

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในลักษณะการปริแตกที่เกิดขึ้นในแกนกลาง  
ของเส้นลวดขณะดึงเส้นลวดผ่านตายโดยวิธีทดลอง

ANALYSIS OF THE CENTRAL BURSTING DEFECTS OF THE  
WIRE DURING DRAWING BY EXPERIMENT



ปิ่น ประมาพันธ์  
PIN PRAMAPHANT

ฉพ.  
๗/๖๑๖๗  
๒๕๔๘

เลขหมู่.....**60504**  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี- 3 ก.ค. 2549

b. 11๕๔๕๙๘  
.....  
.....

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ISBN 974-15-1816-1  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ANALYSIS OF THE CENTRAL BURSTING DEFECTS OF THE  
WIRE DURING DRAWING BY EXPERIMENT**



**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**

**2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน ISBN 974-15-1816-1 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ยืมได้เห็นรายละเอียดประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในลักษณะการปริแตกที่เกิดขึ้นในแกนกลางของ  
เส้นลวดขณะดึงเส้นลวดผ่านคานาโดยวิธีทดลอง  
**นักศึกษา** นายปิ่น ประมาพันธ์  
**รหัสประจำตัว** 43062042  
**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
**สาขาวิชา** วิศวกรรมเครื่องกล  
**พ.ศ.** 2548  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นภายในแกนกลางของเส้นลวดใน  
ขณะที่ทำการดึงเส้นลวดผ่านคานา โดยลดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลง วัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้  
ใช้ลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร ขนาดของมุมคานาที่ใช้มี 2 ขนาด  
มุมคานา 45 องศา ดึงลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดลง 25 เปอร์เซ็นต์ มุมคานา 30 องศา ดึงลดขนาด  
ของพื้นที่หน้าตัดลง 15 เปอร์เซ็นต์ การทดลองโดยการดึงเส้นลวดผ่านคานาหลาย ๆ ครั้งในอุณหภูมิห้อง  
ปกติจนกระทั่งเกิดรอยแตกร้าวภายในแกนกลางของเส้นลวด นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับ  
การดึงเส้นลวดผ่านคานาโดยการอบคืนตัวของเส้นลวดที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ดังนี้ 100, 150, 250  
และ 300 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบคืนตัว 1 ชั่วโมง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า  
การอบคืนตัวของเส้นลวดที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน สามารถลดพฤติกรรมการแตกร้าวที่แกนกลางของ  
เส้นลวดลงได้ ขนาดมุมคานาที่โตมีผลทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่แกนกลางของเส้นลวดมากกว่าขนาดมุมคานา  
ที่มีค่าน้อย



# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือและสนับสนุนเป็นอย่างดีจากบุคคลที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องาน และการแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่พบในระหว่างการทำงานวิจัย

Professor. Kazunari Yoshida พร้อมคณะจาก Tokai University ประเทศญี่ปุ่น ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในส่วนของการให้คำแนะนำในการใช้ซอฟต์แวร์ในการช่วยการวิเคราะห์ปัญหา ตลอดจนคำชี้แนะอื่น ๆ

ผศ. มิ่ง โลกิจแสงทอง และ รศ.จำลอง ปราบแก้ว ที่กรุณาที่ให้ความช่วยเหลือในส่วน of เครื่องมือทดสอบ และช่วยแก้ปัญหาในด้านเทคนิค

คุณมณฑา เทียมเมือง เจ้าหน้าที่ช่างเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือในส่วน of เครื่องมือและช่วยแก้ปัญหาในด้านเทคนิค

อาจารย์สุชาติ หมอยาดี และอาจารย์ณรงค์ แผนกช่างเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคระยอง ที่กรุณาที่ให้ความช่วยเหลือในส่วน of เครื่องมือทดสอบ และช่วยแก้ปัญหาในด้านเทคนิค

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รวมทั้งเพื่อน ๆ เป็นอย่างยิ่ง และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา และมารดาเป็นอย่างยิ่งที่ได้สนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ปิ่น ประมาพันธ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของ การศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 พื้นฐานการผลิต.....	5
2.1 การผลิตในงานอุตสาหกรรม.....	5
2.1.1 ความหมายของการผลิต.....	5
2.1.2 ลักษณะและองค์ประกอบของกระบวนการผลิต.....	6
2.1.3 ความสามารถในการผลิต.....	7
2.2 การแบ่งกลุ่มกระบวนการผลิต.....	8
2.2.1 กระบวนการผลิตชิ้นส่วน.....	8
2.2.2 กระบวนการประกอบชิ้นส่วน.....	11
2.3 วัสดุที่ใช้ในการผลิตทางวิศวกรรม.....	12
2.3.1 การแบ่งกลุ่มของวัสดุ.....	12
2.3.2 วัสดุทางวิศวกรรม.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การขึ้นรูปวัสดุ.....	14
3.1 การรีดขึ้นรูป (Rolling).....	14
3.2 การตีขึ้นรูป (Forging).....	15
3.2.1 Hammer or smith forging.....	15
3.2.2 Drop forging.....	15
3.2.3 Upset forging.....	16
3.2.4 การตีอัดขึ้นรูป.....	17
3.2.5 การตีหมุนขึ้นรูป.....	17
3.3 การดันขึ้นรูป (Extrusion).....	18
3.3.1 กรรมวิธีในการดันขึ้นรูป.....	18
3.3.2 การดันขึ้นรูป (Stretch forming).....	20
3.3.3 การอัดหรือการตีขึ้นรูป (Swaging or Cold forging).....	20
3.3.4 การอัดแบบหล่อ (Hobbing).....	21
3.3.5 การทำเหรียญตราและการอัดนูน (Coining and Embossing).....	21
3.3.6 การย้ำหัวและการย้ำมุม (Riveting and Staking).....	22
3.4 การขึ้นรูปโลหะแผ่น (Plate bending).....	22
3.4.1 การเข้าตะเข็บ (Seaming).....	23
3.5 การดึงลวด (Wire drawing).....	23
3.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการดึงเส้นลวดผ่านคาน.....	24
3.6.1 สมการพื้นฐานการดึงขึ้นรูป.....	24
3.6.2 งานที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด.....	25
3.6.3 ตัวแปรช่วงการเปลี่ยนรูป.....	25
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	29
4.1 การออกแบบขั้นทดสอบ.....	29
4.2 การออกแบบชุดจับคาน.....	31
4.3 การออกแบบคาน.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 วิธีทดลอง.....	37
5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดลอง.....	37
5.2 กรณีศึกษาการดึงเส้นลวดผ่านคายขนาดของครึ่งมุดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ 15 องศา ขนาดการลดพื้นที่หน้าตัด 15 เปอร์เซ็นต์.....	39
5.3 กรณีศึกษาการดึงเส้นลวดผ่านคายขนาดของครึ่งมุดาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ 22.5 องศา ขนาดลดพื้นที่หน้าตัด 25%.....	40
5.4 กรณีศึกษาการดึงเส้นลวดผ่านคาย และอบคืนตัวขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100, 150, 200, 250, 300 °c.....	41
บทที่ 6 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผล.....	44
6.1 ผลที่ได้จากการทดลองในกรณีของการดึงเส้นลวดผ่านคายหลายๆ เที้ยว.....	44
6.1.1 ความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงระยะที่ยืดออกของเส้นลวด.....	44
6.1.2 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึง.....	47
6.1.3 ความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึง ขนาดของครึ่งมุดาย 15 องศา ขนาดของการลดพื้นที่หน้าตัด 15 %.....	51
6.1.4 ความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึง ขนาดของครึ่งมุดาย 15 องศา ขนาดของการลด พื้นที่หน้าตัด 15 %.....	57
6.2 ผลของการอบเส้นลวดทองแดงเพื่อคลายความเค้น.....	62
6.2.1 กรณีครึ่งมุดาย 22.5 องศา R/P 25% Do เท่ากับ 20 mm.....	62
6.2.2 กรณีครึ่งมุดาย 22.5 องศา R/P 25% Do เท่ากับ 20 mm.....	63
6.3 รอยปริแตก และการขยายตัวของรอยปริแตก.....	63
6.4 ผลของมุดาย และจำนวนเที้ยวของการดึงขึ้นรูป.....	66
6.5 แรง และความเค้นดึงขึ้นรูป.....	68
6.6 การวิเคราะห์ความเค้นดึงขึ้นรูปจากผลการทดลอง.....	69
6.6.1 การดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตามปกติ.....	69
6.6.2 การดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายกรณีที่ตัดเส้นลวดเพื่อลดขนาดให้สั้นลง.....	70

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุป และข้อเสนอแนะ.....	72
7.1 บทสรุป.....	72
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
เอกสารอ้างอิง .....	74
ภาคผนวก.....	76
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	81
ประวัติผู้เขียน.....	89



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปชิ้นงาน.....	27
3.2 มุมคายที่ดีที่สุด (โดยแรงที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง) ในการดึงขึ้นรูปเย็น.....	28
4.1 คุณสมบัติของทองแดงที่ใช้ในการทดลอง.....	29
4.2 คุณสมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขที่ใช้ในการดึงลวดด้วยวิธีทดลอง.....	29
4.3 แสดงค่าคุณสมบัติของคายที่ใช้ในการทดลอง.....	34
4.4 แสดงรายละเอียดของค่าตัวแปรต่างๆที่เป็นมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต.....	34
4.5 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความเผื่อของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ยอมรับได้.....	35
4.6 แสดงขนาดลวดก่อนและหลังดึงผ่านคายกรณีใช้คายที่มี $Re/P = 25\%$ .....	35
4.7 แสดงขนาดลวดก่อนและหลังดึงผ่านคายกรณีใช้คายที่มี $Re/P = 15\%$ .....	36
5.1 แสดงชั้นทดสอบที่ผ่านคายแต่ละตัวในกรณี $\alpha$ เท่ากับ 15 องศา $R/P = 15\%$ .....	40
5.2 แสดงชั้นทดสอบที่ผ่านคายแต่ละตัวในกรณี $\alpha$ เท่ากับ 22.5 องศา, $R/P = 25\%$ .....	41
5.3 แสดงขั้นตอนการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคายในกรณีการอบคืนตัว.....	42
5.4 แสดงขั้นตอนการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคายในกรณีการอบคืนตัว.....	43
6.1 เปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านคาย.....	47
6.2 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นตั้งแต่คายที่ 1 ถึง 8.....	51
6.3 แสดงผลของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านคาย $\alpha = 15$ , $R/P = 20\%$ , $D_o = 20$ mm.....	57
6.4 เปรียบเทียบความเค้นดึงขึ้นรูปตั้งแต่คายตัวที่ 1 ถึงคายตัวที่ 12.....	62

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ.....	2
2.1 ระบบการผลิต.....	5
2.2 กระบวนการผลิตทางเทคนิค .....	6
2.3 กระบวนการผลิตทางเศรษฐศาสตร์.....	6
2.4 แสดงการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อ.....	9
2.5 แสดงการขึ้นรูปวัสดุผสม.....	9
2.6 แสดงกรรมวิธีการขึ้นรูปเปลี่ยนรูปด้วยแรง.....	10
2.7 แสดงการขึ้นรูปโดยการตัดเฉย.....	10
2.8 แสดงการแบ่งกลุ่มของวัสดุ.....	12
3.1 แสดงการรีดขึ้นรูปด้วยลูกกลิ้ง.....	14
3.2 ชิ้นส่วนที่ผลิตจากกรรมวิธีการรีดเย็น.....	14
3.3 เครื่องจักรที่ใช้รีดขึ้นรูป.....	15
3.4 แสดงแม่พิมพ์การตีอัดขึ้นรูป.....	16
3.5 แสดงเปรียบเทียบเกรนของโลหะที่ได้จากการ machine กับ forged.....	16
3.6 แสดงขั้นตอนการตีอัดขึ้นรูปพร้อมตัวอย่างชิ้นงาน.....	16
3.7 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Upset forging .....	16
3.8 แสดงตัวอย่างชิ้นงาน.....	16
3.9 แสดงเครื่องจักรอัดกระแทกแนวนอน.....	17
3.10 แสดงหลักการของการตีหมุนขึ้นรูปด้วยลูกกลิ้ง.....	17
3.11 แสดงการตีหมุนขึ้นรูปโดยลูกกลิ้ง ขึ้นรูป.....	17
3.12 แสดงการดันขึ้นรูปแบบ direct extrusion.....	18
3.13 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบ direct extrusion .....	18
3.14 แสดงรูปหน้าตัดให้เห็นลักษณะการดันขึ้นรูป.....	19
3.15 แสดงการดึงหรือดันขึ้นรูปขึ้นงานรูปทรงกระบอก.....	19
3.16 การอัดและดึงขึ้นรูป.....	20
3.17 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการอัดและดึงขึ้นรูป.....	20
3.18 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโลหะแบบ Swaging.....	20
3.19 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปโลหะแบบ Swaging.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 แบบพิมพ์ที่ใช้ในการอัด.....	21
3.21 แสดงความแตกต่างในการทำให้เป็นตัวนูน.....	21
3.22 แสดงความแตกต่างระหว่างการอัดหมึกกับการอัดหัว.....	22
3.23 แสดงการตัดเหล็กแผ่นด้วยลูกกลิ้ง.....	22
3.24 แสดงชิ้นงานที่ผ่านขบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยลูกกลิ้ง.....	22
3.25 แสดงการดึงขึ้นรูปและแบบพิมพ์ (dies) ที่ใช้ดึงลวด.....	24
3.26 ความสัมพันธ์ของงาน 3 ค่าหลักที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด $W_f$ , $W_h$ และ $W_r$ .....	25
3.27 แม่พิมพ์ดึงลวด (Drawing die).....	26
4.1 แสดงรูปถ่ายของลวดทองแดงที่ใช้ในการทดลองการทดลอง.....	30
4.2 กราฟแสดงความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของทองแดงก่อนการทดลอง.....	30
4.3 กราฟแสดงความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของทองแดงหลังการทดลอง.....	31
4.4 แสดงชุดอุปกรณ์จับคายนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร.....	31
4.5 แสดงชุดอุปกรณ์จับคายนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร.....	32
4.6 คาย (Dies) ขนาดต่างๆ.....	32
4.7 แสดงรูปของคายนและมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต.....	33
4.8 คาย (Dies) ขนาดครึ่งมมคายน 22.5 องศา.....	33
4.9 คาย (Dies) ขนาดครึ่งมมคายน 15 องศา.....	33
5.1 แสดงไดอะแกรมการทำงานของเครื่องทดลอง.....	38
5.2 รูปด้านหน้าของเครื่องทดลองพร้อมอุปกรณ์คอมพิวเตอร์.....	38
5.3 แสดงเตาอบไฟฟ้าที่สามารถปรับตั้งอุณหภูมิได้ตามต้องการ.....	39
5.4 แสดงการอบกึ่งตัวในอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	42
6.1 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 1.....	44
6.2 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 2.....	44
6.3 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 3.....	45
6.4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 4.....	45
6.5 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 5.....	45
6.6 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 6.....	46
6.7 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 7.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 8.....	46
6.9 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดง ผ่านคาน้ำตัวที่ 1.....	48
6.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดง ผ่านคาน้ำตัวที่ 2.....	48
6.11 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดง ผ่านคาน้ำตัวที่ 3.....	48
6.12 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดง ผ่านคาน้ำตัวที่ 4.....	49
6.13 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดง ผ่านคาน้ำตัวที่ 5.....	49
6.14 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดง ผ่านคาน้ำตัวที่ 6.....	49
6.15 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดง ผ่านคาน้ำตัวที่ 7.....	50
6.16 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดง ผ่านคาน้ำตัวที่ 8.....	50
6.17 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 1.....	52
6.18 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 2.....	52
6.19 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 3.....	52
6.20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 4.....	53
6.21 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 5.....	53
6.22 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 6.....	53
6.23 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 7.....	54
6.24 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 8.....	54
6.25 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 9.....	54
6.26 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 10.....	55
6.27 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 11.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.28 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 12 .....	55
6.29 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 1.....	57
6.30 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 2.....	57
6.31 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 3.....	58
6.32 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 4.....	58
6.33 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 5.....	58
6.34 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 6.....	59
6.35 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 7.....	59
6.36 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 8.....	59
6.37 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 9.....	60
6.38 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 10.....	60
6.39 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 11.....	60
6.40 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคาน้ำตัวที่ 12.....	61
6.41 แสดงความเค้นดึงขึ้นรูปกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกรณีเครื่องมุดาย 15 องศา R/P 15% Do เท่ากับ 20 mm.....	62
6.42 แสดงความเค้นดึงขึ้นรูปกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกรณีเครื่องมุดาย 22.5 องศา R/P 25% Do เท่ากับ 20 mm.....	63
6.43 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้น ลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา.....	63
6.44 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้น ลวดทองแดง ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 12 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา.....	64
6.45 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของ เส้น ลวดทองแดง ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 8 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 22.5 องศา.....	64
6.46 แสดงภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของ เส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 10 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา.....	65
6.47 แสดงภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกน กลางของ เส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่ง คาย 15 องศา.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.48 แสดงขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนว แกนกลางของ เส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 12 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา .....65	65
6.49 แสดงภาพขยาย 20 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตาม แนวแกนกลางของ เส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา.....66	66
6.50 แสดงภาพขยาย 20 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลาง ของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 12 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา.....66	66
6.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ระหว่างทดลองดึงขึ้นรูปลวดทองแดง กรณีไม่มีการปริแตก (Central Burst) เกิด ขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด .....67	67
6.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ระหว่างทดลองดึงขึ้นรูปลวดทองแดง กรณีมีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกน กลางของเส้นลวด.....67	67
6.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดึงขึ้นรูปลวด และ ความเค้นดึงขึ้นรูปลวดกับ จำนวนคายที่ใช้ดึงเส้นลวดสำหรับมุมครึ่งคาย 15 องศา ดึงลดพื้นที่หน้าตัดลง 15 % .....68	68
6.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (แรงดึงขึ้นรูปลวด) และ Stress กับจำนวนคาย ที่ใช้ดึงเส้นลวด มุมครึ่งคาย 22.5 องศา ลดพื้นที่หน้าตัดลง 25 %.....69	69
6.55 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 4 .....69	69
6.56 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 5.....70	70
6.57 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 6.....70	70
6.58 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 7.....71	71

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$\alpha$	ครึ่งมุมคาย (องศา)
$\mu$	แรงเสียดทาน
$\nu$	Poisson's ratio
$\sigma$	ความเค้น (stress)
$\epsilon$	ความเครียด (strain)
$A_0$	ขนาดพื้นที่หน้าตัดก่อนดึงผ่านคาย ( $\text{mm}^2$ )
$A_1$	ขนาดพื้นที่หน้าตัดหลังดึงผ่านคาย ( $\text{mm}^2$ )
$D$	Elasticity matrix
$D_{e,p}$	Elastic-Plastic matrix
$D_0$	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางก่อนดึงผ่านคาย (mm)
$D_1$	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลังดึงผ่านคาย (mm)
$E$	Young's modulus
$F$	แรง (kgf)
$G$	ความถ่วงจำเพาะ
$L_0$	ขนาดความยาวก่อนดึงผ่านคาย (mm)
$L_1$	ขนาดความยาวหลังดึงผ่านคาย (mm)
$T$	แรงดึง (N)
$V$	ความเร็ว
$\text{Cu}$	ทองแดง
SS304	สแตนเลสมาตรฐาน JIS-SUS304
$\eta$	ประสิทธิภาพ
$\text{Re}$	สัดส่วนการลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดของลวด

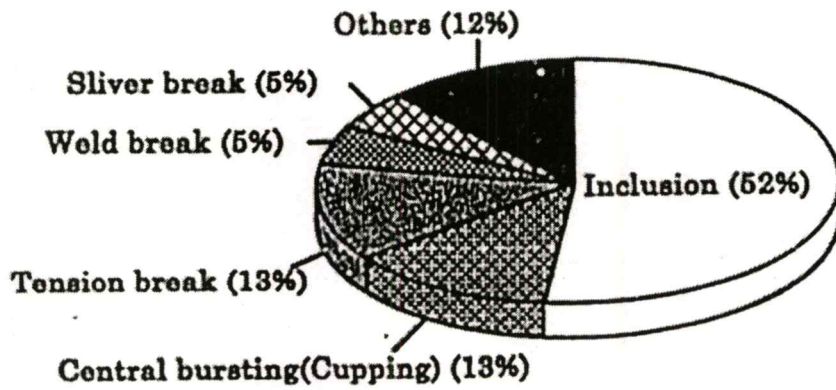
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีการผลิตของกระบวนการขึ้นรูปโลหะมีความก้าวหน้าอย่างมาก การพัฒนาดังกล่าวเพื่อรองรับอุตสาหกรรมการผลิตซึ่งนับวันจะยิ่งพัฒนาก้าวหน้ายิ่งขึ้นไป และจะต้องพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เดียวกันจะต้องศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งมีอิทธิพลต่อการพัฒนากระบวนการขึ้นรูปโลหะ กระบวนการขึ้นรูปโลหะ (Forming Process) ส่วนใหญ่จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นโลหะ หรือบางทีเรียกว่า Deformation Process สามารถแบ่งได้หลายวิธีดังนี้ แบ่งตามชนิดของแรงกระทำบนชิ้นงาน เช่น แรงอัด แรงดึง และแรงเฉือน แบ่งตามการใช้งานของชิ้นงานสำเร็จ เช่น ชิ้นงานที่สามารถนำไปใช้งานได้เลย และชิ้นงานที่จะต้องนำไปประกอบกับชิ้นงานอื่น ๆ จึงสามารถนำไปใช้งานได้ แบ่งตามขนาดของชิ้นงานเช่น ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นงานที่มีทั้งก้อน และชิ้นงานที่ขึ้นรูปเป็นแผ่น แบ่งตามอุณหภูมิในการทำงาน เช่น การขึ้นรูปร้อนและการขึ้นรูปเย็น

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์หรือแยกแยะที่เกิเกิดขึ้นภายในแกนกลางของเส้นลวด ขณะที่ทำการดึงเส้นลวดผ่านด้าย โดยลดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลง วัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้ลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 20 mm. ขนาดของม้วนด้ายที่ใช้มี 2 ขนาด ครึ่งม้วนด้าย 22.5 องศา ดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 25% ครึ่งม้วนด้าย 15 องศา ดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 15% การทดลองโดยการดึงเส้นลวดผ่านด้ายหลาย ๆ ครั้งในอุณหภูมิห้องปกติจนกระทั่งเกิดรอยแตกร้าวภายในแกนกลางของเส้นลวด นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับกรณีการดึงเส้นลวดผ่านด้ายโดยการอบคืนตัวของเส้นลวดที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ดังนี้ 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซนติเกรด ใช้เวลาในการอบคืนตัว 1 ชั่วโมง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการอบคืนตัวของเส้นลวดที่อุณหภูมิต่างกันสามารถลดพฤติกรรมการแตกร้าวที่แกนกลางของเส้นลวดได้ ขนาดม้วนด้ายที่โตมีผลทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่แกนกลางของเส้นลวดมากกว่าขนาดม้วนด้ายที่มีค่าน้อย งานวิจัยดังกล่าวจะได้เป็นแนวทางในการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรอื่น ๆ ที่สำคัญรวมทั้งพฤติกรรมของลวดและด้ายที่เกิดจากการดึงขึ้นรูปโลหะต่อไปซึ่งจะเป็นแบบอย่างที่ดีในการพัฒนาออกแบบ หรือคำนวณที่ถูกต้อง และเหมาะสมต่อไป ในรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการแตกร้าวภายในแกนกลางของเส้นลวดที่มีผลกระทบต่อการขาดของลวด ระหว่างการดึงลวดมากถึง 26% ซึ่งเกิดการบัพพองในกระบวนการดึงเส้นลวดผ่านด้าย



รูปที่ 1.1 แสดงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของ

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ คือ

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูปโลหะโดยวิธีการดิ่งที่สัมพันธ์กันระหว่างลวดและคายที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปลวดทองแดง

1.2.2 เพื่อสร้างและออกแบบชุดทดลองในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเส้นลวดทองแดงในระหว่างการดิ่ง

1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการขาดของเส้นลวดในระหว่างการดิ่งเส้นลวดผ่านคาย หลาย ๆ ครั้ง

1.2.4 เพื่อศึกษาถึงการดิ่งเส้นลวดหลาย ๆ ครั้ง ผ่านคายโดยลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด

1.2.5 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อเส้นลวดในการอบคืนตัวของเส้นลวดในที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มีสมมุติฐานของการศึกษาดังต่อไปนี้

1.3.1 คาดว่าขนาดของมุมคายจะมีผลต่อความเค้นและความเครียดอย่างมาก จากครึ่งมุมคายที่แคบ และทำการลดขนาดทันทีทันใด จะทำให้เกิดความเค้นดึงสูงมากจนทำให้วัสดุขาดได้

1.3.2 คาดว่าผลกระทบของการอบคืนตัวของเส้นลวดที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันจะมีผลให้ความเค้นและความเครียดของวัสดุลดลง และจะมีผลต่อการขาดของเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มีทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัยคือ การพัฒนากระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะ การวิเคราะห์ในทางทฤษฎีจากหนังสือและจากผลการวิจัยของผู้วิจัยที่ทำมาก่อนหน้านี้เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีหนังสือและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

### 1.4.1 Influence of Process Parameters in Drawing of Superconducting Wire

เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการอิทธิพลของค่าครึ่งมุมคายกับความเค้นดึงและความหนาแน่นของวัสดุแกน วิจัยโดย M. Malbeg, J. Bech, N.Bay Technical University of Denmark, P. Skov-Hanssen Nordic Superconductor Technologies

### 1.4.2 Limit-Analysis of Flow Through Conical Converging Dies

เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับข้อจำกัดของการเปลี่ยนแปลงเส้นการเลื่อนไหลที่บริเวณสัมผัสระหว่างลวด และคาย วิจัยโดย Betzalel Avitzur

### 1.4.3 The effect of dies angle on texture and annealing response of ETP copper wire

เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของมุมคาย และการอบคืนตัวของลวดทองแดง

### 1.4.4 Analysis of Central Bursting Defect in Extrusion and Drawing

เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของมุมคาย ที่มีผลกระทบต่อการปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวด

### 1.4.5 Experimental Study of the Effect of a Half-Die Angle on Drawing Stress

During Wire

Drawing เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของมุมคายที่มีผลต่อความเค้นดึงขณะดึงเส้นลวดผ่านคาย

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตของกรวิจัยดังนี้คือ ทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเส้นลวดระหว่างการดึงขึ้นรูปลวดทองแดง

1.5.1 เพื่อศึกษากระบวนการขึ้นรูปโลหะ โดยวิธีการดึงที่สัมพันธ์กันระหว่างลวดและคาย

1.5.2 เพื่อสร้างและออกแบบชุดทดลองในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเส้นลวดในระหว่างการดึง

1.5.3 ศึกษาถึงผลกระทบของมุมคายที่ต่างกันที่มีผลกระทบต่อการขาด ของเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.4 ศึกษาถึงผลกระทบของการลดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดทองแดงในขณะที่ทำการดึงผ่านด้าย

1.5.5 ศึกษาถึงผลกระทบในการอบคืนตัวเพื่อคลายความเค้นในอุณหภูมิต่างกัน

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในการทำวิทยานิพนธ์มีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.6.2 ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.3 ทำการออกแบบเครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลวดทองแดงในระหว่างการดึงขึ้นรูป โดยสร้างขึ้นมาเป็นกรณีพิเศษเพื่อใช้ในการทดลอง

1.6.4 ทำการทดลองการดึงเส้นลวดผ่านด้ายหลายๆ ครั้ง โดยลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง

1.6.5 ทำการนำชิ้นงานที่ผ่านการดึงขึ้นลวดไปอบคลายความเค้น และนำมาทดลองดึงผ่านด้าย

1.6.6 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง

1.6.7 สรุปผลการทดลอง

## บทที่ 2

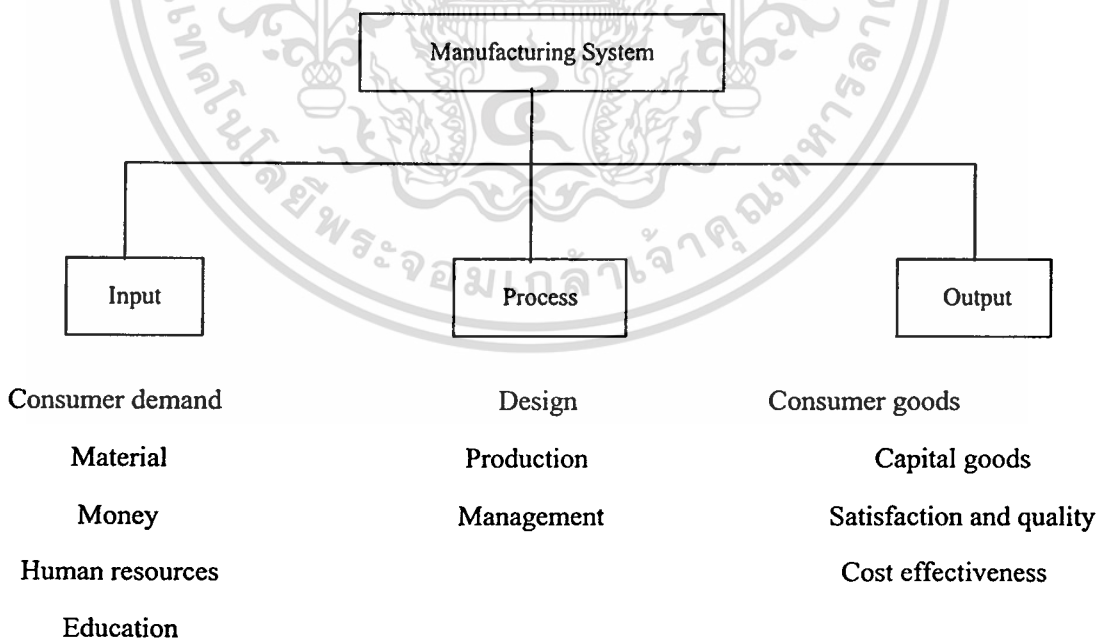
# พื้นฐานของการผลิต

ในพื้นฐานการผลิตมีสิ่งที่สำคัญอยู่ด้วยกัน 3 ประการ คือ เทคโนโลยีการผลิต ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หรือสินค้าจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีที่เหมาะสม เพื่อที่จะทำให้สามารถนำสินค้าออกสู่ตลาดและต่อสู้กับคู่แข่งทางการค้าได้โดยทั้งนี้สินค้านั้น ๆ จะต้องมีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา

### 2.1 การผลิตในอุตสาหกรรม

#### 2.1.1 ความหมายของการผลิต

สินค้าที่ผลิตขึ้นมา (Manufactured goods) โดยทั่วไปแล้ว แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สินค้าจำพวกเครื่องอุปโภคและสินค้าสำหรับผู้ประกอบการ สินค้าของผู้ประกอบการเป็นสินค้าที่จะต้องส่งให้กับบริษัทต่าง ๆ เพื่อทำการผลิตเป็นสินค้าอีกครั้งหนึ่ง ส่วนสินค้าจำพวกเครื่องอุปโภคบริโภค เป็นสินค้าที่ผ่านการซื้อขายจากผู้ซื้อโดยตรง เราสามารถทำการแปรเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุทำให้เป็นผลิตภัณฑ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีคุณภาพที่ดีได้ตามระบบการผลิต ดังรูปที่ 2.1



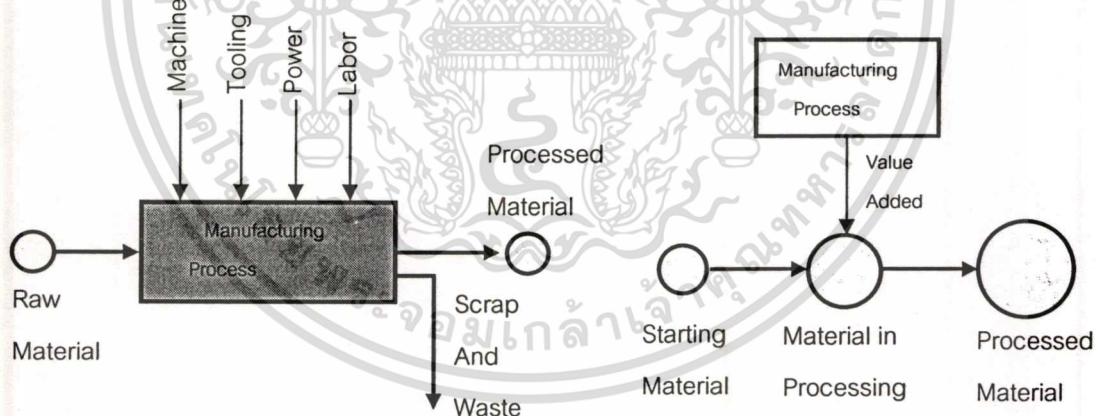
รูปที่ 2.1 ระบบการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิต มีความหมายกว้าง ๆ คือ กระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบหรือวัสดุให้กลายมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ โดยผ่านการออกแบบที่ใช้วิธีการและเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการผลิต คำว่า การผลิต หรือ Manufacturing มาจากภาษาลาติน คือ Manus หมายถึง มือ และ Factus หมายถึง ทำ ซึ่งก็แปลโดยรวมว่า “ทำด้วยมือ” วัสดุ คน วิธีการ และอุปกรณ์ เป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิต ซึ่งจะต้องนำมารวมกันได้อย่างถูกต้องจึงจะทำให้ใช้ต้นทุนต่ำ คุณภาพดีและส่งตามกำหนดเวลาได้

### 2.1.2 ลักษณะและองค์ประกอบของกระบวนการผลิต

ในปัจจุบันการผลิตจะรวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบโดยผ่านกระบวนการ เครื่องจักร และการปฏิบัติการที่มีการวางแผน และการจัดองค์การที่ดีมี 2 ลักษณะ คือ การผลิตโดยกระบวนการทางด้านเทคนิค (Technical Process) และ กระบวนการทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Process) กระบวนการทางด้านเทคนิค เป็นการนำกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีมาประยุกต์ เพื่อใช้ในการแปรรูป และเปลี่ยนคุณสมบัติของวัตถุดิบให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยรวมถึงการประกอบชิ้นส่วนด้วย การผลิตที่ดีจะต้องประกอบด้วย เครื่องจักร เครื่องมือ ต้นพลังงานและแรงงาน ซึ่งทั้งหมดนี้ จะต้องมีการควบคุมและการวางแผนการจัดการที่ดีอย่างมีระบบ เพื่อให้ได้ผลผลิตตามความต้องการของตลาด ดังรูป



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตทางเทคนิค

รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตทางเศรษฐศาสตร์

กระบวนการผลิตทางด้านเศรษฐศาสตร์ มุ่งเน้นทางด้านการบริหาร การขนส่งวัสดุและที่สำคัญคือ การเพิ่มคุณค่า (Value Added) ให้กับวัสดุในกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยการปรับปรุงทั้งด้านรูปร่างและคุณสมบัติ เพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีขึ้น เช่น การปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็ก (Iron)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นเหล็กกล้า (Steel) และการทำทรายให้เป็นแก้วที่ผ่านการปรับปรุงจนใสบริสุทธิ์ ขายเป็นได้ในราคาที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วธรรมดาทั่ว ๆ ไป

### 2.1.3 ความสามารถในการผลิต

ในแต่ละโรงงานการผลิตจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ กระบวนการผลิต การออกแบบระบบการผลิต ตลอดจนถึงขั้นการเพิ่มคุณค่าให้กับวัสดุให้เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งในแต่ละโรงงานที่ทำการผลิตจะดำเนินไปได้ด้วยดี เพื่อที่จะทำให้ความสามารถในการผลิตมีความสามารถสูงขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ คือ

**2.1.3.1 ความสามารถทางเทคโนโลยีของกระบวนการผลิต** ความสามารถทางเทคโนโลยีของกระบวนการผลิตของแต่ละโรงงานหรือบริษัทนำมาใช้จะแปรเปลี่ยนไปตามกระบวนการผลิต เทคโนโลยีในการผลิตจะมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับชนิดของวัสดุ กระบวนการผลิตอย่างหนึ่งก็จะเหมาะสมกับวัสดุชนิดหนึ่ง ซึ่งการเลือกใช้กระบวนการผลิตจำเป็นต้องใช้ผู้มีความชำนาญพิเศษ กำหนดให้เหมาะสมกับวัสดุชนิดนั้น ๆ เทคโนโลยีของกระบวนการผลิตจะไม่เป็นไปตามกายภาพของกระบวนการผลิตเท่านั้น แต่จะถูกกำหนดกระบวนการโดยผู้เชี่ยวชาญด้วย ซึ่งบริษัทใดมีความสามารถทางเทคโนโลยีสูงก็จะได้เปรียบในการเพิ่มความสามารถในการผลิตได้

