

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด

WIRE DRAWING TESTING MACHINE

โดย

นาย นริศ เกลาเกลี้ยง

นาย ศักดินา วิชาศ

นาย วิทยา แพทย์ประเสริฐ



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**103132**  
วัน,เดือน,ปี.....**28 ส.ค. 2552**

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

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด

WIRE DRAWING TESTING MACHINE

ผู้จัดทำ

- |                |               |              |          |
|----------------|---------------|--------------|----------|
| 1. นาย นริศ    | เกลาเกลี้ยง   | รหัสนักศึกษา | 49015498 |
| 2. นาย ศักดินา | วิลาศ         | รหัสนักศึกษา | 49015510 |
| 3. นาย วิทยา   | แพทย์ประเสริฐ | รหัสนักศึกษา | 49015525 |

(รศ. สมชัย นรเศรษฐ์ โสภณ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด

นาย นริศ เกลาเกลี้ยง	49015498
นาย ศักคินา วิชาศ	49015510
นาย วิทยา แพทย์ประเสริฐ	49015525
รศ.สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2551	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเน้นการดึงขึ้นรูปลวดผ่านกราไฟท์ เพื่อลดปัญหาด้านการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวด และความแม่นยำของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสำเร็จที่เพิ่มขึ้น โดยทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่การดึงขั้นต่อนสุดท้าย (Skin pass) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดเริ่มต้น  $\varnothing 2.40$  มิลลิเมตร ลดลงเหลือ  $\varnothing 2.30$  มิลลิเมตร (อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวดร้อยละ 9.0) ใช้กระบวนการดึงลวดแบบขึ้นเดียวความเร็วในการดึง 0.12 มิลลิเมตรต่อวินาที แม่พิมพ์การดึงลวดทำจากทั้งสแตนคาร์ไบด์ ลักษณะรูปร่างตามมาตรฐาน JIS B4111 W103 มีมุมไหลเข้า ( $2\alpha$ ) เท่ากับ  $12^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Wire drawing testing machine

Mr. Narit Klowkleang 49015498

Mr. Sakdina Vilad 49015510

Mr. Vithaya Patprasert 49015525

Assoc. Prof. Somchai Norasethasopon

Advisor

### Abstract

The purpose of this project is to produce wire drawing testing machine focusing on graphite. The main objective of this work is to decrease die wear and to increase the accuracy of finished wire diameter. The experiments of skin pass drawing had been carried out using stainless steel wire (SUS 304) of 2.40 mm diameter as a raw material. The diameter of the wire is reduced to 2.30 mm (or the reduction ratio of the process is 9.0 percent). Drawing speed determined to be 0.12 m/s. Drawing die inserts, which their shapes were formed according to JIS B4111 W103, are made of tungsten carbide. An approach angle of the dies is 12°.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

อันดับแรกเหนือสิ่งอื่นใดคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่เป็นผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ให้การศึกษา ตลอดจนให้กำลังใจและสนับสนุนช่วยเหลือทุกเรื่องในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่เมตตากรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหาตลอดระยะเวลาในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ดำริห์ จันทร์แสงสุก รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ที่เมตตากรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำดี ๆ ตอนปฏิบัติงาน และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และเมตตากรุณาให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณพี่ๆ ที่บริษัท สยามไวร์ อินดัสทรี จำกัด ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่ให้เข้าชมกระบวนการดึงลวดที่โรงงาน และคำแนะนำดี ๆ ที่ช่วยให้การทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ดูง่ายขึ้น

ขอขอบคุณ พี่โหน่ง (นักศึกษา ป.โท) ที่แนะนำสอนให้ใช้เครื่องทดสอบแรงดึงและขอบใจเพื่อนทุก ๆ คน ทั้งเพื่อน ๆ ภาควิศวกรรมเครื่องกลและเพื่อน ๆ ในภาควิชาอื่น ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในทุกเรื่อง

นริศ      เกตุเกตุยง  
ศักดิ์นา      วิชาศ  
วิทยา      แพทย์ประเสริฐ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
รายการสัญลักษณ์	X
รายการคำศัพท์และคำย่อ	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีกระบวนการดิ่งลวด	3
2.1.1 เครื่องดิ่งลวด	3
2.1.2 กระบวนการดิ่งลวด	5
2.1.2.1 ลักษณะแม่พิมพ์ดิ่งลวด	6
2.1.2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานในกระบวนการดิ่งลวด	7
2.2.3 แรงที่ใช้ในการดิ่งขึ้นรูปลวด	8
2.2 ความเค้นและความเครียด	11
2.2.1 ความเค้น (Stress)	12
2.2.2 ความเครียด (Strain)	12
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับไทรบอโลยี	14
2.3.1 สารหล่อลื่น	14
2.3.2 การสึกหรอ	19
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิว	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกล	27
3.1 ความเร็วที่ใช้ดึง	27
3.2 การคำนวณแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด	27
3.2.1 อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวด	27
3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	28
3.2.3 การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด	28
3.3 การออกแบบเพลลา	29
3.3.1 วัสดุเพลลา	30
3.3.2 ขนาดของเพลลา	30
3.3.3 การพิจารณาในการออกแบบ	30
3.3.4 การบิด	31
3.4 สายพาน	32
3.4.1 ชนิดและวัสดุสายพาน	32
3.4.2 ลักษณะการจับด้วยสายพาน	33
3.5 ล้อสายพาน	34
3.6 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing)	36
3.7 อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งเครื่อง	38
3.8 แม่พิมพ์ดึงลวด	41
3.9 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลอง	42
3.10 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง	42
บทที่ 4 การทดลอง	43
4.1 วิธีการทดลอง	43
4.1.1 ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม โดยดึงผ่านด้ายที่มีสารหล่อลื่นกราไฟท์ เป็นตัวหล่อลื่น	43
4.1.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304	43
4.2 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดลอง	44
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	57
5.1 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง	57
5.2 ปัญหาที่พบ	57
5.3 แนวทางการพัฒนา	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก	
ก คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานทดลอง	61
ข มาตรฐานแม่พิมพ์ดีดลวดและการออกแบบ	64
ค ภาพประกอบเครื่องดีดลวดและการออกแบบ	67
ง บทความประกอบวิชาโครงการ	78
ประวัติผู้เขียน	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องดิ่งลวดครอบเบ็น	4
2.2 เครื่องดิ่งลวดแบบขั้นตอนเดียว	4
2.3 เครื่องดิ่งลวดแบบหลายขั้น	4
2.4 การดิ่งลวดผ่านแม่พิมพ์ดิ่งลวด	5
2.5 ภาพตัดรูปร่างของแม่พิมพ์ดิ่งลวดกลม	6
2.6 มุมไหลเข้าที่เหมาะสมของแม่พิมพ์ดิ่งลวดเหล็ก	7
2.7 บริเวณการเปลี่ยนรูปถาวรกระบวนการดิ่งขึ้นรูป	8
2.8 ลักษณะของการบิดเบี้ยวจากแรงเฉือนรีด้นแดนท์	10
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	13
2.10 สารรับแรงกด EP ทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มรับแรง	16
2.11 สภาวะไร้สารหล่อลื่น	18
2.12 สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์ารี	18
2.13 การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์	18
2.14 การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์	18
2.15 การสึกที่แม่พิมพ์ดิ่งลวด	21
2.16 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (CVD) โดยใช้พลังงานไฟฟ้า	23
2.17 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (PVD) โดยใช้พลังงานไฟฟ้า	23
2.18 กระบวนการการเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)	24
3.1 ลักษณะการจับด้วยสายพาน	34
3.2 ล้อสายพาน	35
3.3 เครื่องดิ่งลวดแบบขั้นเดียว	36
3.4 รูปภาพเครื่องดิ่งลวดแบบการดิ่งขึ้นเดียว	37
3.5 หลักการวัดแรงที่ใช้ดิ่งลวด	37
3.6 มอเตอร์ขับเคลื่อน	38
3.7 ชุดทด	39
3.8 ล้อม้วนสำหรับม้วนดิ่งลวด	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9	40
3.10	40
3.11	41
3.12	41
3.13	42
4.1	44
4.2	46
4.3	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คำศัพท์ที่ความเสียหายในงานดิ่งขึ้นรูปและงานอัดขึ้นรูปขึ้นงาน	28
3.2 ขนาดระบุของเพลตามมาตรฐาน ISO/R 775 – 196944	30
3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อยสายพานแบนตามมาตรฐาน ISO 99 – 1975 (E)	35
4.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 จากการทดลอง	44
4.2 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดิ่งจากเครื่อง UTM	45
4.3 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดิ่งจากเครื่อง UTM	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$\%R$	อัตราการผลิตขนาดหน้าตัดลวด
$\%EL$	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
$2\alpha$	มุมไหลเข้าของแม่พิมพ์
$\alpha$	ครึ่งมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์
$\hat{\alpha}$	$\tan \alpha$
$\theta$	มุมของเอลิเมนต์ที่เกิดการบิดเบี้ยว
$\sigma_{f,m}$	ความเค้นขึ้นรูปเฉลี่ย
$\sigma_{f,o}$	ความเค้นขึ้นรูปของวัสดุก่อนดึง ( $N/mm^2$ )
$\sigma_{f,l}$	ความเค้นขึ้นรูปของวัสดุหลังดึง ( $N/mm^2$ )
$\sigma_z$	ความเค้นในแนวแกน ( $N/mm^2$ )
$\sigma_f$	ความเค้นคราก (Yield Strength) ( $N/mm^2$ )
$\phi_{max}$	ความเครียดสูง (True Strain)
$\mu$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
$\Delta T$	อุณหภูมิที่เกิดในการดึงลวด
$\rho$	ความหนาแน่นของวัสดุ
$A_0$	พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง
$A_1$	พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง
$c$	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ
$cSt$	เซนติสโตก
$D_0$	เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดลวดเริ่มต้น
$EP$	สารรับแรงกด
$F_{id,D}$	แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน
$F_{FR,S}$	แรงเสียดทานบนช่วงลาดเอียงของคาน
$F_{sh}$	แรงเฉือนรีตันแดนท์
$T$	แรงดึงที่เครื่องวัดแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์และคำย่อ

Abrasive Wear	การสึกหรอแบบขัดถู
Adhesive Wear	การสึกหรอแบบการเชื่อมติด
Anti Wear Additives	สารป้องกันการสึกหรอ
Approach Angles	มุมไหลเข้าของแม่พิมพ์
Back Relief	ส่วนทางออกแม่พิมพ์ดิ่งลวด
Bearing Length	ระยะกำหนดขนาดแม่พิมพ์ดิ่งลวด
Bell Radius	รัศมีโค้งที่ปากแม่พิมพ์ดิ่งลวด
Cold Drawing	กระบวนการดึงขึ้นรูปเย็น
CVD	กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอเคมี
Dead Metal Zone	บริเวณเนื้อวัสดุเกิดการไม่ไหลตัว
Die Case	แม่พิมพ์ส่วนนอก
Die Insert	แม่พิมพ์ส่วนใน
Distortion of Element	การบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์
Draw Bench	เครื่องดิ่งลวดแบบครอเบ็นซ์
Drawing Die	แม่พิมพ์ดิ่งลวด
Drawing Force	แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป
DLC	การเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร
Elongation	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
Entrance Angle	มุมปากทางเข้าแม่พิมพ์ดิ่งลวด
Extreme Pressure	สารรับแรงกด
Fatigue Strength	ความแข็งแรงล้าของวัสดุ
Fine Wire	การดิ่งลวดขนาดเล็กมาก
Friction Force	แรงเสียดทาน
Hot Extrusion	การอัดเส้นร้อน
Hot Rolling	การรีดร้อน
Hydrostatic Pressure	แรงอัดจากของเหลว
Ideal Deformation Force	แรงในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน
Ironing Wave	การเกิดคลื่นในงานลวดความหนาผนังบาง
Multiple Pass Wire Drawing	การดึงแบบหลายขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์และคำย่อ(ต่อ)

Non Steady State Process	กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียร
PEPVD	กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพโดยใช้พลาสมา
Plastic Deformation	ช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ
PVD	กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ
Redundant Shearing	แรงเฉือนรีดันแดนท์
Semi Angle	ครึ่งมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์
Shaving	การปอก
Single Stepped Wire Drawing	การดึงแบบขั้นเดียว
Skin Pass	การดึงขั้นสุดท้าย
Sliding Friction	ความเสียดทานแบบลื่น ไถล
Steady State Process	กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร
Strain Hardening	ความเครียดแข็ง
Sulphur	กำมะถัน
Surface Roughness	ความเรียบของผิว
Tensile Strength	ความแข็งแรงดึงสูงสุด
Viscosity	ความหนืด
Viscosity Index	ดัชนีความหนืด
Warm Drawing	การดึงลวดแบบอุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

อุตสาหกรรมการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นอุตสาหกรรมที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพราะลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่มีความสวยงามทนการกัดกร่อนได้สูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวในอุตสาหกรรมต่างๆจึงได้นำลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุทำผลิตภัณฑ์ต่อ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในการผลิตลวดที่มีความเที่ยงตรงสูงจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ดึงลวดที่มีการสึกหรอที่ต่ำ เช่น แม่พิมพ์ที่ทำจากเพชร แต่ด้วยเหตุผลด้านต้นทุนการผลิตที่สูงมากในอุตสาหกรรมดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไป จึงใช้แม่พิมพ์ดึงลวดทำจากทั้งสเตนคาร์ไบด์ แต่แม่พิมพ์ดึงลวดทำจากทั้งสเตนคาร์ไบด์ยังเกิดปัญหาด้านการสึกหรอที่สูงส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในแม่พิมพ์เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ลวดความเที่ยงตรงสูงและยังพบปัญหาด้านคุณภาพผิวที่หยาบเนื่องจากการเชื่อมติด (Adhesion) ของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่รูแม่พิมพ์ทำให้ลวดที่เคลื่อนที่ผ่านถูกขูดเป็นรอยในการซ่อมแซมจะต้องหยุดกระบวนการและทำการจัดคายเป็นระยะ ซึ่งทำให้รูในมีขนาดผิดพลาดไปหรืออาจต้องเปลี่ยนแม่พิมพ์ดึงลวดทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องแก้ไขปัญหานี้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด เพื่อใช้ศึกษาการลดการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ลวดที่ผ่านการดึงมีคุณภาพผิวที่ดีขึ้น ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสำเร็จที่ถูกต้องแม่นยำ โดยทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมผ่านกราไฟท์

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ทำการทดลองดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดก่อนดึง 2.40 มิลลิเมตร ลดลงเหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการดึง 2.30 มิลลิเมตร ทำการดึงขั้นสุดท้าย (Skin Pass) มีอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด (Reduction Ratio of Cross Sectional Area) %R = 9.0 เปอร์เซ็นต์

1.3.2 สร้างแม่พิมพ์ดึงลวดหน้าตัดกลมแบบคายอินเสิร์ต รูปร่างตามมาตรฐาน W 103 (JIS B4111) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในของแม่พิมพ์ 2.30 มิลลิเมตร มีมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์

(Approach Angle  $2\alpha$ ) =  $12^\circ$  (ครึ่งมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Semi Angle,  $\alpha$ ) =  $6^\circ$ ) ระบุกำหนด

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด (Die Bearing) 1 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์ส่วนนอก (Die Case) 30 × 15 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดาอินเสิร์ท (Die Insert) 12 × 8 มิลลิเมตร ทำจากโลหะผสมคาร์ไบด์ เกรด K20 (ISO Code)

1.3.3 สร้างเครื่องดัดลวดแบบดึงขึ้นรูปขึ้นเดียวใช้ระบบมอเตอร์เป็นจุดต้นกำลัง ความเร็วในการดึง 0.12 มิลลิเมตรต่อวินาที กระบวนการขึ้นรูปโลหะเมื่อแบ่งกลุ่มตามการวิเคราะห์การทำงานแล้วจะมีอยู่ 2 กลุ่มคือ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร (Steady State Process) และกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียร (Non Steady State Process) กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร ได้แก่ กระบวนการดัดลวด กระบวนการรีด (Rolling) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion) ที่ขึ้นรูปยาว ส่วนงานในกลุ่มกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียรเป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น กระบวนการตัด (Blanking) กระบวนการตีขึ้นรูป (Forging) กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) กระบวนการดัดลวดเป็นงานในกลุ่มกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียรที่มีการขึ้นรูปขึ้นงานที่ยาวและต่อเนื่องมากที่สุด

#### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. สร้างเครื่องดัดลวดแบบขึ้นเดียว
2. จัดสร้างแม่พิมพ์
3. นำเนิ่นการทดลอง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีกระบวนการดึงลวด

กระบวนการขึ้นรูปโลหะเมื่อแบ่งกลุ่มตามการวิเคราะห์การทำงานแล้วจะมีอยู่ 2 กลุ่มคือ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร (Steady State Process) และกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียร (Non Steady State Process) กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร ได้แก่ กระบวนการดึงลวด กระบวนการรีด (Rolling) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion) ที่ขึ้นรูปยาว ส่วนงานในกลุ่ม กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียรเป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น กระบวนการตัด (Blanking) กระบวนการตีขึ้นรูป (Forging) กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) กระบวนการดึงลวดเป็นงานในกลุ่มกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียรที่มีการขึ้นรูปชิ้นงานที่ยาว และต่อเนื่องมากที่สุด

#### 2.1.1 เครื่องดึงลวด

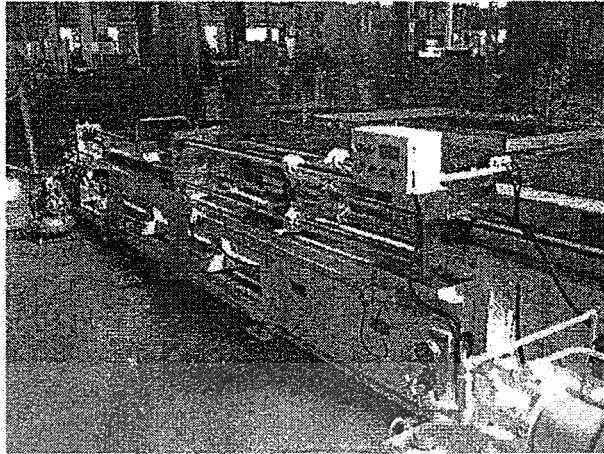
การแบ่งประเภทของเครื่องดึงลวดจะแบ่งตามระบบต้นกำลังการดึงของเครื่องและระดับการลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลวด ซึ่งประเภทของเครื่องดึงลวดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ[1]

##### 1. เครื่องดึงลวดแบบเครื่องครอเบ็นซ์ (Draw Bench)

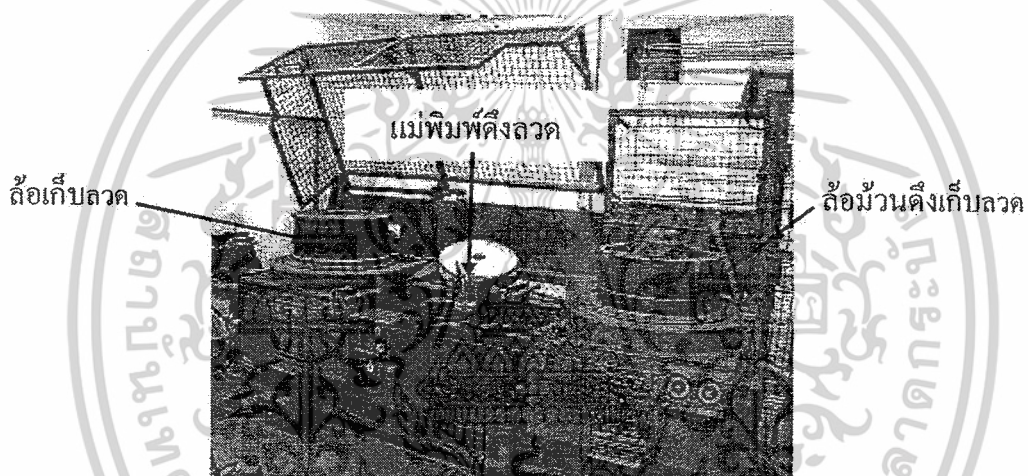
ระบบต้นกำลังของเครื่องครอเบ็นซ์จะใช้ระบบไฮดรอลิกส์ สามารถดึงได้ทั้งการดึงลวดและการดึงท่อความสามารถของเครื่องจะให้อัตราส่วนการลดหน้าตัดได้สูงและเหมาะกับการดึงลวดที่มีขนาดเล็กและต้องการความเที่ยงตรงสูง ดังรูป 2.1

##### 2. แบบใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังในการดึง

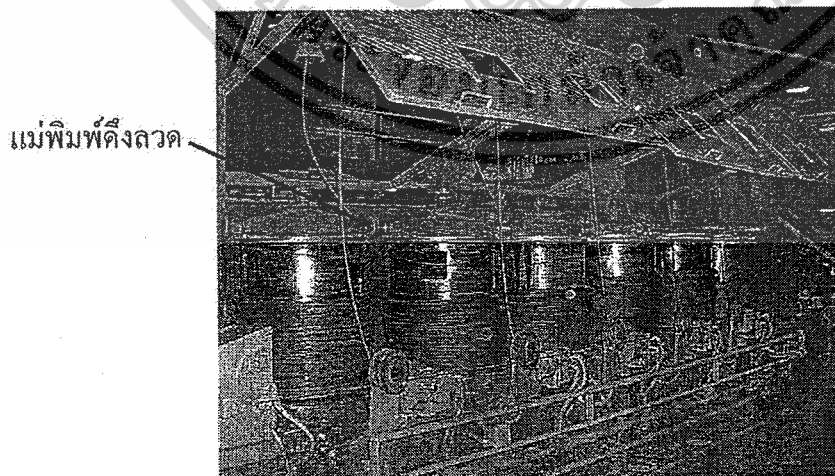
ก. เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing) เครื่องดึงลวดแบบขั้นตอนเดียว ดังรูปที่ 2.2 ส่วนมากจะทำการดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดเพียงตัวเดียวและจะใช้อัตราการลดพื้นที่หน้าตัดที่ต่ำ โดยล้อม้วนดึงเก็บจะมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังเพียงตัวเดียว



รูปที่ 2.1 เครื่องดัดกลดครอบเบ็น



รูปที่ 2.2 เครื่องดัดกลดแบบชั้นตอนเดียว [2]



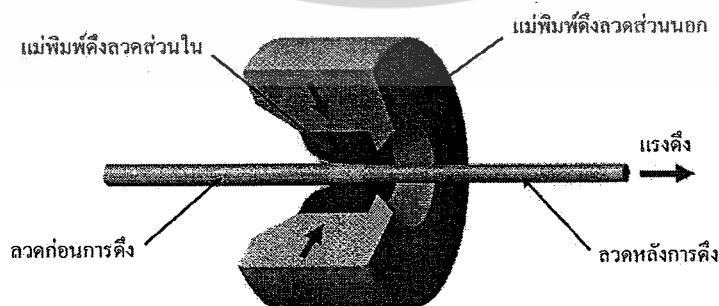
รูปที่ 2.3 เครื่องดัดกลดแบบหลายชั้น [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เครื่องดึงลวดแบบหลายชั้น (Multiple Pass Wire Drawing) การดึงลวดหลายชั้นตอนดังรูปที่ 2.3 จะมีแม่พิมพ์ดึงลวดลดขนาดหลายตัว ใช้ในกรณีที่ต้องการอัตราส่วนการลดหน้าตัดที่สูง การใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังตัวเดียวจะทำให้อัตราเร็วในการดึงคงที่เท่ากันทุกตัว หรือในกรณีที่ไม่มีมอเตอร์เป็นต้นกำลังหลายตัวจะมีการควบคุมความเร็วในการดึงให้เท่ากันทุกตัว ในการดึงลดอัตราพื้นที่หน้าตัดที่สูงจะเกิดความร้อนสะสมขึ้นในลวดและแม่พิมพ์ดึงลวดจึงต้องมีระบบการหล่อเย็นและสารหล่อลื่นที่ดี เพื่อป้องกันผลกระทบจากความร้อนจนอาจทำให้เกิดการสึกหรอขึ้นที่ผิวแม่พิมพ์ดึงลวดได้

### 2.1.2 กระบวนการดึงลวด

หลักการทั่วไปของการดึงลวดและดึงท่อจะมีพื้นฐานคล้ายกัน แต่จะต่างกันออกไปตรงขนาดและรูปร่างหลังการดึง กระบวนการดึงลวดเริ่มจากการนำวัสดุที่เป็นท่อนหรือลวดหลังจากผ่านการขึ้นรูปร้อนมาดึงลดขนาดโดยการดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ดังรูปที่ 2.4 ผลลัพธ์จากการดึงลวดจะมีรูปร่างหลากหลายขึ้นอยู่กับรูปทรงรูในแม่พิมพ์ดึงลวด ได้แก่ รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงกลม รูปทรงหกเหลี่ยม และรูปทรงอื่นๆ ที่ซับซ้อนขึ้น แต่ขีดจำกัดของรูปทรงที่สามารถขึ้นรูปได้จริงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด กระบวนการดึงลวดเริ่มจากการนำลวดมาทำความสะอาดเพื่อขจัดผิวที่เกิดออกไซด์ก่อน ซึ่งหากผิวที่เกิดออกไซด์หลุดออกจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผิวแม่พิมพ์ดึงลวดและส่งผลให้เกิดการสึกหรอ การดึงเริ่มต้น โดยให้แรงดึงที่ปลายด้านหนึ่งของลวดเป็นจุดต้นกำลัง รูปร่างของลวดจะถูกกำหนดด้วยขนาดรูในของแม่พิมพ์ เป็นการทำงานในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ (Plastic Deformation) ระดับของการดึงลวดเมื่อแบ่งตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด [3] จะมีตั้งแต่การดึงลวดลดขนาดใหญ่  $D_0 = 4.2$  ถึง 16 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดกลาง  $D_0 = 1.6$  ถึง 4.2 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็ก  $D_0 = 0.7$  ถึง 1.6 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็กมาก (Fine Wire)  $D_0$  น้อยกว่า 0.7 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็กมาก (Fine Wire) สามารถดึงได้เล็กสุด 0.03 มิลลิเมตร แต่ก็ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) การหล่อเย็นในกระบวนการดึง



รูปที่ 2.4 การดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

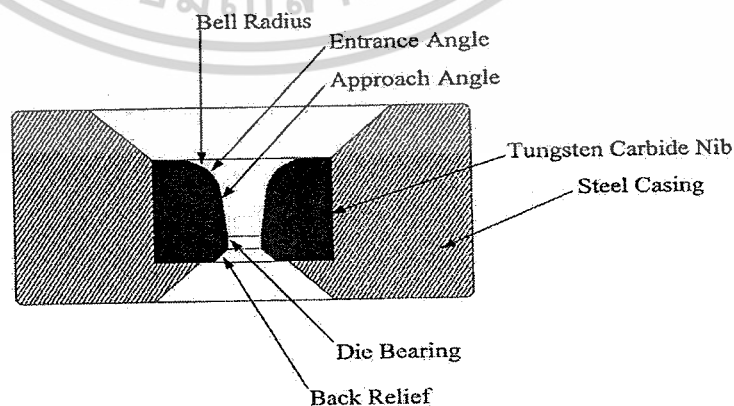
จะมีทั้งของเหลวและของแข็ง ของเหลวได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นต่างๆ ส่วนสารหล่อลื่นแบบของแข็งได้แก่ กราไฟท์ (Graphite) ระบบการหล่อลื่นจะมีทั้งการหยด การพ่น แม่พิมพ์อยู่ในสารหล่อลื่นและลวดวิ่งผ่านสารหล่อลื่น การดึงลวดแบบอุ่น (Warm Drawing)[4] เป็นกรรมวิธีหนึ่งที่ช่วยในการดึงขึ้นรูปลวดที่มีความแข็งแรงมากและดึงขึ้นรูปยาก เป็นกระบวนการดึงลวดโดยเพิ่มความร้อนให้กับวัสดุหรือแม่พิมพ์ดึงลวดจนลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ 200-500 องศาเซลเซียสแต่ต่ำกว่าจุดการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุ ทำให้ผิวภายนอกของลวดมีความแข็งแรงลดลงแต่ภายในลวดยังแข็งแรงเดิมอยู่ ลวดที่ผ่านการดึงมาจะเกิดความเครียดแข็ง (Strain Hardening) มากขึ้นและมีความแข็งแรงล้าของวัสดุ (Fatigue Strength) สูงขึ้น งานที่ทำการขึ้นรูปอุ่นได้แก่ ลวดสปริง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ หรือลวดที่ต้องการเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้สูงขึ้น ส่วนกระบวนการดึงลวดขั้นสุดท้าย (Skin Pass Wire Drawing) จะเป็นการดึงลดขนาดในช่วงสุดท้ายเพื่อได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จที่มีความเรียบผิวดี การดึงลักษณะนี้จะมีอัตราการลดหน้าตัดของลวดต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์

### 2.1.2.1 ลักษณะแม่พิมพ์ดึงลวด

ลักษณะแม่พิมพ์ดึงลวดกลมตามมาตรฐาน JIS B4111 [5] จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ คายอินเสิร์ท (Die Insert) และแม่พิมพ์ส่วนนอก (Steel Case) ดังรูปที่ 2.5 จะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. คายอินเสิร์ท คือ แม่พิมพ์ส่วนในที่อยู่ตัดเข้าไปในแม่พิมพ์ส่วนนอก โดยทั่วไปจะทำมาจากโลหะผสมคาร์ไบด์หรือทำจากเพชร (Diamond Die) ในกรณีการดึงลวดที่มีความระเอียดมาก ซึ่ง คายอินเสิร์ทจะมีส่วนประกอบอยู่ต่างๆดังนี้

ก. รัศมีโค้งที่ปากคาย (Bell Radius) เป็นส่วนที่ลวดเริ่มเข้าสู่แม่พิมพ์มีลักษณะคล้ายระฆัง ช่วยให้ลวดลื่นไหลเข้าสู่การลดหน้าตัดได้ดีขึ้น ลักษณะรัศมีโค้งที่ปากคายยังช่วยให้เกิดแรงอัดจากของเหลว (Hydrostatic Pressure) ส่งผลช่วยให้สารหล่อลื่นไหลเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อการหล่อลื่นได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.5 ภาพตัดรูปร่างของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. มุมปากทางเข้า (Entrance Angle) เป็นส่วนทางเข้าที่ลวดถูกควบคุมโดยผนังด้านข้างเส้นไหลเข้าสู่การลดหน้าตัดพร้อมกับมีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวของลวด

ค. ครึ่งมุมไหลเข้า  $\alpha$  (Approach Angle) เป็นส่วนแรกที่สายเริ่มทำการลดหน้าตัดลง เป็นมุมที่มีอิทธิพลต่อการไหลของเนื้อโลหะ มุมนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการกำหนดแรงในการดึงลวด

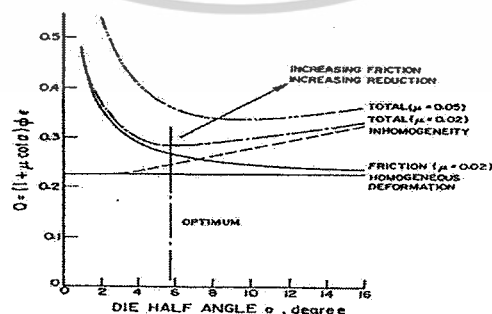
ง. ส่วนลดขนาด (Die Bearing) เป็นส่วนที่ลดขนาดของลวดให้มีขนาดเท่ากับขนาดต้องการของลวดสำเร็จ เป็นส่วนที่มีความเสียดทานมากและการสึกหรอที่ส่วนนี้จะส่งผลต่อรูปทรงและผิวสำเร็จของลวดหลังการดึง

จ. ส่วนทางออก (Back Relief) เป็นส่วนช่วยให้ลวดเส้น ไถลออกจากแม่พิมพ์ดึงลวด และจะช่วยทำให้ลวดรักษาความเป็นเส้นตรง

2. แม่พิมพ์ส่วนนอก เป็นส่วนประกอบที่ใหญ่กว่าเพื่อประโยชน์ในการรับแรงที่มาก และง่ายในการซ่อมบำรุงเมื่อเกิดการสึกหรอ

### 2.1.2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานในกระบวนการดึงลวด

ความเสียดทานในกระบวนการดึงลวดเป็นความเสียดทานแบบเส้นไหล (Sliding Friction) จะเกิดขึ้นบริเวณที่สัมผัสกันระหว่างลวดและแม่พิมพ์ ความเสียดทานในกระบวนการดึงลวดจะเกิดขึ้นอยู่กับมุมไหลเข้า ( $\alpha$ ) เป็นสำคัญ เมื่อมุมไหลเข้ามีขนาดที่เล็กกว่ามุมเหมาะสมก็จะมีพื้นที่สัมผัสมากเป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสมากตาม ส่งผลให้ใช้แรงในการดึงขึ้นรูปที่สูงขึ้น แต่เมื่อมุมไหลเข้ามีขนาดกว้างกว่ามุมที่เหมาะสมจะทำให้พื้นที่สัมผัสน้อยความเสียดทานน้อยแต่การไหลตัวเกิดขึ้นได้ยากจนส่งผลให้วัสดุเกิดการติด (Dead Zone) และในกรณีที่มุมไหลเข้ากว้างมากจะเกิดการปอกของผิว (Shaving) ดังนั้นจึงจะมีมุมเหมาะสมที่ทำให้เกิดความเสียดทานน้อยที่สุดระหว่างลวดและแม่พิมพ์ดึงลวด นอกจากนี้ความเสียดทานยังขึ้นอยู่กับความเรียบผิวของแม่พิมพ์ด้วย แม่พิมพ์ที่มีความหยาบมากจะส่งผลให้เกิดความเสียดทานที่สูงเช่นกัน

