

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องรีดและการศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนของโลหะผสมคาร์บอน AISI 1010 ด้วย

กระบวนการ THERMOMECHANICAL PROCESSING

ROLLER MACHINE AND THE STUDY OF THERMOMECHANICAL PROCESSING FOR GRAIN

BOUNDARY ENGINEERING IN AISI 1010 STEEL

โดย

นายกฤษดา แสงวิจิตกุลชัย

นายเชาวน์ ทองกู่เกียรติกุล

นายรัชชัย โพธิ์ทอง



T119547

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....119547
วัน,เดือน,ปี..... 8 S.ค. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องรีดและการศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนของโลหะผสมคาร์บอน AISI 1010 ด้วย
กระบวนการ THERMOMECHANICAL PROCESSING

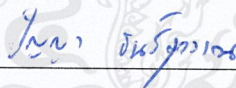
ROLLER MACHINE AND THE STUDY OF THERMOMECHANICAL PROCESSING FOR
GRAIN BOUNDARY ENGINEERING IN AISI 1010 STEEL

ผู้จัดทำ

1. นาย กฤษดา แสงวิจิตกุลชัย รหัสประจำตัว 50010052

2. นาย เซาว์น ทองกู่เกียรติกุล รหัสประจำตัว 50010387

3. นาย ชวัชชัย โพธิ์ทอง รหัสประจำตัว 50010668



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ปิญญา ชันธุ์สุวรรณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องรีดและการศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนของโลหะผสมคาร์บอน AISI 1010 ด้วย

กระบวนการ THERMOMECHANICAL PROCESSING

นายกฤษดา แสงวิจิตกุลชัย รหัสประจำตัว 50010052

นายเชาวน์ ทองกู่เกียรติกุล รหัสประจำตัว 50010387

นายรัชชชัย โพธิ์ทอง รหัสประจำตัว 50010668

ผศ.ดร. ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและเตรียมอุปกรณ์ สำหรับศึกษากระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Process) ในแบบต่างๆ ได้แก่ Recrystallization, One-step strain annealing, และ Iterative strain annealing ต่อกระบวนการเพิ่มขอบเกรนชนิดมีระเบียบ (Coincident Site Lattice boundary, CSLB) ของเหล็กคาร์บอนต่ำ AISI 1010 ที่มีส่วนผสมคาร์บอน 0.1 wt% แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ชนิดขอบเกรนและสัดส่วน CSL ต่อ High Angle Grain Boundary ด้วยเทคนิค การกระเจิงของอิเล็กตรอน (Electron backscatter diffraction, EBSD) ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ROLLER MACHINE AND THE STUDY OF THERMOMECHANICAL PROCESSING FOR GRAIN
BOUNDARY ENGINEERING IN AISI 1010 STEEL

Kritsada Seangwjitkulchai

Chao Tomgkukiatkul

Thawatchai Photong

Asso.Prof.Dr. Panya Kansuwan Advisor

ABSTRACT

The objective of this project was to design and build the roller machine for multipurpose in Thermomechanical Process usage such as recrystallization, one-step strain annealing and Iterative strain annealing. Also increase the fraction of special Grain Boundary called Low sigma Coincident Site Lattice boundary in Low Carbon Steel, AISI 1010. However, the widely used methods are designed for FCC structure with annealing twinning precursor. The challenge to FCC crystal structure is investigated in this project to find correlation between used method and % low CSL increment. The Electron backscatter diffraction (EBSD) in scanning electron microscope (SEM) will be employed to characterize the type of and fraction of grain boundaries to obtain quantitative results.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา
 ชันธุ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความรู้ ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง
 ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณ ธวัชชัย สีกาหลง(พี่เป้า) และเจ้าหน้าที่ในหน่วยงานของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
 ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ในการอนุเคราะห์ในการให้ยืมอุปกรณ์การทำงาน

ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านกำลังใจและกำลังใจตลอดการทำงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะ
 พี่เบิร์ด ที่ให้ข้อเสนอแนะช่วยให้การวิจัยสามารถผ่านพ้นไปได้ด้วยดี เพื่อนดิ่ว วิทยาศาสตร์เคมีเครื่องมือ
 วิเคราะห์ที่ให้อะซิโตนและแอลกอฮอล์จำนวนมาก เพื่อนแข่งและชาวคณะ ภาควิชาไฟฟ้ากำลังที่ให้ความรู้ด้าน
 ไฟฟ้า และช่วยงานเรื่องการควบคุมมอเตอร์เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ตลอดจนบุพการีทุกท่าน ซึ่งอบรมสั่งสอน และให้การ
 สนับสนุนในด้านต่างๆ ตลอดจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 กระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Process)	3
2.2 กรรมวิธีทางงานเย็นของโลหะ (Cold Working of Metal)	4
2.3 การคืนตัว (Recovery)	6
2.4 การตกผลึก (Recrystallization)	7
2.5 การโตของเกรน (Grain growth)	10
2.6 การออกแบบเพลลา	11
2.7 โഴ้	13
2.8 เฟือง	28
2.9 ความเค้นหนาแน่น	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.10 แรงพลวัต	33
2.11 การคำนวณแรงกระทำที่ลูกกรีด	35
2.12 การ โกงของลูกกรีด	36
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	38
3.1 ขอบเขตในการออกแบบเครื่องรีด โลหะ	38
3.2 การออกแบบและคำนวณการใช้กำลังของมอเตอร์	38
3.3 การคำนวณขนาดลูกกรีด	39
3.4 การคำนวณหาขนาดเฟือง	39
3.5 การออกแบบระบบส่งกำลัง	40
3.6 การออกแบบตัวปรับระยะในการรีด	40
3.7 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์	41
3.8 ภาพรวมของการออกแบบ	42
3.9 ขอบเขตในการซ่อมแซมเตาอบ	43
3.10 วงจรควบคุมเตาอบ โลหะ	43
บทที่ 4 ขั้นตอนการทำงานในการสร้างเครื่องรีด โลหะและการซ่อมแซมอบ โลหะ	44
4.1 เครื่องรีด โลหะ	44
4.2 เตาอบโลหะ	52
4.3 การทดสอบเครื่องรีดโลหะ และเตาอบโลหะ	55
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	61
5.1 วิจารณ์และสรุปผลงานวิจัย	61
5.2 แนวทางการพัฒนา	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก

หน้า

62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นตกค้างกับเวลาคืนตัว	6
รูปที่ 2-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Recrystallization กับ Percent cold work	7
รูปที่ 2-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างTensile strength กับ อุณหภูมิ (°F)	9
รูปที่ 2-4 กราฟแสดงการเกิดRecovery, Recrystallization และ Grain Growth	9
รูปที่ 2-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับเวลา	10
รูปที่ 2-6 โซโรลเลอร์: 1 สลัก, 2 แผ่นต่อด้านนอกและด้านใน, 3 บุษที่อัดแน่นกับแผ่นต่อด้านใน	
4 โรลเลอร์หมุนได้อิสระระบบบุช 3	14
รูปที่ 2-7 โซโรลเลอร์สองชั้น และสามชั้น	15
รูปที่ 2-8 ข้อต่อสำหรับโซโรลเลอร์ จากด้านซ้ายต่อด้วยคอตเตอร์พิน ต่อด้วยสปริงรูปด้วย และต่อด้วยข้อต่อแบบพิเศษ	15
รูปที่ 2-9 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ B (สำหรับพินเนียน 19 ฟัน)	22
รูปที่ 2-10 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ A (สำหรับพินเนียน 15 ฟัน)	23
รูปที่ 2-11 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ A (สำหรับพินเนียน 19 ฟัน)	24
รูปที่ 2-12 ตัวประกอบเรขาคณิตที่ใช้หาตัวประกอบรูปแบบของลูอิส	28
รูปที่ 2-13 แรงที่กระทำต่อลูกรีด	36
รูปที่ 2-14 แสดงการโค้งงอของลูกรีด	36
รูปที่ 3-1 ระบบส่งกำลัง	40
รูปที่ 3-2 ตัวปรับระยะ	40
รูปที่ 3-3 วงจรควบคุมมอเตอร์	41
รูปที่ 3-4 รูปส่วนประกอบของเครื่องรีด	42
รูปที่ 3-5 รูปเครื่องรีด โลหะใน โปรแกรม Solid Work	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3-6 รูปวงจรถวมคุมเตาอบ	43
รูปที่ 4-1 ด้านข้างเครื่องดึงลดขนาดเหล็กเส้น	44
รูปที่ 4-2 ด้านหน้าเครื่องดึงลดขนาดเหล็กเส้น	45
รูปที่ 4-3 เพลาและลูกรีดเค็ม	46
รูปที่ 4-4 ลูกรีดที่ผ่านการกลิ้งออกแล้ว	46
รูปที่ 4-5 โครงเรือนเครื่องเค็ม	47
รูปที่ 4-6 ส่วนต่อจากโครงเรือนให้สูงขึ้น	47
รูปที่ 4-7 ชุดโซ่ส่งกำลัง	48
รูปที่ 4-8 ชุดเฟือง	48
รูปที่ 4-9 ตัวปรับระยะ	49
รูปที่ 4-10 มอเตอร์และชุดต้นกำลัง	49
รูปที่ 4-11 ชุดควบคุมมอเตอร์	50
รูปที่ 4-12 ตัววัดระยะ	50
รูปที่ 4-13 เครื่องรีดโลหะที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	51
รูปที่ 4-14 ด้านหน้าเครื่องรีดโลหะ	51
รูปที่ 4-15 เตาโลหะก่อนทำการซ่อมแซม	52
รูปที่ 4-16 แท่งเซรามิก	53
รูปที่ 4-17 ขดลวดความร้อน	53
รูปที่ 4-18 ถังก๊าซอาร์กอน	53
รูปที่ 4-19 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	54
รูปที่ 4-20 เตาอบโลหะที่ซ่อมแซมพร้อมใช้	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-21 รูปชิ้นงาน โลหะผสมคาร์บอน AISI 1010 สำหรับทดสอบ	55
รูปที่ 4-22 รูปชิ้นงานผ่านการ Normalizing ที่อุณหภูมิ 900 °C	55
รูปที่ 4-23 รูปชิ้นงานผ่านการลดขนาด	56
รูปที่ 4-24 นำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิต่างๆ	56
รูปที่ 4-25 การเตรียมชิ้นงานเพื่อสำหรับขัด	56
รูปที่ 4-26 ขณะทำการขัด	57
รูปที่ 4-27 ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	57
รูปที่ 4-28 โครงสร้างชิ้นงานที่ได้รับมา	58
รูปที่ 4-29 โครงสร้างชิ้นงานที่ผ่านการ Normalizing	58
รูปที่ 4-30 โครงสร้างที่ผ่านการ Normalizing และการรีดลดขนาด	59
รูปที่ 4-31 โครงสร้างที่ผ่านการอบ 550 °C, 1 hr, Grain size No. 12.15	59
รูปที่ 4-32 โครงสร้างที่ผ่านการอบ 600 °C, 1hr Grain size No. 12.09	60
รูปที่ 4-33 โครงสร้างที่ผ่านการอบ 700 °C, 1 hr Grain size No. 13.64	60

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ตารางแสดงอุณหภูมิ Recrystallization และ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของธาตุต่างๆ	8
ตารางที่ 2-2 ขนาดระบุของเพลตามมาตรฐาน ISO/R 775-1969	12
ตารางที่ 2-3 ตัวประกอบใช้งานสำหรับแรงกระทำสม่ำเสมอ	17
ตารางที่ 2-4 ตัวประกอบใช้งานสำหรับแรงกระทำที่มีการกระตุกปานกลาง	19
ตารางที่ 2-5 ตัวประกอบใช้งานสำหรับแรงกระทำที่มีการกระตุกมาก	20
ตารางที่ 2-6 โซโรลเลอร์ตามมาตรฐาน ISO/R 606-1976 (E)	25
ตารางที่ 2-7 มวลของโซโรลเลอร์ต่อความยาว	26
ตารางที่ 2-8 ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟืองโซ่, C	27
ตารางที่ 2-9 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส	29
ตารางที่ 2-10 ค่าความเค้นสถิตใช้งานสำหรับใช้สมการของลูอิส	31
ตารางที่ 2-11 ตัวประกอบใช้งาน	35
ตารางที่ 3-1 สัญลักษณ์อักษรกำกับวงจร	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยมีการจัดทำแผนการสร้างไฟฟ้าจากพลังงานในรูปแบบต่างๆ ซึ่งต้องมีการใช้งานวัสดุที่สามารถทนต่อการใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูงและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี การพัฒนาวัสดุประเภทดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการใช้งานวัสดุและอายุการใช้งาน โรงไฟฟ้า โครงการนี้มุ่งเน้นกระบวนการการวิศวกรรมขอบเกรนของ Carbon Steel AISI 1010 ที่มีโครงสร้างระดับอะตอมแบบ BCC และโครงสร้างจุลภาคที่ไม่สลับซับซ้อน ด้วยวิธี Thermomechanical Treatment และนำผลที่ได้ไปสู่การพัฒนากระบวนการดังกล่าวต่อ Ferritic Carbon Steel ชนิดอื่นๆ เช่น 0.50Mo Carbon steel, 2.25Cr-1Mo Carbon, หรือ 2.25Cr-1Mo Carbon steel ให้มีขอบเกรนชนิดพิเศษ

อย่างไรก็ดี การศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนและการทดสอบเพื่อรวบรวมข้อมูลยังขาดความพร้อมด้านอุปกรณ์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองซึ่งประกอบด้วย เครื่องรีดโลหะ (Roller Machine) และเตาอบอุณหภูมิสูง เพื่อสะดวกในการศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 สร้างอุปกรณ์ในการรีดโลหะเพื่อใช้ในกระบวนการทาง Thermomechanical Process สำหรับการศึกษาศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรน

1.2.1 สร้างเตาอบอุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในกระบวนการทางความร้อน Thermomechanical Treatment

1.3 ขอบเขตของโครงการ

งานวิจัยนี้จะศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่และการส่งกำลังแบบต่างๆ ที่ใช้ในเครื่องจักร การออกแบบเครื่องจักรในเชิงวิศวกรรม และทฤษฎีการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงต่างๆ เพื่อนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องรีดโลหะรวมถึงการซ่อมแซมเตาอบอุณหภูมิสูงสำหรับการศึกษาศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนต่อไป

1.4 วิธีการดำเนินงาน

ในโครงการนี้เริ่มต้นโดยการศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนของโลหะผสมคาร์บอน AISI 1010 ด้วยกระบวนการ Thermomechanical processing จากนั้นศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบและเขียนแบบเครื่องรีดโลหะทำการหาแรงกระทำที่ลูกรีด เพื่อคำนวณกำลังที่ต้องใช้ในการรีดและขนาดมอเตอร์ส่งกำลัง วิเคราะห์ ความปลอดภัยชิ้นส่วนต่างๆ ของแบบที่ได้ออกแบบไว้ หลังจากนั้นทำการสร้างเครื่องรีดโลหะตามแบบที่ออกแบบไว้ รวมถึงทำการซ่อมแซมเตาอบอุณหภูมิสูง เมื่อชุดอุปกรณ์เสร็จสิ้น ทำการทดสอบชุดอุปกรณ์โดยใช้กระบวนการ Thermomechanical Process หาอุณหภูมิ Recrystallization ของเหล็ก AISI 1010 ตามจุดประสงค์ของโครงการ



บทที่ 2

ทฤษฎีและการออกแบบ

2.1 กระบวนการความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Process)

คุณสมบัติของ Special grain boundary หรือ CSLB นั้นสามารถทำให้วัสดุสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน การแตกหักเนื่องจากการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนและการคืบ [2] เมื่อเพิ่มสัดส่วนจำนวนมากขึ้น ซึ่งทำได้โดยที่วัสดุนั้นผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล ดังนั้นจึงจำแนกกระบวนการทางความร้อนเชิงกลออกเป็น [2]

2.1.1 Iterative recrystallization เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิด recrystallization ซ้ำหลายครั้ง แต่ยังคงทำให้เกรนมีขนาดเล็ก ดังเช่นใน nickel-base alloy (Ni-16Cr-9Fe) ผ่านการรีดเย็น 20% แล้วอบที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 3 นาที ทำซ้ำกัน 3 ครั้ง เป็นผลให้จำนวน Σ_3 เพิ่มขึ้นเป็น 58% [2]

2.1.2 One-Step recrystallization เป็นกระบวนการที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาสั้น หลังจากผ่านการให้ความเครียดระดับกลาง เป็นผลทำให้เพิ่มความหนาแน่นของ twin และเกรนยังมีขนาดเล็ก เช่นในทองแดงที่ผ่านการให้ความเครียด 50% แล้วอบที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 นาที เป็นผลให้จำนวน twin สูงมากกว่ากระบวนการ multi-step treatment [2]

2.1.3 iterative strain annealing เป็นกระบวนการที่ผ่านการให้ความเครียดเพียงเล็กน้อยไม่เกิน 6% หลังจากผ่านการอบแล้วมีผลทำให้ Σ_3 เพิ่มขึ้นโดยไม่ผ่านการเกิด recrystallization เช่นใน alloy 600 (Ni-16Cr-9Fe) ผ่านการให้ความเครียด 2-5% ตามด้วยการอบที่ 890-940°C เป็นเวลา 1-20 ชั่วโมง เป็นผลทำให้เพิ่มจำนวน Σ_3 และ Σ_9 จากเดิมเป็น 6% และ 5% เป็น 12% ตามลำดับ [12] ส่วนในทองแดงผ่านการกด 6% ตามด้วยการอบที่ 275°C เป็นระยะเวลา 14 ชั่วโมงและที่ 375°C เป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมง เป็นผลให้จำนวน Σ_3 และ Σ_9 เพิ่มขึ้นเป็น 67% และ 9% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าสัดส่วนจำนวน twin อาจลดลงเล็กน้อยระหว่างการอบครั้งแรกก็ตาม [2]

2.1.4 One-step strain annealing เป็นกระบวนการที่ผ่านการอบเพียงครั้งเดียวหลังจากการให้ความเครียดเล็กน้อย เช่นในนิกเกิลหลังจากให้ความเครียด 6% และการอบอ่อน Σ_3 มีแนวโน้มของมุมการจัดเรียงตัวเบี่ยงเบนไปน้อยลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบ ซึ่งเป็นผลในการปรับปรุงทั้ง grain boundary plane [2]

2.2 กรรมวิธีทางงานเย็นของโลหะ (Cold Working of Metal)

เมื่อโลหะถูกรีด อัด โหลด หรือดึงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการจัดเรียงผลึก เรียกว่าการกระทำเหล่านี้สำหรับการทำงานเย็น ซึ่งโลหะส่วนมากมักถูกทำงานเย็นที่อุณหภูมิห้อง และแม้ว่าระหว่างการปฏิบัติงานในการขึ้นรูปจะทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นก็ตาม แต่มันก็ไม่มากเท่ากับอุณหภูมิในงานร้อน กรรมวิธีทางงานร้อนหรือการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่าของการจัดเรียงผลึก จะทำให้ขนาดของเกรนละเอียดขึ้น ส่วนกรรมวิธีทางงานเย็นจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของเกรนและขนาดที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการปฏิบัติการจะเป็นไปได้ น้อย นอกจากนี้กรรมวิธีทางงานเย็นจะให้ผลดีในเรื่องของความแข็งแรง ความสามารถในการนำเนื้อโลหะ (machinability) ความถูกต้องของขนาดมิติ และผิวงานสำเร็จที่เรียบดีขึ้น และเนื่องจากเกิดการออกซิเดชันน้อยกว่าในงานร้อน งานเย็นจึงสามารถใช้ปริมาณมากกว่าของการรีดโลหะแผ่นและ ฟอล์ม (foil) แต่งงานเย็นมีข้อเสียคือต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมาก

2.2.1 หลักการของกรรมวิธีทางงานเย็น (Principles of Cold working)

เพื่อที่จะเข้าใจถึงหลักการของการปฏิบัติทางงานเย็น จำเป็นต้องมีความรู้ในเรื่อง โครงสร้างของโลหะ โลหะทั้งหลายในธรรมชาตินั้นประกอบด้วยเกรนที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ นั้น ซึ่งเกรน (grain) เหล่านี้อาจเห็นได้จากกล้องขยายกำลังสูง ในเนื้อของโลหะที่ผ่านการกัดสีด้วยกรด (etching) มาอย่างถูกต้อง เกรนแต่ละเกรนจะเกิดจากกลุ่มของอะตอมที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่า ตารางผลึก (lattice) ซึ่งการเรียงตัวนี้จะแตกต่างกันในแต่ละเกรน เมื่อวัสดุถูกทำงานเย็น การเปลี่ยนรูปร่างของมันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของเกรน เช่น การแตกออก การที่ของอะตอมและการบิดเบี้ยวของตารางผลึกกระนาบที่เคลื่อนที่ไป (slip plane) จะเกิดขึ้นผ่านบริเวณตารางผลึกที่จุดซึ่งพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมอ่อนที่สุด การเรียงตัวของอะตอมจะเคลื่อนที่เมื่อมีการเลื่อนของระนาบอะตอมแต่พันธะระหว่างอะตอมจะไม่เปลี่ยน ในกรณีซึ่งมีการรวมตัวกันใหม่ (reorientation) จะเกิดการทวีคูณ (twinning) ในตารางผลึกที่มีการทวีคูณด้านหนึ่งจะมีการก่อตัวในรูปแบบที่แตกต่างจากด้านอื่นๆ แต่จะเหมือนกับด้านที่ติดกันซึ่งโดยปกติแล้วการเลื่อนของระนาบจะเป็นผลทั่วไปจากการเปลี่ยนรูปร่างมากกว่า

แรงกดดันที่ใช้ในงานเย็นจะมากกว่าใช้ในงานร้อน เนื่องจากความแข็งแรงของโลหะมีมากกว่า โลหะในงานเย็นจะไม่เปลี่ยนรูปอย่างถาวร จนกระทั่งมันได้รับความเค้นจนเกิดความจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) และเนื่องจากไม่สามารถทำการจัดเรียงผลึกของเกรนได้ใหม่ จึงไม่มีทางทำให้เกรนที่บิดเบี้ยวหรือแตกออกกลับเข้าไปรูปเดิมได้ ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปของเกรนต่อไป จะมีความต้านต่อการเปลี่ยนแปลงนี้มากขึ้น อันจะเป็นผลในการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงของโลหะ ซึ่งเรียกว่า เป็นการทำให้โลหะแข็งจากความเครียด (strain hardened) และสำหรับโลหะที่ไม่ตอบสนองต่อกรรมวิธีทางความร้อนวิธีนี้เป็นวิธีเดียวที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของ

มันได้อันหนึ่งปรากฏการณ์นี้อาจเกิดได้จาก การต้านทานของการเปลี่ยนตำแหน่งอะตอม (atomic dislocation) การแตกของอะตอม (fragmentation) หรือการต้านการบิดของตารางผลึก (lattice dislocation) สิ่งใดสิ่งหนึ่งหรือทั้ง 3 สิ่งรวมกัน

การเปลี่ยนรูปร่างทางงานเย็นที่โลหะจะทนได้นั้นขึ้นกับ ความเหนียว (ductility) ของเนื้อโลหะ ซึ่งถ้ามีมากเท่าไรมันก็สามารถรับการเปลี่ยนรูปร่างได้ดีเท่านั้น โลหะบริสุทธิ์จะทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างได้มากกว่าพวกโลหะผสมเนื่องจากธาตุผสมจะมีแนว โน้มและความรวดเร็วในการแข็งตัวจากความเครียด (strain hardening) และโลหะที่มีขนาดเกรนใหญ่จะมีความเหนียวมากกว่าโลหะที่มีขนาดเกรนเล็กเมื่อโลหะถูกเปลี่ยนรูป จะเกิดความเค้นอย่างรุนแรงในเนื้อของโลหะเรียกว่าความเค้นตกค้าง (residual stress) ซึ่งความเค้นอันไม่พึงปรารถนานี้จะสามารถกำจัดออกได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของโลหะจนต่ำกว่าช่วงการจัดเรียงผลึก (recrystallization) เล็กน้อย ที่อุณหภูมินี้ความเค้นจะสลายตัวไป โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพหรือ โครงสร้างของเกรน ด้วยวิธีการนี้จะสามารถกำจัดผลเสียอันเนื่องมาจากกรรมวิธีทางงานเย็นได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามความเค้นนี้อาจจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติขณะใช้งานของผลิตภัณฑ์บางชนิดเช่น การทำให้ผิวหน้าของโลหะมีความเค้นอัด ในขณะที่ผิวใต้ผิวหน้ามีความเค้นจากแรงดึง จะช่วยลดความล้าที่เกิดขึ้นขณะใช้งานได้ วิธีการที่ใช้ทำให้เกิดความเค้นในสภาพดังกล่าวอาจทำได้โดยการใช้การยิงด้วยเม็ดโลหะ (shot peening) ซึ่งจะอธิบายโดยละเอียดภายหลัง

2.2.2 ข้อดีและข้อจำกัด (Advantage and Limitation)

ผลิตภัณฑ์จำนวนมากจะเข้าขั้นตอนทางงานเย็นภายหลังจากการรีดร้อน เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นที่ยอมรับในเชิงการค้า เช่น แถบโลหะยาว (Strips) และแผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดร้อนจะนิ่ม มีผิวหน้าที่ไม่เรียบร้อยทั้งยังขาดมิติที่แน่นอนและมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ไม่ดี

