hard Disk Drives <i>Thitima Jintawan and Jakrapan Loengnaluemitrachai</i>	547
MM153	Lead-free Solders for Electronic Packaging <i>Chaosuan Kanchanomai and Yoshiharu Mutoh</i>	551
จ. สาขา Energy Technology and Management		
EM101	การศึกษาและหาแนวทางปรับปรุงการใช้พลังงานในโรงบมใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียแบบอัตโนมัติ <i>มานิจ ทองประเสริฐ และ ณัฐเดช เพ็ญวงวงศ์</i>	557
EM102	การวิเคราะห์พลังงานในโรงงานผลิตเส้นหม้อบแห้ง <i>กมล ทับทิมเทศ</i>	563
EM103	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตาอุตสาหกรรมในครัวเรือน <i>ณัฐวุฒิ สุขภูฏี อุเทน กันทา และ อติพงศ์ นันทพันธ์</i>	569
EM105	ผลกระทบของเครื่องยนต์ที่ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง <i>ลิขิต ไสหนู พิชัย นามประกาย และ เทียบ เอื้อกิจ</i>	575
EM106	การวิเคราะห์สมรรถนะตัวเก็บรังสีที่ทำจากซุ้ดระบายความร้อน <i>ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ชาญวิทย์ วุฒิวงศานนท์ และ จิรวรรณ เตียรย์สุวรรณ</i>	581
EM108	ปัจจัยความเสี่ยงในการลงทุนเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ <i>เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์</i>	587
EM109	การจำลองแบบและการทดลองการอบแห้งพริกแบบชั้นบาง <i>กิตติชัย ไตรรัตน์ศิริชัย และ กิตติ สิทธิประภาพร</i>	592
EM210	Boiler Life Assessment of a Thermal Power Plant <i>Veera Loha, Nandh Thavarungkul, Ruangdaj Tongsri, Nakorn Srisukhumbowornchai, Chamaipom Sudasna Na Ayudhaya, Nuchthana Pooltong, Patcharin Burke, Thawatchai Treesuwannukul, Napachat Tareelap, Wanchai Samlee, Chatchawan Kumwarun and Panya Srichandr</i>	596
EM211	เครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์ กรณีศึกษาการต่อจูนนิ่งคอลัมน์แบบกระบอกสูบรวมและกระบอกสูบแยก <i>การวย พึ่งสุวรรณรักษ์</i>	602

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของครึ่งมุมตายและความดันของสารหล่อลื่นต่อความแข็งของลวดทองแดง เมื่อผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีทดลอง

Effect of Half Die Angle and Lubricant Pressure on Drawn Copper Wire Hardness by Experiment

สมชัย นรเศรษฐโสภณ ธนิต แต่งศรี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 66(2)326-9987, โทรสาร 66(2)3269053, e-mail : s3062031@kmitl.ac.th

Somchai Norasethasopon, Tanit Tangsri

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

Chalongkung road Ladkrabang Bangkok Thailand 10520

Tel: 66(2)326-9987, Fax: 66(2)326-9053, e-mail: s3062031@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมตายและความดันของสารหล่อลื่นต่อความแข็งของลวดทองแดงเมื่อผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีทดลอง โดยทำการทดลองดึงลวดทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.7 มม. ลดขนาดลงเหลือ 10.16 มม. ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 36 % ที่ครึ่งมุมตาย 4, 6, 8, 10 และ 12 องศาตามลำดับ โดยใช้ความดันของสารหล่อลื่นที่ช่วงทางเข้าขนาด 0, 30, 60, และ 100 บาร์ หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบความแข็งที่บริเวณจุดต่างๆของชิ้นงานตั้งแต่มิวนอกจนถึงจุดกึ่งกลางของชิ้นงานเพื่อศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไปของเส้นลวดที่ได้ผ่านกระบวนการดึงขึ้นรูปเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตในอนาคตต่อไป