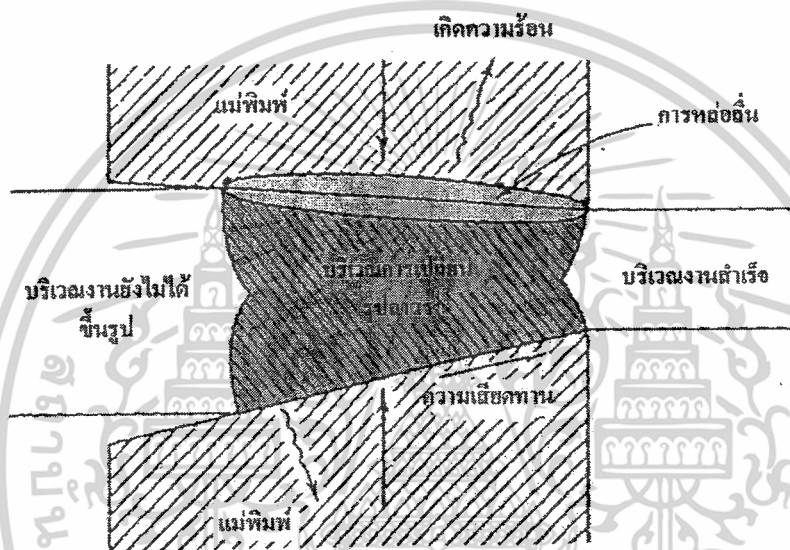


รูปที่ 2.6 มุมไหลเข้าที่เหมาะสมของแม่พิมพ์ดึงลวดเหล็ก[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

การวิเคราะห์แรงในการดึงขึ้นรูปลวดโลหะจำเป็นต้องทราบพฤติกรรมต่างๆของเนื้อโลหะและองค์ประกอบอื่นๆในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) ได้แก่ ผลกระทบจากความเสียดทานระหว่างผิวลวดกับแม่พิมพ์ดึงลวด การหล่อลื่น อุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน การกระจายความเค้นและความเครียด ความเร็วของการเปลี่ยนรูป ความซับซ้อนของรูปร่างการดึงลวดและแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังรูปที่ 2.7 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปจะต้องเท่ากับหรือสูงกว่าความเค้นคราก (Yield Strength) ของวัสดุแต่ต้องไม่มากจนเกินจุดแตกหักของวัสดุ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของแรงและการเปลี่ยนรูปของโลหะจะซับซ้อนมาก แต่ในการวิเคราะห์จะสมมุติให้บริเวณมีการ



รูปที่ 2.7 บริเวณการเปลี่ยนรูปถาวรกระบวนการดึงขึ้นรูป [7]

เปลี่ยนรูปถาวรมีคุณสมบัติทางกลเหมือนกันทุกทิศทุกทาง การคำนวณในกระบวนการดึงลวดมีดังต่อไปนี้

#### 1. อัตราการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของลวด (%)

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100(\%) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$A_0 = \text{พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง} [\text{mm}^2]$$

$$A_1 = \text{พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง} [\text{mm}^2]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. แรงดึงขึ้นรูปสวด ( $F_{D,tot}$ )

แรงดึงขึ้นรูปสวดจะพิจารณาจากผลรวมของแรงในสามส่วน ซึ่งประกอบด้วยแรงในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal Deformation Force) แรงเสียดทาน (Friction Force) และแรงเฉือนหรือแรงเฉือนรีดันแดนท์ (Redundant Shearing) สมการของแรงดึงขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ด้วย Siebel's Method

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (2.2)$$

เมื่อ

$F_{D,tot}$  = แรงดึงขึ้นรูปของกรรมวิธีดึงสวด

$F_{id,D}$  = แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน

$F_{FR,S}$  = แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงสวด

$F_{sh}$  = แรงเฉือนรีดันแดนท์

### 2.1 แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน

$$F_{id,D} = A_1 \sigma_{f,m} \varphi_{max} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$\sigma_{f,m}$  = ความเค้นขึ้นรูปเฉลี่ย (Flow Stress) [ $N/mm^2$ ]

$\varphi_{max}$  = ความเครียด (True Strain)

โดยที่

$$\sigma_{f,m} = \frac{\sigma_{m,n-1} + \sigma_{m,n}}{2} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$\sigma_{m,n-1}$  = ความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุก่อนการดึง [ $N/mm^2$ ]

$\sigma_{m,n}$  = ความเค้นแรงดึงสูงสุดของวัสดุหลังดึง [ $N/mm^2$ ]

โดยที่

$$\varphi_{max} = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (2.5)$$

### 2.2 แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงสวด

$$F_{FR,S} = \frac{2\sigma_{f,m}\varphi_{max}\mu A_1}{\sin 2\alpha} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$F_{FR,S}$  = แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงสวด

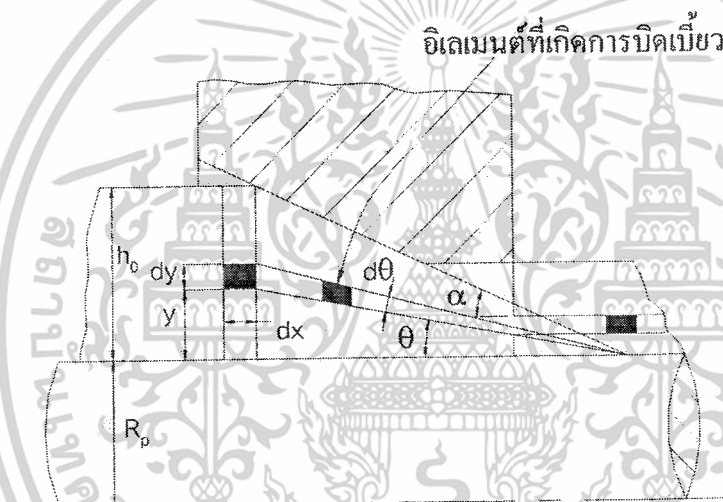
$\mu$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Coulomb's Coefficient of Friction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\alpha$  = มุมของเส้นสัมผัสของแม่พิมพ์ดึงลวด [องศา]

### 2.3 แรงเฉือนรีตันแคนท์

เมื่อทำการวิเคราะห์ที่เอลิเมนต์หนึ่งของลวดโดยกำหนดให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ในขณะที่ถูกดึงขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ดึงลวดดังรูป 2.8 จะเกิดความเค้นเฉือน (Shearing Stress) ที่สูงจากการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของลวดที่ลดลงจึงทำให้เอลิเมนต์เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) เป็นมุมเฉือน =  $\theta$  การบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์นั้นจะเกิดเป็นสัดส่วนกับมุมของแม่พิมพ์ดึงลวด เอลิเมนต์ที่เกิดการบิดเบี้ยวไปนั้นในการดึงต่อจะต้องมีแรงที่มากขึ้นเพื่อให้เอลิเมนต์ที่บิดเบี้ยวถูกดึงผ่านแม่พิมพ์ และจะกลับเป็นรูปทรงเดิมที่บริเวณทางออกบริเวณเอลิเมนต์จึงเกิดความเค้นเฉือนในปริมาณที่สูง เรียกว่าแรงเฉือนรีตันแคนท์ แรงเฉือนรีตันแคนท์ประกอบด้วยแรงสองส่วน คือ แรง



รูปที่ 2.8 ลักษณะของการบิดเบี้ยวจากแรงเฉือนรีตันแคนท์ [8]

แม็คโครเชียร์ริง (Macro-Shearing) ที่อยู่บริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด และแรงอันเชียร์ริง (Unshearing) ซึ่งอยู่บริเวณทางออกของแม่พิมพ์ดึงลวด ปริมาณอันเชียร์ริงจะมีค่าเท่ากับแม็คโครเชียร์ริง การเกิดแม็คโครเชียร์ริงในปริมาณที่สูงจะเป็นสาเหตุทำให้เกิด โซนเนื้อวัสดุไม่ไหลตัว (Dead-Metal Zone) เกิดการติดของเนื้อวัสดุซึ่งคล้ายกับกรรมวิธีอื่นๆ เช่น การดึงขึ้นรูปท่อ (Tube Drawing) และการเกิดคลื่นในการลดความหนาผนังบาง (Ironing Wave) เป็นผลจากการเกิดแม็คโครเชียร์ริงที่บริเวณทางเข้าของแม่พิมพ์ทำให้เกิดการติดของเนื้อวัสดุจึงใช้แรงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นตัวแปรที่ส่งผลต่อแรงเฉือนรีตันแคนท์คือขนาดของมุมไหลเข้าและอัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด

แรงเฉือนรีตันแคนท์สามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{sh} = \frac{2}{3} A_0 \sigma_{f,m} \hat{\alpha} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$F_{sh}$  = แรงเฉือนรูดันแดนที่

$$\hat{\alpha} = \tan \alpha$$

ดังนั้น แรงในการดึงลวดจึงประกอบด้วยแรงในสามส่วน คือ แรงในการขึ้นรูปวัสดุ(2.3) แรงเสียดทาน (2.6) และแรงเฉือนรูดันแดนที่ (2.7) ซึ่งคำนวณโดยสมการ Siebel's Method

$$F_{D,tot} = A_1 \times \sigma_{f,m} \times \left[ \left( 1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] \quad (2.8)$$

### 3. อุณหภูมิที่เกิดในการดึงลวด

$$\Delta T = \sigma_{fm} \ln \frac{A_0}{A_1} \left( \frac{1}{c\rho} \right) \quad (2.9)$$

เมื่อ

$\Delta T$  = อุณหภูมิที่เกิดในการดึงลวด [องศาเซลเซียส]

$\sigma_{f,m}$  = ความเค้นขึ้นรูปเฉื่อย [N/mm<sup>2</sup>]

$c$  = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ [J/kg]

$\rho$  = ความหนาแน่นของวัสดุ [kg/m<sup>3</sup>]

## 2.2 ความเค้นและความเครียด

เมื่อได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของโลหะแล้ว ในลำดับต่อไปจะแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลของโลหะ ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาวิชาโลหะวิทยานั้น มีจุดมุ่งหมายเพื่อต้องการให้ผู้ศึกษาเข้าใจลักษณะต่างๆ ของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางกลหรือคุณสมบัติทางกลของโลหะ เพื่อนำความรู้ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรม และเพื่อให้เกิดความเข้าใจดียิ่งขึ้นเกี่ยวกับแรงที่กระทำต่อโลหะและส่งผลให้โลหะนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะของการแตก หัก บิด งอ หรือขาดออกจากกัน ความรู้เหล่านี้จะเป็นข้อมูลสำคัญในการตัดสินใจเลือกใช้โลหะหรือปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท

คุณสมบัติของโลหะในการตอบสนองต่อแรงทางกล เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำต่อโลหะ โลหะนั้นจะมีอาการเกร็ง คือเกิดแรงขึ้นภายในเพื่อตอบสนองต่อแรงกระทำนั้น ซึ่งเป็นการป้องกันตนเองเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แรงด้านทานนี้เรียกว่า “แรงเค้นหรือความเค้น” (Stress) และเมื่อโลหะนั้นยืดออกหรือหดตัวเข้าตามแนวแรงที่กระทำ คือ แรงดึง และแรงอัด ตามลำดับ ในลักษณะดังกล่าวนี้ก็ หมายความว่า โลหะนั้นเกิดความเครียด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นาเบ้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 ความเค้น (Stress)

ความเค้นเกิดขึ้นจากแรงภายนอกที่กระทำต่อโลหะและกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของโลหะนั้น ขณะเดียวกันภายในเนื้อโลหะก็จะเกิดแรงต่อต้านแรงเหล่านั้นอย่างสม่ำเสมอ และขนาดของความเค้นจะมีค่าเท่ากับขนาดของแรงกระทำจากภายนอกหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของโลหะที่รับแรงภายนอกนั้น โดยเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\text{Stress} = \frac{P}{A} \quad (2.10)$$

เมื่อ

Stress = ความเค้น

P = แรงกระทำ

A = พื้นที่ภาคตัดที่รับแรง

### 2.2.2 ความเครียด (Strain)

ความเครียดเกิดขึ้นจากความเปลี่ยนแปลงของโลหะไม่ว่าจะเป็นการหดตัวเข้า (Contraction) หรือการยืดตัวออก (Elongation) เมื่อโลหะนั้นอยู่ภายใต้แรงอัด (Compressive) และแรงดึง (Tensile) ตามลำดับ

$$\text{Strain} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.11)$$

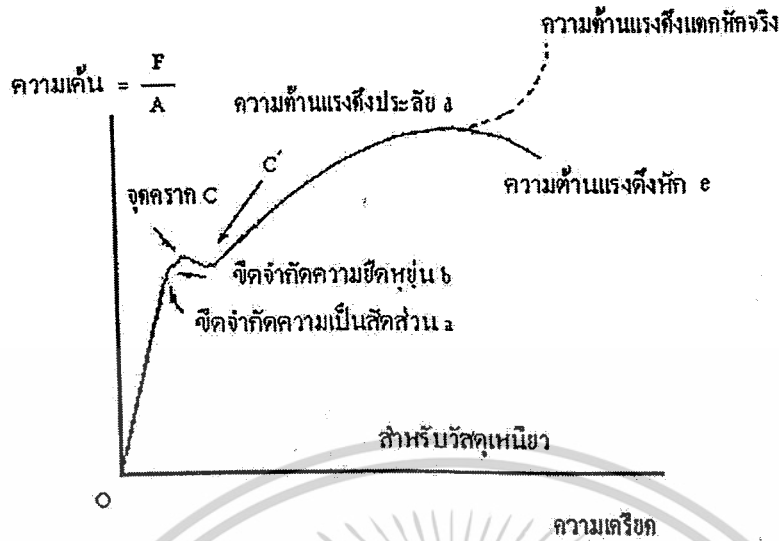
เมื่อ

Strain = ความเครียด

L = ความยาวหลังจากที่โลหะถูกแรงกระทำ

L<sub>0</sub> = ความยาวเดิม

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด คุณสมบัติต่างๆของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกใช้โลหะที่จะมาทำโครงสร้างต่างๆ เช่น คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยเฉพาะกำลังของวัสดุ การทดสอบวัสดุที่สำคัญวิธีหนึ่งคือ การทดสอบ โดยใช้แรงดึง โดยเฉพาะวัสดุที่มีความเหนียว เช่น เหล็ก จะพบว่ามีความเค้นจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเครียดในระยะหนึ่ง แต่เมื่อผ่านช่วงเวลานี้ไปแล้วความสัมพันธ์ดังกล่าวจะไม่เป็นปฏิภาคโดยตรงต่อไปอีก เราสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงกับความเครียดตลอดระยะจนกระทั่งขาดจากกัน กราฟที่ได้จะมีลักษณะคล้ายคลึงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

จากกราฟในรูปที่ 2.9 มีจุดต่างๆ ที่สำคัญดังนี้

- จาก 0 ถึง a กราฟจะเป็นเส้นตรงแสดงว่าแรงเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับส่วนที่ยืดออก หรือความเค้นเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเครียด

- จุด a ซึ่งเป็นจุดสูงสุดเรียกว่า ชิดจำกัดสัดส่วน (Proportional Limit) เป็นจุดสุดท้ายที่กราฟจะเป็นเส้นตรง หลังจากจุดนี้แล้ว ความเค้นจะไม่ปฏิกิริยาโดยตรงกับความเครียด คือกราฟจะไม่เป็นเส้นตรงนั่นเอง

- จุด b เรียกว่า ชิดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) เป็นจุดสุดท้ายที่ความยาวของวัตถุจะหดกลับเท่าเดิมได้อีก

- จุด c เรียกว่า จุดครากบน (Upper Yield Point) และจุด c' เรียกว่า จุดครากล่าง (Lower Yield Point)

- จากจุด c ถึง e เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติก (Plastic) นั่นคือวัตถุยืดออกอย่างถาวร ถ้าปล่อยแรงวัตถุจะไม่หดตัวกลับมาอยู่ในสภาพเดิมอีก

- จาก 0 ถึง d การยืดเกิดขึ้นทุกส่วนตลอดความยาวของแท่งทดสอบ (Gauge Length)

- จาก d ถึง e การยืดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เฉพาะบริเวณที่จะเกิดการหักหรือขาดเท่านั้น

- จุด d เรียกว่า จุดความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength)

- จุด e เรียกว่า จุดแตกหัก (Rupture Point or Breaking Point) เป็นจุดที่วัตถุขาดออกจากกัน

สำหรับโลหะที่เปราะเช่นเหล็กหล่อ กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดจะผิดไปจากเหล็กเหนียว เพราะเหล็กหล่อนั้นมีคุณสมบัติที่เปราะและแตกหักได้ง่าย มีส่วนผสมของคาร์บอนในเนื้อเหล็กมากจึงทำให้เหล็กหล่อนั้นมีความแข็งแรงจนทำให้การยืดตัวของเหล็กชนิดนี้จะได้ไม่มากนัก ก่อนที่เหล็กนี้จะขาดออกจากกัน อีกทั้งกราฟไม่ได้แสดงให้เห็นจุดยึดตัวนี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับไครบอลอย์

### 2.3.1 สารหล่อลื่น [9]

สารหล่อลื่นแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่สถานะ คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (Semi-Solid) และของแข็ง สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุดเพราะความสามารถในการหล่อลื่นและสร้างชั้นฟิล์มเพื่อแยกผิวสัมผัสออกจากกัน ของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นได้แก่ น้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำมันแร่ (Mineral Oil) และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Oil) ในการวิเคราะห์ประโยชน์ของน้ำมันจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของสารหล่อลื่นและสัดส่วนของสารเพิ่มคุณภาพ

#### 1. คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นมีอยู่หลายประการ ดังนั้นในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นจึงจำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นและในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นทั้งทางด้านฟิสิกส์และเคมีที่สำคัญ มีดังต่อไปนี้

- ความหนืด (Viscosity) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันระหว่างผิวสัมผัสและมีผลต่อการลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสด้วยความหนืดน้ำมันเป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปของความต้านทานการไหล ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดัน ในการใช้งานความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากความหนืดจะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัวโมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกันทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วยหน่วยวัดความหนืดระบบสากล (เมตรริก) มีหน่วยความหนืดเป็นเซนติสโตก (Centistoke; cSt) โดยที่  $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$  ที่อุณหภูมิการวัด 40 และ 100 องศาเซลเซียส

- ดัชนีความหนืด (Viscosity Index) น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จึงมีการกำหนดค่าดัชนีความหนืดขึ้น เพื่อใช้ในการแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมักจะมีดัชนีความหนืดที่ต่ำ แต่น้ำมันที่ความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยจะมีดัชนีความหนืดที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and Gravity) ความหนาแน่น หมายถึง มวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานกำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงก็อาจแสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่น และถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็แสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เหม่าหรือสารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

- จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and Fire Points) จุดวาบไฟ หมายถึง อุณหภูมิที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอและสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้การระเหยกลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่จะทำให้การลุกไหม้คงอยู่จึงมีลักษณะเป็นเปลวไฟและดับลงเองโดยทันทีเรียกว่า จุดวาบไฟ แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอุณหภูมิจะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยเป็นไอเพียงพอที่จะเกิดลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง อุณหภูมินี้เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นจะแปรผันกับความหนืด โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะมีจุดวาบไฟสูงด้วย

- จุดไหลเท (Pour Point) จุดไหลเท หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งน้ำมันทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็น ไขจะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากน้ำมันก็ไม่สามารถไหลตัวได้ ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน

- ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization Number) น้ำมันหล่อลื่นทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง สภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ จึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่เป็นด่างเข้าไปเพื่อให้สารที่เป็นกรดมีสภาพเป็นกลาง เมื่อน้ำมันหล่อลื่นไปใช้งานการตรวจสอบอัตราการสิ้นเปลืองสารที่เป็นด่างก็จะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น

- สี (Color) สีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีที่ต่างกัน ความแตกต่างกันของสีของน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกันทั้งวิธีการกลั่น กรรมวิธีการผลิต และชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้นสีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จจึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งาน ยกเว้นเป็นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

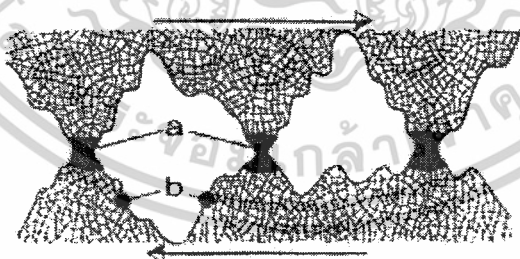
## 2. สารเพิ่มคุณภาพ

โดยทั่วไปน้ำมันสังเคราะห์จะมีคุณสมบัติดีกว่าน้ำมันแร่ แต่สำหรับการใช้งานบางประเภทต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์ก่อน โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปในสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภท

- สารป้องกันการสึกหรอ (Anti Wear Additives) เป็นสารที่ช่วยลดความเสียดทานและการสึกหรอภายใต้การหล่อลื่นแบบสภาวะการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (Boundary Lubrication) คือสภาวะที่ฟิล์มน้ำมันไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้ และมีผิวสัมผัสบางส่วนเกิดการสัมผัสกันโดยตรง สารป้องกันการสึกหรอจะถูกแบ่งออกเป็นสองประเภท ประเภทแรกเป็นสารที่ใช้ลดความเสียดทานและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานที่เบา สารนี้บางครั้งเรียกว่า สารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty Acids) และน้ำมันไขมัน (Fatty Oils) ประเภทที่สองเป็นสารลดความเสียดทานและการสึกหรอภายใต้สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า สารรับแรงกด

- สารรับแรงกด (Extreme Pressure (EP) Additive) ผิวสัมผัสสองผิวที่มีสารหล่อลื่นอยู่ เมื่อรับแรงกดจะเกิดแรงกดและแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสของสารหล่อลื่น สารรับแรงกดจะเป็นตัวช่วยในการเพิ่มคุณภาพการรับแรงกด โดยจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะทำให้เกิดชั้นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรง ดังรูปที่ 2.10 สารรับแรงกดทั่วไปจะเป็นสารประกอบของซัลเฟอร์ คลอรีน หรือฟอสฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน

- สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity Index Improvers) สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดมีหน้าที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเกิดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดจะทำหน้าที่ได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลน้ำมันจะยืดออกและทำปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 สารรับแรงกด EP ทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มรับแรง a. สารรับแรงกด (EP) b. เนื้อโลหะ[10]

- สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants) สารป้องกันการเกิดฟองทำหน้าที่ป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น เมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ สารนี้จะทำให้โมเลกุลของสารเข้าไปติดกับฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศเล็กๆเกิดการรวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้น ลอยขึ้นสู่ผิวและแตกออกในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารป้องกันออกซิเดชัน (Oxidation Inhibitors) เมื่อน้ำมันหล่อลื่นเกิดความร้อนและสัมผัสกับอากาศโดยตรง จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนที่เรียกว่าออกซิเดชันขึ้น ผลของการเกิดออกซิเดชันนั้นจะทำให้ค่าความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดตะกอน การใส่สารป้องกันออกซิเดชันจึงทำหน้าที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันให้น้อยลง

- สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors) ในระบบหล่อลื่นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยน้ำมันหล่อลื่นมีหลายชนิดแต่ที่สำคัญที่สุดมีสองชนิดก็คือการกัดกร่อนที่เกิดจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวของตัวเอง และการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารปนเปื้อนที่ถูกนำพาไปโดยน้ำมัน สำหรับสารป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้กันทั่วไปเป็นสารตัวเดียวกับสารป้องกันออกซิเดชัน

- สารลดจุดไหลเท (Pour Point Depressants) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดไขให้เกิดที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จะช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้มากขึ้น น้ำมันหล่อลื่นเมื่อเติมสารลดจุดไหลเทจะทำให้ น้ำมันเกิดไขที่อุณหภูมิต่ำลงประมาณ 11 ถึง 17 องศาเซลเซียส

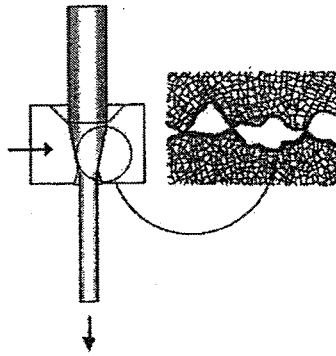
- สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and Dispersants) ใช้เพื่อชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นงานและกระจายมันให้รวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ เพื่อไม่ให้โคลนหรือตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่น

- สารป้องกันสนิม (Rust Inhibitor) โดยทั่วไปจะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี เกิดเป็นชั้นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกัน ให้น้ำหรือความชื้นทำปฏิกิริยากับผิวโลหะ

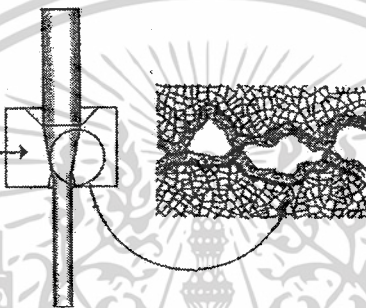
### 3. ขอบเขตของสารหล่อลื่น [10]

- สภาวะไร้สารหล่อลื่น (Non Lubrication) สภาวะไร้สารหล่อลื่นผิวสัมผัสทั้งคู่จะสัมผัสกันโดยตรง และมีผลทำให้เกิดการสึกหรออย่างรุนแรงบนผิวหน้าสัมผัส และเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ

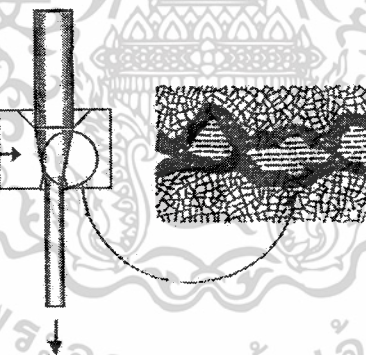
- สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์รี (Boundary Lubrication) สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์รีเป็นสภาวะที่ฟิล์มน้ำมันไม่สามารถรักษาสภาพให้คงตัวอยู่ได้และบางส่วนเกิดการสัมผัสกันโดยตรง จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการดูดกลืนอะตอมทำให้เกิดชั้นฟิล์มขึ้นมาปกคลุมพื้นที่โดยส่วนใหญ่ ดังนั้นระหว่างการลื่น ไกลผิวเหล่านี้จะถูกขจัดทดแทนเนื้อวัสดุ เนื่องจากค่าความต้านทานต่อการเลื่อนตัวที่ต่ำกว่าเนื้อวัสดุสัมผัส และจะเกิดผิวชิ้นใหม่ขึ้นมาทดแทนผิวหน้าเดิมไปเป็นระยะๆ



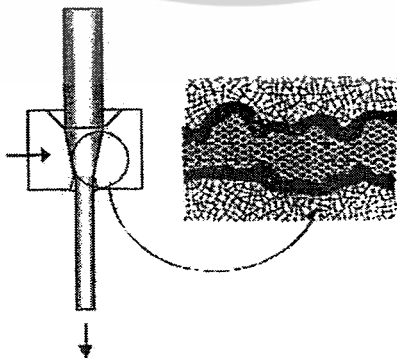
รูปที่ 2.11 สภาวะไร้อาหารหล่อลื่น [10]



รูปที่ 2.12 สภาวะการหล่อลื่นแบบบาวนด์รี [10]



รูปที่ 2.13 การหล่อลื่นแบบกิ่งสมบูรณ์ [10]



รูปที่ 2.14 การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นผิวหน้าเหล่านี้จึงทำหน้าที่ปกป้องเนื้อวัสดุคู่สัมผัสจากการสึกหรอได้ หรือในกรณีที่สารหล่อลื่นไม่เพียงพอจะเกิดผิวชั้นฟิล์มเหล่านี้ขึ้นมาใหม่ได้

- การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed Film Lubrication) ภายใต้การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์จะมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกเพียงบางส่วนและมีบางส่วนที่เนื้อวัสดุจะผสมโดยตรง กระบวนการทางเคมีหรือทางกายภาพจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มใหม่ที่ผิวสัมผัสมีความแข็งแรงต่อการเสียดตัวต่ำ เมื่อมีแรงกระทำตั้งฉากบางส่วนที่ถูกรองรับ โดยฟิล์มน้ำมันและบางส่วนโดยผิวเนื้อวัสดุ ซึ่งสภาพการหล่อลื่นแบบนี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอต่ำ

- การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full Fluid Film Lubrication) เป็นสภาวะการหล่อลื่นที่สารหล่อลื่นเกิดชั้นฟิล์มน้ำมันหนาพอที่แยกผิววัสดุทั้งสองออกจากกันในขณะที่มีการเคลื่อนที่ บางครั้งเรียกว่าการสึกหรอเป็นศูนย์ ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบนี้แรงกระทำจะถูกรองรับด้วยสารหล่อลื่นโดยตรงผิวออกจากกันสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นทั้งหมดจึงมีเฉพาะสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสารหล่อลื่นเท่านั้น การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์จะเกิดขึ้นโดยการใช้การปั๊มอัดสารหล่อลื่นเข้าไป

### 2.3.2 การสึกหรอ

#### 1. กลไกการสึกหรอ [11]

การสึกหรอเป็นความเสียหายที่เกิดจากการขัดสีของพื้นผิวคู่สัมผัส หรือเนื่องจากผิววัสดุเกิดการหลุดจากการถูกแรงกระทำขณะเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการสูญเสียเนื้อบริเวณผิวสัมผัสนั้น พฤติกรรมการสึกหรอมีความซับซ้อนเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง การสึกหรอเกิดได้หลายรูปแบบ เช่น การสึกหรอจากการไถลระหว่างผิว การขัดถูของผิวสัมผัส การชนของอนุภาคขนาดเล็ก หรือการชนของของเหลวกับพื้นผิว และนอกจากนั้นการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางด้านโครงสร้างจุลภาคของผิว ชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของแรง ปฏิกริยาทางเคมี และอุณหภูมิ การสึกหรอที่พบมักจะมีหลายกลไกเกิดพร้อมกัน ดังนั้นการทำการทดลองหรือวิเคราะห์กลไกการสึกหรอเพื่อหาวิธีป้องกันและแก้ไขจึงต้องเข้าใจรูปแบบกลไกการสึกหรอและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง กลไกการสึกหรอแบบเป็น 4 กลไก คือ การสึกหรอแบบเชื่อมติด (Adhesive Wear) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Erosive Wear) และการสึกหรอแบบความล้าผิว (Surface Fatigue Wear)

- การสึกหรอแบบการเชื่อมติด (Adhesive Wear) ลักษณะความเสียหายจากการเชื่อมติดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของผิวสัมผัส และมีแรงกระทำที่มากพอจนยอดผิวสัมผัสทั้งสองมีความ

เกินสูงมากทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าเสียรูปและเกิดการเชื่อมยึดในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ต่อไปจุดที่  
เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งในเวลาที่รีบด่วนเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดกันจะเกิดการฉีกขาดหลุดออก การสึกหรอแบบนี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของคู่วัสดุที่สัมผัสกัน และพื้นที่ที่สัมผัสของโลหะ ในกรณีที่เป็นโลหะต่างชนิดกันผิวของโลหะที่อ่อนกว่าจะหลุดไปติดอยู่ที่ผิวแข็งกว่าจนผิวทั้งสองไม่สามารถแตกต่างกัน การเชื่อมติดของผิวเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งและมีการยึดติดสะสมเป็นชั้นการหล่อลื่นที่มีประสิทธิภาพสามารถกั้นการสัมผัสของผิวโลหะก็จะเกิดการสึกหล่อแบบนี้ได้น้อย

- การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) ลักษณะความเสียหายเกี่ยวข้องกับการตัดหรือเฉือนของผิววัสดุ โดยการขูดของอนุภาคที่แข็งกว่าหรือมีขอบคมจนทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ หรืออาจเกิดขึ้นงานที่หลุดออกผ่านการขัดสีจนอนุภาคแข็งขึ้นจากกลไกของความเครียดแข็ง (Strain Hardening) หรืออนุภาคแข็งที่ติดมากับสารหล่อลื่นที่มีสิ่งเจือปนขูดบนผิวสัมผัส วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจะมีโอกาสเกิดการสึกหรอแบบนี้ได้น้อย

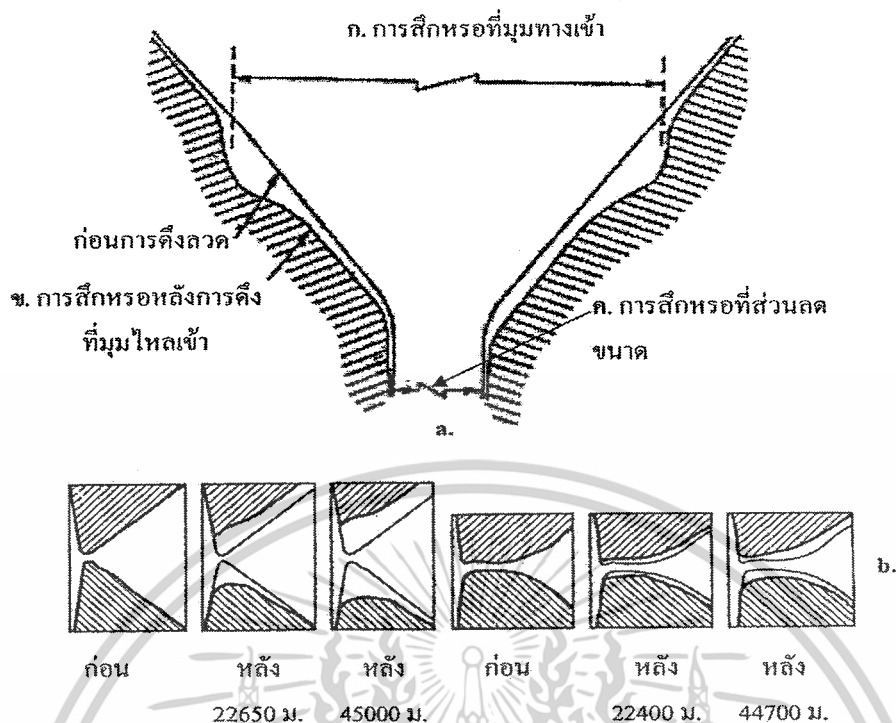
- การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosion Wear) การสึกหรอแบบการกัดกร่อนส่วนมากจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างผิวของแข็งและของไหล (Tribo-Chemical Reaction) ผิวของวัสดุทั้งชิ้นงานและแม่พิมพ์มักจะมีชั้นบางๆของออกไซด์ปกคลุมผิว ซึ่งถ้าความหนาของแรงยึดเกาะไม่สูงพอ มีโอกาสที่จะแตกออกหรือถูเสียดสีทำให้การสึกหรอที่กำลังจะเกิดขึ้นมีความรุนแรง นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีแบบไม่มีสารหล่อลื่นจะเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสร้างฟิล์มออกไซด์บางๆขึ้นอีกบนผิวซึ่งจะแตกออกเมื่อเกิดการเสียดสีขึ้น ดังนั้นการสูญเสียวัสดุอาจมีสาเหตุมาจากกระบวนการทางเคมีและทางกลพร้อมกัน