การรีดเย็นจะสามารถจัดข้อบกพร่องเหล่านี้ได้ในขณะที่ขนาดลดลงเพียงเล็กน้อย และสำหรับโลหะที่ไม่ตอบสนองต่อกรรมวิธีทางความร้อน กรรมวิธีทางงานเย็นเป็นเพียงวิธีเดียวที่จะเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแกร่งให้กับเนื้อวัสดุ นอกจากนี้ยังสามารถใช้กรรมวิธีทางงานเย็นในการอัดไหลสำหรับวัสดุเหนียวได้อีกด้วยแต่กรรมวิธีต้องการอุปกรณ์ที่แข็งแรงและแรงดันมากกว่ากรรมวิธีทางงานร้อนเป็นอย่างมาก การแตกหักของชิ้นงานที่รับการปฏิบัติการทางงานเย็นสามารถได้ถ้ามันได้รับการเปลี่ยนรูปมากจนเกินไป ข้อจำกัดนี้อาจลดลงได้ถ้านำชิ้นงานไปผ่านการอบอ่อนก่อนเข้าขบวนการ และสำหรับกรณีทั่วไปแล้วการทำงานเย็นจะให้ผลดังต่อไปนี้

- (1) จะยังคงมีความเค้นตกค้างอยู่ในเนื้อวัสดุ จนกว่าจะมีการกำจัดออกไปโดยวิธีทางความร้อน
- (2) จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวและการถูกอัดของเส้น โครงสร้าง
- (3) ความแข็งแรงและความแข็งจะเพิ่มขึ้นเป็นการแปรผกผันกับความเหนียว
- (4) อุณหภูมิของการจัดเรียงผลึกใหม่ในเหล็กกล้าจะเพิ่มสูงขึ้น

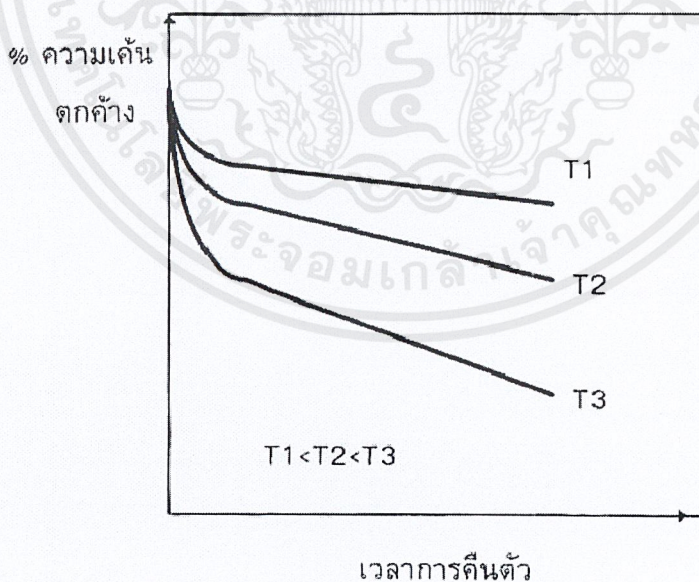
- (5) จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผิว
- (6) สามารถรักษาพิภักัดความเคื่อนของขนาดมิติที่แคบๆไว้ได้
- (7) ปริมาณการผลิตสามารถทำได้เร็วและมากจึงทำให้คุณค่าในเชิงการค้า

2.3 การคืนตัว (Recovery)

เมื่อโลหะผ่านการขึ้นรูปเย็น (cold working) พลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกกักเก็บไว้ในรูปของพลังงานความเครียด (strain energy) หลักการของการคืนตัวคือ เมื่อให้พลังงานหรือความร้อนแก่โลหะ พลังงานความเครียดสะสมภายในจะถูกปลดปล่อยโดยที่ยังไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากดิสโลเคชันมีการเคลื่อนที่ (ในสถานะที่ไม่มีความเค้นจากภายนอก) ซึ่งเป็นผลจากการแพร่ของอะตอมที่อุณหภูมิสูง

ผลที่ตามมาของการคืนตัวมีผลทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง คือ

- พลังงานภายในเริ่มถูกปล่อยออกมา โดยเมื่ออัตราการคืนตัวมากขึ้น พลังงานภายในยิ่งน้อยลง ตามรูป 2-1
- ดิสโลเคชันมีการเรียงตัวใหม่ (Dislocation re-arrangement)
- ความเค้นตกค้าง (Residual stress) ที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็นถูกปล่อยหรือคลายออก โดยปริมาณของการลดความเครียดตกค้างภายใน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการคืนตัว รูป 2.1

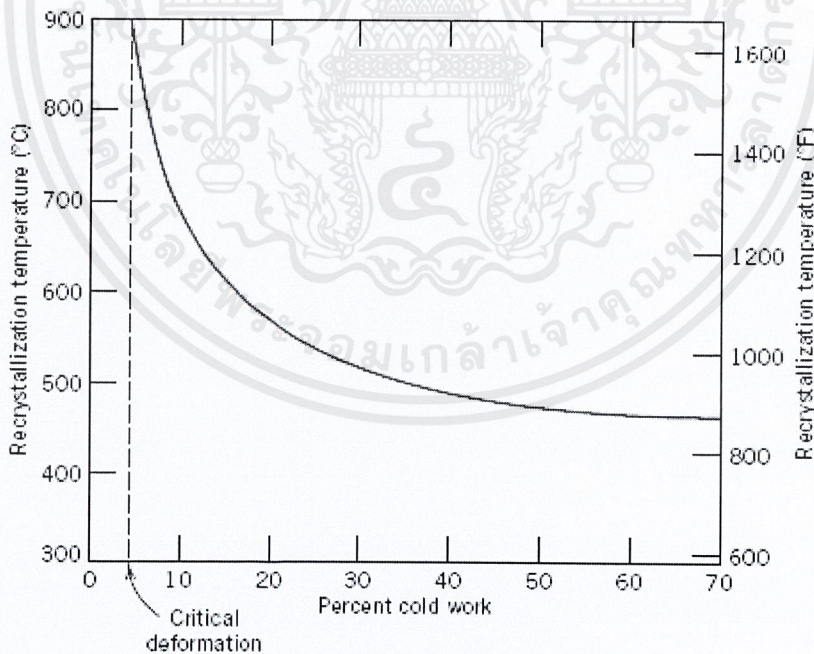


รูปที่ 2-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นตกค้างกับเวลาคืนตัว

2.4 การตกผลึก (Recrystallization)

แม้ว่าการคืนตัวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้วก็ตาม เกรนก็ยังคงมีพลังงานความเครียดที่สูงอยู่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงการคืนตัวให้สูงขึ้นจะเกิดผลึกใหม่ขึ้นมา เกรนที่เกิดขึ้นมาใหม่มีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง (equiaxed grain) สำหรับแรงกระตุ้นหรือแรงขับเคลื่อน (driving force) ที่ใช้สร้างเกรนใหม่ คือ ความแตกต่างของพลังงานภายในระหว่างเนื้อของโลหะที่ได้รับความเครียดกับไม่ได้รับความเครียด

การตกผลึกใหม่จำเป็นต้องใช้เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมถึงจะเกิดผลึกใหม่ อุณหภูมินี้ เรียกว่า อุณหภูมิการตกผลึก (Recrystallization temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิการตกผลึกเสร็จสิ้น ภายใน 1 ชั่วโมง ทั้งนี้ อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณการขึ้นรูปเย็น ความบริสุทธิ์ของโลหะ เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน เป็นต้น สำหรับปริมาณการขึ้นรูปเย็นที่มากขึ้นมีผลเพิ่มอัตราการตกผลึกใหม่และส่งผลให้อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ต่ำลง และเข้าใกล้ค่าคงที่มากขึ้น ณ จุดที่มีการแปรรูปสูง ดังรูป 2-2(D. William) ยิ่งไปกว่านั้นค่าดังกล่าวจะเป็นค่าที่ต่ำที่สุดของอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ ในรูปยังแสดงถึงปริมาณการขึ้นรูปเย็นสูงสุดที่ยังไม่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ เรียกว่า ปริมาณการขึ้นรูปเย็นวิกฤต (critical deformation) ปกติค่านี้จะอยู่ที่ปริมาณการขึ้นรูปเย็นระหว่าง 2%-20%



รูปที่ 2-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ Recrystallization กับ Percent cold work

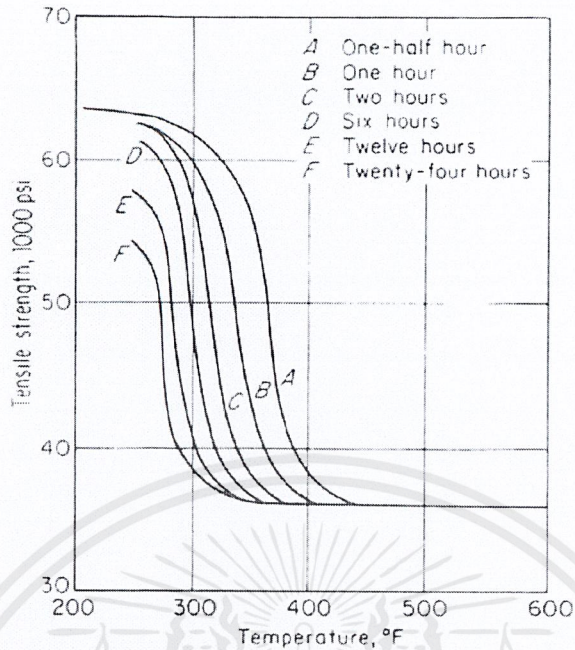
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตกผลึกใหม่จะเกิดได้ง่ายและรวดเร็วมากในโลหะบริสุทธิ์เมื่อเทียบกับโลหะผสมสำหรับโลหะบริสุทธิ์อุณหภูมิการตกผลึกใหม่ประมาณ $0.3 T_m$ โดยที่ T_m คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของจุดหลอมเหลวและโลหะผสมจะมากกว่า $0.3 T_m$ ซึ่งโลหะผสมบางชนิดอาจมีอุณหภูมิการตกผลึกสูงถึงประมาณ $0.7 T_m$ ตามตารางที่ 2-1

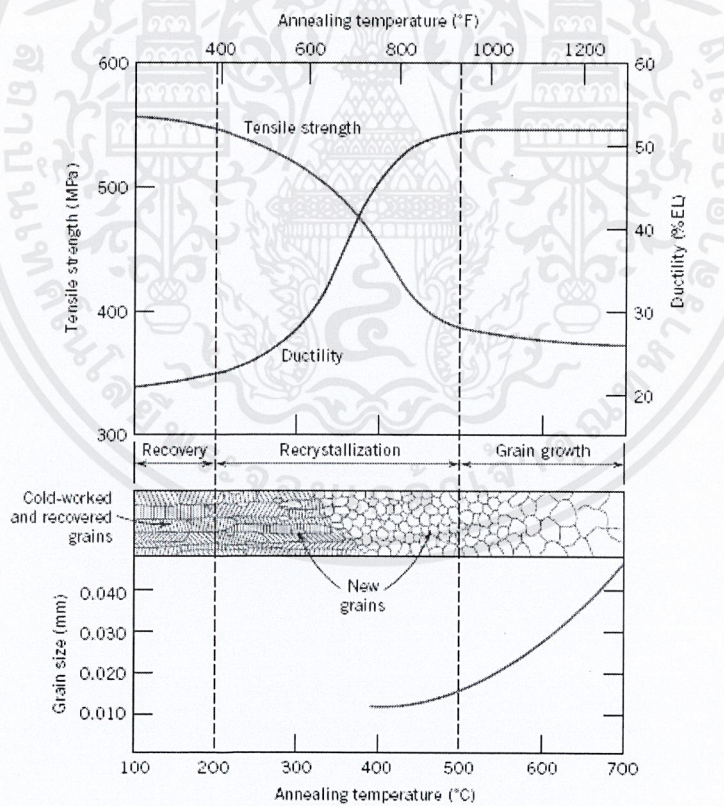
ตารางที่ 2-1 ตารางแสดงอุณหภูมิ Recrystallization และ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของธาตุต่างๆ

<i>Metal</i>	<i>Recrystallization Temperature</i>		<i>Melting Temperature</i>	
	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$	$^{\circ}C$	$^{\circ}F$
Lead	-4	25	327	620
Tin	-4	25	232	450
Zinc	10	50	420	788
Aluminum (99.999 wt%)	80	176	660	1220
Copper (99.999 wt%)	120	250	1085	1985
Brass (60 Cu-40 Zn)	475	887	900	1652
Nickel (99.99 wt%)	370	700	1455	2651
Iron	450	840	1538	2800
Tungsten	1200	2200	3410	6170

สำหรับปัจจัยอุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนนั้น ถ้าเพิ่มระยะเวลาในการอบอ่อนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ต่ำลง หรือถ้าเพิ่มอุณหภูมิของการตกผลึกใหม่สูงขึ้นระยะเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนลดลง ตามรูปที่ 2-3 แต่ว่าอัตราการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบอ่อนไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงดังรูป ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การตกผลึกใหม่จะเปลี่ยนแปลงไปโดยการขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าการเปลี่ยนแปลงเวลา (ที่อุณหภูมิคงที่)



รูปที่ 2-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile strength กับ อุณหภูมิ (°F)



รูปที่ 2-4 กราฟแสดงการเกิด Recovery, Recrystallization และ Grain Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตกผลึกใหม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ดังนี้
คุณสมบัติทางกลเริ่มเปลี่ยนแปลง คือ ความแข็งแรงและความแข็งเริ่มลดลงแต่ความเหนียวเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2-4(D.William) เกรนที่เกิดขึ้นมีขนาดเท่ากันในทุกทิศทาง (equiaxed grain) ที่ปราศจากความเครียดขึ้นใหม่ โดยผลึกใหม่จะเกิดขึ้นบริเวณที่มีความเครียดหรือพลังงานภายในสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น บริเวณขอบเกรน ระบายการเลื่อน เป็นต้น

2.5 การโตของเกรน (Grain growth)

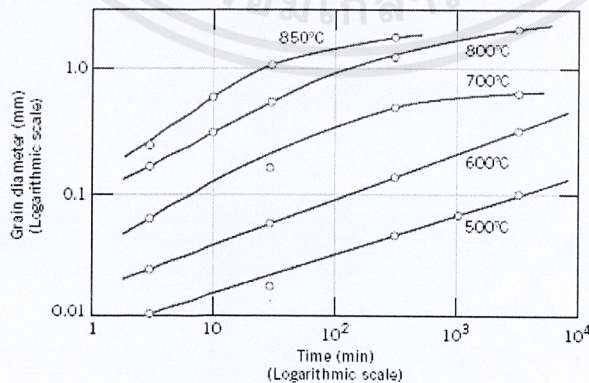
หลังจากการเกิดการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์แล้ว เกรนที่ปราศจากความเครียดจะโตขึ้นเรื่อยๆ ถ้าชิ้นงานโลหะยังอยู่ในอุณหภูมิสูง เรียกปรากฏการณ์เหล่านี้ว่าการโตของเกรน การโตของเกรนเกิดขึ้นโดยการขยับหรือเคลื่อนที่ของขอบเกรน พบว่าเกรนใหญ่ขยายตัวใหญ่โดยไปกินพื้นที่ของเกรนที่มีขนาดเล็กกว่าหรืออาจเรียกได้ว่าเกรนเล็กเกิดการหดตัว เนื่องจากในเกรนใหญ่จะมีพลังงานอิสระน้อยกว่าเกรนเล็กทำให้พลังงานอิสระน้อยกว่าเกรนเล็ก ทำให้พลังงานอิสระดังกล่าวเกิดแรงขับ ผลักดันให้ขอบเกรนลดจำนวนลง

ในกรณีของวัสดุหลายผลึก เส้นผ่านศูนย์กลางของเกรน (d) จะขึ้นกับเวลา ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$d^n - d_0^n = Kt \quad (2.1)$$

โดยที่ d_0 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนเริ่มต้นที่เวลา $t=0$ และ K และ n คือค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา ค่าของ n โดยปกติมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

ปัจจัยที่มีผลต่อการโตของเกรนสำหรับความสัมพันธ์ของขนาดเกรนกับเวลาและอุณหภูมิ ตามรูปที่ 2-5 โดยพบว่า ยิ่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือเวลานานขึ้นจะทำให้ขนาดเกรน โตเร็วขึ้น ส่วนความต้านทานของการเคลื่อนที่ของเกรนหรือการเปลี่ยนตำแหน่ง เช่น มีธาตุแทรกตัวในแลตทิซ เป็นต้น



รูปที่ 2-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนกับเวลา

2.6 การออกแบบเพลลา

เพลลาอาจจะรับแรงดึง แรงกด แรงบิด หรือแรงดัด หรือแรงหลายอย่างรวมกันก็ได้ ดังนั้นการคำนวณจึงต้องใช้ความเคี้ยวผสมเข้าช่วย แรงเหล่านี้ยังอาจจะมีเปลี่ยนแปลงขนาดตลอดเวลาทำให้เพลลาเสียหายเพราะความล้าได้ นั่นจึงต้องออกแบบเพลลาให้มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งาน ในลักษณะนี้ นอกจากนั้นเพลลาจะต้องมีความแข็งแรง (Rigidity) เพียงพอเพื่อลดมุมบิดภายในเพลลาให้อยู่ในขีดจำกัดที่พอเหมาะ ระยะโก่ง (deflection) ของเพลลาที่เป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดขนาดเพลลา เช่นเดียว เพราะถ้าเพลลามีระยะโก่งมากก็จะเกิดการแกว่งขณะหมุน ทำให้ความเร็ววิกฤต วิกฤตนี้ได้ ระยะโก่งนี้ยังมีผลต่อการเลือกชนิดของที่รองรับเพลลา เช่น บอลเบริง (ball bearing) ก็ต้องมีการเยื้องแนว (misalignment) ในการใช้งานที่พอเหมาะกับเพลลาด้วย

2.6.1 วัสดุเพลลา

วัสดุที่ใช้สำหรับทำเพลลาทั่วไปคือเหล็กกล้าละมุน (Mid steel) แต่ถ้าต้องการให้มีความเหนียวและความทนทานต่อแรงกระตุกเป็นพิเศษแล้วมักจะใช้เหล็กกล้าผสมโลหะอื่นทำเพลลา เช่น AISI 1374 3140 4150 4340 เป็นต้น เพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 90 mm มักจะกลึงมาจากเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งผ่านการรีดร้อน อย่างไรก็ตามเพื่อให้เพลลามีราคาถูกที่สุด ผู้ออกแบบควรพยายามเลือกใช้เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาก่อนที่จะเลือกใช้เหล็กกล้าชนิดอื่น

2.6.2 ขนาดของเพลลา

เพื่อให้เพลลามีมาตรฐานเหมือนกัน องค์กรมาตรฐานระหว่างประเทศจึงกำหนดขนาดมาตรฐานของเพลลาซึ่งเป็นขนาดที่ระบุ (Nominal size) ใน ISO/R 775-1969 เอาไว้สำหรับให้ผู้ออกแบบเลือกใช้ทั้งนี้เพื่อให้สามารถซื้อได้ทั่วไป นอกจากนี้ยังเป็นขนาดที่สอดคล้องกับขนาดเบริงที่ใส่รองรับเพลลาด้วยขนาดระบุของเพลลาด้วยขนาดระบุของเพลลาดูได้จากตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ขนาดระบุของเพลตามาตรฐาน 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	

2.6.3 การพิจารณาในการออกแบบ

การคำนวณหาขนาดของเพลที่พอเหมาะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ในบางครั้งการขนาดเพลเพื่อให้เพลทนต่อแรงที่มากกระทำอย่างเฉียวไม่เป็นการเพียงพอ เช่น ในกรณีของเพลเบี้ยว (cam shaft) ในเครื่องยนต์สันดาปภายในต้องการให้มีตำแหน่งเที่ยงตรง ดังนั้นมุมบิดของเพลที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานจะต้องมีค่าไม่มากกว่าที่กำหนดไว้ เป็นต้น นั่นคือ เพลจะต้องมีความแข็งแรงอยู่ภายในพิสัย ที่ต้องการ ถ้ามุมบิด ไปมากนอกจะเสียความเที่ยงตรงทางด้านตำแหน่งแล้วยังอาจจะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนซึ่งมีผลทำให้เฟืองและเบร้งที่รองรับเพลอยู่เกิดความเสียหายได้ง่ายขึ้น

ถึงแม้ว่าจะไม่มีมาตรฐานสำหรับมุมบิดของเพลไว้ก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้วมักจะให้มุมบิดของเพลไว้ก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้วมักจะให้มุมบิดของเพลในเครื่องจักรกลทั่วไปไม่เกิน 0.3° ต่อความยาวเพล 1 m สำหรับเพลส่งกำลังทั่วไปอาจจะให้มีบิดได้ถึง 1° ต่อความยาวเพล 20 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล ในกรณีของเพลลูกเบี้ยวสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในแล้วจะให้มุมบิดได้ไม่เกิน 0.5° ตลอดความยาวของเพล

ความแข็งแรงที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ ความแข็งแรงทางด้านระยะ โกง เพราะจะต้องใช้ระยะโกงของเพลที่อยู่ภายใต้แรงภายนอกเป็นตัวสำคัญในการกำหนดระยะเบียด (clearance) ระหว่างล้อ สายพาน เฟือง โครงของเครื่องจักร ตลอดจนการเลือกชนิดของเบร้งสำหรับรองรับเพล ให้เหมาะสม ถ้าเพลมีระยะ โกงมากเกินไปจะทำให้ความยาวของฟันเฟืองส่วนที่สัมผัสหรือขบกันลดลง เป็นผลทำให้อัตราส่วนการขบ (contact ratio) ของเฟืองลดลงด้วย ทำให้การส่งกำลังของเฟืองไม่ราบเรียบเท่าที่ควร การเลือกเบร้งมารองรับเพลก็เช่นกันจำเป็นจะต้องเลือกเบร้งชนิดที่อนุญาตให้มี

การเยื้องแนวสำหรับการใช้งานได้พอเหมาะกับระยะ โกงของเพลลาที่จะเกิดขึ้นซึ่งอาจจะเป็นแบร์ริงแบบ
ธรรมดาหรือแบร์ริงแบบปรับแนวได้เอง (self-aligning bearing) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าระยะ โกงเป็นสำคัญ

ระยะ โกงดังกล่าวมานี้ก็ไม่มีมาตรฐานกำหนดเป็นแนวทางไว้ โดยทั่วไปแล้วผู้ออกแบบ
อาจจะถือค่าต่อไปนี้เป็นแนวทางในการกำหนดความแข็งแรงทางด้านระยะ โกงได้ดังนี้คือ

สำหรับเพลลาเครื่องจักรกลทั่วไป ค่าระยะ โกงระหว่างจุดรองรับด้วยแบร์ริงควรจะไม่เกิน 0.08
mm/m

สำหรับเพลลาเฟืองที่มีเฟืองตรง (spur gear) คุณภาพดีอยู่ด้วย ระยะ โกง ณ ตำแหน่งที่มีเหียงขบ
กันไม่ควรเกิน 0.125 mm และความลาดเอียงของเพลลา ณ ตำแหน่งนี้ควรจะไม่เกิน 0.0286°

2.6.4 การบิด

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด (torque) จะบิดไปเป็นมุม
เท่ากับ

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (2.2)$$

โดยที่	T	คือ โมเมนต์บิด
	L	คือ ความยาว
	J	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่ (polar area moment of inertial) $= \frac{\pi}{32} d^4$ สำหรับท่อนกลมตัน
	d	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
	d_1	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

ในการออกแบบเพลลา เลือกใช้มุมบิดของเพลลาไม่เกิน 0.3 องศาในทางปฏิบัติ และดัชนีความ
แข็งแรงของเหล็กกล้า (G) 80 Gpa จากค่าโมเมนต์บิดที่ทำการคำนวณ และค่าความยาวที่เลือกใช้แทน
ค่าในสมการ 2.1 จะสามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลาที่ใช้งานได้

2.7 โข้

การขับด้วยโข้มีใช้งานเครื่องจักรกล เนื่องจากมีลักษณะคล้ายกับการขับด้วยสายพาน โข้จะ
คล้องอยู่กับล้อโข้หรือเฟืองโข้ (Sprocket) ซึ่งติดอยู่กับเพลลาขับและเพลลาตาม อัตราทดของการ
ขับจะขึ้นอยู่กับขนาดของเฟืองโข้ทั้งสอง และการขับด้วยโข้นี้จะไม่มีการสลิปเกิดขึ้นระหว่างโข้กับ
เฟืองโข้

ข้อดีของการขับด้วยโซ่

- (1) ในการติดตั้งไม่ต้องการความเที่ยงตรงกับเฟือง
- (2) ไม่จำเป็นต้องมีแรงดึงขั้นต้นในโซ่ด้านตึงเหมือนกับสายพาน ทำให้อายุการใช้งานของแบร็งที่รองรับเพลลาเพิ่มมากขึ้น
- (3) ไม่มีการสลิปในขณะส่งกำลังเหมือนสายพาน ทำให้ได้อัตราทดที่แน่นอน
- (4) มีขนาดกะทัดรัดกว่าสายพาน เมื่อใช้งานด้วยอัตราทดเท่ากัน เฟืองโซ่จะมีขนาดเล็กกว่าล้อสายพานและถ้าต้องการส่งกำลังเท่ากัน ความกว้างของโซ่จะน้อยกว่าสายพาน
- (5) ติดตั้งง่ายกว่าสายพานเพราะเพียงแต่คล้องเข้ากับเฟืองโซ่แล้วสอดสลักเข้าไปเท่านั้น
- (6) ใช้งานได้ดีกับอุณหภูมิสูง บริเวณที่มีความชื้นและฝุ่นละออง