**2.1.3.2 ข้อจำกัดทางกายภาพของผลิตภัณฑ์** ความสามารถในการผลิต ถูกกำหนดโดยลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ขนาด และน้ำหนักในโรงงานผลิตสินค้าที่มีขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีเครื่องมือช่วยในการเคลื่อนย้าย เช่น เทรน ในกรณีการผลิตสินค้าที่มีขนาดเล็กสามารถทำได้ง่าย และรวดเร็ว เช่น สายพานลำเลียง และ เครื่องจักร ที่ใช้ ก็ จะมีขนาดที่แตกต่างกันไป รวมไปถึง ความแตกต่างของอุปกรณ์ และ โคนดิ่งเก็บของ

**2.1.3.3 กำลังการผลิตความสามารถของกระบวนการผลิต** เป็นปริมาณความสามารถในการผลิตผลิตภัณฑ์ ในช่วงเวลาที่กำหนด เช่น ต่อเดือน หรือ ต่อปี จำนวนความสามารถของปริมาณการผลิตต่อช่วงเวลา หมายถึงกำลังการผลิตของโรงงาน หรือกำลังการผลิตนั่นเอง หรืออีกนัยหนึ่งอาจจะกล่าวถึงความสามารถกระบวนการผลิต ที่ทำให้ได้ผลผลิตที่ออกมาต่อวัสดุที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ในบางโรงงานอาจวัดจากจำนวนวัสดุที่เข้าไปในกระบวนการผลิตแล้วได้ผลผลิตเท่าไร บางโรงงานอาจวัดจากจำนวนชั่วโมงการทำงาน ได้ผลผลิตเท่าไรจำนวนกี่ชิ้น

## 2.2 การแบ่งกลุ่มกระบวนการผลิต

พื้นฐานกระบวนการผลิต สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 พวก ใหญ่ ๆ คือ

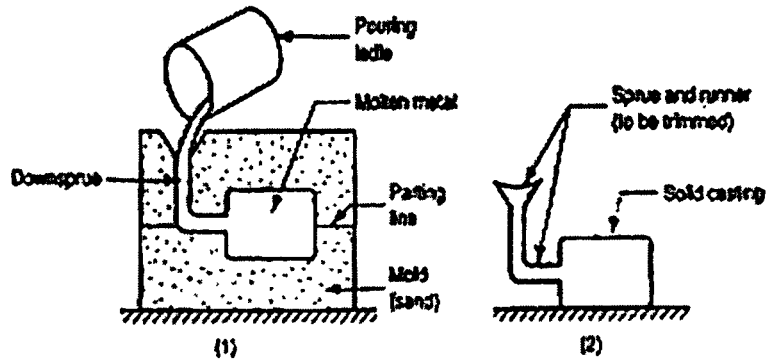
### 2.2.1 กระบวนการผลิตชิ้นส่วน (Processing Operation)

กระบวนการผลิตชิ้นส่วน เป็นการใช้พลังงานเพื่อทำให้ได้ชิ้นงาน โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง คุณสมบัติทางกายภาพ หรือการเพิ่มคุณค่าให้กับวัสดุ โดยใช้พลังงานจากเครื่องจักร ความร้อน

ไฟฟ้า และการใช้พลังงานทางเคมี นอกจากนี้ยังต้องใช้พลังคนซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องคอยควบคุมการทำงานของเครื่องจักร และควบคุมขั้นตอนการผลิต การป้อนวัสดุเข้าเครื่องจักร และการนำเอาชิ้นงานออกจากเครื่องในแต่ละรอบการทำงาน ซึ่งรูปแบบของกระบวนการผลิตมีองค์ประกอบดังรูปที่ 2.1 วัสดุถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งจะต้องใช้พลังงาน เครื่องจักร เครื่องมือ (Tooling) เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างวัสดุ เป็นชิ้นส่วนสำเร็จตามต้องการ จากกระบวนการ ผลิตจะเกิดเศษวัสดุ (Scrap) และของเสีย (Waste) ซึ่งจะถูกปล่อยออกจากกระบวนการผลิตสู่ธรรมชาติ และจะต้องไม่ทำให้สภาพแวดล้อมเสียหายด้วย ผู้ที่ควบคุมกระบวนการผลิตจะต้องพยายามลดของเสีย และเศษวัสดุให้เหลือน้อยที่สุด ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วน มีขั้นตอนการผลิตมากกว่าหนึ่งขั้นตอนที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย จำนวนขั้นตอนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่าง และข้อกำหนดของผู้ออกแบบ ซึ่งจะมีกระบวนการที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ

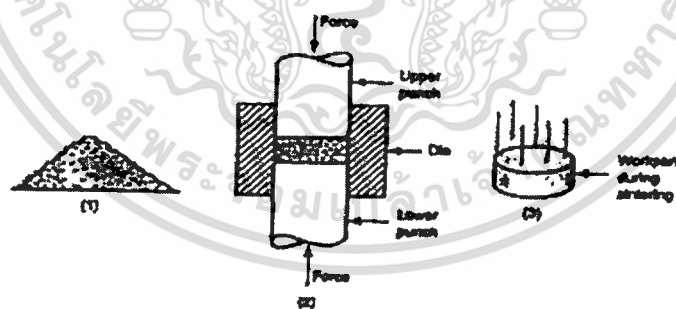
2.2.1.1 กระบวนการขึ้นรูปวัสดุ (Shaping Operation) เป็นการเปลี่ยนรูปวัสดุ ให้ได้รูปทรงตามต้องการ ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การหล่อ (Casting) การอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Forging) และ การขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร (Machining) เป็นต้น กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนการใช้ความร้อน หรือเครื่องจักร หรือรวมกันทั้งสองอย่างทำให้วัสดุชิ้นงานเกิดเปลี่ยนรูปทรงทางเรขาคณิต สามารถจำแนกได้หลายกระบวนการ ซึ่งโดยพื้นฐานมี 4 ลักษณะด้วยกัน คือ

1) การหล่อโลหะ (Casting) การฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Molding) และกระบวนการอื่น ๆ ที่จะต้องให้ความร้อนกับวัสดุจนเป็นของเหลว หรือกึ่งของเหลว วัสดุที่ทำการผลิตในกระบวนการนี้ได้แก่ โลหะ เซรามิก แก้ว พลาสติก เป็นวัสดุที่ให้ความร้อนแล้ว สามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้ เมื่อวัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวหรือกึ่งของเหลวแล้วจะใช้แรงกดดันหรือน้ำหนักตัวของของเหลว ไหลเข้าสู่แบบหล่อ และแข็งตัวภายในแบบหล่อได้รูปทรงตามต้องการ กระบวนการหล่อ จะใช้กับวัสดุที่เป็นโลหะ การฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์จะใช้กับวัสดุพวกพลาสติก วัสดุจำพวกแก้ว อาจจะมีทั้งสองกระบวนการ ส่วนวัสดุผสมพวกโพลีเมอร์ อาจจะใช้กระบวนการเดียวกันกับพลาสติกดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อ

2) กระบวนการขึ้นรูปวัสดุผง (Particulate Processing) วัสดุเริ่มต้นจะมีลักษณะเป็นผง นำมาให้ความร้อนแล้วอัดขึ้นรูป ผงโลหะ หรือเซรามิก ซึ่งทั้งสองวัสดุนี้จะมีรายละเอียดของกระบวนการที่แตกต่างกัน กระบวนการขึ้นรูปโลหะผงนี้สามารถทำได้ง่าย คือการใช้แรงกดพร้อมกับการให้ความร้อน ดังรูปที่ 2.4 นำผงโลหะใส่แบบ แล้วอัดด้วยแรงดันสูง ทำให้ผงโลหะเกิดเป็นรูปร่างตามแบบ อุณหภูมิที่ให้กับวัสดุจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ซึ่งสามารถช่วยทำให้เกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ การเกิดการจับตัวกันของผงโลหะ โดยวิธีนี้เรียกว่า ซินเตอร์ริง (Sintering)

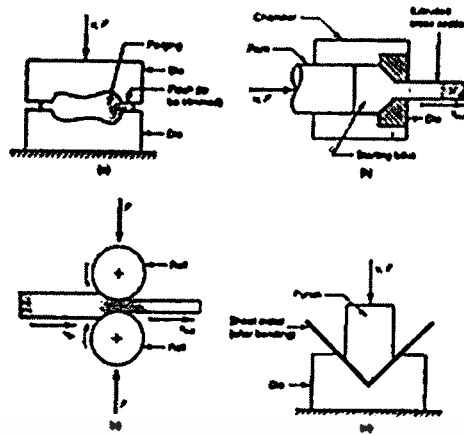


รูปที่ 2.5 แสดงการขึ้นรูปวัสดุผสม

3) กระบวนการเปลี่ยนรูปด้วยแรง (Deformation Processes) วัสดุเริ่มต้นจะเป็นวัสดุแข็งเหนียว (Ductile Solid) โดยทั่วไปเช่น โลหะ การเปลี่ยนรูปเกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อของวัสดุ ซึ่งเกิดจากแรงกระทำบางกระบวนการจะใช้ความร้อนช่วยให้วัสดุสามารถยืดตัวออกได้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะต่ำกว่าจุดหลอมละลายกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ Forging, Extrusion และ Rolling แสดงในรูปที่ 2.5 กระบวนการขึ้นรูปเกี่ยวกับโลหะแผ่น คือ การพับ (Bending)

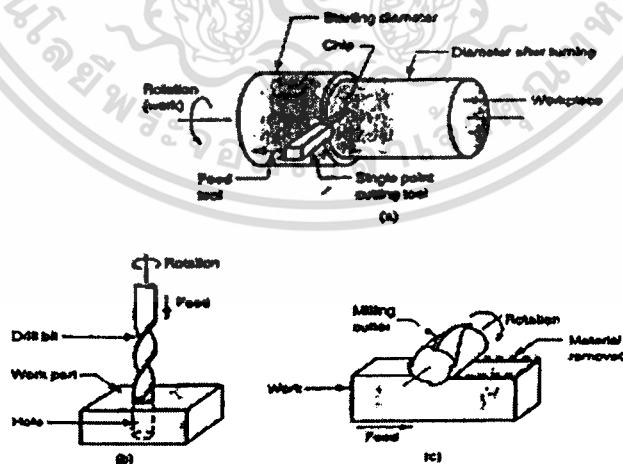
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงกรรมวิธีการเปลี่ยนรูปด้วยแรง

4) กระบวนการตัดเศษวัสดุ (Material removal processes) วัสดุเริ่มต้นเป็นของแข็ง ซึ่งจะนำบางส่วนที่ไม่ได้ใช้งานออกไปทำให้เกิดเป็นชิ้นส่วนมีรูปร่างตามต้องการ กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีเครื่องจักรในการทำงาน เช่น การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) และการกัด (Milling) ดังรูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการตัดอย่างง่ายที่ใช้กับวัสดุแข็ง ซึ่งจะต้องมีเครื่องมือตัด (Tooling) ที่แข็งกว่าวัสดุที่นำมาทำการตัด การเจียรไน (Grinding) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งซึ่งจะต้องใช้ล้อหินขัดตัดเศษวัสดุออก ส่วนกระบวนการอื่น ๆ เป็นกระบวนการพิเศษ ได้แก่ การตัดด้วยลำแสงเลเซอร์หรือลำอิเล็กตรอน การใช้สารเคมีกัด การตัดโดยใช้กระแสไฟฟ้า และการใช้กระแสไฟฟ้าร่วมกับสารเคมี



รูปที่ 2.7 แสดงการขึ้นรูปโดยการตัดเศษ (a) การกลึง (b) การเจาะ (c) การกัด

ในกระบวนการผลิตเพื่อทำการขึ้นรูปวัสดุจำเป็นต้องทำให้เกิดมีของเสีย (Waste) และเศษวัสดุ (Scrap) น้อยที่สุด จะเห็นได้ว่ากระบวนการขึ้นรูปด้วยการตัดเศษวัสดุบางส่วนออกจะทำให้เกิดของเสีย หรือเศษมาก (Net shape Processes) หรือได้ชิ้นงานใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง (Near

net shape Processes) เครื่องจักรในการผลิต และเครื่องมือตัด (Production Machines and Tooling) ขั้นตอนการผลิตจำเป็นต้องมีเครื่องจักร เครื่องมือขึ้นรูป และคน เครื่องจักรเป็นสิ่งแรกที่จะต้องพิจารณา ซึ่งเป็นตัวกำหนดเวลาทำการตัด มีเครื่องจักรเหล่านี้หลายอย่างเรียกรวมว่า Machine Tool ซึ่งจะทำหน้าที่จับเครื่องมือขึ้นรูปงานโดยมีคนควบคุม ในปัจจุบันเครื่องจักรที่ทันสมัยขึ้นจะเป็นแบบอัตโนมัติ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรอาจมาจากไฟฟ้า หรือไอน้ำ เครื่องจักรที่นำมาใช้ควรเลือกให้สามารถใช้งานได้หลายอย่าง เครื่องจักรในการผลิตอื่น ๆ เช่น เครื่องกดอัด (Press) ใช้ในขั้นตอนการกดขึ้นรูป Forge hammer ใช้สำหรับการรีดขึ้นรูปด้วยความร้อน Rolling mills ใช้สำหรับการรีดโลหะแผ่น เครื่องเชื่อม (Welding Machines) ใช้สำหรับการเชื่อม Insertion Machines ใช้สำหรับการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผงวงจรร นอกจากนี้ชื่อของเครื่องจักรจะเป็นไปตามชื่อกระบวนการผลิต เครื่องจักรในการผลิตจำเป็นต้องใช้เครื่องมือ (Tooling) ในที่นี้หมายถึงเครื่องมือตัดหรือเครื่องมือขึ้นรูป ทำหน้าที่จับเครื่องมือตัด และทำการตัดชิ้นงาน

2.2.1.2 การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุ (Property-Enhancing Operation) เป็นการเพิ่มคุณค่าโดยการเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนรูปทรง เช่น การอบชุบโลหะด้วยความร้อน (Heat Treatment) กระบวนการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติ เป็นกระบวนการลำดับที่สองต่อการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร เป็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติภายในเท่านั้น เช่น การอบชุบโลหะด้วยความร้อน อาจจะเป็นการทำให้วัสดุอ่อนตัวลง หรือแข็งขึ้น ซึ่งจะใช้กับวัสดุ จำพวกโลหะ และแก้ว ส่วนในการผลิตวัสดุโลหะผง และเซรามิก การให้ความร้อนจะช่วยให้เกิดความแข็งแรง ซึ่งเนื่องมาจากแรงกดอัดด้วย

2.2.1.3 การตกแต่งผิวสำเร็จ (Surface Processing) เป็นการเตรียมพื้นผิววัสดุให้สะอาด ปรับปรุง หรือทำการเคลือบผิว ภายนอก เช่น การพ่นสี การชุบผิวด้วยไฟฟ้า เพื่อป้องกันผิวหน้าวัสดุจากสภาพแวดล้อมภายนอก ในกระบวนการนี้มีขั้นตอน ทั่วไป คือ การทำความสะอาด การตกแต่งผิว, การเคลือบผิว และการทำให้เกิดฟิล์มเคลือบผิว การทำความสะอาดสามารถทำได้สองอย่างคือ การทำความสะอาดด้วยสารเคมี และการทำความสะอาดทางกล ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดสิ่งสกปรก น้ำมัน ที่ผิวหน้าวัสดุ การปรับผิวทางกล เช่น การพ่นเม็ดเหล็ก การพ่นทราย กระบวนการกายภาพที่ทำให้เกิดการแพร่และเกาะยึดของประจุ การเคลือบด้วยฟิล์ม เช่น การชุบผิวด้วยไฟฟ้า (Electroplating) การชุบผิวอลูมิเนียม (Anodizing) การเคลือบผิวด้วยอินทรีวอดู ที่เรียกว่า การทาสี (Painting) การอบเคลือบสี ซึ่งวัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว ได้แก่ ป้องกันการกัดกร่อน ทำให้เกิดสี ป้องกันการสึกกร่อน และเตรียมผิวเพื่อไปยังกระบวนการอื่นต่อไป

2.2.2 กระบวนการประกอบชิ้นส่วน (Assembly Operations) เป็นขั้นตอนการผลิตพื้นฐาน ลำดับที่สอง เป็นกระบวนการต่อวัสดุให้ได้รูปร่างตาม ต้องการ มี 2 กระบวนการหลัก คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สังกะสี และวัสดุประสมประเภทเหล็กกล้า ทองเหลือง และบรอนซ์ วัสดุกลุ่มโลหะยังแบ่งออกได้ เป็น 2 ประเภทคือ

2.3.2.1 โลหะจำพวกเหล็ก (Ferrous Metals) โลหะประเภทนี้จะมีธาตุเหล็กผสมเป็นส่วนประกอบพื้นฐาน (Iron Based) เช่น เหล็กหล่อ (Cast Iron) เหล็กกล้า (Steel) เหล็กอ่อน (Wrought Iron) เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าแม่พิมพ์ (Die Steel) และเหล็กกล้าทำเครื่องมือ (Tool Steel) เหล็กบริสุทธิ์ไม่สามารถนำมาใช้ในงานวิศวกรรมได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านคุณสมบัติของการผลิต และพฤติกรรมโครงสร้างมากมาย ธาตุที่มีความสำคัญกับเหล็กมากคือ คาร์บอนในเหล็กกล้าจะมีอยู่ไม่เกิน 2% โดยน้ำหนักแต่ถ้าเกิน 2% จะเป็นเหล็กหล่อ นอกจากนี้ธาตุที่ผสมลงไปมีเหล็กคือ แมงกานีส โครเมียม นิกเกิล ซิลิกอน และโมลิบดีนัม ในอัตราส่วนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.3.2.2 โลหะนอกจำพวกเหล็ก (Nonferrous Metals) เป็นโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ โลหะกลุ่มนี้อาจจะมีคุณสมบัติบางอย่างดีกว่าเหล็ก แต่ก็มีคุณสมบัติพิเศษบางอย่างซึ่งเหล็กไม่มี เช่น น้ำหนักหรือความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น ความสวยงามของสี สีสัน สภาพที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อน คุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนและกรรมวิธีในการขึ้นรูปได้ หลากลักษณะอย่างกว้างขวาง สามารถพิจารณาถึงคุณสมบัติและการนำไปใช้งาน โลหะนอกจำพวกเหล็ก แบ่งออกได้ 3 ชนิดคือ

1) โลหะหนัก (Heavy Metals) คือ โลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตรเป็นโลหะต้นกำเนิดของโลหะผสม (Nonferrous Alloy) เช่น ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) ดีบุก (Sn) โครเมียม (Cr) ทังสเตน (W) แทนทาลัม (Ta) ปรอท (Hg) ทองคำ (Au) เงิน (Ag) แพลทินัม (Pt) โมลิบดีนัม (Mo) โคบอลต์ (Co) แมงกานีส (Mn) วาเนเดียม (V) พลวง (Sb) แคดเมียม (Cd)

2) โลหะเบา (Light Metals) คือ โลหะที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 4 กก./ค.ม.<sup>3</sup> โลหะเบาโดยทั่วไป ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) แมกนีเซียม (Mg) เซอร์โคเนียม (Zr) และเบริลเลียม

3) โลหะประสม (Alloy Metals) เป็นโลหะที่ถือว่ามีราคาแพงกว่าเหล็กกล้า และพลาสติก มีคุณสมบัติที่พิเศษทางด้านคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางเคมี ส่วนการประยุกต์ใช้งานเหมาะกับงานทางด้านการใช้งาน ณ อุณหภูมิสูง และคุณสมบัติทางเคมี คือ ด้านทานการกัดกร่อนได้ดี โดยปกติโลหะบริสุทธิ์ โดยการนำโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมา ผสมกันแล้วหลอมละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น ทองเหลือง (Brass) และบรอนซ์ (Bronze) เป็นต้น

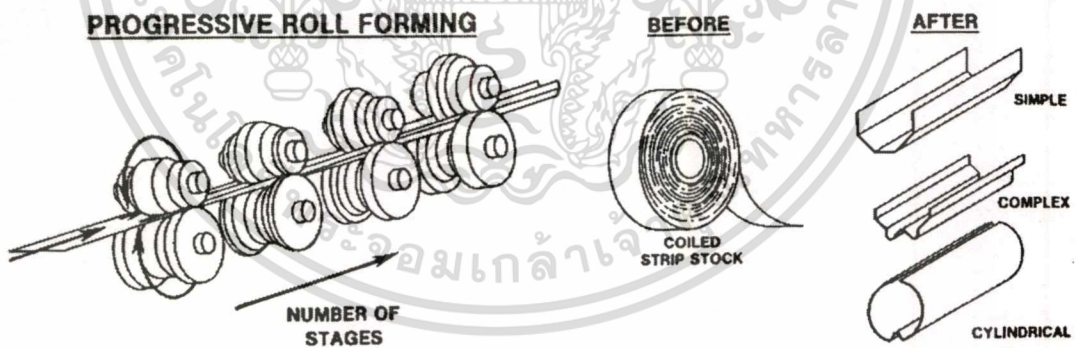
# บทที่ 3

## การขึ้นรูปวัสดุ

กระบวนการขึ้นรูป ของวัสดุชิ้นส่วนใหญ่จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นโลหะ ซึ่งเป็นการทำงานในช่วงการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร สามารถแบ่งได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามชนิดของแรงกระทำบนชิ้นงาน เช่นแรงอัด แรงดึง และแรงเฉือน แบ่งตามการใช้งานของชิ้นงานสำเร็จ เช่นชิ้นงานที่สามารถนำไปใช้งานได้เลย และชิ้นงานที่ต้องนำไปประกอบกับชิ้นงานอื่นๆจึงสามารถนำไปใช้งานได้ แบ่งตามขนาดของชิ้นงาน เช่นชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ หรือชิ้นงานที่ขึ้นรูปทั้งก้อน และชิ้นงานที่ขึ้นรูปเป็นแผ่น แบ่งตามอุณหภูมิในการทำงาน เช่นการขึ้นรูปร้อน และการขึ้นรูปเย็น

### 3.1 การรีดขึ้นรูป (Rolling)

การรีดขึ้นรูป มีวิธีการโดยย่อคือ นำเหล็กที่ทำเป็นแท่งเข้าไปไว้ในเดอบ ทำให้เหล็กนั้นร้อนโดยใช้แก๊สเป่าเข้าไป จะทำให้ลมร้อนหมุนเวียนอยู่ในเตาไปสู่เครื่องรีด เครื่องรีดจะทำการรีดเป็นรูปร่างเล็กลงตามแบบของลูกรีดเป็นตอน ๆ ไป เหล้าที่ขับพาลูกกลิ้งที่หมุนไปมาได้ เพื่อจะประกอบเข้าด้วยกัน และหมุนขับด้วยกำลังมอเตอร์ไฟฟ้า รูปที่ 3.1 ประกอบ



รูปที่ 3.1 แสดงการรีดขึ้นรูปด้วยลูกกลิ้ง

รูปที่ 3.2 ชิ้นส่วนที่ผลิตจากกรรมวิธีการรีดเย็น

เครื่องรีดสร้างบนเพลานาน โดยทำเป็นร่องแบบต่าง ๆ ไว้ในเพลาดียวกัน การทำงานของลูกกลิ้งจะหมุนแล้วป้อนแท่งเหล็กเข้าไป เหล็กก็จะถูกรีดให้เล็กลง โดยผ่านการรีดหลาย ๆ ครั้ง ตามร่องที่ปรากฏอยู่บนเพลานานได้ขนาดตามต้องการ แท่งเหล็กที่นำมารีดจะมีอุณหภูมิประมาณ 2,200 องศาฟาเรนไฮต์ นำแท่งเหล็กนี้เข้าเครื่องรีด การรีดขึ้นรูป (Roll forming) เครื่องรีดขึ้นรูป จะ

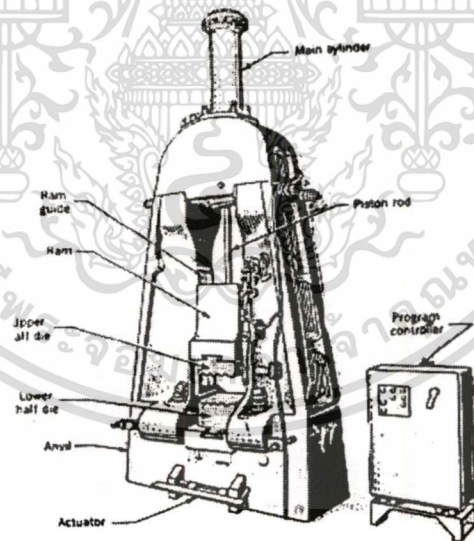
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบไปด้วยชุดลูกกลิ้งหลายๆ คู่ ซึ่งจะทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นขั้น ๆ ต่อเนื่องกันไป โดยชิ้นงานจะถูกป้อนเข้าไปในเครื่องหรือลูกกลิ้งตลอดเวลาไม่ขาดตอน สำหรับอัตราความเร็วในการรีดนั้นประมาณ 50 – 300 ฟุตต่อนาที วิธีการนี้สามารถทำได้รวดเร็ว และชิ้นงานที่ได้มีรูปร่างเหมือนกันตลอด และเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ

### 3.2 การตีขึ้นรูป (Forging)

งานตีขึ้นรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้โลหะตีขึ้น เพื่อเกิดความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน เช่น ทำให้เนื้อวัสดุละเอียดขึ้น รูพรุนต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเนื้อเหล็กเล็กน้อย และสามารถทำให้บางส่วนของโลหะหนาขึ้นได้ โดยวิธีตีขึ้นรูป ตามปกติก่อนที่จะนำเหล็กไปตีขึ้นรูป ต้องทำการให้ความร้อนแก่เหล็กเสียก่อนอย่างช้า ๆ หรือจะอบไว้ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ก็ได้ จากนั้นจึงค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิตีเหล็ก การตีขึ้นรูปสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดดังนี้

**3.2.1 Hammer or smith forging** เป็นการตีขึ้นรูปโดยการให้ความร้อนแก่เหล็ก แล้วนำมาตีขึ้นรูปบนทั่งด้วยค้อน อาจจะใช้แรงตีด้วยมือ หรือแรงเครื่องจักรก็ได้

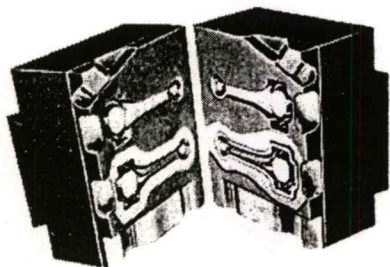


รูปที่ 3.3 เครื่องจักรที่ใช้ตีขึ้นรูป

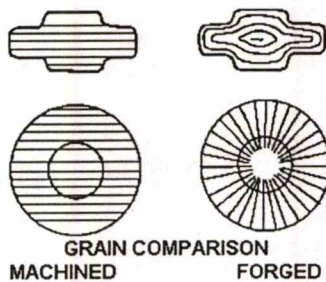
**3.2.2 Drop forging** คือการตีขึ้นรูปโดยการตีแบบต้องการขนาด รูปร่างที่ยุงยาก เช่น Connecting Rod, Spanner ซึ่งจะต้องใช้เครื่องจักรที่มีกำลังสูงมาก ๆ โดยใช้แม่แบบติดกับแท่งอีกส่วนหนึ่งจะติดกับค้อน แม่แบบนี้จะมีหลายชั้น เช่น ตีขึ้นเตรียม และตีขึ้นสำเร็จ ขึ้นตอนการทำงาน

ดูได้จากรูปที่ 3.3

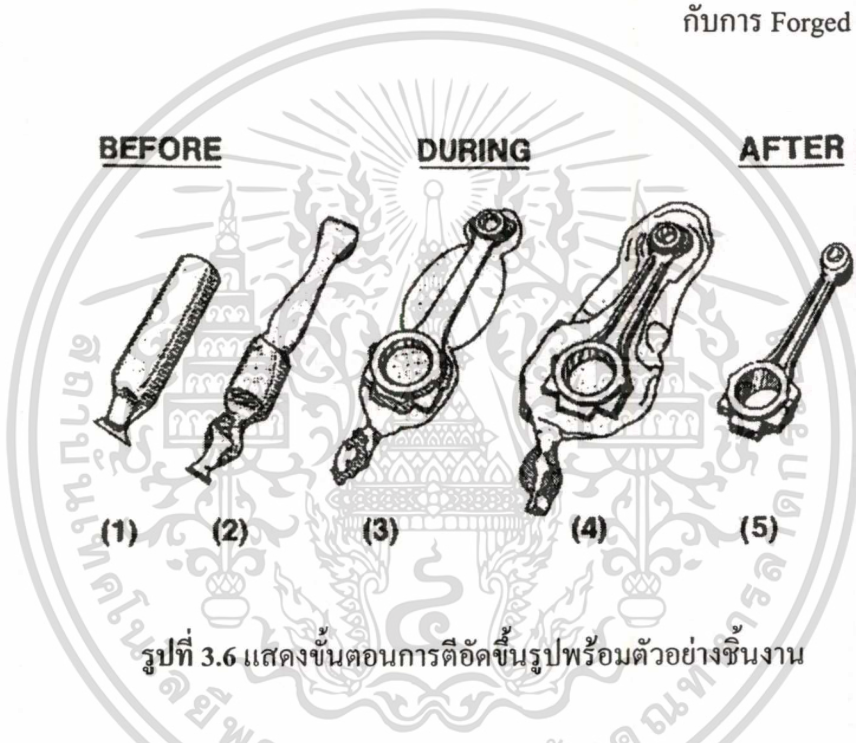
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงแม่พิมพ์การตีอัดขึ้นรูป

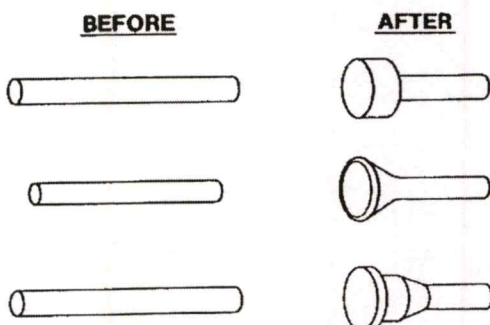
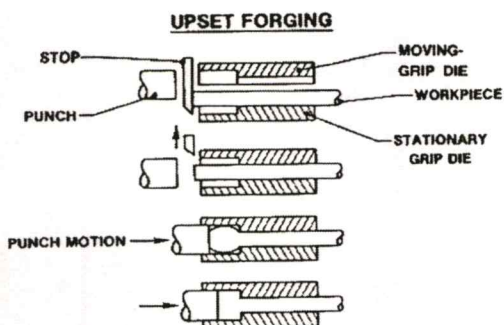


รูปที่ 3.5 แสดงเปรียบเทียบเกรนของโลหะ ที่ได้จากการ Machine กับการ Forged



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการตีอัดขึ้นรูปพร้อมตัวอย่างชิ้นงาน

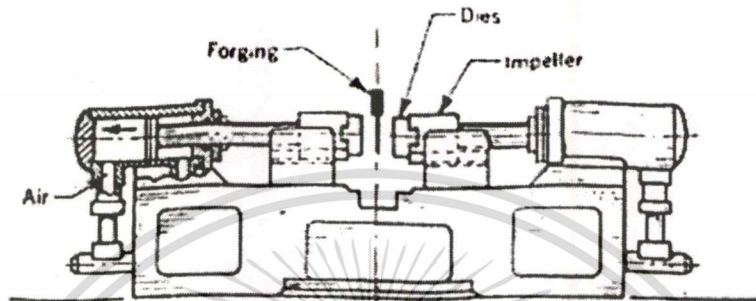
3.2.3 Upset forging เป็นกรรมวิธีผลิตงานที่มีรูปร่างเป็นป้า หรือขอบ โดยการเตรียมชิ้นงานนั้นมาก่อนให้มีขนาดใกล้เคียงกับแบบการขึ้นรูป สามารถทำได้โดยใช้แม่แบบเข้าช่วย โดยทำเป็นขั้นตอนแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชิ้นงาน

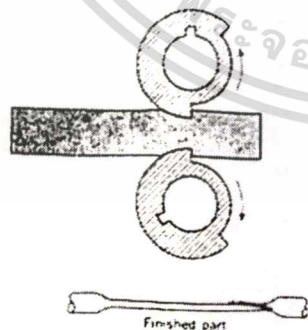
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการขึ้นรูปแบบ Upset forging  
 ไม่ว่าจะตีขึ้นรูปด้วยวิธีใดก็ตาม ก็ต้องอาศัยการตีอัดขึ้นรูป และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การตีอัดขึ้นรูป (Press forging) การตีอัดขึ้นรูปโดยใช้แรงกระแทกลงบนชิ้นงาน โดยมีแม่แบบอยู่ด้วย การตีอัดจะทำต่อเนื่องลงไปบนชิ้นงานครั้งเดียวเสร็จ โดยอัดแต่แรงน้อย ๆ อัดลงไปแบบและเพิ่มแรงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงขั้นสุดท้าย งานที่ได้จะมีรูปร่างทางขนาดเหมือนกัน และยังมีผิวเรียบ จากรูปที่ 3.9 แสดงเครื่องจักรอัดกระแทกแนวนอน

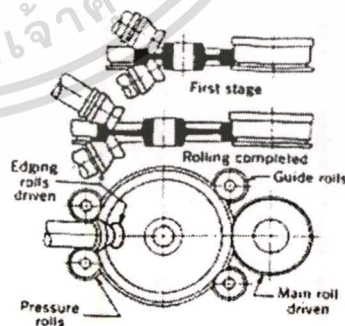


รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องอัดกระแทกแนวนอน

3.2.5 การตีหมุนขึ้นรูป (Roll forging) เป็นการรีดแบบใช้ลูกกลิ้งไปบนชิ้นงานโดยนำชิ้นงานที่อบให้ร้อน ได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วป้อนเข้าไปในเครื่อง ลูกกลิ้งจะหมุนชิ้นงานไปมาจนได้ขนาดตามต้องการ การตีหมุนขึ้นรูปนี้ ใช้สำหรับผลิตงานที่มีขนาดกว้างต่าง ๆ กัน เช่น ใบพัด เครื่องบิน ใบมีดศกัศพบสปริงหรือท่อเรียว เป็นต้น ผิวที่ผ่านการรีดแบบนี้จะคงสภาพอยู่ได้ดีไม่บิดเบี้ยวง่าย เครื่องที่สร้างเป็นลูกกลิ้งนี้จะมีราคาแพง Roll Forging ที่ใช้การรีดแบบวงล้อ เช่น รางรถไฟ ล้อรถราง เป็นต้น จากรูปที่ 3.10 แสดงหลักการตีหมุนขึ้นรูป และรูปที่ 3.11 ประกอบ



รูปที่ 3.10 แสดงหลักการของการตีหมุนขึ้นรูปด้วยลูกกลิ้ง



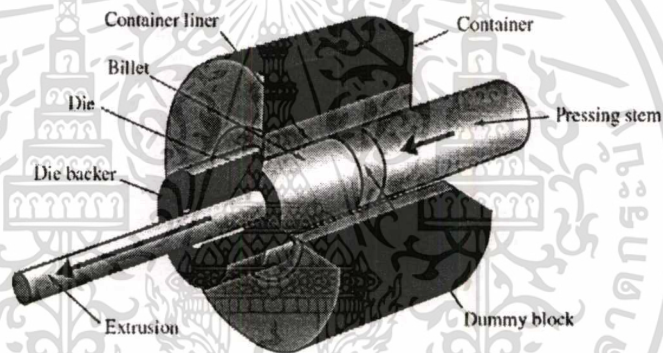
รูปที่ 3.11 แสดงการตีหมุนขึ้นรูปโดยลูกกลิ้ง

### 3.3 การดันขึ้นรูป (Extrusion)

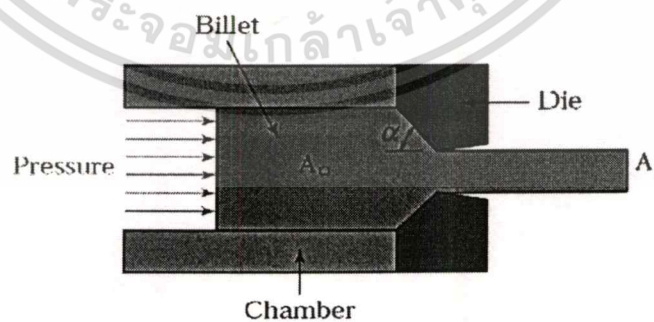
เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะในสภาวะร้อนอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้แรงอัดลงบนชิ้นงานออกมาเป็นรูปขนาน อาจจะเป็นแท่งตันหรือกลวงก็ได้ กรรมวิธีนี้จะกระทำได้โดยนำชิ้นงานเข้าไปในแบบ แล้วมีตัวบีบอัดเข้าไปด้วยแรงอัดสูง ๆ จากแรงอัดนี้จะทำให้ชิ้นงานอาจติดอยู่กับแม่แบบ หรือติดออกมากับแกนบีบก็ได้