ABSTRACT

This research studies the effect of half die angle and lubricant pressure on drawn copper wire hardness by experiment. The specimens and drawn specimens for this experiment were $\varnothing 12.7$ mm. and $\varnothing 10.16$ mm, respectively. Copper wire reduction was 36 % and the half die angles were varied as 4, 6, 8, 10 and 12 degree and lubrication pressure were varied as 0, 30, 60 and 100 bar. Drawn wire hardness at the surface through the wire axis and the effect of mechanical properties of the drawn wires has been investigated. This research results will be used to the development of production fields.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.บทนำ

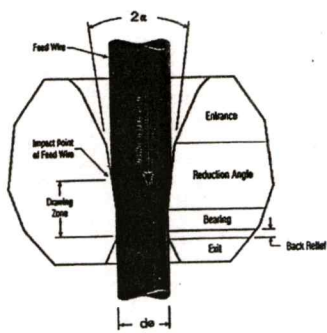
ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตของกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะมีความก้าวหน้าไปอย่างมากจากการพัฒนาดังกล่าวได้กระทำกันในรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการทดลองเพื่อหาค่าของตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อการพัฒนาออกแบบที่เหมาะสมและได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณ หรือการใช้วิธีสร้างรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาแก้ปัญหาอย่างไรก็ตามจากการสอบถามผู้ประกอบการผลิตในอุตสาหกรรมการดึงลวดสิ่งที่ยังไม่ได้มีการพัฒนาก็คือการนำเอาสารหล่อลื่นที่ความดันสูงมาใช้งานเพื่อให้คุณภาพผิวของชิ้นงานดีขึ้นและต้นทุนการใช้พลังงานในการดึงเส้นลวดลดลง อีกทั้งยังไม่ได้ศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมตายที่มีอิทธิพลต่อความแข็งของชิ้นงานซึ่งจะมีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิตซึ่งในปัจจุบันจะตรวจสอบเฉพาะทดสอบดึงและทดสอบบิดและความหนาของการชุบสังกะสีในบางงานเท่านั้นส่วนอิทธิพลของความดันสารหล่อลื่นและความแข็งที่จุดต่างๆภายในเส้นลวดที่ดึงขึ้นรูปซึ่งค่าตัวแปรต่างๆที่สำคัญเหล่านี้มีความสำคัญมากจึงเป็นเหตุจูงใจให้มีศึกษาถึงผลกระทบเหล่านี้เพื่อที่จะนำไปเป็นแบบอย่างที่ดีในการพัฒนาออกแบบและตัดสินใจเลือกสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในโอกาสต่อไป

2.ทฤษฎี

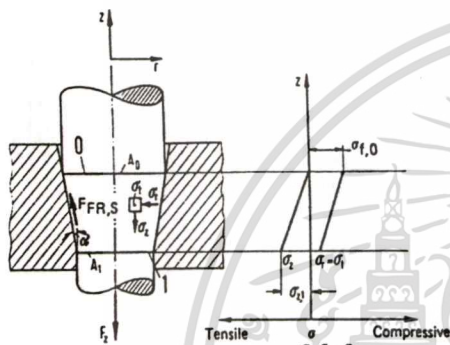
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงในการดึงขึ้นรูปชิ้นงาน

แรงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกรณีของกระบวนการดึงขึ้นรูปนั้นเกิดขึ้นในช่วงของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเกิดขึ้นทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปนั้นเป็นแม่พิมพ์แบบเปิด

โดยปกติจะเกิดทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัดเกิดขึ้นภายในช่วงที่เรียกว่า โซนการดึงขึ้นรูป (Drawing Zone) แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แม่พิมพ์ดึงลวด (Drawing die)