- การสึกหรอแบบความล้าผิว (Fatigue Wear) กลไกนี้จะเกิดในสภาวะต้องรับภาระซ้ำๆ (Cyclic Stress) ทำให้เกิดการรอยแตกของผิวในระดับจุลภาคภายใต้ผิวโลหะ ช่องว่างจะเกิดการขยายตัวภายใต้การรับภาระอย่างต่อเนื่อง จนถึงตำแหน่งวิกฤตที่ช่องว่างขยายไปชนกัน เกิดการแตกออกเป็นเกร็ดหรือชิ้นของผิวโลหะ ซึ่งบางที่เรียกว่า การสึกหรอแบบแยกชั้น (Delamination Wear)

## 2. การสึกหรอที่เกิดขึ้นในกระบวนการดึงลวด [6]

ลักษณะการสึกหรอที่เกิดในกระบวนการดึงลวดจะเกิดได้ทั้งสภาพที่ผิวสัมผัสมีการหล่อลื่นและไม่มีหล่อลื่น การสึกหรออาจเกิดร่วมกันได้หลายแบบ การใช้สารหล่อลื่นที่เหมาะสมจะช่วยลดการสึกหรอได้มากเพราะทำให้การสัมผัสโดยตรงกับผิวลดลง แต่ถ้าสารหล่อลื่นเกิดการหนีตัวหรือระบบที่ใช้ในการหล่อลื่นไม่ทำงานเท่าที่ควร จะทำให้ผิวโลหะแนบติดกันจนอาจเกิดการเชื่อมติดได้ นอกจากนี้ตัวแปรอื่นที่ส่งผลต่อการสึกหรอ ได้แก่ ความร้อนจากการเปลี่ยนรูปและแรงเสียดทาน อายุของสารหล่อลื่น แรงไม่ได้ศูนย์กลาง (Out – off Center Loading) นอกจากนี้การปรับค่าความหยาบของผิวชิ้นงานให้เหมาะสมเพื่อการเก็บรักษาสารหล่อลื่นได้ ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดการสึกหรอในกระบวนการดึงลวดได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การสึกที่แม่พิมพ์ดีดอลูมิเนียม

a. รูปแบบการสึกหรอแม่พิมพ์ดีดอลูมิเนียม [6]

b. การสึกในแม่พิมพ์ดีดอลูมิเนียมกับระยะทางในการคั่ง [3]

ก. การสึกหรอที่รัศมีโค้งที่ปากตาย (Bell Radius) เกิดขึ้นจากการกระทบของอลูมิเนียมกับแม่พิมพ์ดีดอลูมิเนียม การสึกหรอที่มากจะส่งผลให้วัสดุเกิดการไหลตัวไม่ทันทำให้ผิวอลูมิเนียมเกิดการปอก

ข. การสึกหรอที่ครึ่งมุมไหลเข้า  $\alpha$  เป็นผลให้ครึ่งมุมไหลเข้า  $\alpha$  เพิ่มขึ้นกว่ามุมที่เหมาะสม ส่งผลทำให้แรงในการคั่งอลูมิเนียมมากขึ้น

ค. การสึกหรอที่ส่วนลดขนาด (Die Bearing) การสึกหรอจะเกิดขึ้นมากบริเวณนี้เพราะเป็นส่วนกำหนดขนาดสำเร็จ การสึกหรอที่ส่วนนี้จะส่งผลต่ออลูมิเนียมหลังการคั่งมากที่สุดเพราะเป็นส่วนที่กำหนดขนาด รูปทรงอลูมิเนียมหลังการคั่ง และผิวอลูมิเนียมสำเร็จ

## 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิว

การเคลือบผิวเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของผิวบางประการให้กับวัสดุ และเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอให้กับพื้นผิวที่ง่ายต่อการสึกหรอ การเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสำคัญที่สุดขั้นตอนหนึ่งในการผลิตชิ้นส่วนหรือชิ้นงานทางวิศวกรรม ในปัจจุบันเทคโนโลยีการชุบเคลือบผิวมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละกรรมวิธีจะมีข้อดี ข้อเสีย และมีความเหมาะสมที่จะใช้งานแตกต่างกัน ประโยชน์ที่ได้จากการทำการเคลือบผิว ช่วยปรับปรุงสถานะการทำงานให้มีความสามารถที่ดีขึ้น

เนื่องจากการเคลือบผิวเครื่องมือและวัสดุชิ้นงานจะช่วยปรับสถานะการทำงานให้เหมาะสมและเพิ่มไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขีดจำกัดในการทำงานด้านต่างๆมากขึ้น เช่น ลดความเสียหายระหว่างผิวสัมผัส เพิ่มความสามารถในการทำงานที่อัตราเร็วสูงและเพิ่มความสามารถการทำงานที่อุณหภูมิที่สูง ช่วยให้อายุการทำงานของเครื่องมือใช้ได้นานขึ้น โดยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ และเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะบางอย่าง เช่น ความสามารถในการนำไฟฟ้าหรือเป็นฉนวนความสามารถในการนำแม่เหล็กไฟฟ้า และเพื่อความสวยงามของพื้นผิวในงานประดับตกแต่ง

### ประเภทของการเคลือบผิว

กรรมวิธีการเคลือบผิวในแม่พิมพ์ดิ่งลวดยังคงมีข้อจำกัดอยู่มาก เพราะในแม่พิมพ์ดิ่งลวดพื้นที่ต้องการเคลือบผิวจะเป็นพื้นที่บริเวณรูใน แม่พิมพ์ดิ่งลวดที่มีรูในเล็กมากจะประสบปัญหาในการเคลือบผิวมากหรืออาจไม่สามารถเคลือบได้ แต่ในแม่พิมพ์ดิ่งลวดที่มีรูในโตก็สามารถเคลือบผิวได้ง่าย กรรมวิธีการชุบเคลือบผิวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและทำได้จริงในปัจจุบันซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ การเคลือบผิว (Surface Coating) และการชุบแข็งเฉพาะผิว (Surface Hardening)

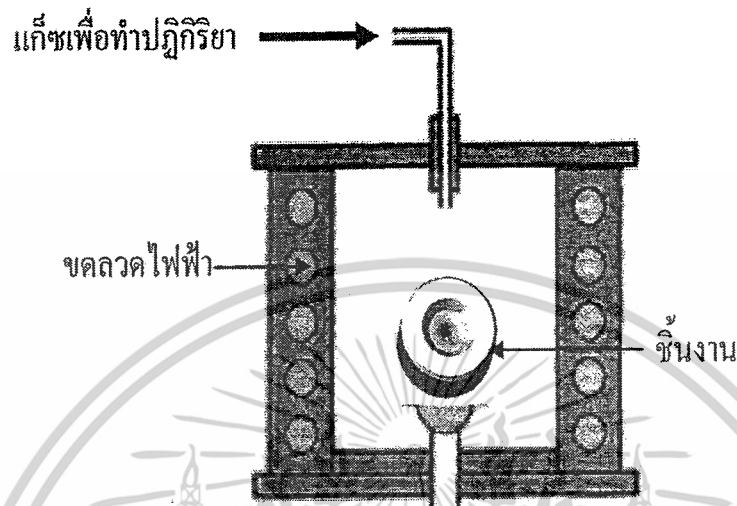
#### 1. การเคลือบผิว

การเคลือบผิว หมายถึง การเอาวัสดุอื่นมาเคลือบติดกับผิวชิ้นงานเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapour Deposition, CVD) การเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) [13] การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (Thermal Spray)

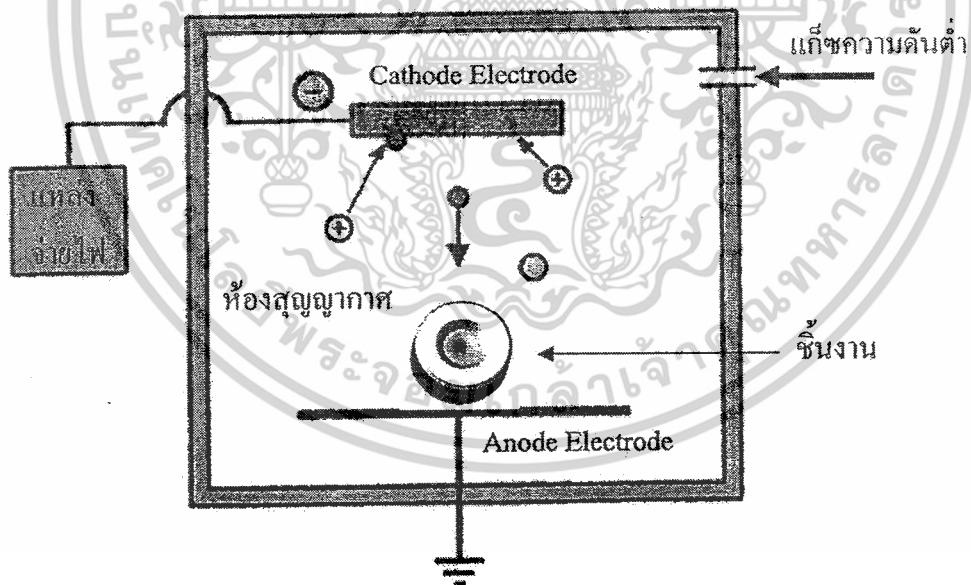
ก. การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapour Deposition, CVD) การเคลือบผิวด้วยไอเคมีเป็นกรรมวิธีการเคลือบผิวโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมีของสารในสถานะที่เป็นไอแก๊ส ปฏิกิริยาของสารในสถานะแก๊สจะแพร่เข้าไปในเนื้อวัสดุพื้นภายใต้ความร้อนและสร้างชั้นผิวเคลือบบนชิ้นงานการเกาะยึดของชั้นฟิล์มกับผิววัสดุพื้นจึงมีความแข็งแรง สามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามแหล่งพลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น ไฟฟ้า พลาสมา และเลเซอร์ จากรูปที่ 2.16 เป็นการเคลือบผิวด้วยไอเคมีโดยใช้ไฟฟ้า ในการใช้วิธีพลาสมาจะช่วยเร่งปฏิกิริยาของสารทำให้การรวมตัวของแก๊สในอัตราที่มากขึ้นจึงได้เป็นชั้นฟิล์มที่หนาขึ้น ลักษณะเด่นของกรรมวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมีจะมีความสม่ำเสมอในชั้นฟิล์มดี สามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มได้ง่ายและการยึดเกาะของชั้นฟิล์มกับผิววัสดุพื้นดี แต่ผิวฟิล์มที่ได้จากกรรมวิธีนี้จะเป็นฟิล์มบางไม่เกิน  $10 \mu\text{m}$  และการใช้อุณหภูมิของกระบวนการสูงเป็นระยะเวลานานจึงมักเกิดการบิดตัวของชิ้นงานมาก หลังการเคลือบผิวจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพผิวด้วยความร้อนอีกครั้ง

ข. การเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (Physical Vapour Deposition, PVD) กรรมวิธีนี้เป็นกรรมวิธีที่ทำให้วัสดุผิวเคลือบกลายเป็นไอหรือเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา ก่อนที่จะกลั่นตัวลงบนผิวหน้าและเข้าไปฝังตัวลงในเนื้อวัสดุ สร้างเป็นชั้นฟิล์มขึ้นมาบนชิ้นงานภายใต้เงื่อนไขสภาวะสุญญากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรม นอกจากการเคลือบเพื่อสร้างผิวให้เหมาะกับการทำงานเฉพาะอย่างแล้วยังทำการเคลือบเพื่อให้มีสีสวยงามอีกด้วย การเคลือบผิวแบบไอกายภาพสามารถแบ่งตามวิธีการที่ใช้ในการเปลี่ยนวัสดุผิวเคลือบให้



รูปที่ 2.16 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (CVD) โดยใช้พลังงานไฟฟ้า [10]



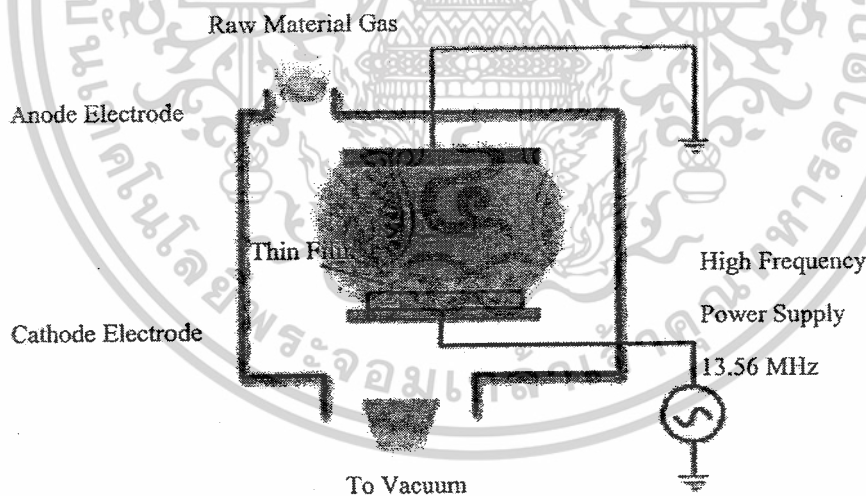
รูปที่ 2.17 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไอกายภาพ (PVD) โดยใช้พลังงานไฟฟ้า [10]

กลายเป็นไอ คือ วิธีทางความร้อน และวิธีที่ไม่ใช่ความร้อน จากรูปที่ 2.17 เป็นการเคลือบผิวแบบไอกายภาพวิธีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ใช้ความร้อนซึ่งเป็นที่นิยมในงานอุตสาหกรรม โดยจ่ายไฟขั้วลบเข้ากับขั้วของแข็งวัสดุเคลือบ (Cathode Electrode) และวางชิ้นงานบนฐานอาโนดที่ต่อกับสายดิน ป้อนก๊าซอาร์กอนด้วยความดันต่ำเข้าภายในสภาวะสุญญากาศ ก๊าซอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (+) วิ่งชนของแข็งวัสดุเคลือบที่เป็นขั้วลบด้วยความเร็วสูง ทำให้อะตอมถูกกระแทกและหลุดออกมาวิ่งไปเกาะกับชิ้นงานจนโตขึ้นเรื่อยๆจนกลายเป็นผิวเคลือบ

ค. การเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) การเคลือบผิวแบบ DLC จะใช้วัสดุเชิงประกอบของคาร์บอนในการเคลือบ โดยทั่วไปโครงสร้างของฟิล์ม DLC จะมีส่วนผสมของเพชร ( $sp^3$ ) กราไฟต์ ( $sp^2$ ) และ C-H หรืออยู่ในลักษณะรูปอสัณฐานมีรูปร่างผลึกที่ไม่แน่นอนแน่นอน DLC เป็นฟิล์มที่มีความแข็งสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำกว่า  $0.1 \mu m$  มีความต้านทานการสึกหรอได้ดี นอกจากนี้แล้วผิวเคลือบที่ได้จาก DLC สามารถเคลือบลงบนพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ดี และไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารต่างๆจึงทำให้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การเคลือบผิวบนฮาร์ดดิสก์ หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลต่างๆ การเตรียมฟิล์ม DLC สามารถเตรียมได้โดยใช้กรรมวิธี CVD และกรรมวิธี PVD แต่กรรมวิธี PVD ซึ่งอาศัยพลาสมานั้นเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากฟิล์มจะเกิดภายใต้ความดันต่ำและอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ส่วนสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มนั้นมักนิยมใช้ในแก๊สไฮโดรคาร์บอนผสมกับแก๊สไฮโดรเจน เมื่อเกิดการแตกตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอนจะทำให้เกิดฟิล์ม DLC เคลือบบนผิวชิ้นงาน ซึ่งพลังที่ทำให้เกิดการแตกตัว



รูปที่ 2.18 กระบวนการการเคลือบผิวด้วยฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) [13]

อาจมาจากไฟฟ้ากระแสตรงหรือไมโครเวฟดังรูปที่ 2.18 การเพิ่มประสิทธิภาพของชั้นฟิล์ม DLC ให้สามารถเกาะยึดติดชิ้นงานได้ดีโดยใช้ฟิล์มเคลือบชนิดอื่นเป็นขั้วชั้นกลาง เช่น SiC แล้วจึงเคลือบผิวด้วย DLC อีกครั้ง

ง. การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (Thermal Spray) มีความหนาตั้งแต่ 50  $\mu\text{m}$  ขึ้นไปวิธีการเริ่มจากการให้ความร้อนกับวัสดุที่นำมาเคลือบ โดยวัสดุเคลือบจะมีทั้งลักษณะผงและลวด จากนั้นใช้ความร้อนจากแก๊สจนกระทั่งเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวเคลือบยึดติดกับผิวชิ้นงาน

## 2. การชุบแข็งเฉพาะผิว

การชุบแข็งเฉพาะผิว หมายถึง การปรับปรุงคุณสมบัติที่ผิวของชิ้นงานให้มีความแข็งมากขึ้น โดยเฉพาะในงานโลหะเพื่อให้ทนต่อการสึกหรอ การเสียดสีและเพื่อให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ลักษณะของกรรมวิธีจะเป็นการเปลี่ยนชั้นผิวสัมผัสให้เป็นสารอีกชนิดหนึ่ง โดยอาจจะใช้กระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางโลหะวิทยา และการใช้ส่วนผสมทางเคมีของผิวชิ้นงานแตกต่างกันไปจากเดิม ตัวอย่างของเทคโนโลยีกลุ่มนี้ได้แก่ การชุบแข็งคาร์บูไรซิง (Carburizing) การชุบแข็งไนไตรดิง (Nitriding) การชุบแข็งคาร์โบไนไตรดิง (Carbonitriding) กรรมวิธีพลาสมาไนไตรดิง (Plasma Nitriding) เป็นต้น

ก. กรรมวิธีการชุบผิวคาร์บูไรซิง (Carburizing) เป็นกระบวนการสร้างผิวแข็งสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มคาร์บอนที่ชั้นผิวหน้าของวัสดุ ชั้นผิววัสดุจะมีคาร์บอนสูงขึ้นจึงมีความแข็งมากขึ้น เมื่อผ่านกระบวนการนี้ชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้แต่อาจเกิดการบิดงอในกรณีงานที่บางและใช้อุณหภูมิสูง การเพิ่มปริมาณคาร์บอนทำได้โดยวิธีการแพ็คคาร์บูไรซิง โดยการนำวัสดุที่จะผ่านกระบวนการเข้าอัดร่วมกับวัสดุที่มีคาร์บอนสูงก่อนและให้ความร้อนในเตาร่วมกัน เมื่อผ่านกระบวนการเหล็กกล้าคาร์บอนจะมีคาร์บอนเพิ่มขึ้น 0.6 - 1.2 %

ข. กรรมวิธีการชุบผิวแข็งไนไตรดิง (Nitriding) เป็นกรรมวิธีการชุบผิวแข็งเฉพาะที่กรรมวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องมือ เฟือง แม่พิมพ์โลหะ และแม่พิมพ์พลาสติก โดยทำให้ไนโตรเจนแพร่กระจายเข้าไปบนผิวหน้าของโลหะพื้น ไนโตรเจนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะพื้นเกิดเป็นสารประกอบเหล็กไนไตรด์ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอ และมีความแข็งที่ผิวสูงขึ้นกว่าเดิม โดยกรรมวิธีนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องที่จะทำให้ไนโตรเจนเข้าไปแพร่กระจายลงในเนื้อเหล็กมากขึ้นและเกิดปฏิกิริยาแบบสมบูรณณ์ ลักษณะเด่นของกรรมวิธีนี้คือ สามารถชุบผิวแข็งได้เฉพาะที่ ความหนาของชั้นฟิล์มลึกถึง 125  $\mu\text{m}$  สามารถชุบผิวแข็งกับวัสดุเหล็กทุกชนิด และช่วยลดความเสียหายของพื้นผิวได้เป็นอย่างดี ส่วนข้อจำกัด คือ การใช้อุณหภูมิในช่วง 480-590°C จะทำให้อาจเกิดการบิดตัวของชิ้นงานหลังการชุบได้ และใช้ระยะเวลาในการชุกรานจึงเหมาะกับการทำงานปริมาณมาก

ค. กรรมวิธีการชุบผิวแข็งคาร์โบไนไตรดิง (Carbonitriding) เป็นวิธีผสมระหว่างกรรมวิธีการชุบผิวคาร์บูไรซิงและกรรมวิธีการชุบผิวแข็งไนไตรดิง โดยให้ความร้อนชิ้นงาน 800-870°C ภายใต้เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นหน้าไปไซประโยชน์ขนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศไฮโดรคาร์บอนและแอมโมเนียเป็นเวลาหลายชั่วโมงในสุญญากาศ และทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วตามด้วยการอบคืนตัว การบิดเบี้ยวของชิ้นงานน้อยกว่ากรรมวิธีการชุบผิวคาร์บูไรซิ่ง ลักษณะเด่นจากกรรมวิธีนี้ผิวฟิล์มจะมีความแข็งมาก มากกว่า 70 HRC มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนได้สูง สามารถชุบผิวแข็งเฉพาะที่ได้ความลึกผิวฟิล์ม 12.5-50  $\mu\text{m}$  และมีความสม่ำเสมอดี ข้อจำกัดของกรรมวิธี คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูง เนื่องจากผิวที่ได้หยาบ ใช้อุณหภูมิสูงในช่วง 500-1150 $^{\circ}\text{C}$  อาจเกิดการบิดตัวหลังชุบได้มาก และค่าใช้จ่ายในการชุบมากกว่าการชุบผิวแข็งคาร์โบไนไตรดิ่ง

ง. กรรมวิธีพลาสมาไนไตรดิ่ง (Plasma Nitriding) กรรมวิธีพลาสมาไนไตรดิ่งจะทำการแพร่ธาตุไนโตรเจนลงบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยใช้บรรยากาศพลาสมาที่กระแสไฟฟ้าที่คล้ายประจุออกมา โดยนำชิ้นงานที่ทำการชุบผิวแข็งลงในภาชนะที่มีประจุไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 300-1500 โวลต์ และความดันประมาณ 0.1-10 torr แก๊สจะแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและไนโตรเจน ลักษณะเด่นของกระบวนการนี้ คือ การเกิดขึ้นแบบเดียวกันทั้งหมดบนพื้นที่ผิวชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ทฤษฎีการคำนวณชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

### 3.1 ความเร็วที่ใช้ดึง

ในที่นี้ใช้ความเร็วในการดึงลวด 0.12 เมตรต่อวินาที เนื่องจากในการดึงลวดความเร็วเป็นองค์ประกอบสำคัญของผิวลวด ถ้าใช้ความเร็วในการดึงสูงจะทำให้ผิวลวดค่อนข้างหยาบ

### 3.2 การคำนวณแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

การคำนวณแรงในการดึงขึ้นรูปนี้เพื่อจะทราบแรงดึงในทางทฤษฎี และใช้อ้างอิงกับแรงที่ได้จากการทดลองว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งจากผลการทดลองจะมีค่าแรงที่ใกล้เคียงกันยกเว้นกรณีที่เกิดการเชื่อมเย็นจะใช้แรงดึงที่สูงมาก ในการทดลองจะใช้ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ค่า Ultimate Tensile Strength = 419.7 N/mm<sup>2</sup> มีมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Approach Angle) ( $2\alpha$ ) = 12°, Semi Angle ( $\alpha$ ) = 6°

#### 3.2.1 อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวด [1]

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100 \quad (3.1)$$

$A_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm<sup>2</sup>]

$A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm<sup>2</sup>]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดก่อนดึง 2.40 mm

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดหลังดึง 2.30 mm

พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.2)$$

$$A_0 = \frac{\pi 2.40^2}{4}$$

$$A_0 = 4.5239 \text{ mm}^2$$

พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_1 = \frac{\pi 2.30^2}{4}$$

$$A_1 = 4.1547 \text{ mm}^2$$

อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวด

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\%R = \frac{4.5239 - 4.1547}{4.5239} \times 100$$

$$\%R = 8.16 \approx 9$$

### 3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในงานดึงขึ้นรูปและงานอัดขึ้นรูปขึ้นงาน [3]

Process	Solid Forward Extrusion	Hollow Forward Extrusion	Drawing of Bar and Tubes	Drawing of Ironing	Drawing of Hollow Bodies
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $\mu$ )	0.04-0.08	0.1-0.125	0.02-0.05	0.02-0.07	0.02-0.08

### 3.2.3 การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวด

แรงที่ใช้ในการดึงลวด ใช้การคำนวณโดย Siebel's Method [2]

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh} \quad (3.5)$$

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

เมื่อ

$$A_0 = \text{พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง} [\text{mm}^2]$$

$$A_1 = \text{พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง} [\text{mm}^2]$$

$$\sigma_{f,m} = \text{ความเค้นในแนวแกน ความเค้นของการไหลเฉลี่ย} [\text{N/mm}^2]$$

$$\mu = \text{สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Coulomb's coefficient of friction}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์อันใดจากการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 & (\mu \approx 0.035) \\
 \alpha & = \text{ครึ่งมุม ไทลเข้าแม่พิมพ์} \\
 \hat{\alpha} & = \tan \alpha \\
 \text{เมื่อ} \\
 \hat{\alpha} & = 0.1051 \\
 \varphi_{\max} & = \text{ความเครียด} \\
 \varphi_{\max} & = \ln \frac{A_0}{A_1} \tag{3.6}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_{\max} & = \ln \left( \frac{4.5239}{4.1547} \right) \\
 \varphi_{\max} & = 0.08513 \\
 \text{เมื่อ} \\
 \sigma_{f,m} & = \text{ความเค้นของการไหลเฉลี่ย ความเค้นในแนวแกน [N/m}^2\text{]} \\
 \sigma_{f,m} & = \frac{1}{2} (\sigma_{f,o} + \sigma_{f,s}) \\
 \sigma_{f,m} & = \frac{1}{2} (344.8 + 365.2) \\
 \sigma_{f,m} & = 355 \text{ N/m}^2
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

แรงในการดึงขึ้นรูป

$$F_{D,tot} = A_1 \times \sigma_{f,m} \left[ \left( 1 + \frac{2\mu}{\sin 2\mu} \right) \varphi_{\max} + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right] \tag{3.8}$$

$$F_{D,tot} = 4.1547 \times 355 \left[ \left( 1 + (2) \frac{0.08}{0.208} \right) (0.08513) + \frac{2}{3} (0.1051) \right]$$

$$F_{D,tot} = 325.487$$

### 3.3 การออกแบบเพลลา [14]

เพลลาอาจจะรับแรงดึง แรงอัด แรงบิด หรือแรงตัด หรือแรงหลายอย่างรวมกันก็ได้ ดังนั้นการคำนวณจึงต้องใช้ความเค้นผสมเข้าช่วย แรงเหล่านี้ยังอาจจะมี การเปลี่ยนแปลงขนาดตลอดเวลาทำให้เพลลาเสียหายเพราะความล้าได้ ฉะนั้นจึงต้องออกแบบเพลลาให้มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานในลักษณะนี้ นอกจากนั้นเพลลา ยังต้องมีความแข็งแรง (rigidity) เพียงพอเพื่อลดมุมบิดภายในเพลลาให้อยู่ในขีดจำกัดที่เหมาะสม ระยะโก่ง(deflection) ของเพลลา ก็เป็นสิ่งสำคัญในการเลือกสารเป็นเอกลักษณ์ที่ส่งมอบเวลาให้กับวิศวกรเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผู้จัดทำหน้าไปเซปาระไฮชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดขนาดเพลาลงเช่นเดียวเพราะถ้าเพลามีระยะ โกงมากก็จะเกิดการแกว่งขณะหมุน ทำให้ความเร็ววิกฤต(critical speed) ของเพลาลดลง ซึ่งอาจทำให้เพลามีการสั่นอย่างรุนแรงในขณะที่ความเร็วของเพลาลงเข้าใกล้ความเร็ววิกฤตนี้ได้ ระยะ โกงนี้ยังมีผลต่อการเลือกชนิดของที่รองรับเพลาลง เช่น บอลเบริง(ball bearing) ก็ต้องมีการยื้องแนว(misalignment) ในการใช้งานที่เหมาะสมกับเพลาลงด้วย

### 3.3.1 วัสดุเพลาลง

วัสดุที่ใช้สำหรับทำเพลาลงทั่วไปคือเหล็กกล้าละมุน (mild steel) แต่ถ้าต้องการให้มีความเหนียวและความทนทานต่อแรงกระตุกเป็นพิเศษแล้วมักจะใช้เหล็กกล้าผสมโลหะอื่นทำเพลาลง เช่น AISI 1374 3140 4150 4340 เป็นต้น เพลาลงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 90 mm มักจะกลึงมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งผ่านการรีดร้อน อย่างไรก็ตามเพื่อให้เพลาลงมีราคาถูกลง ผู้ออกแบบควรพยายามเลือกใช้เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาก่อนที่จะเลือกใช้เหล็กกล้าชนิดอื่น

### 3.3.2 ขนาดของเพลาลง

เพื่อให้เพลาลงมีมาตรฐานเหมือนกัน องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศจึงได้กำหนดมาตรฐานของเพลาลงซึ่งเป็นขนาดระบุ (nominal size) ใน ISO/R 775 – 1969 เอาไว้สำหรับให้ผู้ออกแบบเลือกใช้ทั้งนี้เพื่อให้สามารถหาซื้อได้ทั่วไป นอกจากนี้ยังเป็นขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของเบริงที่ใช้รองรับเพลาลงด้วยขนาดระบุของเพลาลงได้จากตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3.2 ขนาดระบุของเพลาลงตามมาตรฐาน ISO/R 775 – 1969

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น mm				
6	25	70	130	240
7	30	75	140	260
8	35	80	150	280
9	40	85	160	300
10	45	90	170	320
12	50	95	180	340
14	55	100	190	360
18	60	110	200	380
20	65	120	220	

### 3.3.3 การพิจารณาในการออกแบบ

การคำนวณหาขนาดของเพลาลงที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ในบางครั้งการหาขนาดเพลาลงเพื่อให้เพลาลงทนต่อแรงที่มากกระทำอย่างเฉียดไม่เป็นการเพียงพอ เช่น ในกรณีของเพลาลงเบี่ยง (cam shaft) ในเครื่องยนต์สันดาปภายในต้องการให้มีตำแหน่งที่เที่ยงตรง ดังนั้นมุมบิดของเพลาลงที่เกิดขึ้นขณะใช้งานจะต้องมีค่าไม่มากกว่าที่กำหนดไว้ เป็นต้น นั่นคือเพลาลงจะต้องมีความแข็งแรงอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในพิภคที่ต้องการ ถ้ามุมบิดไปมากนอจะเสียความเที่ยงตรงทางด้านตำแหน่งแล้วยังก่อให้เกิดความสั่นสะเทือนซึ่งมีผลทำให้เฟืองและแบริงที่รองรับเพลายู่เกิดความเสียหายได้มากขึ้น

ถึงแม้ว่าจะไม่มีมาตรฐานสำหรับพิภคของมุมบิดของเพลาไว้ก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้วมักจะให้มุมบิดของเพลาในเครื่องจักรกลทั่วไปไม่เกิน  $0.3^\circ$  ต่อความยาว 1 m [15] สำหรับเพลาส่งกำลังทั่วไปอาจจะให้มีมุมบิดได้ถึง  $1^\circ$  ต่อความยาว 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลา ในกรณีของเพลาลูกเบี้ยวสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในแล้วจะให้ให้มีมุมบิดได้ไม่เกิน  $0.5^\circ$  ตลอดความยาวของเพลา

ความแข็งแรงที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ ความแข็งแรงทางด้านระยะโก่ง เพราะจะต้องใช้ระยะโก่งของเพลาที่อยู่ภายใต้แรงที่อยู่ภายนอกเป็นตัวสำคัญในการกำหนดระยะเบียด (clearance) ระหว่างล้อ สายพาน เฟือง โครงของเครื่องจักร ตลอดจนการเลือกชนิดของแบริงสำหรับรองรับเพลาให้เหมาะสม ถ้าเพลามีระยะโก่งมากเกินไปจะทำให้ความยาวของฟันเฟืองส่วนที่สัมผัสหรือขบกันลดลงเป็นผลทำให้อัตราส่วนการขบ (contact ratio) ของเฟืองลดลงด้วย ทำให้การส่งกำลังของเฟืองไม่ราบเรียบเท่าที่ควร การเลือกแบริงมารองรับเพลาก็เช่นกันจำเป็นจะต้องเลือกแบริงชนิดที่อนุญาตให้มีการเอียงแนวสำหรับการใช้งานได้เหมาะสมกับระยะโก่งของเพลาที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นแบริงแบบธรรมดาหรือแบริงแบบปรับแนวได้เอง (self-aligning bearing) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าระยะโก่งที่สำคัญ

ระยะโก่งที่กล่าวมานี้ก็ไม่มีมาตรฐานกำหนดเป็นแนวทางไว้ โดยทั่วไปแล้วผู้ออกแบบอาจจะถือค่าต่อไปนี้เป็นแนวทางในการกำหนดความแข็งแรงทางด้านระยะโก่งได้ดังนี้คือ

สำหรับเพลาคู่อจักรกลทั่วไป ค่าระยะโก่งระหว่างจุดที่รองรับด้วยแบริงควรมิเกิน 0.08 mm/m [16]

### 3.3.4 การบิด

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด (torque) จะบิดเป็นมุมเท่ากับ

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (3.9)$$

โดยที่ T คือ โมเมนต์บิด

L คือ ความยาว

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่ (polar area moment of inertial)

สำหรับเพลากลมตัน

$$J = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (3.10)$$

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบเพลาลูกเลือกใช้มุมบิดของเพลานี้ไม่เกิน 0.3 องศาในทางปฏิบัติ และดัชนีความแข็งแรงของเหล็กกล้า (G) 80 Gpa จากค่าโมเมนต์บิดที่การคำนวณ และค่าความยาวที่เลือกใช้แทนค่าในสมการ 3.9 จะสามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลานี้ใช้งานได้