#### 3.3.1 กรรมวิธีในการดันขึ้นรูป (Extrusion) แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

3.3.1.1 การดันโดยตรง (Direct extrusion) กรรมวิธีแบบนี้ประกอบไปด้วยตัวอัดและแบบพิมพ์ การทำงานก็นำชิ้นงานที่เตรียมทรงกลมมาเผาให้ร้อน แล้วนำไปเข้าเบ้าของแม่แบบ จากนั้นก็จะทำการอัดด้วยแรงอัดให้ชิ้นงานวิ่งออกไปข้างหน้า อาจจะเป็นรูปชิ้นงานตันหรือกลวงก็ได้ตามต้องการ ดูรูปที่ 3.12 ประกอบ

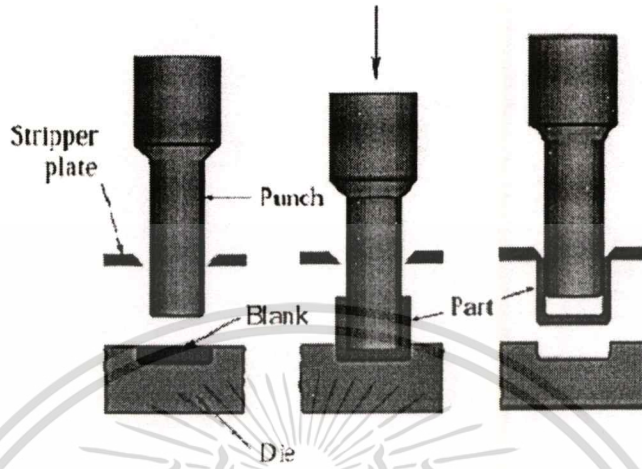


รูปที่ 3.12 แสดงกระบวนการขึ้นรูปโลหะ แบบ Direct extrusion



รูปที่ 3.13 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบ Direct extrusion

3.3.1.2 การดันขึ้นรูปโดยอ้อม (Indirect extrusion) กรรมวิธีนี้ ตัวอัดบนมีขนาดสั้นกว่าศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดของตัวอัดล่าง เมื่อตัวอัดบนอัดกระแทกเข้าไปบนชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานวิ่งสวนขึ้นตามแม่แบบ ทำให้ได้ชิ้นงานออกมาเป็นท่อเปิดหรือกลวง

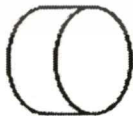


รูปที่ 3.14 แสดงภาพหน้าตัดให้เห็นลักษณะการดันขึ้นรูป

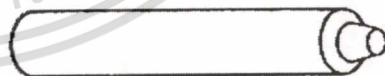
3.3.1.3 การดันแบบกระแทก (Impact extrusion) เป็นกรรมวิธีทำงานแบบใช้แรงอัดลงบนชิ้นงาน แล้วทำให้ชิ้นงานวิ่งสวนกลับมา อีกส่วนหนึ่งก็จะวิ่งไปตามแนวแรงอัด หรืออาจจะเป็นแนวแกนในของตัวอัดบนก็ได้ สุดแต่ชนิดของงาน กรรมวิธีนี้จะทำให้ได้ชิ้นงานออกมาเป็นท่อหรือแท่งก็ได้ นำชิ้นงานมาป้อนขึ้นรูปคล้ายรูปถ้วยก่อน หรืองานที่ได้จากท่อที่ไม่มีตะเข็บก็ได้ จากนั้นก็จะทำการขึ้นรูปเป็นตอน ๆ ไป ดังรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าการทำงานด้วยวิธีนี้จะต้องให้ความร้อนอย่างดี และจะถูกขึ้นรูปได้ขนาดตามแม่แบบด้วย

**BEFORE**

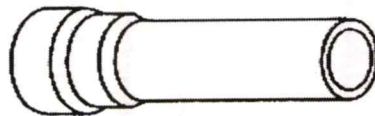
**AFTER**



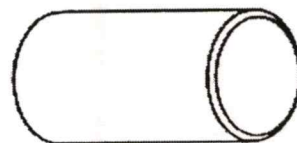
SLUG



TOOTHPASTE TUBE



NOZZLE

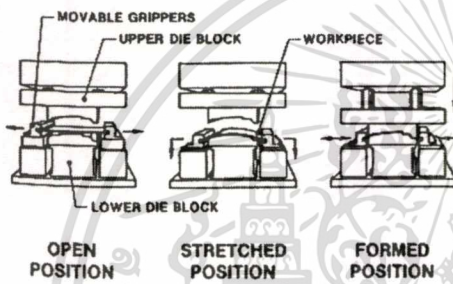


BEVERAGE CAN

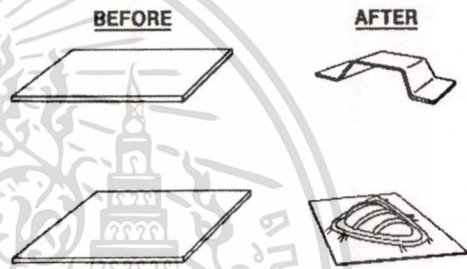
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.15 แสดงการดันขึ้นรูปชิ้นงานรูปทรงกระบอก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การดึงขึ้นรูป (Stretch forming)

ในการขึ้นรูปเหล็กแผ่นขนาดใหญ่ ๆ ให้เป็นรูปร่างโค้ง ๆ เหมือน ๆ กัน จะใช้ขึ้นรูปด้วยวิธีการดึงขึ้นรูปได้ผลดีมาก ส่วนมากจะใช้ดึงด้วยระบบไฮดรอลิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 แบบแม่พิมพ์ซึ่งติดอยู่กับแกนอัดจะเคลื่อนเข้าไประหว่างตัวเลื่อนทั้งสองตัวที่จับยึดแผ่นโลหะไว้ทั้งสองข้าง แบบแม่พิมพ์จะเคลื่อนที่ขึ้นไปในแนวตั้ง และตัวเลื่อนจะเคลื่อนที่ออกจากกันในแนวนอน กำลังที่ใช้จับเคลื่อนแบบแม่พิมพ์และตัวเลื่อนประมาณ 50 - 150 ตัน แรงดันที่เกิดขึ้นจะทำให้แผ่นโลหะเกิดความเค้นขึ้นเกินจุดยืดหยุ่น และเกิดการยุบหรือยืดตัวได้ไปตามแบบ การทำเช่นนี้จะทำให้แผ่นโลหะบางลงเล็กน้อย และเมื่อถอยแบบแม่พิมพ์ออกไปแล้วมันจะกลับคืนตัวบ้างเล็กน้อย จะไม่ได้ตามแบบแม่พิมพ์ทุกประการทีเดียว



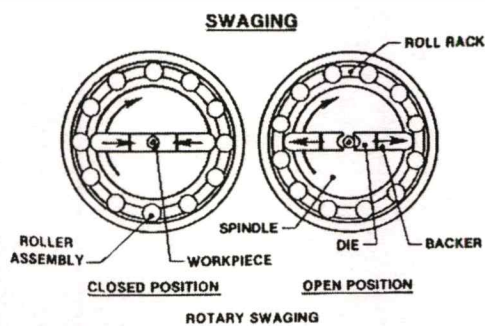
รูปที่ 3.16 การอัดและดึงขึ้นรูป



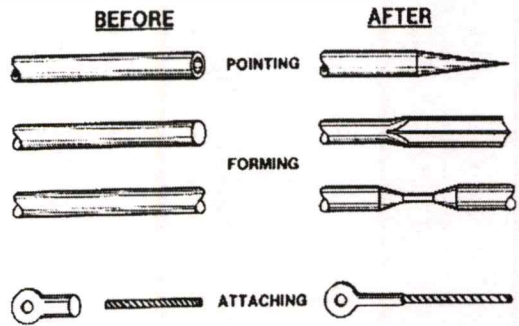
รูปที่ 3.17 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการอัดและดึงขึ้นรูป

### 3.3.3 การอัดหรือการตีขึ้นรูป (Swaging or Cold forging)

เป็นการขึ้นรูปโลหะในขณะเย็น โดยการใช้แรงอัดหรือแรงกระแทก เพื่อดันให้โลหะเข้าไปในแบบแม่พิมพ์ตามต้องการ การที่โลหะไหลเข้าแบบอาจจะเข้าไม่ทั่วถึง อาจจะเข้าไปในบางทิศทางของการออกแรงดันเท่านั้น งานที่ได้จากการตีขึ้นรูป หรืองานที่ประกอบกันแล้ว บางครั้งจะต้องนำมาทำการปรับแต่งให้ได้ขนาดที่ถูกต้อง และมีผิวเรียบด้วยวิธีนี้



รูปที่ 3.18 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปโลหะ

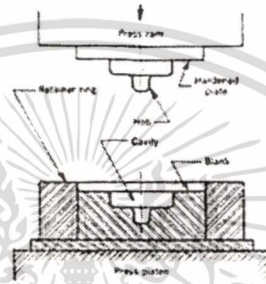


รูปที่ 3.19 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การอัดแบบหล่อ (Hobbing)

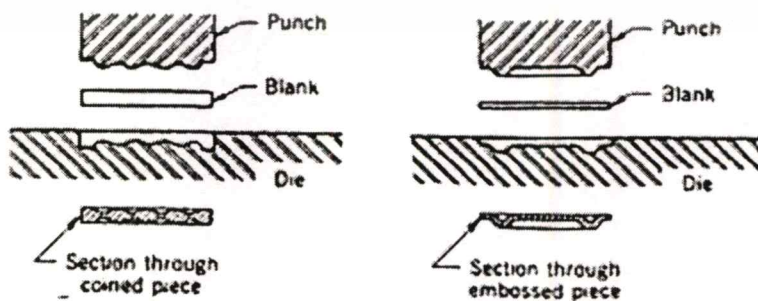
แบบที่ใช้สำหรับการหล่อ ดังรูปที่ 3.20 อาจทำด้วยกรรมวิธีที่เรียกว่า Hobbing โดยการอัดแบบ ซึ่งโลหะแข็งที่เรียกว่าตัว Hob ลงไปในเหล็กอ่อน ถ้า Hob ได้รับความกัดแต่งให้มีรูปร่างเหมือนกับชิ้นงานที่จะต้องการทำทุกประการ แล้วนำมาอบชุบเพื่อให้ได้ความแข็งสูงพอที่จะทนต่อแรงอัดอันมหาศาลที่เกิดขึ้นได้ ข้อดีของ Hobbing คือ สามารถทำชิ้นงานหลายชิ้นให้มีรูปร่างเหมือนกันทุกประการได้โดยเสียค่าใช้จ่ายต่ำ ผิวของแบบหล่อที่ได้เรียบร้อมมาก และไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องจักรชนิดอื่น ๆ ในการตกแต่งผิวภายในแบบซ้ำอีกเลย



รูปที่ 3.20 แบบพิมพ์ที่ใช้ในการอัด

### 3.3.5 การทำเหรียญตราและการอัดนูน (Coining and Embossing)

Coining หรือการทำเหรียญตรา และ Embossing หรือการปั้นแผ่นโลหะให้เป็นตัวนูน ดังรูปที่ 3.21 นั้น เป็นการบังคับไม่ให้โลหะไหลไปตามทิศทางตามแนวขวาง แต่จะบังคับให้มันไหลเข้าไปส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือร่องตื้น ๆ ของแบบ เช่น การทำเหรียญตราต่าง ๆ เนื่องจากวิธีนี้ต้องการเครื่องวัดชนิดพิเศษ ซึ่งให้กำลังอัดสูง ๆ ส่วนมากจึงใช้เฉพาะสำหรับโลหะหรือโลหะผสมที่อ่อน ๆ

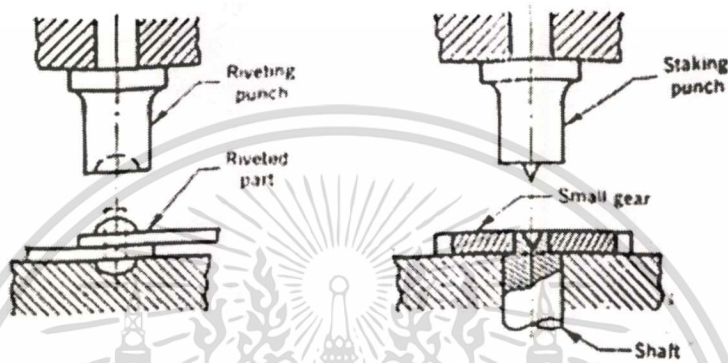


รูปที่ 3.21 แสดงการทำเหรียญตราและทำให้เป็นตัวนูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6 การย้ำหัวและการย้ำหมุด (Riveting and Staking)

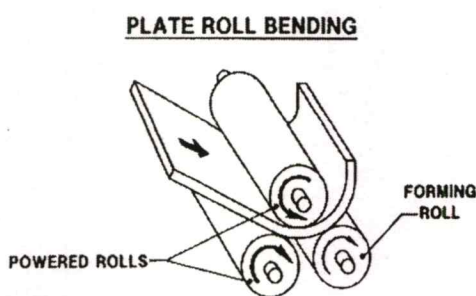
ทั้งสองวิธีนี้ใช้สำหรับการยึดหรือต่อชิ้นส่วนให้ติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.22 สำหรับการย้ำหมุดนั้น จะต้องเจาะรูที่ชิ้นส่วนทั้งสองเสียก่อน แล้วจึงใส่หมุดย้ำเข้าไป จากนั้นก็อัดหรือ ตอกปลายของหมุดย้ำให้ยุบเกิดเป็นหัว ซึ่งมีรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ปรากฏอยู่ในตัวอัด สำหรับแองของหมุดย้ำอาจจะทำการยึดได้ โดยการเม้มปลายของมันให้งอพับติดกับชิ้นงาน Staking เป็นการตอกหรือย้ำหัวของชิ้นส่วน เช่น หัวของเพลลาให้ติดแน่นกับอีกชิ้นส่วนหนึ่ง เช่น เฟือง



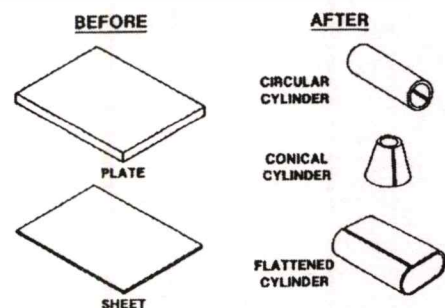
รูปที่ 3.22 แสดงความแตกต่างระหว่างการย้ำหมุดกับการย้ำหัว

### 3.4 การขึ้นรูปโลหะแผ่น (Plate bending)

การตัดแผ่นเหล็กให้เป็นรูปทรงกระบอก จะทำได้โดยใช้ลูกกลิ้งตัด ซึ่งประกอบด้วยลูกกลิ้งที่มีขนาดใหญ่เท่า ๆ กัน 3 ลูก ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ลูกกลิ้งสองลูกจะประกบไว้ในตำแหน่งแนวนอนตายตัว ส่วนอีกหนึ่งสามารถปรับเลื่อนเข้าออกได้ แผ่นโลหะจะถูกบังคับให้ผ่านลูกกลิ้งนั้น ๆ แล้วเกิดการโค้งเป็นรูปร่างท่อนขนาดต่าง ๆ กัน ได้ตามความต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การปรับลูกกลิ้งตัวที่สาม ถ้านำไปปรับเข้าไปชิดลูกกลิ้งคู่แรกมาก ๆ เข้าก็จะทำให้ท่อได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลงยิ่งขึ้น เครื่องจักรที่ใช้จะมีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็ก ๆ ที่ใช้หมุนด้วยมือไปจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถตัดแผ่นเหล็กขนาดหนาได้ถึง 1¼ นิ้วได้



รูปที่ 3.23 แสดงการตัดเหล็กแผ่นด้วยลูกกลิ้ง



รูปที่ 3.24 แสดงชิ้นงานที่ผ่านขบวนการขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอารูปโลหะแผ่นด้วยลูกกลิ้งด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 การเข้าตะเข็บ (Seaming)

ในการผลิตรูปทรงกระบอกขนาดต่าง ๆ เช่น กระป๋อง และผลิตภัณฑ์ที่คล้าย ๆ กันนี้อีกมากมายหลายอย่าง โดยใช้โลหะแผ่นขนาดบาง ๆ การต่อจะใช้ตะเข็บในลักษณะต่าง ๆ กัน

**3.4.1.1 Locking seam** จะใช้ทำตะเข็บตามแนวแกน ซึ่งเป็นตะเข็บที่ไม่สามารถต่อกันได้แน่นหนานัก การทำก็ทำได้โดยการพับขอบของแผ่นเหล็กเข้าหากัน แล้วพับเป็นตะเข็บชนิดต่าง ๆ กัน แล้วนำมาเกี่ยวกัน ใช้แรงอัดติดกันให้แน่น

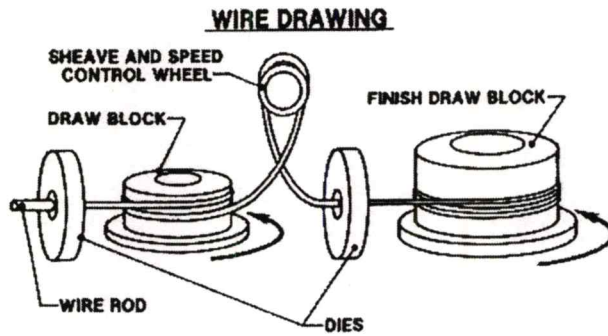
**3.4.1.2 Bottom seam** มีลักษณะคล้าย ๆ กับการทำตะเข็บตามแนวแกน

**3.4.1.3 Compound seam** ซึ่งบางที่เรียกว่า Gordon หรือ Box seam จะต่อกันได้แน่นหนากว่า และเหมาะสำหรับการทำงานที่ละเอียด ตะเข็บทั้งสองแห่งนี้สามารถจะทำได้ด้วยมือและเครื่องจักร

### 3.5 การดึงลวด (Wire drawing)

การดึงขึ้นรูปเส้นลวด เป็นวิธีการขึ้นรูปเย็น (cold working) โดยการดึงเส้นลวดผ่านแม่พิมพ์ให้มีขนาด และรูปร่างตามที่ต้องการ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งพบมากในอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ เช่นเส้นลวดตัวนำยิ่งยวดที่ใช้ในเครื่อง MRI (Magnetic Resonance Imaging) ที่ใช้เอ็กซเรย์ภาพ 3 มิติ ในวงการแพทย์ ก็ผลิตด้วยกรรมวิธีการดึงขึ้นรูป นอกจากนั้นเทคโนโลยีการดึงขึ้นรูป สามารถผลิตเส้นลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กถึง  $7 \mu\text{m}$  ได้ แต่เมื่อความต้องการเส้นลวด ที่มีคุณภาพสูงเช่นนี้ ปัญหาการแตกภายในเส้นลวด (internal fracture) การขาดของเส้นลวดและปัญหาอื่นก็ยังคงเกิดขึ้นอยู่ เป็นผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นมาก ซึ่งปัญหาการแตกภายในเส้นลวดนี้ก็ไม่สามารถตรวจสอบจากผิวเส้นลวดได้เลย การดึงลวดจะทำได้โดยการดึงเหล็กเส้นผ่านแบบพิมพ์หลาย ๆ อัน ซึ่งมีรูเล็กลงไปตามลำดับ จนกว่าจะได้ขนาดที่ต้องการ เหล็กเส้นที่ใส่จะได้ออกจากการรีดแล้วนำมาทำความสะอาดโดยการจุ่มลงในอ่างน้ำกรด เพื่อขจัดสะเก็ดและสนิมต่าง ๆ แล้วทาด้วยน้ำมันกันสนิม และเพื่อให้ผิวลื่น สะดวกต่อการดึงผ่านแบบพิมพ์ ส่วนมากมักจะทำด้วยทั้งสแตนคาร์ไบด์บางกรณีอาจจะใช้เพชร เช่น สำหรับทำลวดเล็ก ๆ ก็ดึงอาจจะทำเป็นแบบดึงทีละเส้น หรืออาจจะดึงแบบต่อเนื่องก็ได้ การดึงแบบทีละเส้นนั้น ขดลวดจะถูกนำไปติดตั้งไว้ในที่สำหรับวางขดลวด โดยที่ปลายข้างหนึ่งของเส้นลวดจะถูกทำให้แหลม หรือมีขนาดเล็กลง เพื่อให้สามารถสอดเข้าแบบพิมพ์ได้สะดวก ปลายที่โผล่ออกไปจากรูแบบพิมพ์จะถูกจับไว้ด้วยคีมแล้วดึงให้ยาวออกได้ แล้วม้วนเข้าที่เก็บเป็นขดไว้อีก เสร็จแล้วจึงนำมาทำการดึงซ้ำอีกในแบบพิมพ์ที่มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ขนาดตามที่ต้องการ สำหรับการดึงแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 3.25 ลวดจะถูกป้อนผ่านแบบพิมพ์และเครื่องดึงหลาย ๆ ตัว ซึ่งวางเรียงเป็นแถว แต่การดึงจะไม่ถึงเกินขอบเขตอันหนึ่ง จำนวนของแบบพิมพ์ในชุดหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะดึง โดยอาจจะมีตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 12 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ก็ได้  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แสดงการดึงขึ้นรูปและแม่พิมพ์ (dies) ที่ใช้ดึงลวด

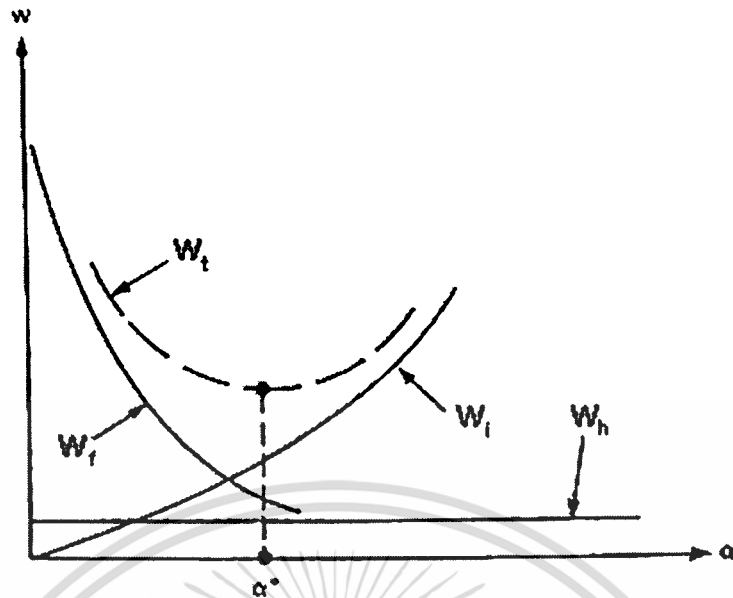
การดึงขึ้นรูปเป็นการผลิตแบบขึ้นรูปโดยวิธีดึงหรือดันให้ได้ชิ้นงานตามรูปร่างที่ต้องการ เช่น การทำท่อที่มีรูปร่างคล้ายขวดปากขนาน โดยด้านหนึ่งจะมีก้นตัน เป็นตัน การผลิตวิธีนี้จะนำมาทำท่อบรรจุก๊าซออกซิเจนหรือแก๊สต่าง ๆ การผลิตทำได้ดังนี้คือ

### 3.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการดึงเส้นลวดผ่านตาย

#### 3.6.1 สมการพื้นฐานการดึงขึ้นรูป

$$\bar{\sigma} = \sigma \ln \frac{A_0}{A_f} = \sigma l \ln \left( \frac{1}{1-r} \right) \quad (3.1)$$

- $\sigma$  = ค่าความเค้นดึงหรือดันขึ้นรูป
- $\bar{\sigma}$  = ค่าความเค้นดึงสำหรับวัสดุ Nonstrainhardening
- $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดลวดก่อนเข้าตาย
- $A_f$  = พื้นที่หน้าตัดลวดหลังออกจากตาย
- $r$  = อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด  $(A_0 - A_f) / A_0$



รูปที่ 3.26 แสดงความสัมพันธ์ของงาน ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด  $W_f$ ,  $W_h$  และ  $W_i$

### 3.6.2 งานที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

จากรูปที่ 3.26 เป็นความสัมพันธ์ของงานในการดึงหรือดัดขึ้นรูปกับค่าครึ่งมุมคายยกเว้น  $W_h$  สำหรับด้านซ้ายของเส้นโค้ง  $W_i$  เห็นว่าเมื่อค่ามุมคายน้อยแรงเสียดทานมีอิทธิพลมาก คือ ต้องใช้แรงมากในการดึงขึ้นรูปเนื่องจากคายกับเส้นลวดมีพื้นที่สัมผัสกันมาก ด้านขวามือของจุดต่ำสุดของเส้นโค้ง  $W_i$  แรงเสียดทานลดลงแต่แรงเฉือน ในการขึ้นรูปมีอิทธิพลมากขึ้น เมื่อคายนี้นุ่มมากขึ้นจนเข้าสู่บริเวณที่ทำให้ลวดเกิดการแยกตัวก่อนเข้าคาย (Dead Zone)

$$W_i = W_h + W_f + W_i \quad (3.2)$$

$W_h$  = งานเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่าง

$W_f$  = งานจากแรงเสียดทานของคายและลวด

$W_i$  = งานจากแรงเฉือน

$$\eta = \frac{W_h}{W_i} \quad (3.3)$$

$\eta$  = ประสิทธิภาพทางกล

3.6.3 ตัวแปรช่วงการเปลี่ยนรูป ( $\Delta$ ) จากรูปที่ 3.28 แสดงถึงอิทธิพลของแรงเฉือนและความเสียดทานในระหว่างการดึงขึ้นรูปลวดยังมีผลต่อคุณสมบัติและโครงสร้างของลวด เช่น เกิดรอยแยก

ในแกนกลาง ดังนั้นจึงกำหนดตัวแปรในขั้นตอนการผลิตคือ  $\Delta$  ควรออกแบบการดึงขึ้นรูปที่มีค่า  $\Delta$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
น้อยกว่า 2  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

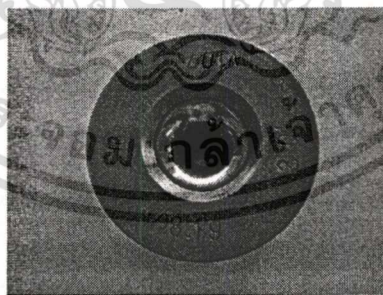
$$\Delta = \frac{H}{L} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} H &= (h_1 + h_2) / 2 \\ H_1 &= \text{ความหนาเส้นลวดก่อนดึงขึ้นรูป} \\ H_2 &= \text{ความหนาเส้นลวดหลังดึงขึ้นรูป} \\ L &= (H_1 - H_2) / (2 \sin \alpha) \end{aligned}$$

หรับการดึงขึ้นรูปลวดหน้าตัดกลม ค่า H เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้น จะได้ค่า  $\Delta$  สำหรับการดึงขึ้นรูปลวด

$$\Delta = \frac{\sin \alpha}{r} (1 + \sqrt{1 - r})^2 \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.3 ค่าอัตราส่วน  $W_f / W_i$  เพิ่มขึ้นเมื่อลดค่า  $\Delta$  เพราะค่าพื้นที่สัมผัสของลวดและคายจะเพิ่มทำให้ค่าแรงเสียดทานเพิ่ม การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงในการดึงขึ้นรูปขึ้นงานแรงที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระบวนการดึงขึ้นรูปนั้นเกิดขึ้นในช่วยของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งเกิดขึ้นทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปนั้นเป็นแม่พิมพ์แบบเปิด โดยปกติจะเกิดทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัดเกิดขึ้นภายในช่วยที่เรียกว่า โซนการดึงขึ้นรูป (Drawing Zone)



รูปที่ 3.27 แสดงแม่พิมพ์ดึงลวด (Drawing die)

งานและแรงที่ต้องการในกระบวนการดึงขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ด้วย Siebel's Method เทอมของงาน และแรงจะพิจารณาที่พื้นที่ภาคตัดที่ทางออกของช่วงลวดของคาย สมการของแรงในการดึงขึ้นรูป และ แรงเสียดทานสามารถที่จะเขียนได้คล้ายคลึง กับการอัดขึ้นรูปตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{D,tot} = F_{id} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (3.6)$$

$$F_{D,tot} = \sigma_{z,1} A_1 = A_1 \sigma_{f,m} \left[ \left( 1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{\max} + \frac{2}{3} \sigma \right] \quad (3.7)$$

มุม 2 เล็ก ๆ  $\sin 2\alpha \cong 2\alpha$  แรงเสียดทานในคายจะเป็น

$$F_{FR,S} = A_1 \sigma_{f,m} \varphi_{\max} \frac{\mu}{\alpha} \quad (3.8)$$

งานทั้งหมดในการเปลี่ยนรูปร่างสามารถคำนวณได้จาก

$$W_{D,tot} = W_{id} + W_{FR,S} + W_{sh} \quad (3.9)$$

โดยที่

$F_D (W_D)$	=	แรง(งาน)ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป
$F_{id} (W_{id})$	=	แรงอุดมคติ (งานอุดมคติ) ที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน
$F_{FR,S} (W_{FR,S})$	=	แรงเสียดทาน (งานเสียดทาน) บนช่วงลาดของคาย
$F_{sh} (W_{sh})$	=	แรงเฉือน (งานเฉือน)
$\sigma_{z,1} \sigma_{f,m}$	=	ความเค้นในแนวแกน Z, ความเค้นของการไหลเฉลี่ย $\sigma_z - \sigma_r = \sigma_f$
$A_1$	=	พื้นที่ภาคตัดที่ทางเข้าช่วยแบร์ริง
$\mu$	=	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน
$\alpha$	=	ครึ่งมุมคาย
$\varphi_{\max}$	=	ความเครียดรวมชาติ

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหาได้จากตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าแรงเสียดทานในการดึงขึ้นรูปและอัดขึ้นรูปขึ้นงาน

Process	Solid forward extrusion	Hollow forward extrusion	Drawing bar and tubes	Ironing	Drawing hollow bodies
Coefficient of friction ( $\mu$ )	0.04-0.08	0.1-0.125	0.02-0.05	0.02-0.07	0.08-0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอารูปภาพให้วงไป ใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงมุมคายที่คิดที่สุด (โดยแรงที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง) ในการดึงขึ้นรูปเย็น

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

แรงรวม  $F_{\text{tot}}$  เป็นฟังก์ชันของมุมทางเข้าของคาย  $2\alpha$  และแรงต่ำสุดที่ได้จากการคำนวณ

$$F_{\text{tot}} = A_0 \sigma_{f,m} \left[ \frac{2}{3} \alpha + \left( 1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{\max} \right] + \pi d_0 \sigma_{f,0} \mu l \quad (3.10)$$

เมื่อ  $A_0$  เป็นพื้นที่ภาคตัดช่วงทางเข้าของเครื่องมุดคายและ / เป็นความยาวของช่วงลาดของคายและ

$$\cos \alpha_{\text{opt}} = 3\mu \varphi_{\max} \pm \sqrt{9\mu^2 \varphi_{\max}^2 + 1} \quad (3.11)$$

ด้านขวามือของสมการจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าของมุม  $2\alpha$  น้อยที่สุดของแรงในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงาน

## บทที่ 4

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวางแผนการวิจัยในหัวข้อ การศึกษาข้อบกพร่องในลักษณะการปริแตกที่เกิดขึ้นที่แกนกลางของ เส้นลวดทองแดงในขณะที่ดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานาโดยวิธีทดลอง นี้ได้ ศึกษา ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งจากวารสารภายในประเทศ และวารสารนานาชาติ จากนั้น ได้เริ่มการออกแบบชิ้นทดสอบ โดยการศึกษารายละเอียดต่างๆของวัสดุที่นำมาทดสอบ ขั้นตอน ต่อมาออกแบบชุดเครื่องมือจับคานา ศึกษาการใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) การวางแผนการทดสอบชิ้นงาน การเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การออกแบบชิ้นทดสอบ

ลวดทองแดงที่ใช้ในการทดสอบ  $\text{CuZn}_4\text{Pb}_2$

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของทองแดงที่ใช้ในการทดลอง

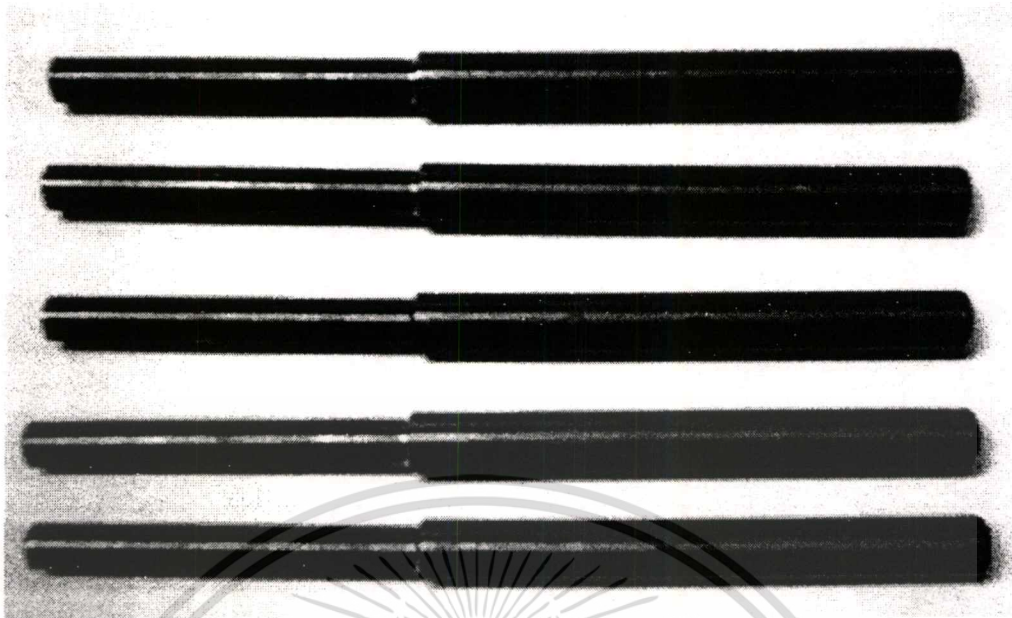
GRADE	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Density (kg/dm <sup>3</sup> )
$\text{CuZn}_4\text{Pb}_2$	94	4	2	8.93

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขที่ใช้ในการดึงลวดด้วยวิธีทดลอง

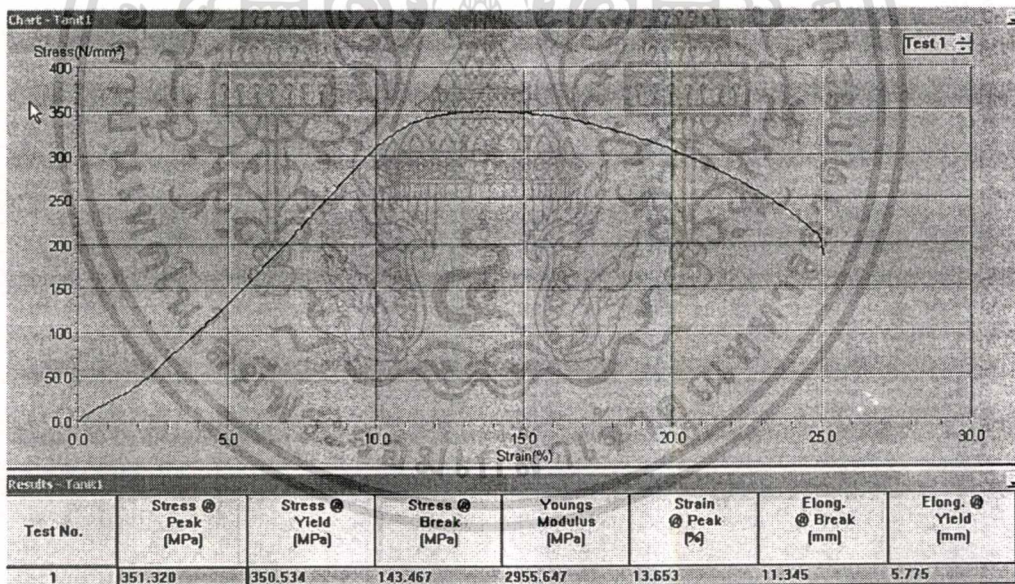
ทองแดง (ลวดทดลอง)	
120,000	Young's modulus; E (MPa)
150	Yield stress; $\sigma_y$ (MPa)
0.3	Poisson's ratio; $\nu$
15 และ 22.5	Die half angle; $\alpha$ (Deg)
15 และ 25	Reduction per pass; Re/P (%)
0.05	Coefficient of friction; $\mu$

จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 เป็นคุณสมบัติของเส้นลวดทองแดงที่ใช้ในการทดสอบ ลวดทองแดงเบอร์  $\text{Cu Zn}_4\text{Pb}_2$  ซึ่งประกอบด้วยทองแดง 94 % สังกะสี 4 % ตะกั่ว 2% และความหนาแน่น 8.93 kg/dm<sup>3</sup> รูปที่ 4.2 และ 4.3 ผลการทดสอบลวดทองแดงก่อนทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



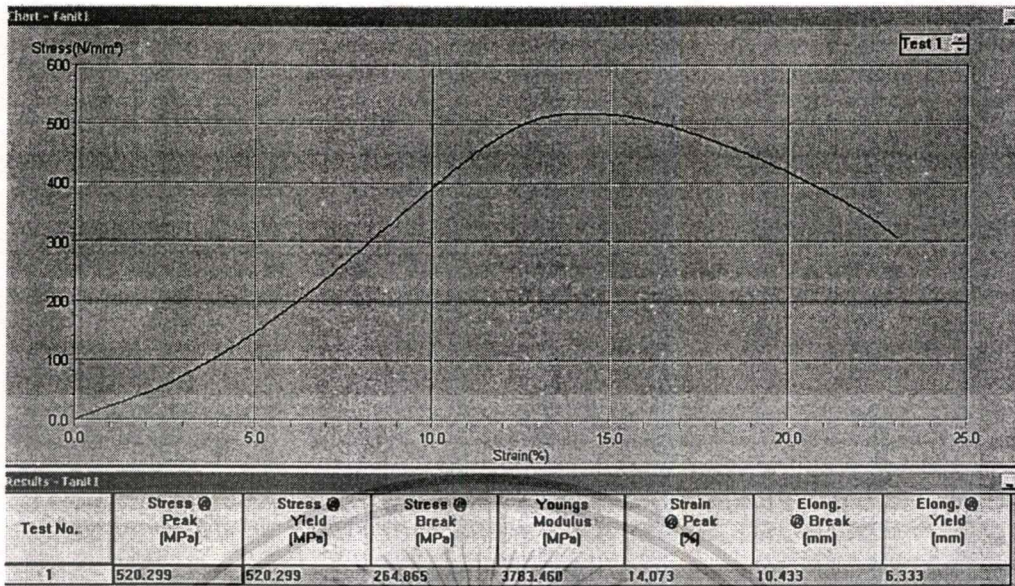
รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของลวดทองแดงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของทองแดงก่อนการทดลอง

จากรูป 4.1 ลวดทองแดงที่ใช้ในการทดสอบเบอร์ CuZn<sub>4</sub>Pb<sub>2</sub> นำมากลึงลดขนาด โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลวดทองแดงที่ใช้ในการทดลอง เริ่มต้นที่ 20 มิลลิเมตร รูปที่ 4.2 กราฟผลการทดลอง การทดสอบความแข็งแรงของทองแดงก่อนทำการทดลอง ความเค้นสูงสุดของเส้นลวดทองแดงก่อนการทดลอง จากกราฟความเค้นสูงสุดที่ 350 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

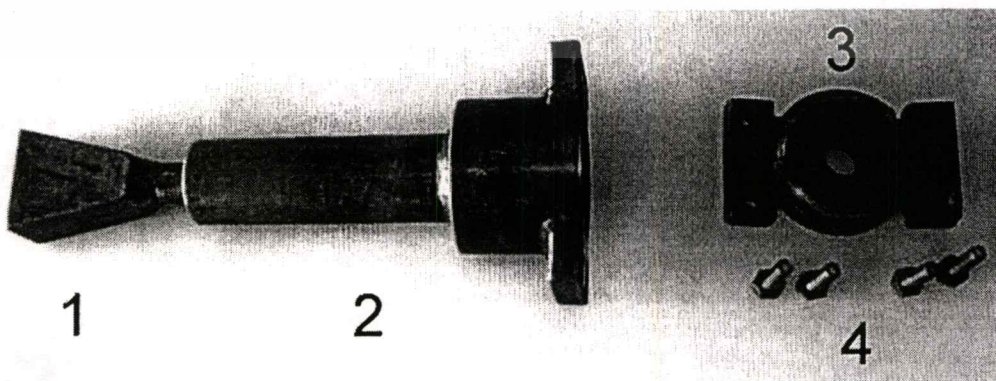


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของทองแดงหลังการทดลอง

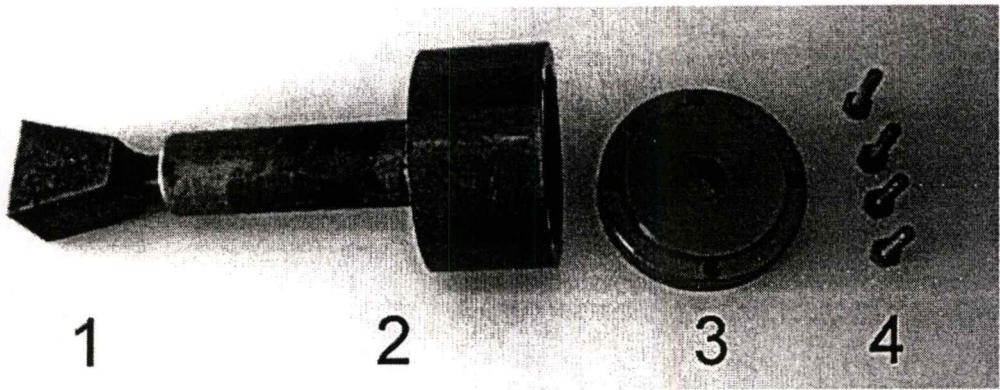
จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความเค้น ความเครียดและคุณสมบัติของทองแดงหลังการทดลอง จากการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคายตัวที่ 1 ผลของความเค้นหลังการดึงเส้นลวดผ่านคายมีค่าสูงกว่าก่อนการดึงเส้นลวดผ่านคายตัวที่ 1 ความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 350 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรเป็น 520 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร เพิ่มขึ้นประมาณ 48.57 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2 การออกแบบชุดจับตาย

การออกแบบชุดจับตาย ได้ออกแบบให้เหมาะกับการทดลอง กล่าวคือจะต้องประกอบคายกับชุดจับยึดให้เหมาะสมและไม่ยุ่งยากซับซ้อนในการประกอบกับเครื่องทดสอบ จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 4.4 แสดงชุดอุปกรณ์จับตายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงชุดอุปกรณ์จับคายนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นอุปกรณ์ชุดจับคายน ซึ่งได้รับการออกแบบพิเศษ เฉพาะในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย

หมายเลข 1 ขั้วต่อสำหรับยึดกับเครื่องทดสอบ

หมายเลข 2 เลืออุปกรณ์จับยึด

หมายเลข 3 ฝาปิดอุปกรณ์จับยึด

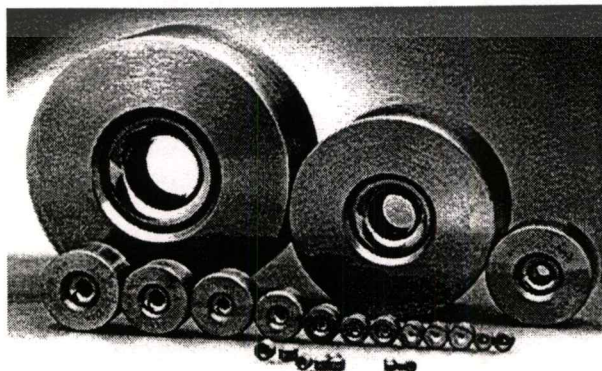
หมายเลข 4 สกรู สำหรับจับยึดชุดทดสอบ

รูปที่ 4.4 ใช้สำหรับจับยึดคายนเข้ากับเครื่องทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 70 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.5 ใช้สำหรับจับยึดคายน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 100 มิลลิเมตร

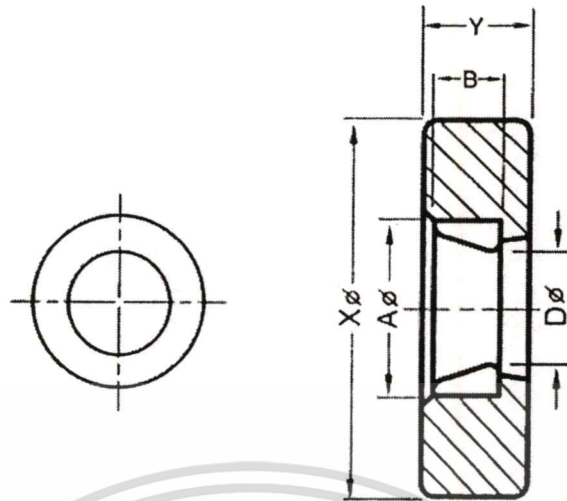
#### 4.3 การออกแบบคายน

ชุดของตัวคายนที่มีขนาดของมุมเอียงต่างกันได้แก่ขนาดมุมคายน  $30^\circ$  และ  $45^\circ$  (หรือมุมครึ่งคายน เท่ากับ  $15^\circ$  และ  $22.5^\circ$  ตามลำดับ)

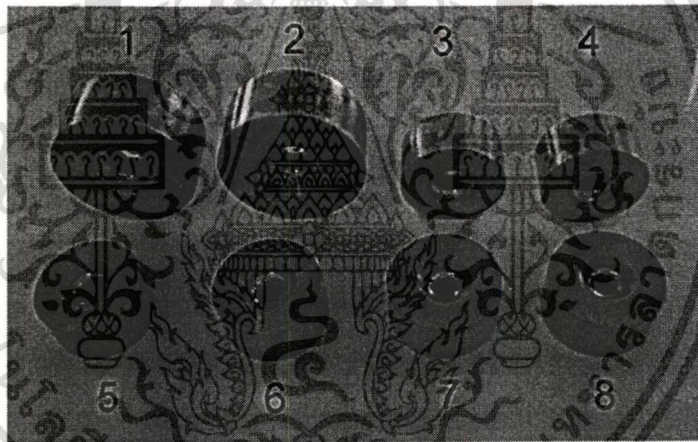


รูปที่ 4.6 แสดงคายน (Dies) ขนาดต่างๆ

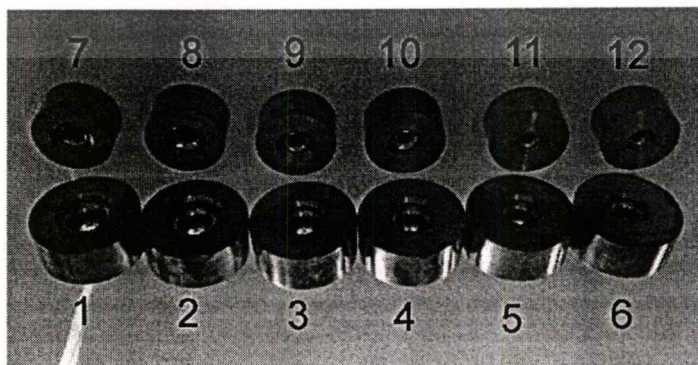
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงภาพของคายน และมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต



รูปที่ 4.8 แสดงคายน (Dies) ขนาดครึ่งมมคายน 22.5 องศา



รูปที่ 4.9 แสดงคายน (Dies) ขนาดครึ่งมมคายน 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคุณสมบัติของค้ายที่ใช้ในการทดลอง

GRADE	WC(%)	CO(%)	HARDNESS (HRA)	TRS (Kg/mm <sup>2</sup> )	PARTICLE SIZE (μ m)
E10	94	6	89.63-90.7	260 over	3

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดของค่าตัวแปรต่างๆ ที่เป็นมาตรฐานของบริษัทผู้ผลิต

TYPE	Rang D mm	Steel Case		Carbide Nib	
		X	Y	A	B
		mm	mm	mm	mm
W 102	0.7 - 1.5	24	12	9	6
W 103	1.5 - 2.5	30	15	12	8
W 104	2.5 - 4	42	20	15	10
W 105	4 - 6	55	24	20	14
W 106	6 - 8	60	28	25	18
W 107	8 - 10	70	35	30	22
W 108	10 - 13	85	40	35	25
W 109	11 - 16	100	45	40	27
W 110	16 - 20	125	50	50	30
W 111	20 - 26	145	60	60	35
W 112	26 - 32	175	70	70	40
W 113	32 - 36	195	80	80	45
W 114	38 - 46	215	96	90	50
W 115	46 - 54	230	90	100	50
W 116	54 - 64	240	90	110	50
W 117	64 - 74	260	100	120	50
W 118	74 - 84	280	100	130	50
W 119	84 - 94	300	100	140	50
W 120	94 - 104	300	100	150	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความเผื่อของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ยอมรับได้

Hole Diameter	Tolerance of
$\varnothing D$	$\varnothing D$
0.2 - 0.5	+0-0.01
0.5 - 2.0	+0-0.015
2.0 - 3.2	+0-0.02
3.2 - 6.0	+0-0.03
6.0 - 12.0	+0-0.04
12.0 - 25.0	+0-0.06
25.0 - Over	+0-0.1

ตารางที่ 4.6 แสดงขนาดลวดก่อนและหลังดึงผ่านคायกรณีใช้คायที่มี Re/P = 25 % ในการทดลอง  
ครั้งนี้

Pass	$A_o$ (sq mm)	$A_f$ (sq mm)	$D_o$ (mm)	$D_f$ (mm)
1	314.1593	251.3274	20.0000	17.8885
2	251.3274	201.0619	17.8885	16.0000
3	201.0619	160.8495	16.0000	14.3108
4	160.8495	128.6796	14.3108	12.8000
5	128.6796	102.9437	12.8000	11.4487
6	102.9437	82.3550	11.4487	10.2400
7	82.3550	65.8840	10.2400	9.1589
8	65.8840	52.7072	9.1589	8.1920

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงขนาดลวดก่อนและหลังดึงผ่านคायกรณีใช้คायที่มี  $Re/P = 15\%$  ในการทดลอง  
ครั้งนี้

Pass	A (Sq mm)	A (Sq mm)	D (mm)	D (mm)
1	314.1593	267.0354	20	18.4391
2	267.0354	226.9801	18.4391	17
3	226.9801	192.9331	17	15.6732
4	192.9331	163.9931	15.6732	14.45
5	163.9931	139.3941	14.45	13.3222
6	139.3941	118.485	13.3222	12.2825
7	118.485	100.7123	12.2825	11.3239
8	100.7123	85.6054	11.3239	10.4401
9	85.6054	72.7646	10.4401	9.6253
10	72.7646	61.8499	9.6253	8.8741
11	61.8499	52.5724	8.8741	8.1815
12	52.5724	44.6866	8.1815	7.543

จากรูปที่ 4.8 แสดงชุดคायที่ใช้ในการทดลองวิจัยครั้งนี้ ซึ่งได้รับการออกแบบจากบริษัทผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งผลิตคायโดยเฉพาะ ตามมาตรฐานสากล ชุดนี้มีทั้งหมด 8 ตัว ขนาดของครึ่งมุดคायเท่ากับ 22.5 องศา ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลง 25% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด 20 มิลลิเมตร รายละเอียดต่างๆ ของการลดพื้นที่หน้าตัด ศึกษาได้จากตารางที่ 4.6 รูปที่ 4.9 คायชุดนี้มีทั้งหมด 12 ตัว ขนาดของครึ่งมุดคायเท่ากับ 15 องศา ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลง 15% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด 20 มิลลิเมตร รายละเอียดต่างๆ ศึกษาได้จากตารางที่ 4.6 การลดพื้นที่หน้าตัด ศึกษาได้จากตารางที่ 4.7 ตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 แสดงมาตรฐานคायที่ใช้ในการทดสอบกับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

## บทที่ 5

### วิธีทดลอง

การศึกษาวิจัยเพื่อศึกษาข้อบกพร่องในลักษณะการปริแตกที่เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด ขณะที่ดึงเส้นลวดผ่านคานาโดยวิธีทดลองนี้ ได้ออกแบบการทดลองโดยการเลือกใช้มุมคานาที่แตกต่างกัน 2 ขนาด ขนาดมุมคานา 30 องศา (ครึ่งมุมคานา 15 องศา) และขนาดมุมคานา 45 องศา และเปอร์เซ็นต์ของการลดพื้นที่หน้าตัด 2 ขนาด คือขนาดของมุมคานา 30 องศาดึงลดขนาดลง 15 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของมุมคานา 45 องศาดึงลดขนาดลง 25 เปอร์เซ็นต์ ในการทดลองดึงเส้น ลวดผ่านคานาครั้งนี้ใช้เครื่องทดสอบที่ได้มาตรฐาน คือ เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ระบบขับเคลื่อน วัตถุประสงค์ และบันทึกผลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดึงสูงสุด 10 ตัน ในการทดลองดึงเส้นลวด ผ่านคานาครั้งนี้ ใช้ความเร็วในการดึงเส้นลวดคงที่ ที่ 30 มิลลิเมตรต่อนาที ในการทดลอง ได้กำหนดขอบเขตของการทดลองไว้ 2 กรณี คือ กรณีที่หนึ่งเป็นการดึงเส้นลวดโดยไม่มีการอบคืนตัวของเส้นลวด โดยการดึงผ่านคานาตัวที่ 1 คานาตัวที่ 2 คานาตัวที่ 3 และดึงผ่านคานาตัวต่อไปจนกระทั่งเส้นลวดเกิดการรอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวด กรณีที่ 2 เมื่อเส้นลวดถูกดึงผ่านคานาตัวที่ 2 แล้วนำเส้นลวดไปอบที่อุณหภูมิต่างกัน ในการทดลองดึงเส้นที่อุณหภูมิห้องปกติ

#### 5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดลอง

5.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ประกอบการทดลอง ประกอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ระบบขับเคลื่อน วัตถุประสงค์ และบันทึกผลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดึงสูงสุด 10 ตัน มีไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 5.1

5.1.2 ชุดหัวจับคานา ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้จับยึดคานาขณะทำการทดลอง มี 2 ขนาด คือ ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร

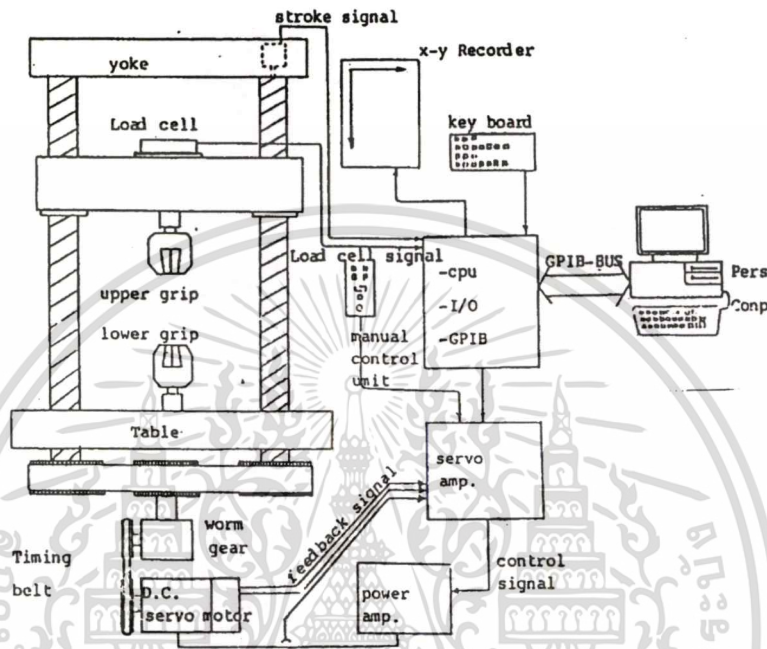
5.1.3 ชุดของตัวคานา ที่มีขนาดของมุมเอียงต่างๆกัน ได้แก่ขนาดมุมคานา 30° และ 45° (หรือมุมครึ่งคานา เท่ากับ 15° และ 22.5°)

5.1.4 ลวดหรือชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดสอบใช้กับมุมครึ่งคานาขนาดต่างๆกัน โดยใช้วัสดุทองแดงลดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร โดยลดขนาดคิดเป็น 15 % และ 25 % ของขนาดเดิม

5.1.5 เครื่อง CNC Wire Cut สำหรับผ่าเส้นลวดทองแดงเพื่อศึกษารอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.6 เตาอบไฟฟ้า สามารถปรับตั้งอุณหภูมิเพื่ออบชิ้นงานทดสอบ ในการทดลองวิจัย  
ครั้งนี้ ได้ออกแบบการ อบอุณหภูมิเส้นลวดทองแดงสำหรับทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบ  
ความเค้นที่เกิดขึ้นต่อการดึงเส้นลวดผ่านด้าย 5 ช่วง คือ ขนาด อุณหภูมิ 100, 150, 200, 250 และ 300  
องศาเซนติเกรด



รูปที่ 5.1 แสดงไดอะแกรมการทำงานของเครื่องทดลอง



รูปที่ 5.2 แสดงภาพด้านหน้าของเครื่องทดลองพร้อมอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงเตาอบไฟฟ้าที่สามารถปรับตั้งอุณหภูมิได้ตามต้องการ

จากรูปที่ 5.3 แสดงเตาไฟฟ้า ซึ่งเตาชนิดที่ใช้อบเส้นลวดทองแดงนั้นสามารถปรับอุณหภูมิได้โดยตั้งอุณหภูมิการทดลองอบขึ้นงานไว้ถึง 5 ระดับกล่าวคือที่ 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนการอบนั้น ได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 5.4

## 5.2 กรณีศึกษาการดึงเส้นลวดผ่านคานขนาดของครึ่งมุมตาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ 15 องศา ขนาดการลองพื้นที่หน้าตัด 15 เปอร์เซ็นต์

เริ่มทำการทดลองโดยการยึดติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นมาทั้งหมดบนเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ยึด ขึ้นทดสอบกับอุปกรณ์ดังกล่าว ตั้งค่าต่างๆ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการตั้งค่าต่าง ๆ ดังนี้

5.2.1 ค่าความเร็วในการทดสอบ ในการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคานในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ความเร็วในการดึงเส้นลวดเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อนาที

5.2.2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นทดสอบเริ่มต้นที่ 20 มิลลิเมตร

5.2.3 ตั้งสเกลวัดแรงดึง การตั้งสเกลวัดแรงดึงไว้สูงสุดไว้เท่ากับ 50 kN

5.2.4 ชนิดการทดสอบ ตั้งชนิดของการทดสอบไว้เป็นการทดสอบแรงดึง

5.2.5 อุณหภูมิห้องทดสอบ ทำการทดลองดึงชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส

5.2.6 การเก็บข้อมูล ผลการทดสอบจะถูกคำนวณไว้ใน โปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.7 การวิเคราะห์ข้อมูล นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นของชั้นทดสอบ การทดสอบแต่ละครั้งในกรณีนี้จะต้องดึงชั้นทดสอบผ่านคายตัวที่ 1 และตัวที่ 2 หลังจากนั้น ต้องนำชั้นทดสอบไปกลึงลดขนาดเพื่อที่จะให้ชิ้นงานสามารถสอดผ่านคายเพื่อจับยึดติดตั้งและทดสอบกับคายตัวที่ 3 และตัวที่ 4 ต่อไป หลังจากผ่านคายตัวที่ 4 แล้ว ก็ต้องนำชั้นทดสอบกลับไปกลึงลดขนาดอีก และต้องกลึงลดขนาดเพื่อผ่านคายตัวที่ 2 , 4 , 6 , 8 , 10

ตารางที่ 5.1 แสดงชั้นทดสอบที่ผ่านคายแต่ละตัวในกรณี  $\alpha$  เท่ากับ 15 องศา R/P = 15%

ชั้นทดสอบ	จำนวนคาย											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				

จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงจำนวนคายทั้งหมดมี 12 ตัวในชุดนี้ ขนาดของครึ่งมุมคาย 15 องศา ขนาดการลดพื้นที่หน้าตัด 15 เปอร์เซ็นต์ต่อการดึงผ่านคายแต่ละครั้ง ชั้นทดสอบชั้นที่ 1 ดึงผ่านคาย 12 ตัว ชั้นที่ 2 ดึงผ่านคาย 11 ตัว ชั้นที่ 3 ดึงผ่านคาย 10 ตัว ชั้นที่ 4 ดึงผ่านคาย 9 ตัว ชั้นที่ 5 ดึงผ่านคาย 8 ตัว

### 5.3 กรณีศึกษาการดึงเส้นลวดผ่านคายขนาดของครึ่งมุมคาย ( $\alpha$ ) เท่ากับ 22.5 องศา ขนาดลดพื้นที่หน้าตัด 25%

เริ่มทำการทดลองโดยการยึดติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สร้างขึ้นมาทั้งหมดบนเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว นำชั้นทดสอบประกอบกับชุดเครื่องมือ จากนั้นตั้งค่าต่าง ๆ บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนี้

5.3.1 ค่าความเร็วในการทดสอบ ในการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคายในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ใช้ความเร็วในการดึงเส้นลวดเท่ากับ 30 มิลลิเมตรต่อนาที

5.3.2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นทดสอบเริ่มต้นที่ 20 มิลลิเมตร

5.3.3 ตั้งสเกลวัดแรงดึง การตั้งสเกลวัดแรงดึงไว้สูงสุดไว้เท่ากับ 50 kN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.4 ชนิดการทดสอบ ตั้งชนิดของการทดสอบไว้เป็นการทดสอบแรงดึง

5.3.5 อุณหภูมิห้องทดสอบ ทำการทดลองดึงขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซนติเกรด

5.3.6 การเก็บข้อมูล ผลการทดสอบจะถูกคำนวณไว้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นของขึ้นทดสอบ

การทดสอบแต่ละครั้งในกรณีนี้จะต้องทำการกลึงชิ้นงานทดสอบหลังจากการดึงชิ้นงานผ่านตายตัวที่ 1 และตัวที่ 2 กลึงเฉพาะในส่วนที่จับกับขึ้นทดสอบ การกลึงลดขนาดในกรณีนี้กลึงเมื่อผ่านตายตัวที่ 2 , 4 และ 6

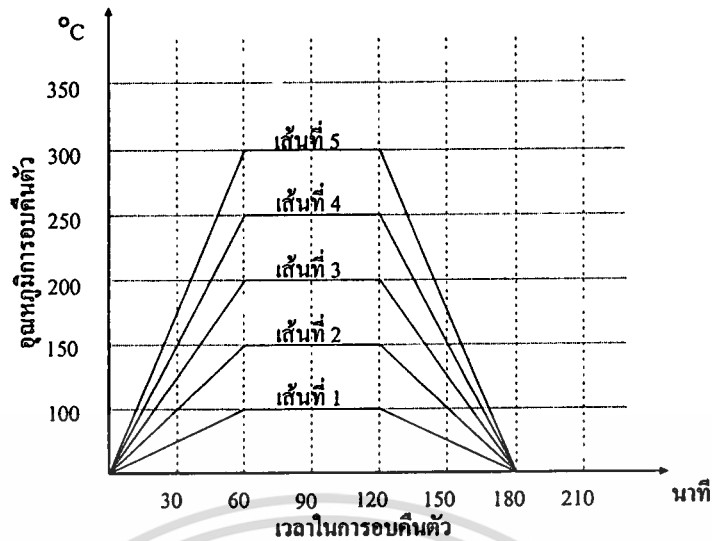
ตารางที่ 5.2 แสดงขึ้นทดสอบที่ผ่านตายแต่ละตัวในกรณี  $\alpha$  เท่ากับ 22.5 องศา, R/P = 25%

ขึ้นทดสอบ	จำนวนตาย							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
4	✓	✓	✓	✓	✓			

จากตารางแสดงให้เห็นว่าขึ้นทดสอบชั้นที่ 1 ดึงผ่านตายทั้งหมด 8 ตัว ชั้นที่ 2 ดึงผ่านตาย 7 ตัว ชั้นที่ 3 ดึงผ่านตาย 6 ตัว ขึ้นทดสอบชั้นที่ 4 จะดึงผ่านตายทั้งหมด 5 ตัว ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ใช้ครึ่งมุมตายเท่ากับ 22.5 องศา ลดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลง 25 เปอร์เซ็นต์ต่อการผ่านตายต่อครั้ง

5.4 กรณีศึกษาการดึงเส้นลวดผ่านตาย และอบคืนตัวขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100, 150, 200, 250, 300 องศาเซนติเกรด

ในการศึกษาการดึงเส้นลวดผ่านตาย ในการอบคืนตัวได้นำเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงจากตายตัวที่ 1 และตายตัวที่ 2 อบคืนตัวที่อุณหภูมิ 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซนติเกรด



รูปที่ 5.4 แสดงการอบคืนตัวในอุณหภูมิที่ต่างกัน

ขึ้นทดลองทั้งหมดอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างกัน โดยอบที่เตาซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ โดยให้ปรับอุณหภูมิต่ำ ๆ เพิ่มขึ้นใช้เวลา 60 นาที ให้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วให้ชิ้นงานถูกอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยให้อุณหภูมิคงที่และปล่อยให้เย็นตัวลง 1 ชั่วโมง แล้วนำไปทดลองดึงผ่านคาน ในอุณหภูมิห้องปกติ

ตารางที่ 5.3 แสดงขั้นตอนการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคานในกรณีการอบคืนตัว

ชั้นที่	อุณหภูมิ °C	จำนวนคาน							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	150	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 5.3 เป็นขั้นตอนของการดึงเส้นลวดผ่านคานตั้งแต่คานตัวที่ 1 ถึงคานตัวที่ 8 ลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (R/P) เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของครึ่งมุมคาน ( $\alpha$ ) เท่ากับ 22.5 องศา โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของเส้นลวดทองแดง 20 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5.4 แสดงขั้นตอนการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคานในกรณีการอบคืนตัว

ขั้นที่	อุณหภูมิ °c	จำนวนคาน											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
2	150	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
3	200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
4	250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
5	300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			

จากตารางที่ 5.4 เป็นขั้นตอนของการดึงเส้นลวดผ่านคานตั้งแต่คานตัวที่ 1 ถึงคานตัวที่ 9 ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง (R/P) 20 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของครึ่งมุมคาน ( $\alpha$ ) เท่ากับ 15 องศา โดยขนาดมีเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของเส้นลวดทองแดง 20 มิลลิเมตรโดยการดึงผ่านคานครั้งที่ 2, 4, 6, 8 แล้วนำไปอบคืนตัวที่เตาที่อุณหภูมิต่างกัน

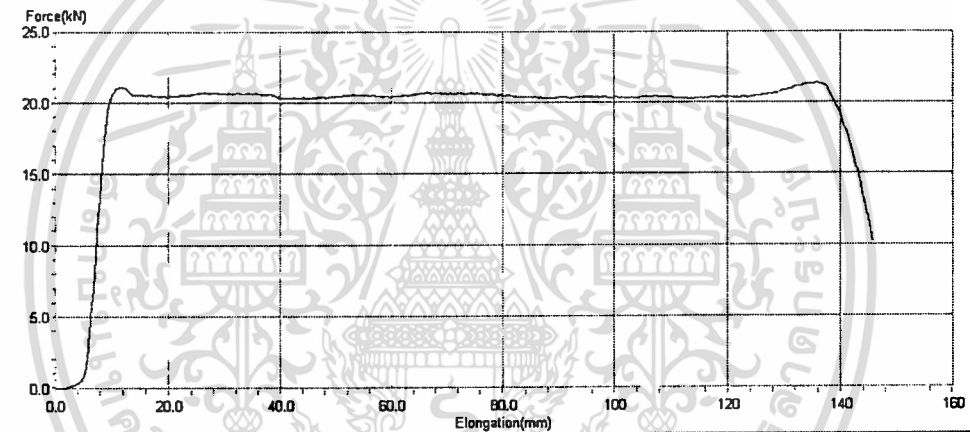
## บทที่ 6

### ผลการทดลอง และวิจารณ์ผล

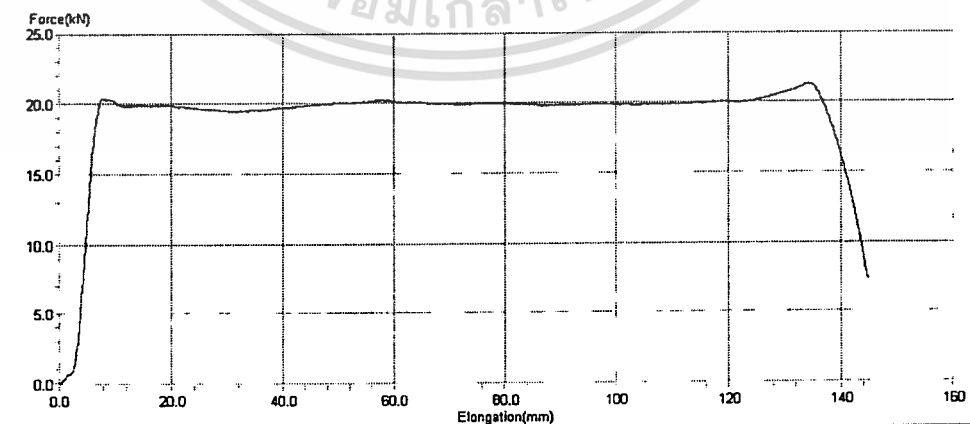
#### 6.1 ผลที่ได้จากการทดลองในกรณีของการดึงเส้นลวดผ่านด้ายหลายๆ เที้ยว

ในอุณหภูมิห้องปรกติได้การทดลองดังนี้

6.1.1 ความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงกับระยะที่ยืดออกของเส้นลวด ขนาดของครึ่งมุมด้าย 22.5 องศา ขนาดของการลดพื้นที่หน้าตัด 25 % เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร

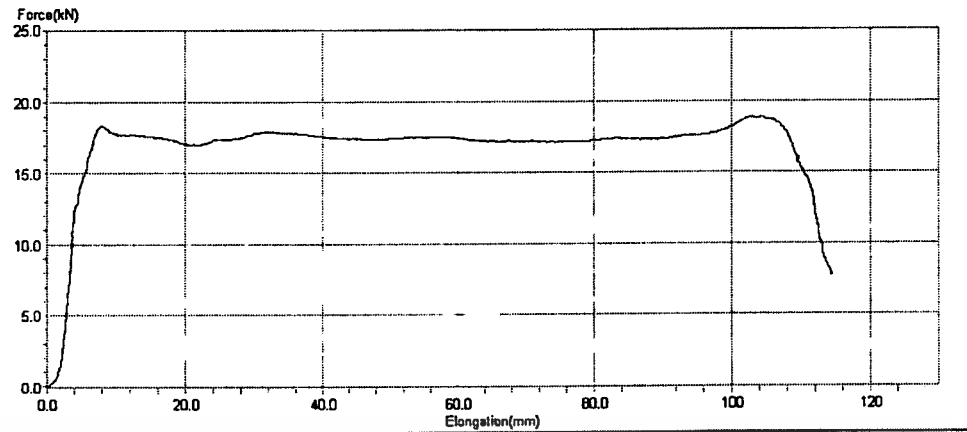


รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านด้ายตัวที่ 1

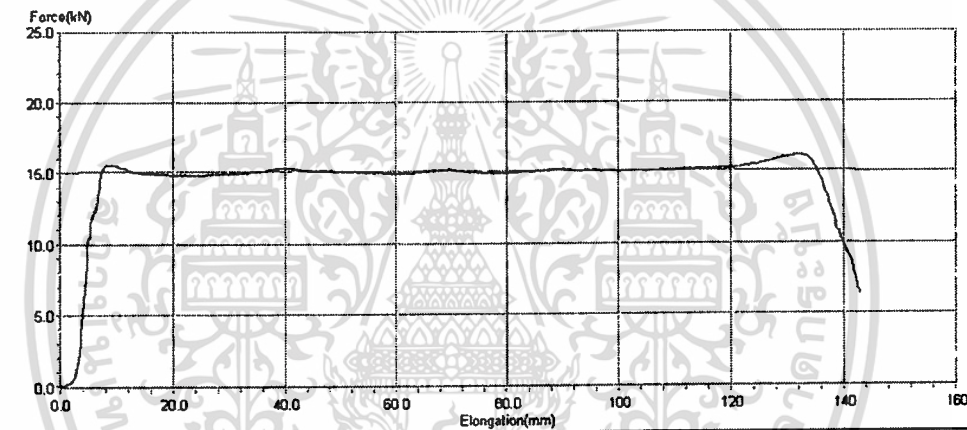


รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านด้ายตัวที่ 2

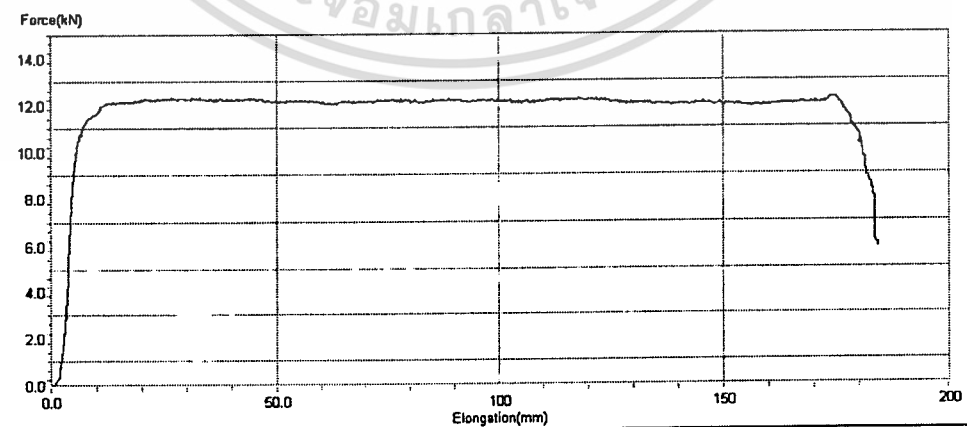
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 3