รูปที่ 2 ความเค้นและแรงในการดึงขึ้นรูป

งานและแรงที่ต้องการในกระบวนการดึงขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ด้วย Siebel's Method เทอมของงานและแรงจะพิจารณาที่พื้นที่ภาคตัดที่ทางออกของช่วงลวดของตาย (A1) สมการของแรงในการดึงขึ้นรูปและแรงเสียดทานสามารถที่จะเขียนได้คล้ายคลึงกับการอัดขึ้นรูปตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 ดังนี้

$$F_{D,tot} = \sigma_{z,1} A_1 = A_1 \sigma_{f,m} \left[\left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] \quad \dots\dots[1]$$

$$F_{D,tot} = F_{id} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad \dots\dots[2]$$

ดังนั้น
ที่มุม 2α เล็กๆ $\sin 2\alpha \cong 2\alpha$ แรงเสียดทานในตายเป็น

$$F_{FR,S} = A_1 \sigma_{f,m} \varphi_{max} \frac{\mu}{\alpha} \quad \dots\dots[3]$$

งานทั้งหมดในการเปลี่ยนรูปร่างสามารถคำนวณได้จาก

$$W_{D,tot} = W_{id} + W_{FR,S} + W_{sh} \quad \dots\dots[4]$$

โดยที่

- $F_D (W_D)$ = แรง (งาน) ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป
- $F_{id} (W_{id})$ = แรงอัดมคคิต (งานอัดมคคิต) ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน
- $F_{FR,S} (W_{FR,S})$ = แรงเสียดทาน (งานเสียดทาน) บนช่วงลวดของตาย
- $F_{sh} (W_{sh})$ = แรงเฉือน (งานเฉือน)
- $\sigma_z, \sigma_{f,m}$ = ความเค้นในแนวแกน Z, ความเค้นของการไหลเฉลี่ย ($\sigma_z - \sigma_r = \sigma_f$)
- A_1 = พื้นที่ภาคตัดที่ทางเข้าช่วงแปรง
- μ = สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน
- α = ครึ่งมุมตาย
- φ_{max} = ความเครียดรวมชาติ

ตารางที่ 1 ค่าแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปขึ้นงาน

Process	Solid forward extrusion	Hollow forward extrusion	Drawing of bars and tubes	Ironing	Drawing of hollow bodies
Coefficient of friction μ	0.04 - 0.08	0.1 - 0.125	0.02 - 0.05	0.02 - 0.07	0.08 - 0.02

ประสิทธิภาพในการขึ้นรูปของขึ้นงาน

$$\eta_{def} = \frac{W_{id}}{W_{eff}} \cong \frac{F_{id}}{F_{eff}} \cdot F_{eff} = \frac{F_{id}}{\eta_{def}} = \frac{A \sigma_{f,m} \varphi_{max}}{\eta_{def}} \quad \dots\dots[5]$$

เมื่อ

η_{def} = ประสิทธิภาพในการขึ้นรูป

W_{eff}, F_{eff} = ประสิทธิภาพของงาน, ประสิทธิภาพของแรง

$$F_{FR,S} = A_0 \sigma_{f,m} \varphi_{max} \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \quad \dots\dots[6]$$

$$F_{sh} = \frac{2}{3} A_0 \sigma_{f,m} \hat{\alpha} \quad \dots\dots[7]$$

เมื่อ A_0 = พื้นที่ภาคตัดช่วงทางเข้าของครึ่งมุมตาย

$$F_{tot} = A_0 \sigma_{f,m} \left[\frac{2}{3} \alpha + \left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} \right] + \pi d_0 \sigma_{f,0} \mu \quad \dots\dots[8]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

Forward extrusion of components	Forward extrusion of semifinished products (hot)	Drawing processes
1.4 – 1.6	7.0	0.2 – 0.3 (0.5)

ตารางที่ 3 มุมตายที่ดีที่สุด (โดยแรงที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง) โดยการดึงขึ้นรูปเย็นและแรงรวม F_{tot} เป็นฟังก์ชันของมุมทางเข้าของตาย 2α และแรงต่ำสุดที่ได้จากวิธีการทางคณิตศาสตร์

Solid forward extrusion of components		Solid forward extrusion or semifinished products	Bar and wire drawing	
φ_{max}	η_{def}	η_{def}	φ_{max}	η_{def}
0.4	0.45	0.3-0.6	0.15	0.45-0.55
1.0	0.75		0.50	0.65-0.75
1.5	0.80			

