

เครื่องทดสอบแรงบิด



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 62003  
วัน,เดือน,ปี 25 ก.ค. 2549

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TORSION TESTING MACHINE



MR.JAMORN JARUSASI

MR.BOONSOM PARADTOUM

MR.SUMET WANCHALARN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

เครื่องทดสอบแรงบิด

TORSION TESTING MACHINE

นักศึกษา

นาย จามร จารุตะสี รหัสประจำตัวนักศึกษา 45015890

นาย บุญสม ปลัดท้วม รหัสประจำตัวนักศึกษา 45015902

ว่าที่ร.ต. สุเมธ หวังเจริญ รหัสประจำตัวนักศึกษา 45015920

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องทดสอบแรงบิด
นักศึกษา	นาย จามร จารุสะติ รหัสประจำตัวนักศึกษา 45015890 นาย นุญสม ปลัดท้วม รหัสประจำตัวนักศึกษา 45015902 ว่าที่ร.ต. สุเมธ หวังเจริญ รหัสประจำตัวนักศึกษา 45015920
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการเจริญเติบโตขึ้นทางเศรษฐกิจและสังคมทำให้มีการใช้วัสดุมากขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการด้านต่างๆ มากมายวัสดุที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายอีกอย่างหนึ่ง คือ โลหะแต่เนื่องจากความสามารถของวัสดุหรือโลหะแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน จึงเกิดคำถามตามมามากมายว่าเราควรเลือกใช้วัสดุหรือโลหะใดมาสนองความต้องการให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและตรงต่อความต้องการในการใช้ให้มากที่สุด ดังนั้นจึงมีการทดสอบความสามารถของวัสดุในวิธีต่างๆ หนึ่งในวิธีการหาความสามารถของวัสดุที่มีการใช้กันคือ การทดสอบแรงบิดดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น โครงการงานการสร้างเครื่องทดสอบแรงบิด มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างเครื่องทดสอบแรงบิดและหาความสามารถทางกลของวัสดุนั้นขั้นตอนในการออกแบบเริ่มจากการศึกษาหาข้อมูลเครื่องต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบลักษณะแล้วจึงออกแบบเครื่องต้นแบบเพื่อมาเริ่มการจัดทำการหาคุณสมบัติและราคาของอุปกรณ์ที่มีขายรวมถึงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบแรงบิด การคำนวณโครงสร้างการเลือกชนิดของวัสดุและทำการกำหนดขนาดในแบบให้ตรงตามหลักทางวิศวกรรม โดยเครื่องที่ได้จัดสร้างขึ้นนี้มีช่วงความสามารถในการทดสอบอยู่ที่ 0-600 นิวตัน

<b>Thesis Title</b>	Torsion Testing Machine
<b>Student</b>	Mr. Jamorn Jarusasi Mr. Boonsom Paradtoum Mr. Sumet Wanchalarn
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2004
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

At present, the usage of materials has been increasing due to the economic growth. One of the popular materials is metal. However, each metal possesses different properties. Thus, the metal should be tested for the interested properties. There are several ways to test properties of metal. One of the methods is the torsion test. The purpose of this thesis is to develop a torsion testing machine. The structure of the machine is designed and fabricated from commercially available materials. The machine has the torsion capacity of 0-600 inch-pounds. Finally, the developed machine is tested with several testing samples, and the results are compared to those tested by a commercial torsion testing machine. Both testing results are in a good agreement.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง เครื่องทดสอบแรงบิด สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ดร. วรรณชัย กัลยาศิริ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความเอาใจใส่ในทุกๆด้านตลอดเวลาที่ผ่านมาและยังขอขอบพระคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำในส่วนที่บกพร่อง และอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา ที่ช่วยเหลือเพื่อข้อมูลที่สำคัญในการทำเครื่องทดสอบแรงบิดจนสามารถบรรลุจุดประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆและผู้เกี่ยวข้องในส่วนเวิร์คช็อปทุกท่านที่ช่วยเหลือจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และคอยเป็นกำลังใจให้คณะผู้จัดทำตลอดมา



นายจามร	จารุตะศิ
นายบุญสม	ปลัดท้วม
ว่าที่ร.ต.สุเมธ	หวังเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฌ
คำอธิบายคำย่อ.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์.....	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การบิดของเพลากลม.....	3
2.2 การชุปแข็งโลหะ.....	6
2.2.1 กรรมวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน.....	6
2.2.2 แผนภาพการเปลี่ยนภาคสัมพันธ์เวลากับอุณหภูมิ.....	18
2.2.3 กรรมวิธีในการชุบแข็ง.....	23
2.2.4 การอบคืนตัว.....	26
2.3 มาตรฐานชิ้นทดสอบ.....	28
<b>บทที่ 3 แผนการดำเนินงาน</b>	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	32
3.2 แผนการดำเนินงานปีการศึกษา 2547.....	33
3.3 การคำนวณหาขนาดชิ้นส่วน.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การคำนวณช่วงเพื่อเลือกใช้เครื่องมือ.....	34
3.4 การออกแบบและการเขียนแบบชิ้นส่วน.....	36
3.5 วิธีการทดสอบการบิดของชิ้นงานทดสอบ.....	39
3.5.1 ขั้นตอนการทดสอบ.....	39
3.5.2 รูปแบบตารางบันทึกผลการทดลอง.....	40
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 ผลการดำเนินงานของเครื่องทดสอบแรงบิด.....	41
4.2 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบแรงบิด.....	41
4.3 การทดลองการทำงานของเครื่องทดสอบแรงบิด.....	45
4.4 ผลการทดลอง.....	47
<b>บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน</b>	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
หนังสืออ้างอิง.....	53
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก. ....	ผก 1
แบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบแรงบิด.....	ผก 2
แบบชิ้นงานทดสอบ.....	ผก 3
ภาคผนวก ข. ....	ผข 1
เอกสารตัวอย่างเครื่องทดสอบแรงบิดแบบ SM21.....	ผข 2
เอกสารตัวอย่างอุปกรณ์วัดแรงบิด.....	ผข 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงรายละเอียดของเหล็กกล้าตามข้อกำหนด BS970 : ตอนที่ 1.....	26
ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และความหมาย.....	28
ตารางที่ 2.3 ความยาวอิสระระหว่างหัวจับ.....	29
ตารางที่ 2.4 อัตราการบิดในการทดสอบ.....	30
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้าตามมาตรฐานเยอรมัน.....	34
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าจากการคำนวณแรงบิด.....	35
ตารางที่ 3.3 แสดงช่วงของประแจที่มีขายในท้องตลาดชิ้นหนึ่ง.....	35
ตารางที่ 3.4 ไบรอกผลการทดลอง.....	40
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าต่างๆของชิ้นทดสอบ.....	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การวิเคราะห์เกี่ยวกับการบิดของเพลลา.....	3
รูปที่ 2.2 ภาพตัดชิ้นเล็กของเพลลา (ข้าง).....	4
รูปที่ 2.3 ภาพตัดชิ้นเล็กของเพลลา (หน้า).....	4
รูปที่ 2.4 แผนภาพสมมูลทางความร้อนของเหล็ก – คาร์บอน.....	6
รูปที่ 2.5 ส่วนบนของแผนภาพสมมูลทางความร้อนของเหล็ก – คาร์บอน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงแบบเพอริเทคติก.....	7
รูปที่ 2.6 ส่วนของเหล็กกล้าในแผนภาพสมมูลของเหล็ก-คาร์บอน.....	9
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างจุลภาค 1.....	11
รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างจุลภาค 2.....	12
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างจุลภาค 3.....	13
รูปที่ 2.10 พื้นที่ของเฟอร์ไรต์จากแผนภาพสมมูลของเหล็ก – คาร์บอน.....	14
รูปที่ 2.11 ระยะห่างระหว่างเส้นลิวทิต (L) และเส้นโซลิตัส (S).....	15
รูปที่ 2.12 แสดงสารที่อยู่ในขอบเกรน.....	16
รูปที่ 2.13 ส่วนของแผนภาพสมมูลของเหล็ก – ไนโตรเจน.....	17
รูปที่ 2.14 Time – Temperature – Transformation (T.T.T) Curves.....	19
รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการเปลี่ยน โครงสร้างระยะต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.16 แสดงการทดลองเพื่อสร้าง T.T.T Curve.....	21
รูปที่ 2.17 แผนภาพสมมูลยภาคของเหล็กกับคาร์บอน.....	22
รูปที่ 2.18 ผลของมวลที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจากการชุบ.....	23
รูปที่ 2.19 แสดงวิธีการทดสอบแบบ End – quench Test.....	24
รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของความแข็งกับระยะจากปลาย.....	25
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างการอบคืนตัว.....	27
รูปที่ 2.22 สัญลักษณ์ของชั้นทดสอบ.....	29
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทำงาน.....	32
รูปที่ 3.2 การเขียนภาพโดยโปรแกรม MDT 2004.....	36
รูปที่ 3.3 แสดงภาพไอโซเมตริกของเครื่องทดสอบแรงบิด.....	37
รูปที่ 3.4 แสดงมุมมองหลายมุมที่เกิดจากโปรแกรม MDT 2004.....	37
รูปที่ 3.5 แสดงแบบแยกชิ้นที่เกิดจากโปรแกรม.....	38
รูปที่ 3.6 แสดงรูปมือหมุนที่ออกแบบจากโปรแกรม.....	38
รูปที่ 4.1 รูปของเครื่องทดสอบแรงบิด.....	41
รูปที่ 4.2 รูปเฟืองทด.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 รูปหัวจับชั้นทดสอบ.....	42
รูปที่ 4.4 รูปแผ่นบอกร่องเสาแผ่นใหญ่.....	43
รูปที่ 4.5 รูปแผ่นบอกร่องเสาแผ่นเล็ก.....	43
รูปที่ 4.6 รูปตัวน้บรอบ.....	44
รูปที่ 4.7 รูปชุดเคลื่อนที่.....	44
รูปที่ 4.8 รูปรางเลื่อน.....	45
รูปที่ 4.9 รูปชั้นทดสอบ.....	45
รูปที่ 4.10 แสดงการจับชั้นทดสอบ.....	45
รูปที่ 4.11 รูปแสดงการล๊อคชุดเคลื่อนที่.....	46
รูปที่ 4.12 รูปแสดงปรับเข็มที่แผ่นบอกร่องเสาทั้งสองแผ่นให้ตรงที่ศูนย์.....	46
รูปที่ 4.13 รูปแสดงการปรับตัวน้บรอบให้ตรงที่ศูนย์.....	46
รูปที่ 4.14 รูปแสดงการปรับค่าที่ประแจให้ตรงศูนย์.....	47
รูปที่ 4.15 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่1.....	47
รูปที่ 4.16 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่2.....	48
รูปที่ 4.17 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่3.....	48
รูปที่ 4.18 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่4.....	48
รูปที่ 4.19 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่5.....	49
รูปที่ 4.20 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่6.....	49
รูปที่ 4.21 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่7.....	49
รูปที่ 4.22 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่8.....	50
รูปที่ 4.23 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่9.....	50
รูปที่ 4.24 แสดงค่าของชั้นทดสอบชั้นที่10.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$T$	=	แรงบิดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ(นิวตัน-เมตร)
$n$	=	จำนวนรอบในการหมุน(รอบ)
$L$	=	ความยาว(เมตร)
$\gamma$	=	ความเครียดเฉือน(เรเดียน)
$\theta$	=	มุมของการบิดที่เกิดขึ้น(เรเดียน)
$\phi$	=	มุมบิดทั้งหมด(เรเดียน)
$\tau$	=	ความเค้นเฉือน(นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$J$	=	รัศมีไจเรชั่น(มิลลิเมตร <sup>4</sup> )
$G$	=	ค่าโมดูลัสแข็งเกร็ง(นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$r$	=	รัศมี(มิลลิเมตร)
$d$	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง(มิลลิเมตร)
$f$	=	ความถี่(เฮิรตซ์)
$P$	=	กำลังส่งของเพลลา(วัตต์)
$U$	=	ค่าการดูดซับพลังงานต่อหน่วยปริมาตร(นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
$\omega$	=	ความเร็วเชิงมุม(เรเดียนต่อหน่วยเวลา)
$A_1$	=	อุณหภูมิวิกฤตต่าง(องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายคำย่อ

BCC	=	Body Centered Cubic
FCC	=	Face Centered Cubic
T.T.T Diagram	=	Time Temperature Transformation Diagrams
T.T.T curve	=	Time Temperature Transformation Curve
MDT 2004	=	Mechanical Desktop 2004



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของโครงการ

ในทางวิศวกรรมนั้นมีการทดสอบวัสดุซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ การทดสอบแบบทำลายและทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งในกรณีนี้จะขอกกล่าวถึงการทดสอบแบบทำลายเป็นหลักเพื่อให้สอดคล้องกับโครงการที่ได้จัดทำขึ้น เครื่องทดสอบแรงบิดเป็นอุปกรณ์ทดสอบความสามารถของวัสดุที่นิยมใช้ในการทดสอบความสามารถทางกลอีกอย่างหนึ่งแต่ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการนั้นยังไม่มีเครื่องทดสอบในลักษณะนี้ โดยหลักการการทำงานของเครื่องมีหลักการคือ เมื่อชิ้นงานถูกยึดจับจนแน่นที่ปลายทั้งสองด้านแล้วปลายด้านหนึ่งจะถูกทำให้หมุนตัวของวัสดุจะเกิดแรงต้านในตัวของวัสดุจนมุมที่หมุนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อทำต่อเนื่องไปจนเกินความสามารถที่วัสดุสามารถที่จะทนได้แล้วนั้นจะเกิดการขาดที่ชิ้นงานทดสอบ ซึ่งจากการทดสอบนี้ทำให้เราสามารถทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุได้ โดยเครื่องที่ได้จัดทำมีความสามารถในการบิดอยู่ที่ 0-600 นิว-ปอนด์มีองศาในการหมุนอยู่ที่ 6 องศาต่อรอบ

ในด้านชิ้นงานทดสอบจะเป็นแท่ง 6 เหลี่ยมยาวประมาณ 180-200 มม. โดยตรงกลางของแท่งทดสอบจะถูกทำให้เป็นแท่งกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ช่วงต่อระหว่างที่ถูกทำให้กลมนั้นจะมีความสามารถในการทนต่อแรงบิดไม่เท่ากันซึ่งรายละเอียดจะขอกกล่าวภายในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้โดยละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

ส่วนที่มีผลโดยตรงกับการบิดมีการใช้เทคนิคทางด้านโลหะวิทยาเข้ามาช่วยในการทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนอุณหภูมิถึงจุดที่โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแล้วให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจนโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์จึงนำชิ้นงานไปใช้งาน

ทฤษฎีที่นำมาเกี่ยวข้องในการศึกษาโครงการนี้คือ การบิดของเพลากลมซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อสร้างเครื่องทดสอบแรงบิด
2. เพื่อศึกษาถึงหลักการและรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องทดสอบแรงบิด
3. สามารถใช้เครื่องทดสอบแรงบิดในการทดลองทางวิศวกรรมรวมทั้งหาความสามารถของวัสดุ

### 1.3 ขอบเขตปฏิญานิพนธ์

1. ออกแบบและเลือกใช้วัสดุในการสร้างเครื่องทดสอบแรงบิด
2. เครื่องนี้ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อทดลองและประมวลผลเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถใช้โปรแกรมในการควบคุมเครื่องได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงบิด
2. ได้ทราบว่าโลหะแต่ละชนิดนั้นสามารถทนต่อแรงบิดได้เท่าใด
3. นำผลที่ได้ไปเลือกวัสดุได้ตรงตามความต้องการ
4. สามารถใช้โปรแกรมช่วยต่างๆเพื่อออกแบบเครื่องทดสอบแรงบิด
5. สามารถใช้เครื่องจักร เช่น เครื่องกัด เครื่องเจาะ เครื่องกลึงและอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการปฏิบัติงานให้ได้ลักษณะและคุณสมบัติตามต้องการได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

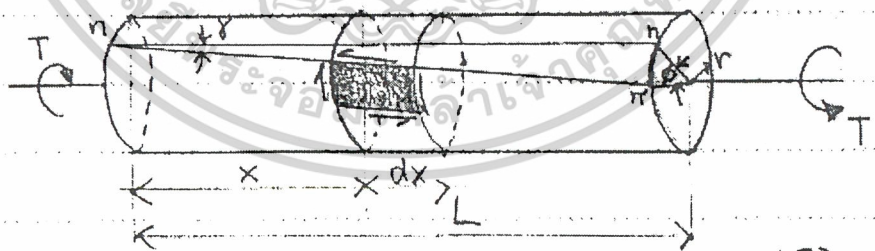
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การบิดของเพลากลม

โมเมนต์ของแรงที่กระทำกับเพล่า ซึ่งจะพยายามบิดเพล่าหรือทำให้เพล่าหมุน เรียกว่า แรงบิด (Twisting Moment, Turning Moment หรือ Torque) เมื่อเพล่าหมุนขณะที่ส่งกำลังก็จะบิดไปด้วย ลักษณะเพล่าอันหนึ่งคล้ายกับว่าประกอบด้วยแผ่นโลหะกลมบางๆหลายๆแผ่นติดกัน ดังนั้นขณะที่บิด แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะบิดไปเล็กน้อยเทียบกับอันถัดไปทำให้เพล่ามีความเครียดเฉือน (Shear Strain) ซึ่งจะทำให้มีความเค้นเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้น

พิจารณาเพล่ากลมตัน ซึ่งถูกบิดด้วยโมเมนต์บิด  $T$  ที่ปลายทั้งสอง ดังรูปที่ 2.1 (อรรถพล หิรัญรัตน์, 2544) ในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการบิดของเพล่ากลมตัน มีสมมุติฐานดังนี้

- 1) เพล่ารับ โมเมนต์บิดอย่างเดียว ในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนของเพล่าและภาคตัดที่พิจารณาอยู่ห่างจากบริเวณ ภาคตัดขวางที่รับ โมเมนต์บิด
- 2) ภาคตัดกลมยังคงสภาพเป็นภาคตัดกลมอยู่ในระหว่างการบิด
- 3) ระนาบ (Plane) ของภาคตัด ยังคงเป็นระนาบไม่บิดโค้ง (Warp) ในขณะที่ได้รับโมเมนต์บิด
- 4) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เปลี่ยน ถ้าหากมุมของการบิดน้อยๆ
- 5) ความเค้นที่เกิดขึ้น ไม่เกินขีดจำกัดของวัสดุ

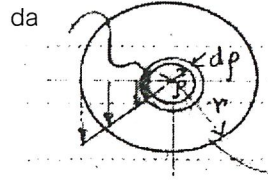
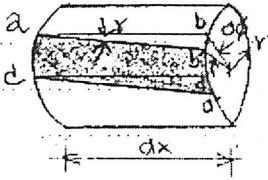


รูปที่ 2.1 การวิเคราะห์เกี่ยวกับการบิดของเพล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชิ้นส่วนเล็กๆยาว  $dx$  จากรูป

$$\text{Shear strain, } \gamma = \frac{bb'}{ab} = \frac{rd\phi}{dx}$$



รูปที่ 2.2 ภาพตัดชิ้นเล็กของเพลลา (ข้าง)

รูปที่ 2.3 ภาพตัดชิ้นเล็กของเพลลา (หน้า)

เมื่อเพลลาได้รับการบิดที่ปลายอย่างเดียวกันเท่านั้น อัตราการเปลี่ยนมุมของการบิด (Angle of Twist),  $\frac{d\phi}{dx}$  จะมีค่าคงที่ตลอดความยาวของเพลลา ค่าคงที่นี้ก็คือ มุมของการบิดต่อหนึ่งหน่วยความยาว แทนด้วย  $\theta$  ดังนั้นจะได้  $\theta = \frac{d\phi}{dx}$  หรือ  $\theta = \frac{\phi}{L}$  ซึ่ง  $L$  คือ ความยาวของเพลลา

$$\begin{aligned} \gamma &= r \frac{d\phi}{dx} = r\theta \quad ; \left( \frac{d\phi}{dx} = \theta \right) \\ \therefore \gamma &= r\theta = r \frac{\phi}{L} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Shear Stress เนื่องจาก Torsion

$$\tau = G\gamma = Gr\theta \quad (2.2)$$

ซึ่งสมการ 2.1 และ สมการ 2.2 เป็นสถานะของความเครียด และความเค้นที่ผิวของเพลลา สำหรับที่ระยะรัศมีใด ๆ ของเพลลาจะได้ ( $\rho$  = รัศมีใด ๆ มีค่าสูงสุด เท่ากับ  $r$  ที่ผิวของเพลลา)

$$\begin{aligned} \gamma &= \rho\theta \\ \tau &= G\rho\theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

ซึ่งสังเกตเห็นว่า ทั้ง  $r$  และ  $\tau$  จะแปรผันตรงกับรัศมี  $\rho$  ของเพลลาและมีค่ามากที่สุดที่ผิวนอก คือ  $\rho = r$  จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด  $T$  ที่กระทำต่อเพลลาในรูปที่ 2.1 (อรรถพล หิรัญรัตน์, 2544) และ มุมที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 2.2 (อรรถพล หิรัญรัตน์, 2544) แรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นที่เล็กๆ ที่พื้นที่  $dA$  คือ  $\tau dA$  และ โมเมนต์ของแรงนี้ก็คือ  $\tau\rho dA$  โมเมนต์บิดทั้งหมด จะเท่ากับผลรวมของโมเมนต์ย่อย ๆ บนพื้นที่ภาคตัด ดังนั้น

$$T = \int_A \tau\rho dA$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \int_A G \theta \rho^2 dA = G \theta \int_A \rho^2 dA$$

$$T = G \theta J \quad (2.4)$$

โดยที่

$$J = \int_A \rho^2 dA \quad \text{คือ Polar moment of Inertia}$$

สำหรับวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง d ค่า  $J = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi r^4}{2}$

จากสมการ (4) จะได้  $\theta = \frac{T}{GJ}$  (2.5)

ซึ่งแสดงว่ามุมบิดต่อหนึ่งหน่วยความยาว, จะแปรผันตรงกับโมเมนต์บิด T และแปรผันกับผลคูณของ GJ ซึ่งเรียกว่า ความแกร่งต้านการบิด (Tensional Stiffness หรือ Tensional Rigidity) ของเพลลา มุมบิดทั้งหมด  $\phi$  เท่ากับ  $\phi L$  คือ

$$\phi = \frac{TL}{GJ} \quad (2.6)$$

แทนค่า  $\theta = \frac{T}{GJ}$  ลงในสมการ (2.2) ได้

$$\tau_{\max} = \frac{Tr}{J}$$

สำหรับเพลลากลมตัน

$$\tau_{\max} = \frac{16T}{\pi d^3}$$

ส่วนค่าความเค้นที่ระยะรัศมีใด ๆ ในภาคตัด คือ  $T = \frac{T\rho}{J}$

ในทางปฏิบัติ เพลลาจะใช้ในการส่งกำลัง (Power, P) โดยโมเมนต์บิดที่คงที่ T ที่ความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) คงที่ ดังนั้นจะได้

$$P = T\omega$$

ซึ่ง  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม วัดเป็น rad ต่อหน่วยเวลา ถ้าเพลลาหมุนด้วยความถี่ (Frequency, f) รอบต่อหน่วยเพลลา  $\omega = 2\pi f$  ดังนั้นจะได้

$$P = T2\pi f$$

หรือ

$$T = \frac{P}{2\pi f}$$

$$T = \frac{60 \text{ watt}}{2\pi n} \quad , \text{ นิวตัน-เมตร (T-เฉลี่ย)}$$

โดยที่

T = โมเมนต์บิดเฉลี่ยจากการส่งกำลัง , นิวตัน-เมตร

P = กำลังส่งของเพลลา , วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \text{ความถี่} = \frac{n}{60}, \text{ รอบต่อนาที}$$

$$n = \text{จำนวนรอบ}$$

กรณีหน่วยอังกฤษจะได้

1. T (in lb . in) =  $63 \times 10^3 \frac{P(\text{in.hp})}{f(\text{in.rpm})}$
2. 1 Horse Power , HP = 0.746 กิโลวัตต์.

## 2.2 การชุบแข็งโลหะ

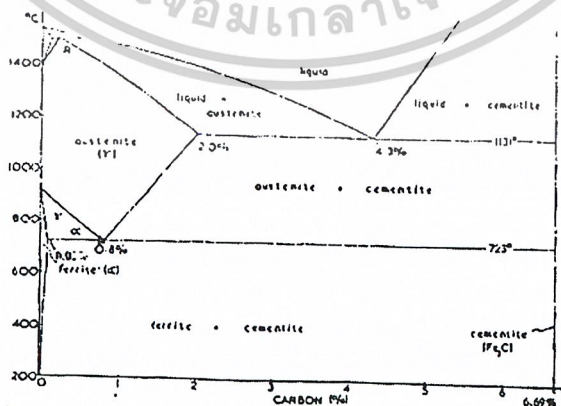
### 2.2.1 กรรมวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน

#### 2.2.1.1 กรรมวิธีทางความร้อน

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) เป็นวิธีทำให้โลหะร้อนหรือเย็นตามขั้นตอนที่แน่นอน เพื่อให้ได้คุณสมบัติหรือ โครงสร้างจุลภาคเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ กรรมวิธีทางความร้อนใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในโลหะกลุ่มเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก

#### 2.2.1.2 แผนภาพสมดุลทางความร้อนของเหล็ก – คาร์บอน

แผนภาพสมดุลทางความร้อนของเหล็ก – คาร์บอน (The Iron – Carbon Thermal Equilibrium Diagram) มีความสำคัญมาก เนื่องจากคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้งานด้านวิศวกรรมจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กและการที่จะเข้าใจถึงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของเหล็กได้ดีต้องเข้าใจเรื่องของแผนภาพสมดุลทางความร้อนของเหล็ก – คาร์บอน รูปที่ 2.4 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545) ในการศึกษาแผนภาพนี้มีรูปฟอร์ม โครงสร้างจุลภาคที่เกี่ยวข้อง 4 ชนิด ได้แก่