### 3.4 สายพาน [2]

การส่งกำลังทางกลจากเพลานี้ไปยังเพลาลูกอีกอันหนึ่ง อาจทำได้สามวิธี คือ โดยใช้เฟือง ใช้สายพาน หรือใช้โซ่ การส่งกำลังโดยสายพานเป็นการส่งกำลังแบบอ่อนตัวได้ (flexible) ซึ่งมีข้อดีข้อเสียหลายประการเมื่อเปรียบเทียบการส่งกำลังโดยใช้เฟืองข้อดีก็คือ มีราคาถูกและใช้งานง่าย รับแรงกระตุกและแรงสั่นสะเทือนได้ดี ขณะใช้งานไม่มีเสียงดัง เหมาะสำหรับการส่งกำลังระหว่างเพลานที่อยู่ห่างกันมากๆ และค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาต่ำ เป็นต้น แต่ก็มีข้อเสียคือ อัตราทดไม่แน่นอนนัก เนื่องจากการสลิป (slip) การครีพ (creep) ของสายพาน และต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างเพลารหรือปรับแรงดึงในสายพานระหว่างใช้งาน นอกจากนี้ยังไม่อาจใช้งานที่มีอัตราทดสูงมากได้ จึงมักใช้กับอัตราทดไม่เกิน 5

#### 3.4.1 ชนิดและวัสดุสายพาน

สายพานแบ่งออกเป็นสี่ชนิดตามลักษณะหน้าตัดของสายพาน คือ สายพานแบน (flat belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สายพานลิ้ม (V-belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู สายพานกลม (rope) มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม และไทม์มิ่งแบลท์ (timing belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู แต่จะทำเป็นร่องคล้ายฟันเพื่อลดความยาวของสายพาน สายพานแต่ละชนิดจะมีลักษณะในการใช้งานต่างกัน

วัสดุที่ใช้ทำสายพานจะต้องมีค่าความต้านทานสูง (strength) สามารถบิดตัวได้ดี และจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสสูง

วัสดุที่ใช้ทำสายพานซึ่งใช้งานกันมากก็คือหนัง (oak-tanned leather) แต่ถ้าเป็นการใช้งานเป็นพิเศษ เช่นอยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้น มีโอโซน สารเคมี หรือมีน้ำมันอยู่ด้วย ก็มักใช้สายพานแบบ chrome leather เพื่อสายพานมีอายุการใช้งานได้นานพอสมควร จึงมักใช้ค่าความเค้นในการออกแบบสายพานต่ำกว่าความต้านแรงดึงสูงสุดของสายพานมาก โดยทั่วไปจะใช้ค่าความปลอดภัยประมาณ 10 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของสายพานหนังจะมีค่าประมาณ 0.40 – 0.50 และความเร็วใช้งานของสายพานควรจะอยู่ในช่วง 1000 - 2000 m/min

สายพานอีกชนิดหนึ่งคือสายพานยาง (rubber belts) สายพานประเภทนี้จะมีฝ้ายหรือผ้าใบเป็นไส้ภายในและมียางหุ้มอยู่ภายนอกยางที่ใช้หุ้มจะเป็นยางหุ้มกำมะถันในอุณหภูมิสูง (vulcanized) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความต้านแรงสายพานยางเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีน้ำมันหรือแสงแดด เมื่อเปรียบเทียบกับสายพานหนังแล้ว สายพานยางจะมีราคาถูกกว่า แต่อายุการใช้งานสั้นกว่า สายพานยางทนต่อสภาพบรรยากาศในการใช้งานได้ดีกว่าสายพานหนัง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

เอกลีกรุ่นเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้แจกจ่ายเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบเขียวหรือเห็นต้นฉบับการคัดลอกไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสายพานยางจะมีค่าประมาณ 0.30 – 0.40 และสามารถรับแรงดึงได้ประมาณ 20 N ต่อชั้น ต่อความยาวสายพาน 1 mm

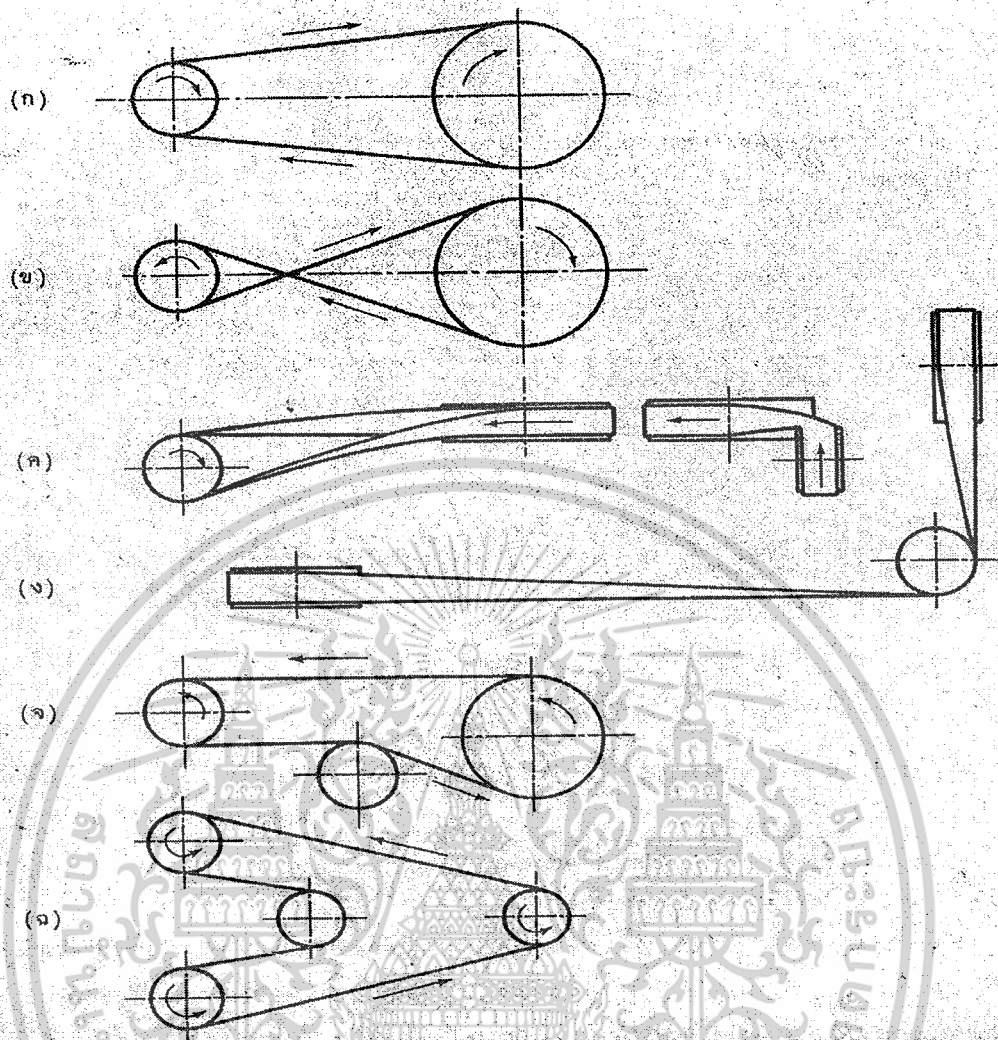
สายพานบาลาตา (balata belts) เป็นยางคล้ายสายพานยางแต่ไม่ต้องผ่านกรรมวิธีอบด้วยกรรมถัน ทนต่อกรดและความชื้นได้ดี แต่อุณหภูมิใช้งานไม่ควรเกิน 40 °C สายพานชนิดนี้มีความต้านแรงมากกว่าสายพานยางประมาณ 25 %

สายพานผ้าถัก (textile belts) ทำจากฝ้ายหรือผ้าใบซ้อนกันเป็นชั้น ๆ แล้วยึดติดกันจากนั้นจึงเคลือบด้วยน้ำมันลินซีด (linseed) เพื่อให้สายพานกันน้ำได้ มักใช้กับงานประเภทชั่วคราว

สายพานทุกชนิดที่กล่าวมานี้จะยึดตัวได้ดี ดังนั้นเมื่ออยู่ภายใต้แรงดึงจะยึดตัวทำให้เกิดการสลลบบนล้อสายพาน (pulley) ในทางปฏิบัติจึงมักจะยึดสายพานให้ตึงไว้ก่อนใช้งานทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการสลลลของสายพาน

### 3.4.2 ลักษณะการขับด้วยสายพาน

เนื่องจากคุณสมบัติของการอ่อนตัวของสายพาน จึงอาจจัดลักษณะการขับของสายพานได้ต่าง ๆ กัน ลักษณะที่นิยมใช้ในการขับด้วยสายพานดูได้จากรูป 3-1 เมื่อต้องการขับเพลลาที่อยู่ขนานกัน และต้องการให้เพลลาทั้งสองหมุนในทิศทางเดียวกัน ก็ทำได้ในลักษณะดังรูป 3-1(ก) ซึ่งเรียกว่าโอพินไดรฟ์ (open drive) และถ้าหากเพลลาอยู่ห่างกันมากควรจะให้สายพานด้านล่างตึง (tight) และด้านบนหย่อน (slack) แต่ถ้าต้องการให้เพลลาทั้งสองหมุนสวนทางกันก็ทำได้โดยวิธีดังรูป 3-1(ข) ซึ่งเรียกว่าครอสไดรฟ์ (crossed drive) แต่การขับในลักษณะนี้จุดที่สายพานไขว้กันจะทำให้สายพานถูกัน ทำให้สายพานเกิดการสึกหรอมาก ดังเพื่อให้เป็นการป้องกันมิให้สายพานสึกหรอมากเกินไป จึงควรจะให้จุดศูนย์กลางของล้อสายพานอยู่ห่างกันไม่น้อยกว่าสี่สิบเท่าของลวดความกว้างสายพาน และทำงานที่มีความเร็วสายพานไม่เกิน 15 m/s การขับแบบควอเตอร์เทอนไดรฟ์ (quarter turn drive) ดังรูป 3-1(ค) ใช้เมื่อเพลลาทั้งสองตั้งฉากกัน และเพื่อป้องกันมิให้สายพานหลุดออกจากล้อสายพานในขณะที่ใช้งาน จึงต้องใช้ล้อสายพานที่กว้างเพียงพอ โดยทั่วไปมักจะกว้างมากกว่าความกว้างสายพานไม่น้อยกว่า 1.4 เท่า และก่อนใช้งานจะต้องทดสอบก่อนเสมอ ส่วนการขับแบบมิลล์ไดรฟ์ (mule drive) ดังรูป 3-1 (ง) ใช้เมื่อเพลลาทั้งสองตั้งฉากกัน แต่ไม่อาจจัดในลักษณะควอเตอร์เทอนไดรฟ์ได้ หรือเมื่อต้องการให้หมุนกลับทิศทางได้เมื่อไม่สามารถใช้ขับในลักษณะโอพินไดรฟ์ได้ เพราะส่วนโค้งสัมผัส (arc of contact) บนล้อสายพานเล็กมีค่าน้อยเกินไป (เพราะอัตราทดสูง และล้อสายพานอยู่ใกล้กันมาก) หรือเมื่อไม่อาจทำให้สายพานตึงโดยวิธีอื่น ก็อาจทำได้โดยใช้ล้อช่วย (idler) ดังรูป 3-1(จ) เป็นการช่วยให้สายพานสัมผัสกับล้อมากขึ้นซึ่งเพิ่มกำลังที่ส่งได้ด้วย ส่วนการขับแบบรีเวอร์สไดรฟ์ (reverse drive) ใช้เมื่อต้องการส่งกำลังไปยังเพลลาหลาย ๆ อันพร้อมกัน



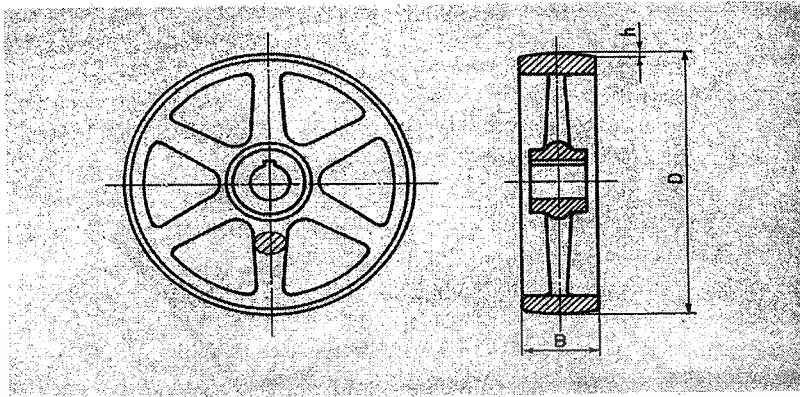
รูป 3.1 ลักษณะการขับด้วยสายพาน (ก) โอเพินไดรฟ์ (ข) ครอสไดรฟ์  
(ค) ควอเตอร์เทอนไดรฟ์ (ง) มิวส์ไดรฟ์ (จ) แสดงการขับ  
โดยใช้ล้อช่วย (ฉ) ริเวสไดรฟ์

### 3.5 ล้อสายพาน [14]

การส่งกำลังโดยสายพานแบนทำได้โดยใช้ความเสียดทานระหว่างผิวหน้าล้อสายพานกับผิวหน้าของสายพาน ดังนั้นจำเป็นต้องทราบรายละเอียดของล้อสายพาน เพื่อที่นำไปใช้งานได้อย่างถูกต้องเหมาะสม ลักษณะของล้อสายพานที่ใช้งานทั่วไป ดูได้จากรูป 3-2 ล้อสายพานจะยึดติดกับเพลาคด้วยลิ่ม ดังนั้นที่มุมล้อสายพานจึงต้องเจาะร่องลิ่มไว้เพื่อไว้ยึดกับเพลานเพื่อให้ล้อสายพานมีน้ำหนักเบาจึงมักทำเป็นแขนยื่นออกจากคุมล้อไปผิวหน้าที่สัมผัสกับสายพาน แขนยื่นนี้มีขนาดเรียวยาวตลอดและมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี ดังรูป 3-2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐานดูได้จาก

#### ตาราง 3-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.2 ล้อสายพาน

ตาราง 3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อสายพานแบบตามมาตรฐาน ISO 99 – 1975 (E)

ขนาดระบุ		ขนาดในพิกัด			
mm	in	เล็กสุด mm	ใหญ่สุด mm	เล็กสุด in	ใหญ่สุด in
40	1.6	39.5	40.5	1.56	1.60
45	1.8	44.4	45.6	1.75	1.80
50	2	49.4	50.6	1.95	2.00
56	2.24	55.2	56.8	2.17	2.24
63	2.5	62.2	63.8	2.45	2.51
71	2.8	70	72	2.76	2.84
80	3.15	79	81	3.11	3.19
90	3.55	88.8	91.2	3.50	3.59
100	4	98.8	101.2	3.88	3.98
112	4.5	110.8	113.2	4.36	4.46
125	5	123.4	126.6	4.86	4.98
140	5.6	138.4	141.6	5.45	5.58
160	6.3	158	162	6.22	6.38
180	7.1	178	182	7.01	7.17
200	8	198	202	7.80	7.95
224	9	221.5	226.5	8.72	8.92
250	10	247.5	252.5	9.74	9.94
280	11.2	276.8	283.2	10.90	11.15
315	12.5	311.8	318.2	12.28	12.53
335	14	351.8	358.2	13.85	14.10
400	16	396	404	15.59	15.91
450	18	446	454	17.56	17.87
500	20	496	504	19.53	19.84
560	22.4	555	565	21.85	22.24
630	25	625	635	24.61	25.00
710	28	705	715	27.75	28.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

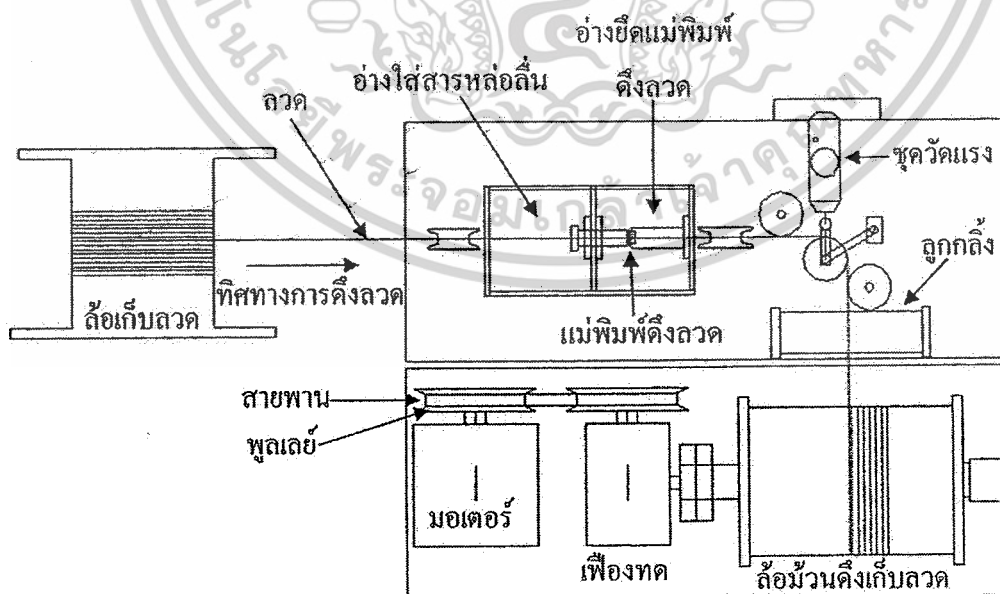
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดระบุ		ขนาดในพิกัด			
mm	in	เล็กสุด mm	ใหญ่สุด mm	เล็กสุด in	ใหญ่สุด in
800	31.5	793.7	806.3	31.25	31.74
900	35.5	893.7	906.3	35.18	35.68
1000	40	993.7	1006.3	39.12	39.62
1120	45	1112	1128	43.78	44.41
1250	50	1242	1258	48.90	49.53
1400	56	1392	1408	54.80	55.43
1600	63	1590	1610	62.60	63.39
1800	71	1790	1810	70.48	71.26
2000	80	1990	2010	78.35	79.13

การใช้สายพานในการส่งกำลังขึ้นอยู่กับขนาดและการจัดวางล้อสายพานเป็นอย่างมาก ดังนั้นการเลือกใช้สายพานอย่างเหมาะสมจึงเกี่ยวข้องกับขนาด ชนิด และผิวหน้าของล้อสายพาน

### 3.6 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing)

การออกแบบเครื่องจะออกแบบตามแบบที่ใกล้เคียงกับที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงลวด เหล็กกล้าไร้สนิม



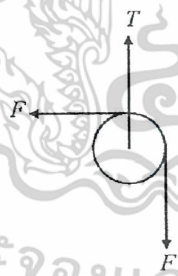
รูป 3.3 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียวที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.4 รูปภาพเครื่องดิ่งลาวดแบบการดิ่งขึ้นเดียว

ระบบชุดวัดแรงที่ใช้ในเครื่องดิ่งลาวด



รูป 3.5 หลักการวัดแรงที่ใช้ดิ่งลาวด

$$T = F$$

เมื่อ  $T =$  แรงดิ่งที่วัดแรงดิ่ง (N)

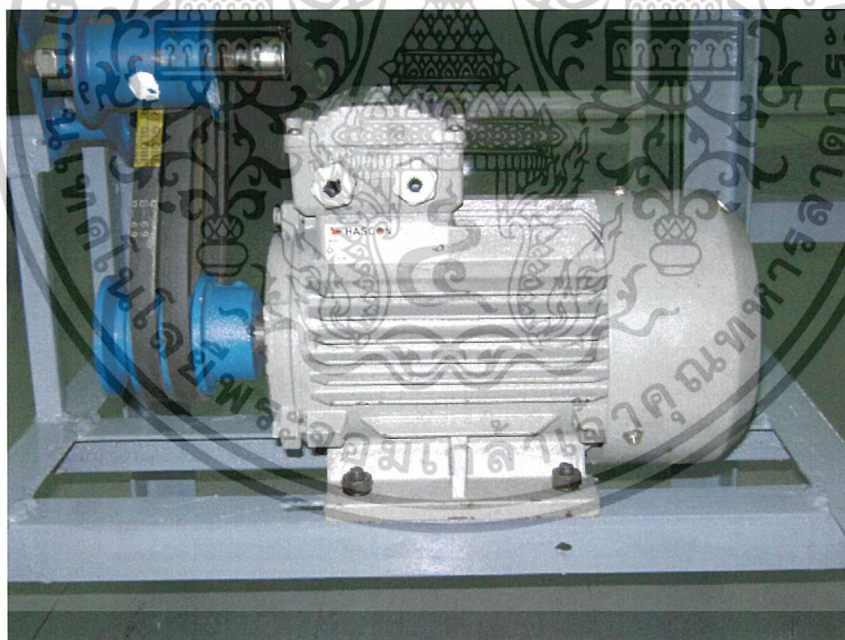
$F =$  แรงที่ใช้ดิ่งลาวด

เครื่องดิ่งลาวดแบบการดิ่งขึ้นเดียว อัตราความเร็วในการดิ่งลาวด 0.12 เมตรต่ออนาที ต้นกำลังในการดิ่งลาวดใช้ระบบมอเตอร์เป็นต้นกำลังผ่านชุดเฟืองทดเพื่อทดรอบให้ช้าลง และลาวดจะถูกเก็บด้วยล้อ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ม้วนดึง ในขณะที่เดียวกันก็จะม้วนเก็บลวดไปด้วย ล้อม้วนดึงเก็บลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 175 mm. ระบบการหล่อลื่นของเครื่องดึงลวดจะกำหนดให้ลวดวิ่งผ่านสารหล่อลื่นแล้วเข้าสู่แม่พิมพ์ดึงลวดเพื่อลดขนาด ชุดหล่อลื่นจะประกอบด้วยสองส่วน คือ อ่างสำหรับยัดแม่พิมพ์ดึงลวด เป็นส่วนที่ใช้ยัดแม่พิมพ์ดึงลวดให้อยู่กับที่ ซึ่งจะใช้สกรูสำหรับยัดแม่พิมพ์ดึงลวดเพื่อสามารถทำการถอดเปลี่ยนได้ และอีกส่วน คือ อ่างสำหรับใส่น้ำมันหล่อลื่น ในส่วนนี้จะใส่น้ำมันหล่อลื่นให้เต็มอ่างเพื่อทำการหล่อลื่นอย่างมีประสิทธิภาพ ขณะทำการดึงเส้นลวดจะอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นและไหลเข้าสู่ทางเข้าแม่พิมพ์ดึงลวดพร้อมกัน อุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงดึงลวด คือ เกจวัดแรงดึง- แรงแฉุด (Push-Pull Gage) รุ่น NK-500 สามารถวัดแรงได้มากที่สุด 500 นิวตัน

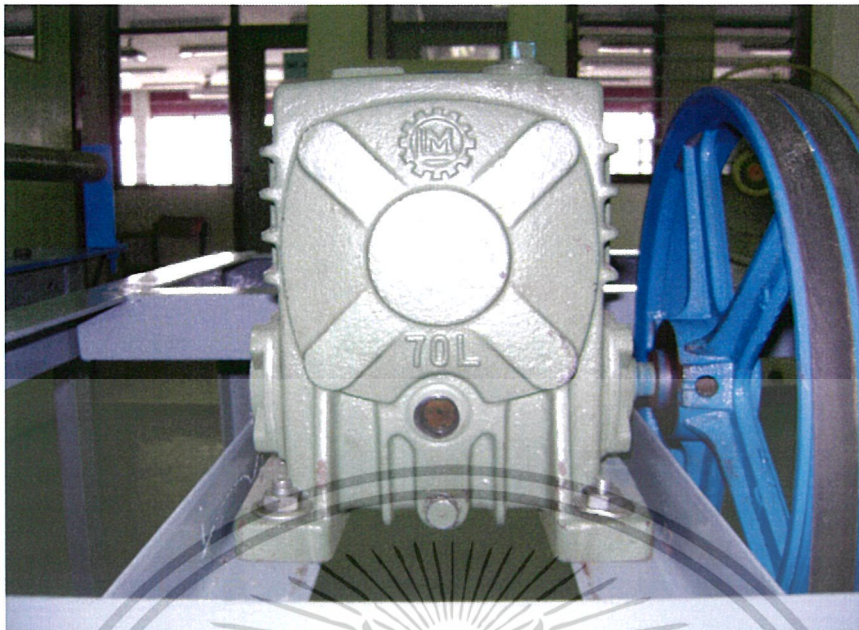
### 3.7 อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งเครื่อง

เราเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า (1.5 กิโลวัตต์) มีความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที เป็นตัวกำเนิดกำลังงานและใช้ชุดทดเฟืองหนอนมีอัตราทด 30:1 ในการทดความเร็วรอบที่มาจากมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบที่ลดลง



รูป 3.6 มอเตอร์ขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

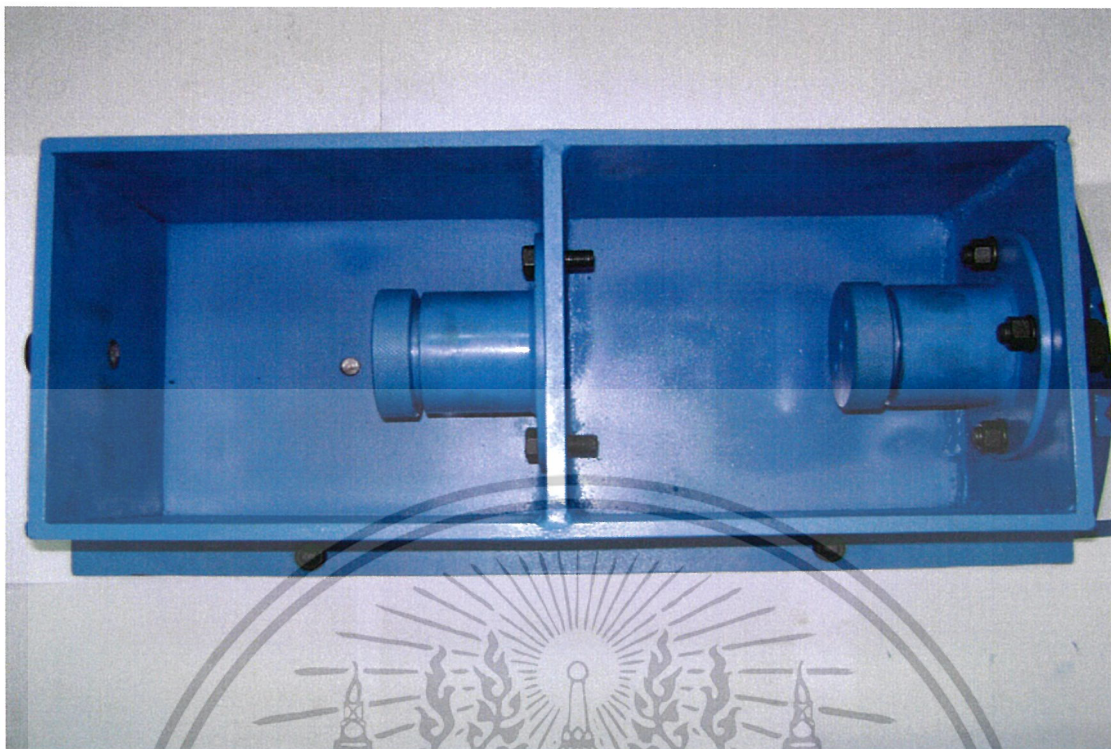


รูป 3.7 ชุดทด

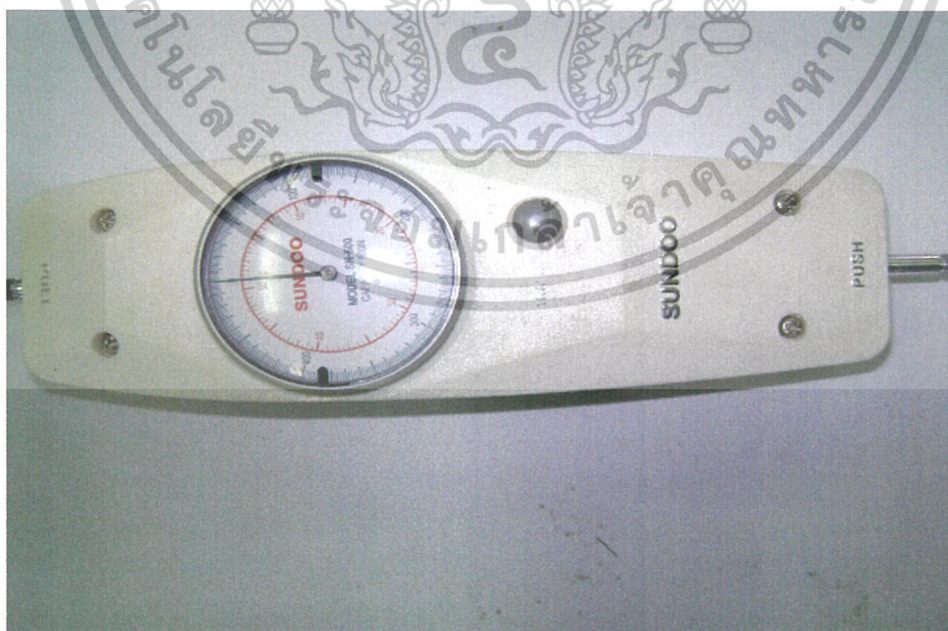


รูป 3.8 ล้อม้วนสำหรับม้วนดิ่งลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



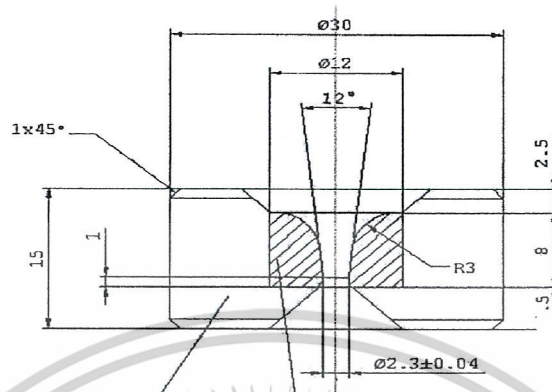
รูป 3.9 อ่างสำหรับติดตั้งยึดแม่พิมพ์ดึงลวดและใส่น้ำมันหล่อลื่น



รูป 3.10 เกจวัดแรงดึง – แรงอัด (Push-Pull Gage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 แม่พิมพ์ดิ่งลวด



แม่พิมพ์ส่วนนอก  $\varnothing 30 \times 15$  มิลลิเมตร คายอินเสิร์ท  $\varnothing 12 \times 8$  มิลลิเมตร

รูปที่ 3.11 ภาพตัดแม่พิมพ์ดิ่งลวด

การเลือกวัสดุที่ทำแม่พิมพ์จะคำนึงถึงประสิทธิภาพและการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมสำหรับการทดลองนี้กำหนดรูปร่างตามมาตรฐาน W103 ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดิ่งลวดทั่วไป แม่พิมพ์จะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือ คายอินเสิร์ท (Die Insert) ส่วนสองคือ แม่พิมพ์ส่วนนอก (Die Case) คายอินเสิร์ทจะส่วนที่อัดเข้าไปในแม่พิมพ์ส่วนนอกทำมาจากสแตนคาร์ไบด์ K20 (ISO Code) แม่พิมพ์ส่วนนอกเป็นส่วนประกอบในการรับแรงอยู่ด้านนอกทำจากวัสดุ JIS SKD11



รูป 3.12 แม่พิมพ์ดิ่งลวดตามมาตรฐาน W 103 ไม่ทำการเคลือบผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการทดลอง

ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เกรด SUS 304 [31] ขนาดลวดก่อนการดึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.40 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดหลังการดึง 2.30 มิลลิเมตร อัตราการลดหน้าตัดของลวดเท่ากับ 9.0%



รูป 3.13 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304  $\phi$ 2.40 มิลลิเมตร

### 3.10 สารหล่อลื่นที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ใช้ Graphite Lubricant เบอร์ XL27 ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลอง

#### 4.1 วิธีการทดลอง

##### 4.1.1 ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยดึงผ่านคานที่มีสารหล่อลื่นกราไฟท์เป็นตัวหล่อลื่น

4.1.1.1 ทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้สารหล่อลื่นกราไฟท์เป็นตัวหล่อลื่น เริ่มต้นโดยลดขนาดปลายลวดเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเจียรระไน แล้วทำการดึงเริ่มต้นด้วยชุดต้นกำลังที่เครื่องทดสอบแรงดึงผ่านแม่พิมพ์ลดขนาด 2.17 มิลลิเมตร เพื่อได้ความยาว 1 เมตร

4.1.1.2 นำลวดออกจากแม่พิมพ์ลดขนาด 2.17 มิลลิเมตร เพื่อประกอบเข้ากับเครื่องดึงลวด โดยดึงผ่านแม่พิมพ์ที่มีขนาดรูใน 2.30 มิลลิเมตร ด้วยชุดต้นกำลังในการดึงด้วยมอเตอร์

4.1.1.3 ทำการดึงลวดแล้วหยุดบันทึกค่าต่าง ๆ ทุก ๆ 5 เมตร ใน 20 เมตรแรกและทุก ๆ 10 เมตร ใน 30 เมตรหลังรวมเป็นระยะทาง 50 เมตร ในการทดลอง

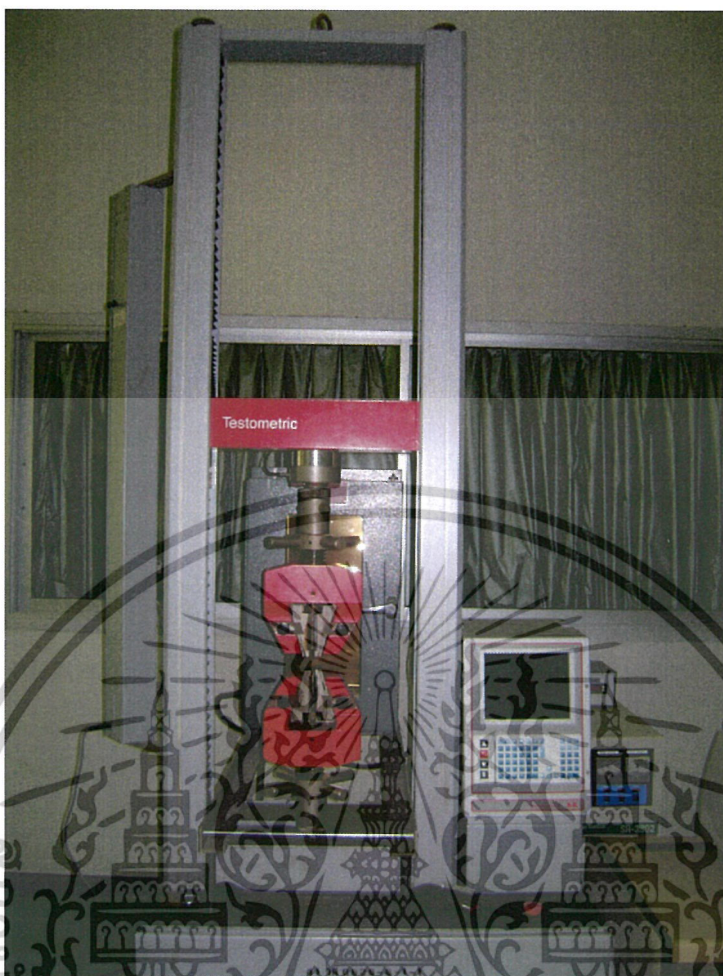
##### 4.1.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