แรงที่ต้องการต่ำสุด $\frac{dF_{tot}}{d\alpha} = 0$ [9]

$\cos\alpha_{opt} = -3\mu\varphi_{max} \pm \sqrt{9\mu^2\varphi_{max}^2 + 1}$ [10]

ด้านขวามือของสมการจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าของมุม 2α น้อยที่สุดของแรงในการเปลี่ยนรูปของชิ้นงาน

ตารางที่ 4 เป็นค่าความเครียดสูงสุด φ_{max} ในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

Rod forward extrusion		Tube forward extrusion		Bar drawing		Ironing	
φ_{max}	$2\alpha_{opt}$	φ_{max}	$2\alpha_{opt}$	φ_{max}	$2\alpha_{opt}$	φ_{max}	$2\alpha_{opt}$
0.3	20°	0.3	40°	0.15	10°	0.15	10-
1.0	32°	1.33	70°	0.50	20°	0.50	12- 20- 24°

อุณหภูมิการขึ้นรูป

โดยปกติกระบวนการดึงขึ้นรูปจะทำที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึงขึ้นรูปทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยที่มีเปอร์เซ็นต์สูงมากเกิดจากความเสียหายโดยอุณหภูมิจะสูงขึ้นประมาณ 85-95% สมการที่ใช้คำนวณหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

$\Delta T = \sigma_{f,m} \ln \frac{A_0}{A_1} \left(\frac{1}{c\rho} \right)$ [11]

โดย c = ค่าความร้อนจำเพาะ

ρ = ความหนาแน่น

ความเค้นในการดึงขึ้นรูป

$\sigma_y = Hv/2$ [12]

$H = (H_1 + H_2)/2$ [13]

H = ความแข็งเฉลี่ย

H_1 = ความแข็งของชิ้นงานก่อนดึงขึ้นรูป

H_2 = ความแข็งหลังการดึงขึ้นรูป

V = อัตราส่วนพั่วของ

ความเสียหายและการหล่อลื่นในการดึงขึ้นรูป

การหล่อลื่นตลอดช่วงทางเข้าของลวดตลอดตายชิ้นงานจะถูกหล่อด้วยสารหล่อลื่นและสารหล่อลื่นที่เหลือจะถ่ายเทกลับลงสู่ถังเก็บสารหล่อลื่นต่อไป

3. การทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่อง TESTOMETRIC MICO 500 ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แรงดึงสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง 200 KN.

3.1.2 เครื่องทดสอบความแข็งตามวิธีร็อกเวล (rock well)

3.1.3 ชุดหัวจับตายและชุดกำเนิดความดันซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3 เครื่อง TESTOMETRIC MICO 500 และชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษ



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.1.4 ลวดทองแดง (CuZn4Pb2) ที่ใช้ในการทดสอบลดขนาดจาก \varnothing 12.7 mm เป็น \varnothing 10.16 mm โดยลดขนาดพื้นที่หน้าตัด

ลง 36 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 สารหล่อลื่นชนิดน้ำ LUBRIOL V 719

3.2 วิธีทดลอง

ติดตั้งอุปกรณ์และชุดทดลองที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษทั้งหมดลงบนเครื่อง TESTOMETRIC MICO 500 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเรียบร้อยแล้วนำลวดทดสอบใส่ในเครื่องมือดังกล่าวจากนั้นทำการตั้งค่าต่างๆในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะทำการทดสอบโดยตั้งค่าต่างๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