ข้อเสียของการขับด้วยโซ่

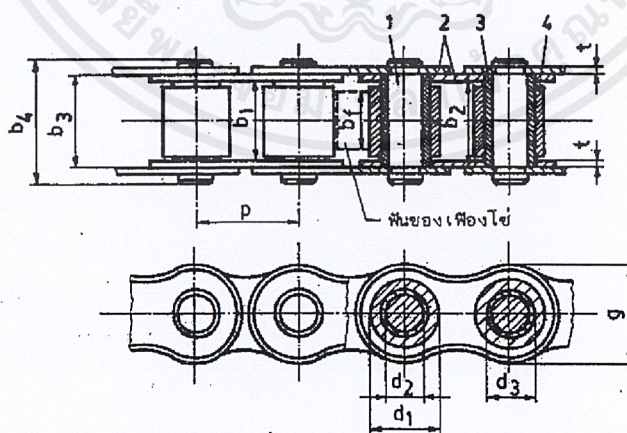
- (1) มีเสียงดัง
- (2) ไม่มีความอ่อนตัวในการส่งกำลัง เพลลาจะต้องขนานกัน
- (3) ส่งกำลังแบบครอสไดรว์ไม่ได้
- (4) มีราคาแพงกว่าการขับด้วยสายพาน
- (5) ต้องมีการหล่อลื่น

2.7.1 ชนิดของโซ่

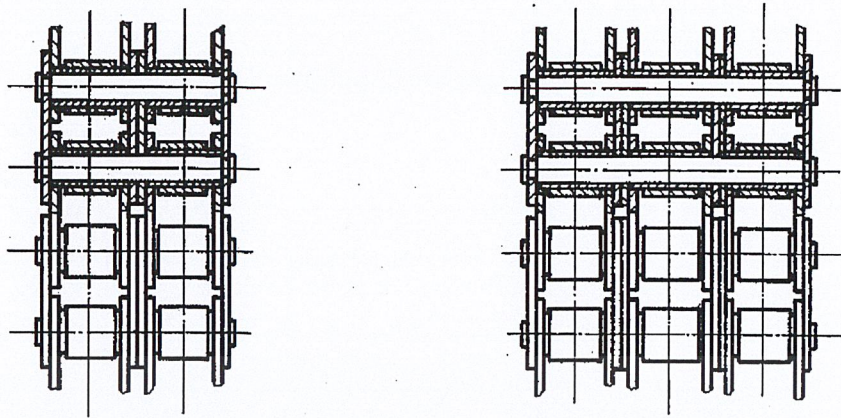
โซ่แบ่งออกเป็นชนิดใหญ่ๆ ได้ 3 ชนิดคือ

2.7.1.1 โซ่โรลเลอร์ (roller chains)

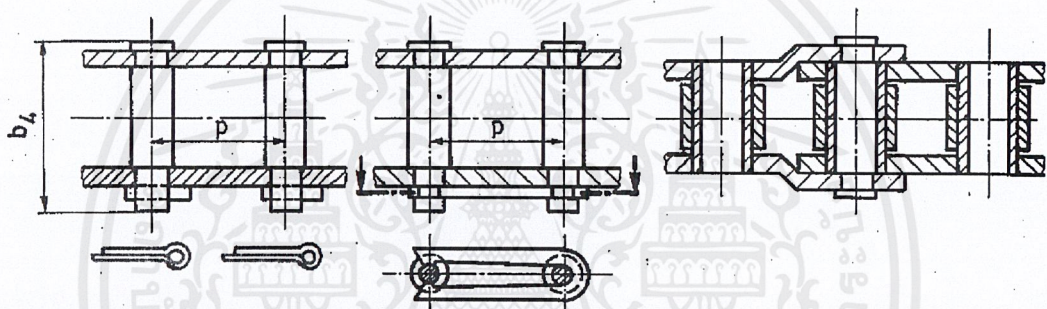
โซ่ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นต่อ (Link) ด้านในและด้านนอกยึดติดกันด้วยสลัก และบุช (bushes)



รูปที่ 2-6 โซ่โรลเลอร์: 1 สลัก, 2 แผ่นต่อด้านนอกและด้านใน, 3 บุชที่อัดแน่นกับแผ่นต่อด้านใน, 4 โรลเลอร์หมุนได้อิสระระบบบุช 3



รูปที่ 2-7 โഴ้โรลเลอร์สองชั้น และสามชั้น



รูปที่ 2-8 ข้อต่อสำหรับ โഴ้โรลเลอร์ จากด้านซ้ายต่อกับคอตเตอร์พิน ต่อกับสปริงรูปตัวยู และต่อกับข้อต่อแบบพิเศษ

2.7.2 การคำนวณหาขนาดโഴ้ (โഴ้โรลเลอร์)

ในการเลือกขนาดโഴ้จะต้องทราบข้อมูลดังต่อไปนี้

ก. กำลังงานที่ต้องการส่งเป็น kW (W_p)

ข. ความเร็วรอบของเพลาขับและเพลาตามเป็น rpm (n_1, n_2)

ค. การใช้งาน เช่น ชนิดของอุปกรณ์ขับและอุปกรณ์ที่ต้องการขับ

จากข้อมูลดังกล่าวนี้ จึงเริ่มต้นการเลือกขนาดโഴ้ตามขั้นตอนดังนี้คือ

2.7.2.1 เลือกจำนวนฟันบนพินเนียน (เฟืองขับ) จากคำแนะนำดังนี้

ความเร็วต่ำมาก	z_{min}	=	12
ความเร็วต่ำ	z_{min}	=	17
ความเร็วปานกลาง	z_{min}	=	21
ความเร็วสูง	z_{min}	=	25
สำหรับการขับเพื่อทดเพิ่มความเร็วให้ใช้	z_{min}	=	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติมักจะใช้จำนวนฟันของโซ่เป็นเลขคี่ และจำนวนข้อต่อโซ่เป็นเลขคู่ เพื่อช่วยให้ความถี่ในความสัมพันธ์ระหว่างฟันของเฟืองโซ่กับข้อต่อโซ่น้อยลง ช่วยให้โซ่มีการสึกหรอสม่ำเสมอ (เช่นเดียวกับฮันทิงบูธในเรื่องเฟือง)

2.7.2.2 เลือกตัวประกอบ N_s จากข้อมูลดังนี้

กลุ่มที่ 1 แรงที่กระทำสม่ำเสมอ เช่น

เครื่องกวาดและเครื่องผสมของเหลว กิ่งของเหลว

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องเป่าแบบหอยโข่ง (Centrifugal blower) และพัดลมขนาดเล็ก

เครื่องอัดอากาศแบบหอยโข่ง

อุปกรณ์ลำเลียง ลิฟต์ บันไดเลื่อน

เครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดัด เช่น เครื่องบรรจุขวด เครื่องบรรจุกระป๋อง

เครื่องสูบลมแบบหอยโข่ง แบบเฟือง แบบโรตารี

เครื่องพิมพ์

เครื่องจักรกลงานไม้ชนิดงานละเอียด

ตัวประกอบใช้งานในกลุ่มนี้ดูได้จากตาราง 2-3

ตารางที่ 2-3 ตัวประกอบใช้งานสำหรับแรงกระทำสม่ำเสมอ

โซ่โรลเลอร์แบบ B				โซ่โรลเลอร์แบบ A			
จำนวนฟัน บนพินเนียน	อุปกรณ์จับ *			จำนวนฟัน บนพินเนียน	อุปกรณ์จับ **		
	สม่ำเสมอ	กระดูกปาน กลาง	กระดูกมาก		ประเภท I	ประเภท II	ประเภท III
ใช้กับแผนภูมิรูป 3.11				ใช้กับแผนภูมิรูป 3.12			
11	1.72	2.16	2.59	11	1.14	1.41	1.69
12	1.59	1.98	2.38	12	1.28	1.28	1.54
13	1.47	1.84	2.21	13	1.19	1.19	1.43
14	1.35	1.69	2.03	14	1.10	1.10	1.32
15	1.27	1.58	1.90	15	1.00	1.00	1.20
16	1.19	1.49	1.79	16	0.93	0.93	1.11
17	1.12	1.40	1.69	17	0.86	0.86	1.03
18	1.05	1.32	1.58	18	0.81	0.81	0.98
19	1.00	1.25	1.50	ใช้กับแผนภูมิรูป 3.12			
20	0.95	1.19	1.43				
21	0.91	1.14	1.36	19	1.00	1.00	1.20
22	0.86	1.08	1.29	20	0.93	0.93	1.12
23	0.83	1.03	1.24	21	0.88	0.88	1.06
24	0.79	0.99	1.19	22	0.84	0.84	1.01
25	0.76	0.95	1.14	23	0.80	0.80	0.96
				24	0.75	0.78	0.93
				25	0.75	0.75	0.90

* สม่ำเสมอ: มอเตอร์ไฟฟ้า

กระดูกปานกลาง: เครื่องยนต์หลายสูบ กระ-

ดูกมาก: เครื่องยนต์หนึ่งสูบ

**ประเภท I: เครื่องยนต์ต่อผ่านไฮดรอลิคคัปปลิ่ง

ประเภท II: มอเตอร์ไฟฟ้าหรือกังหัน

ประเภท III: เครื่องยนต์ต่อผ่านอุปกรณ์ทางกล

119547

กลุ่ม 2 แรงกระทำที่มีการกระทบกลาง เช่น

เครื่องกวนและเครื่องผสมเหลวกับของแข็ง หรือของผสมที่มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลง

เครื่องเป่าแบบหอยโข่งความดันสูง พัดลมในงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

เครื่องมือสายเคเบิล (Cable reels)

เครื่องผสมซีเมนต์

เครื่องอัดอากาศแบบลูกสูบ ที่มีลูกสูบตั้งแต่สามสูบขึ้นไป

อุปกรณ์ลำเลียง และลิฟต์ ที่มีอัตราการลำเลียงไม่สม่ำเสมอ

ปั่นจั่น และรอกขนาดใหญ่

เครื่องจักรในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดัด เช่น เครื่องผสมแป้ง เครื่องบด

เครื่องหัน

เครื่องชักผ้า

เครื่องมือกล เช่น เครื่องรีด เครื่องกลึง และเครื่องกัด

เครื่องอัด เครื่องตัด

กวน

เครื่องจักรที่ใช้ผลิตกระดาษ เช่น เครื่องผสมเยื่อกระดาษ เครื่องรีด

เตาเผาแบบหมุน (Rotary kiln)

เครื่องรีด โลหะ

เครื่องทอผ้า

ตัวอย่างประกอบใช้งานในกลุ่มนี้ดูได้จากตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ตัวประกอบใช้งานสำหรับแรงกระทำที่มีการกระตุกปานกลาง

โซ่โรลเลอร์แบบ B				โซ่โรลเลอร์แบบ A			
จำนวนฟัน บนพีนีเยน	อุปกรณ์จับ *			จำนวนฟัน บนพีนีเยน	อุปกรณ์จับ **		
	สμάเสมอ	กระตุกปาน กลาง	กระตุกมาก		ประเภท I	ประเภท II	ประเภท III
ใช้กับแผนภูมิรูป 3.11				ใช้กับแผนภูมิรูป 3.12			
11	2.16	2.59	3.02	11	1.69	1.83	1.97
12	1.95	2.38	2.78	12	1.54	1.67	1.79
13	1.84	2.21	2.57	13	1.43	1.55	1.67
14	1.69	2.03	2.36	14	1.32	1.43	1.54
15	1.58	1.90	2.22	15	1.20	1.30	1.40
16	1.49	1.79	2.08	16	1.11	1.20	1.30
17	1.40	1.69	1.97	17	1.03	1.12	1.21
18	1.32	1.58	1.84	18	0.98	1.06	1.14
19	1.25	1.50	1.75	ใช้กับแผนภูมิรูป 3.12			
20	1.19	1.43	1.67				
21	1.14	1.36	1.59	19	1.20	1.30	1.40
22	1.08	1.29	1.51	20	1.12	1.21	1.31
23	1.03	1.24	1.45	21	1.06	1.15	1.24
24	0.99	1.19	1.39	22	1.01	1.09	1.18
25	0.95	1.14	1.33	23	0.96	1.04	1.12
				24	0.93	1.01	1.09
				25	0.90	0.97	1.04

*และ**มีความหมายเช่นเดียวกับในตาราง 2-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มที่ 3 แรงกระทำที่มีการกระตุกมาก เช่น

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่น เครื่องเชื่อมไฟฟ้า

เครื่องผลิตก้อนอิฐ

เครื่องจักรกลในโรงงานน้ำตาล

เครื่องบดซีเมนต์

เครื่องบดหิน

เครื่องขุด และเครื่องตักดิน

เครื่องมือกล เช่น เครื่องไส

เครื่องจักรกลในเหมืองแร่

เครื่องบดถ่านหิน

ตารางที่ 2-5 ตัวประกอบใช้งานสำหรับแรงกระทำที่มีการกระตุกมาก

โซ่โรลเลอร์แบบ B				โซ่โรลเลอร์แบบ A			
จำนวนพื้น บนพีนียน	อุปกรณ์ขับ *			จำนวนพื้น บนพีนียน	อุปกรณ์ขับ **		
	สม่ำเสมอ	กระตุกปาน กลาง	กระตุกมาก		ประเภท I	ประเภท II	ประเภท III
ใช้กับแผนภูมิรูป 3.11				ใช้กับแผนภูมิรูป 3.12			
11		3.45	3.88				
12	3.02	3.17	3.57	11	1.97	2.11	2.39
13	2.78	2.94	3.31	12	1.79	1.92	2.18
14	2.57	2.70	3.04	13	1.67	1.79	2.02
15	2.36	2.53	2.85	14	1.54	1.65	1.87
16	2.22	2.38	2.68	15	1.40	1.50	1.70
17	2.08	2.25	2.53	16	1.30	1.39	1.57
18	1.97	2.11	2.37	17	1.21	1.29	1.47
19	1.84	2.00	2.25	18	1.14	1.22	1.38
20	1.75	1.90	2.14				
21	1.67	1.82	2.05	ใช้กับแผนภูมิรูป 3.12			
22	1.59	1.72	1.94	19	1.40	1.50	1.70
23	1.51	1.65	1.86	20	1.31	1.40	1.59
24	1.45	1.59	1.79	21	1.24	1.33	1.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25	1.39	1.52	1.70	22	1.18	1.26	1.43
	1.33			23	1.12	1.20	1.36
				24	1.09	1.16	1.32
				25	1.04	1.12	1.27

*และ** มีความหมายเช่นเดียวกับในตาราง 2-4

2.7.2.3 จำนวนอัตราทดที่ต้องการได้จาก

$$M_w = \frac{\text{ความเร็วรอบเพลารอบสูง}}{\text{ความเร็วรอบเพลารอบต่ำ}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.3)$$

2.7.2.4 จำนวนฟันบนเฟืองโซ่

$$Z = Z_{\text{พินิเยน}} (M_w) \quad (2.4)$$

เลือกโซ่เฟืองโซ่จากรายข้างล่างนี้

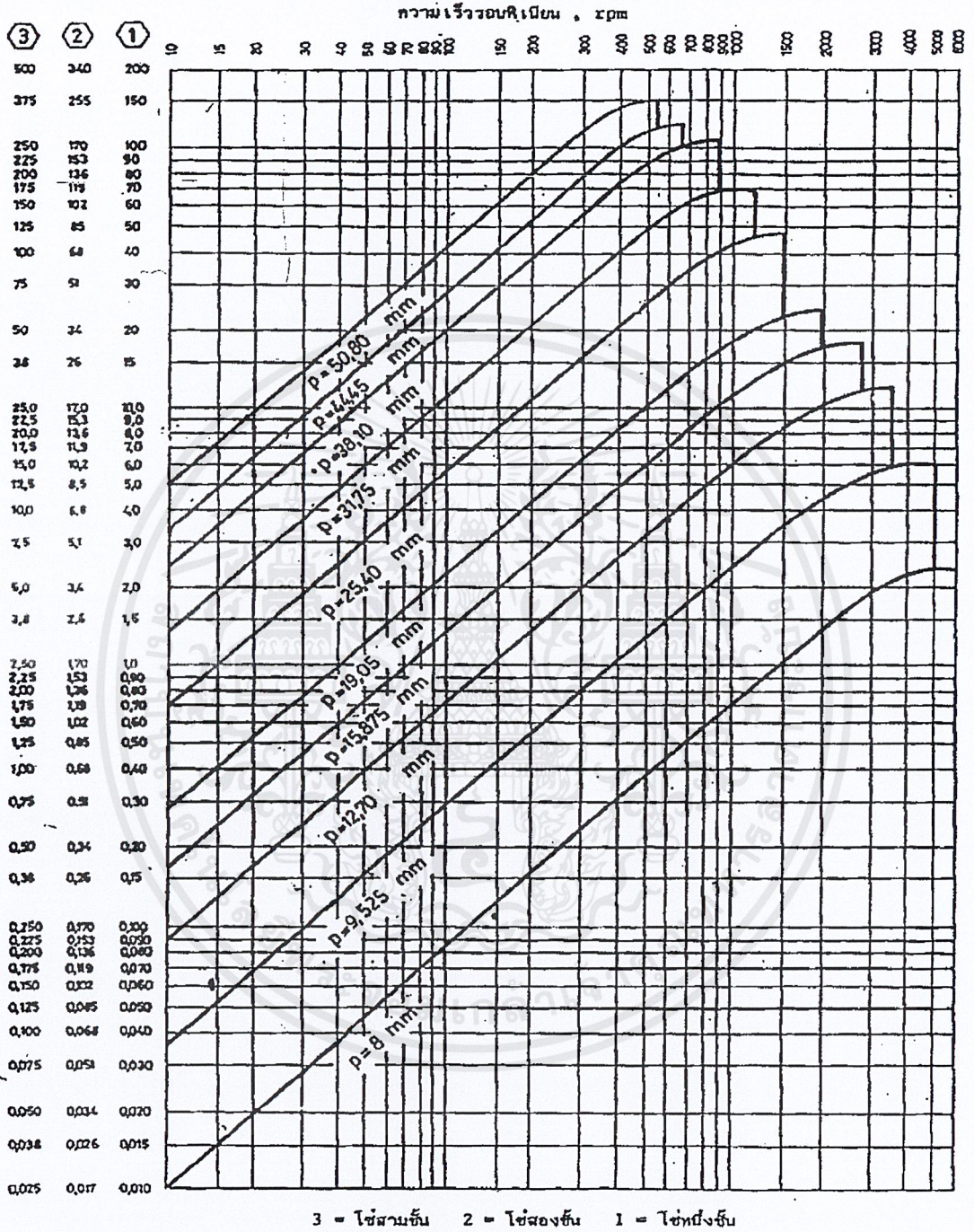
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
25	27	30	38	57	76	95	114	150				

2.7.2.5 กำลังที่เลือกใช้โซ่

$$P = W_p \cdot N_s \quad (2.5)$$

2.7.2.6 เลือกขนาดโซ่โดยพิจารณาจากค่า n พินิเยน และ p โดยดูจากแผนภูมิต่อไปนี้

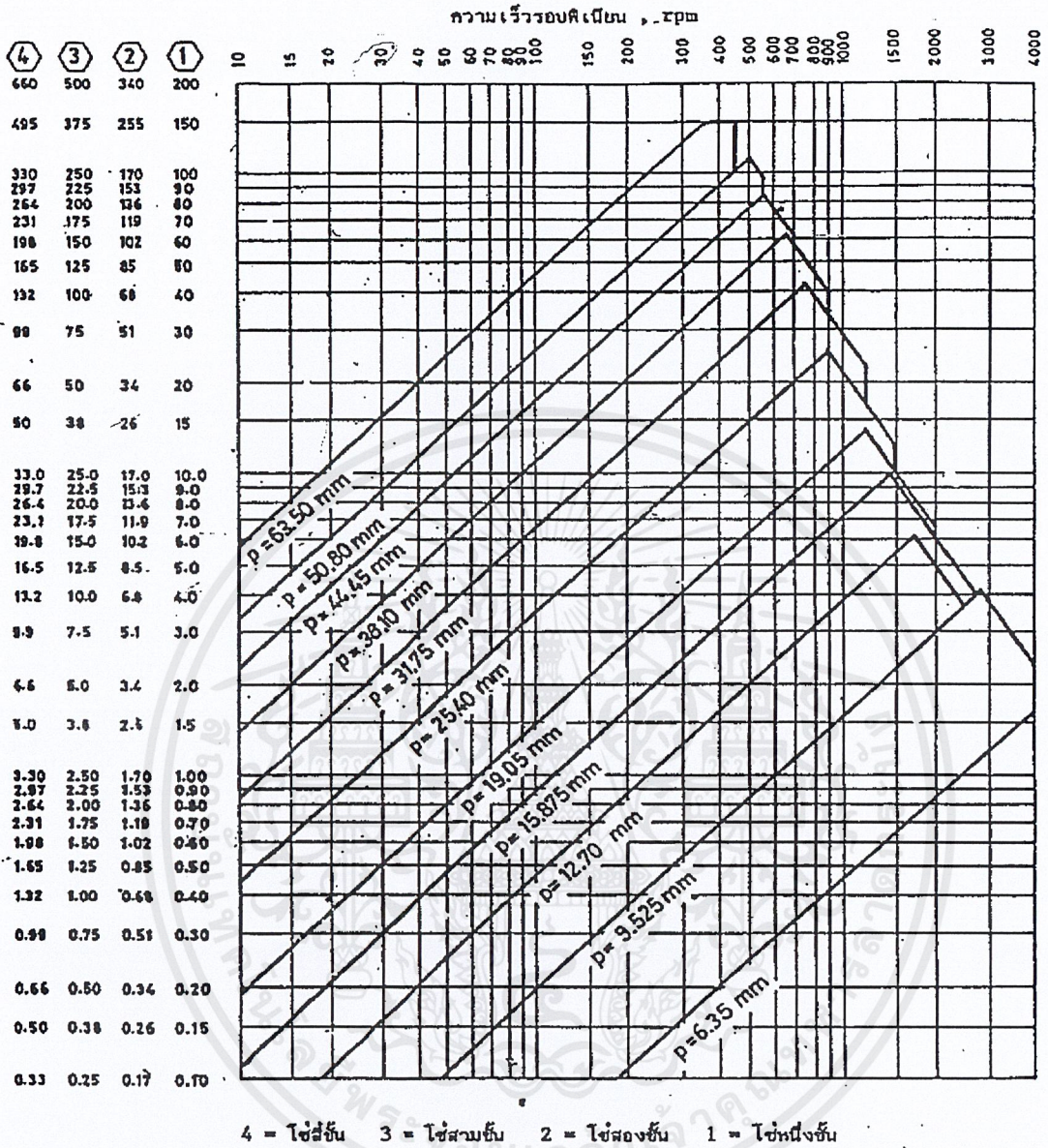
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-11 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ B (สำหรับพิเนียน 19 ฟัน)

รูปที่ 2-9 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ B (สำหรับพิเนียน 19 ฟัน)

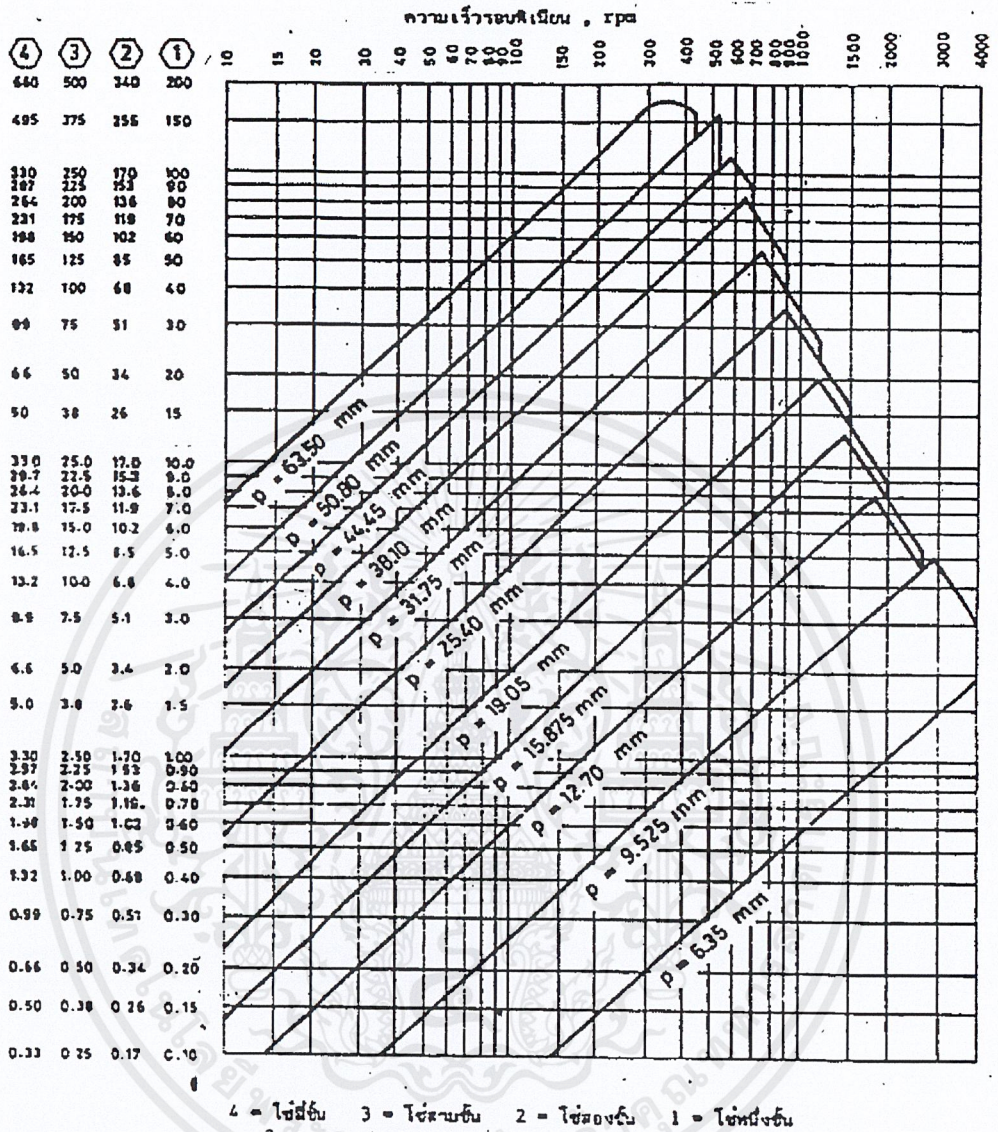
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-12 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ A (สำหรับพินเนียน 15 พิน)