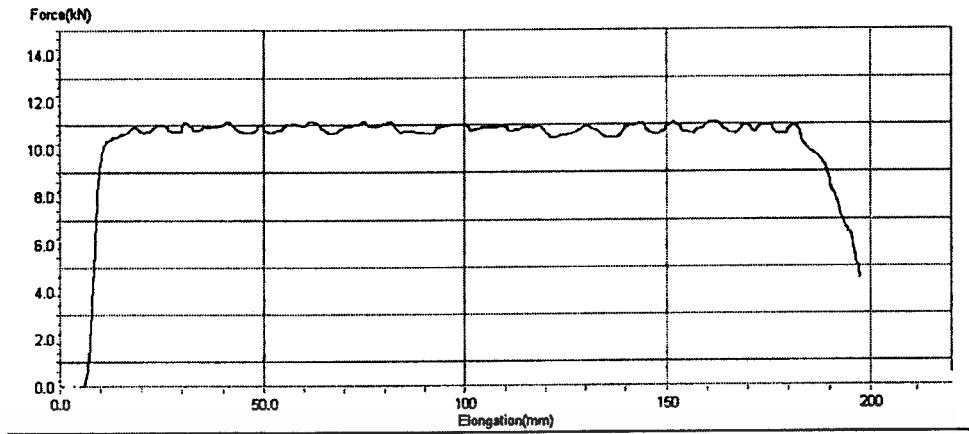


รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 4

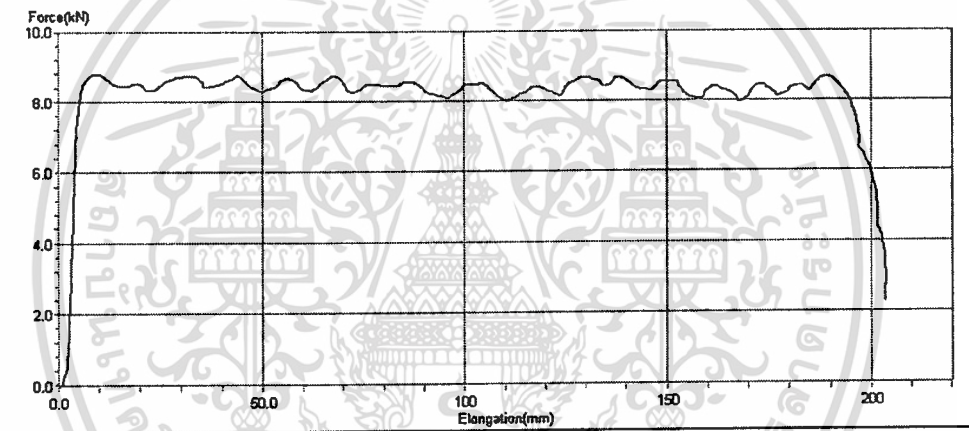


รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 5

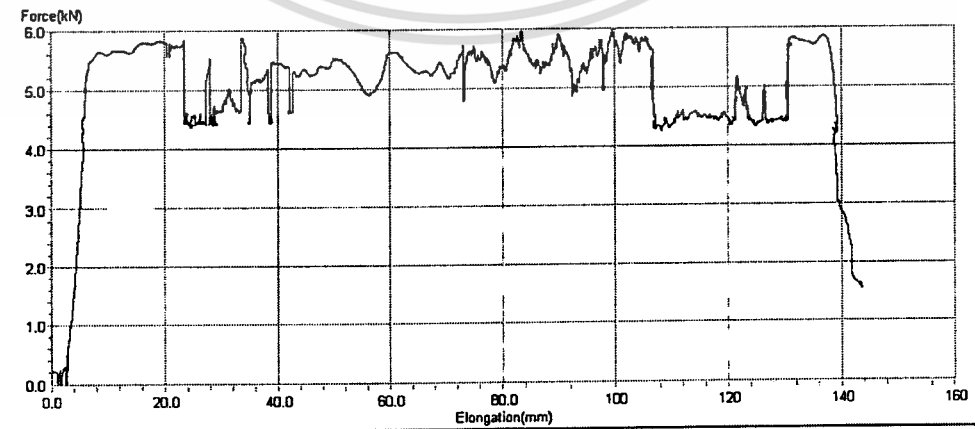
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 6



รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 7



รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 8

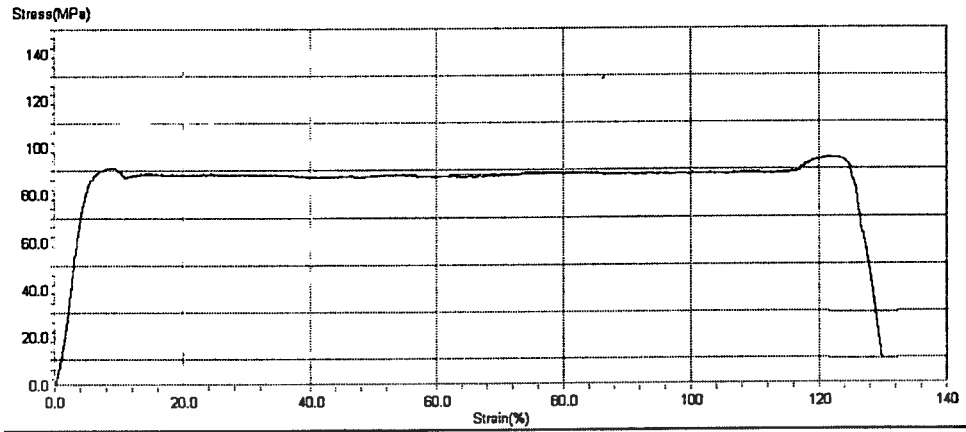
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์จากการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด 20 มิลลิเมตร ขนาดครึ่งมุมคาน ( $\alpha$ ) 22.5 องศา ดึงเส้นคานผ่านคานลดขนาดลงแต่ละครั้ง (R/P) 25% ความเร็วที่ใช้ในการทดลอง 30 มิลลิเมตรต่อนาที จากรูปที่ 6.1 นั้นผลของการดึงผ่านคานตัวที่ 1 แรงที่ใช้ในการดึง 21.1 kN รูปที่ 6.2 ผลของการดึงเส้นลวดผ่านคานตัวที่ 2 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงเท่ากับ 20.3 kN จะเห็นว่าแรงที่ใช้ดึงเส้นลวดลดลงประมาณ 3.79% จากรูป 6.2 และ 6.3 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลงจาก 20.3 kN เป็น 18 kN ซึ่งเป็นการดึงผ่านคานจากตัวที่ 2 มาตัวที่ 3 แรงลดลงประมาณ 11.33% จากรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 เปรียบเทียบผลของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดจากคานตัวที่ 3 มาตัวที่ 4 แรงที่ใช้ในการดึงจาก 18 kN เป็น 15.3 kN ลดลงประมาณ 15% รูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 ผลของแรงที่ใช้ดึงเส้นลวดผ่านคานตัวที่ 4 และตัวที่ 5 แรงลดจาก 15.3 kN เป็น 12.8 kN ลดลงประมาณ 15.34% รูปที่ 6.5 และ 6.6 ผลของการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคานตัวที่ 5 และตัวที่ 6 จาก 12.8 kN ลดลงประมาณ 15.34% รูปที่ 6.5 และ 6.6 ผลของการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคานตัวที่ 5 และตัวที่ 6 จาก 12.8 kN ลดลงเป็น 10.9 kN ลดลงประมาณ 14.84 % จากรูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.7 เป็นผลของการดึงเส้นลวดผ่านคานตัวที่ 6 และตัวที่ 7 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลงจาก 10.9 kN ลดลงเป็น 8.6 kN ลดลงประมาณ 21.10% จากรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8 เป็นผลของการดึงเส้นลวดผ่านคานตัวที่ 7 และตัวที่ 8 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลงจาก 8.6 kN เป็น 5.9 kN ลดลงประมาณ 31.40 %

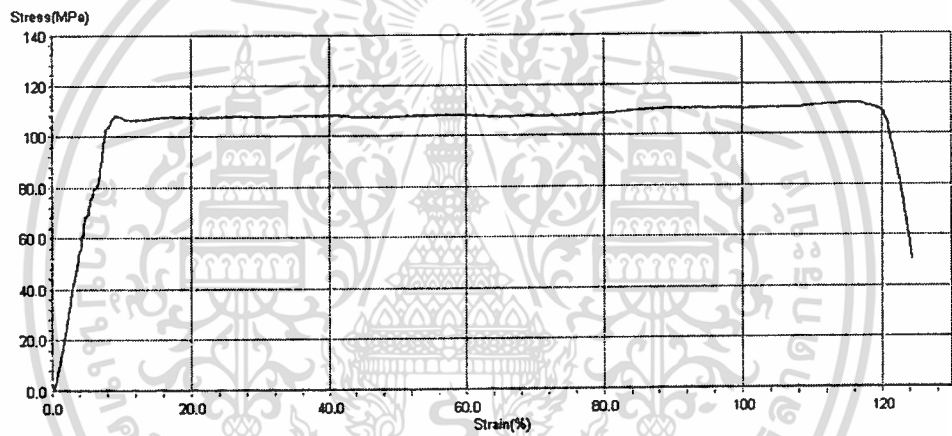
ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านคาน

คานตัวที่	1	2	3	4	5	6	7	8
แรง (KN)	21.1	20.3	18	15.3	12.8	10.9	8.6	5.9
% การลดลงของแรงที่ใช้	3.79%		15%		14.84%		31.4%	
		11.33%		16.34%		21.10%		

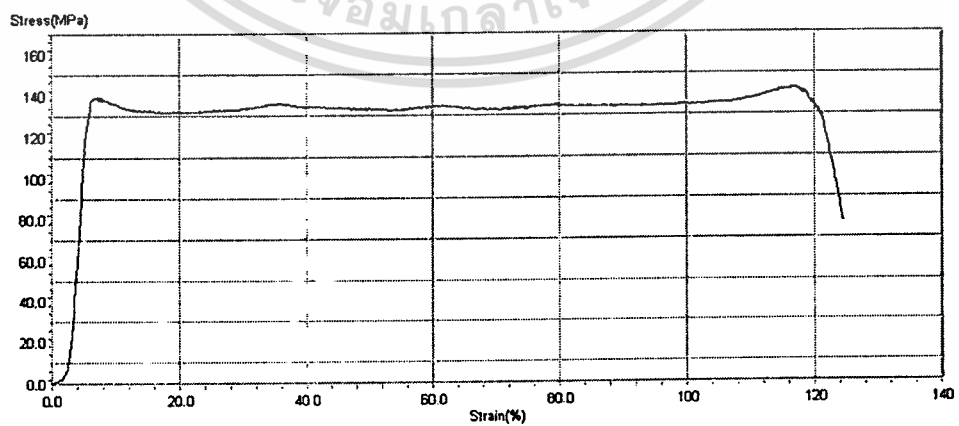
6.1.2 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการดึง ขนาดของมุมคาน 22.5 องศา ขนาดของการลดพื้นที่หน้าตัด 25 % เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร .



รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่าน คาย ตัวที่ 1

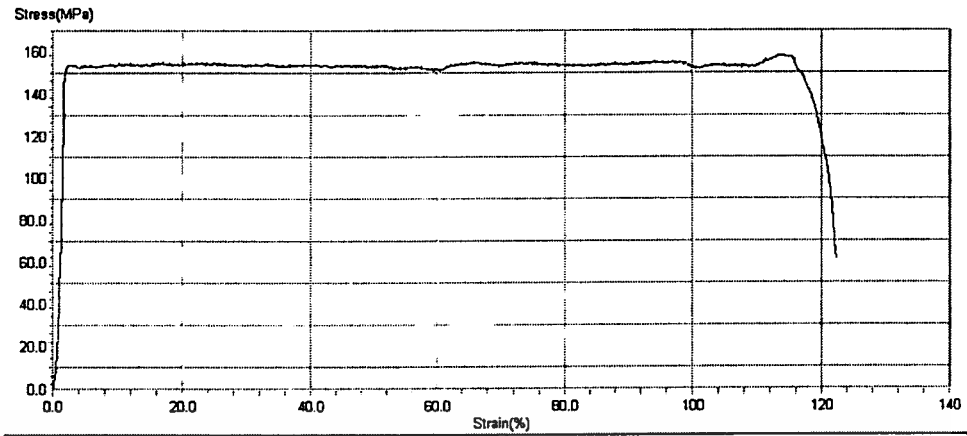


รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่าน คาย ตัวที่ 2

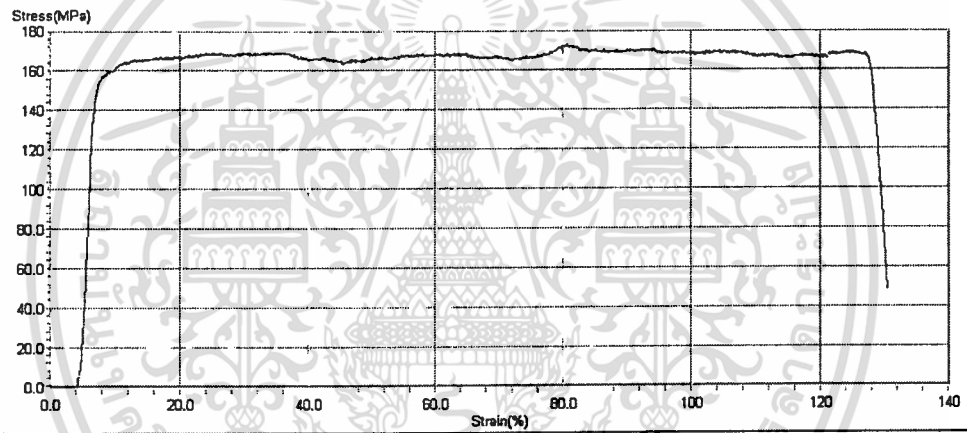


รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่าน คาย ตัวที่ 3

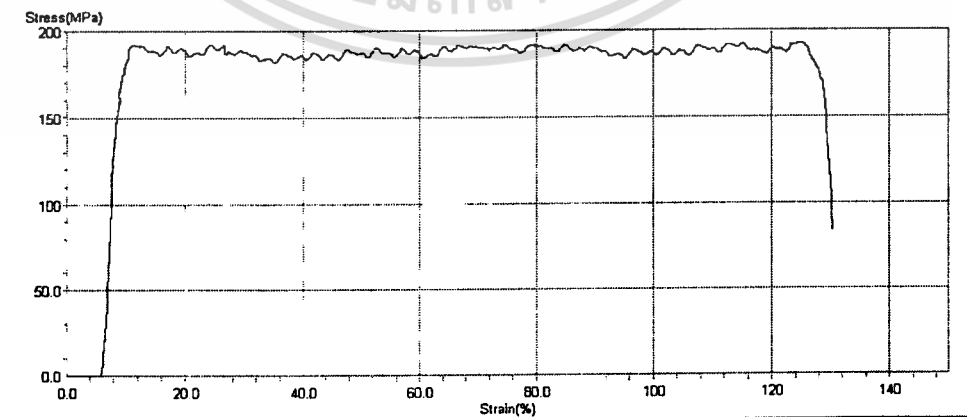
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 4

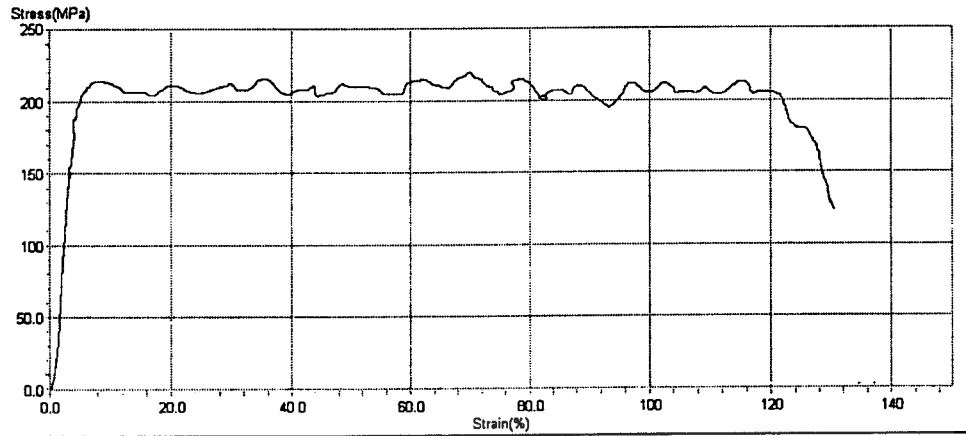


รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 5

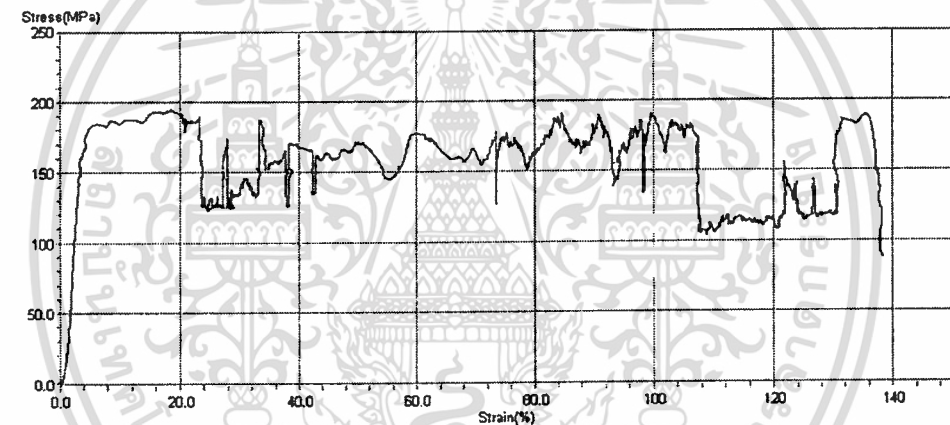


รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่าน ดายตัวที่ 7



รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่าน ดายตัวที่ 8

ผลลัพธ์ของการดึงเส้นลวดผ่านดายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นของเส้นลวดทองแดง 20 มิลลิเมตรขนาดครึ่งมุดดาย ( $\alpha$ ) 22.5 องศา ดึงเส้นลวดผ่านดายลดขนาดลงแต่ละครั้ง (R/P) 25 % ความเร็วที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านดาย 30 มิลลิเมตรต่อนาที จากรูปที่ 6.9 ถึง 6.16 เป็นการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดจากการดึงเส้นลวดผ่านดาย รูปที่ 6.9 ความเค้นผ่านดายตัวที่ 1 ความเค้น 89.55 MPa รูปที่ 6.10 ผลของการดึงเส้นลวดผ่านดายตัวที่ 2 ความเค้น 114.17 MPa ความเค้นเพิ่มขึ้น 27.49% รูปที่ 6.10 และ 6.11 เป็นผลของการดึงเส้นลวดผ่านดายตัวที่ 2 และตัวที่ 3 ความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 114.17 MPa เป็น 135.95% รูปที่ 6.11 และ 6.12 เป็นผลของการดึงเส้นลวดผ่านดายตัวที่ 3 และ ตัวที่ 4 ความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 135.81 MPa เป็น 153.92 MPa จะเห็นว่าความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้น ลวดผ่านดายเพิ่มขึ้น 13.33% จากรูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.13 เป็นผลของความเค้นของการดึงเส้นลวดผ่านดายตัวที่ 4 และตัวที่ 5 ความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 153.92 MPa เป็น 171.69 MPa จะเห็นว่าความเค้นของการดึงเส้นลวดเพิ่มขึ้น 11.54% จากรูปที่ 6.13 และรูปที่ 6.14 เป็นผล

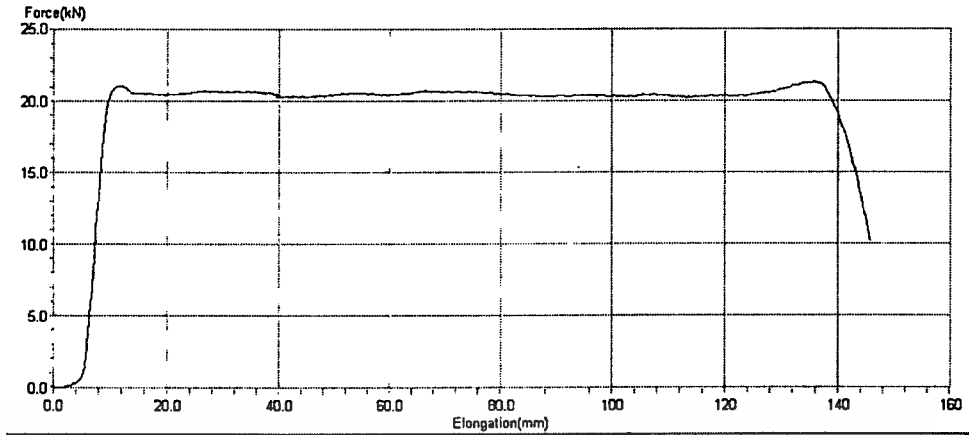
ของความเค้นดึงขึ้นรูปของเส้นลวดผ่านคายนัดที่ 5 และคายนัดที่ 6 ความเค้นของการดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้น จาก 171.69 MPa เป็น 194.95 MPa จะเห็นว่าความเค้นดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้น 13.55% จากรูปที่ 6.14 และรูปที่ 6.15 เป็นของการดึงเส้นลวดผ่านคายนัดที่ 6 และคายนัดที่ 7 ความเค้นดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นจาก 194.95 MPa เป็น 205.10 MPa จะเห็นว่าความเค้นดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้น 5.20% จากรูปที่ 6.15 และรูปที่ 6.16 เป็นผลของความเค้นดึงขึ้นรูปผ่านคายนัดที่ 7 และคายนัดที่ 8 ตามลำดับ ความเค้นดึงขึ้นรูปลดลงจาก 205.10 เป็น 187.59 MPa จะเห็นว่าความเค้นดึงรูปลดลง 187.59 MPa จะเห็นว่าความเค้นดึงขึ้นรูปลดลง 8.54 %

ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นตั้งแต่คายนัดที่ 1 ถึง คายนัดที่ 8

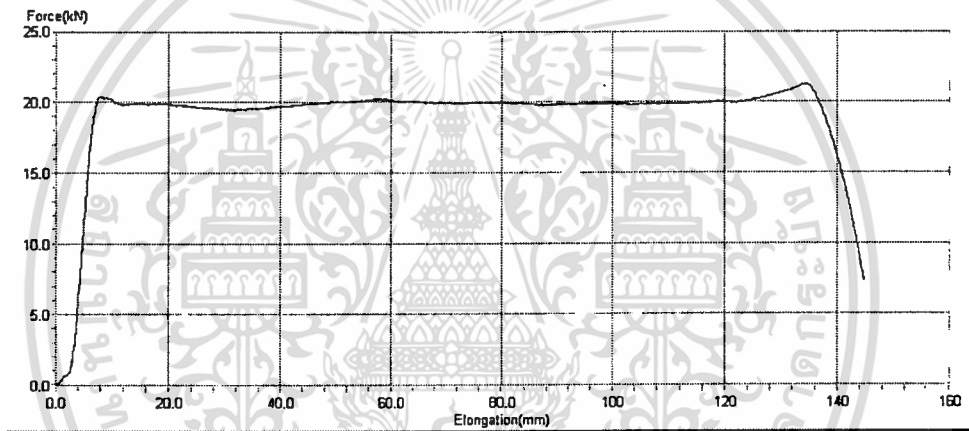
คายนัดที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ความเค้น (MPa)	89.55	114.17	135.81	153.92	171.69	194.95	205.10	187.59
% การเพิ่มขึ้นของความเค้น	27.49%		13.33%		13.55%		8.57%	
		18.95%		11.54%		5.20%		

การทดลองตั้งแต่รูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.16 เป็นผลของการทดลองดึงเส้นลวดผ่านคายนัดถึง 8 ครั้ง ลดขนาดลงเรื่อย ๆ เส้นกราฟเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ดึงผ่านคายนัดครั้งที่ 6, 7, 8 นำเส้นลวดทองแดงที่นำไปผ่าครึ่งจะสังเกตเห็นรอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดหรือที่เรียกว่า (Central burst) หรือรอยปริแตกเป็นรูปตัว V (Chevon crack) ซึ่งผลจากการเกิดข้อบกพร่องนี้ส่งผลให้สูญเสีย วัสดุดิบ สูญเสียงบประมาณ คุณภาพของเส้นลวดตกต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่มีคุณภาพ มีผลเสียหายต่อกระบวนการผลิตเส้นลวดในงานอุตสาหกรรม

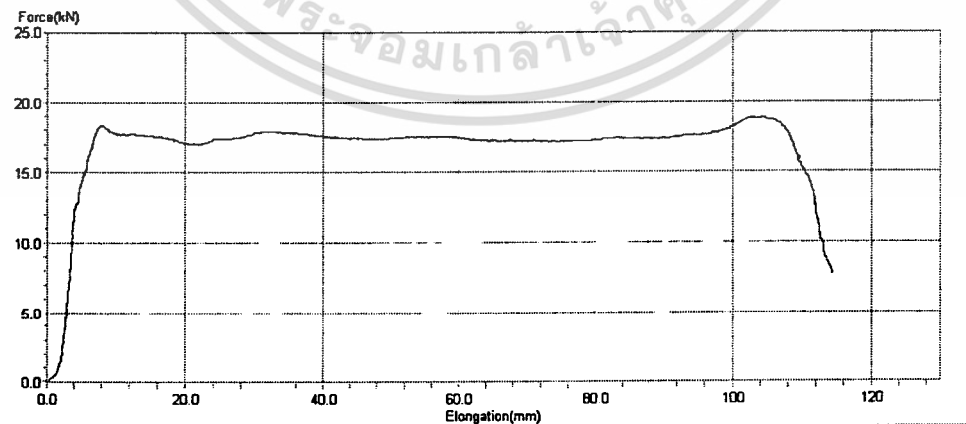
6.1.3 ความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึง ขนาดของมุมคายนัด 15 องศา ขนาดของการลดพื้นที่หน้าตัด 15 % เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 1

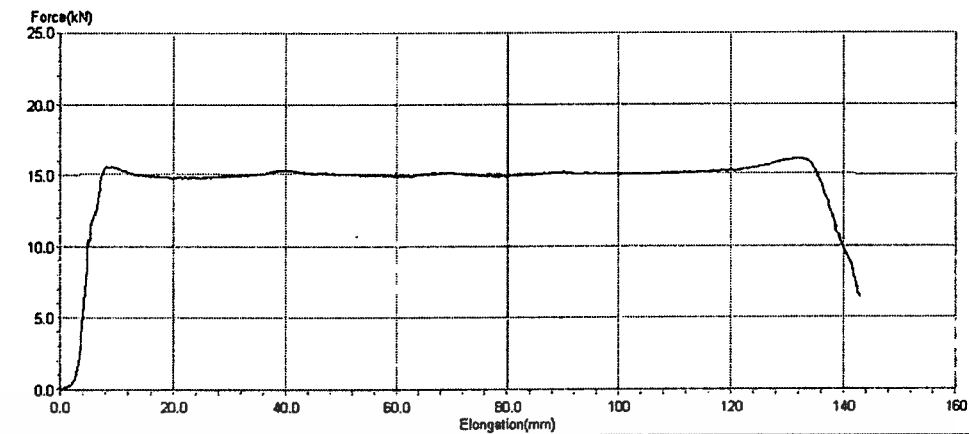


รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 2

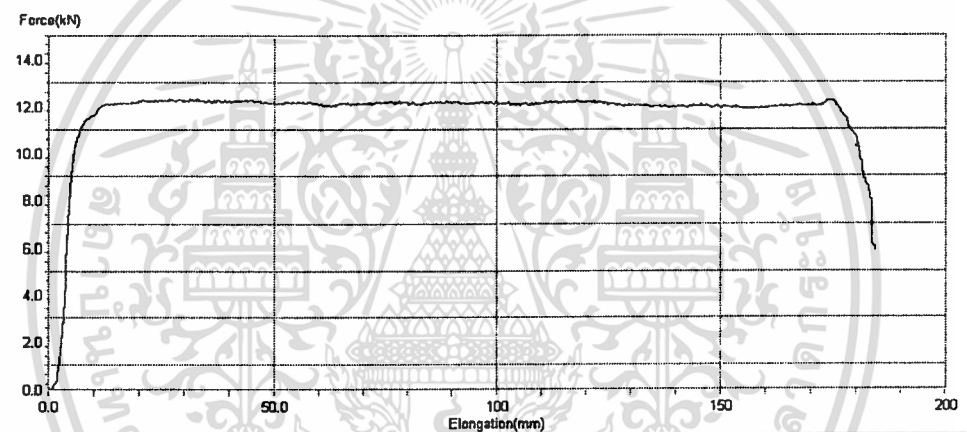


รูปที่ 6.19 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 3

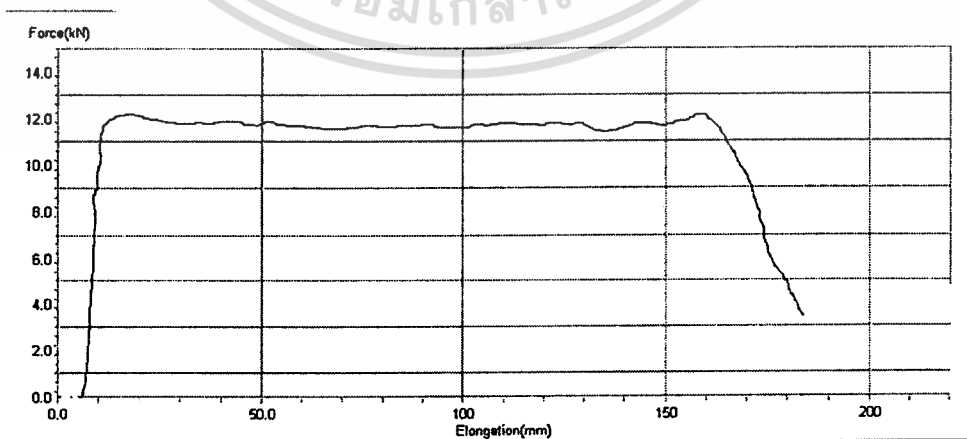
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 4

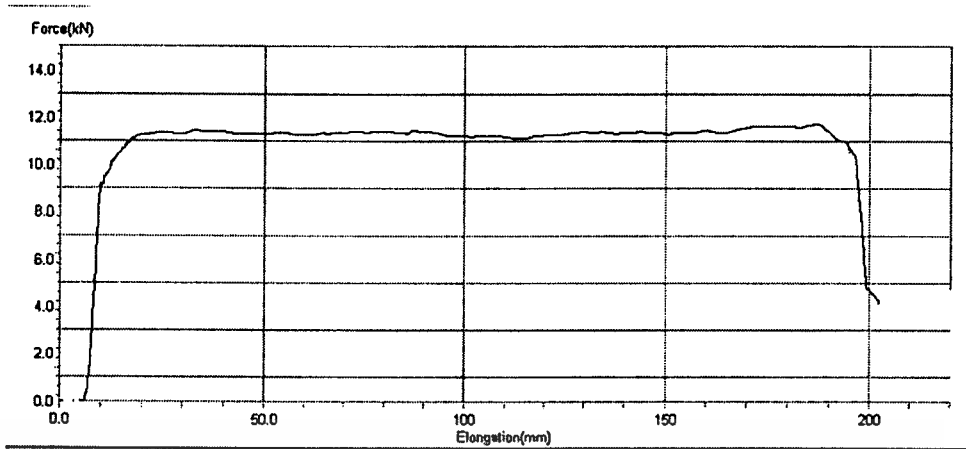


รูปที่ 6.21 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 5

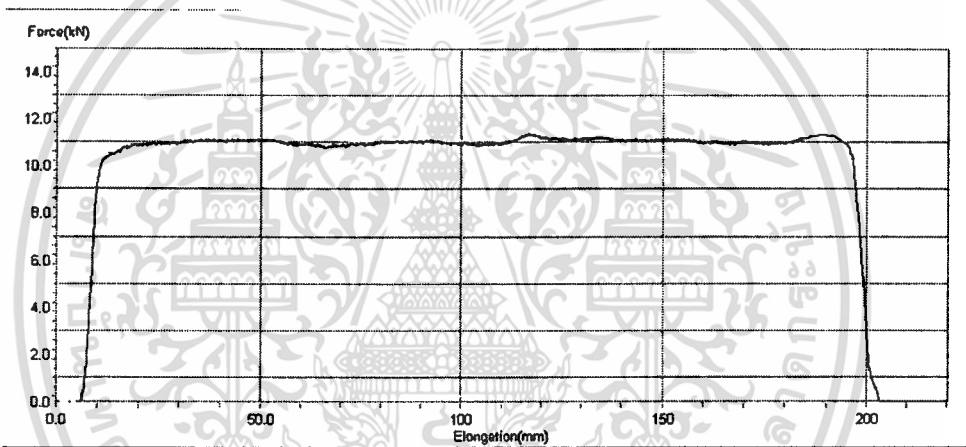


รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 6

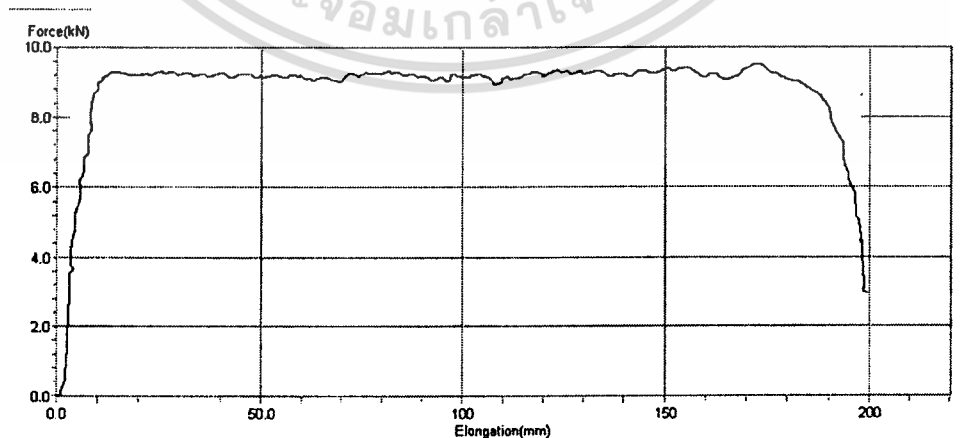
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 7