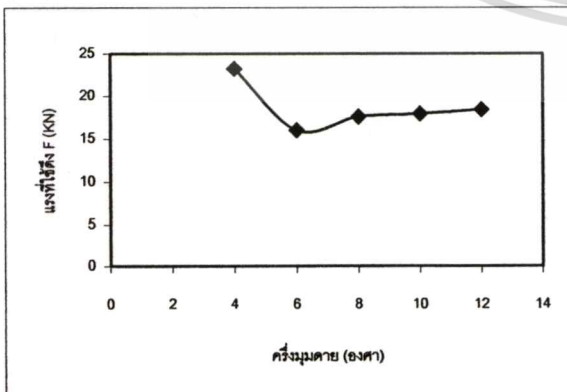
1. ค่าความเร็วในการทดลอง = 0.5 mm/s
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 12.7 mm
3. กำหนดสเกลวัดแรงดึงสูงสุดไว้ = 200 kN
4. ตั้งชนิดการทดสอบไว้เป็นทดสอบดึง
5. ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียสคงที่

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการดึงลวดที่มีครีزمุมตาย 4, 6, 8, 10 และ 12 องศา โดยไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้สารหล่อลื่นโดยปรับเปลี่ยนค่าความดันของสารหล่อลื่นตั้งแต่ 0, 30, 60 และ 100 บาร์ตามลำดับ
2. ตลอดการทดลองเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการพล็อตกราฟและผลของการทดลองลงในคอมพิวเตอร์
3. ทำซ้ำๆหลาย ๆ ครั้งสำหรับแต่ละตัวอย่างจนแน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน
4. นำลวดทดสอบที่ผ่านการดึง ผลการทดลองและกราฟที่ได้หลังจากการทดลองมาทำการวิเคราะห์
5. ทำการทดสอบความแข็งตั้งแต่ผิวภายนอกจนถึงจุดกึ่งกลางของชิ้นงานและเก็บข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์
6. เช็คสภาพผิวของชิ้นงานที่ได้เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์

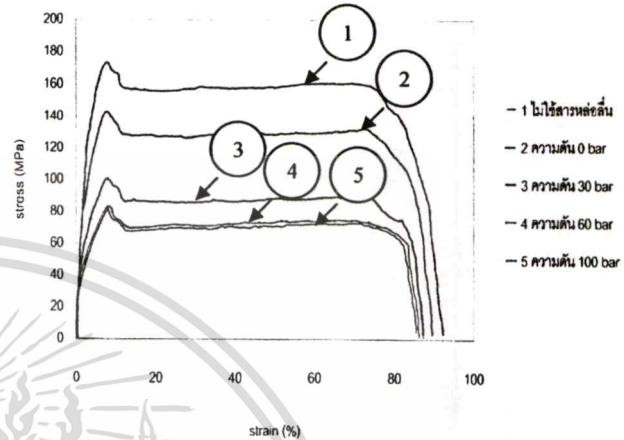
4 ผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าชิ้นงานที่ผ่านการดึงลดขนาดลงนั้นค่าครีزمุมตายมีอิทธิพลต่อแรงที่ใช้ดึงเป็นอย่างมากซึ่งจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในรูปที่ 6



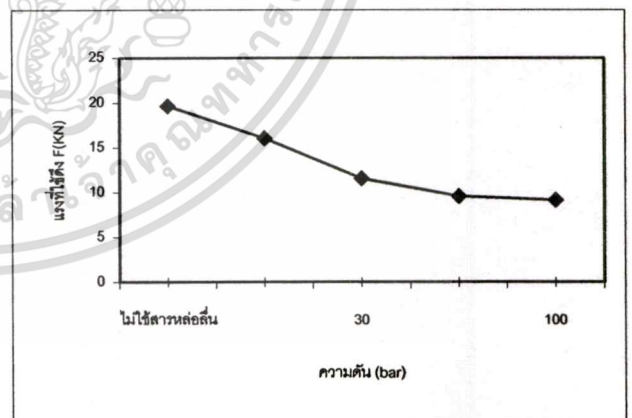
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงและขนาดของครีزمุมตาย