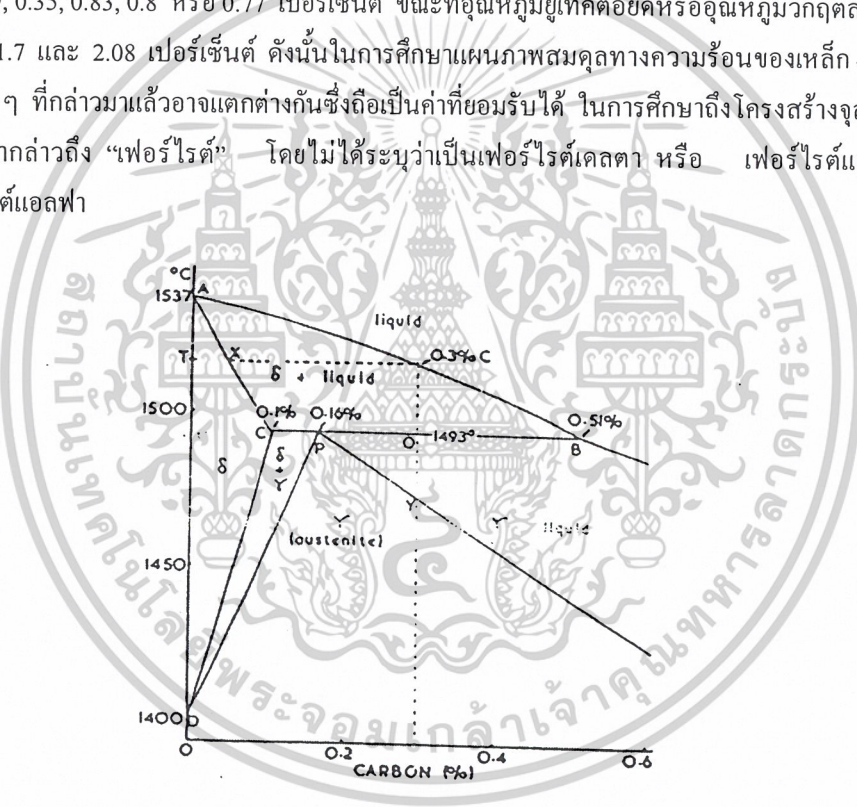


รูปที่ 2.4 แผนภาพสมดุลทางความร้อนของเหล็ก – คาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เฟอร์ไรต์เดลตา ( $\delta$ ) เป็นสารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอน ที่คาร์บอนสามารถละลายในเหล็กได้มากที่สุด 0.1 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 1493°C มีโครงสร้างผลึกแบบ Body Centered Cubic (BCC)
2. ออสเทนไนต์ หรือ เหล็กแกมมา ( $\gamma$ ) เป็นสารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอนที่คาร์บอนสามารถละลายได้มากที่สุด 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 1131°C มีโครงสร้างแบบ Face Centered Cubic (FCC)
3. เฟอร์ไรต์แอลฟา ( $\alpha$ ) เป็นสารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอนที่คาร์บอนสามารถละลายได้มากที่สุด 0.02 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 723°C มีโครงสร้างแบบ Body Centered Cubic (BCC)
4. ซีเมนไทต์ หรือ เหล็กคาร์ไบด์ เป็นสารประกอบแบบแทรกตัวของคาร์บอนในเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 6.69 เปอร์เซ็นต์ มีสูตรทางเคมีเป็น  $Fe_3C$

ความสามารถในการละลายของคาร์บอนในเหล็กในรูปแบบต่าง ๆ และอุณหภูมิที่คาร์บอนละลายได้สูงสุดในแผนภาพอาจแตกต่างกันอยู่บ้างที่มาจากแผนภาพ เช่น ส่วนผสมของคาร์บอนในออสเทนไนต์ที่จุดยูเทคตอยด์ อาจจะเป็น 0.89, 0.35, 0.83, 0.8 หรือ 0.77 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่อุณหภูมิยูเทคตอยด์หรืออุณหภูมิวิกฤตล่าง ( $A_1$ ) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.7 และ 2.08 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการศึกษาแผนภาพสมดุลทางความร้อนของเหล็ก - คาร์บอน ในส่วนของค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วอาจแตกต่างกันซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ ในการศึกษาถึงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กและเหล็กกล้าถ้ากล่าวถึง “เฟอร์ไรต์” โดยไม่ได้ระบุว่าเป็นเฟอร์ไรต์เดลตา หรือ เฟอร์ไรต์แอลฟา ปกติจะหมายถึงเฟอร์ไรต์แอลฟา



รูปที่ 2.5 ส่วนบนของแผนภาพสมดุลทางความร้อนของเหล็ก - คาร์บอน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงแบบเพอริเทคติก (peritectic)

พิจารณาเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสม 0.3 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 2.5 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545) ที่เหนืออุณหภูมิ T เหล็กอยู่ในรูปสารละลายของเหลว เมื่ออุณหภูมิลดถึงอุณหภูมิ T จะเริ่มเกิดของแข็ง โดยเกิดเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) ของสารละลายของแข็งคือ เฟอร์ไรต์เดลตา ( $\delta$ ) ที่มีคาร์บอนละลายอยู่เท่ากับส่วนผสมที่จุด X เมื่ออุณหภูมิลดลงเดนไดรต์มีขนาดโตขึ้น และมีส่วนผสมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นตามเส้น XC ขณะที่ของเหลวมีปริมาณน้อยลง และมีส่วนผสมของคาร์บอนเพิ่มขึ้นเช่นกันคือเพิ่มขึ้นตามเส้น AB ที่อุณหภูมิเหนือ 1493°C เล็กน้อย ( $1493^{\circ}C + \Delta T$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

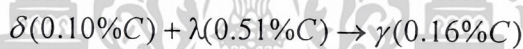
เฟอร์ไรต์เซลล์ตา ( $\delta$ ) จะประกอบด้วยคาร์บอน 0.1 เปอร์เซ็นต์ และของเหลวมีคาร์บอนอยู่ 0.51 เปอร์เซ็นต์ และของเหลวมีคาร์บอนอยู่ 0.51 เปอร์เซ็นต์

จากกฎแขนของคาน (Lever Arm Rule) ที่อุณหภูมิ  $1493^{\circ}\text{C} + \Delta T$

$$\frac{\text{น้ำหนักของเฟอร์ไรต์เซลล์ตา}(0.1\%C)}{\text{น้ำหนักของของเหลว}(0.51\%C)} = \frac{OB}{OC} = \frac{0.51 - 0.30}{0.30 - 0.10} = 1.05$$

แสดงว่าที่อุณหภูมิ  $1493^{\circ}\text{C} + \Delta T$  มีปริมาณของเฟอร์ไรต์เซลล์ตา และของเหลวใกล้เคียงกัน

ที่อุณหภูมิ  $1493^{\circ}\text{C}$  จะเกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติก โดยของเหลว ( $0.51\%C$ ) ร่วมกับแกนโครงของเฟอร์ไรต์เซลล์ตา ( $\delta$ ) เกิดเป็นสารละลายของแข็งอีกชนิดหนึ่งคือออสเตไนต์ ( $\gamma$ ) มีส่วนผสมที่จุด P ( $0.16\%C$ ) ดังสมการ



เมื่อปฏิกิริยาเพอริเทคติกสิ้นสุด โลหะผสมจะประกอบด้วยออสเตไนต์ ( $\gamma$ ) และของเหลว ( $\lambda$ ) ดังนั้นที่อุณหภูมิ  $1493^{\circ}\text{C} - \Delta T$  อัตราส่วนต่อน้ำหนักของเฟสเป็นดังนี้คือ

$$\frac{\text{น้ำหนักของออสเตไนต์}(0.16\%C)}{\text{น้ำหนักของของเหลว}(0.51\%C)} = \frac{OB}{OP} = \frac{0.51 - 0.30}{0.30 - 0.16} = 1.5$$

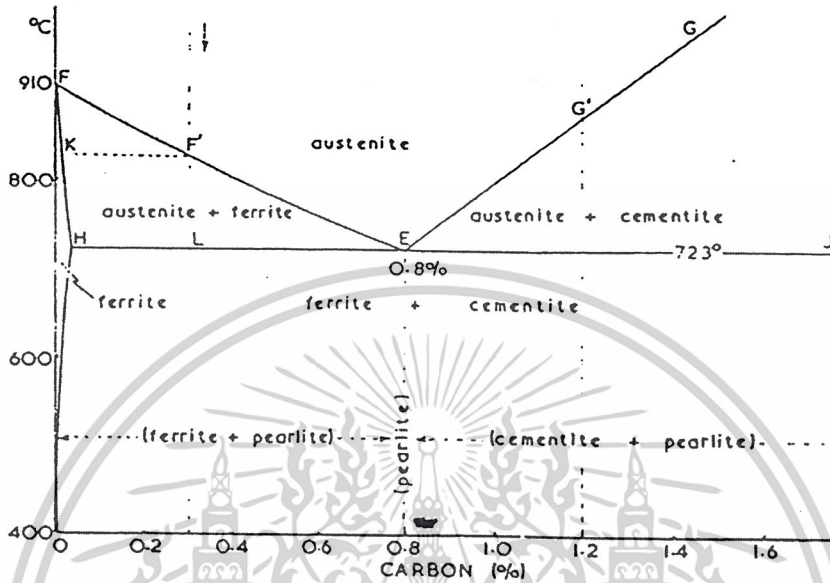
แสดงว่ามีออสเตไนต์อยู่ 1.5 เท่าของเหลว

เมื่ออุณหภูมิลดลงอีกของเหลวจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นออสเตไนต์ ที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเปลี่ยนตามเส้น PY ของเหลวเปลี่ยนเป็นออสเตไนต์หมดที่จุด Y ออสเตไนต์ที่มีส่วนผสมสม่ำเสมอที่ประกอบด้วย 0.3 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน เนื่องจากคาร์บอนที่ละลายแบบแทรกตัวในออสเตไนต์สามารถเกิดการแพร่ได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างผลึกแบบ FCC และจากการเย็นตัวของเหล็กเป็นไปอย่างช้าๆ จึงไม่เกิดแก่นของผลึก (Coring) ในโครงสร้าง

ออสเตไนต์จะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิลดลงจากจุด Y ลงมาจนกระทั่งถึงจุด บนเส้น FE (รูปที่ 2.6 (เมรินี มุกดาสิริ, 2545)) จุด F' นี้คืออุณหภูมิวิกฤตบน ( $A_3$ ) ของเหล็กกล้า 0.3 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน อุณหภูมิวิกฤตบนนี้จะแปรเปลี่ยนตามเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ซึ่งจะอยู่บนเส้น FE เมื่ออุณหภูมิของเหล็กกล้า 0.3 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงต่ำกว่าจุด F' ออสเตไนต์ที่มีโครงสร้างแบบ FCC จะไม่เสถียรภาพจะเปลี่ยนสภาพอันยรูปเป็นเฟอร์ไรต์ แอลฟา ( $\alpha$ ) มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC ผลึก



รูปที่ 2.6 ส่วนของเหล็กกล้าในแผนภาพสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน

ของเฟอร์ไรต์จะเริ่มก่อตัวภายในผลึกของออสเตไนต์และค่อยๆ โตขึ้นโดยจะคุกกลืนโครงสร้างออสเตไนต์ เฟอร์ไรต์ที่ก่อตัวขึ้นในตอนแรกจะมีคาร์บอนผสมอยู่น้อยมาก (ส่วนผสมที่จุด K) ผลึกของออสเตไนต์ที่เหลือจะมีแนวโน้มปริมาณคาร์บอนเข้มข้นมากขึ้น การเปลี่ยนสภาพจากออสเตไนต์เป็นเฟอร์ไรต์จะเกิดโดยกระบวนการแพร่ ส่วนประกอบในเฟอร์ไรต์จะเปลี่ยนไปเล็กน้อยตามเส้น KH ขณะที่ส่วนประกอบในออสเตไนต์จะเปลี่ยนตามเส้น F'E ที่อุณหภูมิ 723°C (จุด L) เฟอร์ไรต์จะมีคาร์บอนอยู่ 0.02 เปอร์เซ็นต์ และออสเตไนต์ที่เหลือมีคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นที่  $723^{\circ}\text{C} + \Delta T$

$$\frac{\text{น้ำหนักของเฟอร์ไรต์ (0.02\%C)}}{\text{น้ำหนักของออสเตไนต์ (0.8\%C)}} = \frac{LE}{LH} = \frac{(0.8 - 0.3)}{(0.3 - 0.02)} = \frac{0.5}{0.28} = 1.79$$

แสดงว่ามีเฟอร์ไรต์เกือบสองเท่าของออสเตไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 723°C ออสเตไนต์ที่เหลือจะเปลี่ยนเป็นยูเทคตอยด์เฟอร์ไรต์ โดยเกิดเป็นชั้น (Layer) สลับกันระหว่างเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ อุณหภูมิ 723°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดเฟอร์ไรต์เรียกว่าอุณหภูมิวิกฤตล่าง ( $A_1$ ) หรืออุณหภูมิยูเทคตอยด์ ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนผสมปริมาณต่างๆ เนื่องจากอุณหภูมิยูเทคตอยด์มีค่าคงที่คือเส้นแนวระดับ HEJ ออสเตไนต์ที่เหลือทั้งหมดจะเปลี่ยนเฟอร์ไรต์ โดยมีอัตราส่วนของเฟอร์ไรต์ต่อเฟอร์ไรต์เป็น 1.79/1 โครงสร้างจุลภาคจะปรากฏเป็นเฟอร์ไรต์ประมาณสองเท่าของเฟอร์ไรต์

เหล็กกล้า 0.8 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนจะเริ่มเกิดของแข็งที่ประมาณ 1470°C โดยจะเกิด เคนไดรต์ของออสเตไนต์ที่มีส่วนประกอบที่ R (รูปที่ 2.4 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545)) และกลายเป็นของแข็งหมด เป็นออสเตไนต์ที่มีคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่เหล็กกล้าเย็นออสเตไนต์จะเปลี่ยนแปลงจะกระทั่งถึงจุด E (รูปที่ 2.6 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545)) สำหรับเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมนี้ อุณหภูมิวิกฤตบนและอุณหภูมิวิกฤตล่างจะซ้อนกันพอดี ออสเตไนต์จะเปลี่ยนสภาพที่อุณหภูมินี้เป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ทั้งหมด

เหล็กกล้า 1.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน จะเริ่มเกิดของแข็งคล้ายกับเหล็กกล้า 0.8 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน เมื่อกลายเป็นของแข็งออสเตไนต์หมด ออสเตไนต์จะมีคาร์บอน 1.2 เปอร์เซ็นต์ขณะที่อุณหภูมิลดลงมายังอุณหภูมิวิกฤตบน ( $A_{cm}$ ) ที่จุด G (รูปที่ 2.6 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545)) จะเริ่มเกิด ซีเมนไทต์ปฐมภูมิ (Primary Cementite) รูปเข็มขึ้นตามบริเวณขอบเกรนของออสเตไนต์ก่อน (ซีเมนไทต์ที่เกิดขึ้นจะสังเกตเห็นเป็นรูปเข็มในสองมิติจากกล้องจุลทรรศน์และสภาพจริงเป็นหน้าตัดของแผ่นซีเมนไทต์) ซีเมนไทต์ที่เกิดขึ้นมีคาร์บอน 6.67 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นออสเตไนต์ที่เหลือประกอบด้วยคาร์บอนที่มีแนวโน้มลดลง ส่วนผสมเปลี่ยนโดยเลื่อนไปทางซ้าย และที่ 723°C ออสเตไนต์จะมีคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์และเฟอร์ไรต์จะก่อตัวขึ้น สุดท้ายเป็นโครงสร้างซีเมนไทต์ปฐมภูมิอยู่ในแมทริกซ์ของเฟอร์ไรต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- รูปที่ 2.7 ก) ผลึกของเฟอร์ไรต์ในเหล็กบริสุทธิ์เชิงการค้า ('Armco'), x100 กัดขึ้นรอยใน 2% Nital  
 ข) หน้าตัดตามยาวของเหล็กถลุง (Wrought Iron) แสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปเส้นใยของกากโลหะ (Slag Fibres) ของเฟอร์ไรต์ x100 กัดขึ้นรอยใน 2% Nital  
 ค) เหล็กกล้า 0.5 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนสภาพหล่อแสดงโครงสร้างวิดมันน์สเตทเทน (Widmanstatten) ของเฟอร์ไรต์ (สีขาว) และเพอร์ไลต์ (สีดำ) x50 กัดขึ้นรอยใน 2% Nital

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

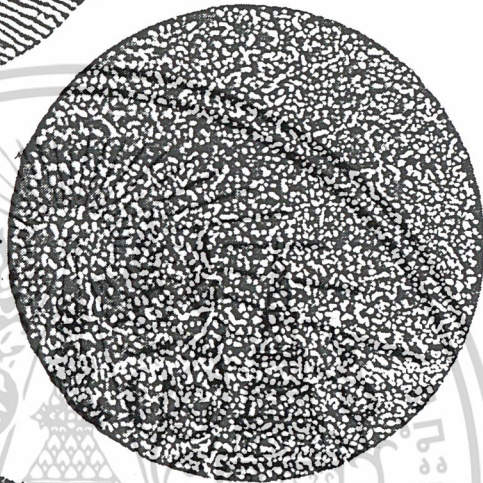


- รูปที่ 2.8 ก) เฟอไรต์และปริมาณเล็กน้อยของเพอร์ไลต์ (สีเข้ม) ในเหล็กกล้า 0.15 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน สภาพนอร์มาไลซ์ (Normalised), x 100 กัดขึ้นรอยใน 2% Nital
- ข) ปริมาณของเฟอไรต์และเพอร์ไลต์ ใกล้เคียงกันในเหล็กกล้า 0.5 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน สภาพนอร์มาไลซ์ (Normalised), x 100 กัดขึ้นรอยใน 2% Nital
- ค) เพอร์ไลต์ทั้งหมดในเหล็กกล้า 0.8 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน สภาพนอร์มาไลซ์ (Normalised), x 100 กัดขึ้นรอยใน 2% Nital

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



11.3a.



11.3c.



- รูปที่ 2.9 ก) โครงสร้างลามลาร์เพอร์ไลต์ (Lamellar Pearlites) ; x 100 กัดขึ้นรอยใน picral – nital  
ข) ซีเมนไทต์อิสระรูปโครงข่าย (Network of Free Cementie) ล้อมรอบเพอร์ไลต์ ; x 100 กัดขึ้นรอยใน 2% Nital  
ค) คล้ายกับ (ข) แต่กำลังขยายมากกว่า แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างแบบลามลาร์ของเพอร์ไลต์และซีเมนไทต์อิสระรูปโครงข่าย ; x 750 กัดขึ้นรอยใน picral – nital

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในเหล็กกล้าคาร์บอนที่ปล่อยให้มีการเย็นตัวช้าเพียงพอ จนกระทั่งโครงสร้างเกิดความสมดุลจะพบว่าโครงสร้างจะเป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่งดังนี้

1. เหล็กที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 0.006% โครงสร้างทั้งหมดเป็นเฟอร์ไรต์ ในทางปฏิบัติเรียกว่าเหล็กบริสุทธิ์เชิงการค้า
2. ถ้ามีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.006% และ 0.02% โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และอนุภาคของซีเมนไทต์ เฟอร์ไรต์ สัดส่วนสัมพัทธ์ของเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ที่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาคจะแปรเปลี่ยนตามส่วนผสมของคาร์บอน
3. ถ้ามีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.02% และ 0.8% โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ สัดส่วนสัมพัทธ์ของเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ที่ปรากฏใน โครงสร้างจุลภาคจะแปรเปลี่ยนตามส่วนผสมของคาร์บอน
4. ถ้ามีคาร์บอน 0.8% โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ทั้งหมด
5. ถ้ามีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.8% ถึง 2% โครงสร้างจะประกอบด้วยซีเมนไทต์และเฟอร์ไรต์ ปริมาณสัมพัทธ์จะขึ้นกับส่วนผสมของคาร์บอน

ในเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ทั้งหมดจะมีคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ ถ้าส่วนผสมของคาร์บอนน้อยกว่าหรือมากกว่า 0.8 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างจะแปรเปลี่ยนไปจากส่วนที่เกิดเฟอร์ไรต์ปฐมภูมิหรือซีเมนไทต์ปฐมภูมิ ความแข็งของเหล็กกล้าที่เย็นตัวช้าๆ จะเพิ่มตามเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความแข็งแรงจะมีค่าสูงสุดที่ส่วนผสมยูเทคตอยด์ (0.8%C) คุณสมบัติของเหล็กกล้าสามารถปรับปรุงได้โดยขบวนการทางความร้อน



รูปที่ 2.10 พื้นที่ของเฟอร์ไรต์จากแผนภาพสมดุลของเหล็ก - คาร์บอน แสดงความสามารถละลายคาร์บอนในเหล็ก BCC ได้น้อยมาก

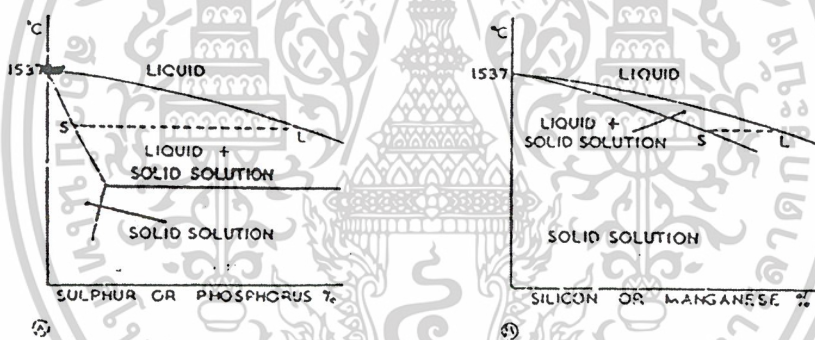
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.3 สารเจือปนในเหล็กกล้า

เหล็กกล้าปกติจะมีแมงกานีสผสมอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะ โดยแมงกานีสที่มีอยู่เป็นส่วนที่หลีกเลี่ยงกระบวนการกำจัดออกซิเจน (Deoxidation)

สารเจือปนเช่น ซิลิคอน กำมะถัน และฟอสฟอรัส อาจมีผสมอยู่ในเหล็กกล้า ผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของสารเจือปนเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับการกระจายในโครงสร้างของเหล็กกล้า ถ้าสารเจือปนดังกล่าวรวมตัวอยู่เป็นแกน (Cored) ในโครงสร้างจะมีผลเสียมากกว่ากระจายสม่ำเสมอ การรวมตัวของสารเจือปนที่บริเวณขอบเกรนมีผลให้เกิดความเปราะตามแนวระหว่างเกรนขึ้นได้

การรวมตัวเป็นแกนของสารเจือปนจะเกิดได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเส้นลิกวิดัส (Liquidus) และเส้นโซลิดัส (Solidus) ที่อุณหภูมิใดๆ ในแผนภาพสมดุล รูปที่ 2.11 (ก) (เมธินี มุกดาศิริ, 2545) ถ้าระยะห่างระหว่างเส้นลิกวิดัส (L) และเส้นโซลิดัส (S) อยู่ห่างกันมากที่อุณหภูมิใดๆ มีผลให้เกิดการรวมตัวเป็นแกนได้มาก เนื่องจากโลหะบริสุทธิ์จะแข็งตัวก่อนและสารเจือปน (ในของเหลว) จะมีความเข้มข้นมากขึ้น และกลายเป็นของแข็งภายหลังอยู่ตามบริเวณขอบเกรน แต่ถ้าส่วนผสมในของเหลว (L) และส่วนผสมในของแข็ง (S) ใกล้เคียงกันในระหว่างเกิดของแข็ง สารเจือปนกระจายสม่ำเสมอมากกว่า รูปที่ 2.11 (ข) (เมธินี มุกดาศิริ, 2545) ผลที่จะก่อให้เกิดอันตรายของสารเจือปนที่อยู่ตามขอบเกรนจะน้อยลง



รูปที่ 2.11 ระยะห่างระหว่างเส้นลิกวิดัส (L) และเส้นโซลิดัส (S) ห่างกันมากตามรูป ก) ก่อให้เกิดแกนของสารเจือปนได้มากกว่ารูป ข) ที่ระยะห่างระหว่างเส้นลิกวิดัสและเส้นโซลิดัสน้อยกว่า

ผลึกของเหล็กกล้าสภาพของแข็ง ที่มีแมงกานีสและซิลิคอนผสมอยู่จะไม่เกิดการรวมตัวเป็นแกนธาตุทั้งสองชนิดนี้สามารถละลายในเหล็กกล้าสภาพของแข็งได้ดี และจะไม่รวมตัวอยู่เฉพาะที่ ในสารละลายของแข็งที่มีแมงกานีสและซิลิคอนไม่เกิน 0.3 เปอร์เซ็นต์ จะมีผลทางตรงน้อยมาก

ส่วนกรณีที่มีกำมะถันและฟอสฟอรัสผสมอยู่ในปริมาณมากพอ จะมีการแยกตัวคดเคี้ยวในระหว่างเกิดของแข็งเป็นสารประกอบของเหล็กอยู่ตามบริเวณขอบเกรนของออสเตไนต์ มีผลให้คุณสมบัติเลวลง เนื่องจากการละลายของกำมะถันและฟอสฟอรัสที่สามารถละลายได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แมงกานีส (Manganese; Mn)

แมงกานีสสามารถละลายในเฟอร์ไรต์และออสไตต์เกิดเป็นสารประกอบคาร์ไบด์ ( $Mn_3C$ ) ที่เสถียรภาพ แมงกานีสที่ละลายในเหล็กมีผลให้เหล็กสามารถชุบแข็งได้ลึกขึ้น มีความแข็งแรงและค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นในเหล็กกล้าคาร์บอนสูงควรมีแมงกานีสไม่เกิน 0.3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากแมงกานีสมีผลให้เกิดการแตกร้าวจากการชุบแข็งโดยจุ่มในน้ำ