4.1.2.1 นำลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนดึงและหลังดึงมาทดสอบหาคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ที่ความเร็วต่าง ๆ

4.1.2.2 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

#### 4.2 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

เครื่อง Universal Testing Machine เป็นเครื่องใช้สำหรับทดสอบคุณสมบัติภายในของวัสดุต่าง ๆ โดยค่าที่แสดงออกมาจะถูกประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ สำหรับค่าที่สามารถแสดงออกมาได้มีมากมายหลายค่า เช่น stress , strain , elongation , modulus เป็นต้น โดยเครื่อง UTM นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนกำลัง ส่วนคอมพิวเตอร์ควบคุม ส่วนทดลอง



รูป 4.1 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)

### 4.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 จากการทดลอง

	คุณสมบัติทางกล	ค่า
ลวดก่อนการดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	552.914 N/mm <sup>2</sup>
	Yield Strength (MPa)	414.908N/mm <sup>2</sup>
ลวดหลังการดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	660.039 N/mm <sup>2</sup>
	Yield Strength (MPa)	618.836 N/mm <sup>2</sup>

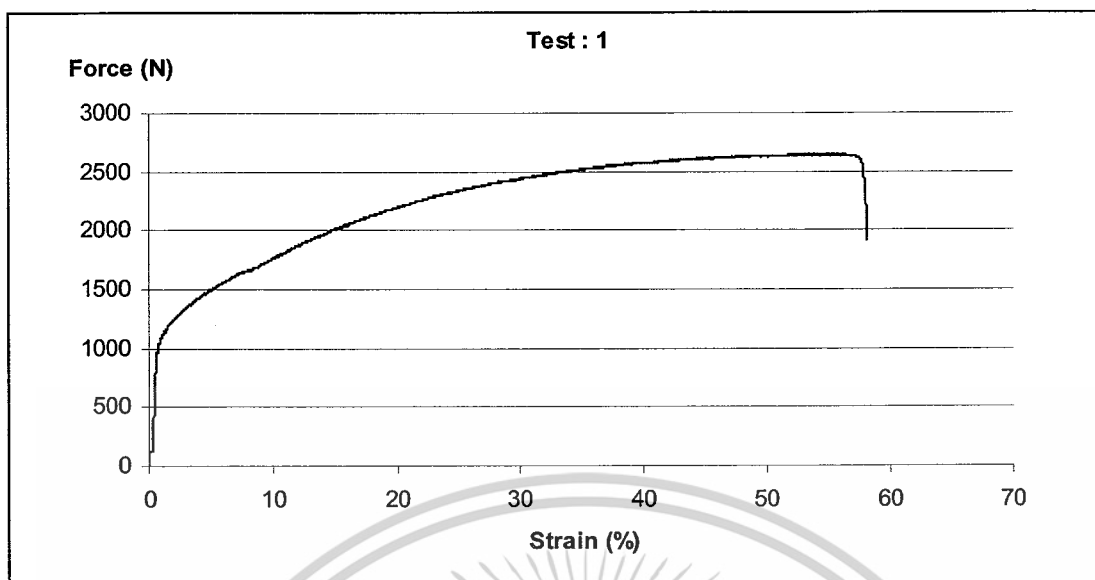
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test : Diameter 2.40 mm.  
 Test Type : Tensile  
 Test Speed : -  
 Sample Length : 30.0 mm.  
 Sample Type : Circular

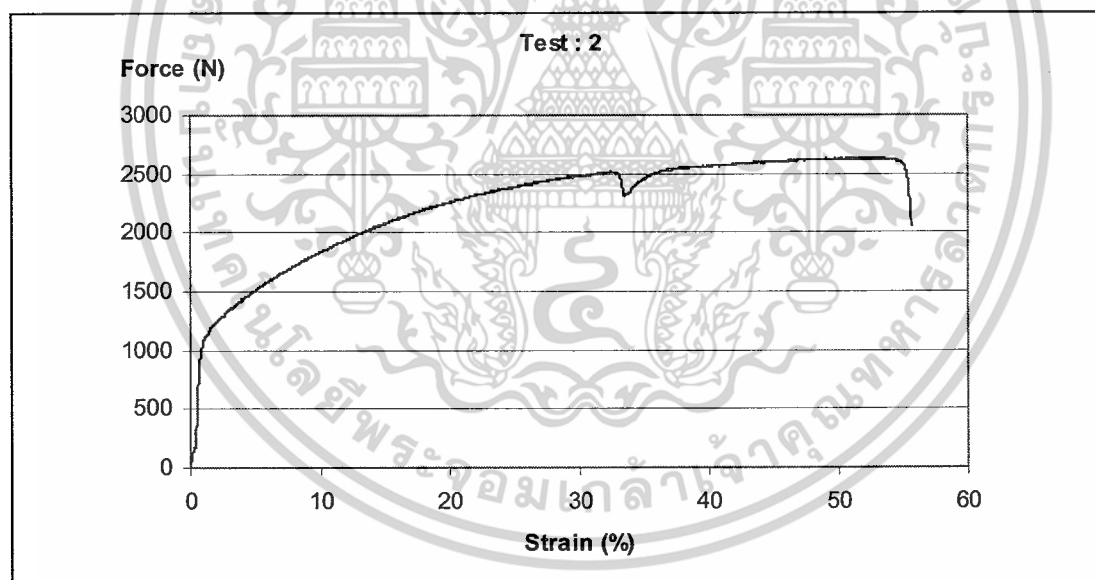
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM

Test No.	V (mm/min)	Force Peak (N)	Strain Peak (%)	Stress Peak (N/mm <sup>2</sup> )	Elong Peak (mm)	Force Yield (N)	Stress Yield (N/mm <sup>2</sup> )	Strain Yield (%)	Elong Yield (mm)
1	10	2649	179.28	585.557	53.784	1213	268.132	5.807	1.742
2	20	2631	173.753	581.579	52.126	1916	423.529	38.200	11.460
3	30	2515	155.263	555.937	46.579	1579	349.036	22.023	6.607
4	40	2464	153.030	544.664	45.909	1990	439.887	56.440	16.932
5	50	2686	135.837	393.736	40.751	2114	467.297	41.667	12.500
6	60	2695	139.743	595.726	41.923	2580	570.305	91.790	27.537
7	70	2454	149.340	542.453	44.802	1648	364.288	27.157	8.147
8	80	2560	147.727	565.884	44.318	1662	367.383	22.537	6.761
9	90	2505	144.623	553.727	43.387	2159	477.244	61.770	18.531
10	100	2759	144.970	609.873	43.497	1909	421.982	22.827	6.848

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

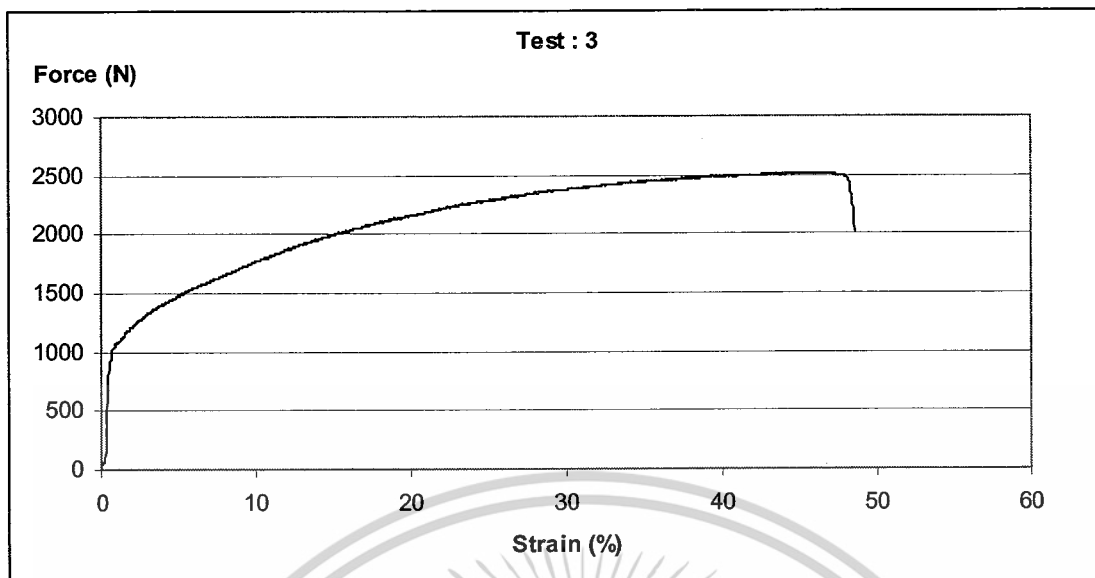


รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 1)

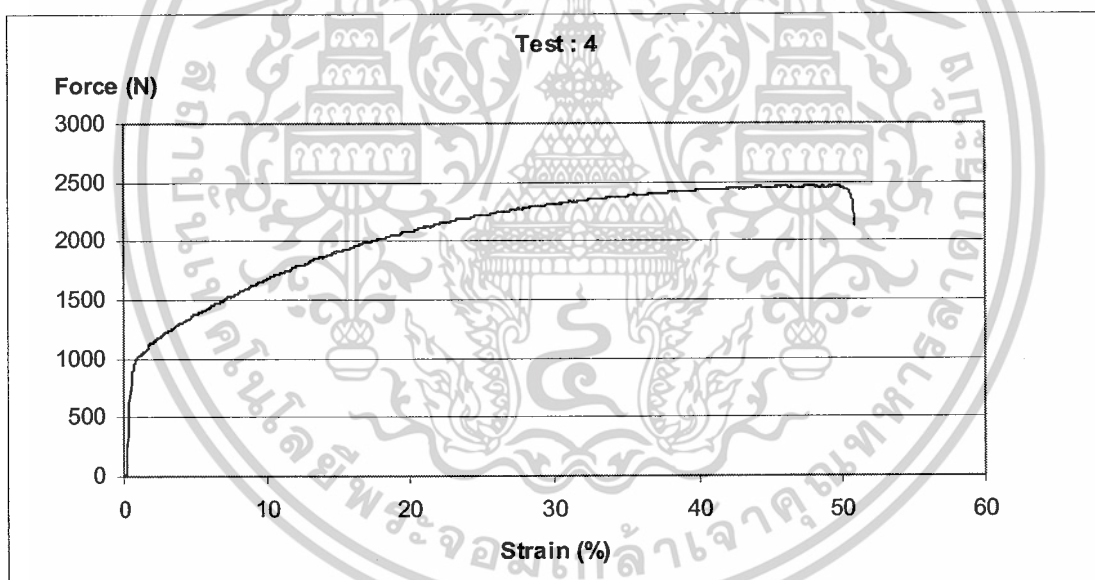


รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

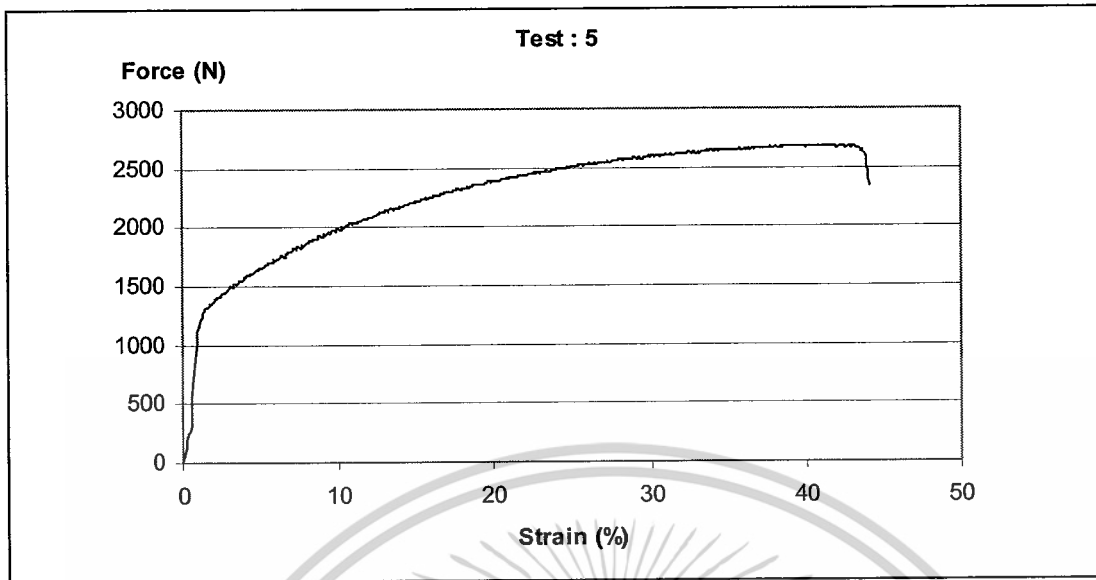


รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 3)

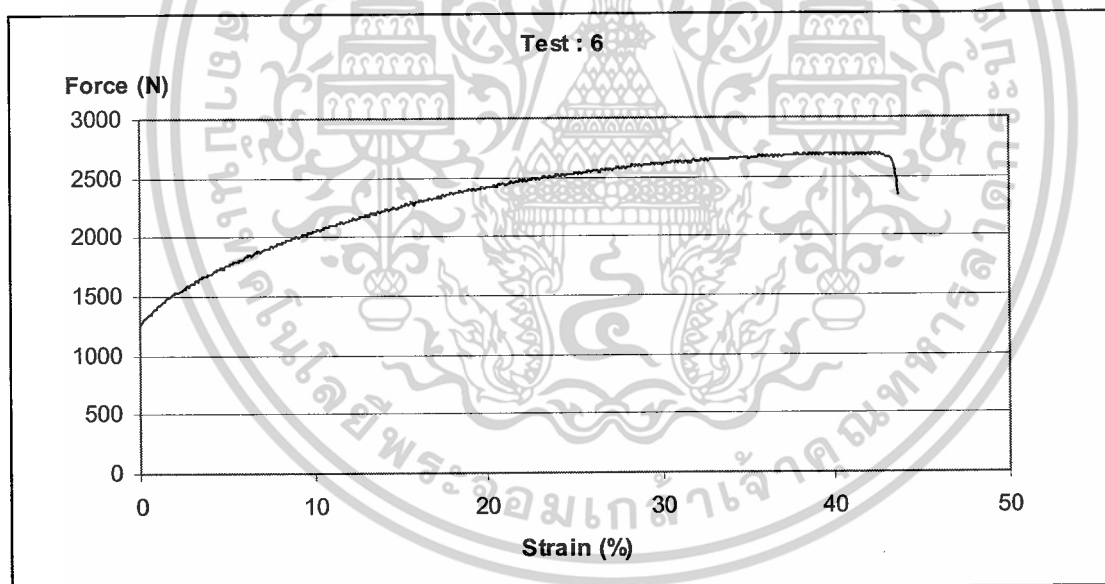


รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

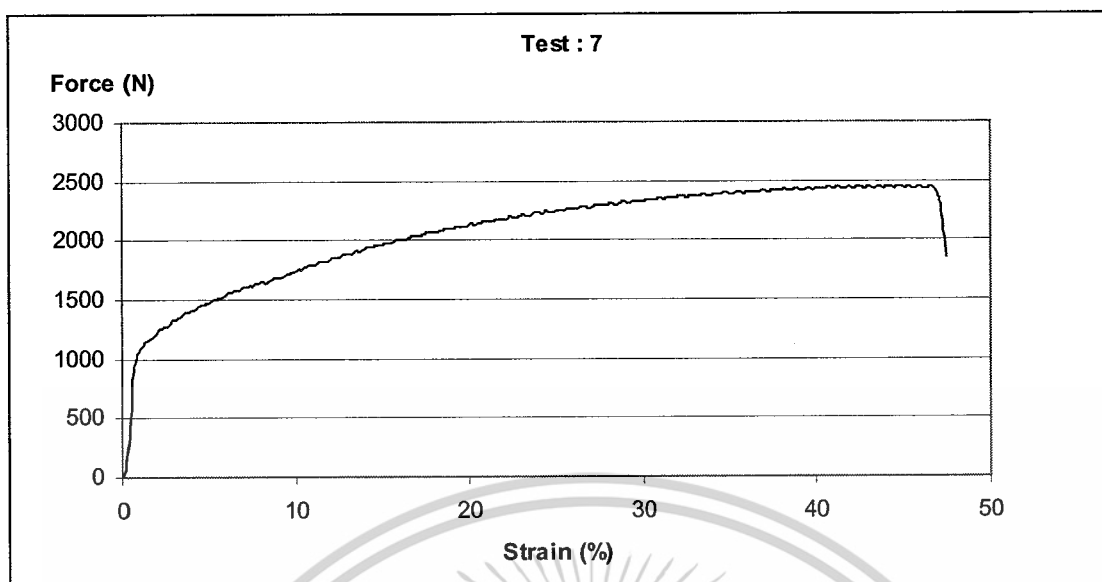


รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 5)

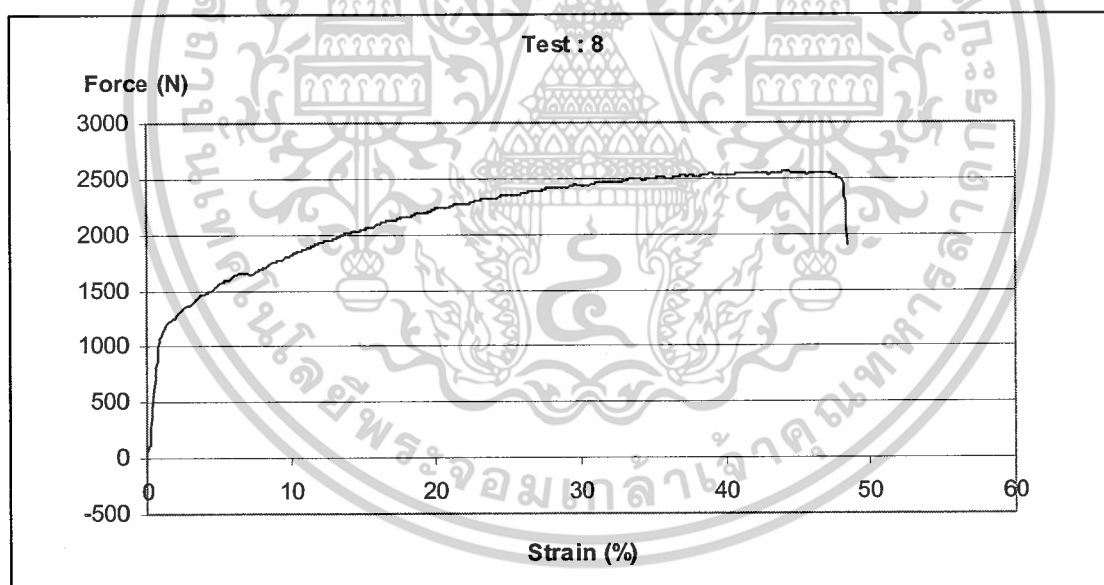


รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

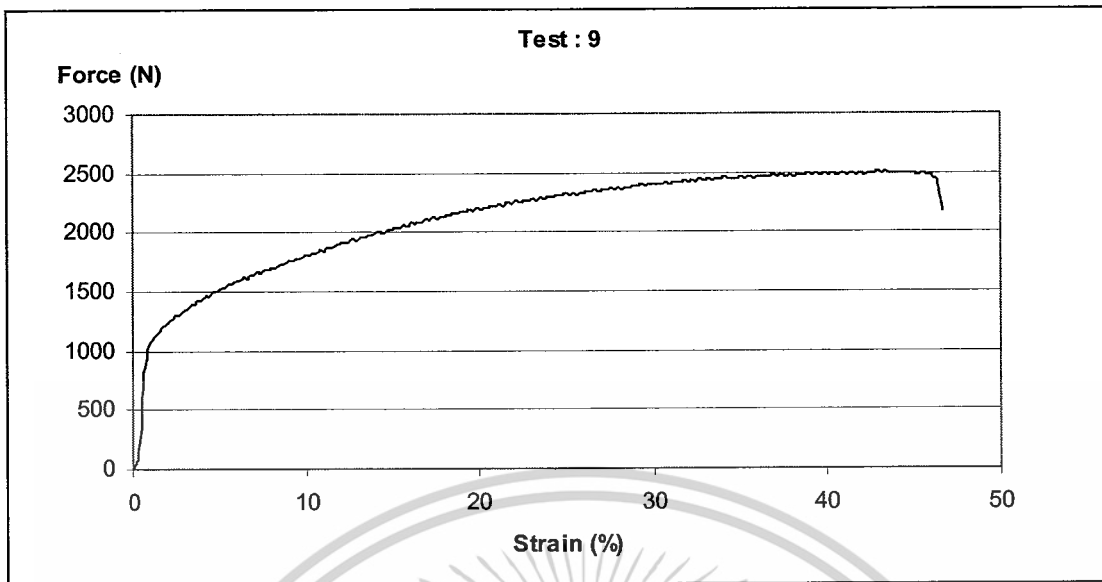


รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 7)

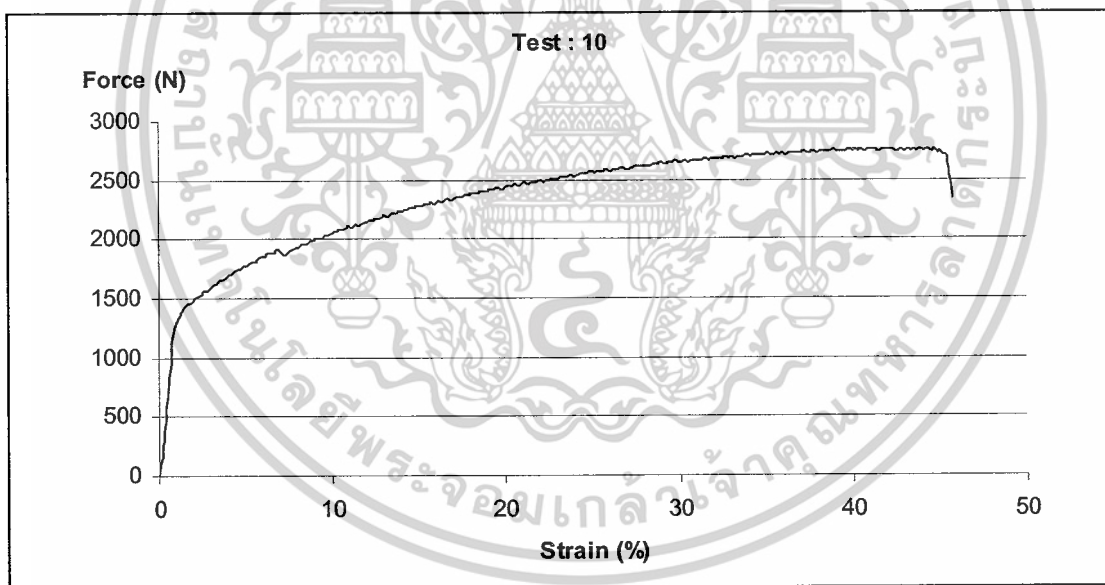


รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 9)



รูป 4.2 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 10)

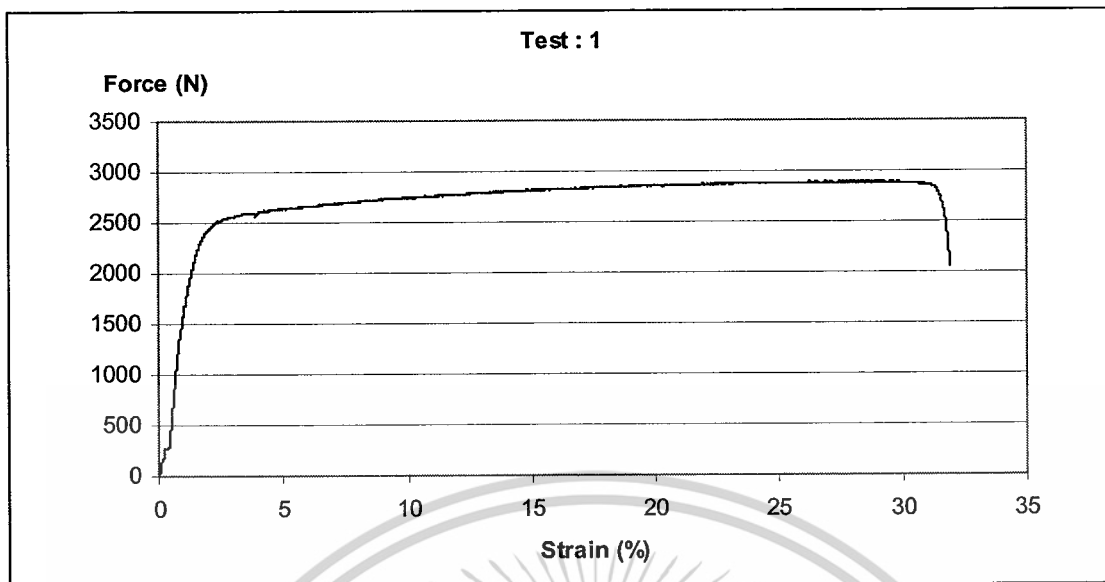
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test : Diameter 2.30 mm.  
 Test Type : Tensile  
 Test Speed : 0.12 m/s  
 Sample Length : 30.0 mm.  
 Sample Type : Circular

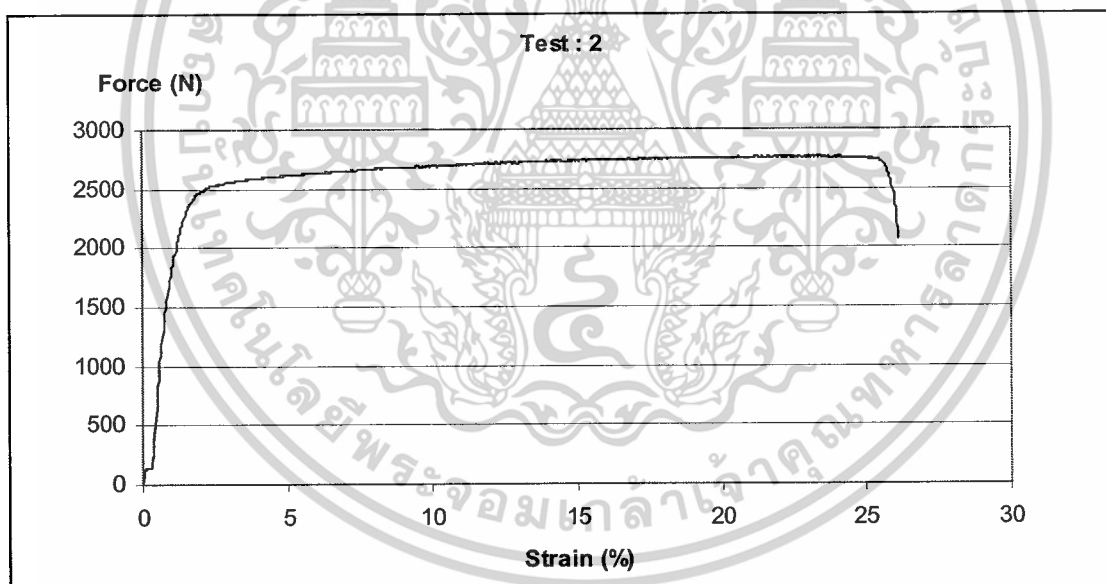
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM

Test No.	V (mm/min)	Force Peak (N)	Strain Peak (%)	Stress Peak (N/mm <sup>2</sup> )	Elong Peak (mm)	Force Yield (N)	Stress Yield (N/mm <sup>2</sup> )	Strain Yield (%)	Elong Yield (mm)
1	10	2887	92.827	694.866	27.848	2512	604.608	7.977	2.393
2	20	2767	74.250	665.984	22.275	2535	610.144	8.480	2.544
3	30	2639	74/057	635.176	22.217	2414	581.021	12.543	3.763
4	40	2735	75.353	658.282	22.906	2625	631.806	30.617	9.185
5	50	2682	69.147	645.525	20.744	2472	594.981	13.397	4.019
6	60	2727	74.137	656.356	22.241	2646	636.86	34.883	10.465
7	70	2884	63.727	694.144	19.118	2662	640.74	12.183	3.655
8	80	2838	66.597	683.073	19.979	2751	662.133	28.867	8.660
9	90	2627	66.557	632.287	19.967	2487	598.591	20.133	6.040
10	100	2637	66.943	634.694	20.083	2607	627.474	44.750	13.425

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

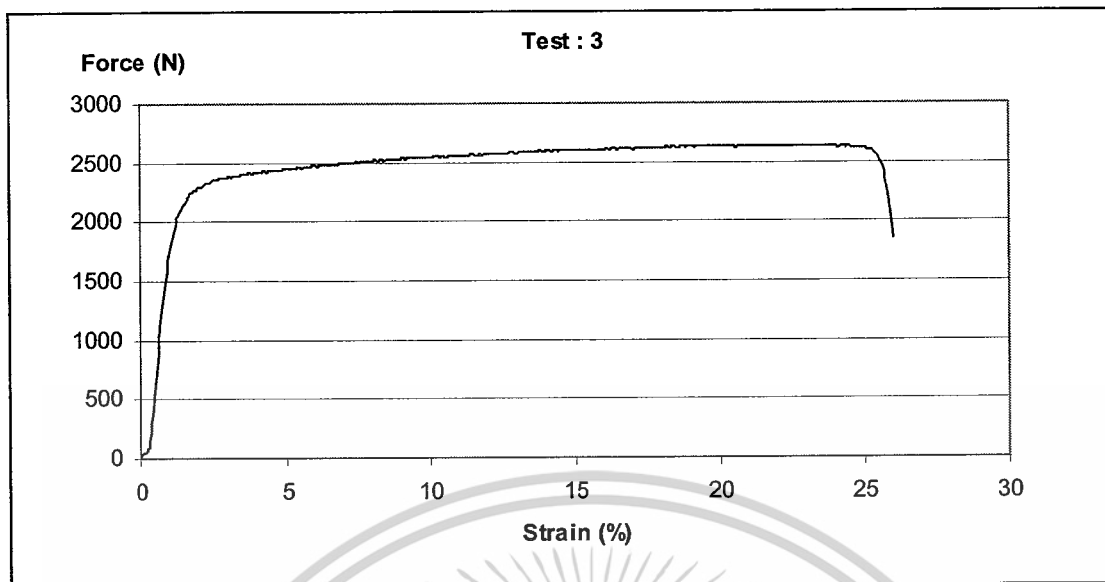


รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 1)

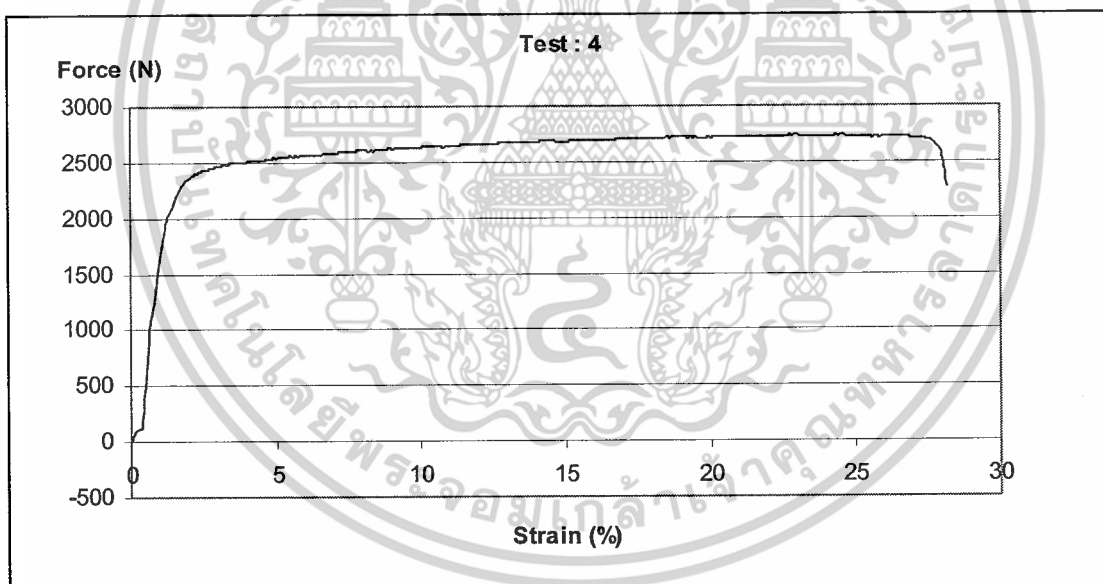


รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

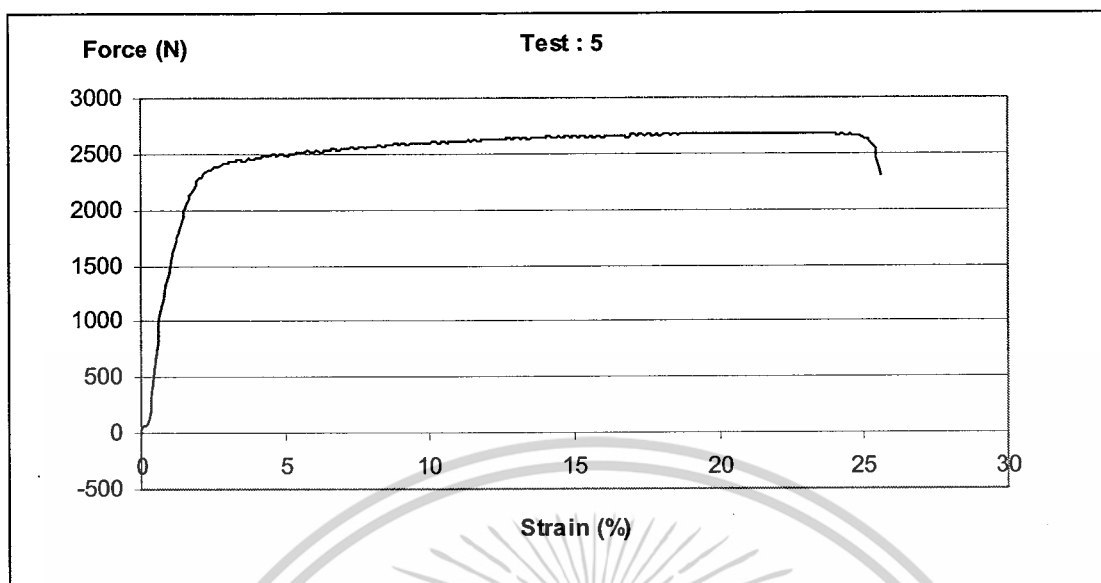


รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 3)