รูปที่ 2-10 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ A (สำหรับพินเนียน 15 พิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-13 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ A (สำหรับพินียน 19 ฟัน)

รูปที่ 2-11 แผนภูมิที่ใช้เลือกโซโรลเลอร์แบบ A (สำหรับพินียน 19 ฟัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเลือกโซ่ที่มีระยะพิตช์ ตามที่ต้องการได้แล้ว นำระยะพิตช์มาหาซื้อตามมาตรฐานและแรง
แตกหักได้จากตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2-6 โซ่โรลเลอร์ตามมาตรฐาน ISO/R 606-1976 (E)

โซ่ ISO	พิตช์ P	d ₁ max	d ₁ min	d ₂ max	d ₂ min	แรงแตกหัก kN		
						หนึ่งชั้น	สองชั้น	สามชั้น
05B	8.00	5.00	3.00	2.31	4.90	4.51	7.85	11.18
06B	9.525	6.35	5.72	3.28	8.66	8.93	16.97	24.92
08A	12.70	7.95	7.95	3.96	11.31	13.83	27.66	41.50
08B	12.70	8.51	7.75	4.45	11.43	17.85	31.20	44.54
10A	15.857	10.16	9.53	5.08	13.97	21.78	43.56	65.33
10B	15.857	10.16	9.65	5.08	13.41	22.27	44.54	66.81
12A	19.05	11.91	12.70	5.94	17.88	31.20	62.39	93.59
12B	19.05	12.07	11.68	5.72	15.75	28.94	57.88	86.82
16A	25.40	15.88	15.88	7.92	22.74	55.62	111.25	1662.87
16B	25.40	15.88	17.02	8.28	25.58	42.28	84.56	126.84
20A	31.75	19.05	19.05	9.53	27.59	56.82	173.64	260.46
20B	31.75	19.50	19.56	10.19	29.14	64.55	129.10	193.65
24A	38.10	22.23	25.40	11.10	35.59	124.59	249.17	373.75
24B	38.10	25.40	25.40	14.63	38.05	97.90	195.81	293.71
28A	44.45	25.40	25.40	42.70	37.32	169.12	338.25	507.37
28B	44.45	27.94	30.99	15.90	46.71	129.10	258.20	387.30
32A	50.80	28.58	31.75	14.27	45.34	222.49	444.98	667.47
32B	50.80	29.21	30.99	17.81	45.70	169.12	338.25	507.37
40A	63.50	39.68	38.10	19.84	55.02	347.08	694.16	1041.23
40B	63.50	39.37	38.10	22.89	55.88	262.61	525.23	787.84
48A	76.20	47.63	47.63	23.80	67.95	500.60	1001.21	1501.81
48B	76.20	48.26	45.72	29.24	70.69	400.54	800.99	1201.43
56B	88.90	53.98	53.34	34.32	81.46	542.89	1085.77	-
64A	101.60	63.50	60.69	39.40	92.15	712.01	1423.92	-
72B	114.30	72.39	68.58	44.48	103.94	898.89	1797.78	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบความสามารถในการจับแรงของโซ่

$$\text{ความเร็วโซ่} \quad V = pzn \quad (2.6)$$

จากสมการแรงในแนวสัมผัสได้

$$F_t = W_p \quad (2.7)$$

จากสมการแรงหนีศูนย์กลางในแนวรัศมี

$$F_{ct} = \frac{W}{g} V^2 \quad (2.8)$$

โดยค่า W/g คูได้จากตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 2-7 มวลของโซ่โรลเลอร์ต่อความยาว

โซ่ ISO	มวลของโซ่,kg/m			โซ่ ISO	มวลของโซ่,kg/m			
	หนึ่งชั้น	สองชั้น	สามชั้น		หนึ่งชั้น	สองชั้น	สามชั้น	สี่ชั้น
06B	0.39	0.74	1.10	06A	0.33	0.65	0.98	
08B	0.68	1.34	1.99	08A	0.61	1.22	1.83	2.44
10B	0.85	1.70	2.55	10A	0.98	1.96	2.95	3.93
12B	1.16	2.31	3.45	12A	1.58	3.05	4.45	6.10
16B	2.70	5.42	8.13	16A	2.50	5.00	7.50	10.00
20B	3.70	7.40	11.10	20A	3.68	7.35	11.03	14.70
24B	6.70	13.75	20.75	24A	5.54	11.07	16.61	22.14
28B	8.25	16.80	25.40	28A	7.52	15.00	22.60	30.10
32B	9.22	18.45	27.67	32A	9.67	19.34	29.02	38.69
40B	15.48	31.55	47.62	40A	15.48	30.95	46.43	61.90
48B	24.71	50.00	75.45	48A				
56B	33.20	67.60		56A				
64B	44.64	89.29		64A				
72B	59.50			72A				

$$\text{แรงดึงในโซ่} \quad F_o = F_t + F_{ct} \quad (2.9)$$

2.7.2.7 สมการค่าความปลอดภัย

$$N_b = \frac{F_b}{F} \quad (2.10)$$

F_b = แรงแตกหักน้อยที่สุดของโซ่ (จากตารางโซ่โรลเลอร์มาตรฐาน)

N_b = ค่าความปลอดภัย (ควรมีค่าระหว่าง7ถึง15)

2.7.2.8 หาจำนวนข้อโซ่จากสมการ

$$x = \frac{2C}{P} + \frac{Z+z}{2} + \left(\frac{Z-z}{2\pi}\right)^2 \frac{P}{C} \quad (2.11)$$

โดยที่

X = จำนวนข้อโซ่หรือจำนวนพิตช์ของโซ่ (ต้องเป็นเลขคู่)

C = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟืองโซ่

P = ระยะพิตช์ของโซ่

Z = จำนวนฟันบนเฟือง

Z = จำนวนฟันบนเฟืองโซ่

โดยดูค่าจาก ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟืองโซ่จากตารางข้างล่าง
ตารางที่ 2-8 ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟืองโซ่, C

ระยะพิตช์ Mm	ระยะห่างระหว่าง ศูนย์กลาง mm	ระยะพิตช์ mm	ระยะห่างระหว่าง ศูนย์กลาง mm
9.525	450	38.10	1350
12.70	600	44.45	1500
15.875	750	50.80	1700
19.05	900	63.50	1800
25.40	1000	76.20	2000
31.75	1200		

เมื่อได้จำนวนข้อโซ่แล้ว (ควรทำให้เป็นเลขคู่) จำนวนข้อโซ่ที่มากำหนดหาระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟืองโซ่ C ที่แท้จริงจากสมการ

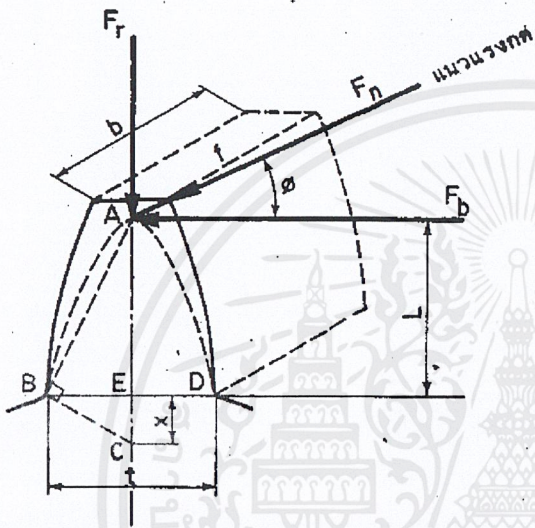
$$C = \frac{P}{2} \left(x - \frac{Z-z}{2} \right) + \sqrt{\left\{ x - \frac{Z-z}{2} \right\}^2 - 2 \left\{ \frac{Z-z}{\pi} \right\}^2} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เฝือก

การออกแบบเฝือกเป็นปัญหาที่ค่อนข้างยาก ทั้งนี้เพราะการออกแบบขั้นต้นต้องกระทำแบบใช้การทดลองดู การออกแบบขนาดของเฝือกมีอยู่หลายวิธี ที่จะกล่าวต่อไปนี่ก็คือการใช้สมการของลูอิส (Lewis)

ลูอิสได้หาสมการสำหรับการคำนวณขนาดของฟันเฝือก โดยสมมติให้ฟันเฝือกมีลักษณะเป็นคานยื่น (Cantilever beam) และรับแรงดั่งในรูป 2.7 ถ้าคิดให้แรงกระทำที่ปลายฟัน แรง F_n จะตั้งฉาก



กับผิวของฟันไปตามแนวแรงกด ซึ่งสามารถแยกออกเป็นสองแรงตั้งฉากกัน คือ F_b และ สมมติให้แรงนี้กระจายออกไปสม่ำเสมอตลอดความหนาของฟัน โดยที่ไม่คิดแรงกดในแนวรัศมี F_r

จากสมการความเค้นในคาน

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(F_b L)(t/2)}{bt^3/12} = \frac{6F_b L}{bt^2}$$

หรือ

$$F_b = \frac{\sigma b t^2}{6L} \tag{2.13}$$

รูปที่ 2-12 ตัวประกอบเรขาคณิตที่ใช้หาตัวประกอบ

รูปแบบของลูอิส

ในการออกแบบคานที่ดี ความเค้นควรจะเท่ากันตลอดทุกหน้าตัดของคาน ถ้าให้ฟันเฝือกในรูป 2-9 มีความเค้นคงที่ ($\sigma =$ คงที่) และเนื่องจากความหนาของเฝือก b เท่ากันตลอด ดังนั้นสมการ (2.13) จะเขียนได้เป็น

$$L = (\text{ค่าคงที่})(t^2) \tag{2.14}$$

จากสมการ (2.14) จะเห็นได้ว่า ฟันเฝือกจะต้องมีรูปร่างเป็นพาราโบลา ดังเส้นประในรูป 2.7 แต่ในเฟืองอินโวลูตเนื้อโลหะจะเพิ่มขึ้นจากรูปพาราโบลาดังในรูป ดังนั้นในเฟืองที่ใช้งานอยู่จริง ความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่หน้าตัด BED

จากรูปสามเหลี่ยมคล้าย ABE และ BCE จะได้ว่า

$$\frac{x}{t/2} = \frac{t/2}{L} \quad \text{หรือ} \quad L = \frac{t^2}{4x}$$

เมื่อแทนค่า L ลงในสมการ (2.13) จะได้ว่า

$$F_b = \sigma b \left(\frac{2x}{3p}\right) p$$

โดยที่ p เป็นเซอควิลลาพิตซ์ และค่า $\frac{2x}{3p}$ เรียกว่า ตัวประกอบรูปแบบของลูอิส (Lewis form factor) ใช้แทนด้วย y จึงทำให้เขียนสมการได้เป็น

$$F_b = \sigma b y p \quad (2.15)$$

เนื่องจากเฟืองในระบบหน่วยอังกฤษใช้บอกด้วย โคเอมิทริลพิตซ์ P ซึ่ง $p = \pi/P$ ดังนั้นสมการ (2.13) จึงเขียนได้เป็น

$$F_b = \frac{\sigma b Y}{P} \quad (2.16)$$

โดยที่ $Y = \pi y$ เป็นตัวประกอบรูปแบบของลูอิสเช่นกัน

สำหรับในระบบหน่วยเอสไอ ใช้บอกขนาดของเฟืองด้วยโมดูล ดังนั้น

$$F_b = \sigma b Y m \quad (2.17)$$

ค่า y และ Y นี้สามารถหาได้โดยการคำนวณจากรูปร่างของฟันเฟือง และหาค่าได้จากตาราง

2-9

ตาราง 2-9 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส

จำนวนฟัน	แรงกระทำที่ปลายฟัน								แรงกระทำใกล้กึ่งกลางฟัน			
	$14\frac{1}{2}^\circ\text{FD}$		20°FD		20°Stub		25°		$14\frac{1}{2}^\circ\text{FD}$		20°FD	
	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y
10	0.176	0.056	0.201	0.064	0.261	0.083						
11	0.192	0.061	0.226	0.072	0.289	0.092						
12	0.210	0.067	0.245	0.078	0.311	0.099	0.242	0.077	0.355	0.113	0.415	0.133
13	0.223	0.071	0.264	0.083	0.324	0.103	0.258	0.082	0.377	0.120	0.443	0.141
14	0.236	0.075	0.276	0.088	0.339	0.108	0.270	0.086	0.399	0.127	0.468	0.149
15	0.245	0.078	0.289	0.092	0.349	0.111	0.286	0.091	0.415	0.133	0.490	0.156
16	0.255	0.081	0.295	0.094	0.360	0.115	0.298	0.095	0.430	0.137	0.503	0.160
17	0.264	0.084	0.302	0.096	0.368	0.117	0.311	0.099	0.446	0.142	0.512	0.163
18	0.270	0.086	0.308	0.098	0.377	0.120	0.324	0.103	0.459	0.146	0.522	0.167
19	0.277	0.088	0.314	0.100	0.386	0.123	0.336	0.107	0.471	0.150	0.534	0.170
20	0.283	0.090	0.320	0.102	0.393	0.125	0.349	0.111	0.481	0.153	0.544	0.173
21	0.289	0.092	0.326	0.104	0.399	0.127	0.365	0.116	0.490	0.156	0.553	0.177
22	0.292	0.093	0.330	0.105	0.404	0.129	0.377	0.120	0.496	0.158	0.559	0.178
23	0.296	0.094	0.333	0.106	0.408	0.130	0.390	0.124	0.502	0.160	0.565	0.180
24	0.302	0.096	0.337	0.107	0.411	0.132	0.403	0.128	0.509	0.162	0.572	0.183
25	0.305	0.097	0.340	0.108	0.416	0.133	0.415	0.132	0.515	0.164	0.580	0.184
26	0.308	0.098	0.344	0.109	0.421	0.135	0.428	0.136	0.522	0.166	0.584	0.186
27	0.311	0.099	0.348	0.111	0.426	0.136	0.418	0.133	0.528	0.168	0.588	0.187
28	0.314	0.100	0.352	0.112	0.430	0.137	0.409	0.130	0.534	0.170	0.592	0.189
29	0.316	0.101	0.355	0.113	0.434	0.138	0.412	0.131	0.537	0.171	0.599	0.191
30	0.318	0.101	0.358	0.114	0.437	0.139	0.418	0.133	0.540	0.172	0.606	0.193
31	0.320	0.101	0.361	0.115	0.440	0.140	0.421	0.134	0.554	0.173	0.611	0.195
32	0.322	0.101	0.364	0.116	0.443	0.141	0.428	0.136	0.547	0.174	0.617	0.196
33	0.324	0.103	0.367	0.117	0.445	0.142	0.430	0.137	0.550	0.175	0.623	0.198

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

34	0.326	0.104	0.371	0.118	0.447	0.142	0.434	0.138	0.553	0.177	0.628	0.200
35	0.327	0.104	0.373	0.119	0.449	0.143	0.437	0.139	0.556	0.177	0.633	0.201
36	0.329	0.105	0.377	0.120	0.451	0.144	0.443	0.140	0.559	0.178	0.639	0.203
37	0.330	0.105	0.380	0.121	0.454	0.144	0.446	0.141	0.563	0.179	0.645	0.205
38	0.333	0.106	0.384	0.122	0.455	0.145	0.450	0.142	0.565	0.180	0.650	0.207
39	0.335	0.107	0.386	0.123	0.123	0.146	0.454	0.143	0.568	0.181	0.655	0.209
40	0.336	0.107	0.389	0.124	0.124	0.146	0.460	0.144	0.570	0.182	0.659	0.210
43	0.339	0.108	0.397	0.126	0.126	0.147	0.463	0.146	0.574	0.183	0.668	0.212
45	0.340	0.108	0.399	0.127	0.127	0.149	0.469	0.147	0.579	0.184	0.678	0.214
50	0.346	0.110	0.408	0.130	0.130	0.151	0.478	0.149	0.579	0.187	0.694	0.221
55	0.352	0.112	0.415	0.132	0.132	0.153	0.485	0.152	0.588	0.190	0.704	0.224
60	0.355	0.113	0.421	0.134	0.134	0.154	0.490	0.154	0.596	0.192	0.713	0.227
65	0.358	0.114	0.425	0.135	0.135	0.155	0.496	0.156	0.603	0.193	0.721	0.229
70	0.360	0.115	0.429	0.136	0.136	0.157	0.502	0.158	0.607	0.194	0.728	0.231
75	0.361	0.115	0.433	0.138	0.138	0.158	0.508	0.160	0.610	0.195	0.735	0.233
80	0.363	0.116	0.436	0.139	0.139	0.159	0.510	0.161	0.613	0.196	0.739	0.235
90	0.366	0.117	0.442	0.141	0.141	0.160	0.516	0.162	0.615	0.197	0.747	0.237
100	0.368	0.117	0.446	0.142	0.142	0.161	0.521	0.164	0.619	0.198	0.755	0.240
เรื้อก	0.390	0.124	0.484	0.154	0.550	0.175	0.568	0.180	0.660	0.210	0.823	0.262



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2-10 ค่าความเค้นสถิตใช้งานสำหรับใช้สมการของคูอิส

วัสดุ	σ		HB
	ksi	N/mm ²	
เหล็กหล่อสีเทา			
ASTM 25	8	55	174
ASTM35	12	82	212
ASTM50	15	103	223
เหล็กหล่อ (คาร์บอนต่ำ)			
0.2% C ไม่ผ่านวิธีทางความร้อน	20	138	180
0.2% C WQT	25	172	250
เหล็กกล้าคาร์บอนตีอัด (forged)			
SAE 1020 case hardened และ WQT	18	124	156
SAE 1030 ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	20	138	180
SAE 1035 ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	23	159	190
SAE 1040 ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	25	172	202
SAE 1045 ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	30	207	215
SAE 1045 ชุบแข็งโดย WQT	32	220	205
SAE 1050 ชุบแข็งโดย OQT	35	241	223
เหล็กกล้าผสม			
SAE 2320 case hardened และ WQT	50	345	225
SAE 2345 ชุบแข็งโดย OQT	50	345	475
SAE3115 case hardened และ OQT	37	255	212
SAE 3145 ชุบแข็งโดย OQT	53	365	475
SAE 3245 ชุบแข็งโดย OQT	65	448	475
SAE 4340 ชุบแข็งโดย OQT	65	448	475
SAE 4640 ชุบแข็งโดย OQT	55	379	475

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแรงกระทำกับพื้นเฟืองเป็นแบบกระทำซ้ำกัน และมีความถี่ตามความเร็วของเฟือง ดังนั้นเฟืองจึงแตกเร็ว โดยผลจากความล้า (fatigue) เสียส่วนใหญ่ เพราะฉะนั้นค่าความเค้นใช้งาน σ ในสมการ (2.15) (2.16) และ(2.17) จึงต้องเป็นความต้านแรงทนทาน(endurance strength)ดังในตาราง 2-10 ซึ่งแสดงค่าความเค้นใช้งานสำหรับวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้ทำเฟือง

ในทางปฏิบัติมักจะออกแบบเฟืองให้มีอัตราส่วนการขบอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.6 ดังนั้นในขณะที่แรงกระทำอยู่ที่ปลายพื้นเฟือง พื้นคู่ถัดไปก็ยังมีสัมผัสกันอยู่ ฉะนั้นแรงทั้งหมดจึงมิได้กระทำที่ปลายพื้นเฟือง เพราะมีพื้นคู่อื่นช่วยรับแรงอยู่ด้วย ในขณะที่เฟืองหมุนไปแรงที่ปลายพื้นจะค่อยๆ เคลื่อนลงมาจนเกือบกลางพื้น พื้นอีกคู่จึงจะผลัดออกจากกัน ด้วยเหตุนี้เองแรงทั้งหมดจึงกระทำต่อพื้นเฟือง ใกล้กับกลางพื้น (ยกเว้นกรณีที่มี $m_c \leq 1$) จากการทำงานของพื้นเฟืองดังกล่าวมานี้ทำให้ไม่สามารถที่จะตัดลีนลงไปได้ว่า เมื่อใดความเค้นในพื้นเฟืองจะมากที่สุด สำหรับการออกแบบเฟืองใช้งานทั่วไปแล้ว มักจะสมมติให้แรงทั้งหมดกระทำที่ปลายพื้น ส่วนชิ้นงานที่ต้องคำนึงถึงขนาดและน้ำหนักเป็นสิ่งสำคัญแล้ว มักจะใช้การคำนวณ โดยคิดให้แรงกระทำใกล้กับกลางพื้นเฟือง

ตามทฤษฎีการคำนวณหาขนาดของพื้นเฟืองดังกล่าวมาแล้ว ได้ละทิ้งแรง F_r ในรูป 2-9 ที่กดพื้นอยู่ แรงนี้จะทำให้เกิดความเค้นอัดเพิ่มขึ้นในพื้น ซึ่งเมื่อรวมกับความเค้นเนื่องจากแรง F_b แล้ว (แรง F_b ทำให้เกิดความเค้นดึงแล้วความเค้นอัดในพื้น) จะเป็นผลให้ความเค้นในด้านหนึ่งของพื้นลดลงและความเค้นอัดในอีกด้านหนึ่งของพื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุส่วนมากที่ใช้ทำเฟืองสามารถรับแรงอัดได้มากกว่าแรงดึง ฉะนั้นแรง F_r ที่ละทิ้งไปนี้ จึงช่วยให้เฟืองสามารถรับแรงได้สูงขึ้นอีก อีกประการหนึ่งก็คือ ความล้าที่เกิดขึ้นมักจะเกิดจากในพื้นด้านที่รับแรงดึง ดังนั้นการลดความเค้นดึงทางด้านนี้จึงทำให้พื้นแข็งแรงขึ้นอีก

2.9 ความเค้นหนาแน่น

ตัวประกอบที่สำคัญอีกค่าหนึ่งซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงพื้นเฟืองมากและมีได้รวมอยู่ในสมการของลูอิสคือ ความเค้นหนาแน่น (stress concentration) ที่โคนพื้นเฟือง ซึ่งเป็นบริเวณที่เชื่อมต่อกันระหว่างอิน โวลูตคอป และวงกลมดีเดนดัม และจะมีฟิลเลตริสมี r การหาค่าตัวประกอบความหนาแน่นทางทฤษฎี K_t สำหรับพื้นเฟืองเป็นสิ่งที่ยากมาก จึงมีเพียงแต่ผลที่ได้จากการทดลอง โดยใช้วัสดุยืดหยุ่น โปร่งแสง (photoelasticity material) ของ Dolan และ Broghamer ซึ่งได้ การออกมาดังนี้คือ

$$K_t = 0.22 + \left(\frac{t}{r}\right)^{0.2} \left(\frac{t}{L}\right)^{0.4} \quad \text{สำหรับ } \phi = 14.5^\circ \quad (2.18 ก)$$

$$K_t = 0.22 + \left(\frac{t}{r}\right)^{0.15} \left(\frac{t}{L}\right)^{0.45} \quad \text{สำหรับ } \phi = 20^\circ \quad (2.18 ข)$$

$$K_t = 0.22 + \left(\frac{t}{r}\right)^{0.11} \left(\frac{t}{L}\right)^{0.5} \quad \text{สำหรับ } \phi = 25^\circ \quad (2.18 ค)$$

โดยที่ t เป็นความหนาของฟันเฟือง และ L เป็นระยะห่างของแรง F_b กับหน้าตัด BED ดังรูป 2-9