2. ซิลิคอน (Silicon; Si)

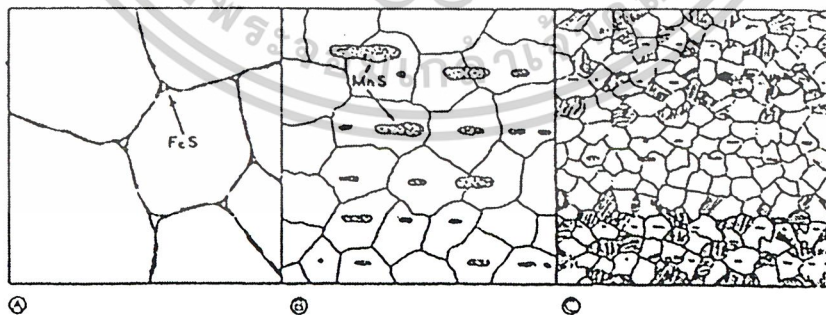
ซิลิคอนที่ผสมในเหล็กกล้ามีผลให้เหล็กกล้ามีสภาพความเป็นของเหลว (Fluidity) ดีขึ้น มักจะเติมในการผลิตงานหล่อซึ่งจะมีผสมอยู่ในปริมาณถึง 0.3 เปอร์เซ็นต์ ในเหล็กกล้าคาร์บอนสูงควรมีซิลิคอนผสมอยู่ปริมาณน้อยเนื่องจากซิลิคอนมีผลทำให้เหล็กคาร์ไบด์ ( $Fe_3C$ ) ไม่เสถียรภาพ จะแตกตัวออกเป็นกราไฟท์และเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีคุณสมบัติอ่อนร่วน

3. ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P)

ฟอสฟอรัสละลายในเหล็กได้ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เกินจากปริมาณนี้จะเกิดสารประกอบฟอสไฟด์ ( $Fe_3P$ ) ที่มีคุณสมบัติเปราะแตกตัวตกตะกอนออกมา ฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปสารละลายจะมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กกล้า แต่จะต้องควบคุมปริมาณไม่ให้เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากจะเกิดส่วนที่มีคุณสมบัติเปราะ โดยเฉพาะถ้าเกิดเหล็กฟอสไฟด์แตกตัวออกจากโครงสร้างจุลภาค

4. กำมะถัน (Sulphur; S)

กำมะถันเป็นสารเจือปนที่มีอยู่ในเหล็กกล้าทั่วไป และมีโอกาสเกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ ( $FeS$ ) ที่เปราะ กำมะถันสามารถละลายได้ดีในเหล็กสภาพหลอมเหลว แต่ในของแข็งกำมะถันสามารถละลายได้เพียง 0.03 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าต้องการไม่ให้เกิดแก่นหรือเกิดการแยกตัวตกตะกอนของสารประกอบซัลไฟด์อยู่ตามบริเวณขอบเกรนควรมีกำมะถันไม่เกิน 0.01 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ออสเตไนต์ถูกล้อมรอบโดยชั้นฟิล์มที่เปราะของเหล็กซัลไฟด์ซึ่งมีจุดหลอมละลายต่ำ จะมีผลให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติร่วน (Crumble) ในระหว่างการขึ้นรูปร้อน เหล็กซัลไฟด์จะเปราะที่อุณหภูมิห้องจึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำการขึ้นรูปเย็นหรือนำไปใช้งานในรูปแบบต่างๆ



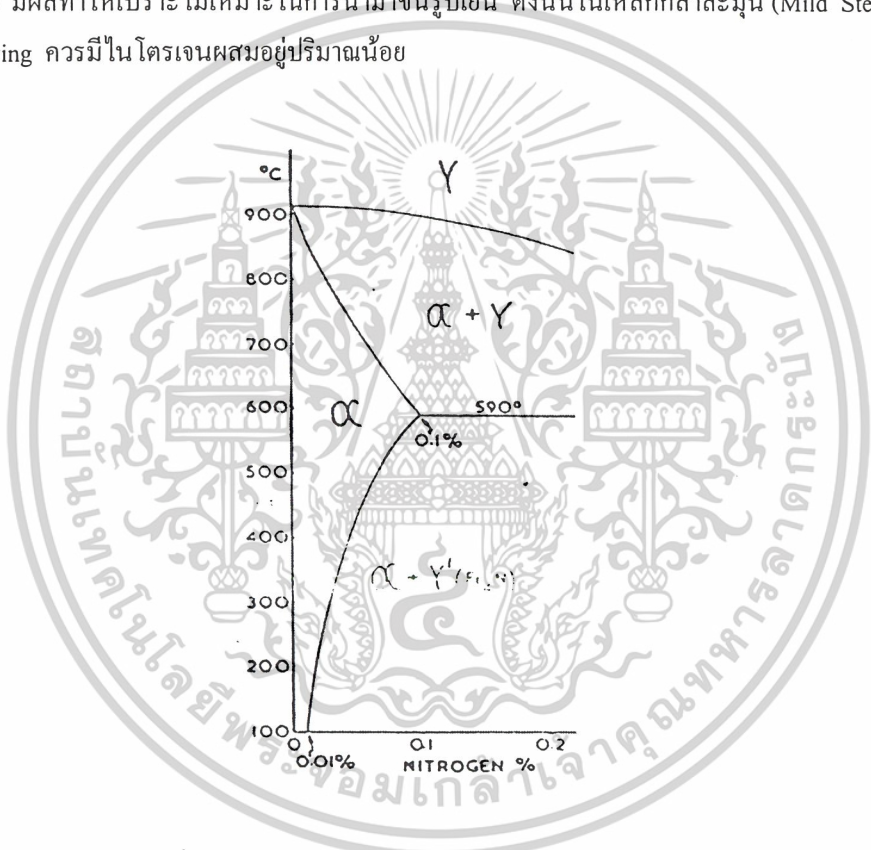
- รูปที่ 2.12 ก) การแยกตัวตกตะกอนของเหล็กซัลไฟด์ (Iron (II) Sulphide;  $FeS$ ) ที่ขอบเกรนใน เหล็กกล้า x 750  
ข) การเกิดแมงกานีสซัลไฟด์ ( $MnS$ ) เป็นก้อนแยกตัวออกอิสระเมื่อแมงกานีสในเหล็กกล้า x 200  
ค) แถบลายมลทิน (Ghost Bands) หรือพื้นที่ที่ไม่เกิดเพอร์ลไลต์ แสดงให้เห็นถึงส่วนที่ฟอสฟอรัสผสมอยู่ x 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำจัดกำมะถันให้เหลือไม่เกิน 0.05 เปอร์เซ็นต์ จะต้องเสียค่าใช้จ่ายแพงมากถ้าเพิ่มแมงกานีสให้เหลือ จากจุดประสงค์ของการทำคือออกซิเดชัน จะทำให้เกิดผลเสียจากกำมะถันลดลง โดยต้องใส่แมงกานีสเข้าไปเป็น 5 เท่า ของความต้องการปกติ กำมะถันจะเกิดเป็นสารประกอบ MnS ซึ่งจะไม่ละลายในเหล็กหลอมเหลว บางส่วนจะถูก กำจัดออกไปพร้อมกากโลหะ (Slag) ส่วนที่เหลือจะมีลักษณะเป็นก้อนค่อนข้างใหญ่กระจายทั่วไปในเหล็กกล้า แมงกานีสซัลไฟด์ (MnS) มีสภาพพลาสติกที่อุณหภูมิการทำฟอร์จิง (Forging) รูปที่ 2.12 (ก) (เมธินี มุกดาสิริ, 2545) และ รูปที่ 2.12 (ข) (เมธินี มุกดาสิริ, 2545)

5. ไนโตรเจน (Nitrogen; N)

ไนโตรเจนจะถูกดูดซึมโดยเหล็กกล้าหลอมเหลวในระหว่างขบวนการผลิต ไนโตรเจนรวมกับเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ หรือยังคงสามารถละลายแทรกตัวหลังจากกลายเป็นของแข็งหมดแล้ว รูปที่ 2.13 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545) มีผลทำให้เปราะไม่เหมาะในการนำมาขึ้นรูปเย็น ดังนั้นในเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) ที่จะนำมา ทำ Deep Drawing ควรมีไนโตรเจนผสมอยู่ปริมาณน้อย



รูปที่ 2.13 ส่วนของแผนภาพสมดุลของเหล็ก – ไนโตรเจน

6. ไฮโดรเจน (Hydrogen; H)

ไฮโดรเจนไอออนสามารถละลายแทรกตัวในเหล็กกล้าสภาพของแข็งและจะไม่อยู่กับที่ในโลหะ มี ผลให้เกิดความเปราะขึ้น ไฮโดรเจนอาจละลายในเหล็กในระหว่างขบวนการผลิตเหล็ก หรืออาจเกิดจากความชื้น ของฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมในระหว่างขบวนการเชื่อม หรืออาจเกิดจากการแยกของแก๊สไฮโดรเจนที่ผิวโลหะใน ขบวนการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะ โดยวิธีไฟฟ้า (Electro Plating) หรือขบวนการสร้างโลหะด้วยกรด (Acid Pickling)

ไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเหล็กกล้าอาจเกิดผล “Delayed Fracture” เป็นการแตกหักภายใต้ภาระสถิตเมื่อ เวลาผ่านไปในช่วงเวลาหนึ่ง ความเสียหายนี้อาจเกิดขึ้นหลังจากใส่ความเค้นไม่เกิน 50% ของ 0.2% Proof Stress

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

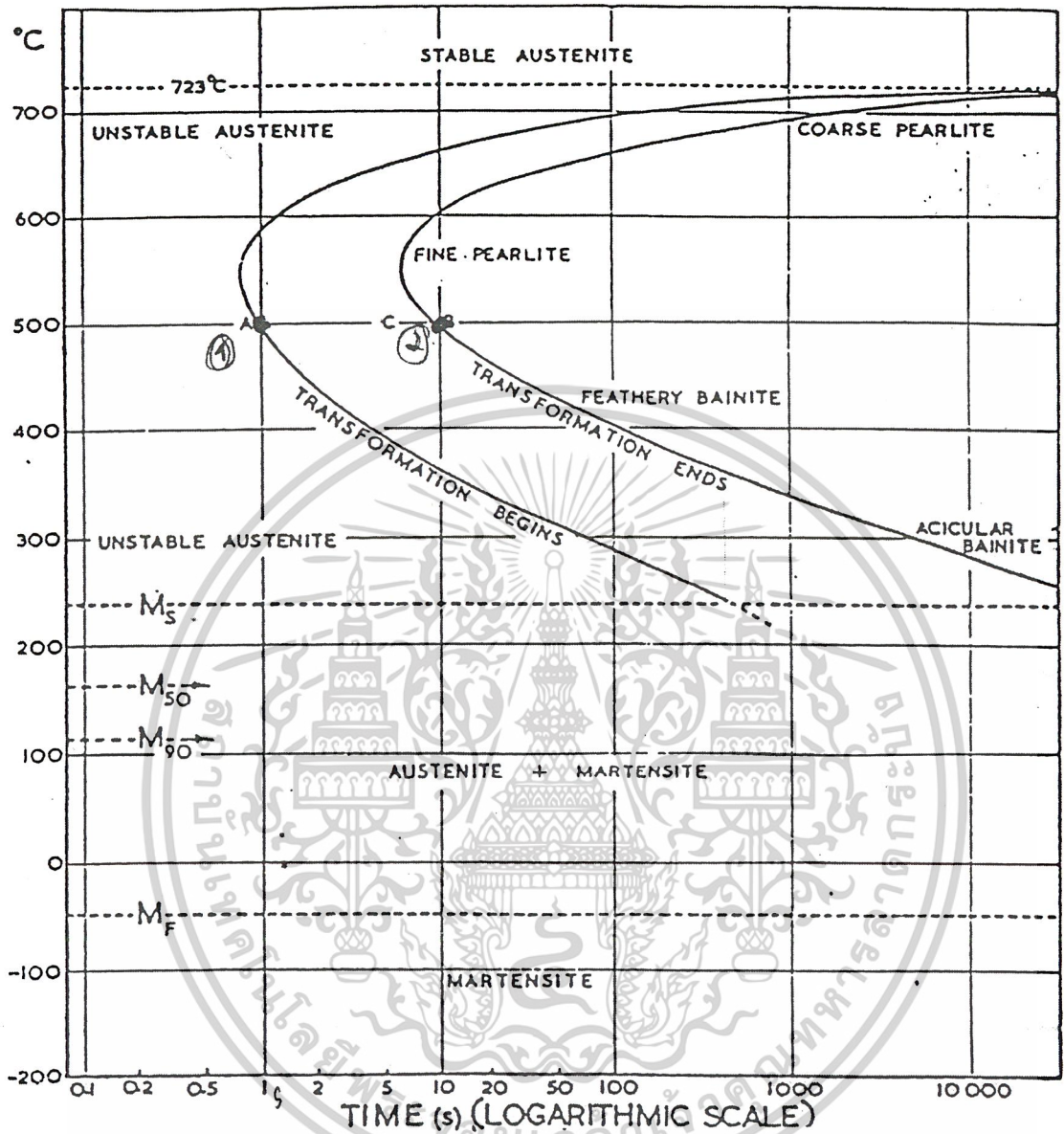
ในเหล็กกล้ากลไกการเกิดความเปราะเนื่องจากไฮโดรเจนเกิดจากการเคลื่อนที่ของไฮโดรเจนไอออนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมของเหล็กไปยังตำแหน่งที่หรือใกล้กับส่วนบกพร่องในแลตทิซ หรือเข้าไปในส่วนที่มีความเค้น 3 แกน ที่มีความเข้มข้นสูง ในแต่ละกรณีจะก่อให้เกิดการก่อตัวของรอยร้าวและเกิดความเสียหายในเวลาต่อมา

### 2.2.2 แผนภาพการเปลี่ยนภาคสัมพันธ์กับเวลากับอุณหภูมิ

แผนภาพการเปลี่ยนภาคสัมพันธ์กับเวลา และอุณหภูมินี้เรียวย่อๆ ว่า แผนภาพ T.T.T (T T T Diagram) หรือเรียกว่า Isothermal Transformation Diagram เป็นแผนภาพแสดงเวลาที่จำเป็นในการทำให้ Retained Austenite เปลี่ยนภาค (Phase) ไปที่อุณหภูมิคงที่

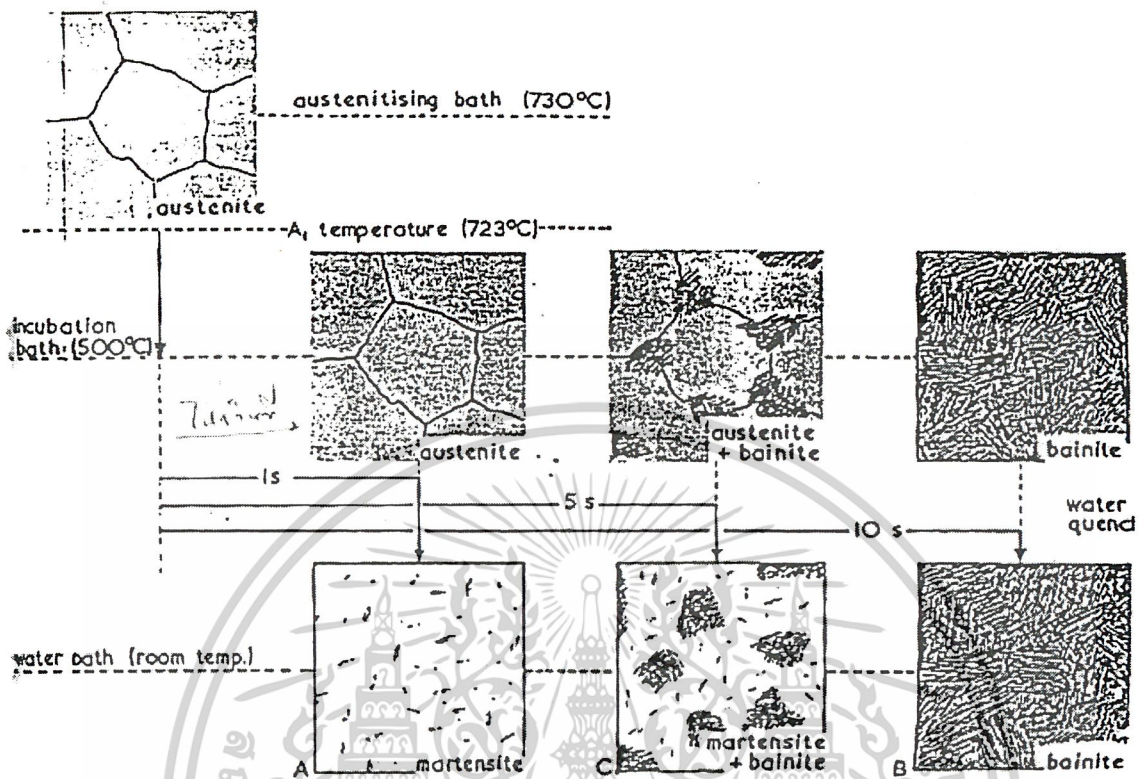
รูปที่ 2.14 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536) เป็นแผนภาพ T.T.T ของเหล็กกล้ามีคาร์บอนผสมอยู่ 0.8% (ส่วนผสม Eutectoid) เส้นโค้งรูปตัวซี (C) เรียกว่า S-curve ค่ายซ้ายสุดเป็น Curve แสดงเวลาที่ ออสเตนไนต์เริ่มเปลี่ยนภาค ส่วนเส้นที่อยู่ทางขวาแสดงถึงเวลาที่ออสเตนไนต์เปลี่ยนภาคไปหมดที่อุณหภูมิเดียวกัน

แผนภาพ T.T.T ได้มาจากการทดลองกับเหล็กตัวอย่างจำนวนหลายๆ ชิ้นให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดลองอยู่ในช่วง Austenitic แบ่งชิ้นงานออกเป็นกลุ่ม ๆ แต่ละกลุ่มทำให้มีการเปลี่ยนภาคไปที่อุณหภูมิเดียวกัน ในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน แล้วจุ่มชิ้นงานทดลองลงในน้ำ เราสามารถตรวจสอบ จุดโครงสร้างของชิ้นงานทดลองที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่อุณหภูมิคงที่ ตัวอย่างเช่น เราให้ความร้อนชิ้นงานทำลอม (0.8%C) ให้อุณหภูมิสูงกว่า  $723^{\circ}\text{C}$  แล้วจุ่มลงในตะกั่วหลอมละลายที่  $500^{\circ}\text{C}$  ทั้งไว้ 1 วินาที แล้วจุ่มลงในน้ำ เราจะได้โครงสร้างของชิ้นงานเป็นโครงสร้างแบบมาเทนซิติกทั้งหมด แสดงว่าที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 1 วินาที (A ในรูปที่ 2.14 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536) และ 2.15 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536)) เหล็กกล้ามีโครงสร้างเป็น ออสเตนไนต์ ถ้าปล่อยให้เหล็กกล้าอยู่ในตัวถึงตะกั่วอุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  10 วินาที (B ในรูปที่ 2.14 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536) และ 2.15 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536)) แล้วจุ่มลงในน้ำ เราจะได้โครงสร้างซึ่งประกอบด้วย เบนไนต์ ทั้งหมด (เบนไนต์ เป็นโครงสร้างที่ Retained Austenite แตกตัวเป็นซีเมนไทต์ และ เฟอร์ไรต์เกรนละเอียด) ซึ่งแสดงว่าภายใน 10 วินาที จะมีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็น เบนไนต์ ทั้งหมด ถ้าเราแช่ชิ้นงานในถึงตะกั่วหลอมละลาย 5 วินาที แล้วจุ่มในน้ำ (C ในรูปที่ 2.14 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536) และ 2.15 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536)) เราจะได้ส่วนผสมของ เบนไนต์ และ มาร์เทนไซต์ ซึ่งแสดงว่า ที่อุณหภูมิคงที่  $500^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 5 วินาที โครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น เบนไนต์ และ ออสเตนไนต์ ที่เหลือซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเป็น มาร์เทนไซต์ ในเวลาต่อมา โดยวิธีทดลองที่อุณหภูมิคงที่ต่าง ๆ กัน จากจุดโครงสร้างที่เกิดขึ้นเราสามารถสร้าง T.T.T Curves ได้ดังรูปที่ 2.14 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536)



รูปที่ 2.14 Time - Temperature - Transformation (T.T.T) Curves ของเหล็ก Plain Carbon Steel ที่ส่วนผสม Eutectic

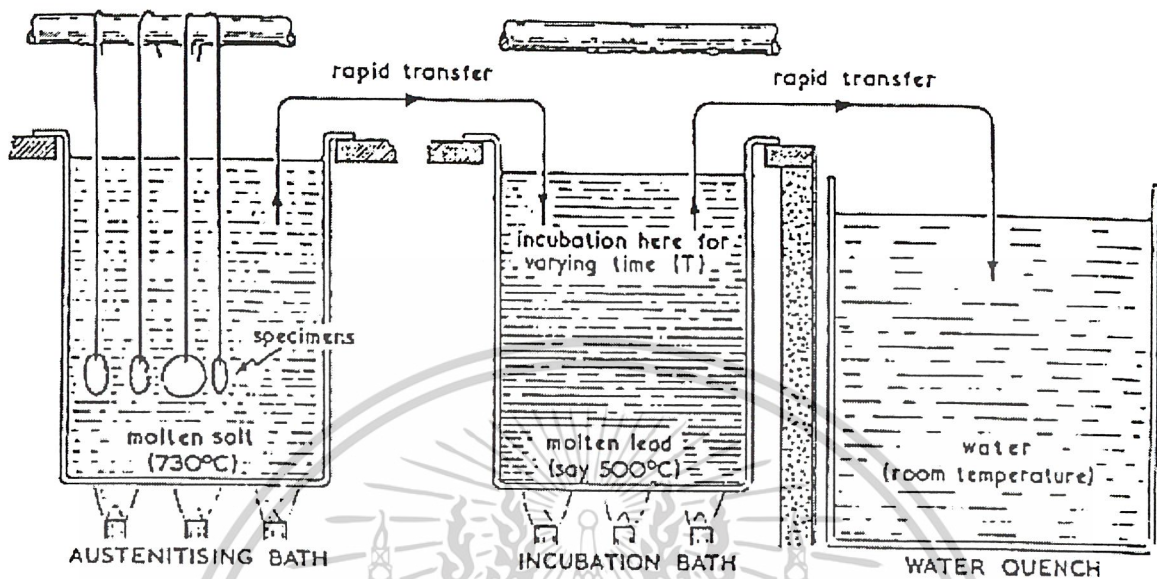
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างระยะต่างๆ ในช่วงเวลาที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิคงที่ ของเหล็ก 0.8% C

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนต์ เป็นมาร์เทนไซต์ (และถึงแม้จาก ออสเทนไนต์ เป็นเพอร์ไลต์) ในทางปฏิบัติ เป็นไปไม่ได้ที่จะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 730°C เป็น 500°C (ตามตัวอย่างข้างบน) ในเวลาศูนย์วินาที และจาก 500°C เป็น 0°C ในเวลาศูนย์วินาที แต่ก็ทำให้ใกล้เคียงที่สุดได้โดยใช้ชิ้นงานเป็นรูปเหรียญกลมชิ้นเล็กเป็นชิ้นงานทดลอง เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงเพื่อสร้าง T.T.T Curve ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536)

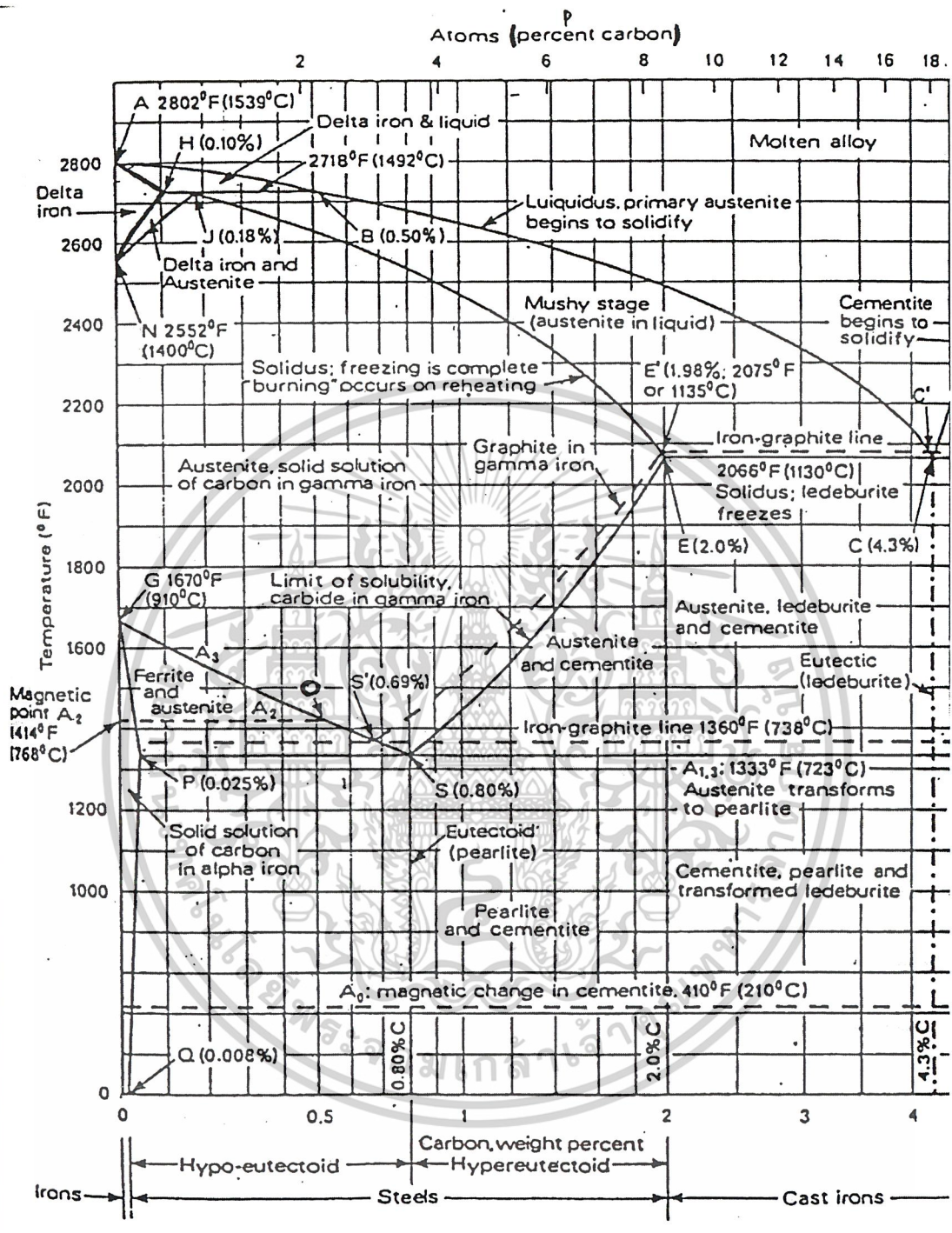
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงการทดลองเพื่อสร้าง T.T.T Curve