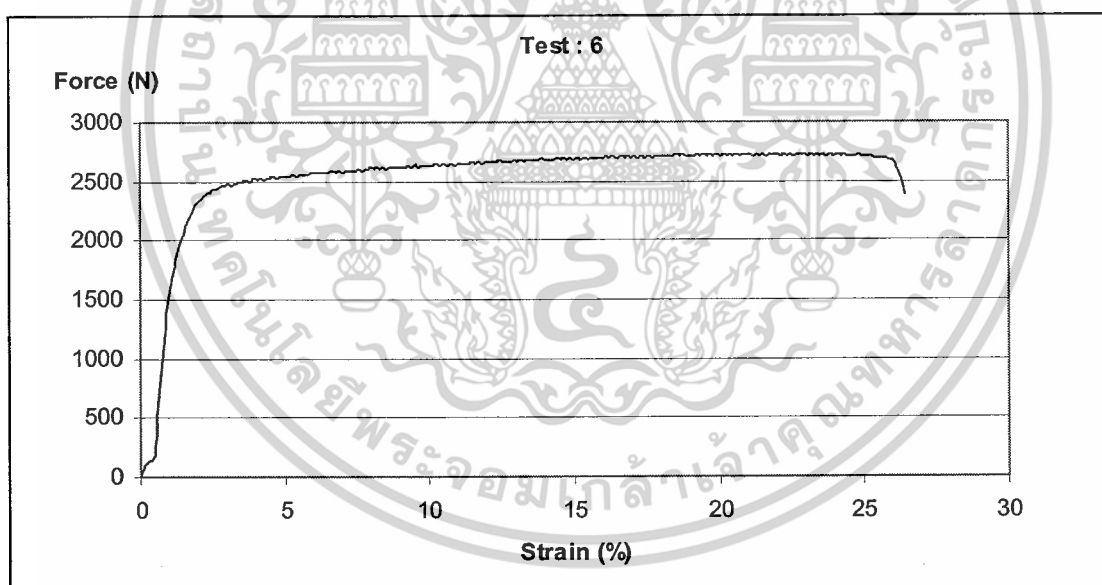


รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

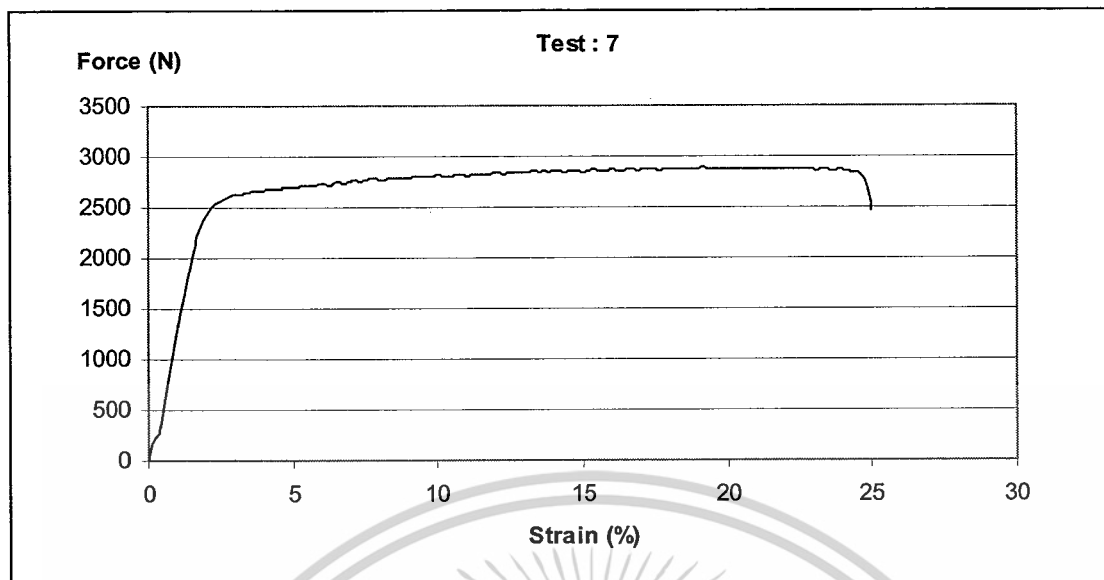


รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 5)

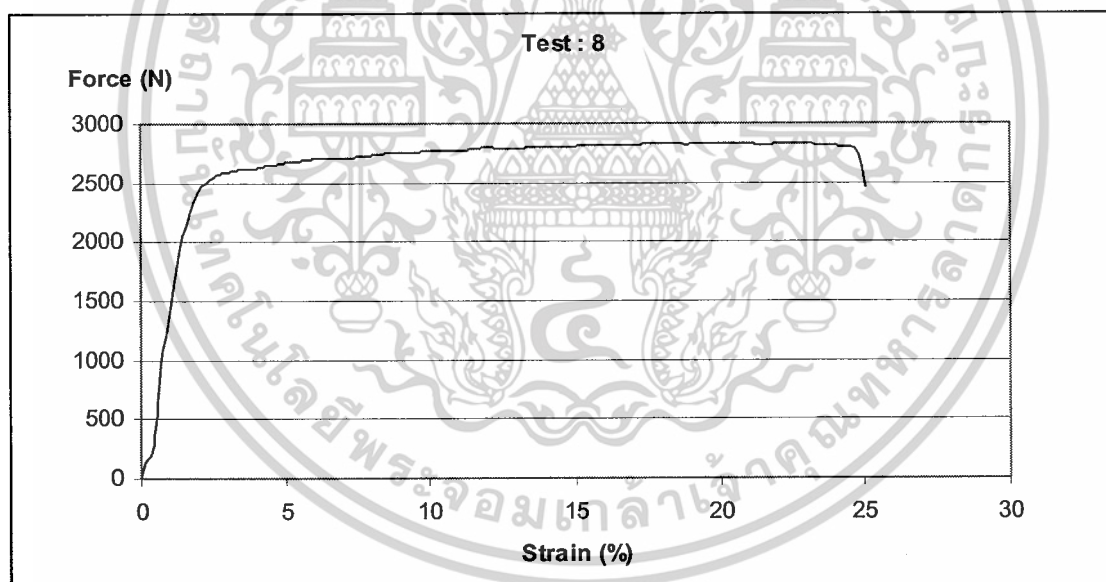


รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

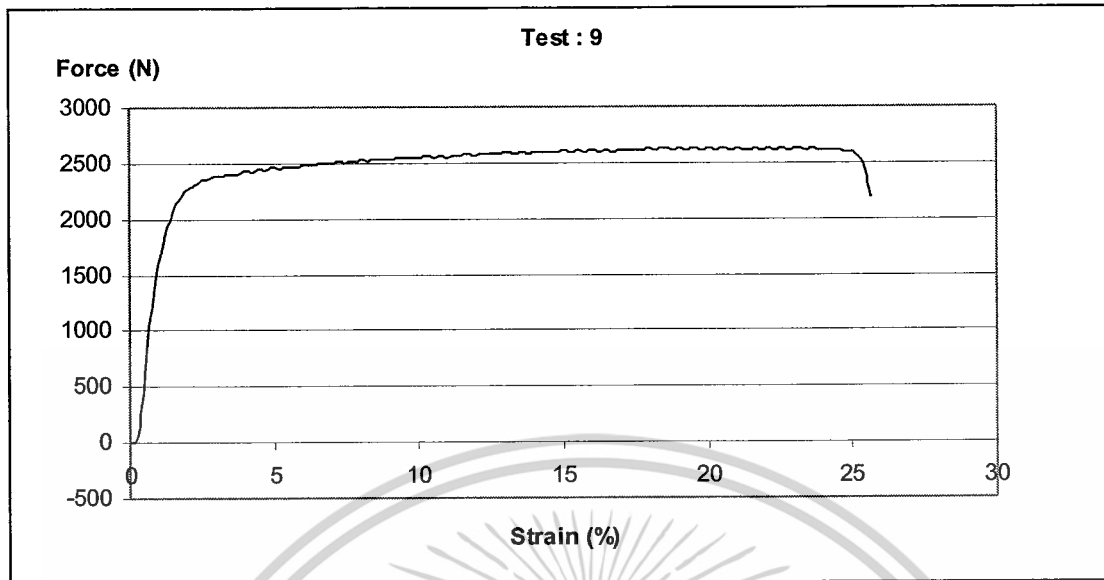


รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 7)

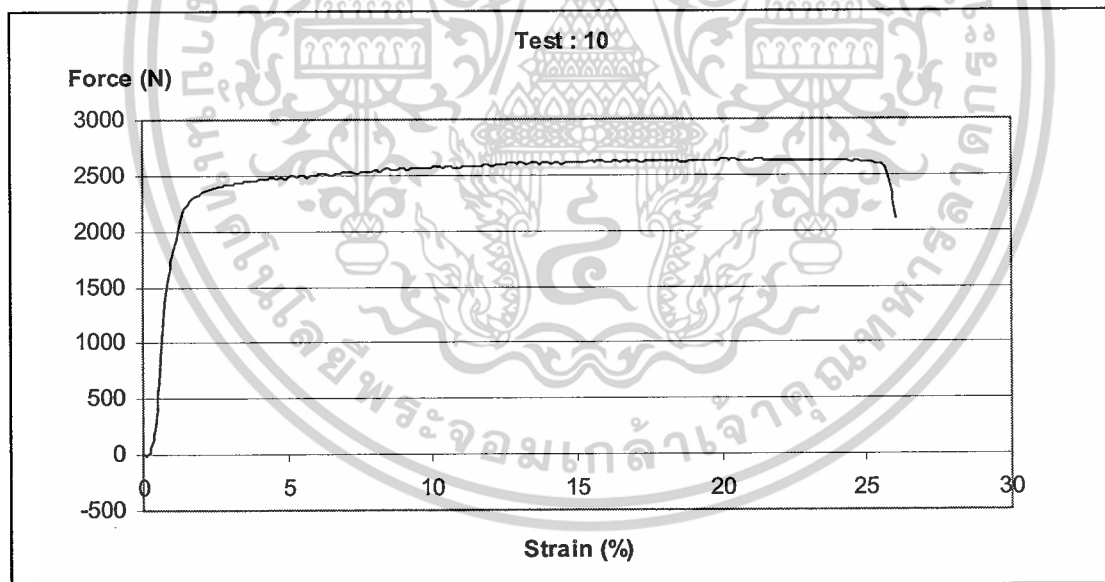


รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 9)



รูป 4.3 แสดงกราฟที่ได้จากการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ครั้งที่ 10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# บทวิจารณ์และสรุป

### 5.1 วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

หลังจากได้ทำการศึกษาถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการสร้างเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด เพื่อลดขนาดของลวดและตรวจสอบเปรียบเทียบความเค้นก่อนทำการดึงลดขนาดและความเค้นหลังทำการดึงลดขนาด ทางคณะผู้สร้างก็ได้ทำการสร้างเครื่องนี้ขึ้นมา ผลปรากฏว่าเครื่องนี้สามารถลดขนาดลวดเหล็กกล้าไร้สนิมได้จริงตามที่ได้ตั้งวัตถุประสงค์และขอบเขตของโครงการไว้ และเมื่อนำลวดที่ผ่านเครื่องดึงลดขนาดแล้วมาทำการหาคุณสมบัติภายใน โดยเครื่อง Universal Testing Machine ( UTM ) แล้วเมื่อวิเคราะห์ผลที่ออกมาสามารถสรุปได้ดังนี้

ในการทดลองจะใช้ความเร็วในการดึง 10 mm/min

5.1.1 เปรียบเทียบค่าความเค้นก่อนลดขนาดและค่าความเค้นหลังลดขนาด ค่าความเค้นหลังดึงลดขนาดแล้วจะมากกว่าค่าความเค้นก่อนดึงลดขนาด

5.1.2 ความมเค้นหลังดึงลดขนาดมีค่ามากกว่าเนื่องจากลวดที่ผ่านการลดขนาดแล้ว จะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง และลวดที่ผ่านการลดขนาดแล้วจะทำให้เนื้อลวดแน่นขึ้นเป็นเหตุให้เกิดแรงดึงเพิ่มขึ้นและมีความเค้นเพิ่มขึ้นด้วย

5.1.3 ลวดที่ผ่านการลดขนาดมาแล้ว ระยะยืดจนขาดจากกันของลวดจะน้อย เนื่องจากลวดที่ผ่านการลดขนาดมาแล้วลวดจะยาวกว่าเดิม แสดงว่าลวดที่ผ่านการลดขนาดมายืดตัวมาแล้ว เมื่อมาทำการทดสอบความเค้นอีกจึงทำให้ระยะยืดจนขาดจากกันมีค่าน้อยลง

จากการทดลองเปรียบเทียบค่าความเค้นก่อนดึงกับหลังดึงลดขนาดจะเห็นว่าค่าความเค้นหลังการดึงลดขนาดมีค่ามากกว่า และในการทดลองครั้งต่อไปน่าจะลองเปลี่ยนความเร็วในการดึงดูว่าค่าความเค้นจะเปลี่ยนไปหรือไม่ หรืออาจจะทำการเปรียบเทียบค่าความเค้นของลวดชนิดเดียวกันขนาดเดียวกัน ดึงด้วยความเร็วเท่ากัน ในโรงงานอุตสาหกรรมกับค่าที่ได้จากการทดลองของเรา ดูว่าลวดที่เราทำการลดขนาดนั้นสามารถนำไปใช้งาน ได้จริงหรือไม่

### 5.2 ปัญหาที่พบ

5.2.1 ในขั้นแรกการนำลวดที่ยังไม่ได้ลดขนาดติดตั้งเข้ากับเครื่องดึงขึ้นรูปลวด จะต้องนำลวดไปเจียรลดขนาด เพื่อจะนำลวดผ่านคायไปเข้าล้อม้วนเก็บ ถ้าเจียรในลวดมีขนาดเล็กเกินเวลาดึงลดขนาดลวดที่เจียรระโนไว้จะขาดได้

5.2.2 ผลจากข้อ5.2.1 เมื่อเตรียมเครื่องดึงขึ้นรูปลวดเรียบร้อยแล้ว ควรใช้มือจับเกี่ยวทดดึงลวด

ผ่านคायประมาณ 1 รอบของล้อม้วนเก็บ เพื่อป้องกันลวดขาดเวลาเดินเครื่องจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ลวดที่นำมาลดขนาดมีการบิดเบี้ยวหรือมีการหักมุมมากในการดึงผ่านชุดสายจะเกิดการติดขัดขึ้น เป็นผลให้แรงดึงมีค่าสูงขึ้น

5.2.4 Roller ตัวที่ติดกับชุดวัดแรงดึง จะรับแรงมาก จนทำให้ Roller นั้นเกิดการสึกหรอ จะมีผลต่อผิวของลวด ดังนั้นควรทำการชุบแข็ง Roller

5.2.5 ในการดึงลวดถ้าไม่มีสารหล่อลื่น เมื่อดึงผ่านสายจะเกิดความร้อนและลวดจะขาด

5.2.6 การเก็บลวดที่ลื้อม้วนลวดสามารถเรียงเป็นระเบียบด้วยตัวเองได้ในระยะหนึ่ง เนื่องจากลวดที่เรียงตัวไปเรื่อยๆ มุมของลวดที่ลื้อม้วนเก็บกับ Roller ตัวสุดท้ายจะเปลี่ยนไปเป็นผลให้ลวดไม่สามารถเรียงตัวได้ ดังนั้นควรจะมีตัวพาลวดเก็บที่ลื้อม้วน

5.2.7 เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดนี้มีโครงสร้าง 2 ชุด ในขณะที่ทำการดึงต้องมีการจับยึดโครงสร้างให้มั่นคง เนื่องจากแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปลวดจะทำให้โครงสร้าง 2 ชุดนี้บิดตัวได้

5.2.8 ในการดึงลวดที่มีความแข็งแรงมาก หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดใหญ่เกินไป เป็นผลให้แรงที่ใช้ในการดึงลดขนาดอาจจะมีค่าแรงดึงที่วัดได้เกินกว่าเครื่องมือวัดที่มีอยู่รับได้ต้องระวังอย่าให้แรงดึงมากเกิดกว่าเครื่องมือวัดจะรับได้

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

5.3.1 ทดสอบดึงลดขนาดลวดได้หลายขนาดและหลายรูปทรง โดยการออกแบบแม่พิมพ์ตามที่ต้องการ

5.3.2 เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดนี้จะเป็นเครื่องไว้ใช้ทดลองหรืองานวิจัยในอนาคต เช่น การทดลองหรือวิจัยการสึกหรอของสาย เป็นต้น

5.3.3 ออกแบบตัวพาลวดเก็บที่ลื้อม้วนเก็บ

5.3.4 อาจใช้โปรแกรมเข้ามาช่วยเพื่อที่จะได้ ขนาดลวดที่ลดขนาดออกมามีความเที่ยงตรงมากขึ้น มีคุณภาพผิวที่ดีขึ้น

5.3.5 ในกรณีที่แรงดึงที่วัดได้เกินเครื่องมือวัดที่มีอยู่ อาจใช้สปริงในการวัดแรงดึงแทน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Avitzur, B.Z.L., 1968 **Metal Forming**, McGraw-Hill, New York, pp. 219-246
- [2] Rer. Nat.F.Ender, 1990, **Wire Drawing Machine**, [Online] Available : <http://www.imet.tu-clausthal.de/en/techdienst/wul.shtml>, [2005, June 30].
- [3] Lange, K., 1985, **Handbook of Metal forming**, McGraw Hill, New York, pp. (13.14)-(14.14).
- [4] Skolyszewski, A., Packo, M., Luksza, J. and Ruminski, M., 2002, "Warm Forming of Acid Resistant Steel Wires Used for Manufacturing of Spring", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 125-126, pp. 326-333.
- [5] United Tungsten & Diamond Company Limited, 2546, **มาตรฐานแม่พิมพ์ดึงลวดกลม JIS B4111** (เอกสารแนะนำสินค้า), หน้า 8.
- [6] Schey, J.A., 1984, **Tribology in Metal Working**, American Society for Metals, pp.343-391.
- [7] Dieter, G.E., 1988, **Mechanical Metallurgy**, McGraw-Hill, New York, pp.503-5505.
- [8] Blazynski, T.Z., 1976. **In Metal Forming Tool Profiles and Flow**, Unwin Brothers Ltd., London, pp. 222-238.
- [9] วีศักดิ์ กรีวิเชียร, 2544, **น้ำมันหล่อลื่น**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 1-7.
- [10] ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์, John T.H. pearce, ผกามาศ แซ่ห้วง, วารุณี เปรมานนท์, สุรพล ราษฎร์นุ้ย และ สติทธิชัย วิโรจน์นุปลั้มภัก, 2545, **การตีกรอ, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**, หน้า 129-132.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] วารุณี เปรมานนท์, 2547, “Tribological Behavior of Tool Materials Against Stainless Steel Workpiece Material in a Ball-on-disk Model Wear Device”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 , 18-20 ตุลาคม, pp. 521-242.
- [12] ปัญญา ศรีจันทร์ และ ทิพวรรณ สุขประเสริฐ, 2545, โลหะ วัสดุและการกัดกร่อน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ, หน้า 35-45.
- [13] Sumitomo, 2000, **Diamond-like Carbon**, [Online] Available : <http://www.sei.co.jp/RandD/Itami/e-tool/wadaien.html>, [2005, June 30].
- [14] ดร. วริทธิ์ อิงภากรณ์ และ ชายุ ถนัดงาน, “การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1,2”, บริษัท ซีอีดี ยูเคชั่น จำกัด.
- [15] รศ. สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ, “กลศาสตร์ของแข็ง เล่ม 1”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- [16] ผศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช, “Material Science” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- [17] Manam Stainless Wire Company Limited, 2547, ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม มาตรฐาน JIS G4309 (เอกสารแนะนำสินค้า), หน้า 2-4.
- [18] Donald P. and Bernstein I. M., **Handbook of Stainless Steel**, [online], Available:<http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=Q304A>[2005, June 30].
- [19] Serope Kalpakjian, 1991, **Manufacturing Processes for Engineering Material**, John wiley Publishing Company, Illinois Institute of Technology, pp.49-85, pp.38.
- [20] William D. Callister, Jr.,2001, **Fundamentals of Materials Science and Engineering**, John Wiley & Sons, New York, pp. 445-448.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก. 1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304

ตารางที่ ก.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก SUS 304 อ้างอิงจากบริษัทผู้ผลิตลวดเหล็กกล้าไร้สนิม บริษัท Mamam Stainless Wire Company [17]

ส่วนผสมทางเคมี								
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Other
0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	8.0-10.5	18.0-20.0	-	0.1

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 [18],[19]

คุณสมบัติทางกล	ค่า
Hardness , Vickers	129
Strain hardening exponent	0.45
Strength coefficient	1275
Modulus of Elasticity	193-200 Gpa
Poisson's Ratio	0.29

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติทางกลของทังสเตนคาร์ไบด์[20]

คุณสมบัติทางกล	ค่า
Modulus of Elasticity	400 Gpa
Poisson's Ratio	0.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 จากการทดลองตามมาตรฐาน มอก.

244 เล่ม 7

	คุณสมบัติทางกล	ค่า
ลวดก่อนการดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	419.7 N/mm <sup>2</sup>
	Yield Strength (MPa)	344.8 N/mm <sup>2</sup>
	Elongation at Break	71.3%
ลวดหลังการดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	441 N/mm <sup>2</sup>
	Yield Strength (MPa)	365.2 N/mm <sup>2</sup>
	Elongation at Break	33.3%

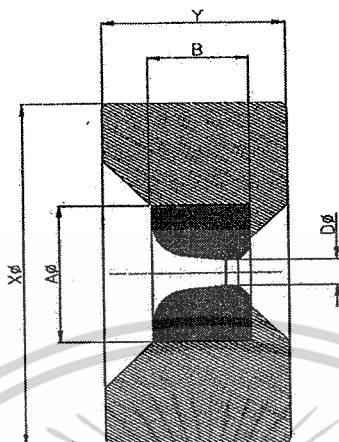


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1มาตรฐานแม่พิมพ์ดีดกลึงและการออกแบบ



รูปที่ ข.1 ขนาดของแม่พิมพ์ดีดกลึง ตามมาตรฐาน JIS B4111 [5]

ตารางที่ ข.1 ขนาดมาตรฐาน JIS B4111 ของแม่พิมพ์ดีดกลึง

ชนิด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูใน D มม.	Steel Case		Carbide Nib	
		X	Y	A	B
		มม.	มม.	มม.	มม.
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	1
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	94-1004	300	100	150	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข. 2 คุณสมบัติของคาร์ไบด์ที่ใช้ทำแม่พิมพ์ในการทดสอบ ตามมาตรฐานคาร์ไบด์ เกรด K20 (ISO Code) อ้างอิงตามมาตรฐาน บริษัท ยู ไนเต็ด ทังสตัน แอนด์ ไดมอนด์ จำกัด (United Tungsten & Diamon Co., LTD) ผู้ผลิตแม่พิมพ์ดีงลาว

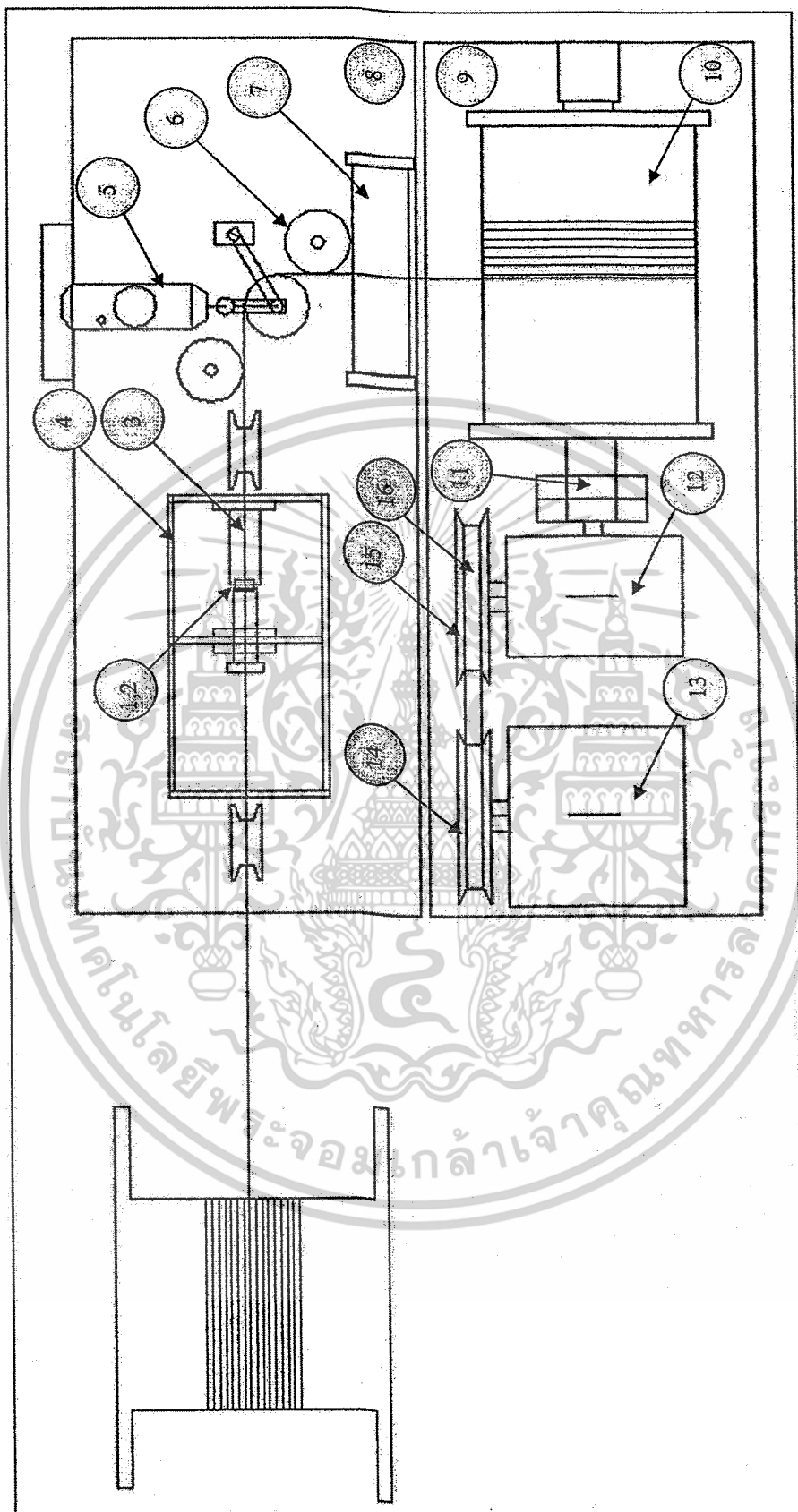
คุณสมบัติ	ค่า
Hardness (HRA)	91.5-92.4
TRA (KPIS)	>240
T.R.S Kg/mm <sup>2</sup>	200
Density (g/cc)	14.80-15.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



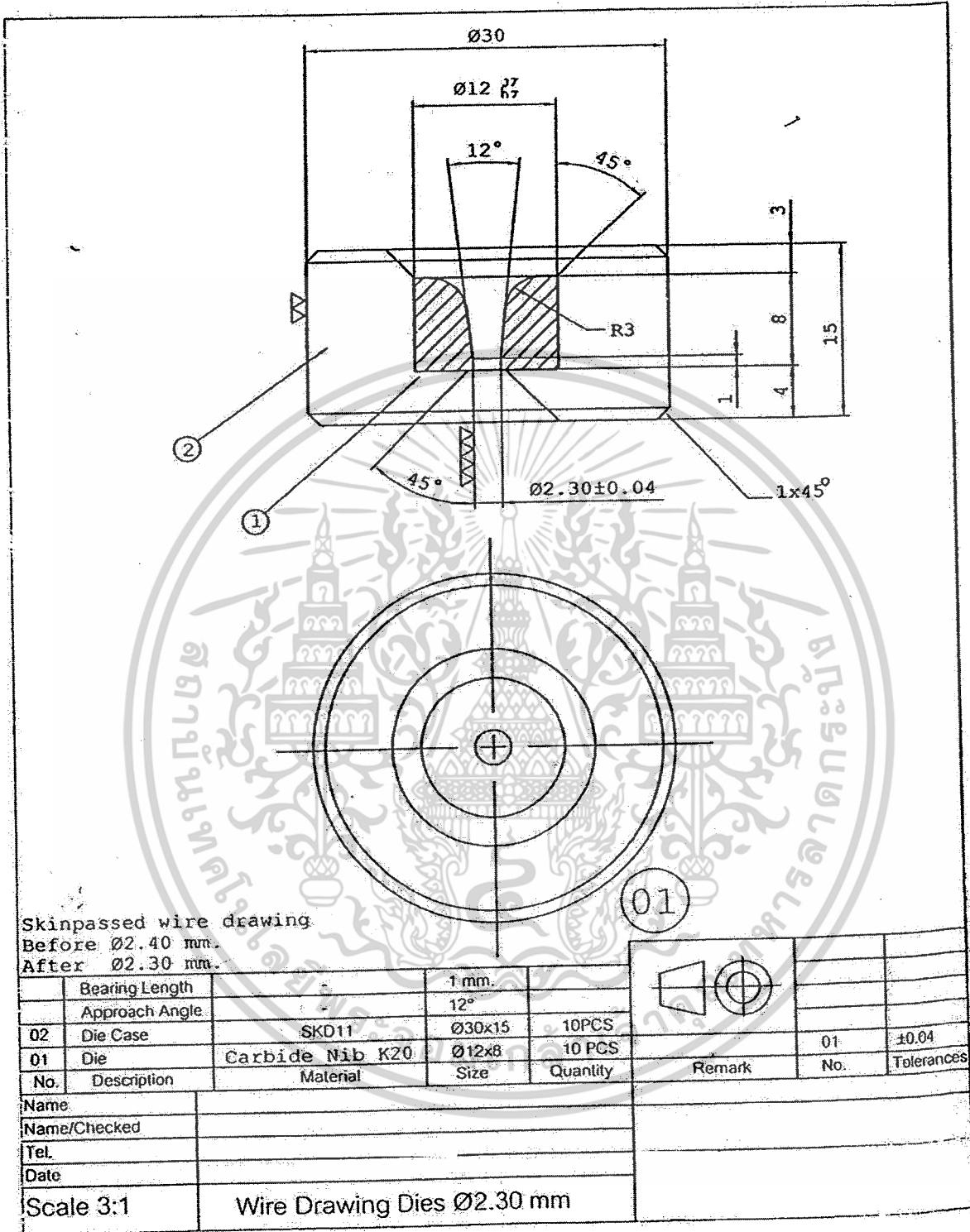
รูปที่ ๑. ภาพประกอบเครื่องดัดสวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.1 ส่วนประกอบเครื่องดึงลวด

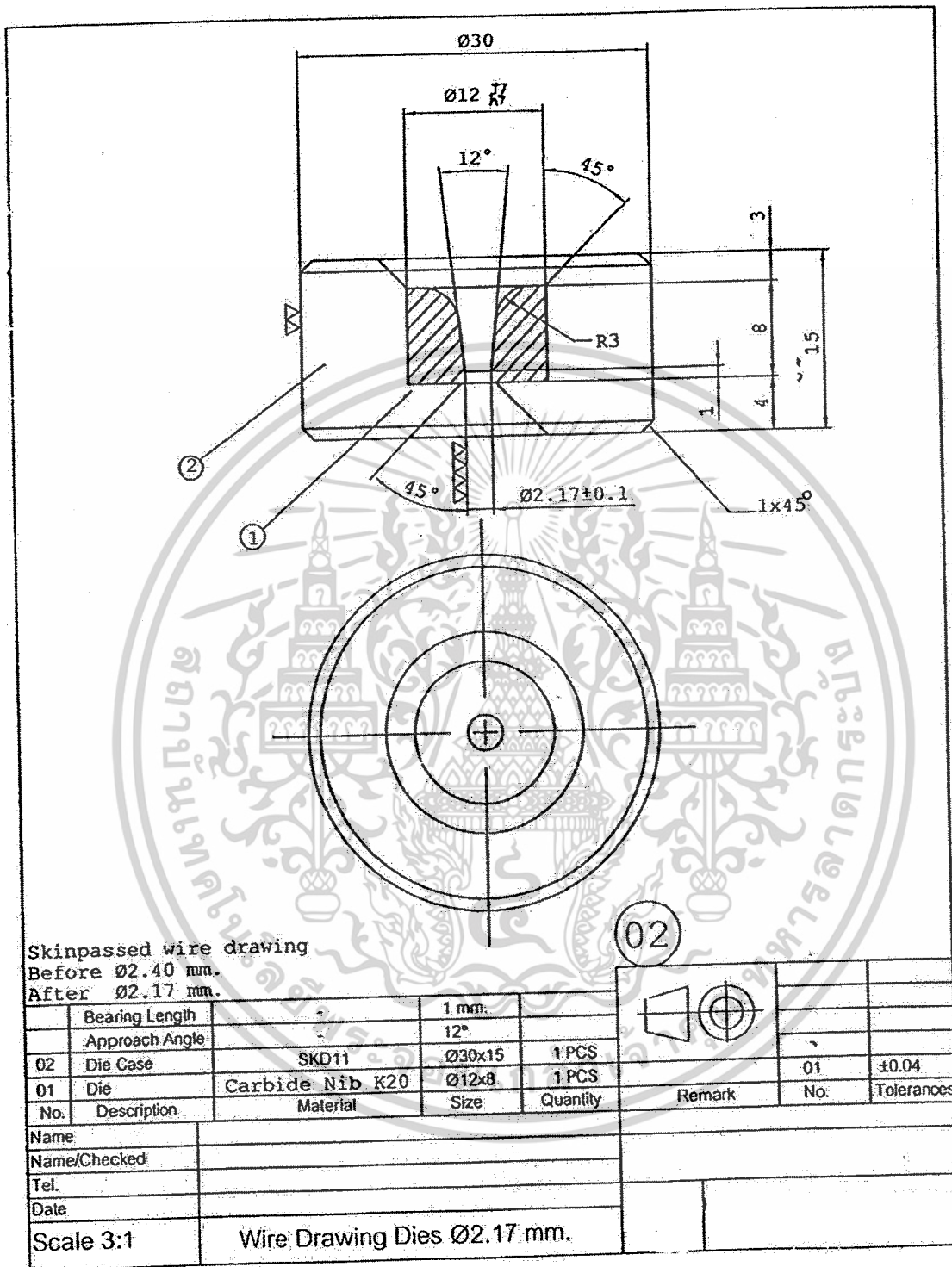
ที่	รายการ	ขนาด	วัสดุ	จำนวน
1.	Wire drawing dies Ø 2.30	Ø 2.30 mm.	WC K20	1 ตัว
2.	Wire drawing dies Ø 2.17	Ø 2.17mm.	WC K20	1 ตัว
3.	ตัวจับยึดแม่พิมพ์ดึงลวด	Ø45×243mm.	JIS S45C	1 ชุด
4.	อ่างใส่สำหรับสารหล่อลื่น	600×280mm.	JIS S10C	1 ชุด
5.	Push-Pull Gage รุ่น NK-500	500 N.	-	1 ตัว
6.	Bearing	Ø2.5 in.	-	5 ตัว
7.	Roller	Ø50mm.×150mm.	-	1 ตัว
8.	ฐานเครื่องดึงลวด	560×1010×890mm.	JIS S10C	1 ตัว
9.	ฐานเครื่องชุดต้นกำลังเครื่อง	560×1010×890mm.	JIS S10C	1 ตัว
10.	ล้อหมุนดึงลวด	Ø175mm.	JIS S10C	1 ล้อ
11.	ชุดต่อส่งต่อกำลัง	Ø 3 in.	-	1 ชุด
12.	Gear Box	30:1	-	1 ชุด
13.	มอเตอร์	2 hp.	-	1 ตัว
14.	พูลเล	Ø3 in.	-	1 ตัว
15.	พูลเล	Ø12 in.	-	1 ตัว
16.	สายพาน	เบอร์ 69	-	1 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก. 2 ภาพตัดแม่พิมพ์ดึงลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.30 มิลลิเมตร