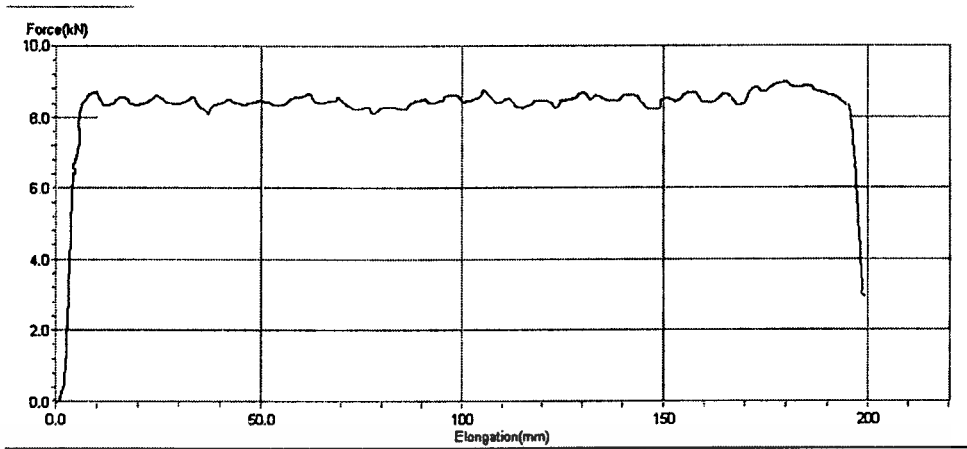


รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 8

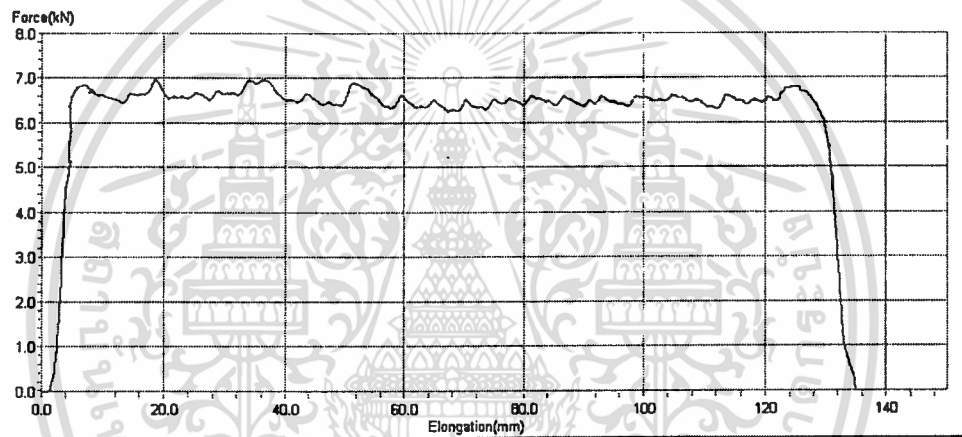


รูปที่ 6.25 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 9

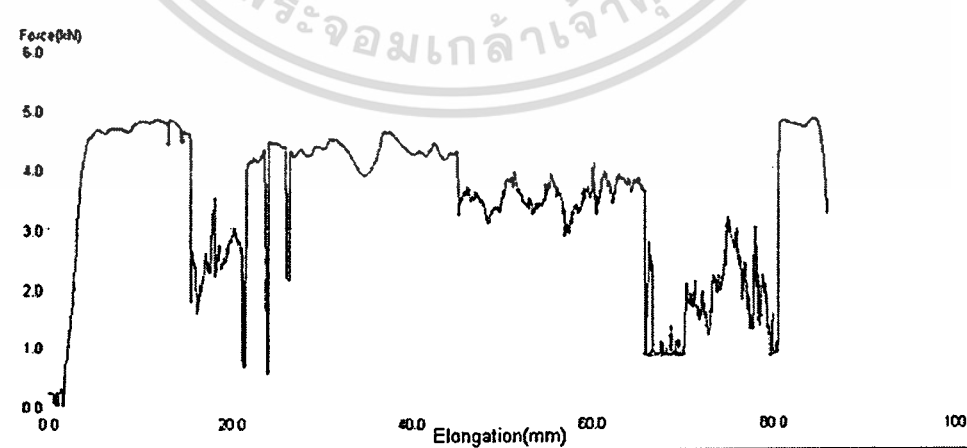
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.26 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 10



รูปที่ 6.27 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 11



รูปที่ 6.28 แสดงความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 12

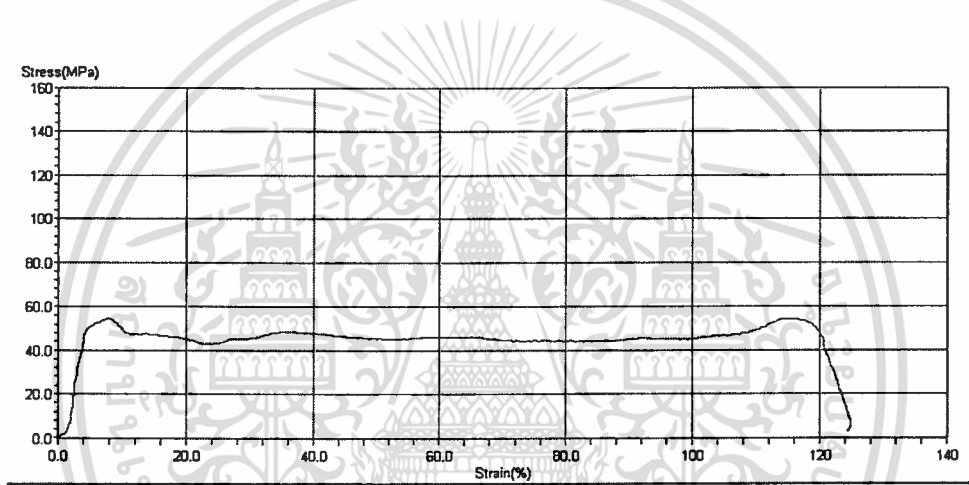
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์ของการดึงเส้นลวดผ่านคานาจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร ขนาดของครึ่งมุมคานา ( $\alpha$ ) 15 องศา การดึงเส้นลวดผ่านคานาลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงแต่ละครั้ง (R/P) 15% ความเร็วที่ใช้ในการทดลอง 30 มิลลิเมตรต่อนาที จากรูปที่ 6.17 และรูปที่ 6.18 แรงที่ได้ในการดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 1 และตัวที่ 2 เพิ่มขึ้นจาก 13.8 kN เป็น 17.1 kN จะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดเพิ่มขึ้น 28.26% จากรูปที่ 6.18 และรูปที่ 6.19 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านคานาลดลงจาก 17.7 kN เป็น 13.6 kN จะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 2 และ 3 มีค่าลดลง 23.16% จากรูปที่ 6.19 และรูปที่ 6.20 เป็นผลของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 3 และตัวที่ 4 แรงที่ใช้ในการดึง 13.6 kN และ 13.3 kN จะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการดึงลดลง 2.25 % จากรูปที่ 6.20 และรูปที่ 6.21 เป็นผลของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 4 และตัวที่ 5 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวด 13.3 kN และ 12.77 kN ตามลำดับ จะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลง 3.98 % จากรูปที่ 6.21 และรูปที่ 6.22 เป็นผลของแรงที่ใช้ดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 5 และตัวที่ 6 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวด 12.77 kN และ 11.8 kN จะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลง 7.59 % จากรูปที่ 6.22 และรูปที่ 6.23 เป็นผลของแรงที่ใช้ดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 6 และ ตัวที่ 7 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลงจาก 11.8 kN เป็น 11.12 kN จะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลงจากคานาดำตัวที่ 6 และคานาดำตัวที่ 7 ประมาณ 5.76% จากรูปที่ 6.23 และรูปที่ 6.24 เป็นผลของการดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 7 และตัวที่ 8 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลงจาก 11.12 kN เป็น 11.11 kN จะเห็นว่าความแตกต่างของแรงดึงเส้นลวดแตกต่างกันน้อยมาก 0.89% จากรูปที่ 6.24 และรูปที่ 6.25 เป็นผลของแรงที่เกิดจากการดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 8 และตัวที่ 9 แรงที่ใช้ในการดึงลดลงจาก 11.11 kN เป็น 9.5 kN จะเห็นว่าแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลง 14.49% จากรูปที่ 6.25 และรูปที่ 6.26 เป็นผลของแรงที่เกิดจากการดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 9 และตัวที่ 10 แรงที่ใช้ดึงเส้นลวดลดลงประมาณ 11.58% จากรูปที่ 6.26 และรูปที่ 6.27 เป็นผลของการแรงที่ใช้ดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 10 และตัวที่ 11 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลงจาก 8.4 kN เป็น 7.3 kN แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลง 13.09% จากรูปที่ 6.27 และรูปที่ 6.28 ผลของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านคานาดำตัวที่ 11 และคานาดำตัวที่ 12 แรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดลดลงจาก 7.3 kN เป็น 6.00 kN แรงที่ใช้ในการดึงลดลง 17.8%

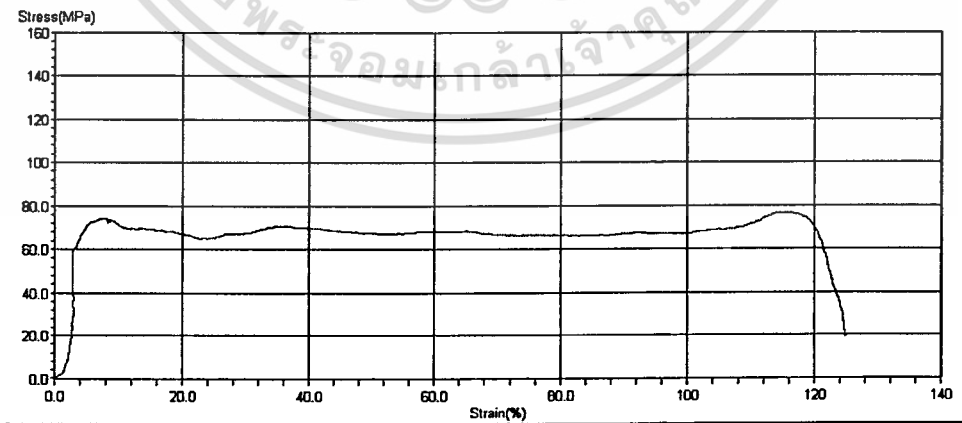
ตารางที่ 6.3 แสดงผลของแรงที่ใช้ในการดึงเส้นลวดผ่านด้าย  $\alpha = 15$  องศา, R/P = 20 %,  $D_o = 20$  mm

ด้ายตัวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
แรง (kN)	13.8	17.7	13.6	13.3	12.8	11.8	11.1	11	9.5	8.4	7.3	6.0
% แรงที่เปลี่ยนไป	28.26%		2.2%		7.59%		0.89%		11.58%		17.8%	
		23.16%		3.98%		5.76%		14.49%		13.09%		

6.1.4 ความสัมพันธ์ของแรงที่ใช้ในการดึง ขนาดของเครื่องมุดด้าย 15 องศา ขนาดของการลดพื้นที่หน้าตัด 15 % เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร

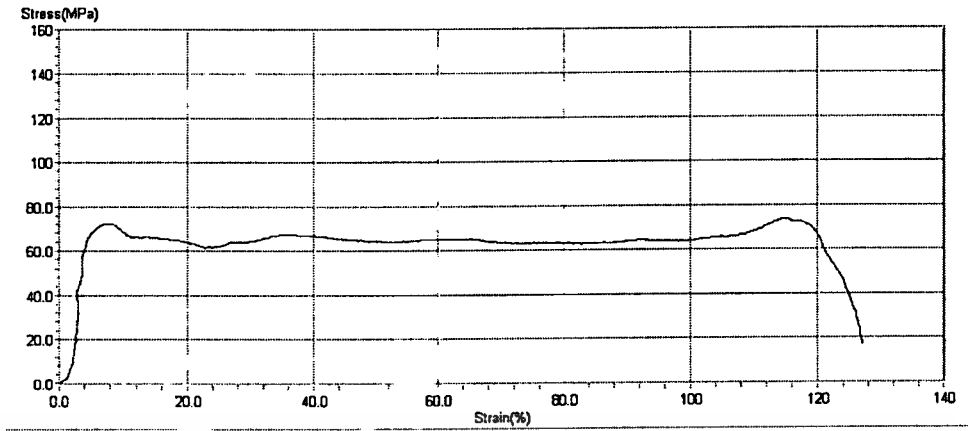


รูปที่ 6.29 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านด้ายตัวที่ 1

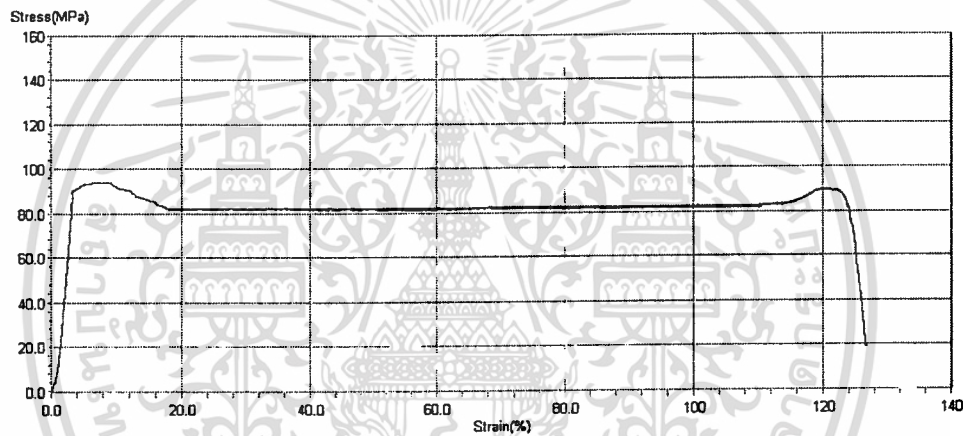


รูปที่ 6.30 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านด้ายตัวที่ 2

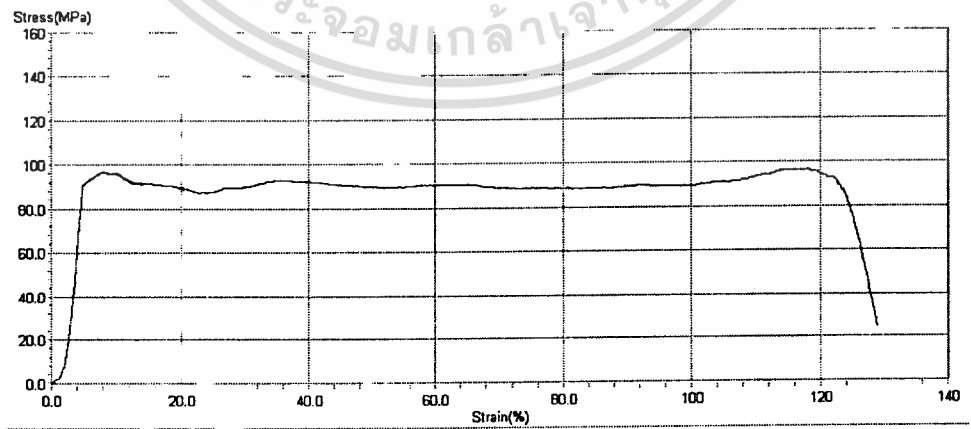
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.31 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 3

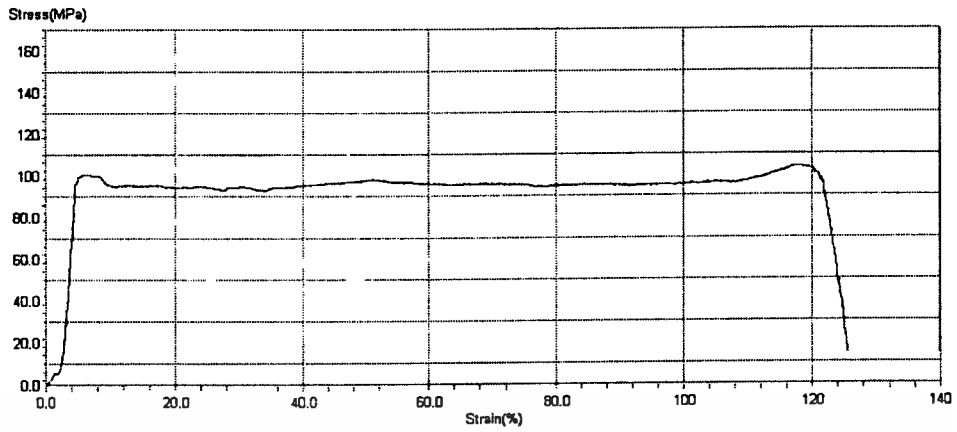


รูปที่ 6.32 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 4

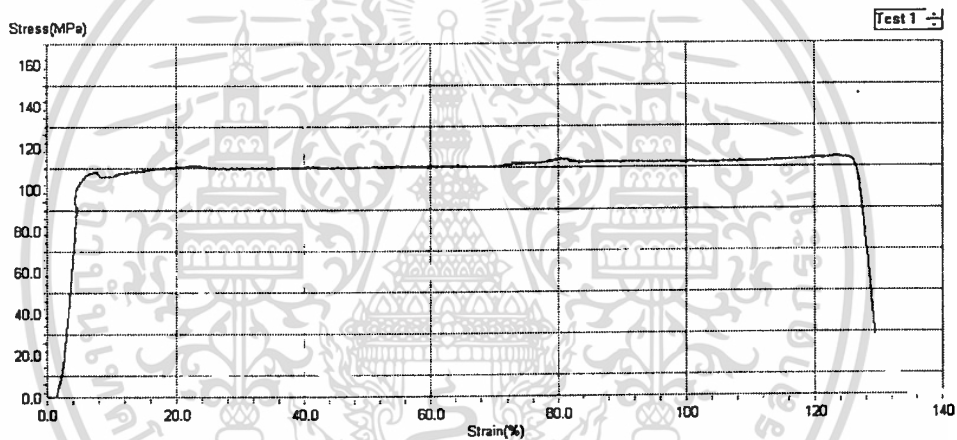


รูปที่ 6.33 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 5

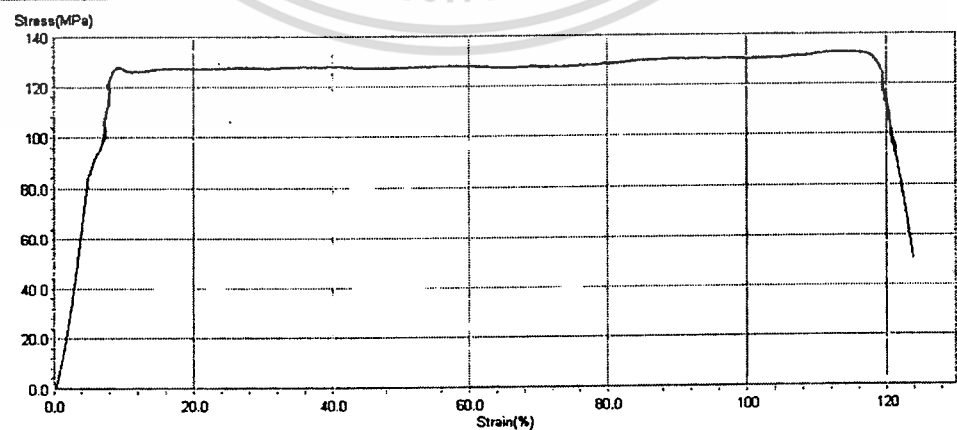
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.34 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 6

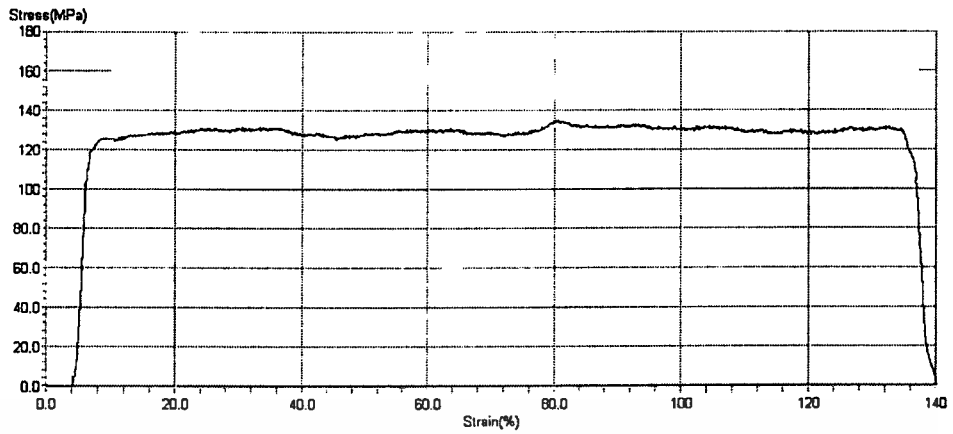


รูปที่ 6.35 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 7

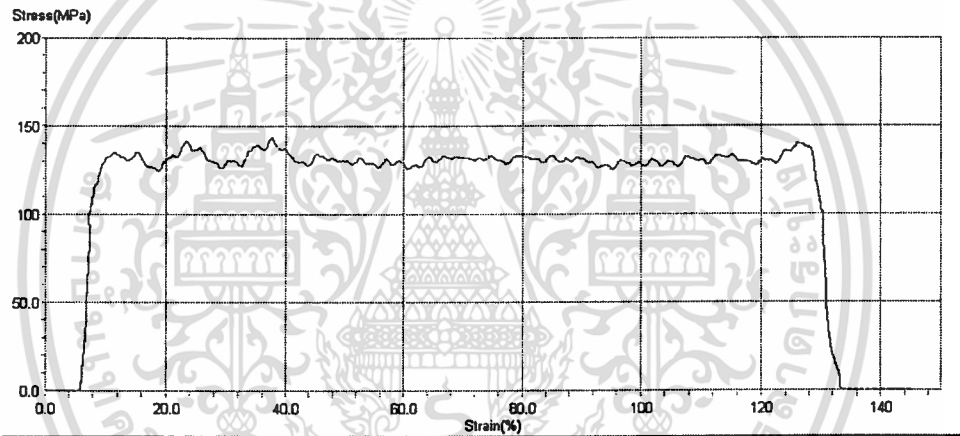


รูปที่ 6.36 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานตัวที่ 8

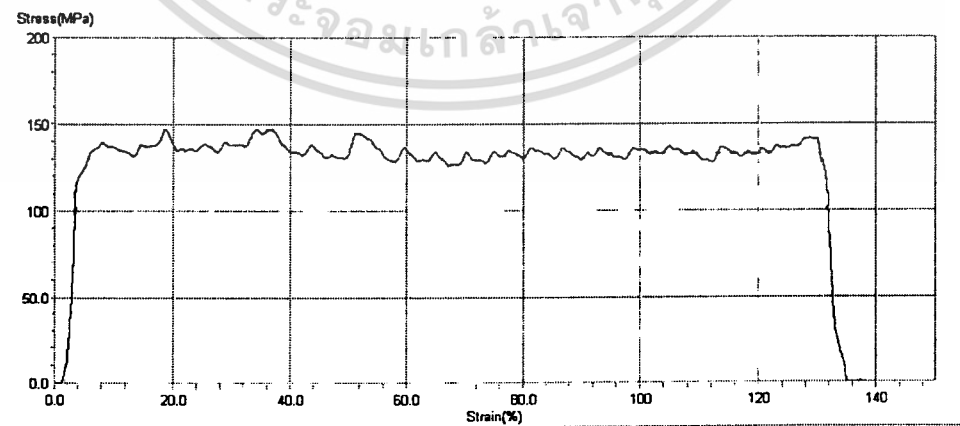
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 9

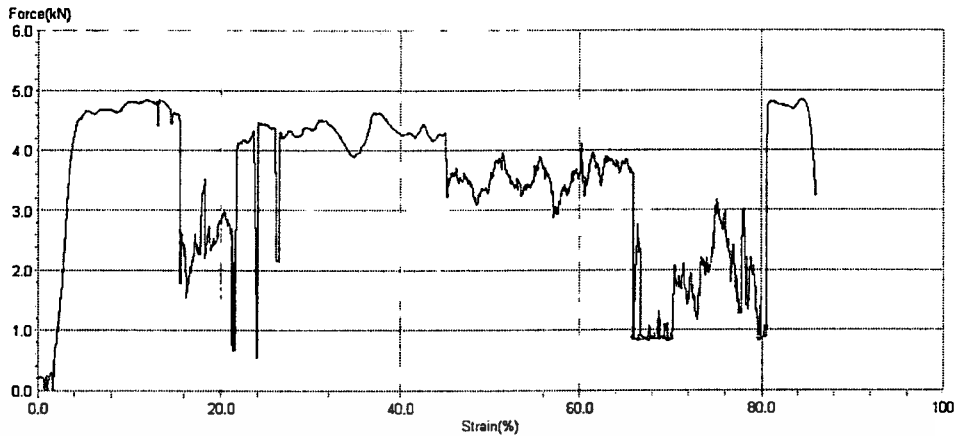


รูปที่ 6.38 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 10



รูปที่ 6.39 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.40 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนั้ 12

ผลลัพธ์ของการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนั้จากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร ขนาดของครึ่งมุมคายนั้ ( $\alpha$ ) 15 องศา ลักษณะของพื้นที่หน้าตัดลงต่อการดึงผ่านคายนั้แต่ละครั้ง (R/P) 15% ความเร็วที่ใช้ในการทดลอง 30 มิลลิเมตรต่อนาที จากรูปที่ 6.29 และรูปที่ 6.30 ดึงเส้นลวดผ่านคายนั้ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ความเค้นของการดึงขึ้นรูป 51.67 MPa และ 77.98 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความเค้นดึงขึ้นรูปจากคายนั้ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 เท่ากับ 50.92% จากรูปที่ 6.30 และ 6.31 ผลของความเค้นดึงขึ้นรูปจากคายนั้ตัวที่ 2 และคายนั้ตัวที่ 3 ความเค้นดึงขึ้นรูปจาก 77.98 MPa เป็น 70.50 MPa ความเค้นดึงรูปลดลงระหว่างคายนั้ตัวที่ 2 และคายนั้ตัวที่ 3 ประมาณ 9.59% จากรูปที่ 6.31 และรูปที่ 6.32 เป็นผลของความเค้นดึงขึ้นรูปจากคายนั้ตัวที่ 3 และตัวที่ 4 ซึ่งมีค่าความเค้นเท่ากับ 70.50 MPa และ 81.10 MPa ตามลำดับ ความเค้นเพิ่มขึ้น 15.04% จากรูปที่ 6.32 และรูปที่ 6.33 ผลของความเค้นดึงขึ้นรูปเมื่อผ่านคายนั้ตัวที่ 4 และตัวที่ 5 ความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 81.10 MPa เป็น 91.11 MPa ตามลำดับ ความเค้นเพิ่มขึ้น 12.34 % รูปที่ 6.33 และรูปที่ 6.34 ผลของความเค้นที่เกิดจากการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนั้ลดขนาดจากตัว 5 และตัวที่ 6 ความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 91.11 MPa เป็น 99.59 MPa ตามลำดับความเค้นของการดึงเพิ่มขึ้น 9.31 % จากรูปที่ 6.34 และรูปที่ 6.35 ผลของความเค้นที่เกิดจากการดึงเส้นลวดผ่านคายนั้ตัวที่ 6 และตัวที่ 7 มีความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 99.59 MPa เป็น 111.21 MPa สูงขึ้นจากเดิม 11.67 % จากรูปที่ 6.35 และรูปที่ 6.36 ผลของความเค้นดึงขึ้นรูปของเส้นลวดจากคายนั้ตัวที่ 7 และคายนั้ตัวที่ 8 ความเค้นดึงเพิ่มขึ้นจาก 111.21 MPa เป็น 129.67 MPa ความเค้นเพิ่มขึ้น 16.59% จากรูปที่ 6.36 และรูปที่ 6.37 ผลของความเค้นดึงขึ้นรูปจากคายนั้ตัวที่ 8 และคายนั้ตัวที่ 9 ความเค้นเพิ่มขึ้นจาก 129.67 MPa เป็น 130.56 MPa ความเค้นเพิ่มขึ้นถึง 0.69% ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นน้อยมาก จากรูปที่ 6.37 และรูปที่ 6.38 ผลของความเค้นดึงขึ้นรูปจากคายนั้ตัวที่ 9 และคายนั้ตัวที่ 10 จาก 130.56 MPa เป็น 135.83 MPa ความเค้นเพิ่มขึ้น 4.03% รูปที่ 6.38 และรูปที่ 6.39 เป็นผลของความเค้นที่ดึงเส้นลวดผ่านคายนั้ตัวที่ 10 และ 11 ความเค้นดึงเพิ่มขึ้นจาก

135.83 MPa เป็น 138.86 MPa ความเค้นดึงเพิ่มขึ้น 2.23% จากรูปที่ 6.39 และรูปที่ 6.40 ผลของความเค้นดึงขึ้นรูปลดลงจาก 138.86 MPa เป็น 134.28 MPa ความเค้นลดลง 3.29%

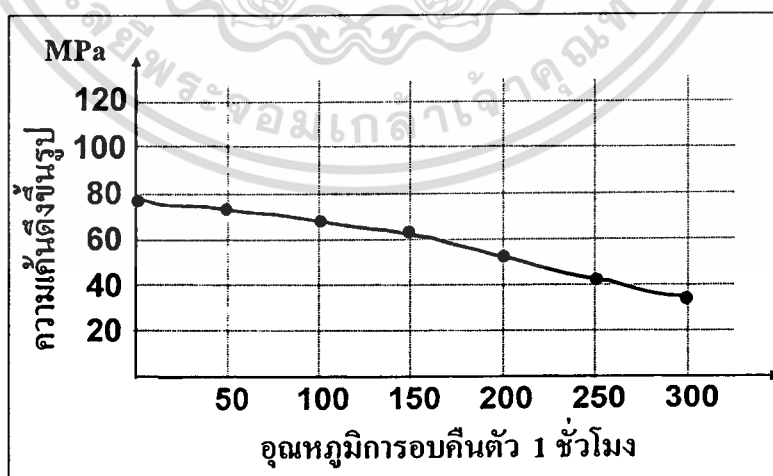
ตารางที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบความเค้นดึงขึ้นรูปตั้งแต่คายตัวที่ 1 ถึงคายตัวที่ 12

คายตัวที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ความเค้น (MPa)	52	77	70	80.1	91	100	111	129	130	135	138	134
% แสดงการเปลี่ยนแปลง	50.92		15.04		9.31		16.59		4.03		3.29	
ความเค้น		9.59		12.34		11.67		0.69		2.23		

จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเส้นลวด โดยที่ข้อบกพร่องภายในของเส้นลวดเราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในกรณีที่ขนาดครึ่งมุดคาย 15 องศา รอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดจะเกิดขึ้นเมื่อกระบวนการดึงขึ้นรูปผ่านคายตัวที่ 9 ในกรณีของครึ่งมุดคายเท่ากับ 22.5 องศาจะเกิดรอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดเมื่อผ่านคายตัวที่ 6

## 6.2 ผลของการอบเส้นลวดทองแดงเพื่อคลายความเค้น

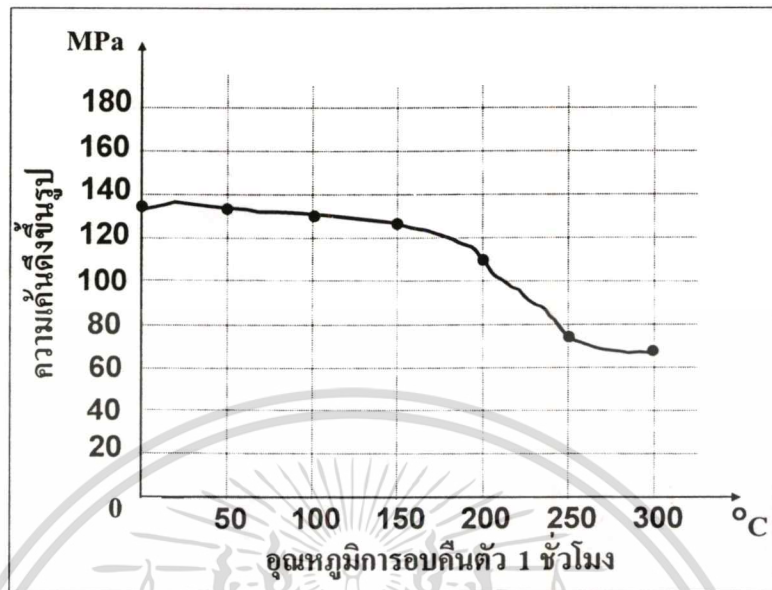
### 6.2.1 กรณีครึ่งมุดคาย 15 องศา R/P 15% Do เท่ากับ 20 mm.



รูปที่ 6.41 แสดงความเค้นดึงขึ้นรูปกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกรณีครึ่งมุดคาย 15 องศา R/P 15% Do เท่ากับ 20 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

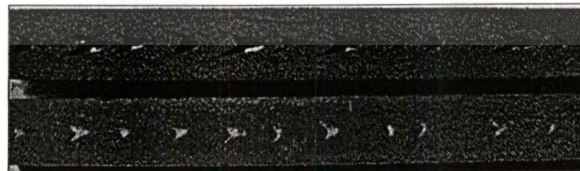
### 6.2 กรณีครึ่งมุมคาย 22.5 องศา R/P 25% Do เท่ากับ 20 mm.



รูปที่ 6.42 แสดงความเค้นดึงขึ้นรูปกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกรณีครึ่งมุมคาย 22.5 องศา R/P 25% Do เท่ากับ 20 mm.