เหนือเส้นอุณหภูมิวิกฤตล่าง (Lower Critical Temperature)  $A_1$  สำหรับเหล็กกล้าที่ส่วนผสมยูเทคตอยด์ (0.8% C) หรือเหนือเส้นอุณหภูมิวิกฤตบน (Upper Critical Temperature)  $A_3, A_{cm}$  สำหรับเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ ( $C < 0.8\%$ ) และเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ( $0.8\% < C < 2\%$ ) รูปที่ 2.17 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536) จุดโครงสร้างของเหล็กกล้าจะเป็นออสเทนไนต์แบบเสถียรภาพ ถ้าให้การเปลี่ยนแปลงสภาพเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) ที่อุณหภูมิได้เส้น  $A_1$  ( $723^\circ\text{C}$ ) เพียงเล็กน้อยออสเทนไนต์จะเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นโครงสร้างแบบเพอร์ไลต์อย่างหยาบและอ่อน ดังรูปที่ 2.14 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536) ถ้าการเปลี่ยนสภาพเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิต่ำลงมากขึ้น จะเกิดโครงสร้างของเพอร์ไลต์เกรนละเอียดและมีความแข็งมากขึ้น จนกระทั่งการเปลี่ยนภาคแบบอุณหภูมิคงที่ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ  $535^\circ\text{C}$  จะเกิดโครงสร้างแบบเบนไนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติค่อนข้างแข็งเหนียว มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิประมาณ  $240^\circ\text{C}$  สำหรับเหล็กกล้าส่วนผสมยูเทคตอยด์ ซึ่งเป็นเส้นที่อยู่ในแนวระดับ  $M_s$  ของ T.T.T Curves ในรูปที่ 2.14 (พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536) เป็นอุณหภูมิที่เริ่มเกิด มาเทนไซต์ และจะเกิด มาเทนไซต์ หดที่เส้น  $M_f$  หรืออุณหภูมิประมาณ  $-50^\circ\text{C}$  ถ้าเราจุ่มเหล็กลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องจะมีออสเทนไนต์เหลืออยู่ประมาณ 5% ส่วนที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  ออสเทนไนต์จะแปรรูปเป็น มาเทนไซต์ประมาณ 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แผนภาพสมดุลของเหล็กกับคาร์บอน

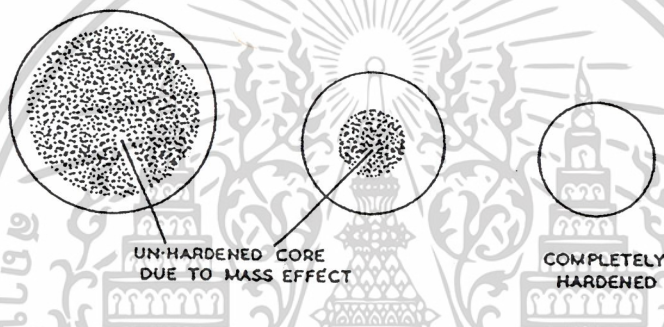
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.3 กรรมวิธีในการชุบแข็ง

### 2.2.3.1 Hardenability และ Rulling Section

ในกระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้า ถ้าชิ้นงานมีขนาดหน้าตัดใหญ่จะเกิดผลของมวลต่อกระบวนการชุบแข็ง ถ้าชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีหน้าตัดใหญ่มาก ในระหว่างการชุบส่วนแกนกลางของชิ้นงานจะมีอัตราการเย็นตัวที่ช้า เนื่องจากผลของมวล ดังนั้นส่วนแกนกลางจะมีลักษณะที่อ่อนเหนียว ขณะที่ชิ้นงานหน้าตัดบางเมื่อทำการชุบในลักษณะเดียวกันจะเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ตลอดหน้าตัด รูปที่ 2.18 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545)

การปรับปรุงเหล็กกล้าคาร์บอนให้สามารถชุบแข็งเป็นมาร์เทนไซต์ได้ง่ายขึ้น สามารถทำได้โดยเติมธาตุผสม (Alloying Element) ที่เหมาะสมลงไป จะมีผลทำให้อัตราการเย็นตัววิกฤตของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ช้าลง



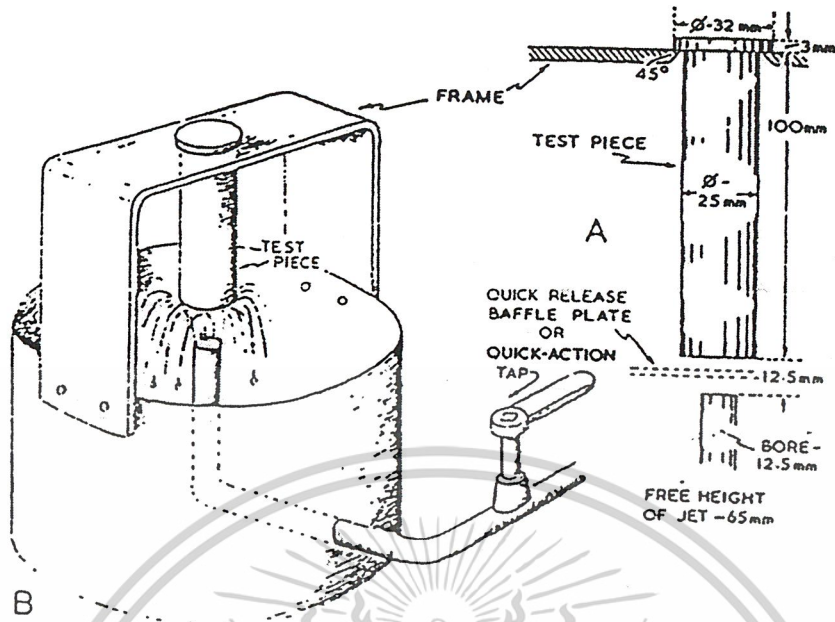
รูปที่ 2.18 ผลของมวลที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจากการชุบ หน้าตัดขนาดใหญ่มาก การเย็นตัวจะช้าไม่สามารถที่จะเกิดมาร์เทนไซต์ได้หมด

ธาตุผสมที่เติมโคในเหล็กกล้าคาร์บอนมีผลให้สามารถชุบแข็งได้ลึกขึ้น ขนาดหรือเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุดของชิ้นงานที่สามารถชุบแข็งแล้วเกิดมาร์เทนไซต์ได้หมดเรียกว่า Rulling Section ในการชุบแข็งถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่เกินไปที่แกนกลางจะไม่เกิดมาร์เทนไซต์

ความสามารถของเหล็กกล้าที่สามารถชุบแข็งแล้วเกิดมาร์เทนไซต์ได้ลึกเรียกว่า Hardenability ถ้าเหล็กมี Hardenability สูง หน้าตัดใหญ่ที่สุดของชิ้นงานที่ชุบแข็งแล้วเกิดมาร์เทนไซต์ทั้งหมดจะมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือมีค่า Rulling Section มากขึ้น

การทดสอบหาค่า Hardenability ของเหล็กที่นิยมใช้กันมากคือวิธี Jominy End – quench Test รูปที่ 2.19 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545) เป็นการทดสอบโดยฉีดน้ำอุณหภูมิประมาณ 25°C ไปยังปลายส่วนล่างของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบจนมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์มาแล้ว ปล่อยให้กระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสิ้นสุด น้ำชิ้นทดสอบไปแต่ผิวด้านข้างให้เรียบ มีความกว้าง 4 มม. ตรงข้ามกัน 2 ตำแหน่ง แล้วนำไปทดสอบความแข็งที่ตำแหน่งห่างจากปลายของการชุบต่างๆ กัน นำผลของความแข็งที่สัมพันธ์กับระยะห่างจากปลายของการชุบมาสร้างแผนภาพ จะได้ Hardenability curve ดังรูปที่ 2.20 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



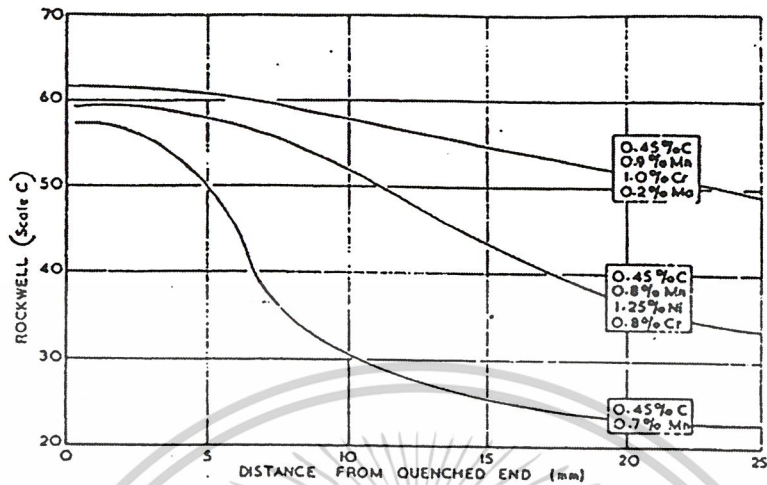
รูปที่ 2.19 แสดงวิธีการทดสอบแบบ End - quench Test (ก) แสดงรูปร่างของชิ้นทดสอบ (ข) อุปกรณ์ทดสอบแบบง่าย ๆ

2.2.3.2 การระบุชื่อเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐานอังกฤษ

การระบุชื่อเหล็กกล้าแปรรูป (Wrought Steels) ที่มีแมงกานีสและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจะอยู่ในตอนที่ 1 ของ BS 970 (Part 1 of BS 970) เป็นมาตรฐานในการบอกชื่อเหล็กกล้าคาร์บอน BS 970 ได้กำหนดขึ้นมาตั้งแต่ปี 1972 เป็นการระบุชื่อเป็นเลข 6 หลัก ใช้ในการบ่งบอกถึงส่วนประกอบของแมงกานีสและคาร์บอน รวมถึงรายละเอียดที่สำคัญอื่น ๆ

กลุ่มตัวเลขสามหลักแรกเป็น 000 ถึง 199 เป็นกลุ่มเหล็กกล้าที่ประกอบด้วยแมงกานีสและคาร์บอน เป็นตัวเลขที่บอกค่าเป็นหนึ่งในร้อยเท่าของส่วนผสมเฉลี่ยของแมงกานีส อักษร A หรือ M บอกถึงเหล็กกล้าที่นำมาวิเคราะห์ (A) หรือ บอกคุณสมบัติเชิงกลที่ต้องการ (M) หรือถ้าต้องการกำหนดค่า Hardenability เข้าไป ด้วยจะกำหนดแทนตัวเลขหลักที่สี่ ส่วนตัวเลขหลักที่ห้าและหกจะใช้แทนหนึ่งในร้อยเท่าของปริมาณคาร์บอนเฉลี่ย (กรณีเหล็กกล้าที่มีคาร์บอน 1% จะแทนด้วยเลขเพียงสองหลักคือ 99 เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ตัวเลขสามหลัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของความแข็งกับระยะจากปลายของการชุบสำหรับเหล็กกล้า 3 ชนิด จากการทดสอบตามวิธีของ Jominy

ตัวอย่างเช่น BS970:060 A52 เป็นชื่อบอกเหล็กกล้าที่ประกอบด้วยคาร์บอน 0.50–0.55%, แมงกานีส 0.5–0.7% ผลิตตามความต้องการสำหรับการวิเคราะห์ (A)

เหล็กกล้าคาร์บอน – แมงกานีสตัดแต่งเสรี (Free Cutting Carbon – Manganese Steels) เป็นเหล็กกล้าในกลุ่ม 200 ถึง 240 โดยตัวเลขหลักที่สองและสามจะบอกค่าเป็นหนึ่งร้อยเท่าของปริมาณกำมะถันโดยประมาณ ดังนั้น BS970:216 M28 เป็นชื่อของเหล็กกล้าที่ตัดแต่งเสรีประกอบด้วย 0.24–0.32% คาร์บอน และ 0.12–0.20% กำมะถัน ผลิตตามคุณสมบัติเชิงกลที่กำหนด

ตารางที่ 2.1 (ที่มา: เมธินี มุกดาสิริ, 2545) เป็นตารางแสดงรายละเอียดของเหล็กกล้าตามข้อกำหนด BS970 ที่ประกอบด้วยส่วนผสมเจือปนกรรมวิธีทางร้อนและคุณสมบัติเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงรายละเอียดของเหล็กกล้าตามกำหนด BS970 : ตอนที่ 1

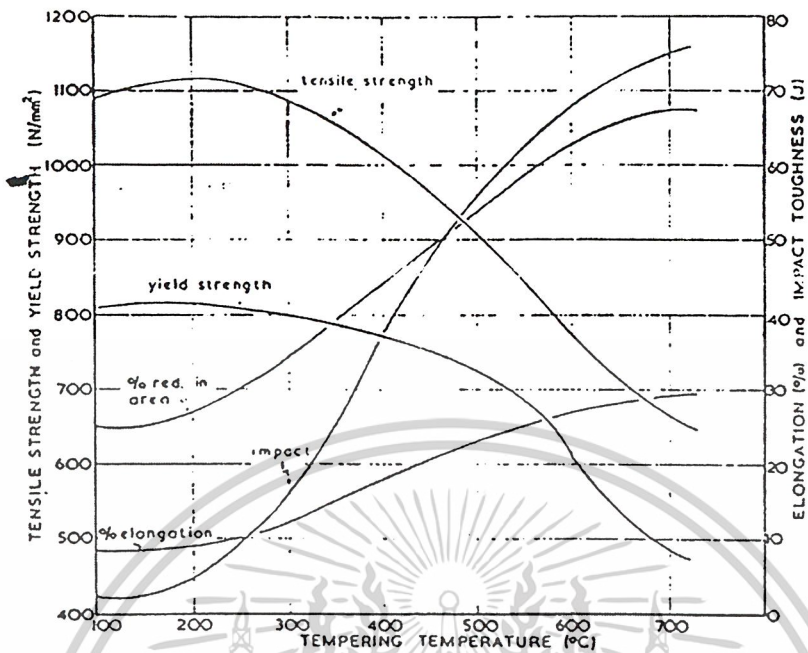
Type	Composition (%)			Heat-treatment	Typical Mechanical properties					
	BS970.	C	Mn		Ruling Section (mm)	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Izod (J)	Hardness (Brinell)
Low carbon	015A03	0.03	0.15	Not heat-treatable—used where ductility and formability are required	—	—	—	—	—	—
	050A12	0.12	0.50		—	—	—	—	—	—
	060A17	0.17	0.60		—	—	—	—	—	—
Medium carbon—mainly constructional steels	20' 070M20 carbon	0.20	0.70	Normalised at 800–910°C. Water-quenched 880–910°C; tempered 550–660°C.	150	430	215	21	—	150
					20	620	355	20	41	180
	30' 080M30 carbon	0.30	0.80	Normalised at 860–890°C. Water quenched 850–890°C; tempered 550–660°C.	150	495	250	20	—	165
					20	695	415	16	34	205
	40' 080M40 carbon	0.40	0.80	Normalised at 850–860°C. Water quenched 850–860°C; tempered 550–660°C.	150	540	280	16	20	180
					20	770	465	16	34	230
50' 080M50 carbon	0.50	0.80	Normalised at 810–840°C. Oil quenched 810–840°C; tempered 550–660°C.	150	620	310	14	—	205	
				12.7	825	570	12	—	275	
55' 070M55 carbon	0.55	0.70	Normalised at 810–840°C. Oil quenched 810–840°C; tempered 550–660°C.	63.5	695	355	12	—	230	
				20	930	575	12	—	275	
High carbon	080A62	0.62	0.80	Heat-treated to give required combination of hardness and toughness—generally used as tool steels	—	—	—	—	—	—
	060A72	0.72	0.80		—	—	—	—	—	—
	080A83	0.83	0.80		—	—	—	—	—	—
	070A86	0.86	0.80		—	—	—	—	—	—
	060A99	1.00	0.60		—	—	—	—	—	—

#### 2.2.4 การอบคืนตัว

เหล็กกล้าทำเครื่องมือที่ชุบแข็งจะมีคุณสมบัติที่เปราะ และมีความเค้นเกิดขึ้นไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในสภาพนั้น นอกจากต้องการคุณสมบัติความแข็งเป็นสำคัญ ดังนั้นจึงต้องทำการอบร้อนใหม่หรืออบคืนตัวเพื่อลดความเค้นภายในและความเปราะ

เหล็กกล้าทำโครงสร้างที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนปานกลางจะอบคืนที่อุณหภูมิสูง ความแข็งและความแข็งแรงจะลดลง แต่ค่าความเหนียว (Toughness) และความเหนียวดึง (Ductility) จะเพิ่มขึ้น

ระหว่างการอบคืนตัวปกติจะทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตล่าง ( $A_1$ ) มาร์เทนไซต์มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างสมดุล คือ เฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ ยิ่งอบอุณหภูมิสูงขึ้นมาร์เทนไซต์ก็มีโอกาสเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ได้มากขึ้น ความแข็งและความแข็งแรงจะลดลงมากขึ้นอีก ในขณะที่ความเหนียว (Toughness) และความเหนียวดึง (Ductility) เพิ่มขึ้นอีก (รูปที่ 2.21 (เมธินี มุกดาสิริ, 2545)) ดังนั้นการเลือกอุณหภูมิในการอบคืนตัวจะได้คุณสมบัติเชิงกลที่ต้องการ



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างการอบคืนตัว (Tempering Temperature) ของ เหล็กกล้า 0.5% C และ 0.7% Mn รูปทรงกระบอก 25 มม. จุ่มชุบน้ำจาก 830°C

การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างการอบคืนตัว สำหรับมาร์เทนไซต์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.3% จะแบ่งได้เป็น 3 ชั้น คือ

1. ชั้นที่ 1 (1st stage)

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 100°C หรือต่ำกว่า มาร์เทนไซต์พยายามเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์รูปแบบอื่นที่มีคาร์บอน 0.25% กับอนุภาคที่ละเอียดมากของคาร์ไบด์ คาร์ไบด์นี้ไม่ใช่คาร์ไบด์แต่เป็นคาร์ไบด์ที่มีคาร์บอนมากกว่าซีเมนไทต์ มีสูตรเป็น  $Fe_3C_2$  หรือเรียกว่า  $\epsilon$ -carbide การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้ไม่สามารถสังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา เนื่องจาก  $\epsilon$ -carbide มีขนาดเล็กมาก แต่ถ้าใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะสามารถเห็นได้มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ๆ หนาประมาณ  $2 \times 10^{-8}$  ม. ในขั้นตอนนี้ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากมี  $\epsilon$ -carbide ที่ละเอียดและแข็งเกิดขึ้นความเปราะจะลดลงเนื่องจากความเค้นจะหายไปจากการเปลี่ยนเฟสที่ 100°C การเปลี่ยนแปลงเฟสจะเกิดช้ามากแต่จะเพิ่มขึ้นถึง 200°C

2. ชั้นที่ 2 (2nd stage)

ขั้นตอนนี้จะเริ่มอบที่ 250°C เมื่อออสเตไนต์ที่เหลือ (Retained Austenite) เริ่มเปลี่ยนเป็นเบนไนต์และมาร์เทนไซต์มีลักษณะเป็นรูปเข็ม จากการกัดขึ้นรอย (Etching) จะปรากฏเป็นสีมืด โครงสร้างชนิดนี้แต่ก่อนเรียกว่า ทรูสไตต์ (Troostite) ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากผลที่ออสเตไนต์เปลี่ยนเป็นเบนไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ขั้นที่ 3 (3 rd stage)

ที่อุณหภูมิประมาณ 350°C  $\epsilon$  - carbide จะเริ่มเปลี่ยนเป็นซีเมนไทต์ธรรมดาและจะเกิดอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มในช่วงเวลานี้คาร์บอนที่เหลือจะแยกตัวจากมาร์เทนไซต์ โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์ BCC ธรรมดา ที่เหนือ 500°C อนุภาคซีเมนไทต์จะเปลี่ยนเป็นรูปกลมในเมทริกซ์ของเฟอร์ไรต์ โครงสร้างนี้แต่เดิมเรียกว่าซอร์ไบต์ (Sorbite) ปัจจุบันจะไม่เรียกซอร์ไบต์ และทรุสไตต์ก็เช่นเดียวกันแต่จะเรียกว่าเป็นมาเทนไซต์คืบคั้นตัว (Tempered Martensite) ความแข็งแรงจะลดลงแต่ความเหนียวจึงจะเพิ่มขึ้น

## 2.3 มาตรฐานขั้นทดสอบ

### 2.3.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การทดสอบเหล็กและเหล็กกล้า

เล่ม 16 การทดสอบลวดเหล็กกล้าโดยการบิด

#### 1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานนี้กำหนด หลักการทดสอบสัญลักษณ์และความหมาย ขั้นทดสอบ เครื่องทดสอบ และข้อกำหนดของการทดสอบลวดเหล็กกล้าโดยการบิด

1.2 มาตรฐานนี้ครอบคลุมเฉพาะ การทดสอบการบิดลวดเหล็กกล้าที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือมิติแสดงคุณลักษณะ (Characteristic Dimension) ไม่น้อยกว่า 0.4 มิลลิเมตร และไม่เกิน 10 มิลลิเมตร

#### 2. หลักการทดสอบ

2.1 การทดสอบกระทำโดยบิดขั้นทดสอบรอบแกนของขั้นทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน จนกระทั่งขั้นทดสอบขาดหรือได้จำนวนรอบการบิดที่ระบุ

#### 3. สัญลักษณ์และความหมาย

3.1 สัญลักษณ์และความหมายในมาตรฐานนี้ ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.2 (ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [ส.ม.อ.], 2525) และรูปที่ 2.22 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [ส.ม.อ.], 2525)

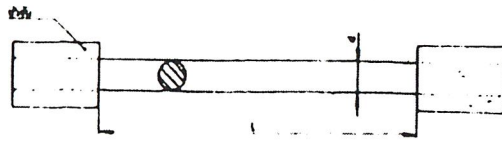
ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์และความหมาย

(ข้อ 3.1)

สัญลักษณ์	ความหมาย
d	เส้นผ่านศูนย์กลางระบุของลวดกลม หรือมิติแสดงคุณลักษณะของลวดที่ภาคตัดขวางไม่กลม
L	ความยาวอิสระระหว่างหัวจับ
N <sub>t</sub>	จำนวนรอบการบิด

หมายเหตุ \* มิติแสดงศูนย์กลางของลวดภาคตัดขวางไม่กลม ปกติจะระบุในมาตรฐานของวัสดุที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์นั้นๆ และเป็นมิติที่ใหญ่ที่สุดของภาคตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 สัญลักษณ์ของชิ้นทดสอบ  
(ข้อ 3.1)

#### 4. ชิ้นทดสอบ

- 4.1 ชิ้นทดสอบจะต้องตรง หากจำเป็นต้องทำให้ตรงให้ตัดด้วยมือ ถ้าทำไม่ได้ให้ทุบบนพื้นเรียบที่ทำด้วยวัสดุประเภทไม้ พลาสติก หรือทองแดง ค้อนที่ใช้ทุบให้ทำด้วยวัสดุประเภทที่กล่าวมาแล้ว
- 4.2 ความยาวอิสระระหว่างหัวจับ ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.3 (ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [ส.ม.อ.], 2525)
- 4.3 สำหรับลวดที่มีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะลวดขนาดใหญ่โตกว่า 5 มิลลิเมตร ความยาวอิสระระหว่างหัวจับตามที่ระบุในตารางที่ 2.3 (ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [ส.ม.อ.], 2525) อาจจะตกลงกันให้ใช้สั้นกว่าที่กำหนดได้ กล่าวคือความยาวที่แนะนำไว้เป็น 100 d ให้เลือกใช้เป็น 50 d และความยาวที่แนะนำเป็น 50 d ให้เลือกใช้เป็น 30 d ได้

ตารางที่ 2.3 ความยาวอิสระระหว่างหัวจับ  
(ข้อ 4.2)

ขนาดระบุของ d (มิลลิเมตร)	ความยาวอิสระระหว่างหัวจับ L
$0.4 \leq d < 1$	200 d
$1 \leq d < 3.6$	100 d
$3.6 \leq d < 5$	100 d
$5 \leq d \leq 10$	50 d

#### 5. เครื่องทดสอบ

- 5.1 เครื่องทดสอบ จะต้องออกแบบให้สามารถใช้แรงดึงที่พอเหมาะกับชิ้นทดสอบได้
- 5.2 หัวจับทั้งสองของเครื่องทดสอบต้องอยู่ในแนวแกนเดียวกันตลอดเวลาการทดสอบ และไม่ต้องทำให้เกิดความโค้งใด ๆ ขึ้นกับชิ้นทดสอบ
- 5.3 เครื่องทดสอบจะต้องเป็นแบบที่ระยะระหว่างหัวจับปรับได้เองตามระยะที่เปลี่ยนไประหว่างการทดสอบ
- 5.4 หัวจับด้านใดด้านหนึ่งจะต้องสามารถหมุนรอบแกนของชิ้นทดสอบได้ ในขณะที่หัวจับอีกด้านหนึ่งจะต้องไม่หมุน เว้นไว้แต่เมื่อต้องการวัดแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ระยะระหว่างหัวจับ จะต้องสามารถปรับให้ใช้ได้กับความยาวของชิ้นทดสอบขนาดต่าง ๆ