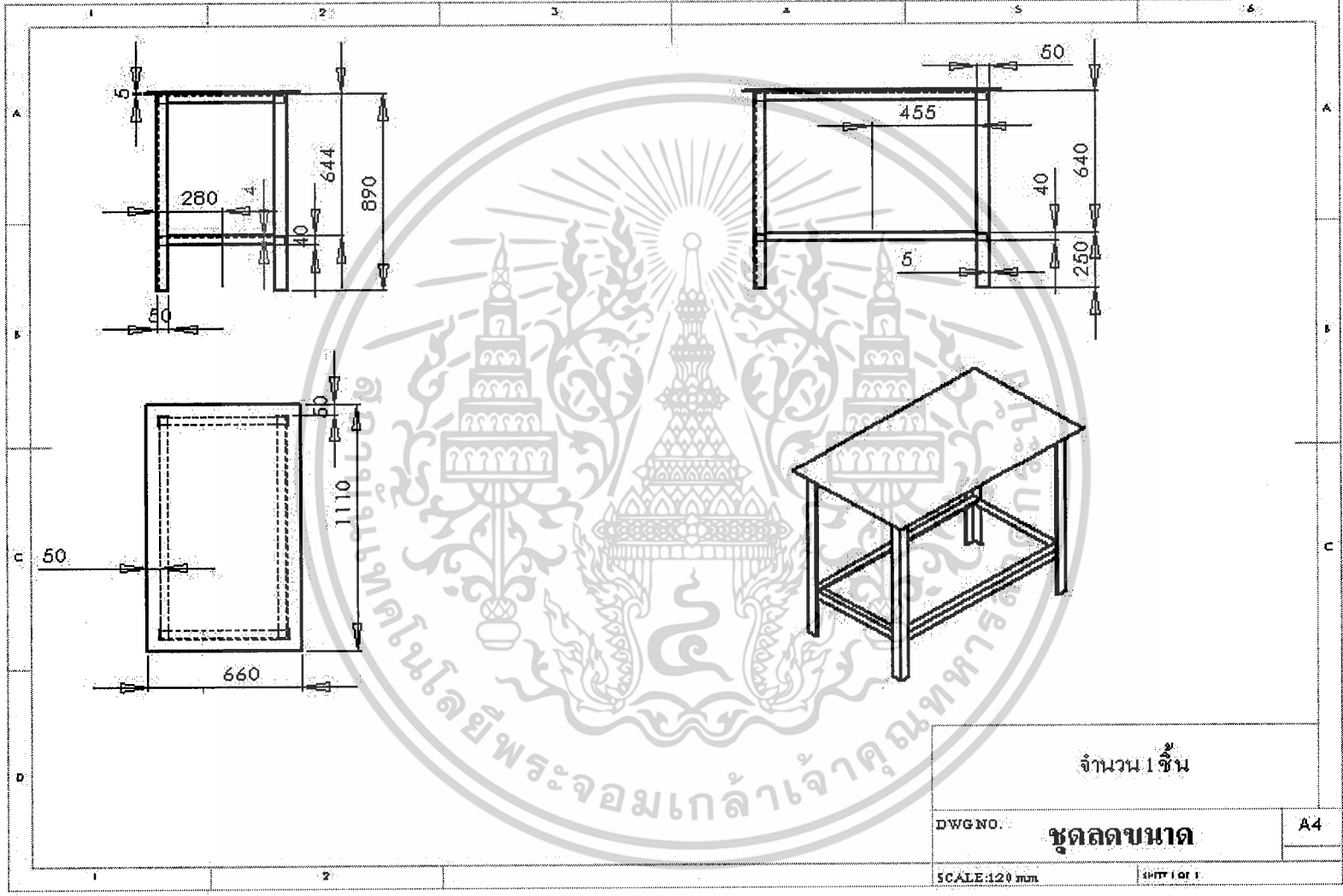
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



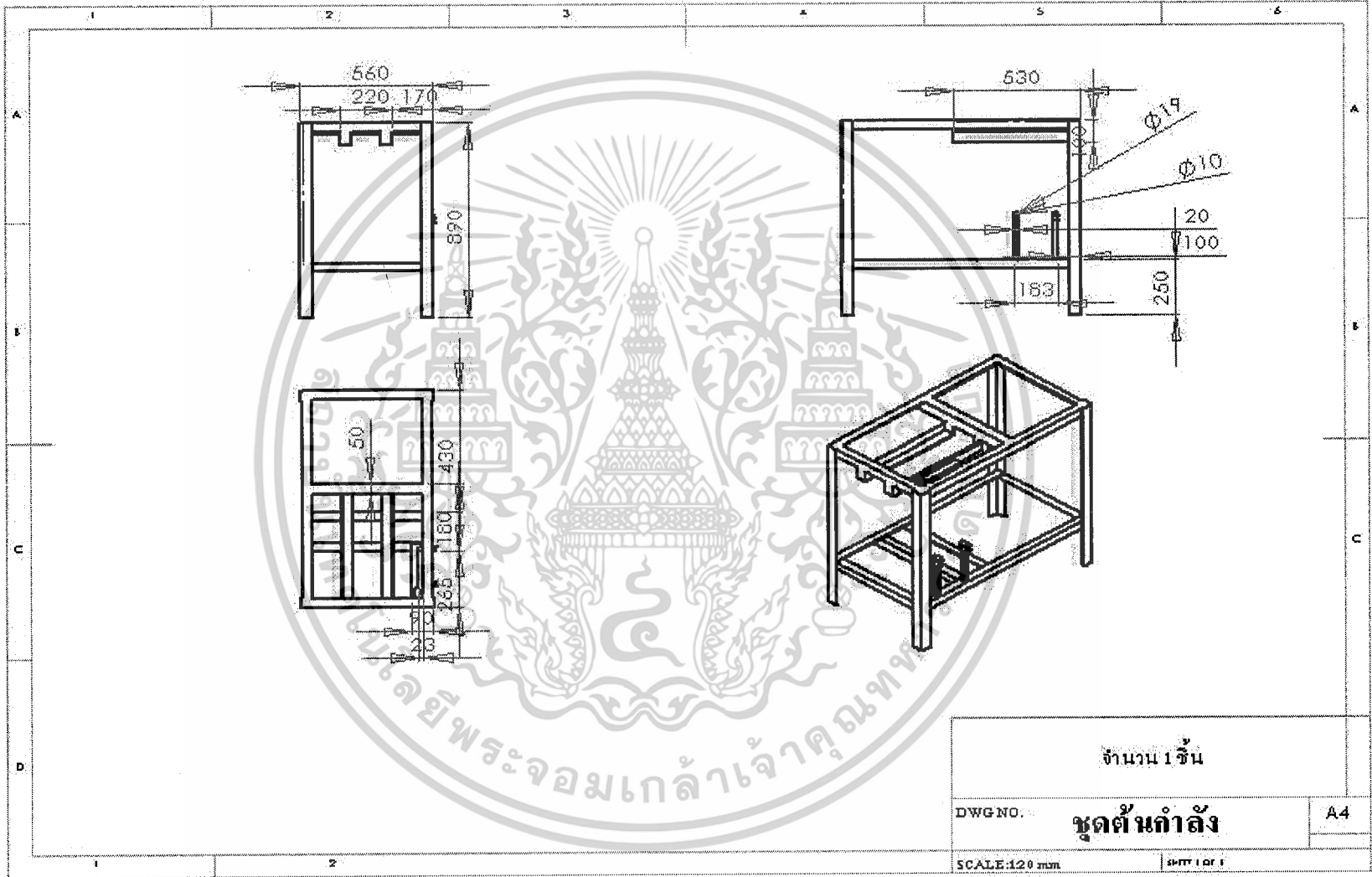
รูป ค. 3 ภาพตัดแม่พิมพ์ดึงลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.17 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

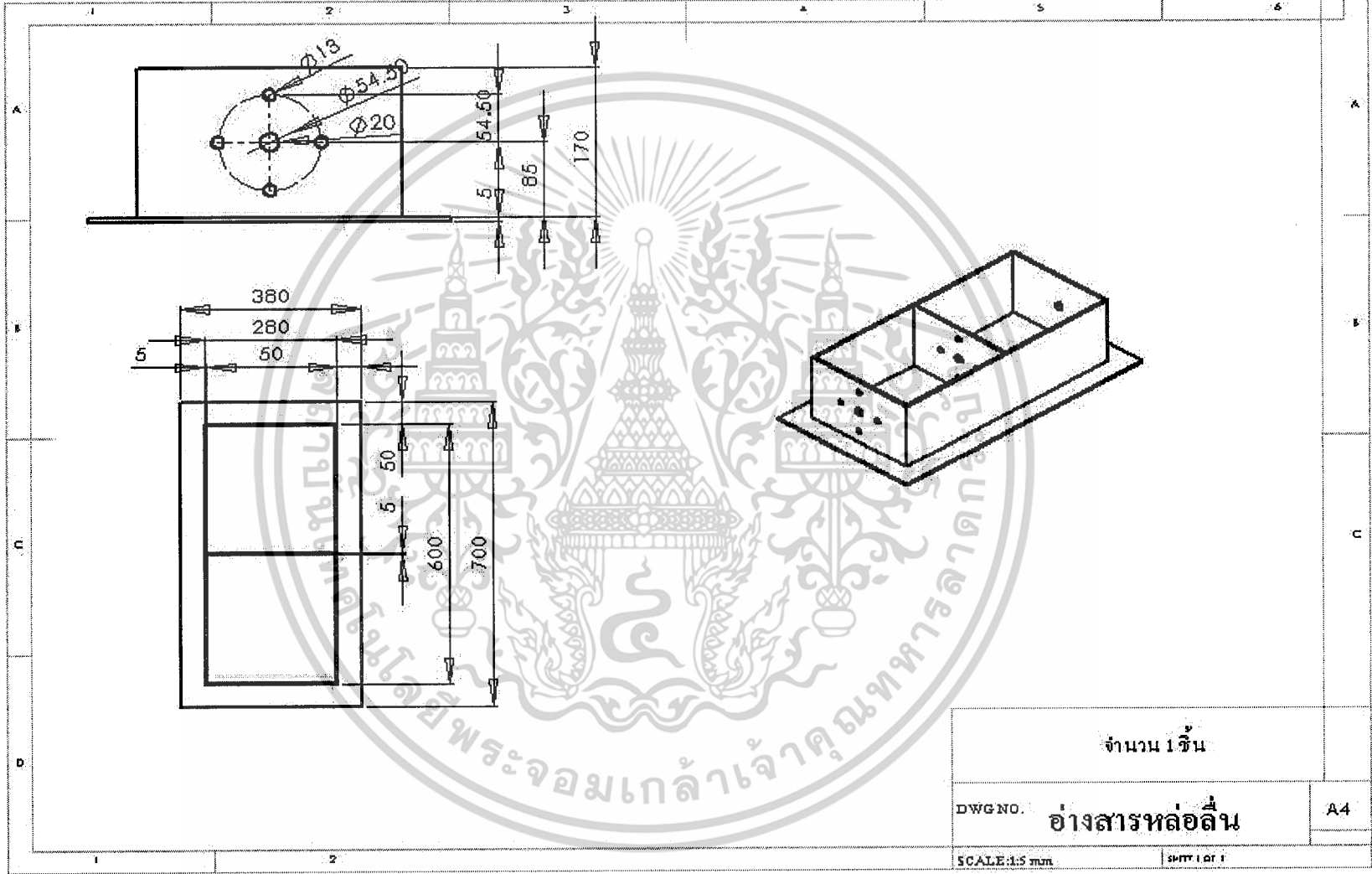
รูปที่ 4 แบบฐานเครื่องกลึง



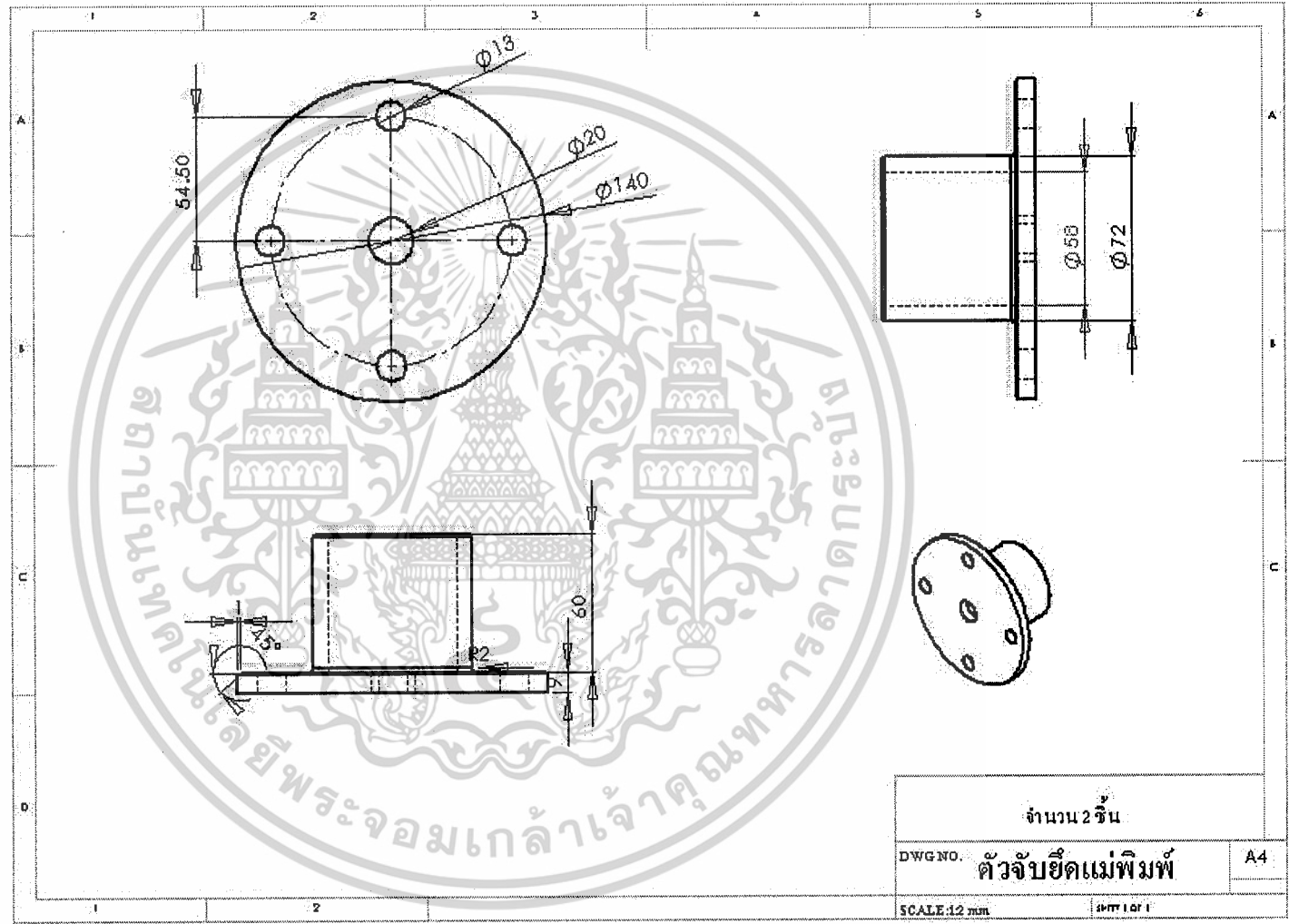
สมุดแบบก่อสร้างของแผนกช่างไม้



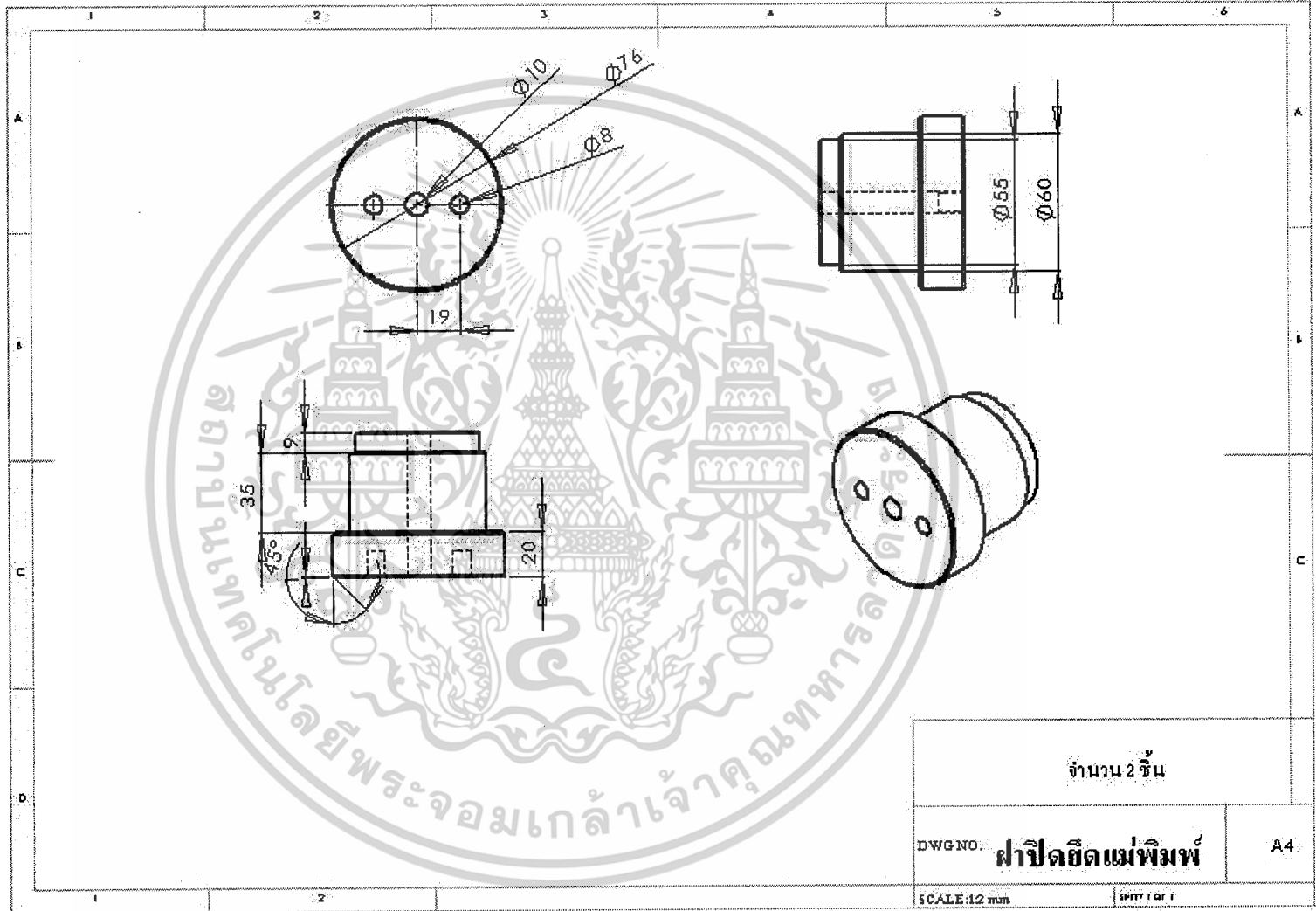
พียอชเรเนงเตปรีเ่งอังกา ๑๗ ใกรึ



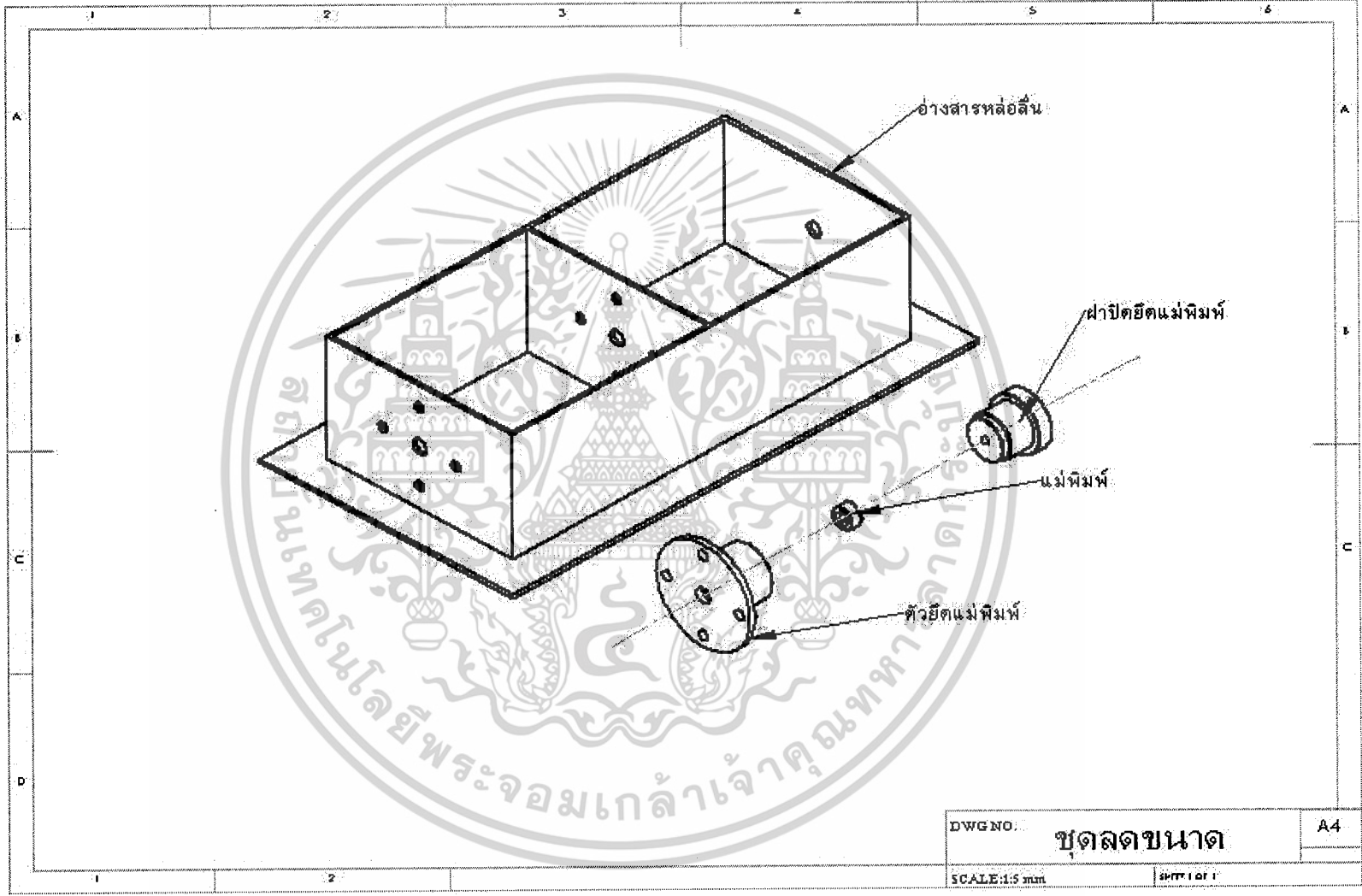
รูปที่ ๗ แบบตัวจับยึดแม่พิมพ์



รูปที่ ค. 8 ตัวปิดยึดแม่พิมพ์ตลับตัวที่ 2



รูปที่ ค.๑ ภาพประกอบชุดลดขนาด





ภาคผนวก ง.  
บทความประกอบวิชาโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# เครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด<sup>1</sup>

นริศ เกลาเกลี้ยง<sup>2</sup>, คักดิณา วิลาศ<sup>2</sup>, วิทยา แพทย์ประเสริฐ<sup>2</sup>



สมชัย นรเศรษฐ์ไศภาน<sup>3</sup>

## บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวดเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเน้นการดึงขึ้นรูปลวดผ่านผงกราไฟท์ เพื่อลดปัญหาด้านการสึกหรอของแม่พิมพ์ดึงขึ้นรูปลวด และความแม่นยำของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสำเร็จที่เพิ่มขึ้น โดยทำการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 ที่การดึงขึ้นตอนสุดท้าย (Skin pass) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดเริ่มต้น  $\varnothing 2.40$  มิลลิเมตร ลดลงเหลือ  $\varnothing 2.30$  มิลลิเมตร (อัตราการลดขนาดหน้าตัดของลวดร้อยละ 9.0) ใช้กระบวนการดึงลวดแบบขั้นเดียวความเร็วในการดึง 0.12 มิลลิเมตรต่อวินาที แม่พิมพ์การดึงลวดทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ ลักษณะรูปร่างตามมาตรฐาน JIS B4111 W103 มีมุมไหลเข้า ( $2\alpha$ ) เท่ากับ  $12^\circ$

## Abstract

The purpose of this project is to produce wire drawing testing machine focusing on lubrication. The main objective of this work is to decrease die wear and to increase the accuracy of finished wire diameter. The experiments of skin pass drawing had been carried out using stainless steel wire (SUS 304) of 2.40 mm diameter as a raw material. The diameter of the wire is reduced to 2.30 mm (or the reduction ratio of the process is 9.0 percent). Drawing speed determined to be 0.12 mm/s. Drawing die inserts, which their shapes were formed according to JIS B4111 W103, are made of tungsten carbide. An approach angle of the dies is  $12^\circ$ .

**Keywords:** Wire Drawing / wear / Approach Angle / Surface Quality

## 1. บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

อุตสาหกรรมการดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เพราะลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่มีความสวยงามทนการกัดกร่อนได้สูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวในอุตสาหกรรมต่างๆจึงได้นำลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุทำผลิตภัณฑ์ต่อ เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ในการผลิตลวดที่มีความเที่ยงตรงสูงจำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ดึงลวดที่มีการสึกหรอที่ต่ำ เช่น แม่พิมพ์ที่ทำจากเพชร แต่ด้วยเหตุผลด้านต้นทุนการผลิตที่สูงมากในอุตสาหกรรมดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไปจึงใช้แม่พิมพ์ดึงลวดทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ แต่แม่พิมพ์ดึงลวดทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ยังเกิดปัญหาด้านการสึกหรอที่สูงส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูในแม่พิมพ์เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ลวดความเที่ยงตรงสูงและยังพบปัญหาด้านคุณภาพผิวที่หยาบเนื่องจากการเชื่อมติด (Adhesion) ของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่รูแม่พิมพ์ทำให้ลวดที่เคลื่อนที่ผ่านถูกขัดเป็นรอยในการซ่อมแซมจะต้องหยุดกระบวนการและทำการขัดดาบเป็นระยะ ซึ่งทำให้รูในแม่พิมพ์ลดขนาดผิดพลาดไปหรืออาจต้องเปลี่ยนแม่พิมพ์ดึงลวดทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องแก้ไขปัญหานี้

<sup>1</sup> ชื่ออังกฤษ "Wire drawing testing machine"

<sup>2</sup> นักศึกษาคณะวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 3Q/1,3Q/2 รหัส 49015498, 49015510 และ 49015525 ตามลำดับ

<sup>3</sup> อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. โทร. 0849194989, อีเมล [knosomch@kmitl.ac.th](mailto:knosomch@kmitl.ac.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**สัญลักษณ์**

%R	อัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด	$\alpha$	ครึ่งมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์
$2\alpha$	มุมไหลเข้าของแม่พิมพ์	$D_0$	เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดลวดเริ่มต้น
$A_0$	พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง	$A_1$	พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง
$\mu$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	$F_{D,tot}$	แรงดึงขึ้นรูปของกรรมวิธีดึงลวด
$F_{id,D}$	แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน	$F_{FR,S}$	แรงเสียดทานบนช่วงมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ดึงลวด
$F_{sh}$	แรงเฉือนรีตันแดนท์	$\epsilon_{max}$	ความเครียด
$\sigma_{f,m}$	ความเค้นของการไหลเฉลี่ยความเค้นในแนวแกน	$\sigma_{f,0}$	ความเค้นขึ้นรูปของวัสดุก่อนดึง
$\sigma_{f,1}$	ความเค้นขึ้นรูปของวัสดุหลังดึง	$\hat{\alpha}$	$\tan \alpha$

**1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ**

ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด เพื่อใช้ศึกษา ลวดที่ผ่านการดึงมีคุณภาพผิวที่ดีขึ้น ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสำเร็จที่ถูกต้องแม่นยำขึ้น โดยทำการปรับปรุงสภาวะกระบวนการผลิต ด้วยการศึกษารหัสลวดชนิดต่างๆ และเปรียบเทียบความเค้นของลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนดึงและหลังดึงลดขนาด

**1.3 ขอบเขตของโครงการ**

1.3.1. ทำการทดลองดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลวดก่อนดึง 2.40 มิลลิเมตร ลดลงเหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังการดึง 2.30 มิลลิเมตร ทำการดึงขั้นสุดท้าย (Skin Pass) มีอัตราการลดขนาดหน้าตัดลวด (Reduction Ratio of Cross Sectional Area) %R = 9.0 เปอร์เซ็นต์

1.3.2. สร้างแม่พิมพ์ดึงลวดหน้าตัดกลมแบบตายอินเล็ต รูปร่างตามมาตรฐาน W 103 (JIS B4111) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูของแม่พิมพ์ 2.30 มิลลิเมตร มีมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Approach Angle,  $2\alpha$ ) =  $12^\circ$  (ครึ่งมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Semi Angle,  $\alpha$ ) =  $6^\circ$ ) ระยะกำหนดขนาด (Die Bearing) 1 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแม่พิมพ์ส่วนนอก (Die Case)  $30 \times 15$  มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตายอินเล็ต (Die Insert)  $12 \times 8$  มิลลิเมตร ทำจากโลหะผสมคาร์ไบด์ เกรด K20 (ISO Code)

1.3.3. สร้างเครื่องดึงลวดแบบดึงขึ้นรูปขึ้นเดียวใช้ระบบมอเตอร์เป็นชุดต้นกำลัง ความเร็วในการดึง 0.12 มิลลิเมตรต่อวินาที กระบวนการขึ้นรูปโลหะเมื่อแบ่งกลุ่มตามการวิเคราะห์การทำงานแล้วจะมีอยู่ 2 กลุ่มคือ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร (Steady State Process) และกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบไม่เสถียร (Non Steady State Process) กระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียร ได้แก่ กระบวนการดึงลวด กระบวนการรีด (Rolling) และกระบวนการอัดขึ้นรูป (Extrusion) ที่ขึ้นรูปยาว ส่วนงานในกลุ่มกระบวนการขึ้นรูปโลหะ

แบบไม่เสถียรเป็นกระบวนการขึ้นรูปแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น กระบวนการตัด (Blanking) กระบวนการตีขึ้นรูป (Forging) กระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) กระบวนการดึงลวดเป็นงานในกลุ่มกระบวนการขึ้นรูปโลหะแบบเสถียรที่มีการขึ้นรูปขึ้นงานที่ยาวและต่อเนื่องมากที่สุด

**2. แรงที่ใช้ในการดึงลวด (Drawing Force)**

แรงที่ใช้ในกระบวนการดึงลวดนั้น เป็นแรงที่เกิดจากการดึงที่ปลายลวดด้านหนึ่งผ่านรูของตาย เพื่อลดพื้นที่หน้าตัดของลวด ซึ่งแรงดึงขึ้นรูปลวดจะพิจารณาจากผลรวมของแรงในสามส่วน ซึ่งประกอบด้วยแรงในการดึงขึ้นรูปวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Ideal Deformation Force) แรงเสียดทาน (Friction Force) และแรงเฉือนหรือแรงเฉือนรีตันแดนท์ (Redundant Shearing) สมการของแรงดึงขึ้นรูปสามารถคำนวณได้ด้วย Siebel's Method ดังสมการ