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าครีزمุมตายที่น้อยมาก ๆ จะส่งผลทำให้เกิดความเค้นสูงทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่ครีزمุมตายมีขนาดแคบจนก่อให้เกิดแรงต้านที่สูงมากในบริเวณที่เส้นลวดสัมผัสกับผิวตาย สำหรับที่ครีزمุมตาย 4, 6, 8, 10 และ 12 องศาจะเห็นว่าความเค้นสูงสุดจะเกิดที่ครีزمุมตาย 4 องศา และที่ครีزمุมตาย 6 องศา จะมีความเค้นต่ำที่สุดซึ่งถือเป็นขนาดครีزمุมตายที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นขณะดึงขึ้นรูปที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้ความดันของสารหล่อลื่น 0, 30, 60 และ 100 บาร์

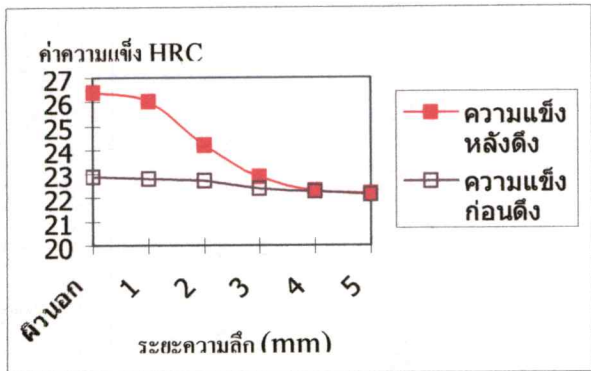
จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าค่าของความเค้นและความเครียดจะมีค่ามากที่สุดขณะดึงขึ้นรูปโดยไม่ใช้สารหล่อลื่นและมีค่าต่ำสุดขณะดึงขึ้นรูปโดยใช้ความดัน 100 บาร์



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงกับความดันของสารหล่อลื่น

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่าของแรงที่ใช้ดึงจะมีผลทำให้เกิดแรงดึงสูงสุดในขณะที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นและจะมีค่าต่ำสุดที่ความดันสารหล่อลื่น 100 บาร์ โดยจะเห็นว่าที่ความดันของสารหล่อลื่น 60 บาร์ และ 100 บาร์ แรงที่ใช้ดึงจะแตกต่างกันน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะความลึกจากผิวหน้าของลวดทองแดงที่ผ่านการดึงที่ความดันสารหล่อลื่น 100 บาร์

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าค่าของความแข็งที่บริเวณผิวของชิ้นงานจะมีความแข็งสูงสุดและที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานจะมีความแข็งต่ำสุด โดยที่ความแข็งที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการอัดตัวของเนื้อโลหะที่บริเวณนอกสุดและจะค่อย ๆ ลดต่ำลงจนถึงบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานความแข็งของและเนื้อโลหะที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อเทียบกับค่าความแข็งของวัสดุก่อนการดึงขึ้นรูปเนื่องจากทองแดงเป็นวัสดุอ่อนแม้จะลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงถึง 36 %

[100 bar] [60 bar] [30 bar] [0 bar] [ไม่ใช้สารหล่อลื่น]



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ความเรียบผิวกับความดัน

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าค่าความเรียบผิวของชิ้นงานหลังการดึงขึ้นรูปที่ความดันสูงจะมีความเรียบผิวดีขึ้นเรื่อยๆ และดีที่สุดที่ความดัน 100 บาร์ โดยจะเห็นความแตกต่างชัดเจนเมื่อเทียบกับความเรียบผิวที่ไม่ใช้สารหล่อลื่น

สรุป

จากผลของการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

- (1) ค่าความเค้นในเส้นลวดจะลดลงต่ำสุดในขณะที่ใช้เครื่องมือตาย 6 องศาและที่เครื่องมือตาย 4 องศาจะเกิดความเค้นสูงสุดในการทดลองที่เครื่องมือตาย 4, 6, 8, 10 และ 12 องศาและที่เครื่องมือตายมากเกิน 6

องศาขึ้นไปค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่าที่เครื่องมือตาย 6 องศาเป็นขนาดของเครื่องมือตายที่เหมาะสมที่สุดกับการดึงลวดทองแดงลดขนาดจาก 12.7 มม. ลงเหลือ 10.16 มม. ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 36 %