## 6. การทดสอบ

6.1 จับชิ้นทดสอบด้วยหัวจับ ให้ชิ้นทดสอบและหัวจับอยู่ในแนวแกนเดียวกัน ซึ่งทดสอบต้องตรงตลอดเวลา ระหว่างการทดสอบ หากมิได้ระบุเป็นอย่างอื่นในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ การรักษาสองชิ้นทดสอบให้ตรงตลอดการทดสอบดังกล่าว สามารถทำได้โดยใช้ความเค้นดึงคงที่เท่าที่จำเป็นที่จะทำให้ชิ้นทดสอบตรง แต่ค่าความเค้นดึงนี้ต้องไม่เกินร้อยละ 2 ของค่าความต้านแรงดึงระบุของเส้นลวด

6.2 หมุนหัวจับด้านหนึ่งด้วยอัตราการบิดคงที่ จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดหรือได้จำนวนรอบการบิดที่ระบุไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์นั้น ๆ การนับรอบให้นับเฉพาะที่หมุนครบรอบ

6.3 อัตราการบิดในการทดสอบ จะต้องไม่เร็วเกินไปจนทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิอันมีผลต่อการทดสอบ ไม่ว่ากรณีใด ๆ ค่าของอัตราการบิดนี้จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.4 (ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [ส.ม.อ.], 2525)

ตารางที่ 2.4 อัตราการบิดในการทดสอบ

( ข้อ 6.3 )

ขนาดระบุของ d (มิลลิเมตร)	จำนวนรอบสูงสุดต่อนาที ต่อ 100 d	จำนวนรอบต่อนาทีสำหรับ ความยาวที่เลือกใช้ ตามตารางที่ 2.3
$0.4 \leq d < 1$	90	180
$1 \leq d < 3.6$	60	60
$3.6 \leq d < 5$	30	30
$5 \leq d \leq 10$	30	15

หมายเหตุ: ถ้าความยาวอิสระระหว่างหัวจับ ไม่เป็นไปตามตารางที่ 2.3 (ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [ส.ม.อ.], 2525) จำนวนรอบต่อนาทีให้คิด จากสมรรถที่ 1 และสมรรถที่ 2 ของตารางที่ 2.4 (ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [ส.ม.อ.], 2525)

## 7. ข้อกำหนดของการทดสอบ

7.1 นอกจากจะระบุเป็นอย่างอื่น การทดสอบให้กระทำที่อุณหภูมิห้อง

### 7.2 เกณฑ์การพิจารณาผลการทดสอบ

- (1) ในกรณีที่ผลการทดสอบได้จำนวนรอบไม่น้อยกว่าค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์นั้นๆ ให้ถือว่าชิ้นทดสอบนั้นเป็นไปตามเกณฑ์กำหนด โดยไม่ต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่ชิ้นทดสอบขาด
- (2) ในกรณีที่ผลการทดสอบได้จำนวนรอบน้อยกว่าค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์นั้นๆ และตำแหน่งที่ขาดอยู่ห่างจากหัวจับอันใกล้ เกินกว่าระยะ  $2d$  ให้ถือว่าชิ้นทดสอบนั้นไม่เป็นไปตามเกณฑ์กำหนด
- (3) ในกรณีที่ผลการทดสอบได้จำนวนรอบน้อยกว่าค่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์นั้นๆ และตำแหน่งที่ขาดอยู่ห่างจากหัวจับอันใกล้ ไม่เกิน  $2d$  ให้ยกเลิกผลการทดสอบนี้แล้วทำการทดสอบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 ถ้าในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ ระบุให้ทำการตรวจสอบผิวของชิ้นทดสอบรวมทั้งรอยขาดวิธีการตรวจสอบและ การวินิจฉัยผล ให้เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดใหม่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ



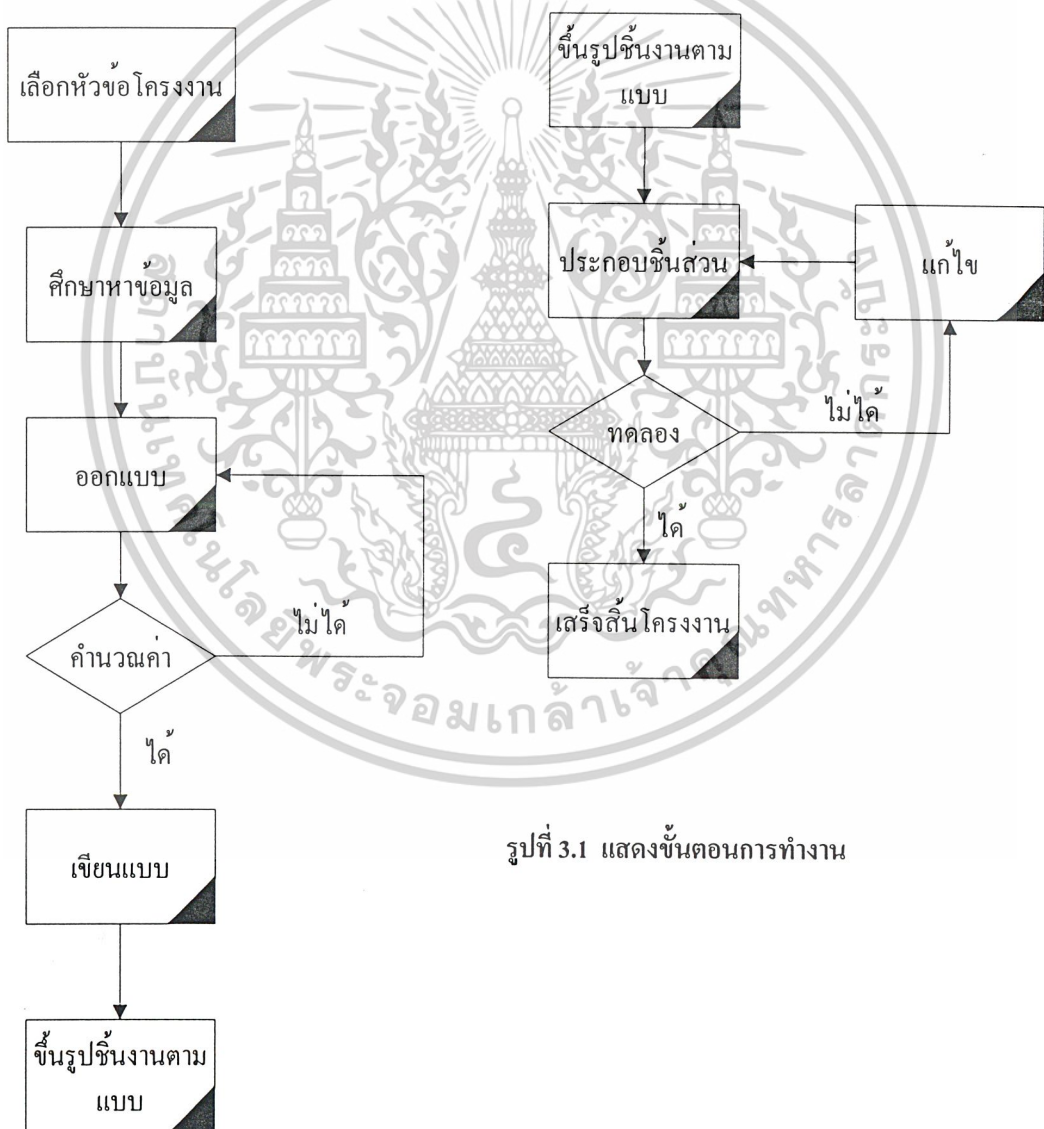
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### แผนการดำเนินงาน

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

จากการศึกษาหาข้อมูลเพื่อประกอบการทำโครงการ รายละเอียดแสดงตามแผนผังแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจากรูปได้แสดงถึงลำดับขั้นตอนของการทำโครงการตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 แผนการดำเนินงานปีการศึกษา 2547

ในการทำงานได้มีการกำหนดระยะเวลาในการทำของโครงการไว้เพื่อควบคุมและติดตามผลรวมถึงใช้เป็นตัวชี้วัดความสำเร็จของโครงการซึ่งได้แสดงไว้ในตารางด้านล่าง

งานที่ต้องดำเนินการ	แผนการดำเนินงานภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2547																			
	มิถุนายน				กรกฎาคม				สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ศึกษาการทำงานของเครื่อง																				
2. วางแผนการทำงาน																				
3. สร้างชิ้นส่วนและสั่งซื้อวัสดุ																				
4. ติดตั้งและประกอบชิ้นส่วน																				
5. ทดลองการทำงาน																				
6. พัฒนาและปรับปรุงการทำงาน																				

งานที่ต้องดำเนินการ	แผนการดำเนินงานภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2547																			
	พฤศจิกายน				ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. ทดลองการทดสอบกับวัสดุ																				
2. พัฒนาและปรับปรุง																				
3. สรุปและรายงานผลการทำงาน																				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การคำนวณหาขนาดชิ้นส่วน

ปัญหาที่พบในอันดับต้นๆของการทำปริญญานิพนธ์เรื่องเครื่องทดสอบแรงบิดนี้คือ จะใช้ตัววัดค่าใดมาวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการบิดชิ้นงาน นั้นหมายถึงต้องรู้ช่วงของแรงทั้งหมดที่วัสดุจะทนได้ การคำนวณนี้จะแสดงให้เห็นถึงการแก้ปัญหาดังที่กล่าวมา

#### 3.3.1 การคำนวณช่วงเพื่อเลือกใช้เครื่องมือ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้าตามมาตรฐานเยอรมัน

Material	Elastic modulus (MN/m <sup>2</sup> )	Tensile strength (MN/m <sup>2</sup> )	Yield strength (MN/m <sup>2</sup> )	Shear strength (MN/m <sup>2</sup> )	Modulus of rigidity (MN/m <sup>2</sup> )
St. 37	210,000	370	240	140	80,000
St. 42	210,000	420	250	160	80,000
St. 50	210,000	500	300	200	80,000
St. 52	210,000	520	320	200	80,000
St. 60	210,000	600	360	220	80,000
St. 70	210,000	700	420	260	80,000

โดยตารางที่ 3.1 (ที่มา: ชนะ กลีภาร์, 2528) จะแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ต่างชนิดกัน โดยสิ่งที่สนใจคือค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear strength) แล้วนำค่าที่แสดงในตารางมาคำนวณตามสมการดังต่อไปนี้

$$T = \frac{\tau \pi d^3}{16} \quad (3.1)$$

- กำหนดให้
- T = แรงบิด (นิวตัน.เมตร)
  - $\tau$  = ความต้านแรงเฉือน (นิวตันต่อตารางเมตร)
  - d = ขนาดความโตของชิ้นงานทดสอบ (เมตร)

นำค่าความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) จากตารางมาแทนในสมการ โดยการคำนวณจะยกตัวอย่างเฉพาะเหล็กกล้า St. 37 จะได้

$$T = \frac{(140)(3.14)(6^3)}{16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{5938}{1000}$$

$$= 5.94 \text{ นิวตัน.เมตร}$$

จากการคำนวณเหล็กกล้า St. 37 จะได้ค่าแรงบิดที่เหล็กกล้าชนิดนี้จะสามารถทนได้ โดยวัสดุทุกชนิดในตารางจะแสดงดังตารางที่ 3.2

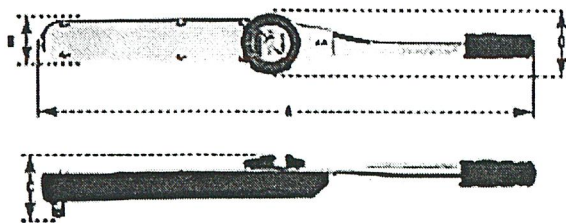
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าจากการคำนวณแรงบิด

Material	Shear strength (MN/m <sup>2</sup> )	T <sub>6 mm.</sub> (N.m)	T <sub>10 mm.</sub> (N.m)
St 37	140	5.9346	27.475
St 42	160	6.7824	31.4
St 50	200	8.478	39.25
St 52	200	8.478	39.25
St 60	220	9.3258	43.175
St 70	260	11.0214	51.025

จากการคำนวณแสดงให้เห็นถึงค่าแรงบิดที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันคือขนาด 6 ม.ม. และขนาด 10 ม.ม. จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเลือกช่วงของตัววัดแรงบิดจากตารางที่ 3.3 (ที่มา: [www.cditorque.com](http://www.cditorque.com), 2547)

ตารางที่ 3.3 แสดงช่วงของประแจที่มีขายในท้องตลาดยี่ห้อหนึ่ง

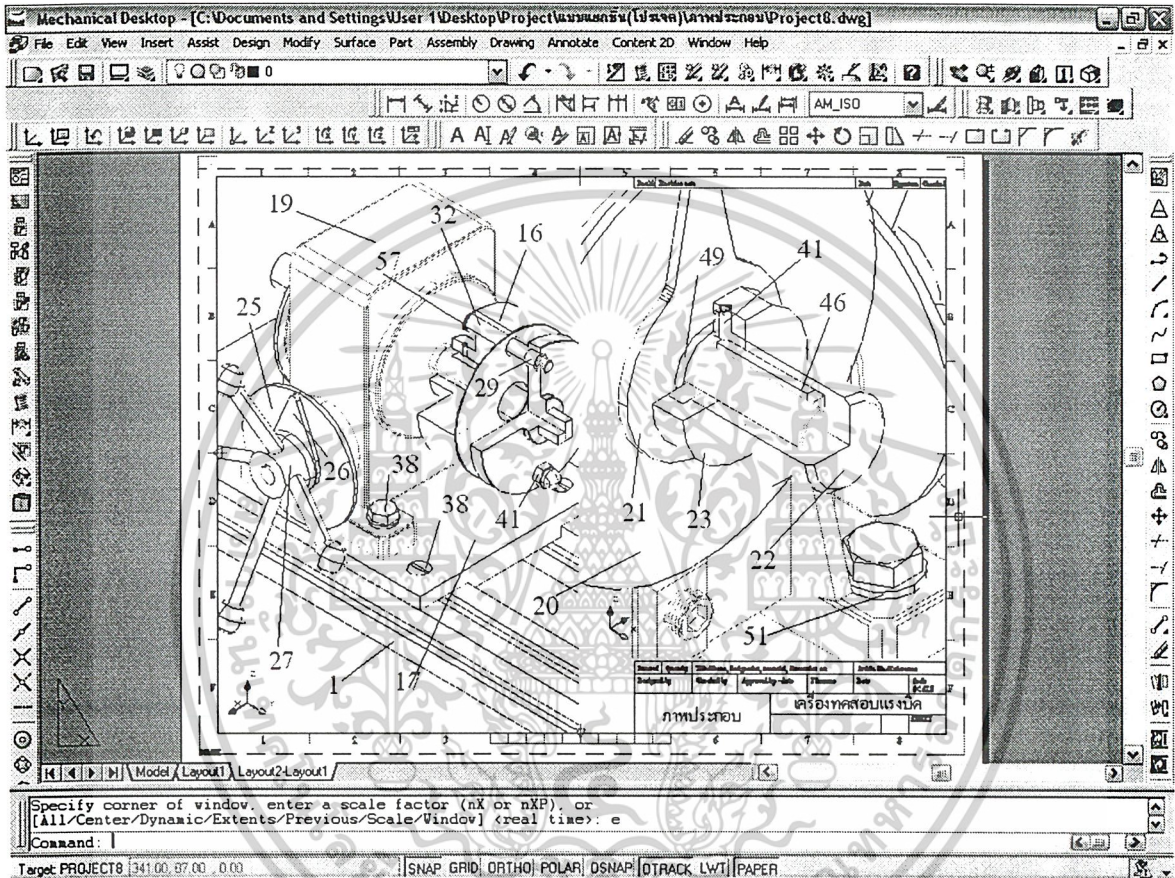
Part Number	Torque Range	Drive Size	Incr.	A in. [mm]	B in. [mm]	C in. [mm]	D in. [mm]	Wt. lbs. [Kg]
1.81NLDNP	0-1.8 Nm	1/4"	.05 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.85 (.39)
3.51NLDNP	0-3.5 Nm	1/4"	.1 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.85 (.39)
91NLDNP	0-9 Nm	1/4"	.2 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.85 (.39)
92NLDNP	0-9 Nm	3/8"	.2 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.85 (.39)
182NLDNP	0-18 Nm	3/8"	.5 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.85 (.39)
302NLDNP	0-30 Nm	3/8"	.5 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.85 (.39)
352NLDNP	0-35 Nm	3/8"	1 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.85 (.39)
702NLDNP	0-70 Nm	3/8"	2 Nm	14.47 (367.54)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	1.48 (.67)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบและการเขียนแบบชิ้นส่วน

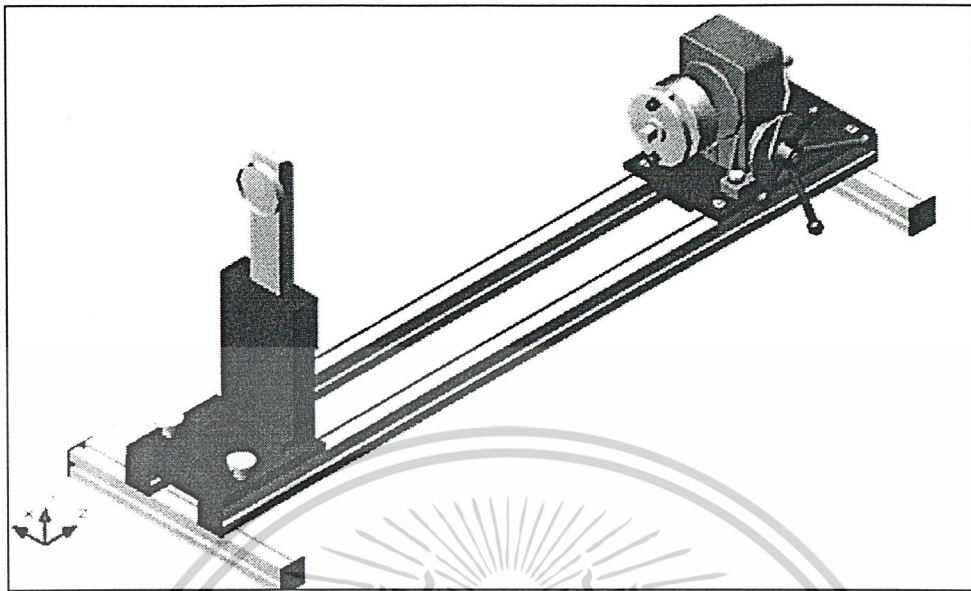
ในการออกแบบเครื่องทดสอบแรงบิดนั้น ได้มีการนำโปรแกรมเข้ามาช่วยเพื่อลดขั้นตอนในการเขียนแบบด้วยวิธีเดิมและยังช่วยให้สามารถทำการแก้ไขได้อย่างสะดวกโดยโปรแกรมที่พูดถึงนี้คือ MECHANICAL DESKTOP 2004 ซึ่งสามารถใช้ร่วมกับโปรแกรมในการออกแบบพื้นฐานอย่าง AUTO CAD ได้ โดยประโยชน์ที่ชัดเจนคือการเขียนชิ้นส่วนมาตรฐานทำได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว เพื่อประโยชน์ในการขึ้นรูปชิ้นงานได้สะดวกต่อไป



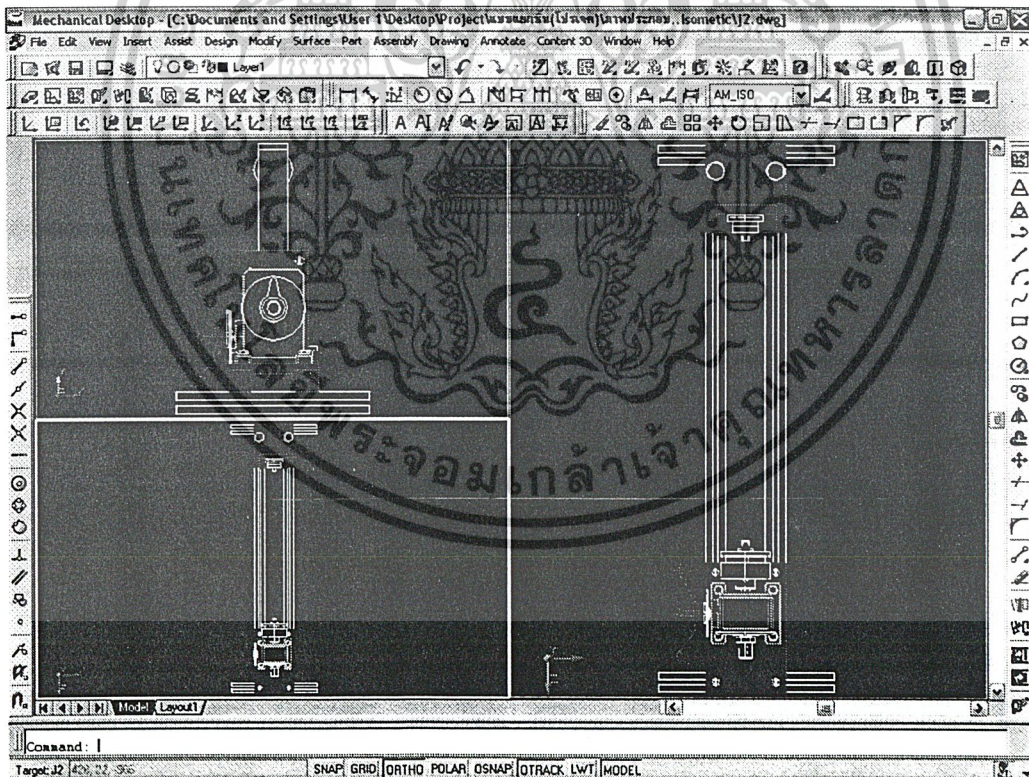
รูปที่ 3.2 การเขียนภาพโดยโปรแกรม MDT 2004

นอกจากนั้นแล้วเพื่อความสะดวกในการมองเห็นในด้านที่เราให้ความสนใจจึงมีวิธีการสร้างรูปในแต่ละมุมมองให้แยกจากกันดังแสดงจากรูปที่ 3.3 และ 3.4 อีกทั้งยังสามารถเขียนเป็นแบบตั้งงานได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

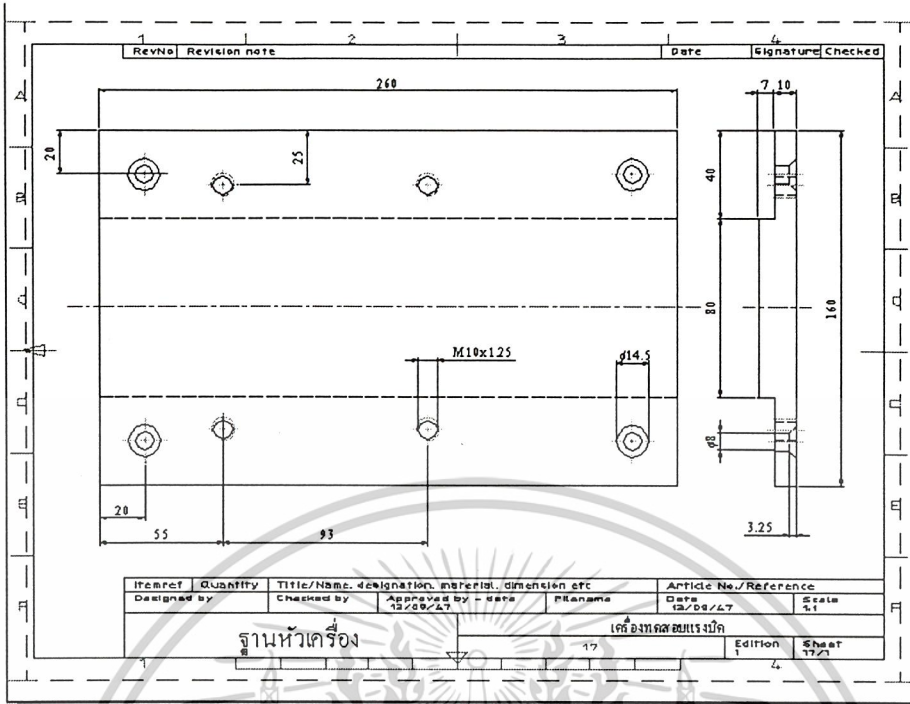


รูปที่ 3.3 แสดงภาพไอโซเมตริกของเครื่องทดสอบแรงบิด

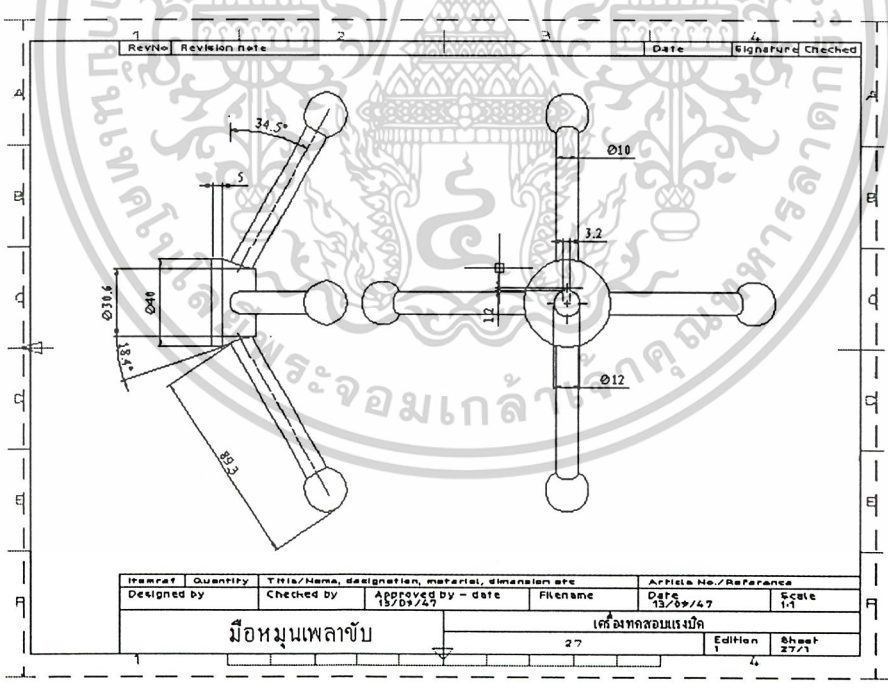


รูปที่ 3.4 แสดงมุมมองหลายมุมมองที่เกิดจากโปรแกรม MDT 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงแบบแยกชิ้นที่เกิดจากโปรแกรม