ในทางปฏิบัติค่า t , L และ r เป็นค่าที่ไม่สามารถจะทราบได้ล่วงหน้าก่อนที่จะออกแบบเฟือง นอกจากนี้ยังมีตัวประกอบอย่างอื่นอีก เช่น ความเรียบของผิวหน้า และตัวประกอบความไวของรอยเจาะ q (notch sensitivity factor) มาเกี่ยวข้องในการหาค่าความเค้นหนาแน่นอีกด้วย ดังนั้นในการคำนวณเกี่ยวกับฟันเฟืองจึงให้ใช้ค่าประมาณดังนี้คือ

$$1.2 \leq K_f \leq 1.7 \quad \text{เมื่อให้แรงกระทำที่ปลายฟัน}$$

$$1.4 \leq K_f \leq 2.0 \quad \text{เมื่อให้แรงกระทำใกล้ที่กลางฟัน}$$

โดยที่ K_f เป็นตัวประกอบความเค้นหนาแน่นจริง (*actual stress concentration factor*) ดังนั้นสมการ (2.15) (2.16) และ (2.17) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$F_b = \frac{\sigma_b y p}{K_f} \quad (2.19)$$

$$F_b = \frac{\sigma_b Y}{K_f P} \quad (2.20)$$

$$F_b = \frac{\sigma_b Y m}{K_f} \quad (2.21)$$

สำหรับการออกแบบเฟืองทั่วไปอาจสมมติให้ค่าความหนาของฟันเฟืองมีค่าดังต่อไปนี้

$$\frac{8}{P} < b < \frac{12.5}{P} \quad \text{หรือ} \quad 8m < b < 12.5$$

ในกรณีที่เนื้อที่ในการติดตั้งเฟืองมีน้อย ก็อาจจะออกแบบให้ความหนาเฟืองน้อยกว่าค่าที่แนะนำเอาไว้ก็ได้ ถ้าความหนาเฟืองน้อยเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาในการตั้งศูนย์ (alignment) เฟืองที่ขบกัน แต่ถ้าความหนาเฟืองมากเกินไปอาจทำให้เฟืองบิด อันเนื่องมาจากการกระจายแรงไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาฟันเฟือง

2.10 แรงพลวัต

จากที่ผ่านมานั้นเป็นการคำนวณหาขนาดของเฟืองโดยคิดให้แรง F_b อยู่หนึ่ง แล้วใช้ความรู้ทางด้านกลศาสตร์วัสดุหาสมการสำหรับแรงที่ฟันเฟืองควรจะรับเอาไว้ได้ ในทางด้านปฏิบัติ เฟืองจะหมุนอยู่ในขณะใช้งาน และแรงที่ส่งผ่านมายังเฟืองจะคำนวณได้จากสมการ

$$F_t = \frac{W_p}{V} \quad (2.22)$$

โดยที่ F_t = แรงที่เป็น N

W_p = กำลังงานที่ส่งผ่าน เป็น W

V = ความเร็วพิตช์ (pitch line speed) เป็น m/s

หรือในระบบหน่วยอังกฤษ จะคำนวณหาแรงได้จากสมการ

$$F_t = \frac{33000hp}{V} \quad (2.23)$$

โดยที่ F_t = แรงที่เป็น lb

V = ความเร็วพิตช์ (pitch line speed) เป็น ft/min

ตามปกติแล้วแรงที่ส่งผ่านจะมีค่ามากกว่าแรงที่หาค่าได้จากสมการ (2.22) หรือ (2.23) ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากตัวประกอบต่างๆ เช่น ความผิดพลาดในการตัดรูปร่างของฟันเฟือง ค่าเบี่ยงเบนทำให้เกิดการกระแทกขึ้นเป็นต้น จากการทดลองพบว่า แรงที่ส่งผ่านมาที่แท้จริงขึ้นอยู่กับความเร็วพิตช์ เรียกว่าตัวประกอบความเร็ว K_v (velocity factor) ดังนั้นแรงที่กระทำต่อฟันเฟืองในขณะที่ใช้งานควรจะเป็น

$$F_d = K_v F_t \quad (2.24)$$

ค่า F_d นี้เรียกว่าแรงพลวัต (dynamic load) ส่วน K_v สำหรับหน่วยเอสไอจะหาได้จากสมการ

$$K_v = \frac{3+V}{3} \quad \text{สำหรับเฟืองทั่วไป} \quad V \leq 10 \text{ m/s}$$

$$K_v = \frac{6+V}{6} \quad \text{สำหรับเฟืองที่ตัดอย่างดี} \quad 5 < V < 20 \text{ m/s}$$

$$K_v = \frac{5.56+V}{5.56} \quad \text{สำหรับเฟืองที่ตัดอย่างดี} \quad V \geq 20 \text{ m/s}$$

ค่า K_v สำหรับระบบหน่วยอังกฤษ จะหาได้จากสมการ

$$K_v = \frac{600+V}{600} \quad \text{สำหรับเฟืองทั่วไป} \quad V \leq 2000 \text{ ft/min}$$

$$K_v = \frac{1200+V}{1200} \quad \text{สำหรับเฟืองที่ตัดอย่างดี} \quad 1000 < V < 4000 \text{ ft/min}$$

$$K_v = \frac{78+V}{78} \quad \text{สำหรับเฟืองที่ตัดอย่างดี} \quad V \geq 4000 \text{ ft/min}$$

ในการคำนวณหาขนาดของฟันเฟือง ผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบว่าแรงพลวัตนี้มากกว่าแรงที่ฟันเฟืองจะรับได้หรือไม่ และให้ถือว่าฟันเฟืองแข็งแรงพอเมื่อ $F_b \geq F_d$ โดยที่สมมติว่าแรง

F_b กระทำที่ปลายฟันการที่จะให้ F_b มากกว่า F_d เท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงที่มากระทำ นั่นคือ

$$\frac{F_b}{F_d} = N_s$$

โดยที่ N_s เรียกว่า ตัวประกอบใช้งาน (service factor) และให้ใช้ค่าโดยประมาณ ซึ่งแสดงไว้ในตาราง 2-11

ตาราง 2-11 ตัวประกอบใช้งาน

ชนิดของแรง	N_s	ตัวอย่าง
แรงเรียบสม่ำเสมอ	1.00-1.25	พัดลมไฟฟ้า
แรงกระแทกเล็กน้อย	1.25-1.50	เครื่องเจาะบ่อน้ำบาดาล เครื่องมือลม
แรงกระแทกอย่างหนัก	1.50-2.00	เครื่องบดหิน

2.11 การคำนวณแรงกระทำที่ลูกรีด

แรงกระทำที่ลูกรีด

$$F = Lw\bar{Y}' \left(1 + \frac{\mu L}{2h_{av}} \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ w คือ ความกว้างของแผ่นโลหะที่จะนำมารีด
 μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
 h_{av} คือ $\frac{h_o + h_f}{2}$
 $\bar{Y}' = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{Y}$ และ $\bar{Y} = \frac{K\varepsilon^n}{n+1}$ เมื่อ n คือ เลขชี้กำลังของการเพิ่มความแข็งแรงจากความเครียด, K คือ strength coefficient

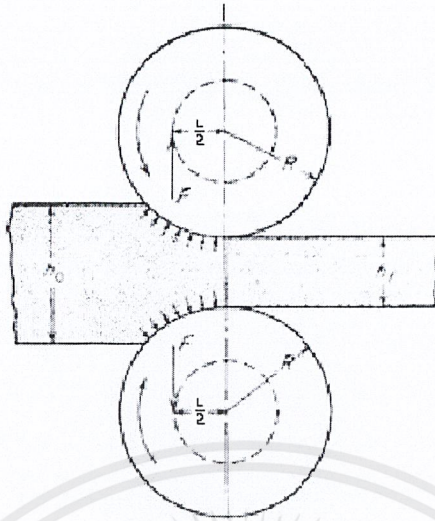
$$\text{True strain } \varepsilon = \frac{l}{l_o} = \frac{h_o}{h_f}$$

เมื่อ L คือ Arc of contact

$$\text{ซึ่ง } L = \sqrt{R\Delta h}$$

เมื่อ R คือ รัศมีของลูกรีด

Δh คือ ผลต่างระหว่างค่าความหนาของแผ่นโลหะก่อนลูกรีด และหลังลูกรีด



รูปที่ 2-13 แรงที่กระทำต่อลูกรีด

Roll torque and power

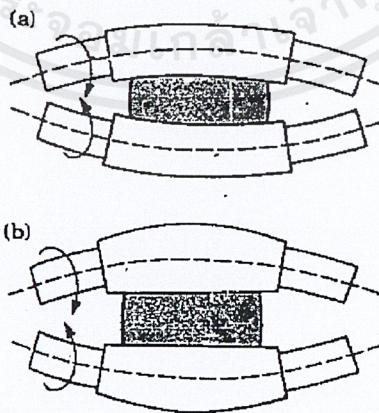
$$T = \frac{FL}{2}$$

$$\text{Power} = T\omega$$

เมื่อ $\omega = \frac{2\pi N}{60}$; N คือ ความเร็วการหมุนรอบต่อนาทีของ ลูกรีด
 ดังนั้น

$$\text{Power} = \frac{\pi FLN}{60,000} \text{ kW} \tag{2.24}$$

2.12 การโค้งงอของลูกรีด



รูปที่ 2-14 แสดงการ โค้งงอของลูกรีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการรีดแผ่นโลหะที่อุณหภูมิห้องอาจเกิดการโค้งของตัวลูกรีด โดยเกิดการโค้งงอขึ้นระหว่างลูกรีดกับลูกปืน ทำให้แผ่นที่ลูกรีดไม่ออกมาเป็นแผ่นแบนแต่จะออกมาในลักษณะที่โค้งนูน ปัญหานี้สามารถแก้ไขด้วยการรีดด้วยลูกรีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเดิม

รัศมีลูกรีดใหม่หลังจากเกิดการโค้งคือ

$$R' = R \left(1 + \frac{CF'}{h_o - h_f} \right) \quad (2.25)$$

จากสมการ

$C = 2.3 \times 10^{-2} \text{mm}^2/\text{kN}$ สำหรับลูกรีดเหล็ก

$C = 4.57 \times 10^{-2} \text{mm}^2/\text{kN}$ สำหรับลูกรีดที่ทำจากเหล็กหล่อ

F' คือ แรงกระทำลูกรีด ต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของแผ่น โลหะ หน่วย kN/m

R' คือ รัศมีใหม่ของลูกรีด

R คือ รัศมีลูกรีดเดิม

h_o คือ ความหนาหน้าก่อนรีด

h_f คือ ความหนาหลังรีด

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

3.1 ขอบเขตในการออกแบบเครื่องรีดโลหะ

- (1) ปรับระยะในการรีดสูงสุด 3 cm
- (2) ความเร็วในการรีด 12 rpm
- (3) % Reduction 20 %
- (4) ไซมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 Hp
- (5) ขนาดของลูกรีด เส้นผ่านศูนย์กลาง 11.4 cm
- (6) สังกาลังด้วยโซ่ เบอร์ 80

3.2 การออกแบบและคำนวณการใช้กำลังของมอเตอร์

วัสดุชนิด AISI 1010 กว้าง 2 เซนติเมตร ต้องการรีดจากความหนา 1 เซนติเมตร ให้เหลือ 0.8 เซนติเมตร โดยออกแบบให้ ลูกรีดมีขนาด รัศมี 5.7 เซนติเมตร และความเร็วในการรีด 12 รอบ/นาที

$$\text{จากสูตร } F = Lw\bar{Y}' \left(1 + \frac{\mu L}{2h_{av}} \right)$$

$$\text{และ } L = \sqrt{R\Delta h}$$

$$\text{เราจะรู้ค่า } L = \sqrt{(0.057)(0.01 - 0.008)} = 0.0106$$

สำหรับวัสดุชนิด AISI 1010 ที่มีค่า $K=1275$ MPa และ $n=0.45$

$$\text{ความเครียดจริง } \epsilon = \ln \left(\frac{0.01}{0.008} \right) = 0.223$$

$$\text{จากสมการ } \bar{Y} = \frac{(1275)(0.223)^{0.45}}{0.45+1} = 447.71 \text{ MPa, และ } \bar{Y}' = \frac{2}{\sqrt{3}} (447.71) = 514.87 \text{ MPa}$$

$$h_{av} = \frac{0.01+0.008}{2} = 0.009, \text{ และสมมติให้ค่า } \mu = 0.08, w = 2 \text{ cm}$$

ดังนั้นแรงที่ได้

$$F = (0.0106)(0.02)(434) \left(1 + \frac{(0.08)(0.0106)}{(2)(0.009)} \right) = 96.3 \text{ kN}$$

และกำลัง

$$\text{Power} = \frac{2\pi(96300)(0.0106)(12)}{60,000} = 1.28 \text{ KW} = 1.7 \text{ Hp}$$

ดังนั้นเลือกมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า

3.3 การคำนวณขนาดลูกรีด

จาก $F = 169553.6 \text{ N}$, $w = 30 \text{ mm}$, $F' = 5.65 \text{ kN/mm}$, $R = 55 \text{ mm}$
และใช้ $C = 2.3 \times 10^{-2} \text{ mm}^2/\text{kN}$

แทนค่าใน

$$R' = 55 \left(1 + \frac{(2.3 \times 10^{-2})(5.65)}{10 - 8} \right)$$

$$R' = 58 \text{ mm} = 0.058$$

จากการคำนวณหาค่า R' พบว่าความแตกต่างระหว่าง R และ R' มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่ารัศมีลูกรีดที่ได้ออกแบบนั้นมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง

3.4 การคำนวณหาขนาดเฟือง

ต้องการออกแบบเฟืองคู่หนึ่งในการส่งกำลัง 3 hp จากเพลาชั่งหมุนด้วยความเร็วรอบ 12 rpm ไปยังเพล่อีกอันหนึ่ง โดยที่ความเร็วเท่าเดิม ใช้วัสดุ SAE 4340 ค่าวงกลมพิตช์ขนาด 128 mm จะสามารถหาขนาดเฟืองได้ดังนี้

ค่า $\sigma_{SAE 4340} = 448 \text{ N/mm}^2$

ความเร็วพิตช์ $v = \pi d n = \pi(128)(12/60) = 80.42 \text{ mm/s}$

จากสมการ $F_t = \frac{w_p}{v} = \frac{2238}{0.08042} = 27828.89 \text{ N}$

ความเร็วพิตช์น้อยกว่า 10 m/s ดังนั้น

$$K_v = \frac{3+v}{3} = \frac{3+0.08042}{3} = 1.0268$$

$$F_d = k_v F_t = (1.0268)(27828.89) = 28574.7 \text{ N}$$

สมมติให้ $K_f = 1.5$ และ $b = 8 \text{ m}$ เนื่องจากยังไม่รู้จำนวนฟันเฟือง ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่า Y ได้จากการพิจารณาตาราง 2.3 จะเห็นได้ว่า ถ้าจำนวนฟันเฟืองอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30 ฟัน ก็อาจสมมติค่าเฉลี่ยของ Y ในการคำนวณขั้นแรกได้เพราะค่า Y ไม่แตกต่างกันมากนัก ในที่นี้ให้สมมติค่า $Y = 0.33$ และในการหาค่าพิตช์โดยประมาณ จะให้ $F_b = F_d$ จากสมการ (2.19)

$$F_d = F_b = \frac{6bYm}{K_f}$$

$$28574.7 = \frac{448(8\text{m}^2)(0.33)}{1.5}$$

$$m = 5.9$$

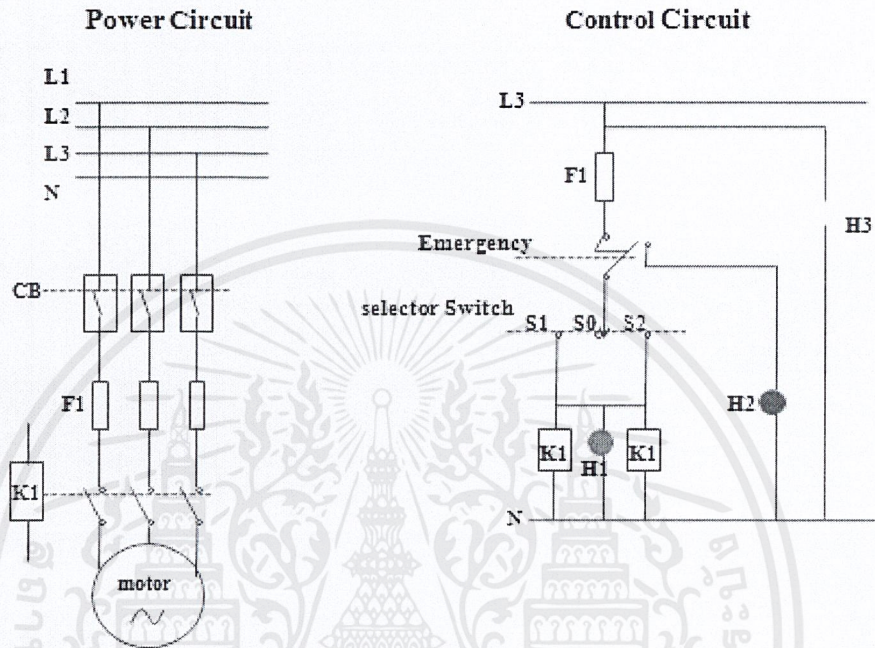
เลือก $m = 6$

$$N = \frac{dp}{m} = \frac{128}{6} = 21 \text{ ฟัน}$$

ความหนาเฟือง $b = 8m = 8(6) = 48 \text{ mm}$

3.7 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์

ต้องการให้เครื่องรีดสามารถรีดไปกลับได้ และมีปุ่มหยุดฉุกเฉินเพื่อความปลอดภัยจึงสามารถออกแบบวงจรการควบคุมได้ดังนี้



รูปที่ 3-3 วงจรควบคุมมอเตอร์

3.7.1 สัญลักษณ์อักษรกำกับวงจร

ตารางที่ 3-1 สัญลักษณ์อักษรกำกับวงจร

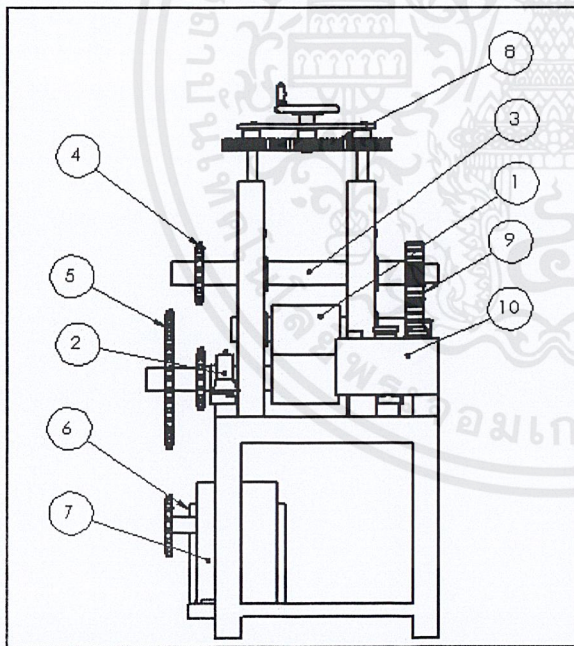
สัญลักษณ์	ความหมาย
S0	สวิตช์เลือกหยุดเดินมอเตอร์
S1	สวิตช์เลือกเดินมอเตอร์หมุนขวา
S2	สวิตช์เลือกเดินมอเตอร์หมุนซ้าย
Emergency	ปุ่มกดหยุดฉุกเฉิน
F1	ฟิวส์ป้องกันวงจรควบคุม
K1	แมกเนติกคอนแทคเตอร์
H1	หลอดไฟสีเขียวเดินมอเตอร์
H2	หลอดไฟสีแดงกดปุ่มฉุกเฉิน
H3	หลอดไฟสีเหลืองตรวจสอบไฟเข้าระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 ขั้นตอนการทำงาน

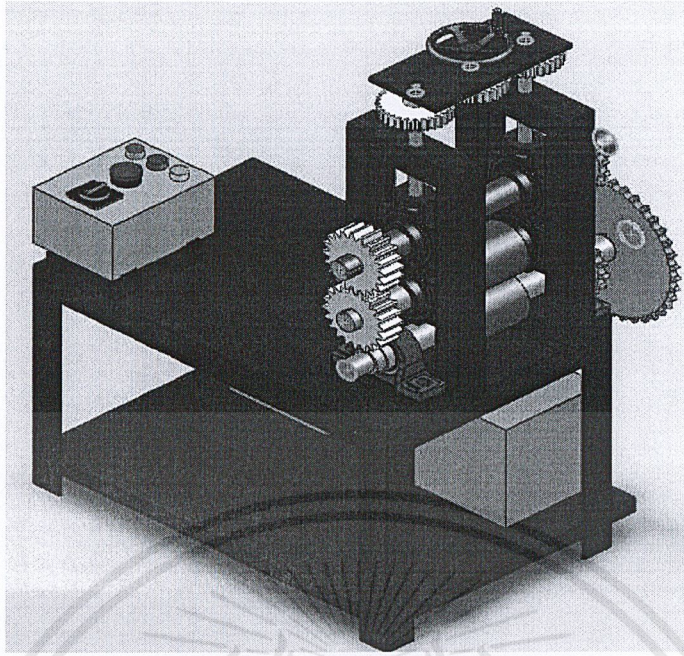
1. สับเบรกเกอร์ ไฟสีเหลือง(H3)ติดแสดงว่าไฟเข้าตามปกติ สวิตช์เลือกอยู่ที่ S0 หยุดการทำงาน
2. เลือกสวิตช์ S1 คอนแทคเตอร์ K1 ทำงาน หลอดไฟสีเขียว(H1)ติด มอเตอร์ทำงาน หมุนทางขวา
3. การเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์จากหมุนขวา เป็นหมุนซ้าย จะต้องหมุนสวิตช์เป็น S0 ก่อนเสมอ
4. เลือกสวิตช์ S2 คอนแทคเตอร์ K1 ทำงาน หลอดไฟสีเขียว(H1)ติด มอเตอร์ทำงาน หมุนทางซ้าย
5. เมื่อต้องการหยุดฉุกเฉิน ให้กด Emergency แล้วไฟสีแดง(H2)จะติด
6. ถ้าฟิวส์F1 ขาดวงจรก็จะหยุดทำงาน

3.8 ภาพรวมของการออกแบบ



1. ลูกรีดโลหะ
2. แบริ่ง
3. เฟลากลับทิส
4. ชุดเฟือง โซ่ส่งกำลังกลับทิส
5. ชุดเฟือง โซ่ส่งกำลังจากมอเตอร์
6. มอเตอร์ไฟฟ้า
7. Gearbox
8. กลไกปรับระยะการรีด
9. ชุดเฟืองทดกลับทิส
10. กล้องควบคุมปิด-เปิดเครื่อง

รูปที่ 3-4 รูปส่วนประกอบของเครื่องรีด

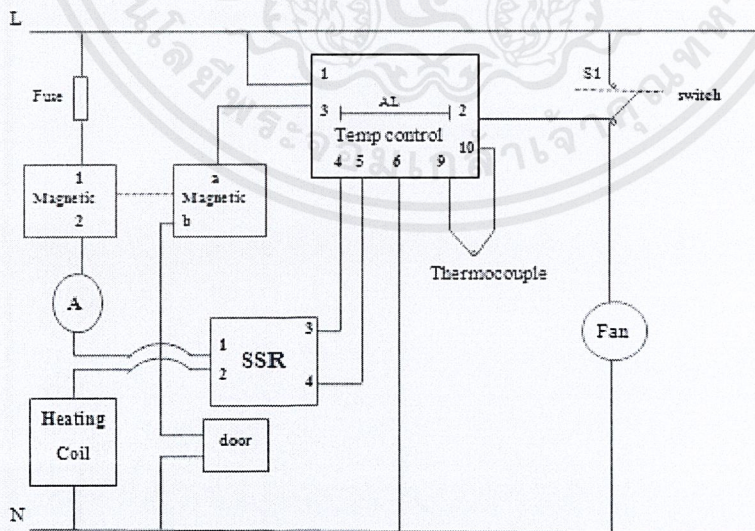


รูปที่ 3-5 รูปเครื่องรีดโลหะในโปรแกรม Solid Work

3.9 ขอบเขตในการซ่อมแซมเตาอบ

- (1) เตาอบทำอุณหภูมิได้ 1,100 องศาเซลเซียส
- (2) คอยล์ร้อนทำความร้อนสูงสุด 1,200 องศาเซลเซียส
- (3) ใช้ไฟฟ้า 3,200 kW

3.10 วงจรควบคุมเตาอบโลหะ



รูปที่ 3-6 รูปวงจควบคุมเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ขั้นตอนการทำงานในการสร้างเครื่องรีดโลหะและการซ่อมแซมอบโลหะ

ในบทนี้นั้นเราจะกล่าวถึงเรื่องขั้นตอนและกระบวนการทั้งหมดในการสร้างเครื่องรีดโลหะ และการซ่อมแซมเตาอบโลหะ โดยจะแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

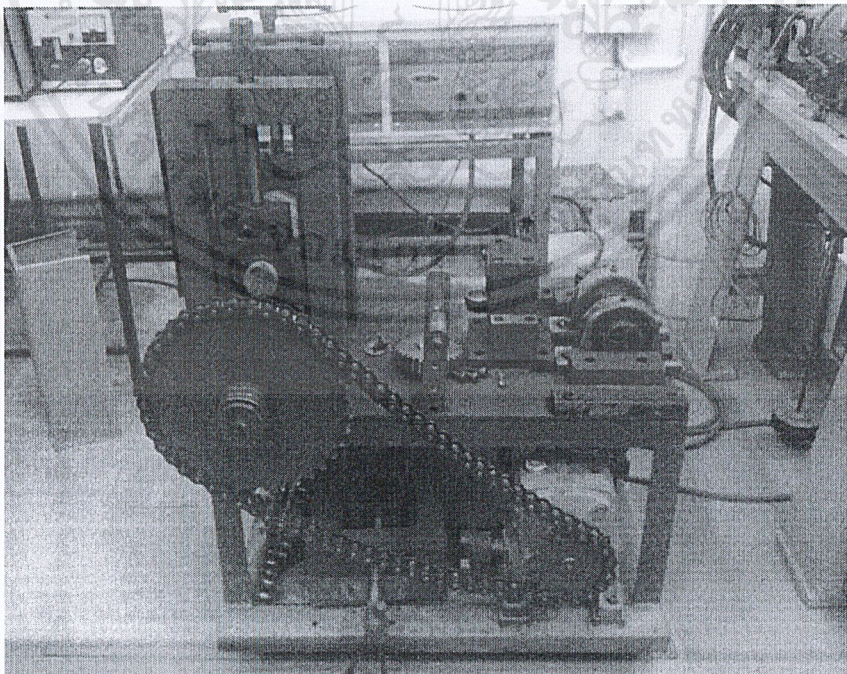
4.1 เครื่องรีดโลหะ

4.1.1 การศึกษา วางแผน และการคำนวณการออกแบบ

ในขั้นตอนแรกนี้เราจะเน้น ไปในเรื่องการศึกษาและหาข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องรีดโลหะ และทำการตรวจสอบเครื่องดัดขนาดเหล็กเส้นเครื่องเดิมที่ตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการวัสดุวิศวกรรมว่ามีอะไรเสียหายหรือใช้งานไม่ได้แล้วบ้าง เพื่อเป็นแนวทางและช่วยกำหนดเป้าหมายการวางแผนสิ่งที่จะต้องทำ และการออกแบบเครื่องรีดโลหะเครื่องนี้