### 6.3 รอยปริแตก และการขยายตัวของรอยปริแตก

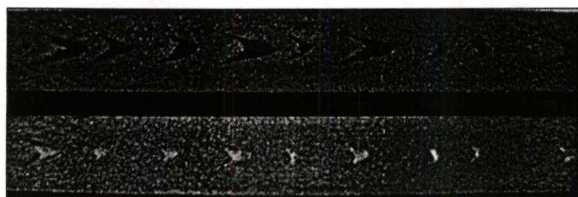
กรณีใช้ค้ายซึ่งมีมุมครึ่งคาย 15 องศา พบว่าเกิดรอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดเมื่อตั้งขึ้นรูปลวดทองแดงถึงเทียวกี่ 10 และเมื่อผ่าเส้นลวดทองแดงออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง พบรอยปริแตกรูปบั้งนายสิบปรากฏที่แกนกลางของเส้นลวด ส่วนของปลายแหลมที่อยู่ตรงแกนกลางลวดทองแดงของรอยปริแตกรูปบั้งนายสิบจะชี้ไปในทิศทางที่ออกแรงดึงลวด เมื่อผ่านการดึงถึงเทียวกี่ 11 พบว่ามีรอยปริแตกเกิดขึ้นเป็นระยะๆ เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.43



รูปที่ 6.43 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง ที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เทียว (ครึ่ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา

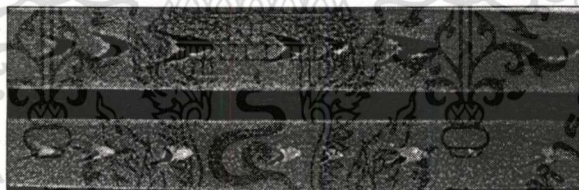
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผ่านการดิ่งถึงเที่ยวที่ 12 แล้วผ่าเส้นลวดทองแดงออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง พบว่ารอยปริแตกได้ขยายโตขึ้น แต่จำนวนรอยปริแตกคงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 6.44



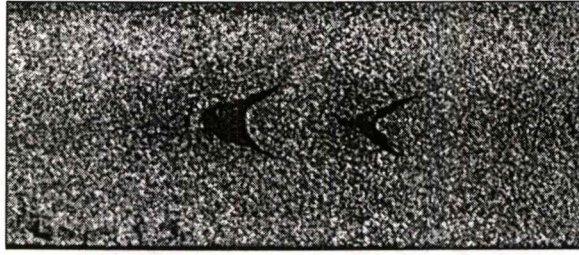
รูปที่ 6.44 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง ที่ผ่านการดิ่งขึ้นรูปมาแล้ว 12 เที่ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา

สำหรับกรณีที่ใช้คายซึ่งมีมุมครึ่งคาย 22.5 องศา พบว่าเกิดรอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดเมื่อดิ่งขึ้นรูปลวดทองแดงถึงเที่ยวที่ 6 และเมื่อผ่าเส้นลวดทองแดงออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง พบรอยปริแตกรูปบั้งนายสิบปรากฏที่แกนกลางของเส้นลวดทองแดง ในทำนองเดียวกันกับกรณีใช้คายที่มีมุมครึ่งคาย 15 องศา รอยปริแตกได้ขยายใหญ่ขึ้นในเที่ยวที่ 8 ดังแสดงในรูปที่ 6.45



รูปที่ 6.45 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง ที่ผ่านการดิ่งขึ้นรูปมาแล้ว 8 เที่ยว (ครั้ง) มุมครึ่งคาย 22.5 องศา

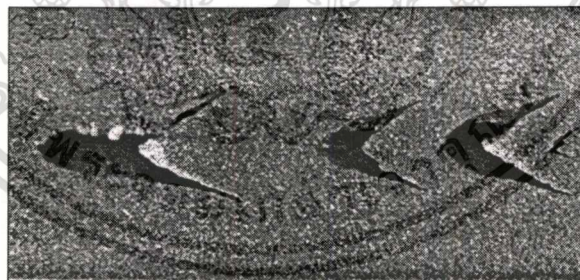
รูปที่ 6.46, 6.47 และ 6.48 เป็นภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดิ่งขึ้นรูปมาแล้ว 10, 11 และ 12 เที่ยว (ครั้ง) ตามลำดับ มุมครึ่งคาย 15 องศา



รูปที่ 6.46 แสดงภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 10 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งดای 15 องศา



รูปที่ 6.47 แสดงภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งดای 15 องศา



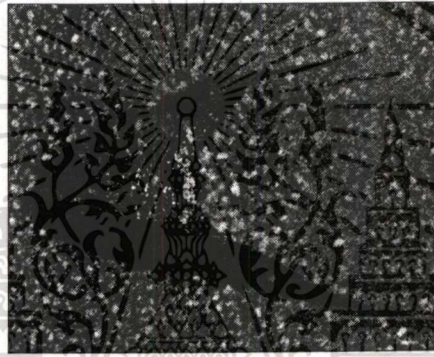
รูปที่ 6.48 แสดงภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 12 เที้ยว (ครั้ง) มุมครึ่งดای 15 องศา

รูปที่ 6.49 และ 6.50 เป็นภาพขยาย 20 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 และ 12 เที้ยว (ครั้ง) ตามลำดับกรณีดังกล่าวนี้ใช้มุมครึ่งดای 15 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 6.49** แสดงภาพขยาย 20 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เท่า (ครั้ง) มุมครึ่งด้าย 15 องศา



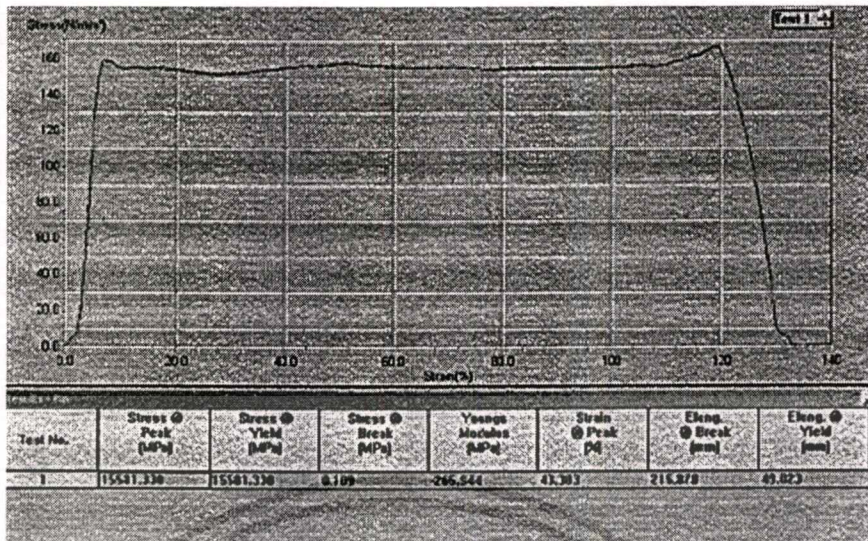
**รูปที่ 6.50** แสดงภาพขยาย 20 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 12 เท่า (ครั้ง) มุมครึ่งด้าย 15 องศา

#### 6.4 ผลของมุมด้าย และจำนวนเที่ยวของการดึงขึ้นรูป

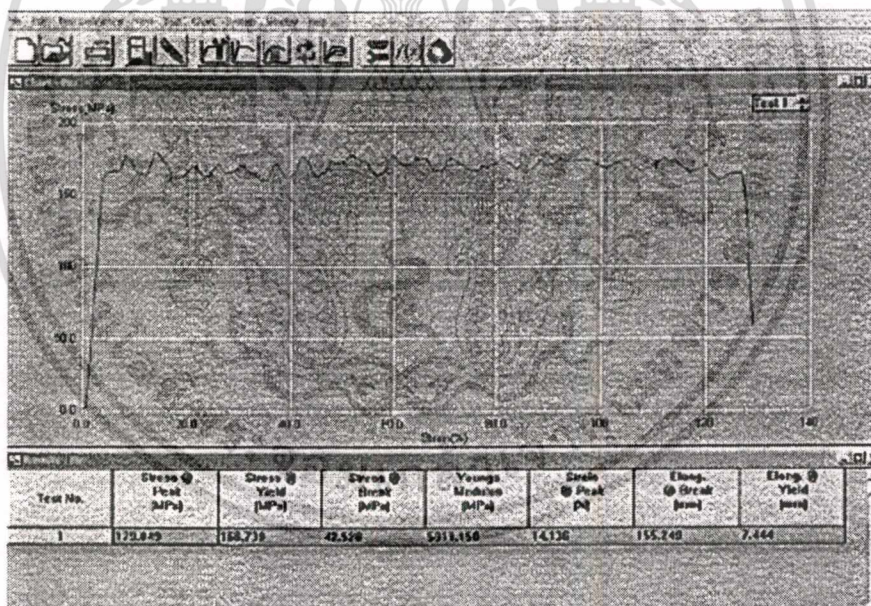
จากผลการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า รอยปริแตกเกิดง่ายขึ้น เมื่อใช้ด้ายที่มีขนาดมุมด้ายโตขึ้น กรณีมุมด้าย 30 องศา การปริแตกเกิดขึ้นในการดึงเที่ยวที่ 10 และสำหรับมุมด้าย 45 องศา การปริแตกเกิดขึ้นในการดึงเที่ยวที่ 6

ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ระหว่างทดลองดึงขึ้นรูปลวดทองแดงกรณีไม่มีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวดนั้น เส้นกราฟที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงความคงที่ของความเค้นดึงขึ้นรูป (Drawing Stress) ได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 6.51 ซึ่งจะแตกต่างจากกรณีมีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้น ลวด เส้นกราฟที่ได้จากการทดลองจะปรากฏความผันแปรของค่าความเค้นดึงขึ้นรูป (Drawing Stress) ได้อย่างชัดเจนเช่นกัน ตำแหน่งที่ค่าความเค้นดึงขึ้นรูป (Drawing Stress) ลดต่ำลงคือตำแหน่งที่เกิดรอยปริแตกขึ้นในแกนกลางเส้นลวด ดังแสดงในรูปที่ 6.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ระหว่างทดลองดึงชิ้นรูปหลอดทองแดง กรณีไม่มีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด

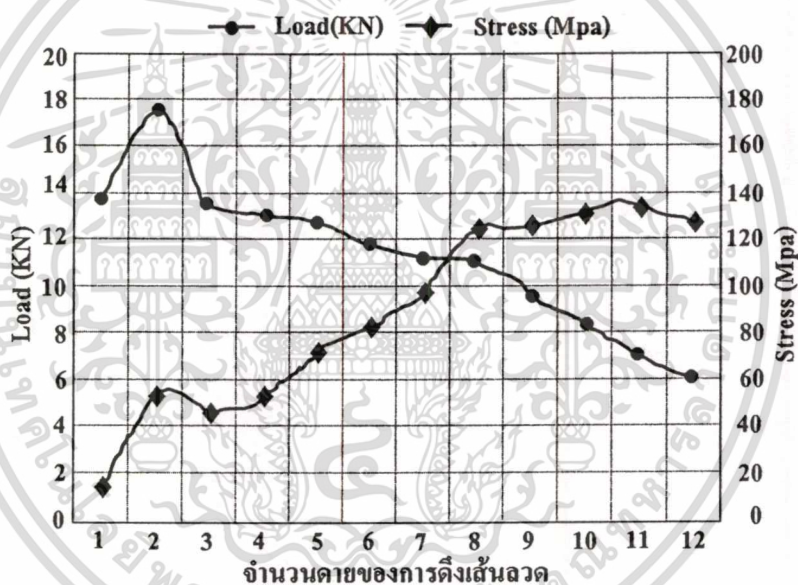


รูปที่ 6.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ระหว่างทดลองดึงชิ้นรูปหลอดทองแดง กรณีมีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด

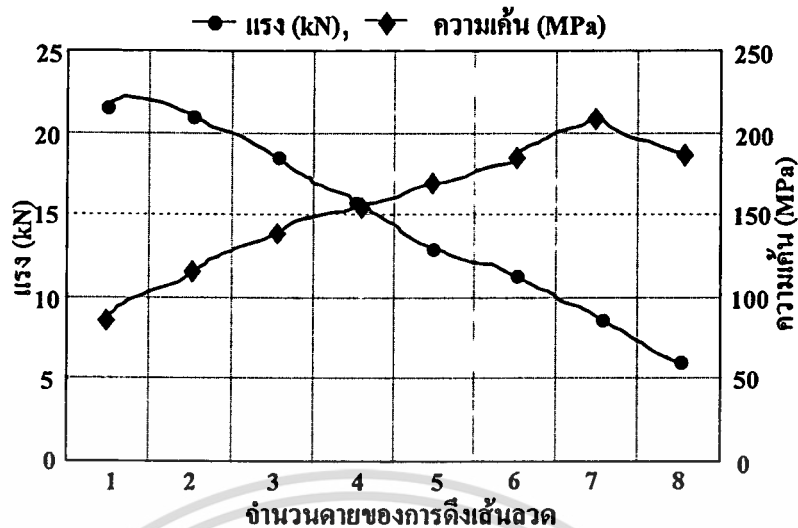
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.5 แรง และความเค้นดึงขึ้นรูป

แรงดึงขึ้นรูปลวดจะแปรผกผันกับจำนวนเที้ยว (ครั้ง) ของการดึงขึ้นรูปทั้งสองขนาดของค่ามุมด้าย คือ 30 องศา และ 45 องศา (ครึ่งมุมด้ายเท่ากับ 15 องศา และ 22.5 องศา) ในขณะที่เพิ่มจำนวนเที้ยวของการดึงขึ้นรูปขึ้นไปเรื่อยๆนั้น แรงดึงขึ้นรูปจะลดลงเป็นลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากในขณะที่ดึงลวดผ่านด้ายแต่ละเทียวนั้น พื้นที่หน้าตัดของลวดจะลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 25% และ 15 % ตามลำดับ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนี้จะตรงกันข้ามกับพฤติกรรมของความเค้นดึงขึ้นรูป คือ ความเค้นดึงขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนเที้ยวของการดึงขึ้นรูป ด้วยเหตุผลอันเดียวกัน และจะมีค่าสูงสุดในเที้ยวของการดึงขึ้นรูปหลังเกิดรอยปริแตกแล้ว 1 เที้ยว ดังแสดงในรูปที่ 6.53 และ 6.54



รูปที่ 6.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดึงขึ้นรูปลวด และความเค้นดึงขึ้นรูปลวด กับ จำนวนด้ายที่ใช้ดึงเส้นลวด (จำนวนเที้ยวที่ดึงลวด) สำหรับมุมครึ่งด้าย 15 องศา ดึงลดพื้นที่หน้าตัดลง 15 %



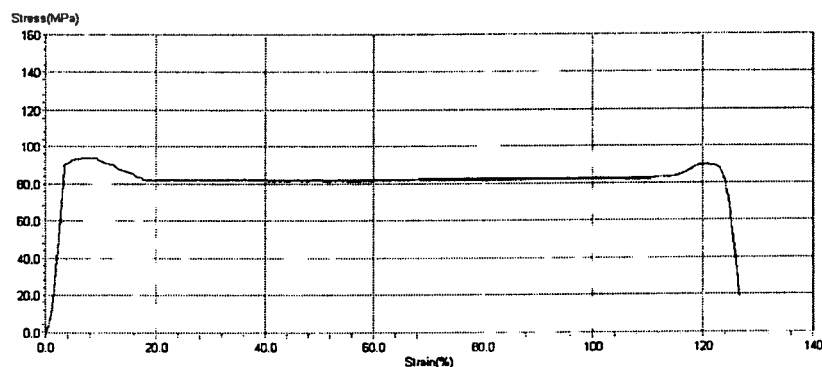
รูปที่ 6.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดิ่งขึ้นรูปลวด และ ความเค้นดิ่งขึ้นรูปลวด กับ จำนวนรอบที่ใช้ดิ่งเส้นลวด (จำนวนเที่ยวที่ดิ่งลวด) สำหรับมุมครึ่งดัด 22.5 องศา ดิ่งลดพื้นที่หน้าตัดลง 25 %

ทั้งแรงดิ่งขึ้นรูปลวด และ ความเค้นดิ่งขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ดัดที่มีค่ามุมดัด และ เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น

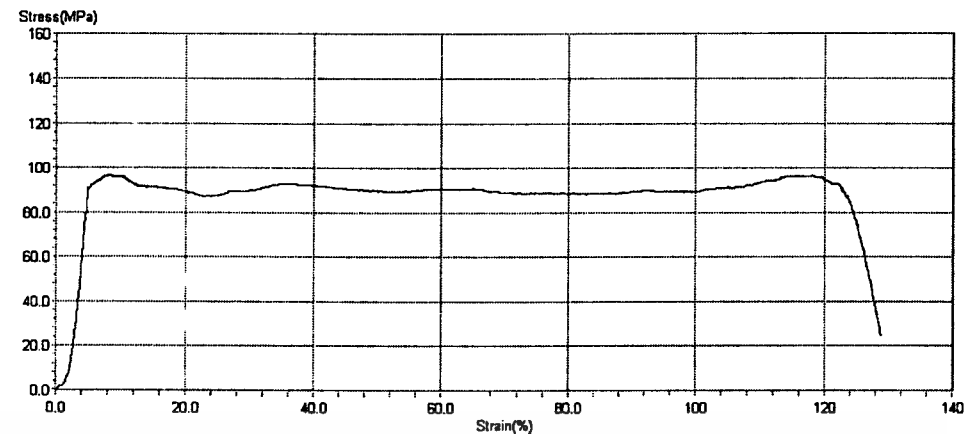
## 6.6 การวิเคราะห์ความเค้นดิ่งขึ้นรูปจากผลการทดลอง

จากการผลทดลองการดิ่งเส้นลวดผ่านดัดหลายๆครั้ง และลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 20% และขนาดของครึ่งมุมดัด 15 องศา แยกพิจารณาผลการทดลองได้ 2 กรณี คือ

### 6.6.1 การดิ่งเส้นลวดทองแดงผ่านดัดตามปกติ



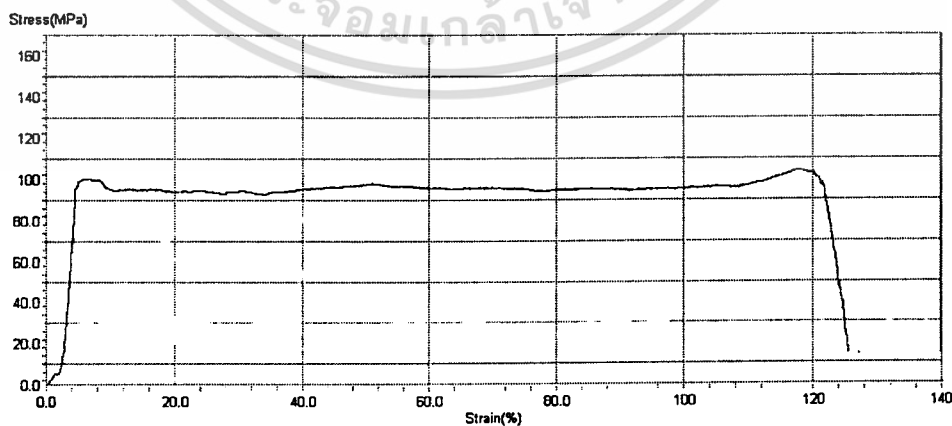
รูปที่ 6.55 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดิ่งเส้นลวดทองแดงผ่านดัดตัวที่ 4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงข้อมูลเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.56 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 5

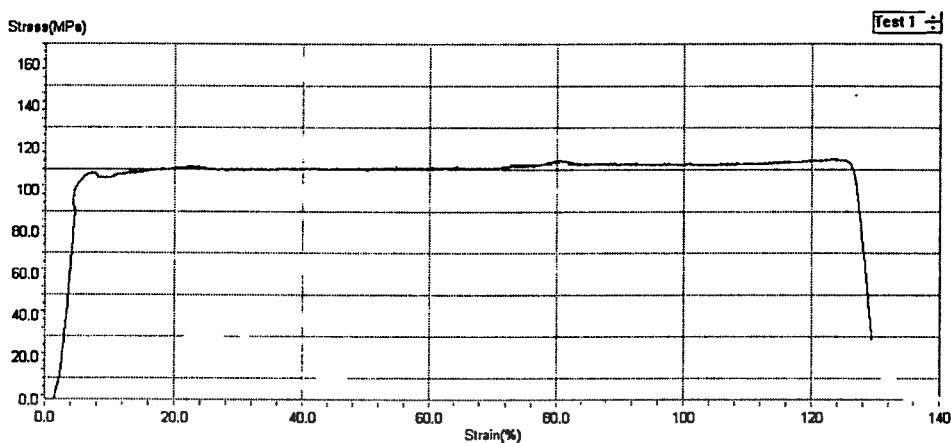
จากผลการทดลองรูปที่ 6.55 และรูปที่ 6.56 กราฟผลการทดลองการดึงเส้นลวดผ่านคายนตัวที่ 4 และคายนตัวที่ 5 เส้นกราฟช่วงสุดท้ายจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ความเค้นดึงขึ้นรูปของผลการทดลองคายนตัวที่ 5 ช่วงปลายเส้นกราฟความเค้นจะคงที่ นั่นแสดงว่าเป็นการดึงเส้นลวดผ่านคายนตัวที่ 4 และดึงผ่านคายนตัวที่ 5 ช่วงแรกของกราฟจากรูปทั้งสองความเค้นดึงขึ้นรูปสูงมาก สาเหตุเกิดจากผิวสัมผัสระหว่างคายนกับเส้นลวดเริ่มสัมผัสซึ่งกันและกัน เส้นลวดถูกแรงดึงผ่านคายน เนื้อโลหะในเส้นลวดถูกอัดตัวทำให้ความเค้นดึงขึ้นรูปในช่วงแรกสูงมาก จากนั้นความเค้นจะลดลง และความเค้นดึงจะคงที่ตลอดจนสิ้นสุดของกระบวนการดึงขึ้นรูป

#### 6.6.2 การดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนกรณีที่ตัดเส้นลวดเพื่อลดขนาดให้สั้นลง



รูปที่ 6.57 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายนตัวที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.58 แสดงความสัมพันธ์ความเค้นที่ใช้ในการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคายตัวที่ 7

ในการทดลองการดึงเส้นลวดผ่านคายครั้งนี้มีข้อจำกัดจากเครื่องมือทดสอบ กล่าวคือ การดึงเส้นลวดผ่านคายตัวที่ 1 และผ่านคายตัวที่ 2 ตัวที่ 3 และตัวต่อไปนั้นความยาวของเส้นลวดเพิ่มมากขึ้น จนไม่สามารถทำการดึงเส้นลวดผ่านคายได้ เพราะระยะช่วงชักของเครื่องมือทดสอบมีจำกัด การแก้ปัญหาดังกล่าวใช้วิธีการตัดเส้นลวดชิ้นงานให้สั้นลง แล้วนำเส้นลวดไปดึงผ่านคายตัวต่อไปทำให้ความเค้นดึงขึ้นรูปช่วงปลายของเส้นลวดสูงขึ้น ตามรูปที่ 6.55 และรูปที่ 6.57 แต่ในกรณีที่มีการดึงเส้นลวดผ่านคายอย่างต่อเนื่องความเค้นดึงจะคงที่ตลอดความยาวของเส้นลวดดังรูปที่ 6.58

## บทที่ 7

# สรุปและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในแกนกลางของเส้นลวดทองแดง ขณะที่ทำการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านคานหลาย ๆ ครั้ง ลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลงในแต่ละครั้ง ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดึงขึ้นรูป ในการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของครึ่งมุมคาน และเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดแตกต่างกัน คือขนาดของครึ่งมุมคาน 15 องศา ลดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลง 20 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของครึ่งมุมคาน 22.5 องศา ลดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลง 25 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วที่ใช้ในการดึงเส้นลวดครั้งที่ 30 มิลลิเมตรต่ออนาที ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

### 7.1 บทสรุป

1. จากการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเส้นลวดเกิดข้อบกพร่องขึ้นได้ในขณะทำการดึงขึ้นรูปหลายๆ เทียบติดต่อกัน ซึ่งมีผลมาจากความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวดเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นลวดถูกดึงผ่านคานหลายๆ เทียบ (ครั้ง)
2. การใช้คานที่มีขนาดของมุมคานที่ต่ำจะช่วยให้ความเค้นดึงขึ้นรูปในเส้นลวดต่ำไปด้วย และเกิดรอยปริแตกช้ากว่าขนาดของมุมคานที่โตกว่า
3. การใช้คานที่มีขนาดของมุมคานที่โตจะทำให้เกิดรอยปริแตกในแกนกลางของลวดเร็วขึ้น และความเค้นดึงขึ้นรูปลวดในเส้นลวดสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ลวดเกิดการขาดในขณะดึงขึ้นรูปในกระบวนการผลิตได้ง่าย ทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงักลง และต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น
4. การลดพื้นที่หน้าตัดที่ต่ำมีผลให้ความเค้นในเส้นลวดต่ำ การลดพื้นที่หน้าตัดสูงมีผลทำให้ความเค้นในเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้น และเกิดรอยปริแตกในแกนกลางได้ง่ายขึ้น
5. การลดพฤติกรรมการเกิดข้อบกพร่องในลักษณะดังกล่าวจำเป็นจะต้องทำการศึกษาถึงผลกระทบของขนาดมุมคาน การลดพื้นที่หน้าตัด ความเร็วขณะดึงเส้นลวดผ่านคาน การอบคลายความเค้น และการใช้สารหล่อลื่นในขณะดึงขึ้นรูปลวดอย่างละเอียดถี่ถ้วน
6. ความเค้นของการดึงเส้นลวดผ่านคานลดลง ในกรณีการอบเส้นลวดในเตาอบที่มีอุณหภูมิต่างกัน สำหรับในกรณีการศึกษาวิจัยครั้งนี้พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาวิจัยและศึกษาเพิ่มเติมกรณีอุณหภูมิต่อการอบคืนตัวอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น กรณีการอบคืนที่อุณหภูมิต่างกัน เช่น อุณหภูมิ 350, 400, 450, 500 องศาเซลเซียส เป็นต้น
2. ควรทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับกรณีความเร็วที่ใช้ในการดึงเส้นลวด ในกรณีนี้ใช้ความเร็วในการดึงที่ 30 มิลลิเมตรต่อนาที ควรศึกษาเพิ่มเติมกรณีความเร็วในการดึงที่สูงขึ้น เช่น 60, 90, 120, 150, 180 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อศึกษาผลกระทบของความเค้น การเกิดรอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวด ซึ่งจะมีผลต่อการขาดของลวด
3. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเปรียบเทียบผลของความเค้นของการดึงขึ้นรูประหว่าง โลหะต่างชนิดกัน จะมีผลต่อความเค้นแตกต่างกันอย่างไร เช่น ศึกษากรณีของลวดทองแดงเปรียบเทียบกับลวดอลูมิเนียม
4. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมกรณีที่มีสิ่งเจือปนในเส้นลวดในตำแหน่งต่าง ๆ กัน ที่มีผลกระทบต่อการดึงเส้นลวดผ่านคายหลาย ๆ เที้ยว
5. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมกรณีที่มีมุมคายต่าง ๆ กัน ซึ่งจะมีผลต่อความเค้นในการดึงเส้นลวด ที่แตกต่างกันและพิจารณามุมคายที่แตกต่างกันมาก ๆ
6. ในกรณีของเครื่องมุดคาย 15 องศา และเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด 15% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเริ่มต้นที่ 20 มิลลิเมตร ดึงผ่านคายไม่เกินตัวที่ 9 เพราะว่าเมื่อผ่านคายตัวที่ 10 แล้ว รอยปริแตกจะเกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด มีผลเสียหายในกระบวนการผลิต
7. ในกรณีที่ดึงลวดทองแดงผ่านคายของมุดคาย 22.5 องศา เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด 25 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดทองแดงเริ่มต้น 20 mm. ควรดึงผ่านคายไม่เกินตัวที่ 5 จึงจะอยู่ในเกณฑ์ดี เพราะถ้าดึงผ่านคายตัวที่ 6 รอยปริแตกจะเกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด มีผลเสียหายต่อกระบวนการผลิต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พงษ์ศักดิ์ นิสภากุล. 2544. “การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ของการขาดในการดึงเส้นลวดที่มีสิ่งเจือปน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ธนิต แดงศรี. 2546. “การศึกษาผลกระทบของครึ่งมุมตาย ความเร็วและความดันของสารหล่อลื่นในการดึงลวดทองแดงโดยการทดลอง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] กริฑาพล สุทธิลาบุทพล. 2546. “การวิเคราะห์การดึงลวดวัตถุประกอบโดยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] คำรง ไชยธีรานูวัฒน์ศิริ. การขึ้นรูปโลหะ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2521
- [5] ชลิตต์ นรุตสมนตรี และคณะ. กระบวนการผลิต : สำนักพิมพ์ ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ. 2544
- [6] ทวี เทศเจริญ. 2535. การออกแบบเครื่องมือกล : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] สมชัย นรเศรษฐ โสภณ. 2535. กลศาสตร์ของแข็ง : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] S.Norasatopon 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.
- [9] Peter J. Lee, David C. LARBALSTIER. “Niobium-Titanium superconducting Wires: Nanostructures by Extrusion and Wire Drawing” *Wire Journal International*, vol.36, No. 2, 2003, pp. 61-66.
- [10] B.Avitzer. “Analysis of Central Bursting Defect in Extrusion and Wire Drawing” *Journal of Engineering for Industry*, 1968, pp 79-91.
- [11] F.F.Kraft,U.Chakkingal,G.Baker,R.N Wright. “The effect of die angle on texture and annealing response of EPT copper wire” *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, pp. 171-178.
- [12] B.Avitzer. “Limit Analysis of Flow Through Conical Converging Dies” [Online]  
<http://www.lehigt.edu/-ba04/metalforming.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Malberg, M. J. Bech, N. Bay, P. Skov-Hansen, Giuseppe Cualbu, 1998, **Influence of process parameters in drawing of superconducting wire**, [Online], Applied Superconductivity Conference, California USA.  
Available : <http://www.sensor.northgrum.com/es/stc/asc/pdf/mtb02.pdf>
- [14] J. Chakrabarty, **Theory of Plasticity**, McGraw-Hill International Editions, 1987
- [15] Edward M, Mielnik. **Metalworking Science and Engineering** : McGraw-Hill Inc. 1991
- [16] Kazunari Yoshida “3-Dimension finite element analysis of drawing of superconducting wire” **Advance in Materials and Processing Technology II** , 1998, pp. 934-941.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

http://www.me-nett.com

การประชุมวิชาการ  
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล  
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๑๗  
The 17<sup>th</sup> Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand



๑๕-๑๗ ตุลาคม ๒๕๔๖  
October 15-17, 2003

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
กรุงเทพฯ - ปราจีนบุรี  
KMITNB Bangkok - Prachinburi

บทคัดย่อ  
Abstract



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONVERSION OF SAGO PLANT TO SOLID (CHARCOAL,) PRODUCT BY PYROLYSIS .....	115
สมรรถนะของเครื่องขุดที่ใส่ท่อขนาดเป็นเชื้อเพลิง .....	116
การใช้ไขมันชีวภาพที่สกัดจากกากของเสียในเครื่องขุดสี่ล้อ .....	117
ระบบควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง ไคโรเจนด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องขุดสันดาปภายใน .....	118
<b>MM: Mechanics, Materials and Manufacturing</b>	
การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสมของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสำหรับรถจักรยาน .....	119
การทำนายการเสียหายแบบอ่อนเหนียวในการขึ้นรูปดัดแผ่นอลูมิเนียมรูปตัวอักษรที่เชื่อมขั้วสุญญากาศ .....	120
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามมิติสำหรับกระบวนการขึ้นรูปโลหะผงที่อุณหภูมิสูง .....	121
การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองของสถานะควิซีของพอลิเมอร์ .....	122
การสร้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ PET ด้วยพฤติกรรมแบบไฮเปอร์อีลาสติกสำหรับการจำลองกระบวนการฉีดเป็นแบบแข็ง .....	123
MODELLING OF VISCO-HYPERELASTIC BEHAVIOUR OF CARBON BLACK FILLED RUBBER .....	124
การขยายตัวของรอยร้าวเส้นตรงเชื่อมระหว่างโลหะเชื่อมต่อนอกเหล็กคืบ-ค้ำกับทองแดงภายใต้ภาวะแบบบิกคิวอี .....	125
อิทธิพลของความดันกลียุคขึ้นงานในกระบวนการดัดขึ้นรูปโลหะแผ่นรูปตัว .....	126
A NUMERICAL STUDY OF AN EARLY STAGE OF ALLOY SOLIDIFICATION USING SIMILARITY TRANSFORMATION AND SECANT ITERATIVE TECHNIQUE .....	127
การวิเคราะห์การสั่นพ้องของรูปร่างของท่อด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	128
การศึกษาการสึกหรอแบบกัดตื้นบริเวณคมตัดฟันซี่ .....	129
การออกแบบปีกกล และ การประยุกต์ใช้กับการทดสอบการแตกหัก .....	130
การออกแบบชุดอุปกรณ์วิเคราะห์อื่นตัวสำหรับการทดสอบความเค้น .....	131
BUCKLING LOAD CHARACTERISTIC OF CONICAL SHELLS UNDER VARIOUS END CONDITIONS .....	132
BUCKLING OF AXIALLY COMPRESSED CONICAL SHELLS OF LINEARLY VARIABLE THICKNESS .....	133
แบบจำลองการตรวจสอบรอยเชื่อมแบบอาร์คโคโยใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์ .....	134
LIFE ASSESSMENT OF CORRODED SUPERHEATER TUBES IN A POWERPLANT STEAM GENERATOR .....	135
การควบคุมแรงส่งผ่านไปยังพื้นโคโยใช้ตัวลุดชันการสั่นสะเทือนสำหรับเครื่องจักรที่แปรความเร็วรอบ .....	136
FINITE ELEMENT STUDIES OF INTERFACIAL EFFECTS IN THE CONSOLIDATION OF MATRIX COATED FIBRE COMPOSITES .....	137
อายุความล้าของเบร้งแบบลูกกลิ้งทรงกระบอกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่รับภาระ .....	138
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและรอยแตกที่ร้าวบนเพื่อง .....	139
BONE STRESS ANALYSIS OF DENTAL IMPLANTS BY FINITE ELEMENT METHOD .....	140

การวิเคราะห์ความถี่ในแบบที่ได้อธิบายในแบบจำลองด้วยวิธีอนันต์...	141
อิทธิพลของการให้ความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมบริเวณผลกระทบจากความถี่ของคลื่นการขยายตัวของรอยแตกจากความถี่ของเหล็กเกรด เอ ในข้อ 10 43-40	142
DESIGN AND DEVELOPMENT OF A CYCLIC LOAD GENERATOR FOR USE IN EXPERIMENTS IN DENTAL MEDICINE	143
เครื่องมือวัดคุณสมบัติการไหลของของเหลวในแนวระนาบที่มีสภาพความเค้นแรงสั่นสะเทือนเฉพาะจุดสำหรับ การวัดวัสดุที่มีอัตราไหลที่สูง	144
การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในลักษณะการปริแตกที่มีดัชนีในแกนกลางของเส้นลวดจะดึงเส้นลวดผ่านสาย โยงวิธีทดลอง	145
เทคนิคการวัดแรงกระทำที่ใบมีดของหมุน	146
การวัดการกระทำที่ใบมีดของหมุนจากข้อมูลเชิงตัวเลขในลักษณะต่างๆ	147
NUMERICAL STUDY OF TRIBOLOGICAL EFFECTS OF MACHINING PERFORMANCE	148
การออกแบบระบบและวิธีการที่จะนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ	149
อิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วในการทดสอบที่มีผลต่อพฤติกรรมการแตกของเหล็กกล้า AISI 5120	150
NUMERICAL DETERMINATION OF DRIVING FORCE FOR CRACKS IN MULTI-LAYERED SYSTEMS	151
อิทธิพลของตัวแปรต่างๆในการเคลื่อนที่ของพลาสมาโดยใช้ใบมีดทั้งสามตัวใบ	152
เครื่องทดสอบการสึกกร่อน	153
อิทธิพลของฟิล์มแข็งเคลือบผิวที่ของกรรมวิธีดึงสวามเหล็กกล้าไร้สนิม	154
อิทธิพลของแรงโหลดขึ้นงา ในงานแท่งที่ผลิตที่มีผลต่อคุณภาพขึ้นงาน	155
การใช้ไฟเบอร์ออปติกในการตรวจสอบการขึ้นรูปในเครื่องขึ้นรูปที่เชื่อมกับโปรแกรมการฉีดและรอยอื่น	156
การเลือกของผิวหน้ากับข้อบกพร่องการขึ้นรูป	157
THE EFFICIENT SEARCH TECHNIQUE FOR MECHANICAL COMPONENT SELECTION	158
THEORETICAL CHARACTERISTICS OF JOURNAL BEARINGS WITH NON-NEWTONIAN PALM OILS	159
<b>TF: Thermal Systems and Fluid Mechanics</b>	
การศึกษาผลกระทบของปั๊มความร้อนที่จัดโดยวิธีการทดลอง	160
การควบคุมอัตราการไหลของน้ำในท่อโง้งด้วยสภาวะใช้รวม	161
PARAMETRIC STUDY OF THE ACOUSTIC TRANSMISSION LOSS OF MULTIPLE HELMHOLTZ RESONATOR-TYPE SILENCERS	162
ESTIMATION OF SOUND TRANSMISSION LOSS FOR A DESIGN OF SINGLE HELMHOLTZ RESONATOR-TYPE SILENCERS	163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MM037

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17  
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปทุมธานี

**การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในลักษณะการปรีแตกที่เกิดขึ้นในแกนกลางของชิ้น  
ฉนวนขณะดึงเส้นฉนวนผ่านคานโดยวิธีทดลอง**

ศ.ดร.สมภพพร โสภณ<sup>1</sup> ปิ่น ประมวญพันธ์<sup>2</sup>

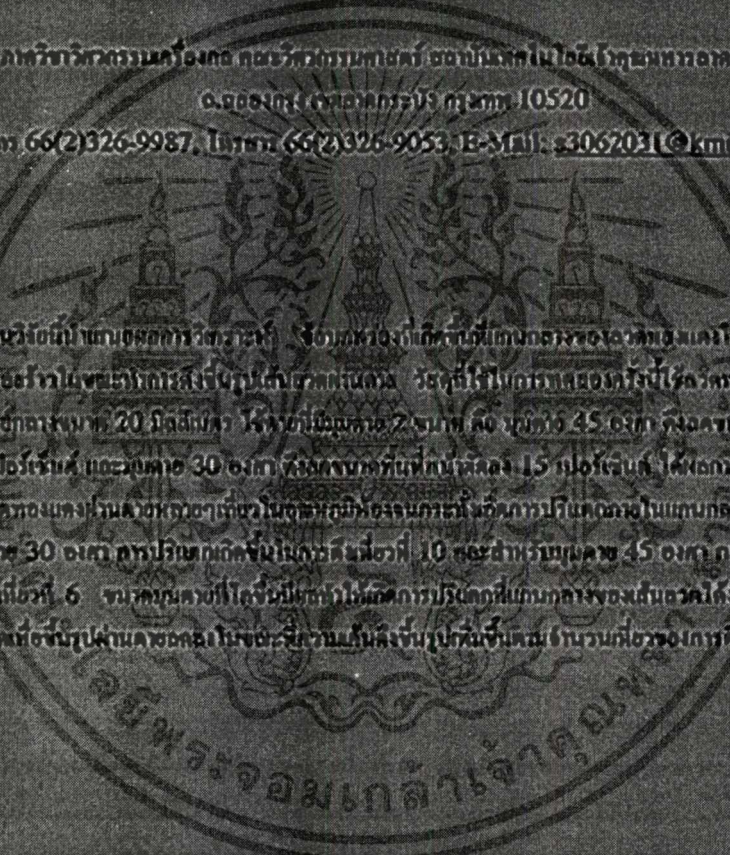
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

อ.ดร.องคกร เสงี่ยมกรประวีญ ภาควิชา 10520

โทร 66(2)326-9987, โทรสาร 66(2)326-9053, E-Mail: s3062031@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์การวิเคราะห์ ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นที่แกนกลางของฉนวนสูงแรงดันในลักษณะการปรีแตกในร่องรอยในขณะนำฉนวนดึงขึ้นรูปในสภาวะที่อุณหภูมิสูง วิธีดัดแปลงการทดสอบการปรีแตกของฉนวนที่ปรีแตกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร ใช้ฉนวนขนาด 2 เซนติเมตร มียาว 45 เซนติเมตร ฉนวนที่ปรีแตกแล้วจะนำขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเวลา 30 วินาที หรือจนกระทั่งที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ได้ผลกรรมผลของการดึงเส้นฉนวนของแรงดึงผ่านคานหรือตัวนำในอุณหภูมิของจนกระทั่งถึงการปรีแตกของในแกนกลางของ ฉนวนฉนวนกรรมผลขนาด 30 เซนติเมตร การปรีแตกเกิดขึ้นในลักษณะที่ 10 ของจำนวนผลคูณ 45 เซนติเมตร การปรีแตกเกิดขึ้นในการดึงที่อัตรา 6 เซนติเมตรคานที่ใส่ลงมีขนาดไม่มีการปรีแตกที่แกนกลางของฉนวนได้จึงสรุป เราพบว่าแรงดึงฉนวนที่ขึ้นรูปผ่านคานของคานในขณะดึงขึ้นรูปนั้นขึ้นกับจำนวนที่วางองศาการดึงที่ขึ้นกับ



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในลักษณะการปริแตกที่เกิดขึ้นในแกนกลางของเส้นลวดขณะดึง เส้นลวดผ่านตายโดยวิธีทดลอง

### Analysis of the Central Bursting Defects of the Wire during Drawing by Experiment

สมชัย นรเศรษฐ์โคภน<sup>1</sup> ปิ่น ประมาพันธ์<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 66(2)326-9987, โทรสาร 66(2)326-9053, E-Mail: [s3062031@kmitl.ac.th](mailto:s3062031@kmitl.ac.th)

Somchai Norasethasopon, Pin Pramaphant

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

Chalongkung Road Ladkrabang Bangkok Thailand 10520

Tel: (662)326-9987, Fax: (662)326-9053, E-Mail: [s3062031@kmitl.ac.th](mailto:s3062031@kmitl.ac.th)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นที่แกนกลางของลวดทองแดงในลักษณะการปริแตกเป็นรอยร้าวในขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปเส้นลวดผ่านตาย วัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้ลวดทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร ใช้ตายที่มีมุมตาย 2 ขนาด คือ มุมตาย 45 องศา ดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 25 เปอร์เซ็นต์ และมุมตาย 30 องศา ดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลง 15 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลการทดลองจากการดึงเส้นลวดทองแดงผ่านตายหลายๆเที่ยวในอุณหภูมิห้อง จนกระทั่งเกิดการปริแตกภายในแกนกลางของเส้นลวด กรณีมุมตาย 30 องศา การปริแตกเกิดขึ้นในการดึงเที่ยวที่ 10 และสำหรับมุมตาย 45 องศา การปริแตกเกิดขึ้นในการดึงเที่ยวที่ 6 ขนาดมุมตายที่โตขึ้นมีผลทำให้เกิดการปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดได้ง่ายขึ้น เราพบว่าแรงดึงลวดเพื่อขึ้นรูปผ่านตายลดลงในขณะที่ความเค้นดึงขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตามจำนวนเที่ยวของการดึงที่เพิ่มขึ้น

degrees die angle and 6<sup>th</sup> pass of drawing for 45 degrees die angle. Increasing of die angle the central burst was easier occurred. We found that the drawing force decrease while drawing stress increase as drawing pass number increase.