รูปที่ 3.6 แสดงรูปมือหมุนที่ออกแบบจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 วิธีการทดสอบการบิดของชิ้นงานทดสอบ

#### 3.5.1 ขั้นตอนการทดสอบ

เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ที่เกิดจากการขึ้นรูปตามแบบและขนาดที่มาตรฐานกำหนดไว้แล้วนั้น (สามารถดูภาพเขียนแบบได้จากภาคผนวก ก.) ให้เริ่มต้นทำการทดลองตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตั้งตำแหน่งมือหมุนให้แผ่นบอกรองศาด้านหน้าตรงกับแผ่นใสซึ่งองศา โดยให้ชี้ไปที่เลขศูนย์
2. ตั้งตำแหน่งแผ่นบอกรองศาด้านหลังให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์โดยการขันสกรูเกลียวออกแล้วหมุนแผ่นใสซึ่งองศาให้ตรงตำแหน่งศูนย์แล้วทำการขันสกรูเกลียวให้แน่น
3. หมุนตำแหน่งตัวนับให้ขึ้นจำนวนรอบที่นับได้เป็นศูนย์
4. นำลูกบล็อกลูกกลมเหล็กขนาด 3/8" เบอร์ 13 จำนวน 2 ตัวมาใส่ที่ปลายของที่จับทั้งสองด้าน
5. นำชิ้นงานทดสอบที่ทำการขึ้นรูปแล้วมาใส่ระหว่างบล็อกทั้งสองด้าน
6. โดยการยึดชิ้นงานให้แน่นทั้งสองด้านกระทำได้โดยการเลื่อนฐานด้านหลังจนชนชิ้นงาน
7. ล็อคฐานเลื่อนให้แน่นด้วยการหมุนน็อตที่พิมพ์ลายขึ้นรูปให้แน่น
8. เริ่มต้นการหมุนชิ้นงาน โดยให้หมุนมือหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
9. สังเกตและบันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล โดยสามารถดูค่าการบิดได้จากหน้าปัดของประแจวัดแรงบิด โดยตรงและอ่านค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไปจากแผ่นบอกรองศาด้านหลังจากนั้นแปลงค่าองศาให้เป็นเรเดียน โดยการนำค่าองศาที่ได้ไปคูณกับ 0.01745 และจำนวนรอบของการหมุนสามารถอ่านได้จากตัวนับรอบที่ติดกับมือหมุน
10. บิดจนชิ้นงานขาดออกจากกันแล้วนำค่าที่ได้มาคูณด้วย 0.113 เพื่อเปลี่ยนหน่วยเป็น นิวตัน.เมตร
11. นำค่าที่ได้ไปพล็อตลงในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแรงบิด (นิวตัน.เมตร) กับมุมที่เปลี่ยนแปลงไป (องศา)
12. นำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าดังนี้จากสมการที่ 2.6
  - 12.1 Shearing Stress at Proportional Limit (นิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1
  - 12.2 Yield Strength (นิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1
  - 12.3 Shearing Stress at Fracture (นิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.1
  - 12.4 Modulus of Rigidity (G); (นิวตันต่อตารางเมตร) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6
  - 12.5 Average Energy Absorbed per Unit Volume (U)

$$U = \frac{(\tau_{PL}^2)}{4G} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\tau_{PL}$  = Shearing Stress at Proportional Limit

#### 13. วิจัยและสรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

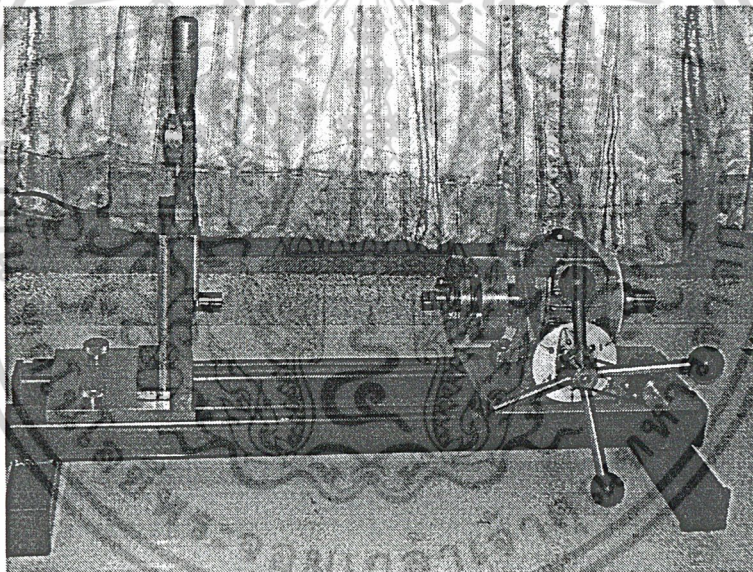


## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 ผลการดำเนินงานของเครื่องทดสอบแรงบิด

ลักษณะโดยรวมของเครื่องทดสอบแรงบิดที่ได้ทำการออกแบบและได้ทำการสร้างขึ้นนี้มีขนาดความกว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร โดยมีแรงบิดที่ใช้ในการทดสอบสูงสุด 600 นิวตัน และจากการที่ได้ทดสอบชิ้นงาน เครื่องทดสอบแรงบิดที่สร้างขึ้นมีความสามารถทดสอบโลหะชนิดต่างๆ ได้ เช่น เหล็กเหนียว ทองเหลือง ทองแดง อลูมิเนียม ที่รับโหลดสูงสุดก่อนการขาดสูงสุดไม่เกิน 600 นิวตัน ซึ่งลักษณะของเครื่องทดสอบจะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4.1 รูปของเครื่องทดสอบแรงบิด

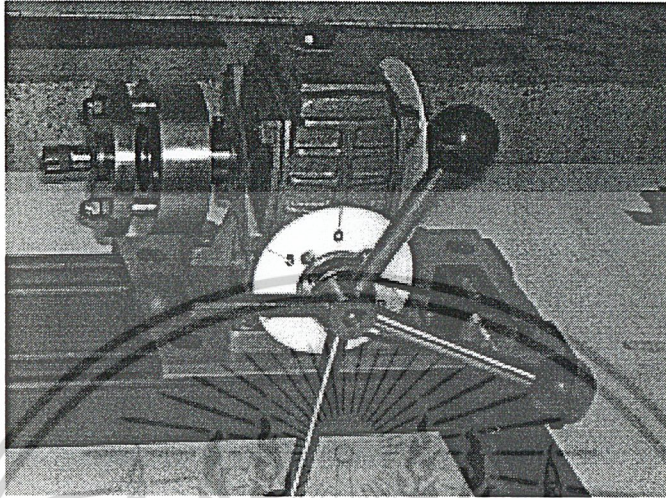
#### 4.2 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบแรงบิด

จากการศึกษามาตรฐานของเครื่องทดสอบแรงบิดได้นำมาออกแบบชิ้นส่วนสำคัญของเครื่องทดสอบแรงบิด ได้มีส่วนสำคัญ 3 ส่วนดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

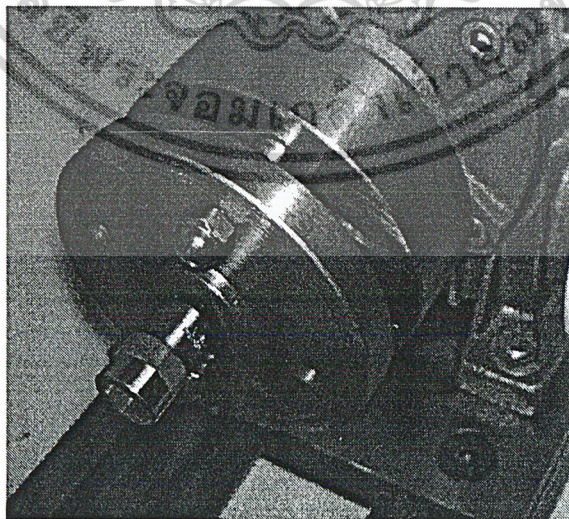
#### 4.2.1 ชุดอยู่กับที่

1. เฟืองทดใช้อัตราทดรอบ 60ต่อ1 ที่เลือกใช้ 60ต่อ1 เนื่องจากเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายและง่ายต่อการแบ่งมุมสเกลองศาของเครื่องทดสอบแรงบิด



รูปที่ 4.2 รูปเฟืองทด

2. หัวจับขึ้นทดสอบ ได้ทำการออกแบบให้เป็นที่สำหรับสวมลูกประแจบล็อกขนาด 3/8 นิ้ว สวมไว้เพื่อเป็นตัวจับยึดขึ้นทดสอบที่ใช้แบบนี้เพราะจากการศึกษาจะพบว่าขึ้นทดสอบแบบเพลากลมธรรมดาและ หัวจับขึ้นงานแบบธรรมดาแล้วจะทำให้เวลาทดสอบขึ้นงานจะเกิดการหลวมหรือหลุดออกจากหัวจับเกิดการหมุนฟรีของขึ้นทดสอบทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้มากดังนั้นจึงออกแบบเป็นแบบนี้ เพื่อใช้ทดสอบขึ้นทดสอบที่มีลักษณะเป็นเพลากเหล็กเหลี่ยมเท่านั้น เพราะการทำแบบนี้จะทำให้ลด ค่าความคลาดเคลื่อนจากการที่ขึ้นทดสอบหมุนฟรีกับหัวจับ ได้มาก

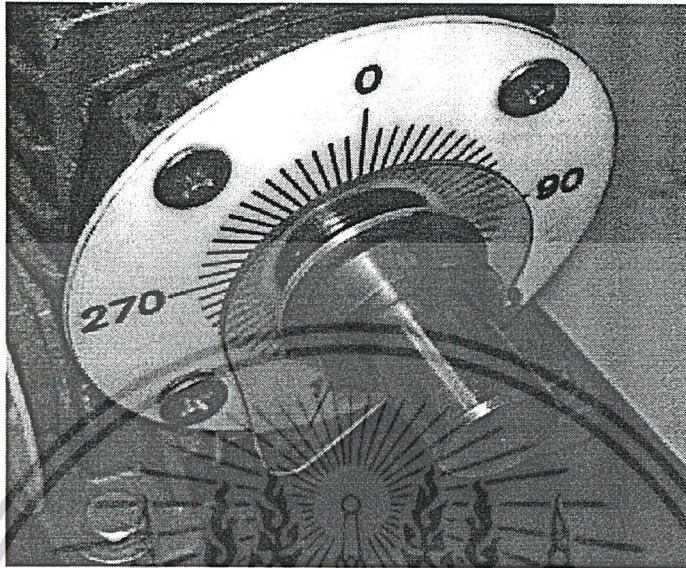


รูปที่ 4.3 รูปหัวจับขึ้นทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

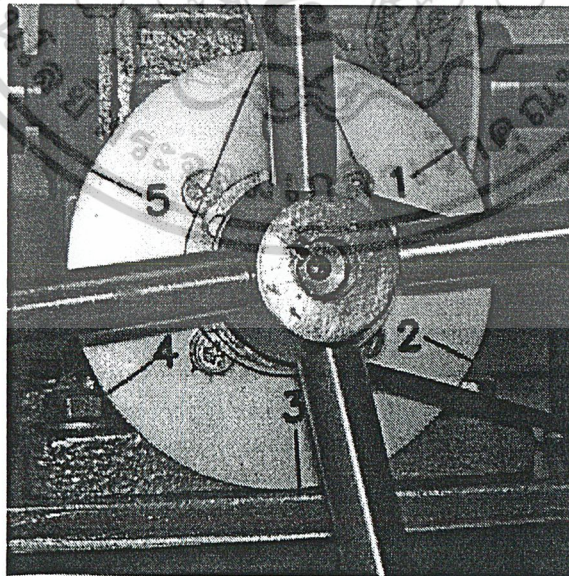
3. แผ่นบอกองศา แผ่นบอกองศาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.1 แผ่นใหญ่ เป็นชั้นที่ใช้บอกองศาจริงของชั้นทดสอบ



รูปที่ 4.4 รูปแผ่นบอกองศาแผ่นใหญ่

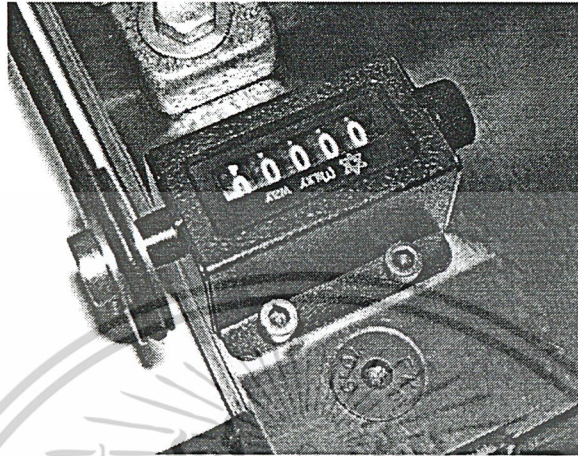
3.2 แผ่นเล็ก จะติดอยู่กับมือหมุนที่ใช้บิดชั้นทดสอบ จากเฟืองทดอัตราทดที่ 60ต่อ1 จะพบว่าเมื่อ หมุนมือหมุนไป 1 รอบจะทำให้ชั้นทดสอบหมุนไปจริงองศา แผ่นองศานี้ทำจากแผ่นอะคริลิกและได้ใช้โปรแกรม Mechanical Desktop ช่วยในการออกแบบการแบ่งสเกล



รูปที่ 4.5 รูปแผ่นบอกองศาแผ่นเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

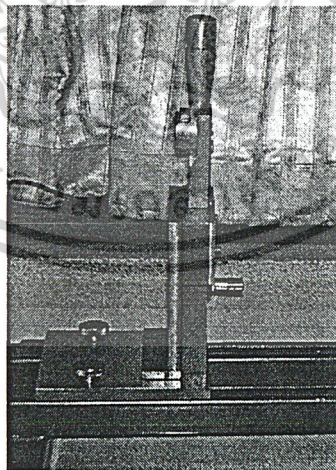
4. ตัวนับรอบเป็นตัวช่วยในการนับรอบของการบิดเพื่อป้องกันการความผิดพลาดจากการลืมของผู้ที่ใช้เครื่องทดสอบ



รูปที่ 4.6 รูปตัวนับรอบ

#### 4.2.2 ชุดเคลื่อนที่

จะสามารถเลื่อนไปมาได้เพื่อให้ได้ขนาดตามชั้นทดสอบ จะประกอบด้วยชิ้นส่วนสำคัญคือ “ตัวประแจทอร์ค” ตัวประแจทอร์ค จะเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญมากในเครื่องทดสอบเนื่องจากเป็นตัวที่ใช้สำหรับ บอกค่าแรงบิดที่เราใช้ไปในการบิดชั้นทดสอบแต่ละค่าที่เราใช้ไป รวมทั้งค่าต่างๆไปจนถึงค่าสุดท้ายที่ทำให้ชั้นทดสอบขาดว่าใช้แรงเท่าใด

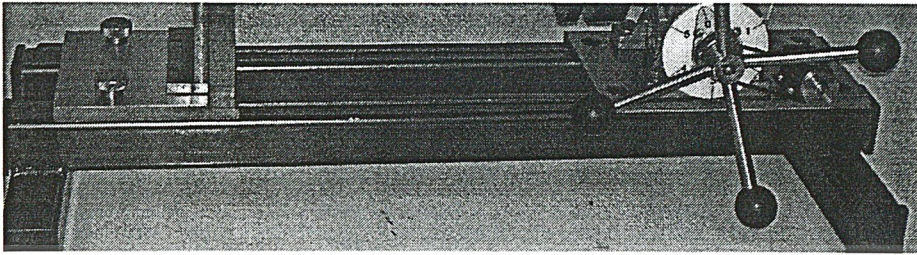


รูปที่ 4.7 รูปชุดเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 รวงเลื่อน

ทำจากเหล็กกล่องหน้าตัด กว้าง 2 นิ้ว ยาว 2 นิ้ว และหนา 5 มม.

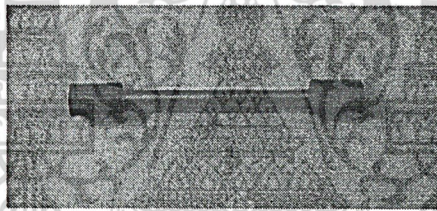


รูปที่ 4.8 รวงเลื่อน

#### 4.3 การทดลองการทำงานของเครื่องทดสอบแรงบิด

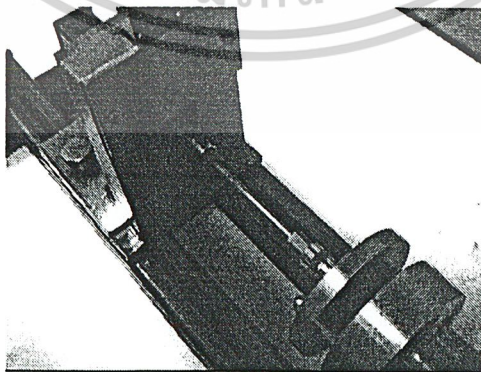
จากการที่ได้ทำการทดลองการทำงานของเครื่องทดสอบแรงบิดมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. นำชิ้นงาน ทดสอบที่เป็นเพลาคเหล็กเหลี่ยมมากสิ่งออกดั่งรูป



รูปที่ 4.9 รูปชิ้นทดสอบ

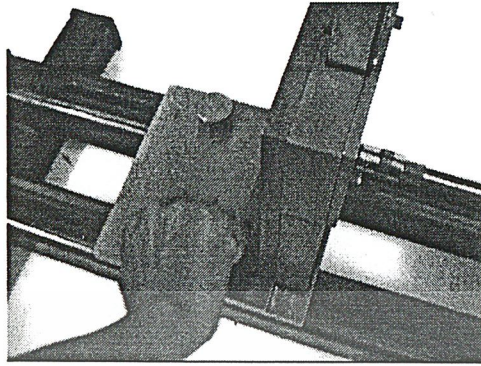
2. ก่อนการทดสอบการบิดจะต้องวัดขนาดชิ้นงานทดสอบแล้วทำการจดบันทึกค่าที่วัดได้
3. นำชิ้นทดสอบไปจับเข้ากับเครื่องทดสอบ



รูปที่ 4.10 แสดงการจับชิ้นทดสอบ

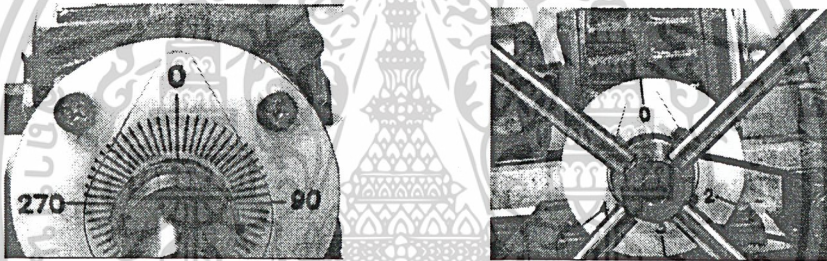
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการล็อกชุดเคลื่อนที่ให้แน่นโดยการบิดน็อตที่พิมพ์ลายไว้แล้ว



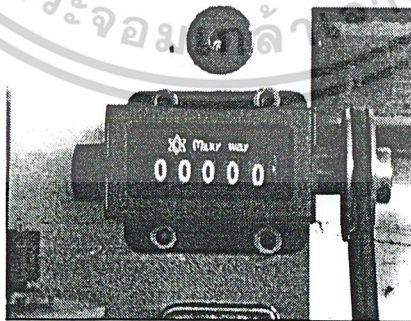
รูปที่ 4.11 รูปแสดงการล็อกชุดเคลื่อนที่

5. ปรับเข็มที่แผ่นบอกองศาทั้งสองแผ่นให้ตรงที่ศูนย์



รูปที่ 4.12 รูปแสดงปรับเข็มที่แผ่นบอกองศาทั้งสองแผ่นให้ตรงที่ศูนย์

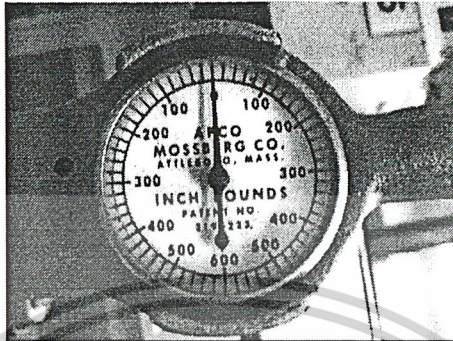
6. ปรับตัวนับรอบให้ตรงที่ศูนย์



รูปที่ 4.13 รูปแสดงการปรับตัวนับรอบให้ตรงที่ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ปรับค่าที่ประแจให้ตรงศูนย์



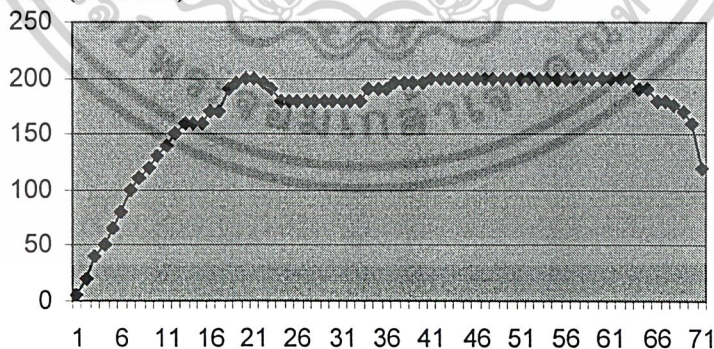
รูปที่ 4.14 รูปแสดงการปรับค่าที่ประแจให้ตรงศูนย์

8. เริ่มทำการบิดขึ้นทดสอบ
9. จดบันทึกค่าของแรงค่าต่างๆที่แปรผันตามองศาต่างๆองศาที่บิดไป
10. นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟและทำการคำนวณ

4.4 ผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุโดยการบิดนั้นได้ทำการทดสอบเหล็กกล้า 9S20 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และระยะ  $L$  เท่ากับ 80 มิลลิเมตรจำนวน 10 ชิ้นและจากการทดลองได้นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.15-4.24 ได้ดังนี้

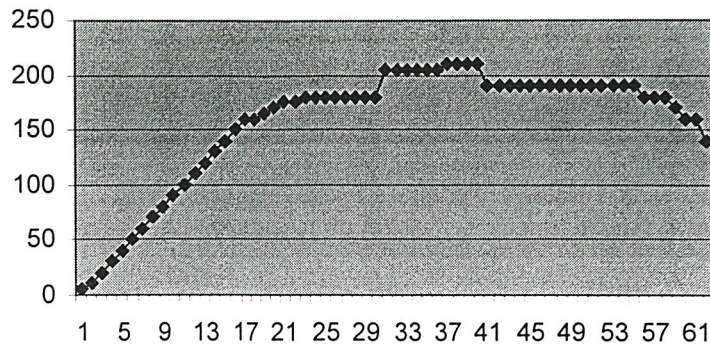
แรงบิด(นิวตัน)



รูปที่ 4.15 แสดงค่าของขึ้นทดสอบขึ้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

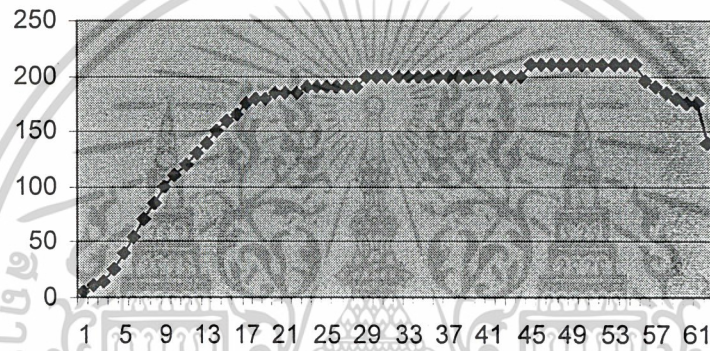
แรงบิด(นิว.ปอนด์)



มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.16 แสดงค่าของจันทดสอบจีนที่ 2

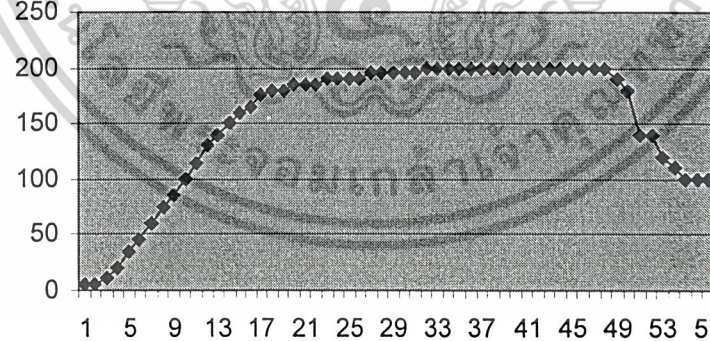
แรงบิด(นิว.ปอนด์)



มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.17 แสดงค่าของจันทดสอบจีนที่ 3

แรงบิด(นิว.ปอนด์)