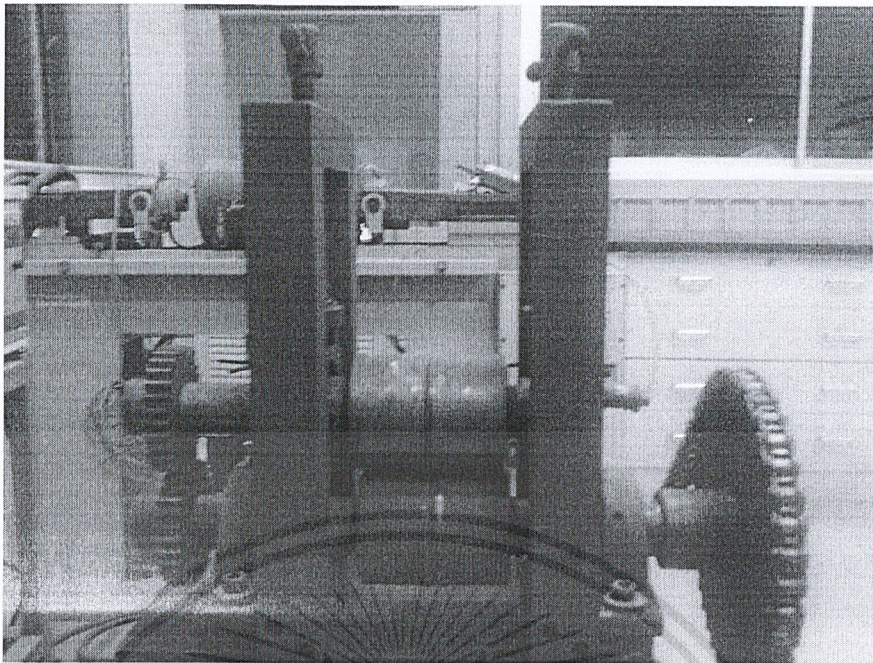
4.1.2 การตรวจสอบเครื่องดัดขนาดเหล็กเส้นเครื่องเดิม

ในขั้นตอนนี้เราต้องตรวจสอบ และทำการสรุปว่าเครื่องดัดขนาดเหล็กเส้นเครื่องเดิมนั้นมีอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนไหนเสียหายหรือสูญหายบ้าง เพื่อที่จะทำการดัดแปลงและปรับปรุงให้เป็นเครื่องรีดโลหะต่อไป



รูปที่ 4-1 ด้านข้างเครื่องดัดขนาดเหล็กเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



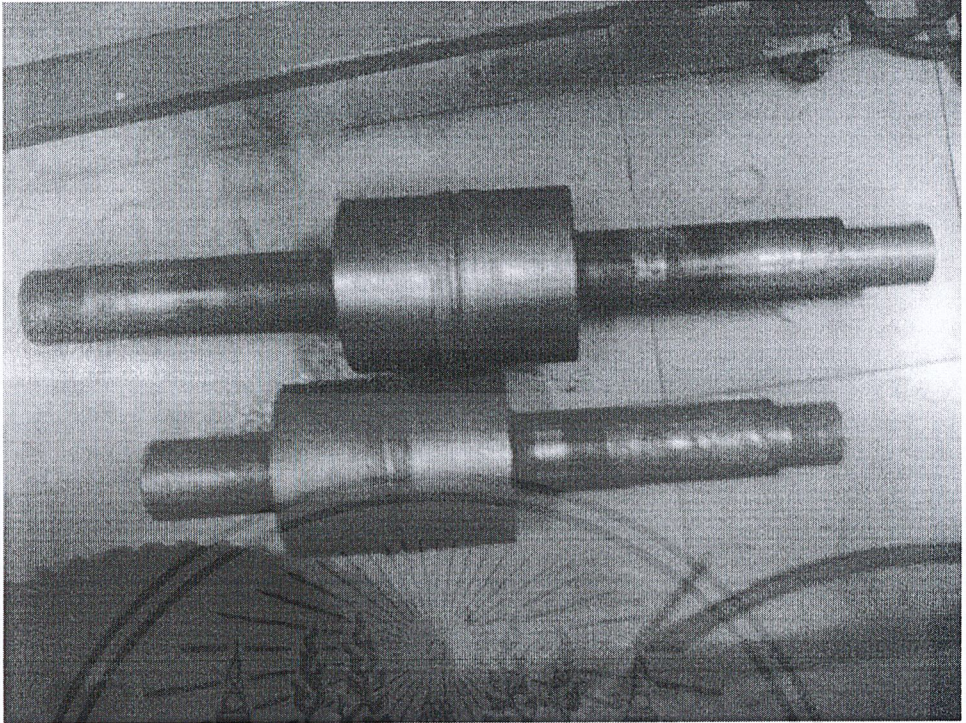
รูปที่ 4-2 ด้านหน้าเครื่องดัดขนาดเหล็กเส้น

หลังจากที่เราได้ทำการตรวจสอบแล้วมีสิ่งที่จะต้องแก้ไขและต้องทำการเพิ่มเติมให้เป็นไปตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ดังนี้

- 1) เพลลาและตัวลูกกริด
- 2) โครงเรือนเครื่องรีดโลหะและชุดเบร้ง
- 3) ชุดโซ่ส่งกำลัง
- 4) ชุดเฟือง
- 5) ตัวปรับระยะลูกกริด
- 6) มอเตอร์และชุดคั่นกำลัง
- 7) ชุดควบคุมมอเตอร์

4.1.3 เพลลาและตัวลูกกริด

หลังจากที่เราได้สำรวจตรวจสอบเครื่องดัดขนาดเหล็กเส้นตัวเก่าเรียบร้อยแล้วนั้น เราก็ได้ทำการปรับเปลี่ยนเครื่อง โดยเริ่มจากเพลลาและตัวลูกกริดจากแบบที่ออกแบบไว้ นั้น เราต้องทำการกลึงและเจียรลดขนาดลูกกริดและทำการกลึงลดขนาดส่วนปลายเพื่อไว้สำหรับใส่เฟือง จากนั้นต้องทำการกลึงเพลลาขึ้นมาใหม่ตามแบบอีกหนึ่งชิ้นเพื่อไว้สำหรับเปลี่ยนทิศการหมุนของเพลาลูกกริดตัวบน



รูปที่ 4-3 เพลลาและลูกรีดเคิม

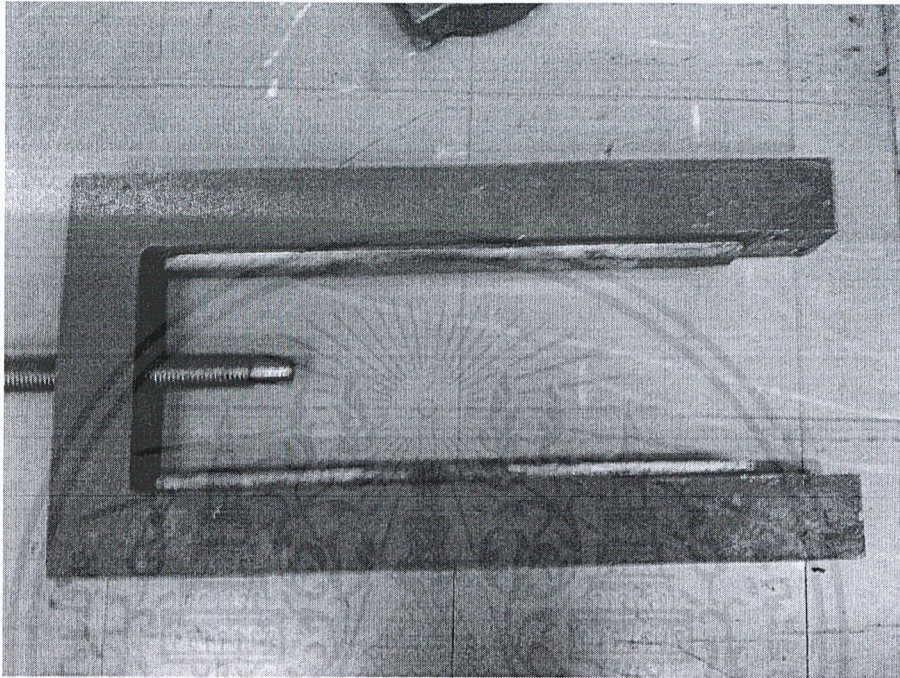


รูปที่ 4-4 ลูกรีดที่ผ่านการกลึงออกแล้ว

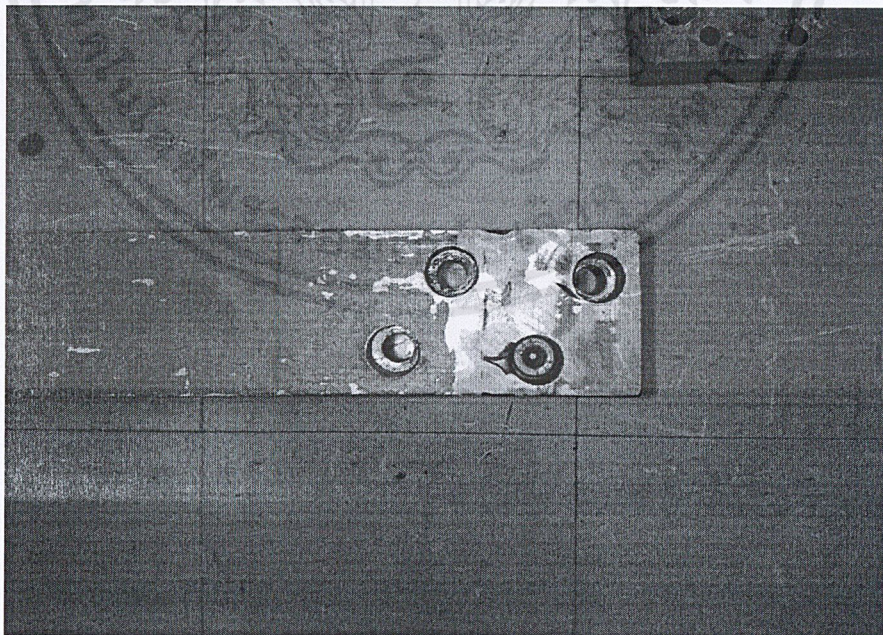
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 โครงเรือนเครื่องรีดโลหะและชุดแปรง

ในส่วนนี้นั้นเราจะมาดู 2 ส่วนคือส่วน โครงเรือนและตัวแปรง ที่เราต้องทำการต่อโครงเรือนเดิมให้สูงขึ้นจากเดิมเพื่อที่จะรองรับการปรับขึ้นลงของแปรงและตัวเฟลาถูรีด และอีกส่วนคือการซื้อแปรงใหม่ที่ตัวเก่าเสียและทำการเชื่อมติดแปรงเข้าด้วยกัน



รูปที่ 4-5 โครงเรือนเครื่องเดิม

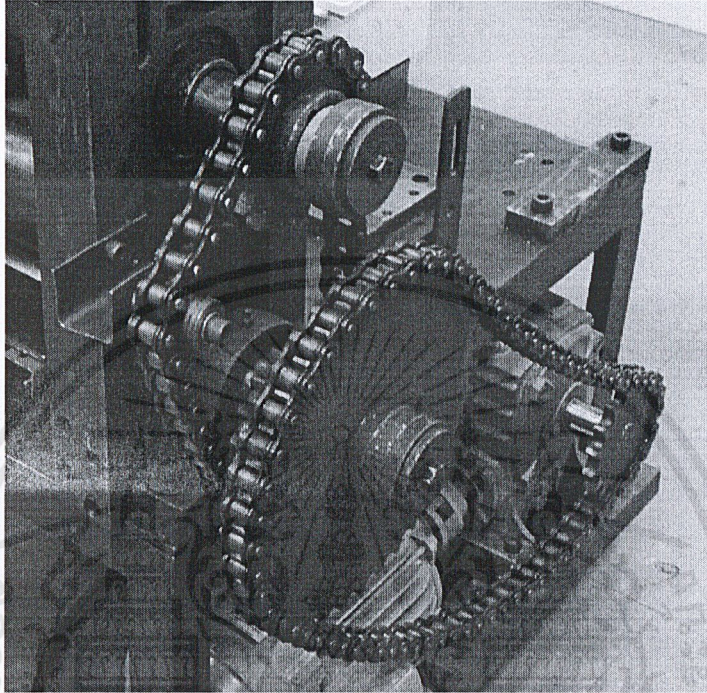


รูปที่ 4-6 ส่วนต่อจาก โครงเรือนให้สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ชุดโซ่ส่งกำลัง

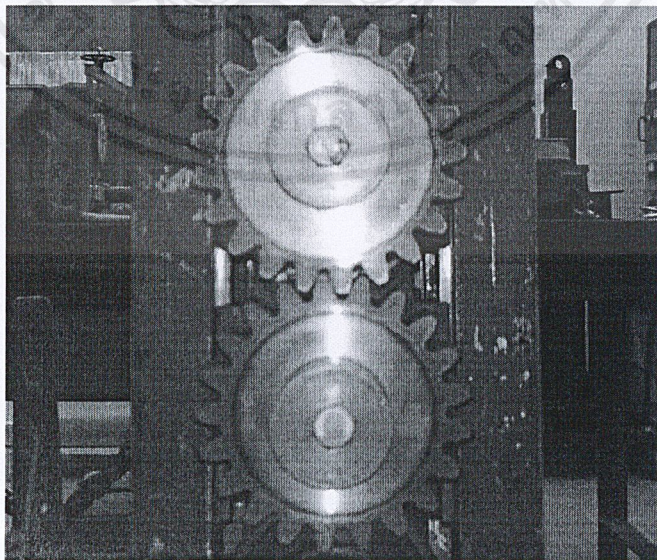
เรื่องชุดโซ่ส่งกำลังทำเพื่อไว้สำหรับเปลี่ยนทิศทางการหมุนของเพลาลูกรีดตัวบน ทำให้การหมุนของลูกรีด 2 ตัวนั้นหมุนเข้าหากัน และที่สำคัญคือทำให้เครื่องรีดโลหะของเราปรับระยะได้ โดยเราได้เพิ่มตัวเฟือง โซ่ไว้ที่เพลาลูกรีดตัวล่างและเพลาตัวบนสุดที่เราได้ทำขึ้นมาใหม่



รูปที่ 4-7 ชุดโซ่ส่งกำลัง

4.1.6 ชุดเฟือง

ในส่วนนี้เราทำการติดตั้งชุดเฟืองอยู่ที่เพลาลูกรีดตัวบนและเพลาตัวบนสุดที่เราได้ทำขึ้นมาใหม่ ไว้สำหรับเปลี่ยนทิศทางการหมุนของเพลาลูกรีดตัวบน

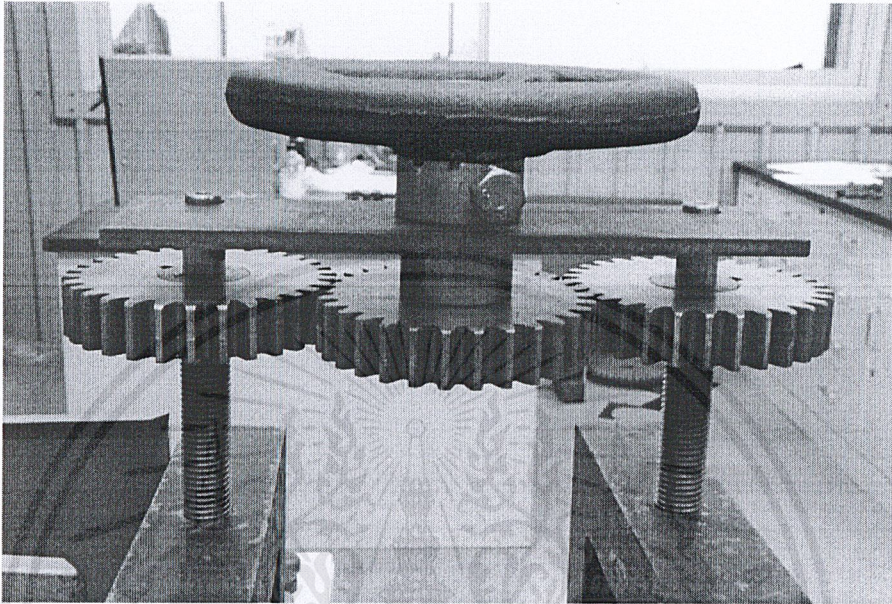


รูปที่ 4-8 ชุดเฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 ตัวปรับระยะลูกรีด

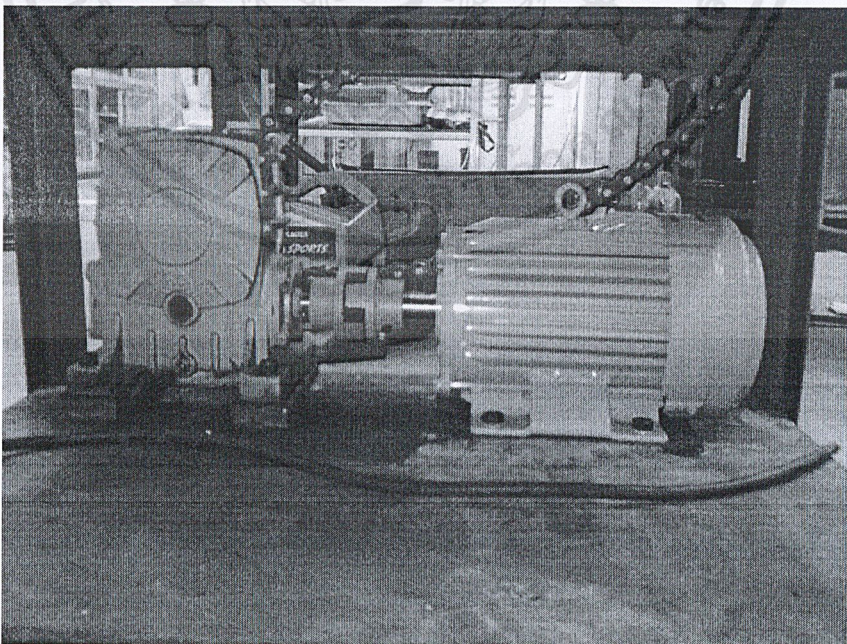
ตัวปรับระยะนั้น ทำไว้สำหรับการปรับระยะช่องว่างระหว่างลูกรีดตัวบนและตัวล่างเพื่อให้เครื่องรีดของเราเป็นเครื่องรีดที่สามารถรีดปรับระยะได้ โดยการนำเฟืองตัวเก่าของเครื่องซึ่งลดขนาดเหล็กเส้นเดิมมาทำการตัดแปลง และได้ใส่พวงมาลัยไว้หมุนปรับระยะ



รูปที่ 4-9 ตัวปรับระยะ

4.1.8 มอเตอร์และชุดต้นกำลัง

จากที่เราได้คำนวณไว้เราต้องทำการติดตั้งมอเตอร์ต้นกำลัง โดยเลือกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 3 แรงม้า ความเร็ว 1450 รอบต่อนาที และทำการติดคัปปลิ่ง

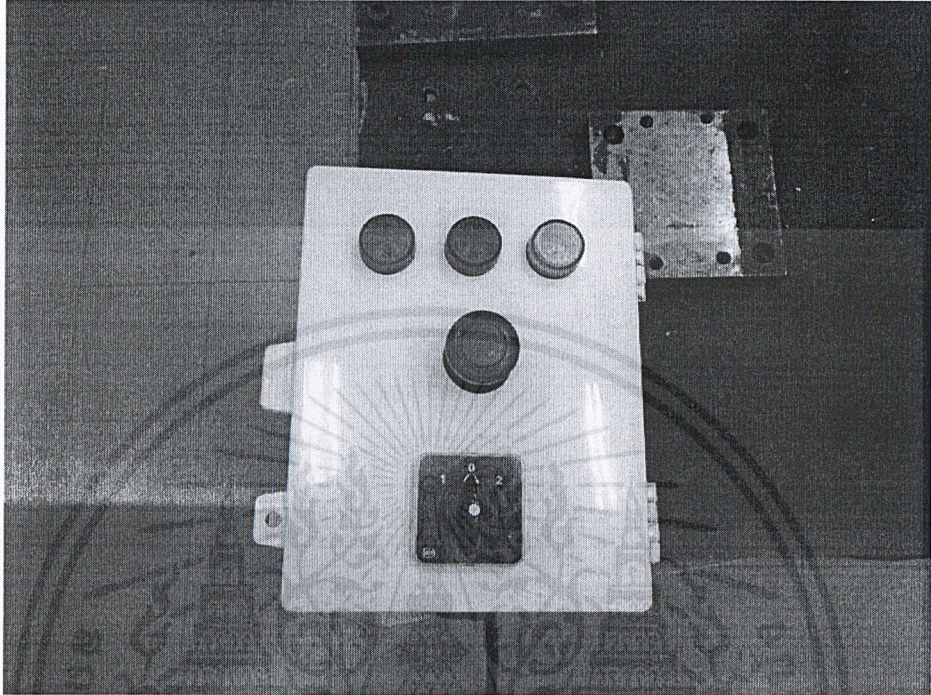


รูปที่ 4-10 มอเตอร์และชุดต้นกำลัง

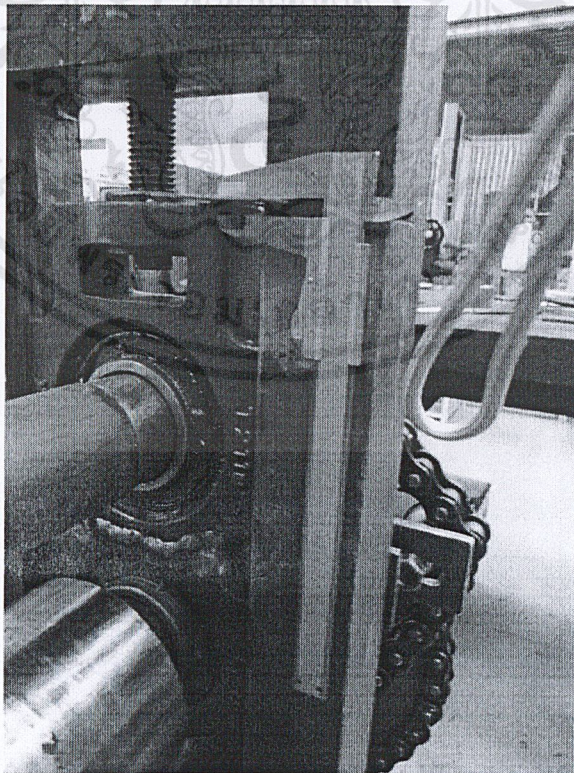
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.9 ชุดควบคุมมอเตอร์

หลังจากที่เราได้ติดตั้งและปรับปรุงคัดแปลงส่วนกลไกของเครื่องรีดโลหะเสร็จแล้ว เราต้องมีชุดควบคุมมอเตอร์ไว้สำหรับการควบคุมการใช้งานของเครื่องรีดโลหะ

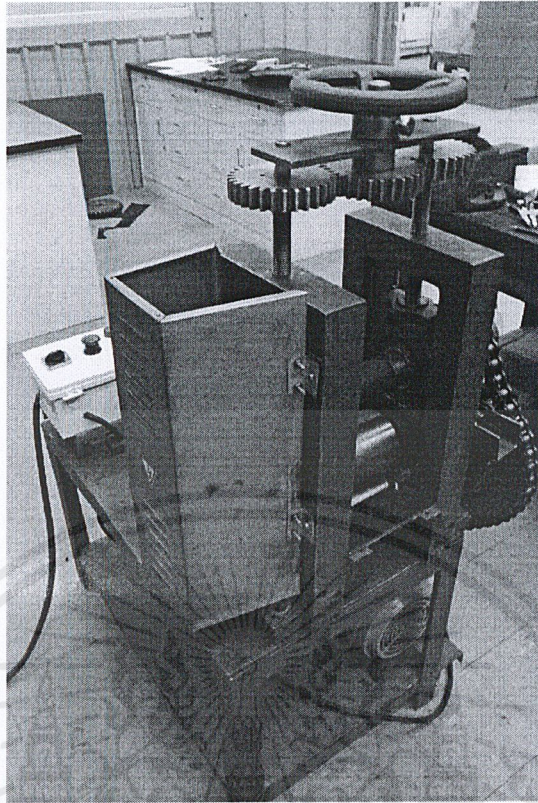


รูปที่ 4-11 ชุดควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 4-12 ตัววัดระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-13 เครื่องรีดโลหะที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว



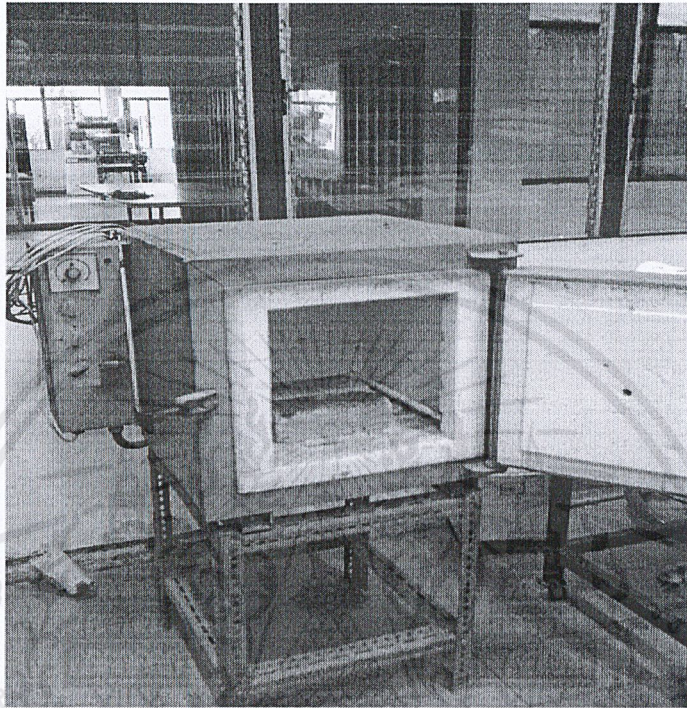
รูปที่ 4-14 ด้านหน้าเครื่องรีดโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 เตาอบโลหะ

4.2.1 เตรียมการเพื่อทำการซ่อมแซมเตาอบโลหะ

ในขั้นตอนแรกเราต้องทำการตรวจสอบเตาอบโลหะ ที่ตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการวัสดุวิศวกรรม ว่ามีอะไรเสียหายหรือใช้งานไม่ได้แล้วบ้าง และต้องเพิ่มเติมอะไรบ้าง เพื่อทำการซ่อมแซมต่อไป



รูปที่ 4-15 เตาโลหะก่อนทำการซ่อมแซม

หลังจากที่เราได้ทำการตรวจสอบเตาอบเดิมแล้วมีสิ่งที่จะต้องแก้ไขและเพิ่มเติมในการซ่อมแซมครั้งนี้ ดังต่อไปนี้

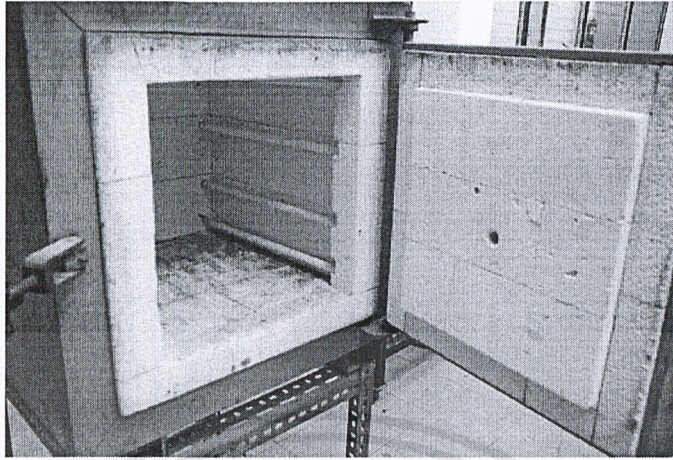
- 1) คอยล์ร้อนและแท่งเซรามิก
- 2) ถังก๊าซอาร์กอน
- 3) ชุดควบคุมอุณหภูมิ

4.2.2 คอยล์ร้อนและแท่งเซรามิก

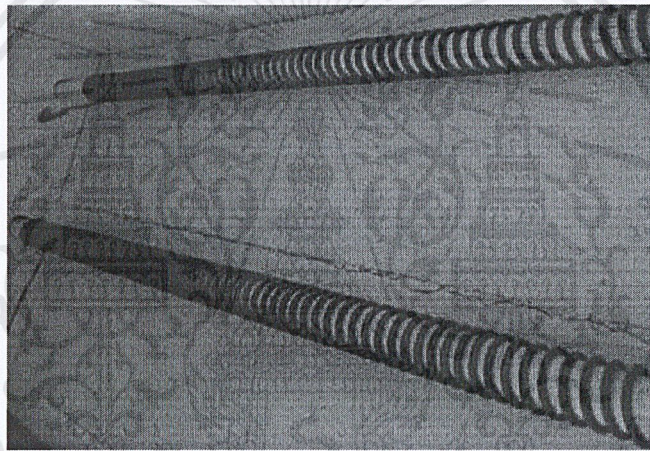
จากที่ได้ทำการสำรวจตรวจสอบเตาอบโลหะที่มีอยู่นั้น ภายในไม่มีคอยล์ร้อนอยู่เราจึงทำการซื้อมาใส่ โดยดูจากเครื่องเดิม ผู้สามารถทนความร้อน 1,200 องศาเซลเซียส

4.2.3 ถังก๊าซอาร์กอน

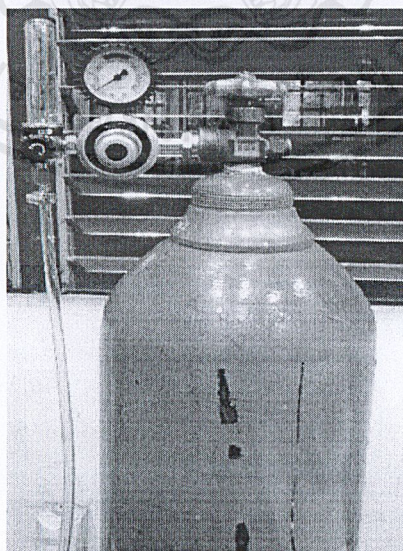
การเพิ่มถังก๊าซอาร์กอน ไว้ใช้สำหรับการป้องกันก๊าซเข้าไปตอนกำลังอบโลหะที่อุณหภูมิสูงเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน ของเหล็กกับอากาศ



รูปที่ 4-16 แท่งเซรามิก



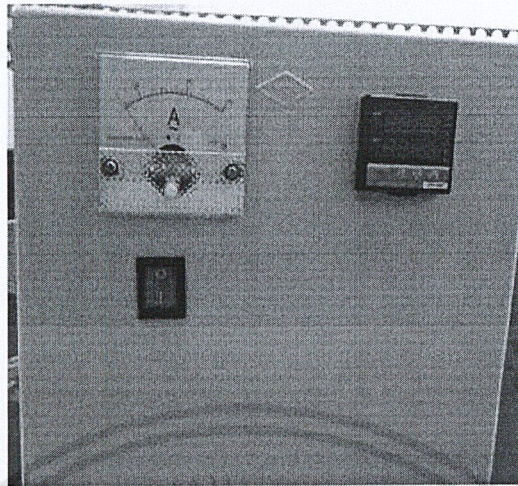
รูปที่ 4-17 ขดลวดความร้อน



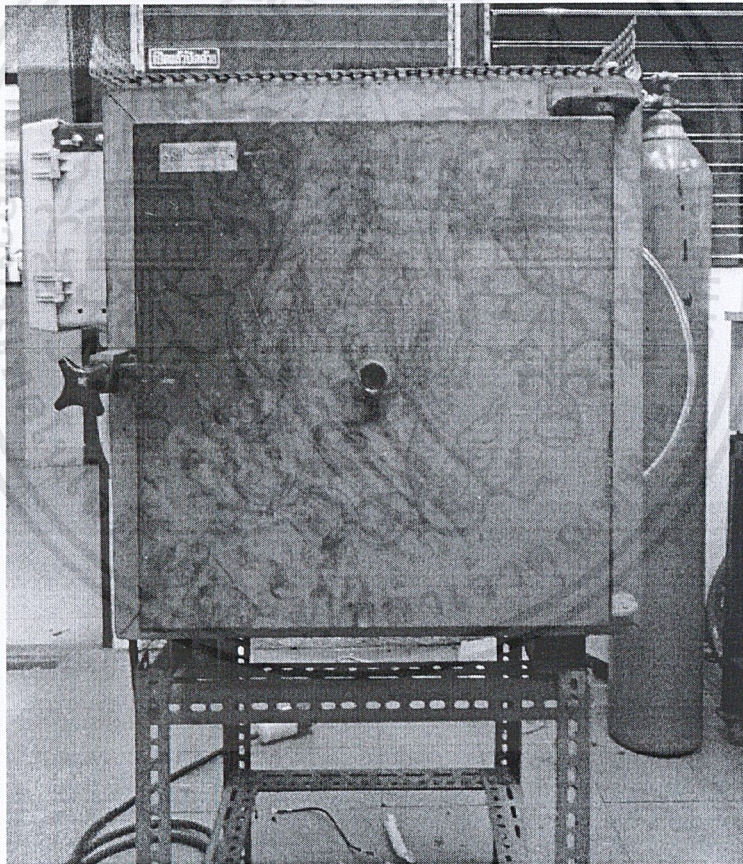
รูปที่ 4-18 ถังก๊าซอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ชุดควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4-19 ชุดควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4-20 เตาอบ โลหะที่ซ่อมแซมพร้อมใช้

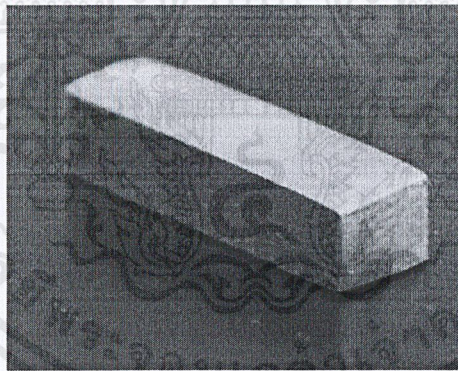
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบเครื่องรีดโลหะ และเตาอบโลหะ

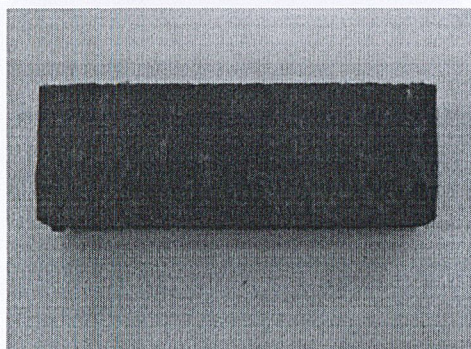
หลังจากที่เราได้สร้างเครื่องรีดโลหะ โดยการปรับและดัดแปลงจากเครื่องดัดขนาดเหล็กเส้นเดิม และได้ทำการซ่อมแซมเตาอบโลหะอุณหภูมิสูงเสร็จแล้ว ต่อมาถึงการทดสอบที่จะตรวจว่าเครื่องเราสร้างและซ่อมมานั้นสามารถใช้ได้จริง โดยทำการทดสอบหาอุณหภูมิการจัดเรียงผลึก (Recrystallization)

4.3.1 การทดสอบหาอุณหภูมิการจัดเรียงผลึก (Recrystallization)

- 1) เตรียมชิ้นงานโลหะผสมคาร์บอน AISI 1010 ให้มีขนาดความหนา 8 mm กว้าง 8 mm ยาว 40 mm
- 2) นำชิ้นทดสอบไปกระบวนการอบอ่อน (Normalizing) หลังจากนั้นรีดลดขนาดลง 30 % Reduction of thickness
- 3) นำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงผลึก (Recrystallization) ที่อุณหภูมิ 550 °C, 600 °C, 700 °C เป็นเวลา 15min, 1hr, 2hr
- 4) นำชิ้นทดสอบมาทำการขัดโดยวิธี Mechanical Polishing จนถึงความละเอียด 3 μm
- 5) ดำเนินการกัดกรดโดยวิธี Marshall
- 6) นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการกัดกรดมาแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อหาอุณหภูมิ Recrystallization

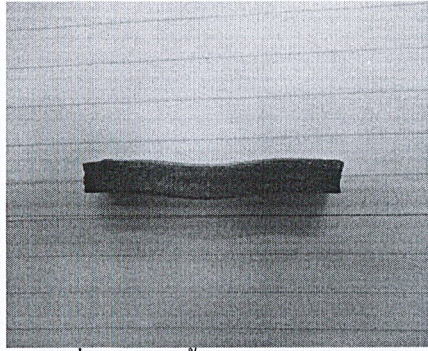


รูปที่ 4-21 รูปชิ้นงาน โลหะผสมคาร์บอน AISI 1010 สำหรับทดสอบ

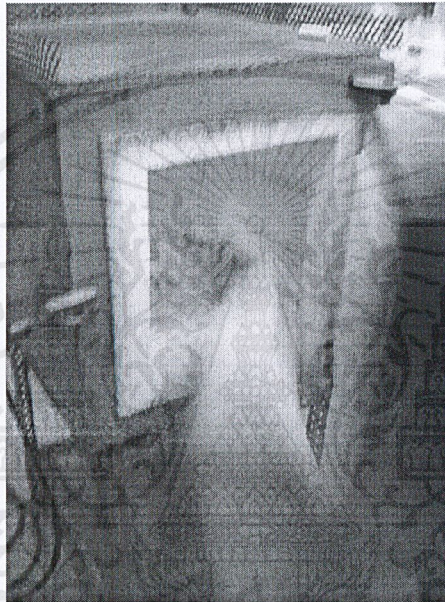


รูปที่ 4-22 รูปชิ้นงานผ่านการ Normalizing ที่อุณหภูมิ 900 °C

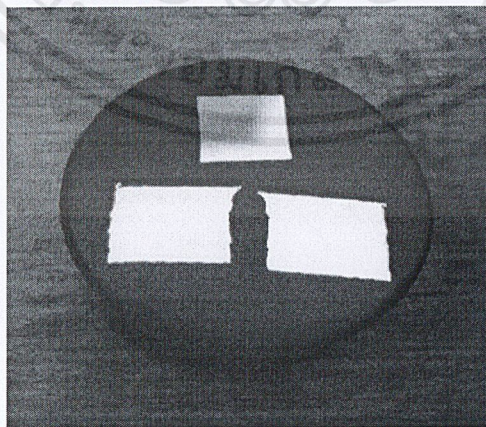
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-23 รูปชิ้นงานผ่านการลดขนาด

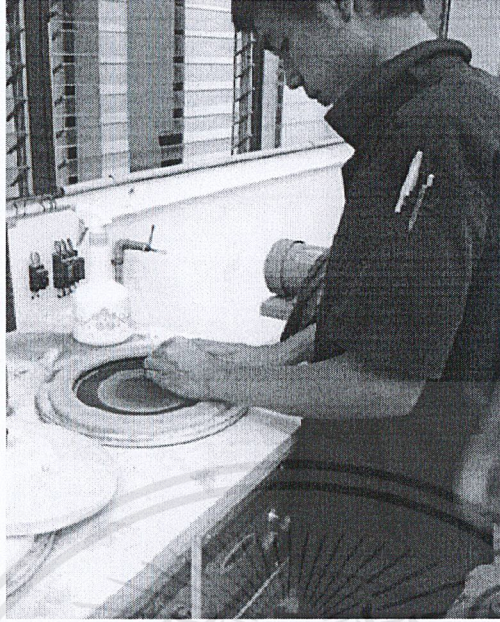


รูปที่ 4-24 นำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิต่างๆ

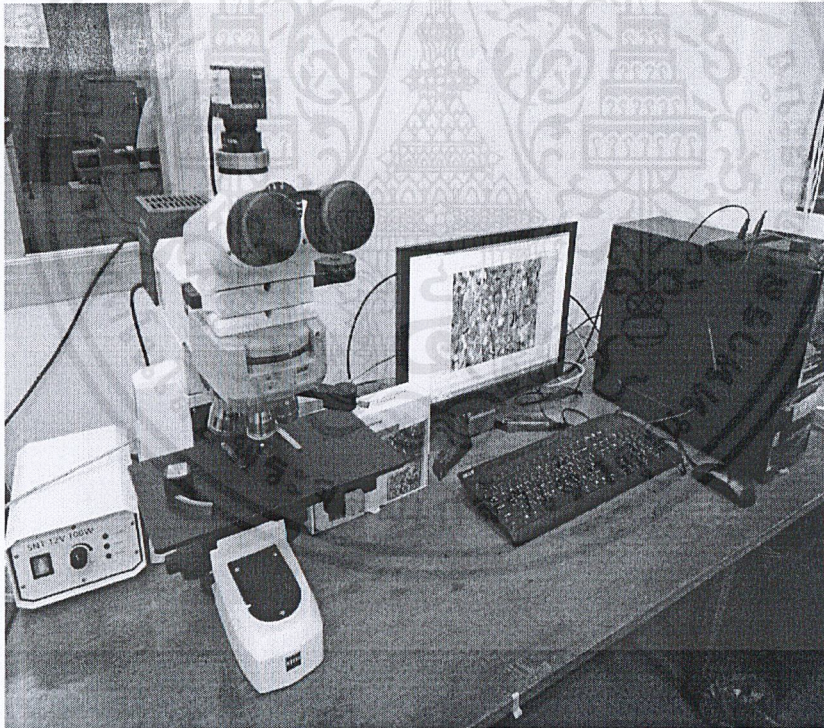


รูปที่ 4-25 การเตรียมชิ้นงานเพื่อสำหรับขัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



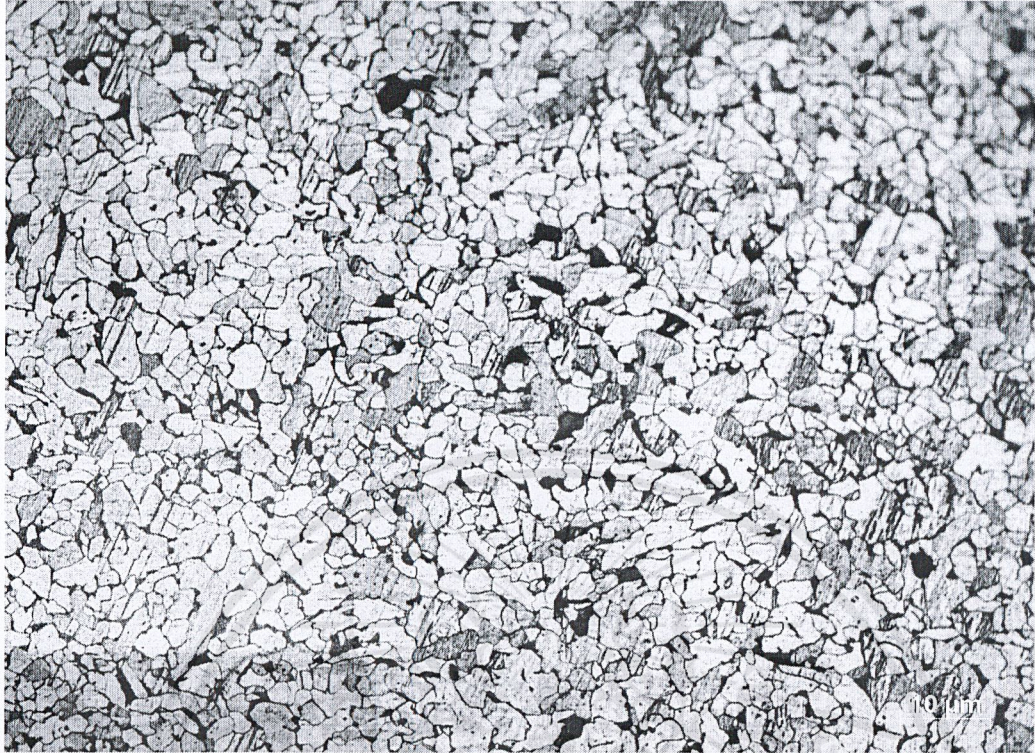
รูปที่ 4-26 ขณะทำการขีด



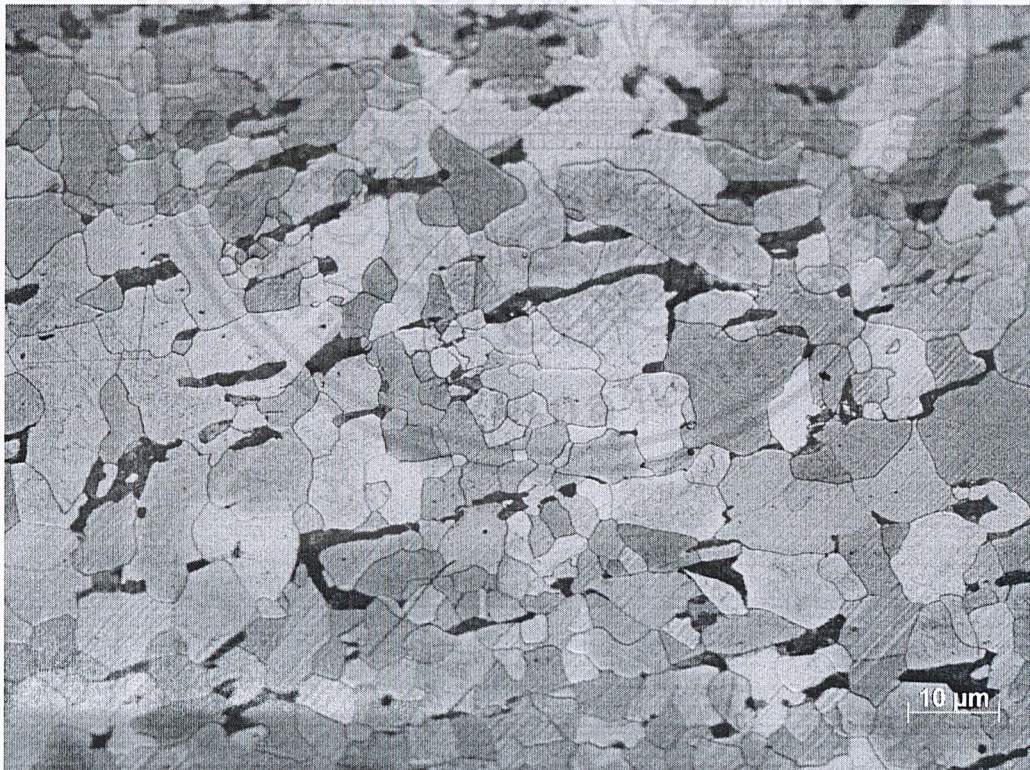
รูปที่ 4-27 ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดสอบจากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4-28 โครงสร้างชิ้นงานที่ได้รับมา

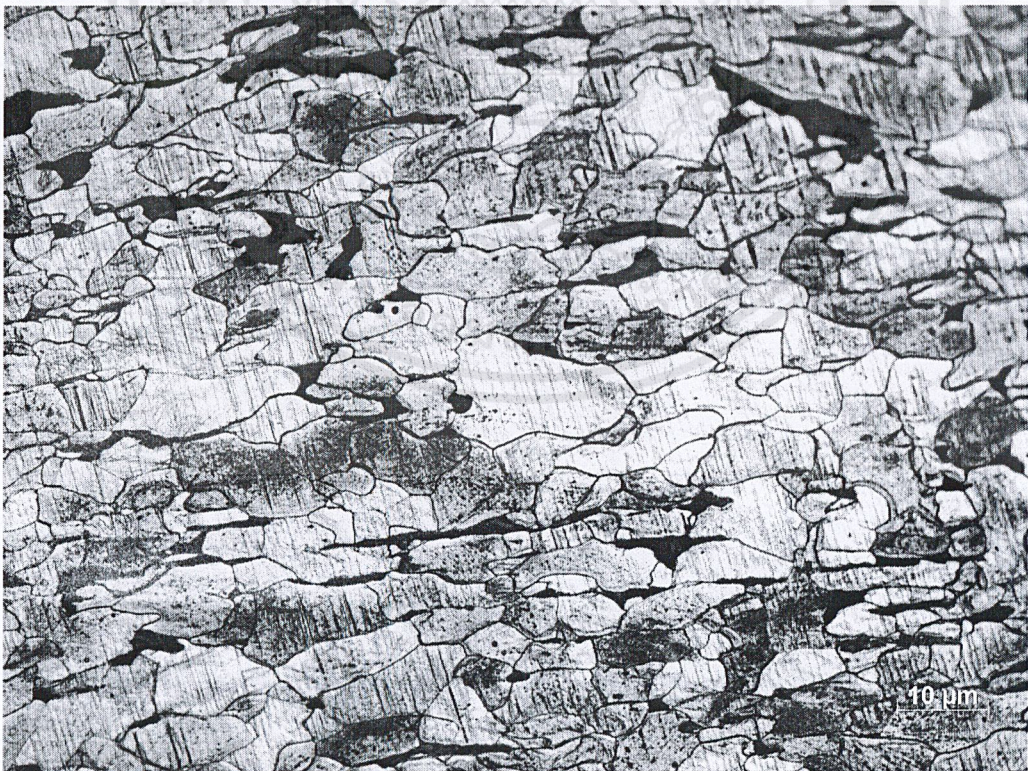


รูปที่ 4-29 โครงสร้างชิ้นงานที่ผ่านการ Normalizing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