#### 1. บทนำ

ชาวอียิปต์โบราณอาจเป็นชนชาติที่ริเริ่มทำการพัฒนาการดึงขึ้นรูปโลหะขึ้นเป็นชนชาติแรก เช่น การดึงเส้นโลหะเพื่อทำเส้นใยทองคำแล้วนำไปถักทอร่วมกับเส้นใยอื่นๆเพื่อให้ได้มาซึ่ง "ผ้าทองคำ" มีหลักฐานจากภาพเขียนในพีระมิด Tutthmosis III ก่อน ปี ค.ศ. 1460 และพีระมิด Tutankhamun และจากสถานที่อื่นๆที่แสดงให้เห็นได้ว่าชาวอียิปต์ได้ใช้วิธีดักก่อนทองคำขึ้นรูปให้เป็นแผ่นหรือเป็นชิ้นบางๆ แล้วนำไปดึงผ่านช่องในแม่พิมพ์หิน ซึ่งเป็นที่เชื่อกันว่าแม่พิมพ์ต่างๆนี้ทำจากการขุดช่องในก้อนหินที่แข็งมาก รูปโครงสร้างของแนวการเปลี่ยนรูปจึงคล้ายกับที่บอเวนจอร์ ในการดึงขึ้นรูปลวดทองคำนั้นจะตีส่วนปลายของแท่งทองคำให้เรียวแหลมแล้วสอดเข้าไปในช่องแม่พิมพ์หิน โดยจะหล่อลื่นด้วยเทียนไข แล้วจับยึดปลายที่โผล่ออกมาจากแม่พิมพ์หินไว้ ต่อจากนั้นจึงทำการดึงขึ้นรูป ดังนั้น จึงทำให้เกิดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโตสม่ำเสมอทั้งเส้น ในศตวรรษที่ 5 ชาวเปอร์เซียสามารถดึงลวดทองแดงลดขนาดลงได้จนถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.022 นิ้ว (0.55 มิลลิเมตร) โดยดึงผ่านแผ่นเหล็ก การดึงเส้นลวดผ่านตายหลายเที่ยว (ครั้ง) อาจทำให้เกิดข้อบกพร่องในลักษณะการปริแตกขึ้นในแกนกลางของเส้นลวดได้ ซึ่งมีสาเหตุหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น ผลจากกระบวนการลดพื้นที่หน้าตัด ขนาดของมุมตาย ตลอดจนปัจจัยอื่นๆ ในกระบวนการผลิต นอกจากนั้นยังมีผลทำให้เกิดความเค้นขณะดึงขึ้นรูปสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการผลิต สูญเสียเวลาในกระบวนการผลิตมากขึ้นจากความเสียหายที่เกิดขึ้น

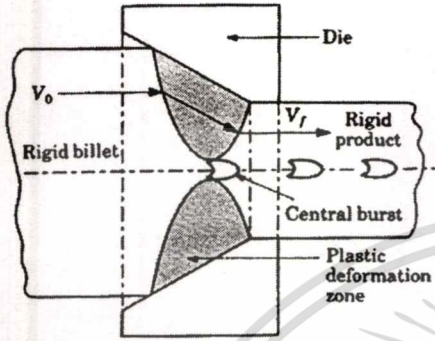
#### Abstract

This research presents the analysis results of the bursting defect of the center axis of the copper wire during multi-pass drawing through a die. The material used in this experiment is copper wire with a diameter of 20 mm. Two sizes of die angle, 45 degree with 25% reduction in the cross-section area and 30 degree with 15 % reaction in the cross-section area, were used in this research. The experimental results were conducted by multi-pass drawing a copper wire through the die at the room temperature until the center burst of the copper wire was obtained. The central burst occurred in 10<sup>th</sup> pass of drawing for 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังสื่ออื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก่เส้นลวด ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้คุณภาพของชิ้นงานที่ดี และเพื่อลดการสูญเสียในกระบวนการผลิต ผู้วิจัยได้ศึกษากรณีดังกล่าว โดยใช้ลวดทองแดงดึงผ่านคานหลายๆ เที้ยว (ครั้ง) จนเกิดการรอยปริแตกในแกน กลางของเส้นลวดที่เรียกว่า 'Central burst' ที่เรียกเช่นนี้ เพราะเกิดการแตกร้าวขึ้นที่พื้นที่หน้าตัดที่แกนกลางของเส้นลวด บางครั้งเรียกว่า 'Chevron crack' หรือ รอยแตกร้าวรูปบั้งนายสิบ



รูปที่ 1 แสดงการเกิดรอยปริแตกที่แกนกลางเส้นลวด

ภายนอก ดังนั้นสมการความเค้นที่เกิดจากการดึงลดขนาด[1-4]ในกรณีที่เป็นการ Deform แบบโฮโมจีเนียส จึงเขียนได้เป็น

$$\sigma = \bar{\sigma} \ln \frac{A_0}{A_f} = \bar{\sigma} \ln \left( \frac{1}{1-r} \right) \dots (1)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น  
 $\bar{\sigma}$  = ความเค้นไหลเฉลี่ย (Mean Flow Stress)  
 $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดด้านทางเข้าคาน  
 $A_f$  = พื้นที่หน้าตัดด้านทางออกของคาน  
 $r$  = สัดส่วนการลดพื้นที่หน้าตัด  $(A_0 - A_f) / A_0$

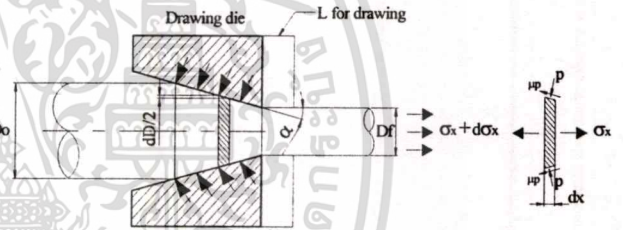
พิจารณาค่าแก้สำหรับแรงเสียดทานภายใน และแรงเฉือนภายนอกที่เกิดการสูญเสีย จากสมการข้างบนสามารถเขียนได้ใหม่ ดังนี้

$$\sigma = c_f (\alpha) c_i (\alpha, r) \bar{\sigma} \ln \frac{A_0}{A_f} \dots (2)$$

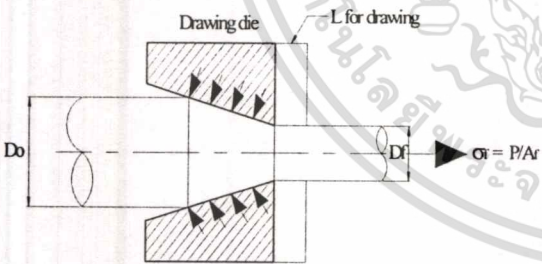
$$\sigma = c_f (\alpha) c_i (\alpha, r) \bar{\sigma} \ln \frac{1}{1-r} \dots (3)$$

2. ทฤษฎี

สิ่งสำคัญอย่างยิ่งสิ่งหนึ่งในกระบวนการดึงขึ้นรูปโลหะที่จะต้องพิจารณาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เลยก็คือ ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นในเส้นลวดขณะดึงขึ้นรูปโลหะ เพราะความเค้นดึงในเส้นลวดจะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะมีผลต่อการขาดของเส้นลวดขณะดึงขึ้นรูป การออกแบบคานที่ดีจะช่วยให้สามารถลดค่าความเค้นดึงนี้ลงได้



รูปที่ 3 แสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นบนเส้นลวดในช่วงความยาว dx ขณะเส้นลวดถูกดึงผ่านคาน



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของเส้นลวดที่ไหลผ่านคาน ความเค้นดึง และความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นลวดกับคาน

จากรูปที่ 3 สามารถเขียนสมการผลรวมของแรงในแนวแกน x ได้ คือ

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

เมื่อ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง และ  $\alpha$  เป็นมุมครึ่งหนึ่งของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2

ถ้าไม่คิดผลของค่าที่มีขนาดเล็ก และจะง่ายขึ้น โดยที่

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

ความเค้นที่เกิดขึ้นในเส้นลวดขณะไหลผ่านคานจะเป็นความเค้นที่มีคุณสมบัติอยู่ในช่วงพลาสติกของวัสดุที่ใช้ทำลวดนั้นๆ การ Deform ของเส้นลวดก็เกิดการ Deform อยู่ในช่วงพลาสติกเช่นกัน คือเป็นการ Deform อย่างถาวร ลักษณะของเส้นลวดที่ไหลผ่านคาน ความเค้นดึง และความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นลวดกับคาน จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 1 จากหลักสภาวะการแปรรูปของความเค้น การดึงลวดผ่านคานรูปทรงกรวย ไม่เกิดการสูญเสียแรงเฉือนภายใน และแรงเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2rdr \sigma_x + r^2 d\sigma_x + 2prdr + \frac{2rdr \tau}{\tan \alpha} = 0 \quad \dots(6)$$

ในทำนองเดียวกัน พิจารณาผลรวมของแรงในแนวรัศมี จะได้ ความเค้นในแนวรัศมี หรือความเค้นที่จะทำให้ตายแตก (Die-Breaking Stress) คือ

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

และ

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

ในกรณีที่มีมุมมีขนาดเล็ก  $\mu \tan \alpha$  ไม่จำเป็นต้องนำมาคิดได้ และ  $\sigma_r = -p$  ให้  $B = \mu \cot \alpha$  ทำการอินทิเกรตผลลัพธ์สมการอนุพันธ์ และจัดรูปสมการใหม่ให้ง่ายขึ้น ได้สมการความเค้นดังเฉลี่ยเป็น

$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = \left[ 1 + \frac{1}{B} \right] \left\{ 1 - \left[ \frac{D_f}{D_0} \right]^{2B} \right\} \quad \dots(9)$$

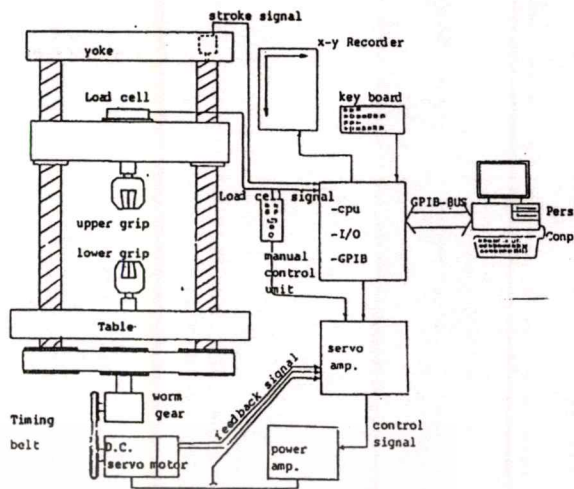
$B = \mu \cot \alpha$

$D_0, D_f$  = เส้นผ่าศูนย์กลางก่อนและหลังการดึง

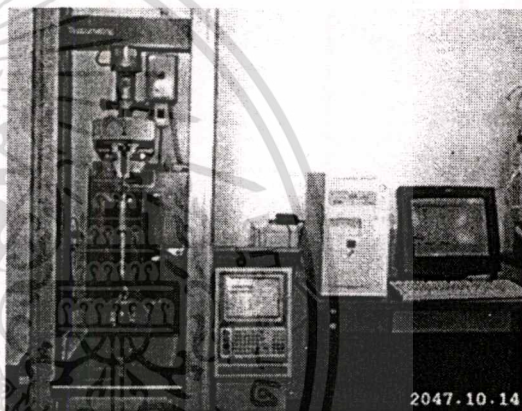
$\alpha$  = มุมครึ่งตาย

$\mu$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

$\bar{\sigma}$  = ความเค้นไหลเฉลี่ย (Mean Flow Stress)



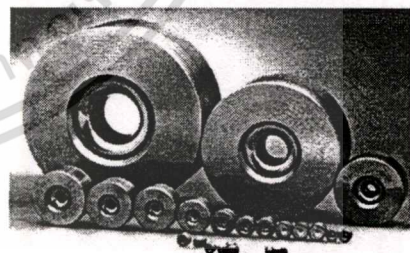
รูปที่ 4 แสดงไดอะแกรมการทำงานของเครื่องทดลอง



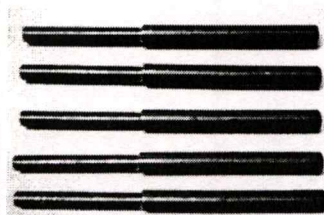
รูปที่ 5 ภาพด้านหน้าของเครื่องทดลองพร้อมอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

3. เครื่องมือ และอุปกรณ์ทดลอง

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ประกอบการทดลอง ประกอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ระบบขับเคลื่อน วัสดุ และบันทึกผลควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แรงดึงสูงสุด 10 ตัน มีไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 5
2. ชุดหัวจับตายซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อใช้จับยึดตายขณะทำการทดลอง มี 2 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร
3. ชุดของตัวตายที่มีขนาดของมุมเอียงต่างกันได้แก่ขนาดมุมตาย 30° และ 45° (หรือมุมครึ่งตาย เท่ากับ 15° และ 22.5°)
4. ลวดหรือชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบใช้กับมุมครึ่งตายขนาดต่างๆกัน โดยใช้วัสดุทองแดงลดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 20 มิลลิเมตร โดยลดขนาดคิดเป็น 15 % และ 25 % ของขนาดเดิม
5. เครื่อง CNC Wire Cut สำหรับผ่าเส้นลวดทองแดงเพื่อศึกษารอยปริแตกที่แกนกลาง



รูปที่ 6 ตาย (Dies) ขนาดต่างๆ



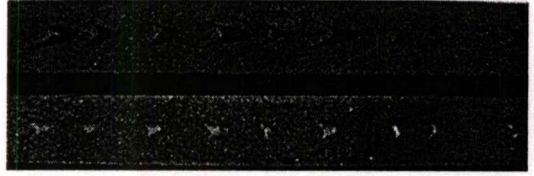
รูปที่ 7 เส้นลวดทองแดงที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติหนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการทดลอง และวิจารณ์ผล

ในการทดลองนี้ผู้ทำวิจัยเลือกใช้วัสดุทดลองเป็นทองแดง ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงอยู่ใน ตารางที่ 1 ชั้นทดสอบที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ใช้คาย 2 ชุดๆละ 12 ชั้น และ 8 ชั้น คายชุดแรกมีมุมคาย 45 องศา หรือครึ่งมุมคายเท่ากับ 22.5 องศา ดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดให้เล็กลงไปเรื่อยๆครั้งละ 25 เปอร์เซ็นต์ 12 เที้ยวหรือครึ่งของการดึงขึ้นรูป และชุดที่ 2 มีมุมคาย 30 องศา หรือครึ่งมุมคายเท่ากับ 15 องศา ดึงลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงเรื่อยๆครั้งละ 15 เปอร์เซ็นต์ 8 เที้ยวหรือครึ่งของการดึงขึ้นรูป ทำการดึงลวดผ่านตายด้วยเครื่อง UTM แล้วบันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงกับระยะทางที่ดึงผ่านตายไว้ แล้วผ่าดูรอยปริแตกภายในเส้นลวดด้วยเครื่อง Wire Cut

เมื่อผ่านการดึงถึงเที้ยวที่ 12 แล้วผ่าเส้นลวดทองแดง ออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง พบว่ารอยปริแตกได้ขยายโตขึ้น แต่จำนวนรอยปริแตกคงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 9

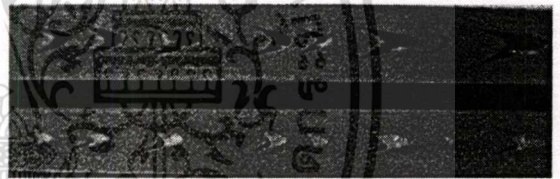


รูปที่ 9 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 12 เที้ยว (ครึ่ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ และเงื่อนไขที่ใช้ในการดึงลวดด้วยวิธีทดลอง

	ทองแดง (ลวดทดลอง)
Young's modulus; E (MPa)	120,000
Yield stress; $\sigma_y$ (MPa)	150
Poisson's ratio; $\nu$	0.3
Die half angle; $\alpha$ (Deg)	15 และ 22.5
Reduction per pass; $R_e/P$ (%)	15 และ 25
Coefficient of friction; $\mu$	0.05

สำหรับกรณีที่ใช้คายซึ่งมีมุมครึ่งคาย 22.5 องศา พบว่าเกิดรอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดเมื่อดึงขึ้นรูปลวดทองแดงถึงเที้ยวที่ 6 และเมื่อผ่าเส้นลวดทองแดงออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง พบรอยปริแตกรูปร่างคล้ายสิบลประกาฏที่แกนกลางของเส้นลวดทองแดงในทำนองเดียวกันกับกรณีที่ใช้คายที่มีมุมครึ่งคาย 15 องศา รอยปริแตกได้ขยายใหญ่ขึ้นในเที้ยวที่ 8 ดังแสดงในรูปที่ 10

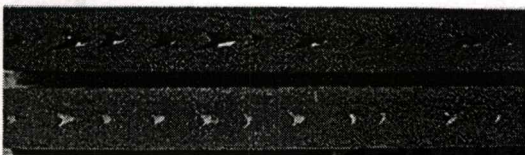


รูปที่ 10 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 8 เที้ยว (ครึ่ง) มุมครึ่งคาย 22.5 องศา

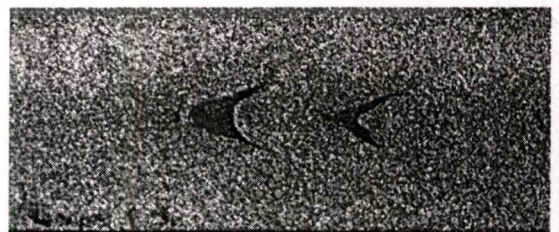
4.1 รอยปริแตก และการขยายตัวของรอยปริแตก

กรณีใช้คายซึ่งมีมุมครึ่งคาย 15 องศา พบว่าเกิดรอยปริแตกที่แกนกลางของเส้นลวดเมื่อดึงขึ้นรูปลวดทองแดงถึงเที้ยวที่ 10 และเมื่อผ่าเส้นลวดทองแดงออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดง พบรอยปริแตกรูปร่างคล้ายสิบลประกาฏที่แกนกลางของเส้นลวด ส่วนของปลายแหลมที่อยู่ตรงแกนกลางลวดทองแดงของรอยปริแตกรูปร่างคล้ายสิบลประกาฏจะชี้ไปในทิศทางที่ออกแรงดึงลวด เมื่อผ่านการดึงถึงเที้ยวที่ 11 พบว่ามีรอยปริแตกเกิดขึ้นเป็นระยะๆเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8

รูปที่ 11, 12 และ 13 เป็นภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 10, 11 และ 12 เที้ยว (ครึ่ง) ตามลำดับ มุมครึ่งคาย 15 องศา

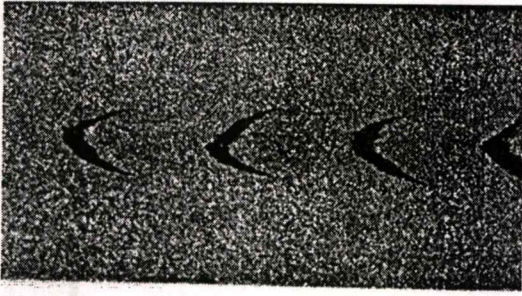


รูปที่ 8 แสดงภาพเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เที้ยว (ครึ่ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา

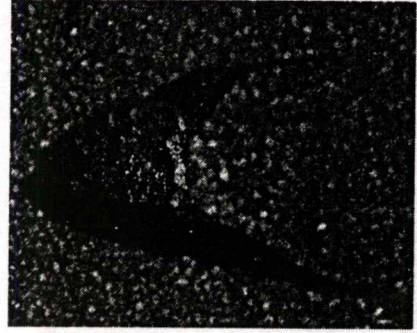


รูปที่ 11 ภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 10 เที้ยว (ครึ่ง) มุมครึ่งคาย 15 องศา

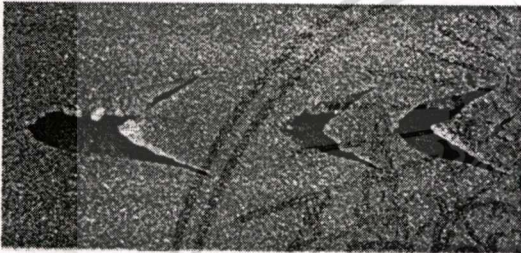
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 12 ภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เทียวย (ครั้ง) มุมครึ่งตาย 15 องศา

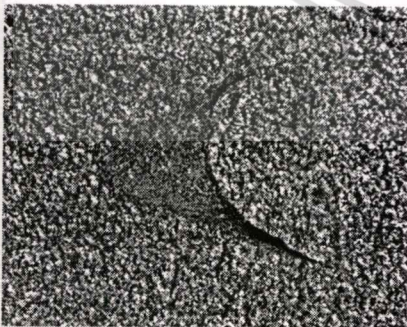


รูปที่ 15 ภาพขยาย 20 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 12 เทียวย (ครั้ง) มุมครึ่งตาย 15 องศา



รูปที่ 13 ภาพขยาย 7 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 12 เทียวย (ครั้ง) มุมครึ่งตาย 15 องศา

รูปที่ 14 และ 15 เป็นภาพขยาย 20 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 และ 12 เทียวย (ครั้ง) ตามลำดับ กรณีดังกล่าวนี้ใช้มุมครึ่งตาย 15 องศา

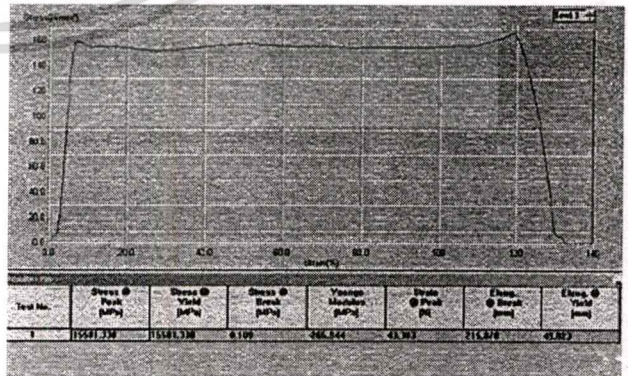


รูปที่ 14 ภาพขยาย 20 เท่าของเส้นลวดทองแดงที่ผ่าออกเป็นสองส่วนตามแนวแกนกลางของเส้นลวดทองแดงที่ผ่านการดึงขึ้นรูปมาแล้ว 11 เทียวย (ครั้ง) มุมครึ่งตาย 15 องศา

#### 4.2 ผลของมุมตาย และจำนวนเทียวยของการดึงขึ้นรูป

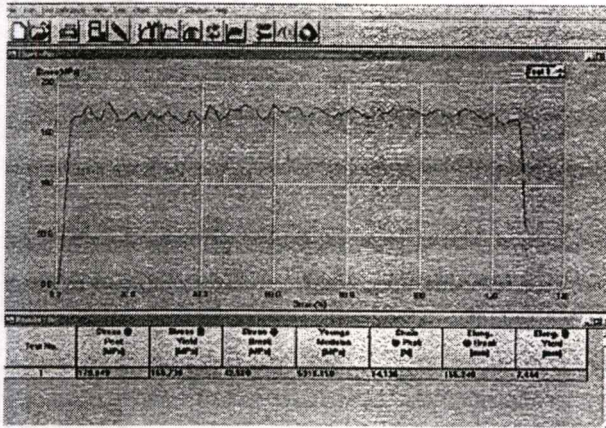
จากผลการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า รอยปริแตกเกิดขึ้นง่ายขึ้น เมื่อใช้เตี้ยวยที่มีขนาดมุมตายโตขึ้น กรณีมุมตาย 30 องศา การปริแตกเกิดขึ้นในการดึงเทียวยที่ 10 และสำหรับมุมตาย 45 องศา การปริแตกเกิดขึ้นในการดึงเทียวยที่ 6

ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ระหว่างทดลองดึงขึ้นรูปลวดทองแดงกรณีไม่มีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวดนั้น เส้นกราฟที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงความคงที่ของความเค้นดึงขึ้นรูป (Drawing Stress) ได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งจะแตกต่างจากการกรณีมีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด เส้นกราฟที่ได้จากการทดลองจะปรากฏความผันแปรของค่าความเค้นดึงขึ้นรูป (Drawing Stress) ได้อย่างชัดเจนเช่นกัน ตำแหน่งที่ค่าความเค้นดึงขึ้นรูป (Drawing Stress) ลดต่ำลงคือตำแหน่งที่เกิดรอยปริแตกขึ้นในแกนกลางเส้นลวด ดังแสดงในรูปที่ 17

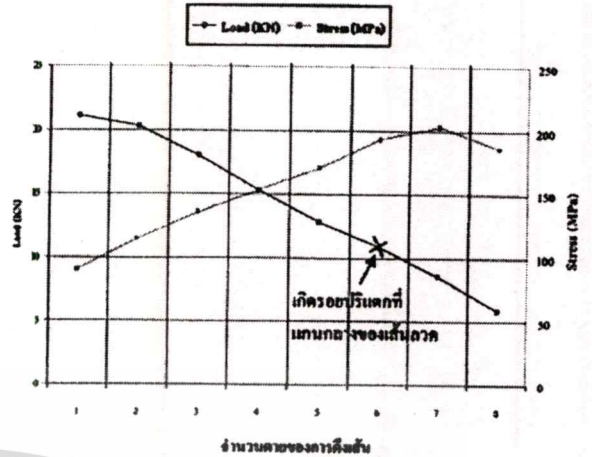


รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ระหว่างทดลองดึงขึ้นรูปลวดทองแดงกรณีไม่มีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ระหว่างทดลองดึงขึ้นรูปหลอดทองแดงกรณีมีการปริแตก (Central Burst) เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวด



รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (แรงดึงขึ้นรูปหลอด) และ Stress (ความเค้นดึงขึ้นรูปหลอด) กับจำนวนทางที่ใช้ดึงเส้นลวด (จำนวนเที่ยวที่ดึงลวด) สำหรับมุมครึ่งตาย 22.5 องศา ดึงลดพื้นที่หน้าตัดลง 25 %

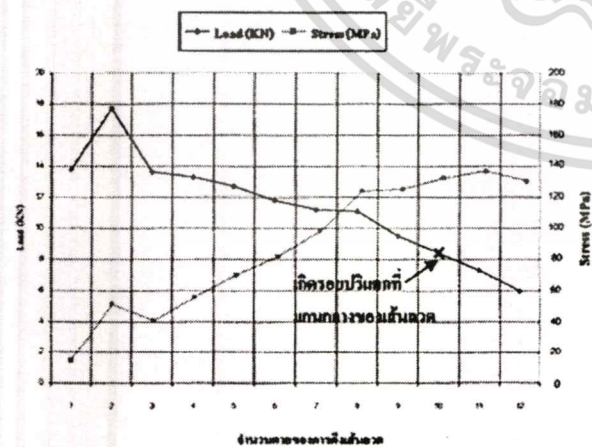
4.3 แรง และความเค้นดึงขึ้นรูป

แรงดึงขึ้นรูปหลอดจะแปรผกผันกับจำนวนเที่ยว (ครั้ง) ของการดึงขึ้นรูปทั้งสองขนาดของค่ามุมตาย คือ 30 องศา และ 45 องศา (ครึ่งมุมตายเท่ากับ 15 องศา และ 22.5 องศา) ในขณะที่เพิ่มจำนวนเที่ยวของการดึงขึ้นรูปขึ้นไปเรื่อยๆนั้น แรงดึงขึ้นรูปจะลดลงเป็นลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากในขณะที่ดึงลวดผ่านตายแต่ละเที่ยวนั้น พื้นที่หน้าตัดของลวดจะลดลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 25 % และ 15 % ตามลำดับ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนี้จะตรงกันข้ามกับพฤติกรรมของความเค้นดึงขึ้นรูป คือ ความเค้นดึงขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนเที่ยวของการดึงขึ้นรูปด้วยเหตุผลอันเดียวกัน และจะมีค่าสูงสุดในเที่ยวของการดึงขึ้นรูปหลังเกิดรอยปริแตกแล้ว 1 เที่ยว ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19

ทั้งแรงดึงขึ้นรูปหลอด และความเค้นดึงขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตายที่มีค่ามุมตาย และเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19

5. สรุป และข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเส้นลวดเกิดข้อบกพร่องขึ้นได้ในขณะทำการดึงขึ้นรูปหลายๆเที่ยวติดต่อกัน ซึ่งมีผลมาจากความเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นที่แกนกลางของเส้นลวดเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นลวดถูกดึงผ่านตายหลายๆเที่ยว (ครั้ง)
2. การใช้ตายที่มีขนาดของมุมตายที่ต่ำจะช่วยให้ความเค้นดึงขึ้นรูปหลอดในเส้นลวดต่ำไปด้วย และเกิดรอยปริแตกช้ากว่าขนาดของมุมตายที่โตกว่า
3. การใช้ตายที่มีขนาดของมุมตายที่โตจะทำให้เกิดรอยปริแตกในแกนกลางของลวดเร็วขึ้น และความเค้นดึงขึ้นรูปหลอดในเส้นลวดสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ลวดเกิดการขาดในขณะที่ดึงขึ้นรูปในกระบวนการผลิตได้ง่าย ทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดซังกงและต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น
4. การลดพื้นที่หน้าตัด ที่ต่ำมีผลให้ความเค้นในเส้นลวดต่ำ การลดพื้นที่หน้าตัดสูงมีผลทำให้ความเค้นในเส้นลวดเพิ่มสูงขึ้น และเกิดรอยปริแตกในแกนกลางได้ง่ายขึ้น
5. การลดพฤติกรรมการเกิดข้อบกพร่องในลักษณะดังกล่าวจำเป็นต้องทำการศึกษาถึงผลกระทบของค่าขนาดมุมตาย การลดพื้นที่หน้าตัด ความเร็วขณะดึงเส้นลวดผ่านตาย การอบคลายความเค้น และการใช้สารหล่อลื่นในขณะที่ดึงขึ้นรูปหลอดอย่างละเอียดถี่ถ้วน



รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load (แรงดึงขึ้นรูปหลอด) และ Stress (ความเค้นดึงขึ้นรูปหลอด) กับจำนวนทางที่ใช้ดึงเส้นลวด (จำนวนเที่ยวที่ดึงลวด) สำหรับมุมครึ่งตาย 15 องศา ดึงลดพื้นที่หน้าตัดลง 15 % การนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ Professor Kazunari Yoshida พร้อมคณะจาก Tokai University, Japan ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้จนเป็นผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผนวกที่ 2 ตารางแสดงขนาดของลวดก่อนและหลังดึงผ่านตายกรณีใช้ตายที่มี  $Re/P = 25\%$  ในการทดลองครั้งนี้

ดิ่งลวดขนาด เทียบ (ครั้ง) ที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)
1	20.00	17.32
2	17.32	15.00
3	15.00	12.99
4	12.99	11.25
5	11.25	9.74
6	9.74	8.44
7	8.44	7.31
8	7.31	6.33

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Edward M. Mielnik, Metalworking Science and Engineering, 397-463
- [2] Kazunari Yashida, Hiroshi Tanaka, The drawability of Ni-Ti shape-memory alloy wires, Wire and bar, 89-94(1995) 2, 45
- [3] Honma, T., Shape memory alloys and their application, J. JSME, 87-786(1984), 517
- [4] J. Chakrabarty, Theory of Plasticity, McGraw-Hill International Editions, 1987

ผนวกที่ 1 ตารางแสดงขนาดลวดก่อนและหลังดึงผ่านตายกรณีใช้ตายที่มี  $Re/P = 15\%$  ในการทดลองครั้งนี้

ดิ่งลวดขนาด เทียบ (ครั้ง) ที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)
1	20.00	18.44
2	18.44	17.00
3	17.00	15.67
4	15.67	14.45
5	14.45	13.32
6	13.32	12.28
7	12.28	11.32
8	11.32	10.44
9	10.44	9.63
10	9.63	8.87
11	8.87	8.18
12	8.18	7.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ Professor Kazunari Yoshida พร้อมคณะจาก Tokai University, Japan ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้จนเป็นผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

หมวดที่ 2 ตารางแสดงขนาดของลวดก่อนและหลังดึงผ่านตายกรณีใช้ ดายที่มี  $Re/P = 25\%$  ในการทดลองครั้งนี้

ดิ่งลดขนาด เทียบ (ครั้ง) ที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)
1	20.00	17.32
2	17.32	15.00
3	15.00	12.99
4	12.99	11.25
5	11.25	9.74
6	9.74	8.44
7	8.44	7.31
8	7.31	6.33

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Edward M. Mielnik, Metalworking Science and Engineering, 397-463
- [2] Kazunari Yashida, Hiroshi Tanaka, The drawability of Ni-Ti shape-memory alloy wires, Wire and bar, 89-94(1995) 2, 45
- [3] Honma, T., Shape memory alloys and their application, J. JSME, 87-786(1984), 517
- [4] J. Charkrabarty, Theory of Plasticity, McGraw-Hill International Editions, 1987

หมวดที่ 1 ตารางแสดงขนาดลวดก่อนและหลังดึงผ่านตายกรณีใช้ ดายที่มี  $Re/P = 15\%$  ในการทดลองครั้งนี้

ดิ่งลดขนาด เทียบ (ครั้ง) ที่	$D_0$ (mm)	$D_1$ (mm)
1	20.00	18.44
2	18.44	17.00
3	17.00	15.67
4	15.67	14.45
5	14.45	13.32
6	13.32	12.28
7	12.28	11.32
8	11.32	10.44
9	10.44	9.63
10	9.63	8.87
11	8.87	8.18
12	8.18	7.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นายปิ่น ประมาพันธ์  
 วัน /เดือน/ปีเกิด 9 พฤษภาคม 2502  
 วุฒิกการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล  
 สถาบันราชภัฏราชนครินทร์ ฉะเชิงเทรา

### ประสบการณ์การทำงาน

2527- 2528 : โรงงานไทยถาวร โลหะภัณฑ์.  
 ตำแหน่งช่างประจำเตาหลอมอลูมิเนียม  
 2528 - 2530 โรงเรียนเทคโนโลยีปทุมมา  
 ครูปฏิบัติการสอนสายช่างอุตสาหกรรม สาขาช่างยนต์  
 2530 – 2531 โรงเรียนกนกเทคโนโลยี  
 ครูปฏิบัติการสอนสายช่างอุตสาหกรรม สาขาช่างยนต์  
 2532 – ปัจจุบัน โรงเรียนเทคโนโลยีภาคตะวันออก (อี.เทค)  
 ตำแหน่งรองหัวหน้าแผนกช่างยนต์

### ผลงานที่เคยได้รับการตีพิมพ์

2543 “The Effect of Diesel Fuel to Vegetable Oil Ratio Variations in Mixed Fuel on Diesel Engines Combustion and Performance”  
 Ladkrabang Engineering Journal, March 2000, pp. 134-139.  
 2546 “Analysis of the Central Bursting Defects of the Wire during Drawing by Experiment ” Mechanical Engineering Network of Thailand The 16<sup>th</sup> Conference

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้