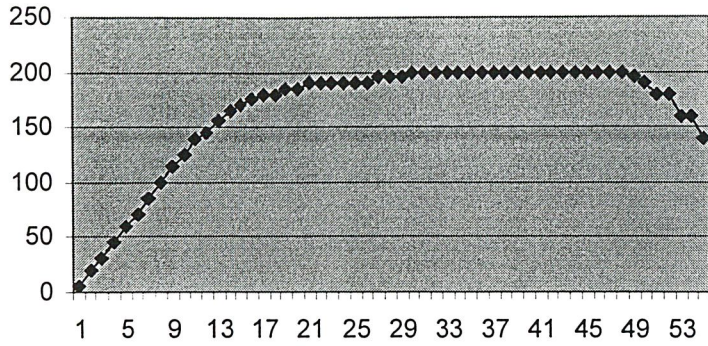


มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.18 แสดงค่าของจันทดสอบจีนที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

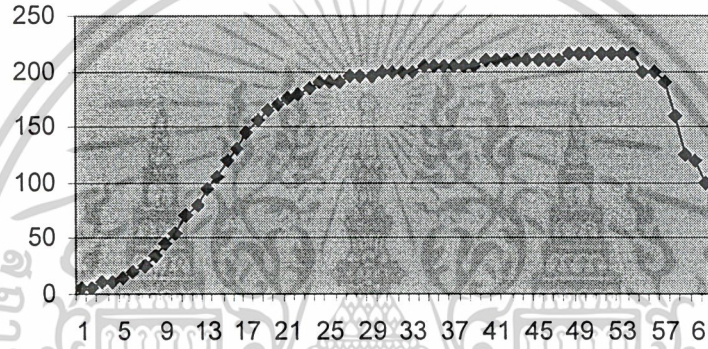
แรงบิด(นิว.ปอนด์)



มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.19 แสดงค่าของขั้นตอนสอบชิ้นที่ 5

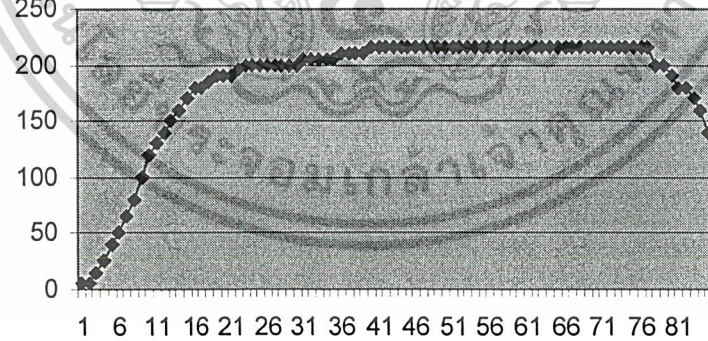
แรงบิด(นิว.ปอนด์)



มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.20 แสดงค่าของขั้นตอนสอบชิ้นที่ 6

แรงบิด(นิว.ปอนด์)

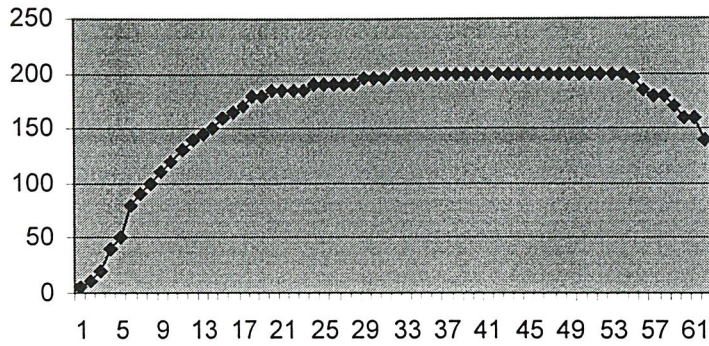


มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.21 แสดงค่าของขั้นตอนสอบชิ้นที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

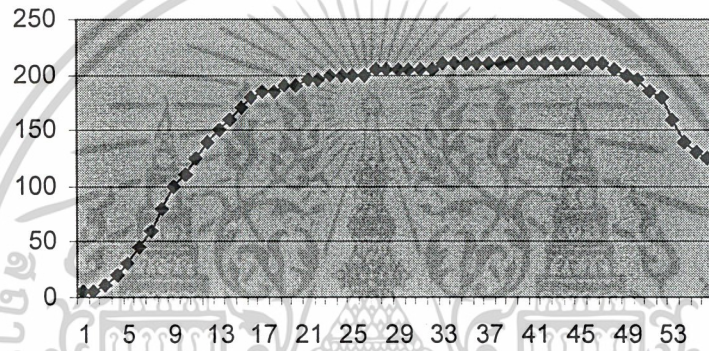
แรงบิด(นิว.ปอนด์)



มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.22 แสดงค่าของจันทดสอบชิ้นที่8

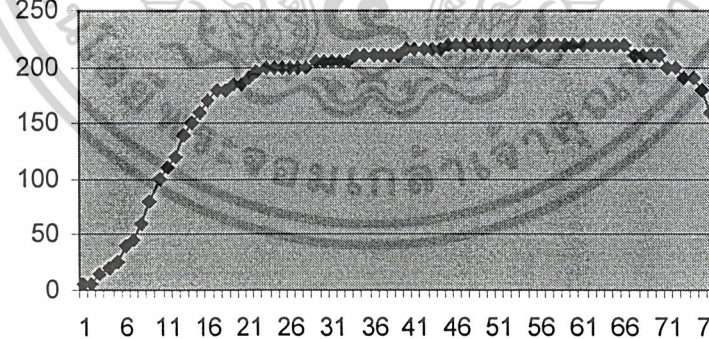
แรงบิด(นิว.ปอนด์)



มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.23 แสดงค่าของจันทดสอบชิ้นที่9

แรงบิด(นิว.ปอนด์)



มุมบิด (องศา)

รูปที่ 4.24 แสดงค่าของจันทดสอบชิ้นที่10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าต่างๆของชิ้นทดสอบ

ชั้นที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความยาว L (มม.)	จุดProportional Limit (นิวตัน.เมตร)	ค่าสูงสุดก่อนชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน.เมตร)	ค่า $\sigma$ จากการคำนวณ (นิวตันต่อตารางเมตร)
1	6.1	80	16.95	23.73	380
2	6.1	80.1	18.08	23.73	405
3	6	80	16.95	23.17	399
4	6	80	15.82	22.6	373
5	5.9	80.2	15.82	22.6	392
6	6.02	79.9	16.95	23.17	395
7	5.9	80	14.69	21.47	364
8	6	80	16.95	23.17	399
9	6	80	16.95	23.17	399
10	5.9	80	15.82	22.04	395

4.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องทดสอบแรงบิด

จากค่าแรงบิดของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการทดลองนำมาหาค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่เหล็กของชิ้นทดสอบกำหนดไว้ที่  $360\text{N/mm}^2$  (ที่มา: บรรณเลข ศรนิล และ ประเสริฐ ก๊วยสมบูรณ์, 2524, หน้าที่ 118 เหล็กอัด โนมัด)

หาค่าเฉลี่ยเท่ากับ

$$\frac{380 + 405 + 399 + 373 + 392 + 395 + 364 + 399 + 399 + 395}{10} = 390 \quad \text{นิวตันต่อตารางเมตร}$$

$$\% \text{ค่าความผิดพลาดเท่ากับ} \quad \frac{360 - 390}{360} \times 100 = 8.33\%$$

จากการทดสอบชิ้นงานซึ่งเป็นเหล็กกล้า 9 S 20 จำนวน 10 ชิ้นซึ่งจะมีค่าความคลาดของชิ้นทดสอบเท่ากับ

8.33%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

1. สามารถสร้างเครื่องทดสอบแรงบิดได้ตามที่ทำการออกแบบไว้และจากการทดสอบเหล็กกล้า 9 S 20 ผลที่ได้จากการทดสอบคือค่าที่ได้ออกมาจากการทดสอบชิ้นงานทดสอบจำนวน 10 ชิ้นจะพบว่าจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 8.33%
2. จากการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบแรงบิดนี้เครื่องทดสอบจะสามารถทดสอบ โลหะหรือเหล็กชนิดต่างๆ ได้เฉพาะที่มีลักษณะเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมเท่านั้นและแรงสูงสุดก่อนที่โลหะชนิดนั้นจะขาดจะต้องไม่เกิน 600 นิวตัน
3. เครื่องทดสอบแรงบิดนี้ไม่สามารถอ่านค่าละเอียดได้เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่ามีความละเอียดต่ำ

#### 5.2. ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการทดสอบนั้นใช้อุปกรณ์วัดทอร์คเป็นตัวอ่านค่าจึงทำเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้ เมื่อค่าที่ได้คลาดเคลื่อนขอแนะนำให้นำอุปกรณ์นั้นไปทำการสอบเทียบ
2. ชิ้นทดสอบนั้นจะต้องผ่านการเจียรระโน เท่านั้นเพราะถ้าชิ้นทดสอบไม่เรียบจะทำให้เกิดค่าที่คลาดเคลื่อนได้

## หนังสืออ้างอิง

- พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2536. วัสดุศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- รศ.บรรเลง ศรีนิต และ ผศ.ประเสริฐ ก้วยสมบัติ, 2524. ตารางงานโลหะ. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ชนะ กสิภาร, 2528. ความแข็งแรงของวัสดุ. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2525. การทดสอบเหล็กและเหล็กกล้า(เล่มที่ 16 การทดสอบลวดเหล็กกล้าโดยการบิด. 200 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- วรวิทย์ เกตุบรรลุ, 2544. เอกสารประกอบการสอน การออกแบบเครื่องจักรกล 1. ชลบุรี : แผนกเทคนิคการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสัตหีบ.
- อรรถพล หิรัญรัตน์, 2544. เอกสารประกอบการสอน ความแข็งแรงของวัสดุ.
- เมธิณี มุกดาสิริ, 2545. เอกสารประกอบการสอน โลหะวิทยา.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

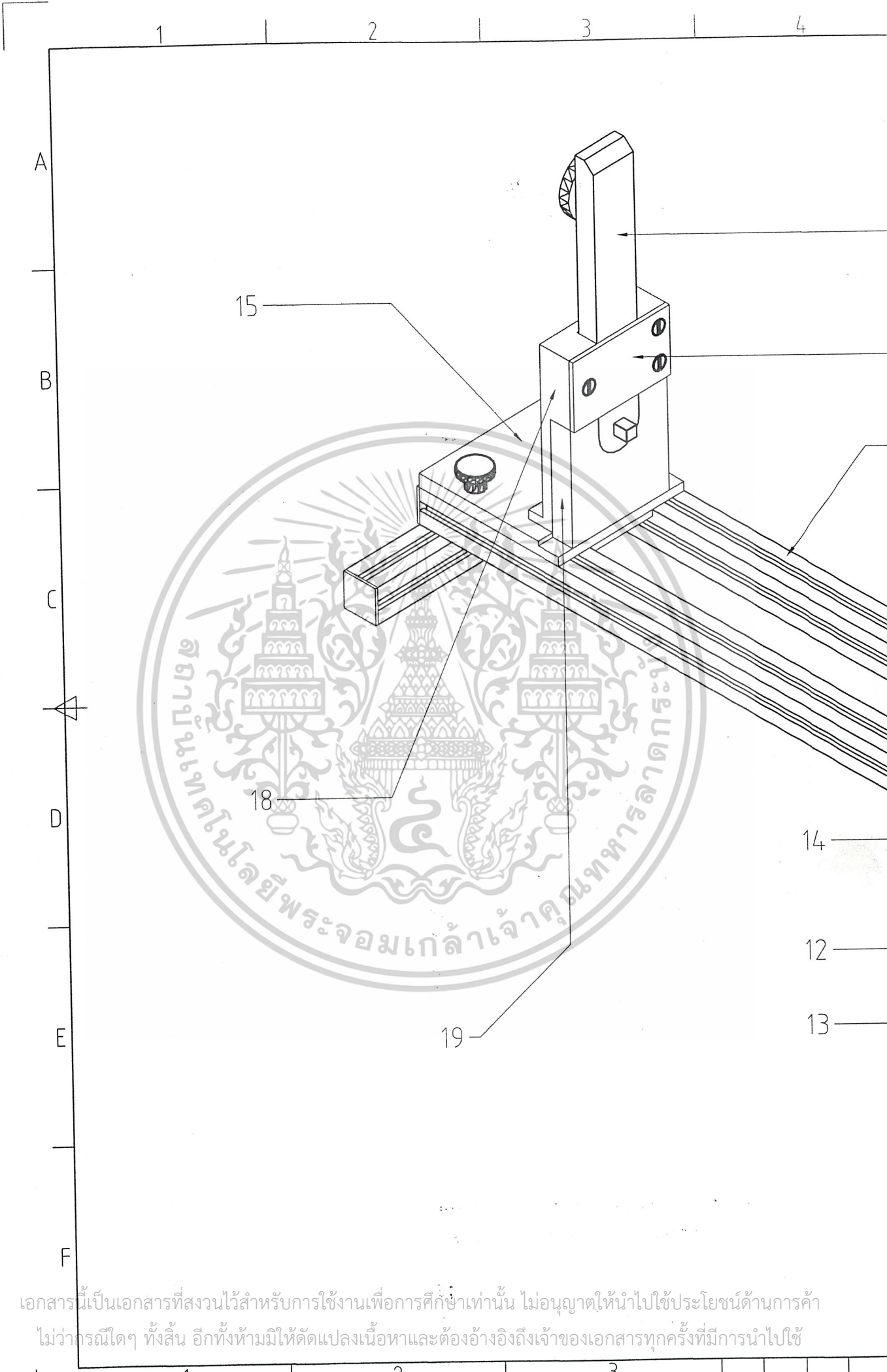
ภาคผนวก ก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



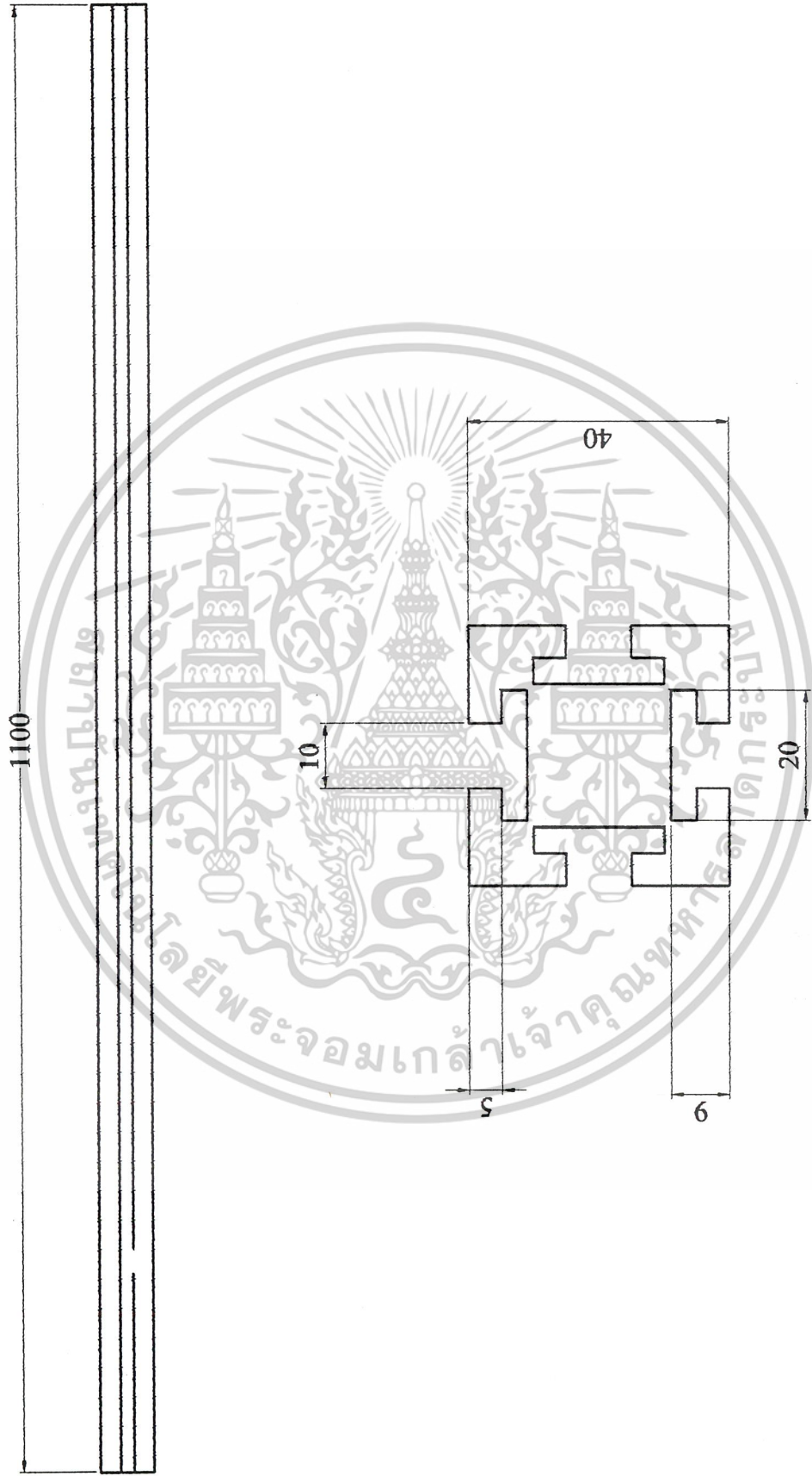
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ผก 2  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RevNo	Revision note	Date	Signature	Checked
-------	---------------	------	-----------	---------

A B C D E F



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
Designed by		Checked by	31/03/2005
Designed by		Checked by	Scale 1:1
Designed by		Checked by	Filename
Designed by		Checked by	เครื่องทดสอบแรงบิด
Designed by		Checked by	Edition 1
Designed by		Checked by	Sheet 1/1

ร่างหน้าทฤษฎี

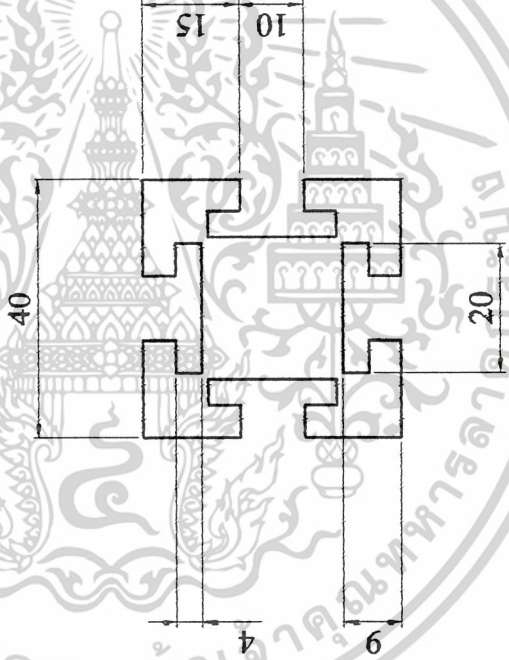
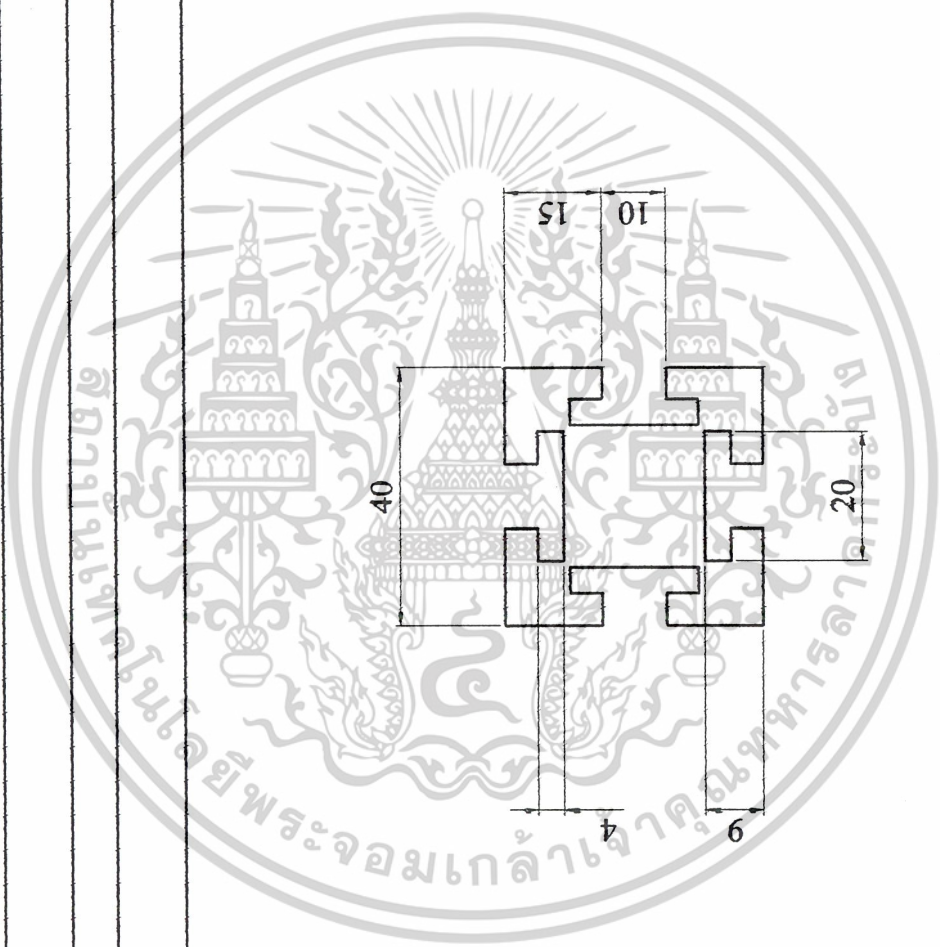
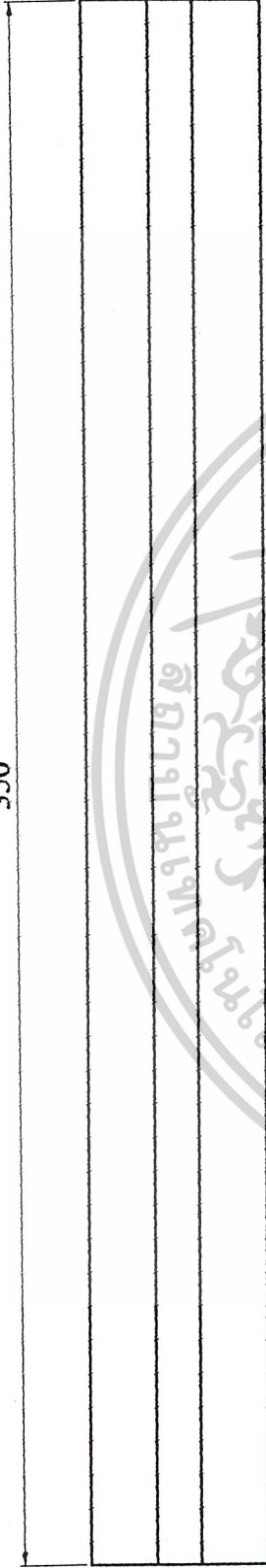
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาแต่อย่างใด ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A B C D E F

RevNo	Revision note	Date	Signature	Checked
-------	---------------	------	-----------	---------

A B C D E F

350



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date 31/03/2005
		Filename	Scale 1:1
<b>ร่างนำหน้าหลัก</b> เครื่องทศอับแรงบีค			Edition 1
			Sheet 2/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A B C D E F