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh}$$

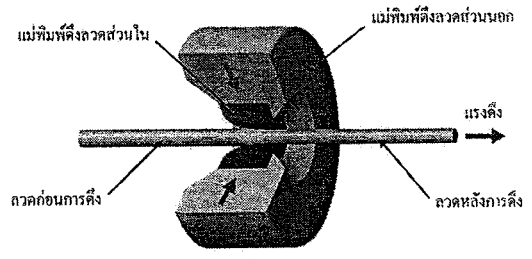
$$F_{D,tot} = \text{แรงดึงขึ้นรูปรวมของกรรมวิธีดึงลวด}$$

$$F_{id,D} = \text{แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ}$$

$$F_{FR,S} = \text{แรงเสียดทาน}$$

$$F_{sh} = \text{แรงเฉือนรีตันแดนท์}$$

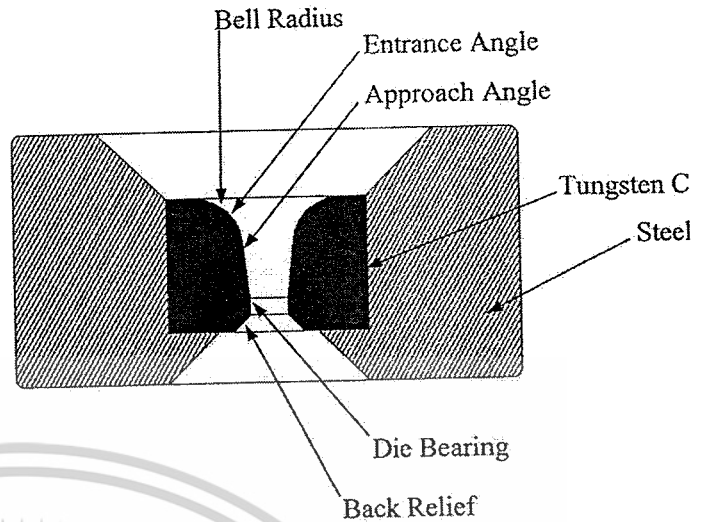
**3. กระบวนการดึงลวด**



รูปที่ 3.1 การดึงลวดผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
 หมายความว่าเอกสารนี้สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
 หมายความว่าเอกสารนี้สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

หลักการทั่วไปของการดึงลวดและการดึงท่อจะมีพื้นฐานคล้ายกัน แต่จะต่างกันออกไปตรงขนาดและรูปร่างหลังการดึง กระบวนการดึงลวดเริ่มจากการนำวัสดุที่เป็นท่อหรือลวดหลังจากผ่านการขึ้นรูปร้อนมาดึงลดขนาดโดยการดึงผ่านแม่พิมพ์ดึงลวด ดังรูปที่ 3.1 ผลลัพธ์จากการดึงลวดจะมีรูปร่างหลากหลายขึ้นอยู่กับรูปทรงรูในของแม่พิมพ์ดึงลวด ได้แก่ รูปสี่เหลี่ยม รูปทรงกลม รูปทรงหกเหลี่ยม รูปทรงอื่นๆที่ซับซ้อนขึ้น แต่ขีดจำกัดของรูปทรงที่สามารถขึ้นรูปได้จริงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุของแต่ละชนิด กรรมวิธีการดึงลวดเริ่มจากการนำลวดมาทำความสะอาดเพื่อขจัดผิวที่เกิดออกไซด์ก่อน ซึ่งหากผิวที่เกิดออกไซด์หลุดออกจะทำให้เกิดการเสียดสีกับผิวแม่พิมพ์ดึงลวดและส่งผลให้เกิดการสึกหรอ การดึงเริ่มต้นโดยให้แรงดึงที่ปลายด้านหนึ่งของลวดด้วยชุดกำลัง รูปร่างของลวดจะถูกกำหนดด้วยขนาดรูในของแม่พิมพ์ เป็นการทำงานในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ (Plastic Deformation) ระดับของการดึงลวดเมื่อแบ่งตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด [3] จะมีตั้งแต่การดึงลวดลวดขนาดใหญ่  $D_0 = 4.2$  ถึง 16 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดกลาง  $D_0 = 1.6$  ถึง 4.2 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็ก  $D_0 = 0.7$  ถึง 1.6 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็ก (Fine Wire)  $D_0$  น้อยกว่า 0.7 มิลลิเมตร การดึงลวดขนาดเล็กมากสามารถดึงได้เล็กสุด 0.03 มิลลิเมตร แต่ก็ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) การหล่อลื่นในกระบวนการดึงจะมีทั้งของเหลวและของแข็ง ของเหลว ได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นต่างๆ ส่วนการใช้สารหล่อลื่นแบบของแข็ง ได้แก่ กราไฟท์ (Graphite) ระบบการหล่อลื่นจะมีทั้งการหยด การพ่นแม่พิมพ์อยู่ในสารหล่อลื่น และลวดวิ่งผ่านสารหล่อลื่น การดึงลวดแบบอุ่น (Warm Drawing) [4] เป็นกรรมวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการดึงขึ้นรูปลวดที่มีความแข็งแรงมากและดึงขึ้นรูปยากเป็นกระบวนการดึงลวดโดยเพิ่มความร้อนให้กับวัสดุหรือแม่พิมพ์ดึงลวดจนลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ 200-500 องศาเซลเซียสแต่ต่ำกว่าจุดการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุ ทำให้ผิวภายนอกของลวดมีความแข็งแรงลดลงแต่ภายในลวดความแข็งแรงยังคงเดิมอยู่ ลวดที่ผ่านการดึงมาจะเกิดความเครียดสูง (Strain Hardening) มากขึ้นและมีความแข็งแรงล้าของวัสดุ (Fatigue Strength) สูงขึ้น งานที่ทำการการขึ้นรูปอุ่นได้แก่ ลวดสปริง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ หรือลวดที่ต้องการเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้สูงขึ้นส่วนกระบวนการดึงลวดขั้นสุดท้าย (Skin Pass Wire Drawing) จะเป็นการดึงลดขนาดในช่วงสุดท้ายเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จที่มีความเรียบผิวดี การดึงลักษณะนี้จะม้อัตรการลดหน้าตัดของลวดต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 3.2 ภาพตัดรูปร่างของแม่พิมพ์ดึงลวดกลม

ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ดายอินเสิร์ท (Die Insert) และแม่พิมพ์ส่วนนอก (Steel case) ดังรูปที่ 3.2

3.1.1. ดายอินเสิร์ท คือ แม่พิมพ์ส่วนในที่ถูกอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ส่วนนอก โดยทั่วไปจะทำมาจากโลหะผสมคาร์ไบด์หรือทำจากเพชร (Diamond Die) ในกรณีการดึงลวดที่มีความละเอียดมาก ซึ่งดายนินเสิร์ทจะมีส่วนประกอบดังนี้

ก. รัศมีโค้งที่ปากตาย (Bell Radius) เป็นส่วนที่ลวดเริ่มเข้าสู่แม่พิมพ์ มีลักษณะคล้ายระฆัง ช่วยให้ลวดลื่นไหลเข้าสู่การลดหน้าตัดได้ดีขึ้น ลักษณะรัศมีโค้งที่ปากตายยังช่วยให้เกิดแรงอัดจากของเหลว (Hydrostatic Pressure) ส่งผลช่วยให้สารหล่อลื่นไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ให้การหล่อลื่นดีขึ้น

ข. มุมปากทางเข้า (Entrance Angle) เป็นส่วนทางเข้าที่ลวดถูกควบคุมโดยผนังด้านข้างลื่นไหลเข้าสู่การลดหน้าตัดพร้อมกับมีสารหล่อลื่นเป็นฟิล์มเคลือบ

ค. ครึ่งมุมไหลเข้า  $\alpha$  (Approach Angle) เป็นส่วนแรกที่ดายนินเสิร์ททำ การลดหน้าตัดลง เป็นมุมที่มีอิทธิพลต่อการไหลของเนื้อโลหะ มุมนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาในการกำหนดแรงในการดึงลวด

ง. ส่วนกำหนดขนาด (Die Bearing) เป็นส่วนที่กำหนดขนาดของลวดให้มีขนาดเท่ากับขนาดที่ต้องการของลวดสำเร็จ เป็นส่วนที่มีความเสียดทานและการสึกหรอที่ส่วนนี้จะส่งผลต่อรูปทรงและผิวสำเร็จของลวดหลังการดึง

จ. ส่วนทางออก (Back Relief) เป็นส่วนช่วยให้ลวดลื่นไหลออกจากแม่พิมพ์ดึงลวด และจะช่วยทำให้ลวดรักษาความเป็นเส้นตรง

3.1.2. แม่พิมพ์ส่วนนอก เป็นส่วนประกอบที่ใหญ่กว่าเพื่อประโยชน์ในการรับแรงที่มาก และง่ายในการซ่อมบำรุงเมื่อเกิดการสึกหรอ

3.1 ลักษณะแม่พิมพ์ดึงลวด

ลักษณะแม่พิมพ์ดึงลวดกลมตามมาตรฐาน JIS B4111 [5] จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า การรับแรงที่มาก และง่ายในการซ่อมบำรุงเมื่อเกิดการสึกหรอ

4. การคำนวณแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอด

การคำนวณแรงในการดึงขึ้นรูปนี้เพื่อจะทราบแรงในทางทฤษฎี ในการทดลองจะใช้หลอดเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ค่า Ultimate Tensile Strength = 419.7 N/mm<sup>2</sup> มีมุมไหลเข้าของแม่พิมพ์ (Approach Angle) = 12°, Semi Angle (α) = 6°

1. อัตราการลดขนาดหน้าตัดของหลอด [1]

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100$$

A<sub>0</sub> คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm<sup>2</sup>]

A<sub>1</sub> คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm<sup>2</sup>]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดก่อนการดึง 2.40 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดหลังการดึง 2.30 มิลลิเมตร

พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_0 = \frac{\pi 2.40^2}{4}$$

$$A_0 = 4.5239$$

พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง

$$A_1 = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_1 = \frac{\pi 2.30^2}{4}$$

$$A_1 = 4.1547$$

อัตราการขนาดหน้าตัดของหลอด

$$\%R = \frac{A_0 - A_1}{A_1} \times 100$$

$$\%R = \frac{4.5239 - 4.1547}{4.1547} \times 100$$

$$\%R = 8.16 \approx 9\%$$

ตาราง 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในงานดึงขึ้นรูปและงานอัดขึ้นรูปขึ้นงาน [3]

Process	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)
Solid Forward Extrusion	0.04 - 0.08
Hollow Forward Extrusion	0.10 - 0.125
Drawing of Bar and Tubes	0.02 - 0.05
Ironing	0.02 - 0.07
Drawing Hollow Bodies	0.02 - 0.08

4.1. การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูปหลอดนี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแรงที่ใช้ในการดึงหลอด ใช้การคำนวณโดย Siebel's Method

$$F_{D,tot} = F_{id,D} + F_{FR,S} + F_{sh}$$

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

เมื่อ

A<sub>0</sub> = พื้นที่หน้าตัดก่อนการดึง [mm<sup>2</sup>]

A<sub>1</sub> = พื้นที่หน้าตัดหลังการดึง [mm<sup>2</sup>]

σ<sub>f,m</sub> = ความเค้นในแนวแกน ความเค้นของการไหลเฉลี่ย [N/mm<sup>2</sup>]

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน Coulomb's coefficient of Friction (μ ≈ 0.08)

α = ครึ่งมุมไหลเข้าแม่พิมพ์

$$\hat{\alpha} = \tan \alpha$$

เมื่อ α̂ = 0.1051

เมื่อ ε<sub>max</sub> = ความเครียด

$$\epsilon_{max} = \ln \frac{A_0}{A_1}$$

$$\epsilon_{max} = \ln \frac{4.5239}{4.1547}$$

$$\epsilon_{max} = 0.08513$$

เมื่อ

σ<sub>f,m</sub> = ความเค้นตามแนวแกน [N/mm<sup>2</sup>]

$$\sigma_{f,m} = \frac{1}{2} (\sigma_{f,0} + \sigma_{f,1})$$

$$\sigma_{f,m} = \frac{1}{2} (344.8 + 356.2)$$

$$\sigma_{f,m} = 355 N/m^2$$

แรงดึงในการขึ้นรูป

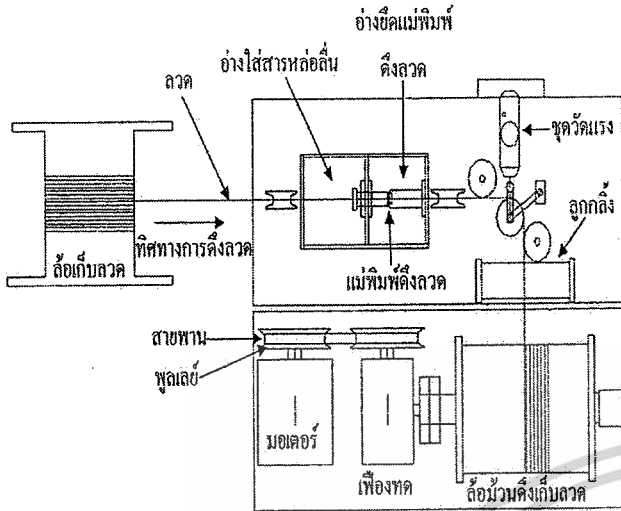
$$F_{D,tot} = A_1 \times \sigma_{f,m} \times \left[ \left( 1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \epsilon_{max} + \frac{2}{3} \hat{\alpha} \right]$$

$$F_{D,tot} = 4.1547 \times 355 \times (0.151 + 0.070)$$

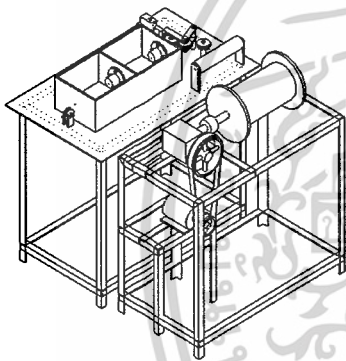
$$F_{D,tot} = 325.96 N$$

ขอสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

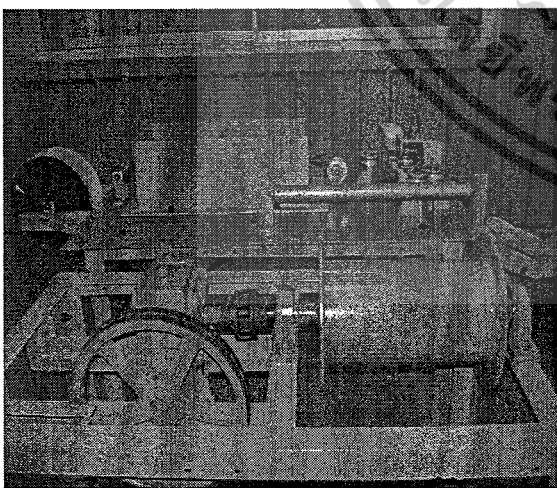
โครงการนี้เป็นงานออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบดึงขึ้นรูปลวด เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 โดยการดึงผ่านกราไฟท์ เป็นกระบวนการดึงลวดแบบขั้นเดียวที่ขึ้นตอนการดึงขั้นสุดท้าย ประกอบไปด้วย



รูปที่ 5.1 เครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียวที่ใช้ในงาน



รูปที่ 5.2 การออกแบบเครื่องดึงที่ใช้ในการดึง



รูปที่ 5.3 เครื่องดึงทดสอบขึ้นรูปลวดจริง

## 5. วิธีการดำเนินโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการค้าภายใต้เงื่อนไขการรับประกัน ISO 9001:2015 (ISO Code) แม่พิมพ์ส่วนนอกเป็นส่วนประกอบที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาในการรับแจ้งอยู่ด้านนอกทำจากวัสดุ JIS SKD11 ที่มีการนำไปใช้

### 5.1 สร้างเครื่องดึงลวดแบบขั้นเดียว (Single Stepped Wire Drawing)

การออกแบบเครื่องจะออกแบบตามแบบที่ใกล้เคียงกับที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูปที่ 5.1 รูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 เครื่องดึงลวดแบบการดึงขั้นเดียว อัตราความเร็วในการดึงลวด 0.12 มิลลิเมตรต่อวินาที ต้นกำลังในการดึงลวดใช้ระบบมอเตอร์เป็นต้นกำลังผ่านชุดเฟืองทดเพื่อลดรอบให้ช้าลง และลวดจะถูกเก็บด้วยล้อม้วนดึง ในขณะที่เดียวกันก็จะม้วนเก็บลวดไปด้วย ล้อม้วนดึงลวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 175 มิลลิเมตร ระบบการหล่อลื่นของเครื่องดึงลวดจะกำหนดให้ลวดวิ่งผ่านสารหล่อลื่นกราไฟท์แล้วเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อลดขนาด ชุดหล่อลื่นจะประกอบด้วย 2 ส่วน ดังรูป 5.4 คือ อ่างสำหรับยัดแม่พิมพ์ดึงลวด เป็นส่วนที่ใช้ยัดแม่พิมพ์ดึงลวดให้อยู่กับที่ ซึ่งจะใช้สกรูสำหรับยัดแม่พิมพ์ดึงลวดเพื่อสามารถทำการถอดเปลี่ยนได้และอีกส่วนคืออ่างสำหรับสารหล่อลื่น ในส่วนนี้จะใส่กราไฟท์หล่อลื่นให้เต็มอ่างเพื่อทำการหล่อลื่นให้มีประสิทธิภาพ ขณะทำการดึงลวดจะจมอยู่กับกราไฟท์และไหลเข้าสู่ทางเข้าแม่พิมพ์ดึงลวดพร้อมกัน



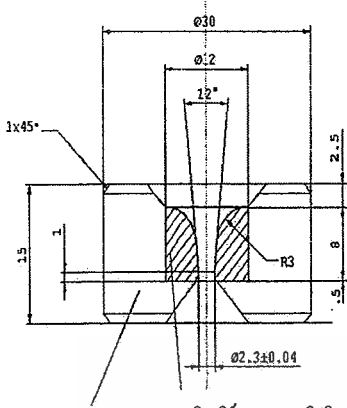
รูปที่ 5.4 ชุดอ่างน้ำมันเครื่อง

### 5.2 ออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์

การเลือกวัสดุใช้ทำแม่พิมพ์จะคำนึงถึงประสิทธิภาพและการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม สำหรับโครงการนี้กำหนดรูปร่างตามมาตรฐาน W103 ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมดึงลวดทั่วไป แม่พิมพ์จะประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ดายอินลิเอร์ท (Die Insert) ส่วนสองคือแม่พิมพ์ส่วนนอก (Die Case) ดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ดายอินลิเอร์ทจะเป็นส่วนอัดเข้าไปในแม่พิมพ์ส่วนนอกทำมาจากทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์เกรด K20 (ISO Code) แม่พิมพ์ส่วนนอกเป็นส่วนประกอบ

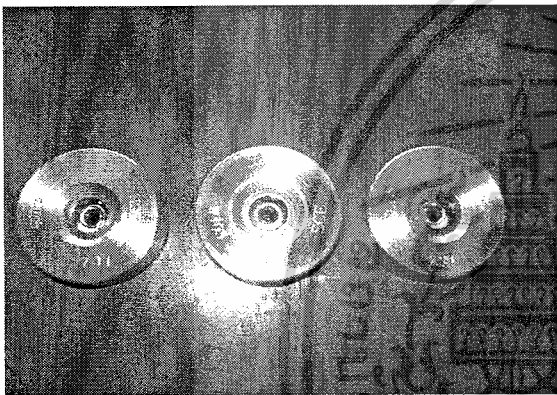
### 5.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติความเค้น

ทดลองหาความเค้นโดยเครื่อง Universal Testing Machine ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 เป็นเครื่องใช้สำหรับทดสอบคุณสมบัติภายในของวัสดุต่าง ๆ โดยค่าที่แสดงออกมาจะถูกประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ สำหรับค่าที่สามารถแสดงออกมาได้มีมากมายหลายค่า เช่น stress , strain , elongation , modulus เป็นต้น โดยเครื่อง UTM นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนกำลัง ส่วนคอมพิวเตอร์ควบคุม ส่วนทดลอง



แม่พิมพ์ส่วนนอก  $\varnothing 30 \times 15$  มิลลิเมตร คานอินเจิร์ท  $\varnothing 12 \times 8$  มิลลิเมตร

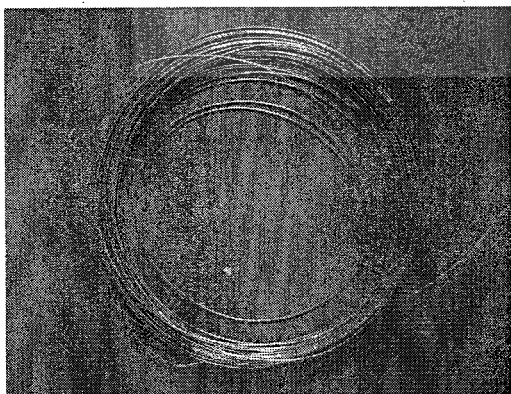
รูปที่ 5.5 ภาพตัดแม่พิมพ์ที่ดิ่งลวด



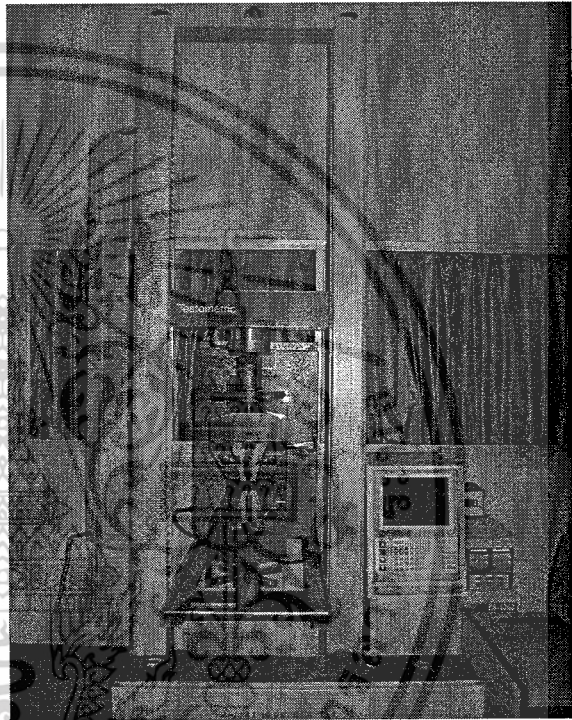
รูปที่ 5.6 รูปแม่พิมพ์ที่ดิ่งลวด

### 5.3 ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในการดิ่ง

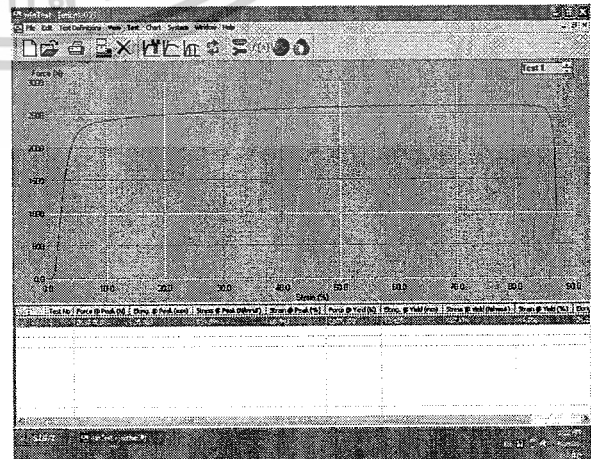
ลวดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เกรด SUS 304 ขนาดลวดก่อนการดิ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.40 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดหลังการดิ่ง 2.3 มิลลิเมตร อัตราการลดหน้าตัดของลวดเท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.7 ลวด SUS 304



รูปที่ 5.8 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM)



รูปที่ 5.9 กราฟที่ได้จากเครื่อง (UTM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าที่กรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 จากการทดลอง

	คุณสมบัติทางกล	ค่า
ลวดก่อนการดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	552.914 N/mm <sup>2</sup>
	Yield Strength (MPa)	414.908N/mm <sup>2</sup>
ลวดหลังการดึง	Tensile Strength , Ultimate (MPa)	660.039 N/mm <sup>2</sup>
	Yield Strength (MPa)	618.836 N/mm <sup>2</sup>

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนการดึงจากเครื่อง UTM

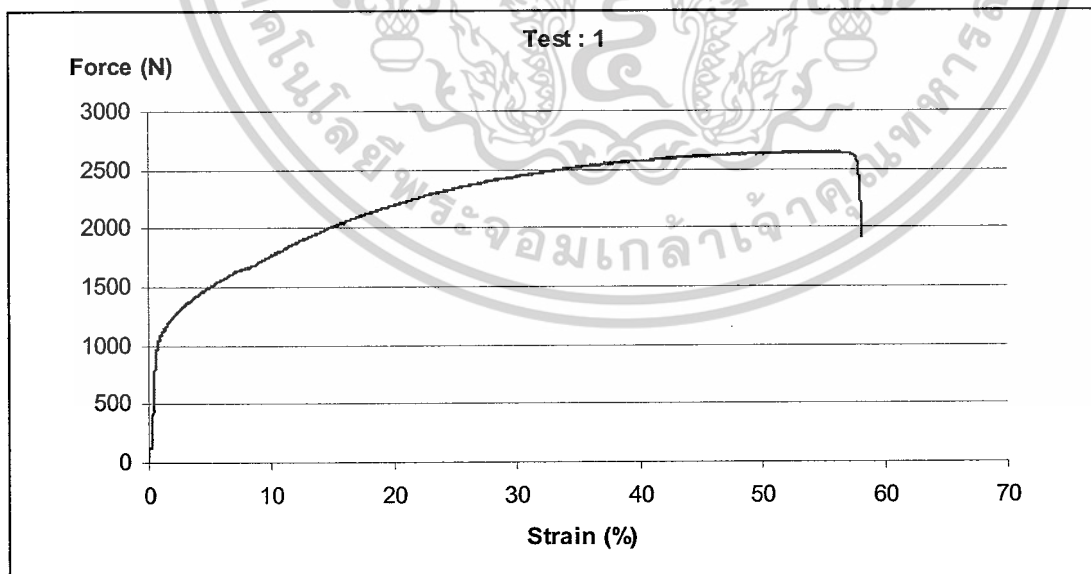
Test No.	V (mm/min)	Force Peak (N)	Strain Peak (%)	Stress Peak (N/mm <sup>2</sup> )	Elong Peak (mm)	Force Yield (N)	Stress Yield (N/mm <sup>2</sup> )	Strain Yield (%)	Elong Yield (mm)
1	10	2649	179.28	585.557	53.784	1213	268.132	5.807	1.742
2	10	2631	173.753	581.579	52.126	1916	423.529	38.200	11.460
3	10	2515	155.263	555.937	46.579	1579	349.036	22.023	6.607
4	10	2464	153.030	544.664	45.909	1990	439.887	56.440	16.932
5	10	2686	135.837	393.736	40.751	2114	467.297	41.667	12.500
6	10	2695	139.743	595.726	41.923	2580	570.305	91.790	27.537
7	10	2454	149.340	542.453	44.802	1648	364.288	27.157	8.147
8	10	2560	147.727	565.884	44.318	1662	367.383	22.537	6.761
9	10	2505	144.623	553.727	43.387	2159	477.244	61.770	18.531
10	10	2759	144.970	609.873	43.497	1909	421.982	22.827	6.848

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM

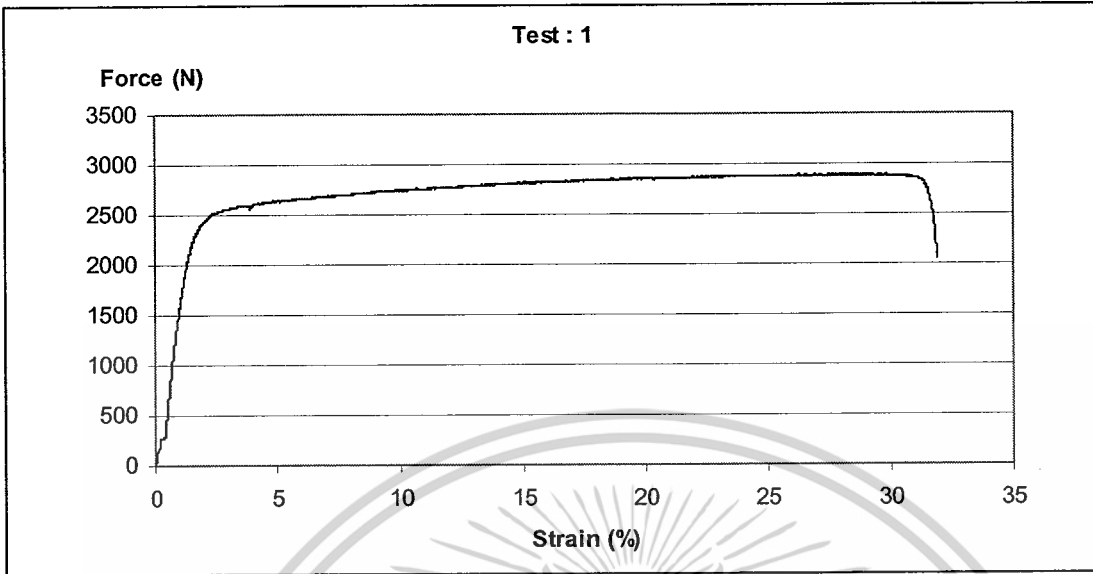
Test No.	V (mm/min)	Force Peak (N)	Strain Peak (%)	Stress Peak (N/mm <sup>2</sup> )	Elong Peak (mm)	Force Yield (N)	Stress Yield (N/mm <sup>2</sup> )	Strain Yield (%)	Elong Yield (mm)
1	10	2887	92.827	694.866	27.848	2512	604.608	7.977	2.393
2	10	2767	74.250	665.984	22.275	2535	610.144	8.480	2.544

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดลองลวดเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการดึงจากเครื่อง UTM (ต่อ)

Test No.	V (mm/min)	Force Peak (N)	Strain Peak (%)	Stress Peak (N/mm <sup>2</sup> )	Elong Peak (mm)	Force Yield (N)	Stress Yield (N/mm <sup>2</sup> )	Strain Yield (%)	Elong Yield (mm)
3	10	2639	74.057	635.176	22.217	2414	581.021	12.543	3.763
4	10	2735	75.353	658.282	22.906	2625	631.806	30.617	9.185
5	10	2682	69.147	645.525	20.744	2472	594.981	13.397	4.019
6	10	2727	74.137	656.356	22.241	2646	63.860	34.883	10.465
7	10	2884	63.727	694.144	19.118	2662	640.740	12.183	3.655
8	10	2838	66.597	638.073	19.979	2751	662.133	28.867	8.660
9	10	2627	66.557	632.287	19.967	2487	598.591	20.133	6.040
10	10	2637	66.943	634.694	20.083	2607	627.474	44.750	13.425

รูปที่ 6.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงกับความเครียดก่อนดึงลดขนาด  
เส้นผ่านศูนย์กลางลวด 2.4 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงกับความเครียดหลังดิ่งลดขนาด  
เส้นผ่านศูนย์กลางลวด 2.3 มิลลิเมตร

## 6. ผลการทดลอง

จากการทดลองความเค้น ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่าความเค้นระหว่างก่อนดิ่งกับหลังดิ่งลดขนาดในการทดลองเราจะใช้ความเร็วในการดิ่ง 10 mm/min จากการเปรียบเทียบจะเห็นว่าค่าความเค้นหลังดิ่งลดขนาดจะมีค่ามากกว่าความเค้นก่อนดิ่งลดขนาด ดังตารางที่ 2 รูปที่ 6.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงกับความเครียดก่อนดิ่งลดขนาด รูปที่ 6.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงกับความเครียดหลังดิ่งลดขนาด

## 7. สรุป

### 7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองความเค้นของลวด SUS 304 ก่อนและหลังดิ่งลดขนาด ค่าความเค้นหลังดิ่งลดขนาดมีค่าความเค้นมากกว่าก่อนดิ่งลดขนาดเนื่องจากลวดที่ผ่านการลดขนาดแล้ว จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง และลวดที่ผ่านการลดขนาดแล้วจะทำให้เนื้อลวดแน่นขึ้นเป็นเหตุให้มีแรงดิ่งเพิ่มขึ้นและความเค้นเพิ่มขึ้นด้วย

### 7.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

- ได้เครื่องดิ่งลวดไว้สำหรับทดสอบและศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของลวดเมื่อทำการดิ่งในสภาวะต่างๆ
- เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและวิจัยในอุตสาหกรรมการผลิตลวด

- เพื่อทำให้เกิดความร่วมมือกันระหว่างภาคอุตสาหกรรมและการศึกษา

### 7.3 การวิจัยในอนาคต

- ทำการวิจัยเกี่ยวกับความแข็งแรงของลวดเหล็กกล้าไร้สนิม
- ทำการวิจัยเกี่ยวกับคุณภาพของความเรียบของผิวลวดเหล็กกล้าไร้สนิม

### หนังสืออ้างอิง

- [1] Avitzur, B.Z.L., 1968, Metal Forming, McGraw-Hill, New York, pp. 219-246
- [2] Rer. Nat. F. Endre, 1990, Wire Drawing Machines, [Online] Available : <http://www.imet.tuclausthal.de/en/techdienst/wwwul.shtml>, [2005, June 30].
- [3] Lange, K., 1985, Handbook of Metal forming, McGrawHill, York, pp. (13.14-14.14).
- [4] Skolyszewski, A., Packo, M., Luksza, J. and Ruminski, M., 2002, "Warm Forming of Acid resistant Steel wires used for Manufacturing of Springs", Journal of Materials processing Technology, Vol. 125-126, pp. 326-333.
- [5] United Tungsten & Dianond Company Limited, 2546, มาตรฐานแม่พิมพ์ดิ่งลวดกลม JIS B4111 (เอกสารแนะนำสินค้า), หน้า 8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นาย นริศ เกลาเกลี้ยง เกิดวันที่ 1 เมษายน 2528 จังหวัดชลบุรี โดยมีประวัติการศึกษาดังนี้  
 พ.ศ. 2543-2546 ปวช. สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคชลบุรี  
 พ.ศ. 2546-2548 ปวส. สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคชลบุรี  
 พ.ศ. 2549-2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นาย ศักดินา วิลาส เกิดวันที่ 2 มิถุนายน 2513 จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีประวัติการศึกษาดังนี้  
 พ.ศ. 2529-2532 ปวช. สาขาช่างกลเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคพายัพ  
 พ.ศ. 2532-2534 ปวส. สาขาช่างกลเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคพายัพ  
 พ.ศ. 2549-2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นาย วิทยา แพทย์ประเสริฐ เกิดวันที่ 1 ตุลาคม 2527 จังหวัดกรุงเทพฯ โดยมีประวัติการศึกษา  
 ดังนี้  
 พ.ศ. 2544-2547 ปวช. สาขาช่างยนต์ โรงเรียนเทคนิควิทยา  
 พ.ศ. 2547-2549 ปวส. สาขาช่างยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระ  
 นครเหนือ  
 พ.ศ. 2549-2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้