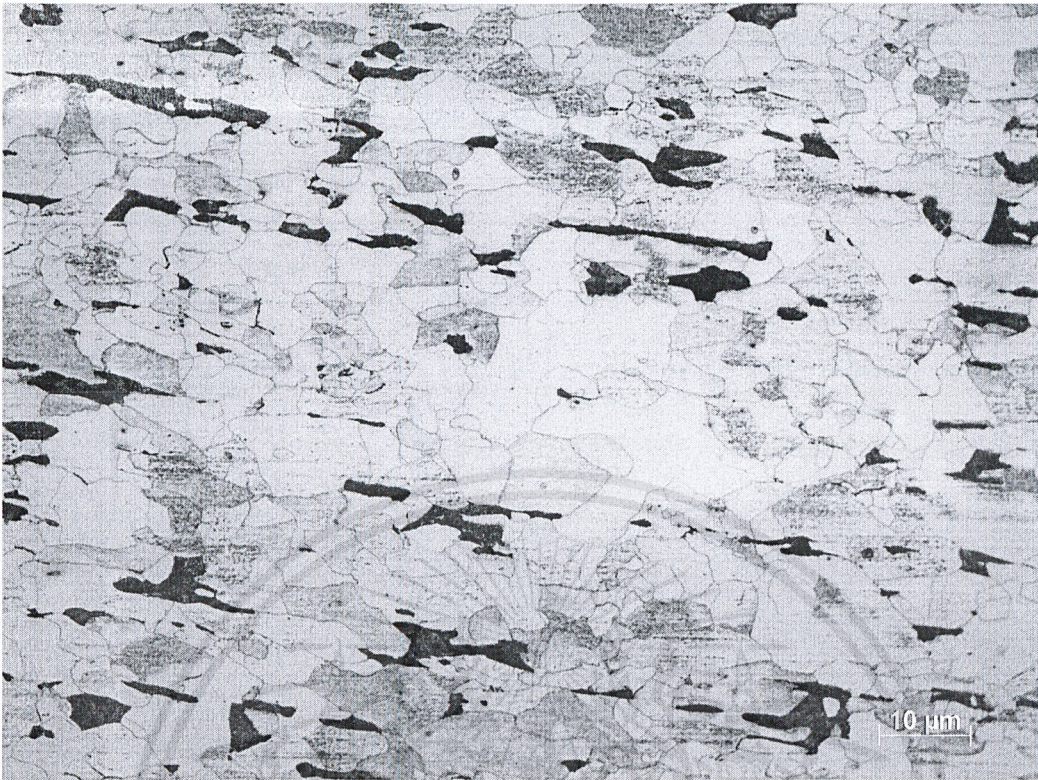


รูปที่ 4-30 โครงสร้างที่ผ่านการ Normalizing และการรีดลดขนาด



รูปที่ 4-31 โครงสร้างที่ผ่านการอบ 550 °C, 1 hr, Grain size No. 12.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-32 โครงสร้างที่ผ่านการอบ 600 °C, 1hr Grain size No. 12.09



รูปที่ 4-33 โครงสร้างที่ผ่านการอบ 700 °C, 1 hr Grain size No. 13.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 วิจารณ์และสรุปผลงานวิจัย

หลังจากได้ทำการศึกษาถึงทฤษฎีต่างๆที่จำเป็นสำหรับการสร้างเครื่องรีด (Roller machine) เพื่อใช้ในการศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรน ทางคณะผู้สร้างจึงได้ทำการสร้างเครื่องมือนี้ขึ้นมา ปรากฏว่าเครื่องนี้สามารถลดขนาดความหนาของเหล็กแผ่นได้ เมื่อวิเคราะห์ผลที่ออกมาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 เครื่องรีด โลหะสามารถรีดลดขนาดความหนาได้ครั้งละไม่เกิน 1 mm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบด้วย

5.1.2 เปอร์เซ็นต์ความหนาของชิ้นงานทดสอบสามารถทำได้ตามต้องการ แต่จำเป็นต้องรีดชิ้นงานด้วยจำนวนครั้งที่ยาก

5.1.3 สามารถนำเหล็กที่ผ่านการลดขนาดความหนาไปใช้ในการศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนต่อไปได้

5.1.4 เตาอบสามารถอบได้อุณหภูมิสูงสุด 1200 องศา

จากการทดสอบเครื่องรีด โลหะและเตาอบอุณหภูมิสูงในกระบวนการ Thermomechanical Process โดยการหาอุณหภูมิ recrystallization ของโลหะผสมคาร์บอน AISI 1010 พบว่าชุดอุปกรณ์สามารถใช้ในการศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนได้

5.2 แนวทางการพัฒนา

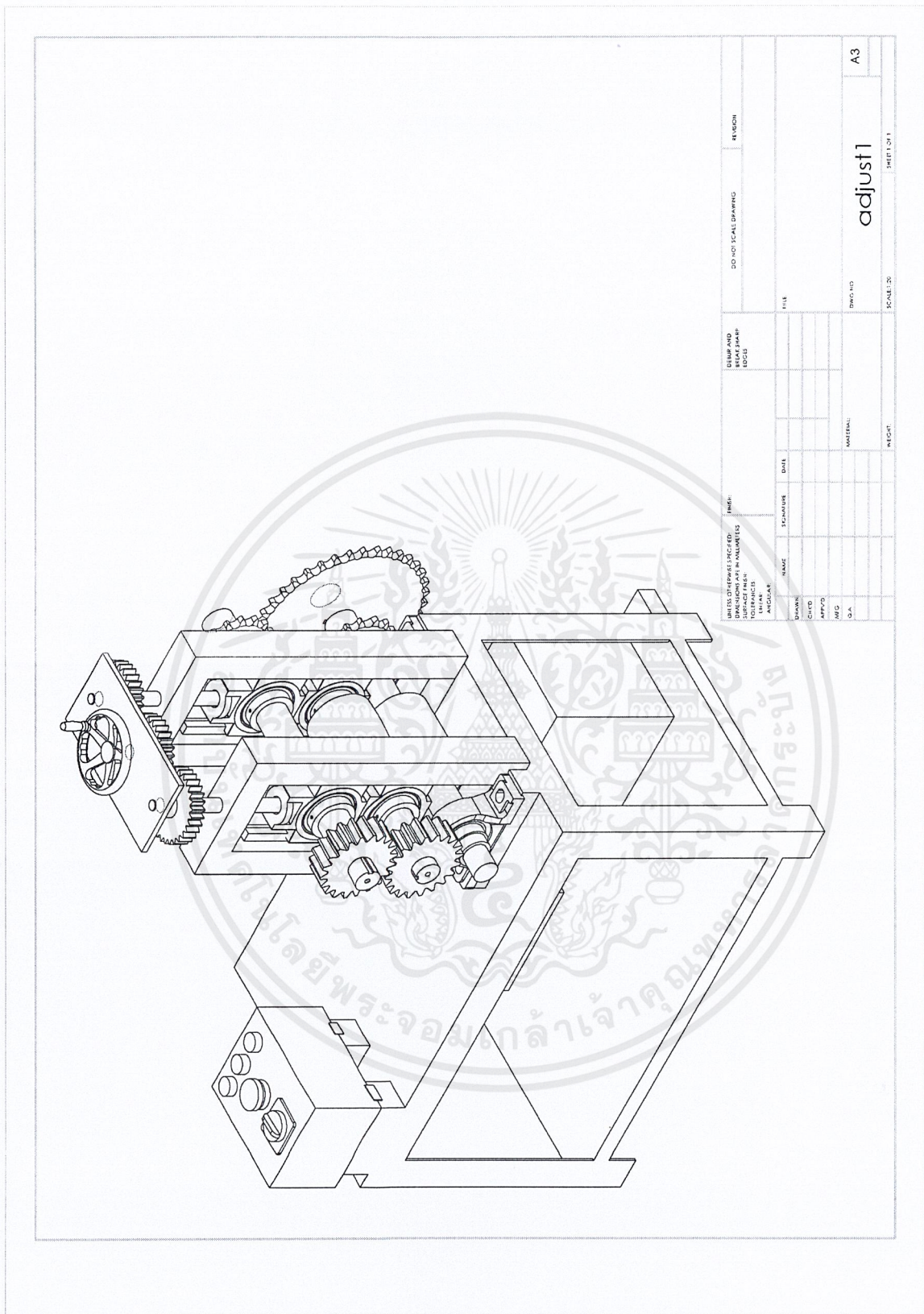
5.2.1 ต้องการให้แผ่นเหล็กที่ผ่านการรีดมีความตรงมากขึ้น โดยการจะใช้หัวจับเป็นตัวจับแล้วดึงแผ่นเหล็กออกมาหรือมีการเพิ่มชุด Roller เข้าไปในแนวตั้งฉากกัน ซึ่งจะช่วยให้เหล็กมีความตรงมากขึ้นกว่าเดิม

5.2.2 ใช้ชุดอุปกรณ์เครื่องรีด โลหะ เตาอบ เพื่อศึกษากระบวนการวิศวกรรมขอบเกรนสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุด้วยวิธีการปรับเปลี่ยน โครงสร้างของวัสดุ

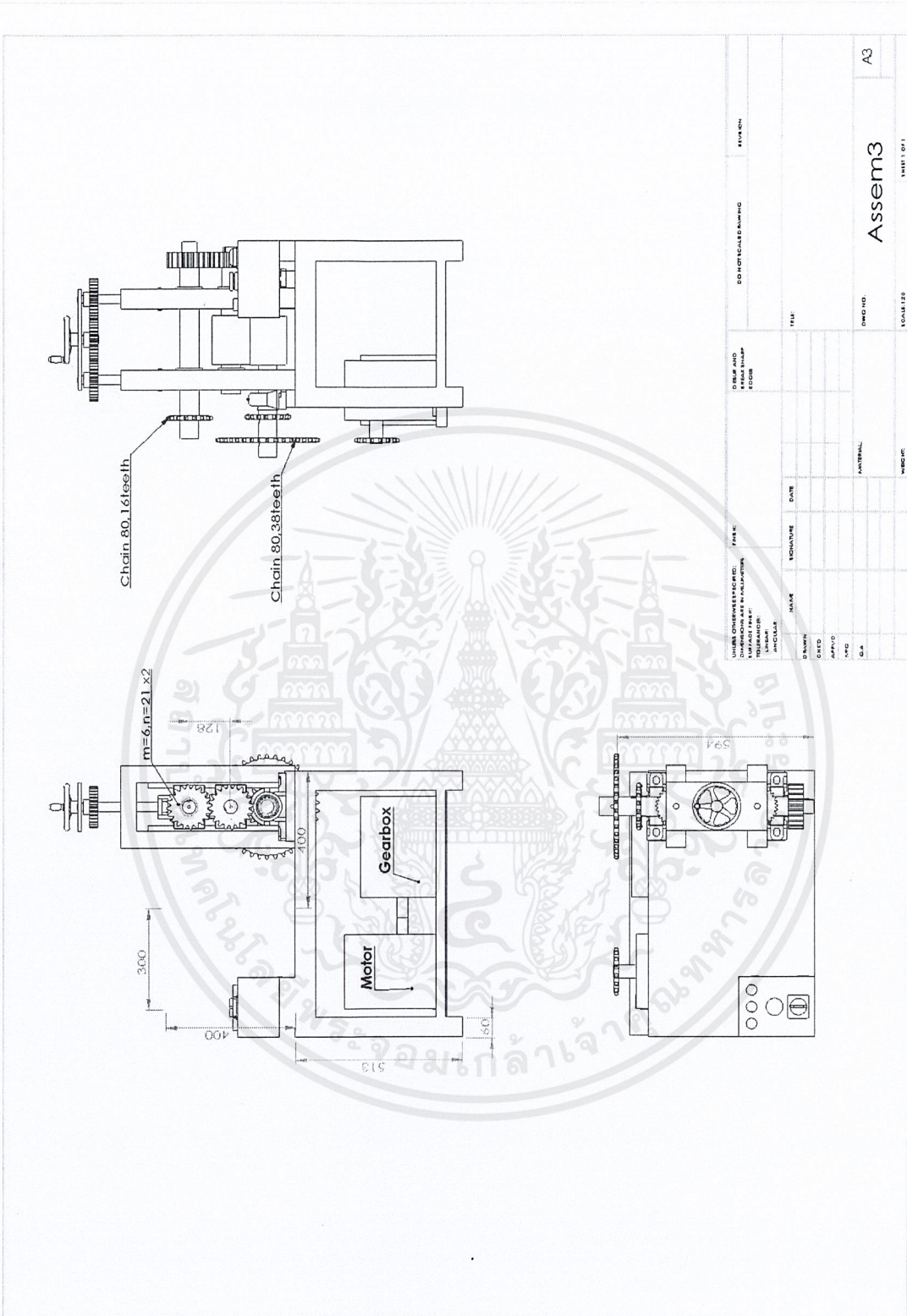
5.2.3 เพื่อใช้ชุดอุปกรณ์ศึกษากระบวนการทางความร้อน Thermomechanical Treatment ของ Low Carbon steel เพื่อเพิ่มสัดส่วนของขอบเกรน CSL ชนิด Low Σ (<29)



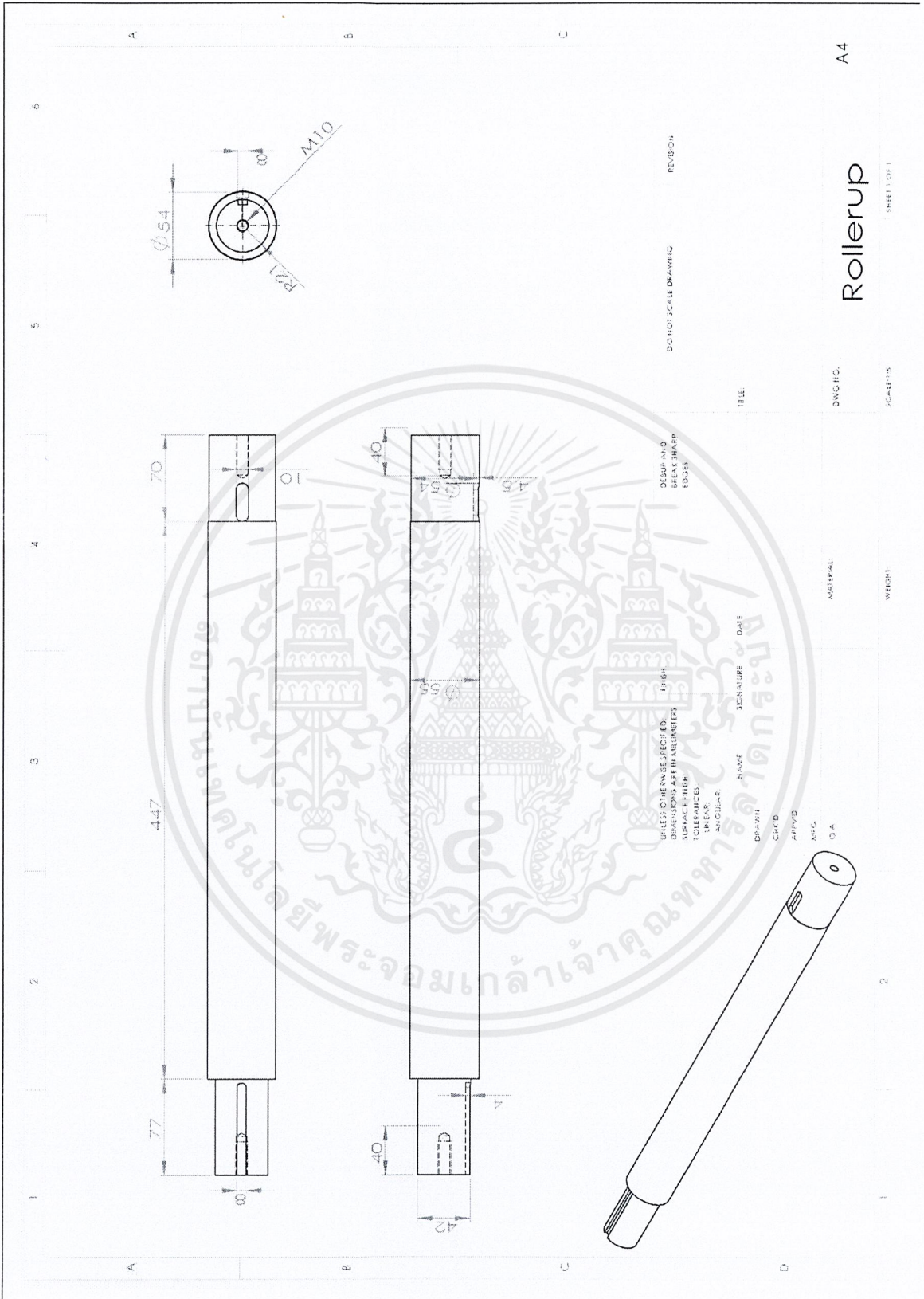
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



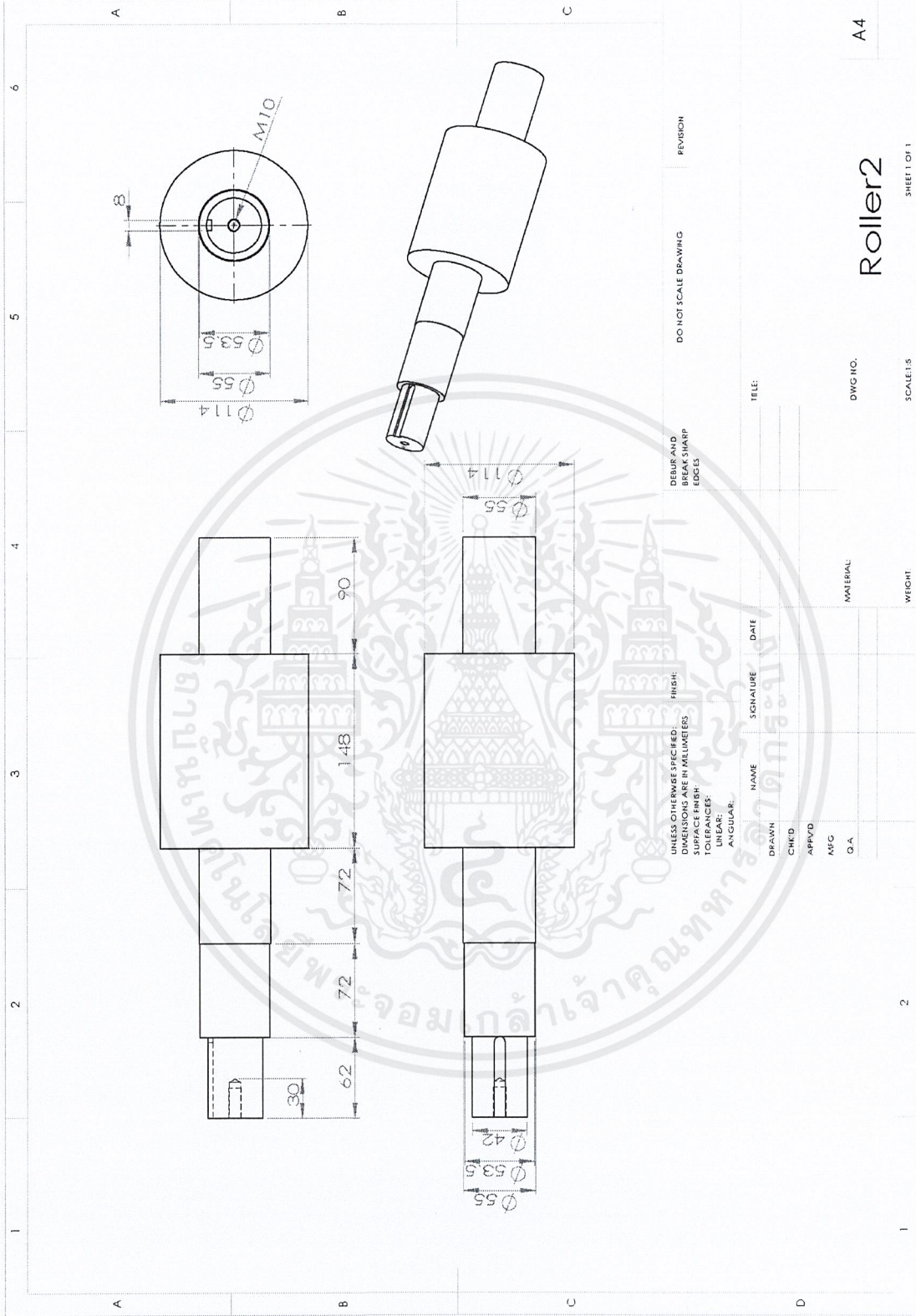
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: FINISH DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	
SURFACE FINISH: TO BE SPECIFIED: ANGULAR:		NAME	
SIGNATURE		DATE	
DRAWN		TELE:	
CHIEF			
APPROVD			
MFG			
Q.A.			

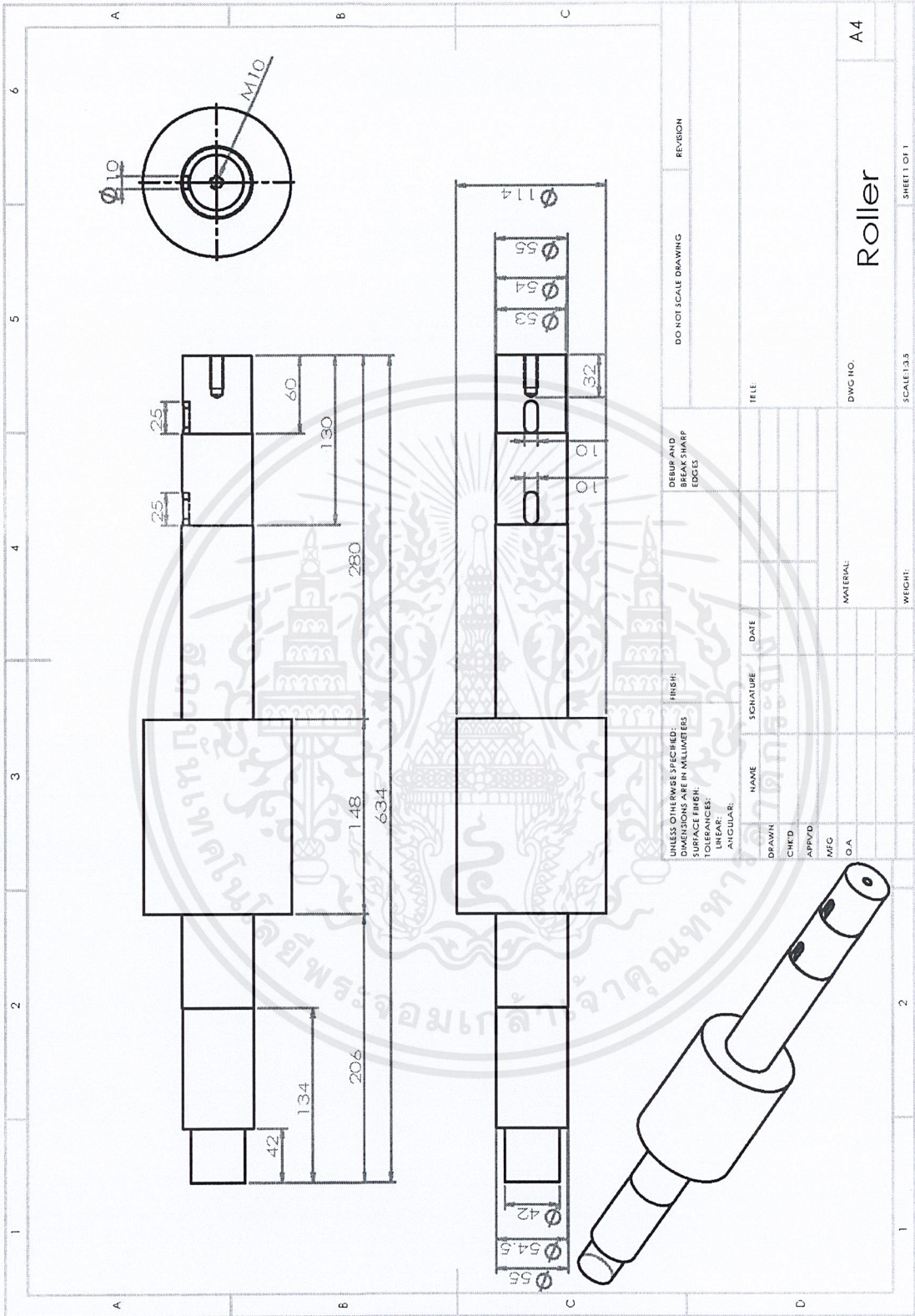
DWG NO. **Roller2** A4

SCALE: 1:5

WEIGHT:

MATERIAL:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

บรรณานุกรม

- [1] Callister D William . Materials Science and Engineering: An Introduction, 6th ed, 2007.
- [2] Piyaporn Sinsrok. Effects of Recrystallization and Grain Growth on the Formation of Annealing Twin in the 304 stainless steel. Master’s Degree of Science in Nuclear technology Department of nuclear Technology Faculty of Engineering Chulalongkron University, 1999.
- [3] George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition, McGraw-Hill inc, 1988.
- [4] วริทธิ์ อึ้งภากรณ์, ชาญ อดินางาน, การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 2, ซีเอ็ดยูเคชั่น, พ.ศ..2523
- [5] อภิรักษ์ เมฆประยูร, อาทิตย์ ป้อมสัมฤทธิ์, เอกรินทร์ ศิวเสน, เครื่องดัดขนาดเหล็กเส้นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่, วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
- [6] สุภชัย ประเสริฐสกุล, โลหะวิทยาภาพสำหรับวิศวกร เล่ม1, ไซน์ แอนด์ เอ็นจิเนียริง, พ.ศ. 2549