(2) ค่าความเค้นดึงในเส้นลวดจะลดลงเมื่อใช้ความดันสารหล่อลื่นที่ความดัน 100 บาร์ซึ่งเป็นความดันของสารหล่อลื่นที่ดีที่สุดในการทดลองครั้งนี้ จากการพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความดันของสารหล่อลื่นที่ความดัน 60 บาร์ และ 100 บาร์ค่าของแรงดึงจะแตกต่างกันไม่มากนักโดยที่แรงดึงขึ้นรูปจะลดลงสูงสุดในช่วงของความดัน 0 ถึง 60 บาร์

(3) สภาพผิวของเส้นลวดหลังการดึงขึ้นรูปผลของความดันจะทำให้สภาพผิวของเส้นลวดที่ผ่านการดึงดีที่สุดที่ความดันสูงสุดที่ทำการทดลองที่ 100 บาร์เนื่องจากความดันของสารหล่อลื่นยิ่งสูงความเสียหายบนบริเวณผิวงานก็ยิ่งลดลง

(4) ความแข็งของเส้นลวดที่เพิ่มขึ้นนั้นจะอยู่ที่บริเวณผิวด้านนอก ส่วนตรงกลางของเส้นลวดจะมีความแข็งของเนื้อทองแดงใกล้เคียงกับค่าก่อนการดึงลดขนาดเนื่องจากเกิดการอัดตัวที่บริเวณผิวของงานทำให้เนื้อโลหะอัดตัวแน่นขึ้นจึงทำให้ผิวชิ้นงานแข็งขึ้นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ Professor Kazanari Yoshida พร้อมคณะจาก Tokai University Japan คุณพงษ์ศักดิ์ นิสภกุล คุณกริชาพล สุลีลายุทธพล และ คุณรุจิโรจน์ เลียบวิไล บมจ. อุซาสยามสตีลอินดัสตรีอีสท์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้จนเป็นผลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Edward M. Mielnik, Metalworking Science and Engineering, 397-463
- [2] J. Charkrabarty, Theory of Plasticity, Mc Graw-Hill International Editions, 1987
- [3] Kurt Lange, Handbook of Metal Forming, Editor in chief, Mc Graw-Hill Book Company
- [4] S. Norasatsopon and T.Tangsri, "Experimental study of the effect of a half die angle on drawing stress during wire drawing" Ladkrabang Engineering Journal, March 2001, pp.134-139.
- [5] P. Kaewtatip, "A study on the effect of drawing speed on the performances of wire drawing process" Conference for ME NETT 15th, Thailand, 2001, pp.151-155.
- [6] D.V. Yanaki, "Feeding commercial lubricant under pressure into the deformation zone in drawing" Stal in English, 1963(6), pp.492-493.
- [7] K. Yoshida, H. Tanaka, "The drawability of Ni-Ti shape memory alloy wires" Wire and Bar, 89-94(1995) 2,45.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายธนิต แต่งศรี
วัน เดือน ปี	20 ตุลาคม 2501
วุฒิการศึกษา	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 2540
ประสบการณ์ทำงาน	
2539: ปัจจุบัน	โรงเรียนเทคโนโลยีไทยสุริยธรรมอินทรา 70/2 หมู่ 5 ถ.รามอินทรา แขวงคันทนายาว เขตคันทนายาว กรุงเทพมหานคร 10230
ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์	
2544	“การศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมคานที่มีต่อความเค้นดึง ระหว่างทำการดึงลดขนาดลวดด้วยวิธีทดลอง” Ladkrabang Engineering Journal, March 2001, pp.134-139.
2545	“ผลกระทบของครึ่งมุมคานและความดันของสารหล่อ ลื่นต่อความแข็งแรงของลวดทองแดงเมื่อผ่านกระบวนการ ขึ้นรูปเย็นด้วยวิธีทดลอง” Mechanical Engineering Network of Thailand The 16 th Conference.