RevNo

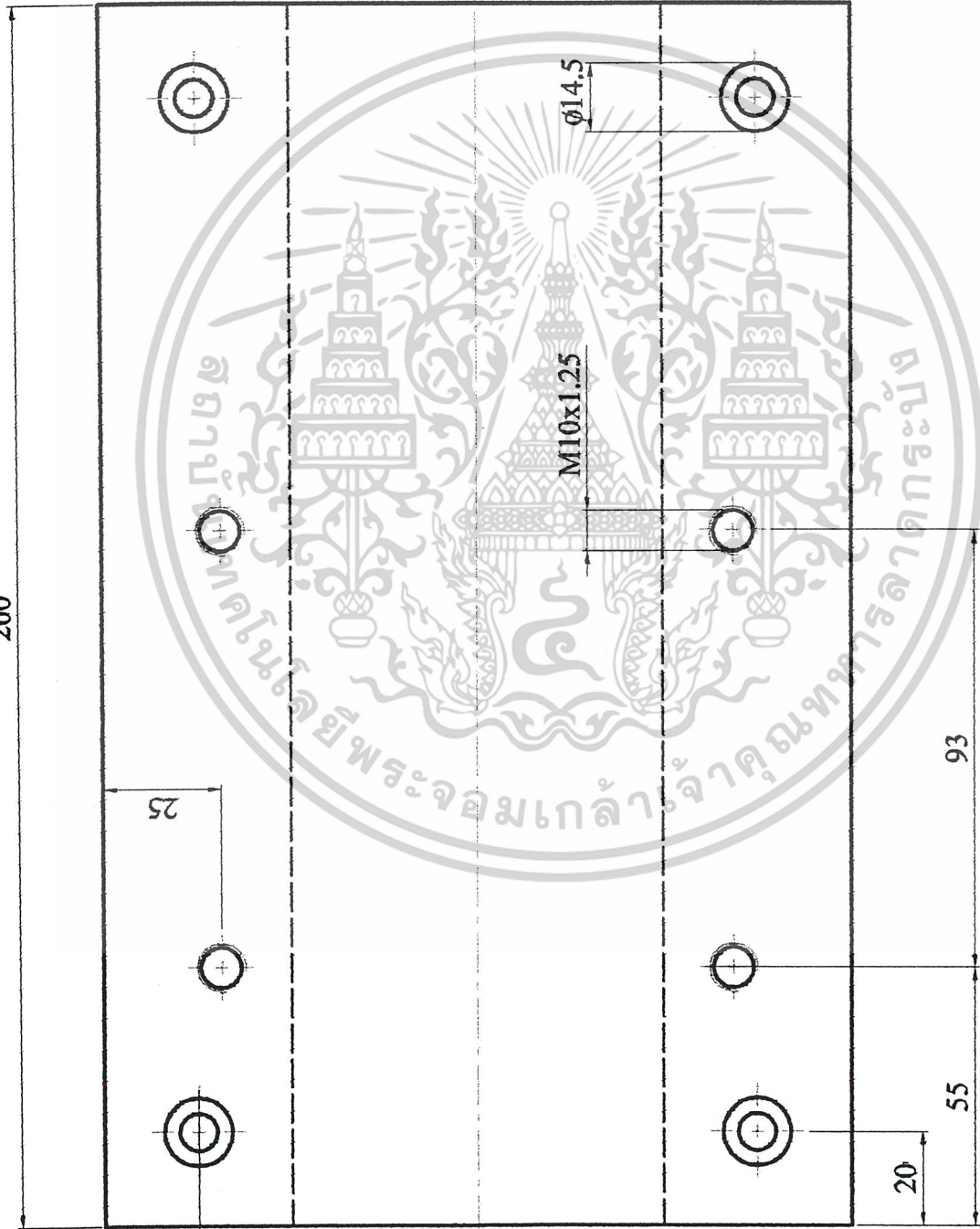
Revision note

Date

Signature

Checked

260



7 10

40

160

80

∅8

3.25



∅14.5

M10x1.25

25

93

55

20

เครื่องทดสอบแรงบิด

ฐานหัวเครื่อง

Article No./Reference

Date 31/03/2005

Scale 1:1

Title/Name, designation, material, dimension etc

Approved by - date

Filename

4

Sheet 4/1

Edition 1

4

4

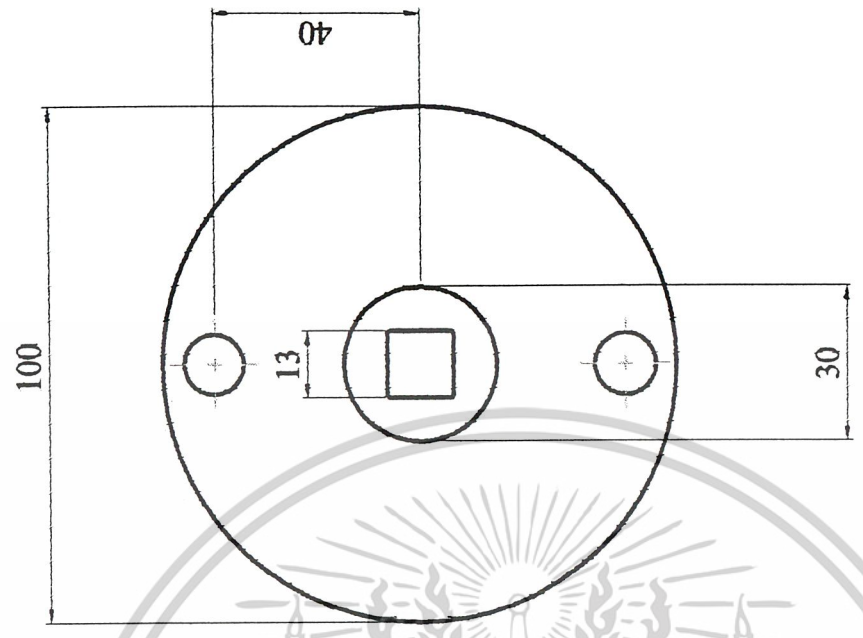
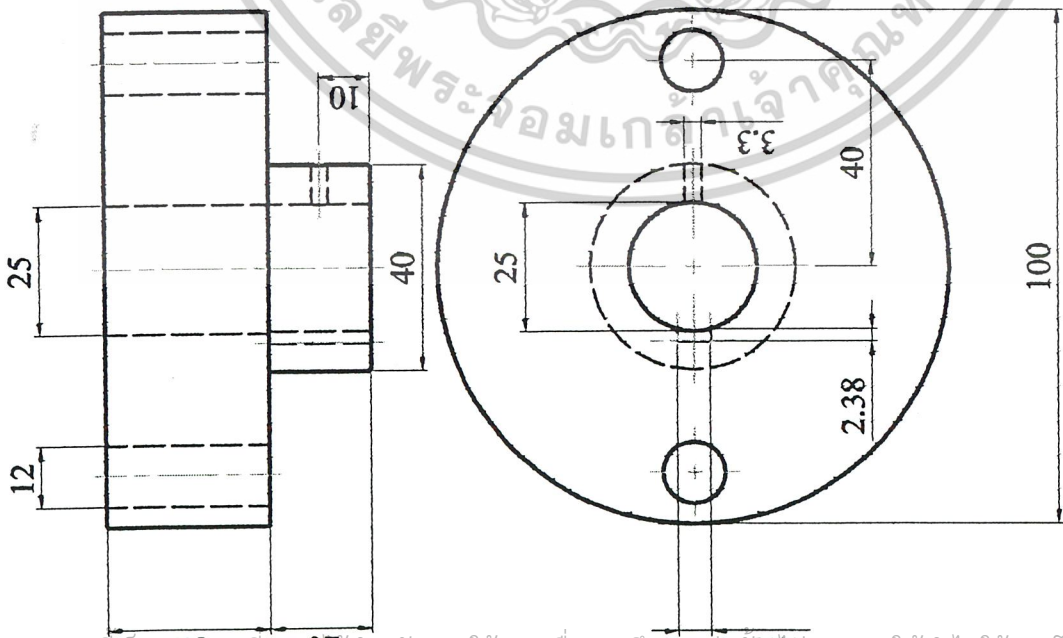
4

4

4

4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรรมสิทธิ์ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
			31/03/2005
			Scale
			1:1
หัวข้อชิ้นงาน			
เครื่องทดสอบแรงบิด			
			Edition
			1
			Sheet
			5/1

A B C D E F

A B C D E F

RevNo

Revision note

Date

Signature

Checked

A

B

C

D

E

F



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
		31/03/2005	13/09/47
Filename		Scale	
เครื่องทดสอบแรงบิด		4:1	
Edition		Sheet	
1		6/1	

แกนหัวจับ

A

B

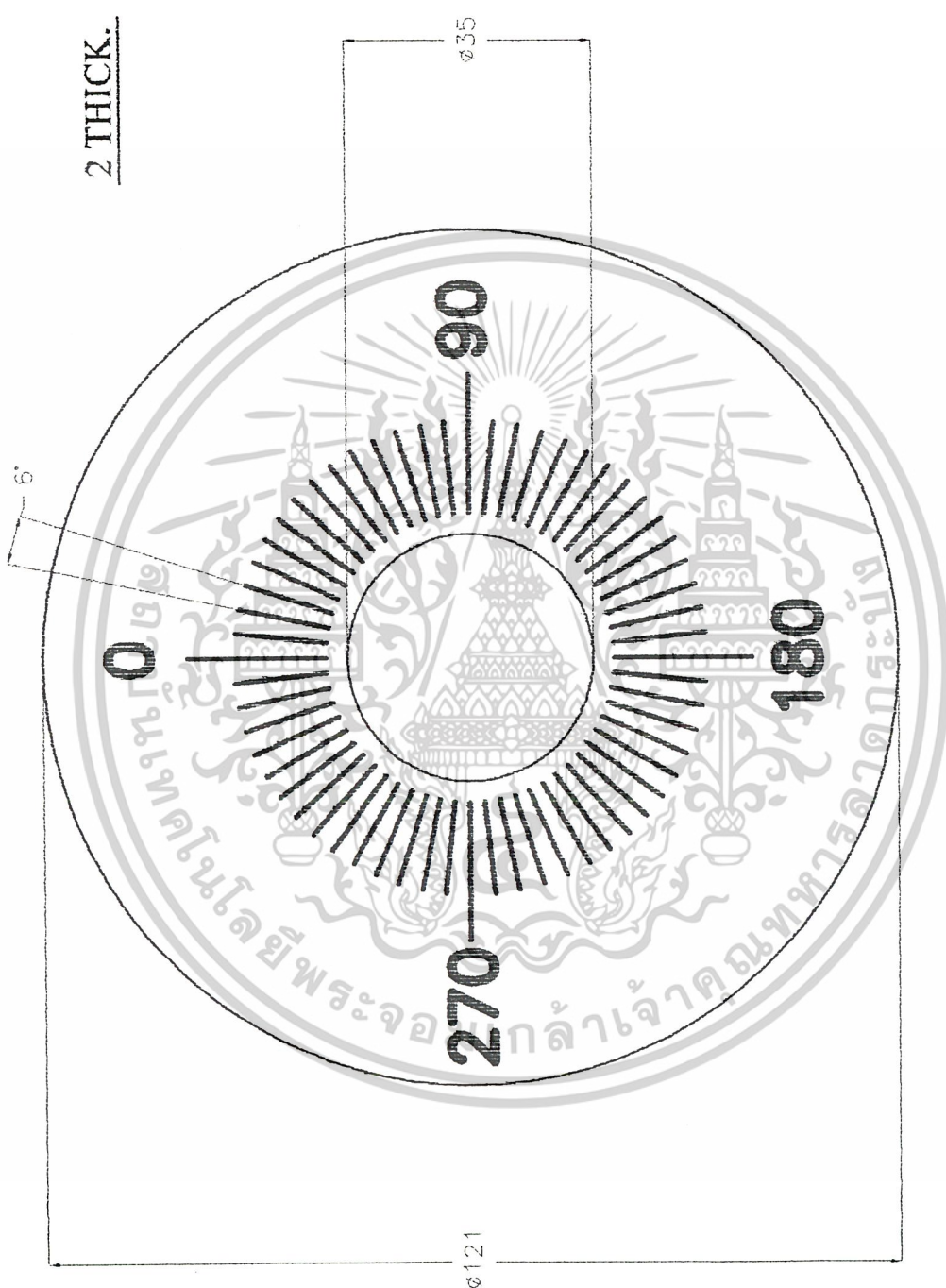
C

D

E

F

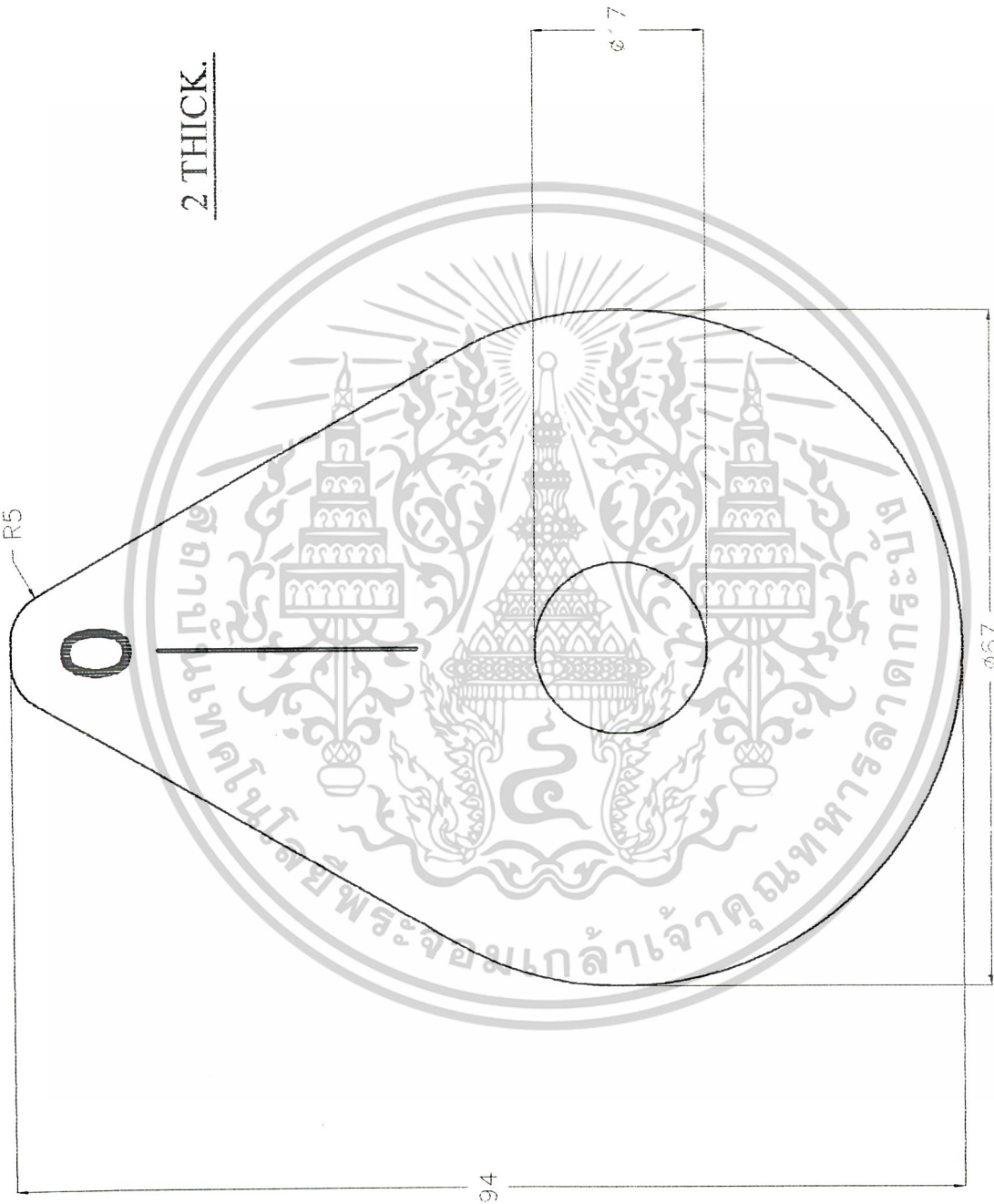
Pertho/ Revision note	Date	Signature	Checked
-----------------------	------	-----------	---------



2 THICK.

Item No.	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
			31/03/2005
			Scale
แผนออกแบบงาน			เครื่องตัดขอบวงรี
แผนออกแบบงาน			Sheet
			1
			8/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งลงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2 THICK.

R5

67

94

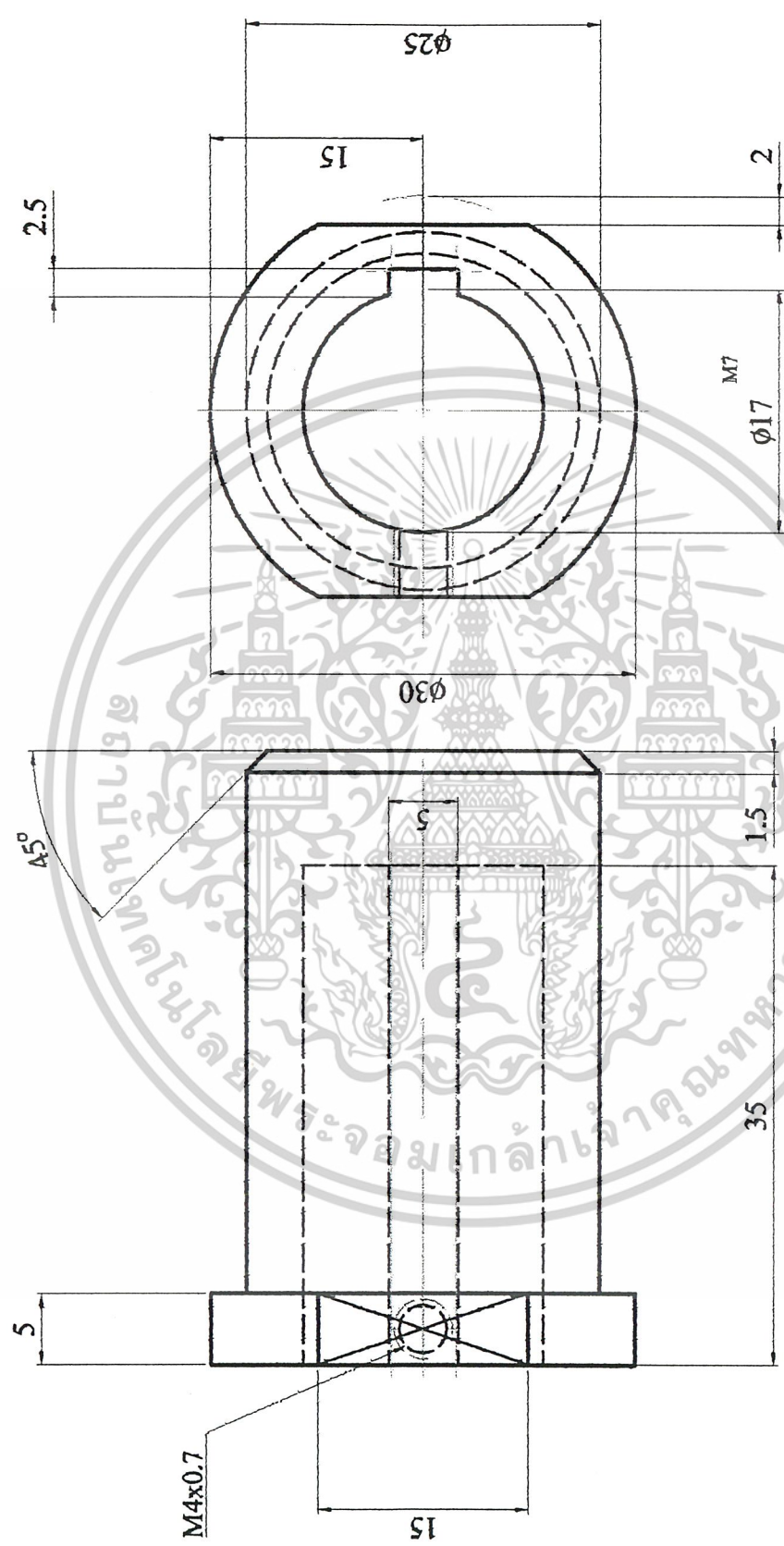
67

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
		Checked by	Date
		Approved by - date	31/03/2005
		Filename	Scale
วิทยาลัยราชภัฏบรฉม Rajabhat Buriram			Edition 1
			Sheet 9/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใดๆทั้งสิ้น "อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้"

RevNo	Revision note	Date	Signature	Checked
-------	---------------	------	-----------	---------

A B C D E F



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date 31/03/2005
		Filename	Scale 3:1

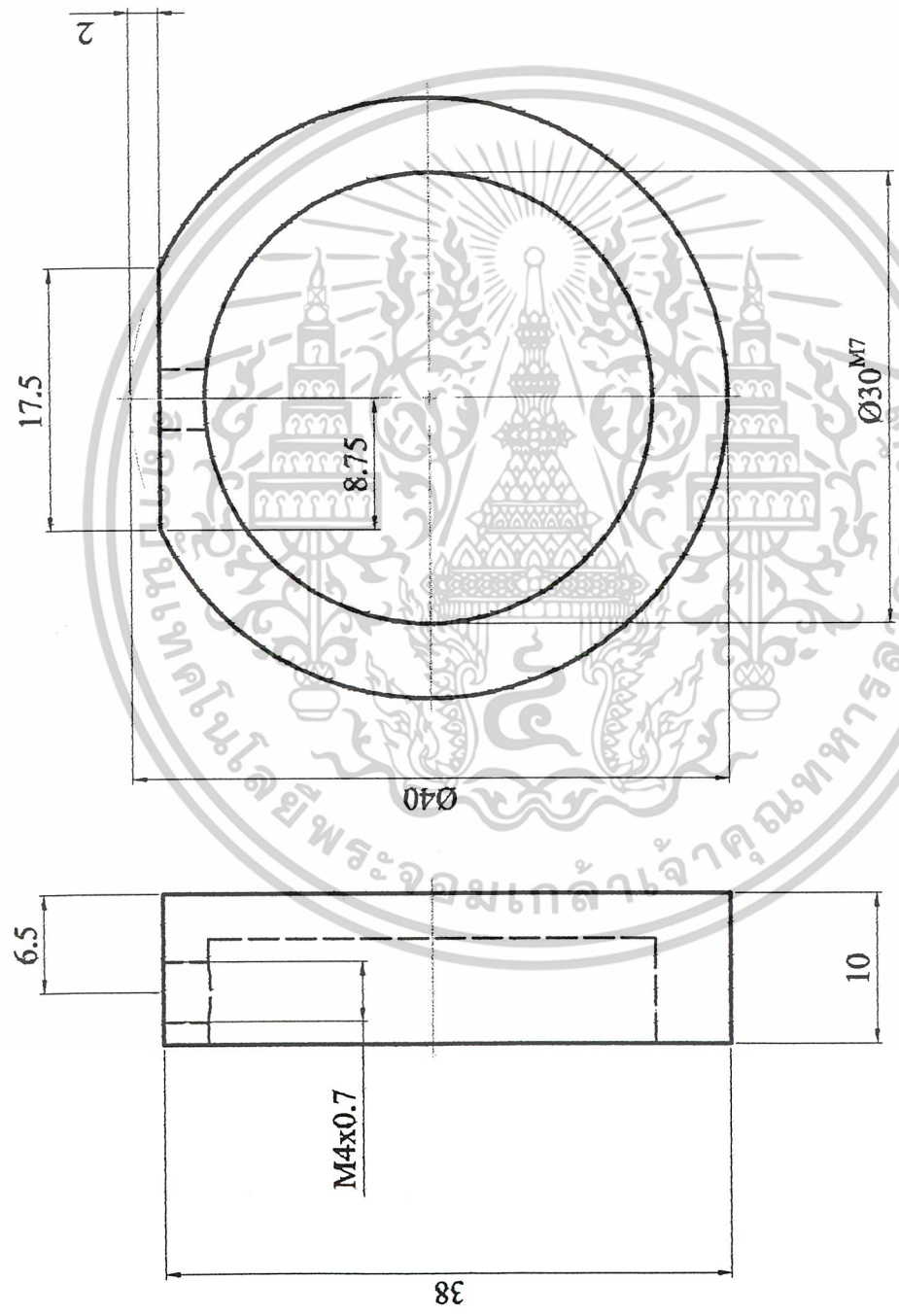
เครื่องทดสอบแรงบิด		Edition 1	Sheet 10/1
<b>ปลอกครอบเพล</b>		10	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A B C D E F

A B C D E F

RevNo Revision note Date Signature Checked



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date 31/03/2005
		Filename	Scale 3:1
แหวนยึดปลอก			Edition 1
เครื่องทดสอบแรงบิด			Sheet 11/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A B C D E F

RevNo

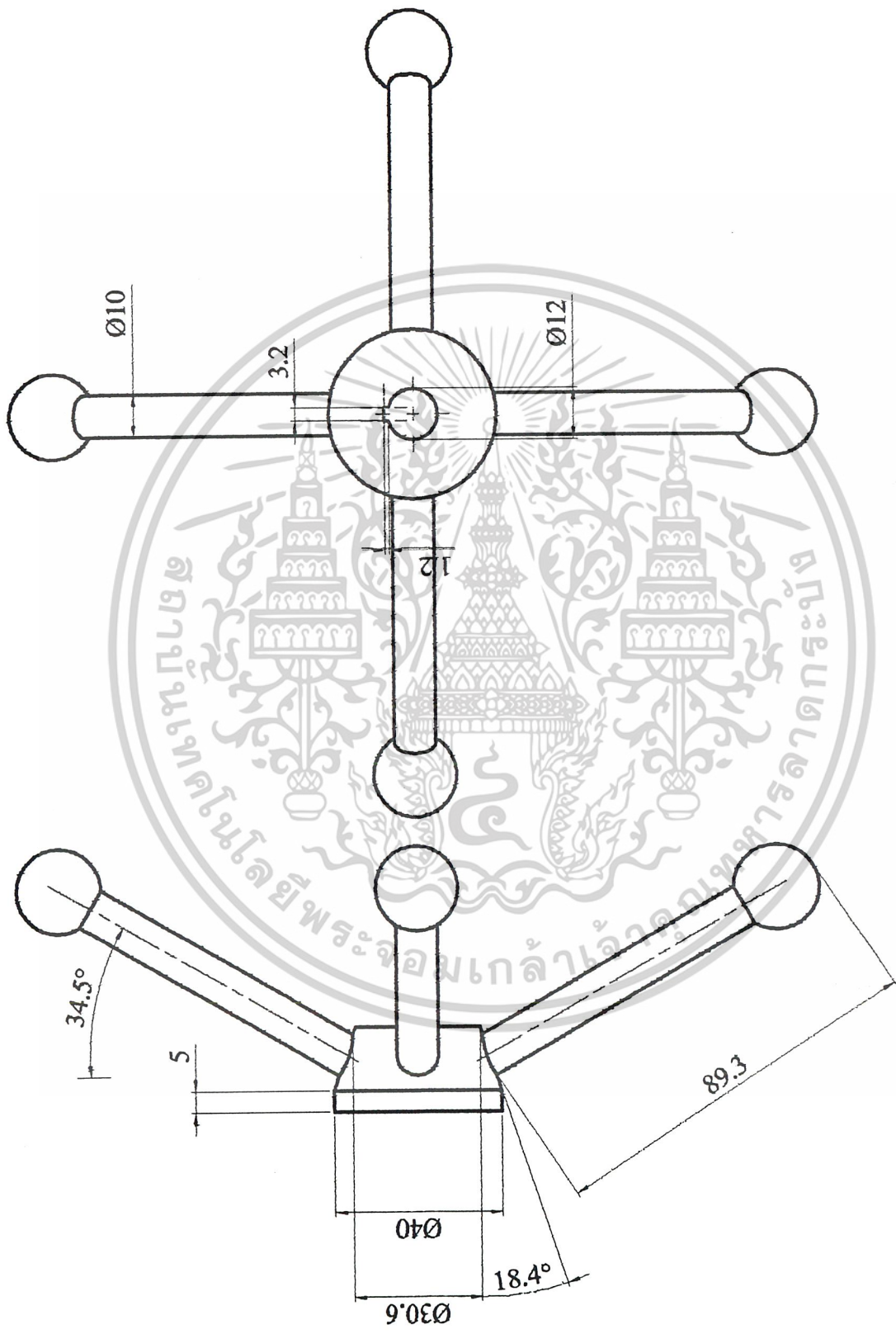
Revision note

Date

Signature

Checked

A B C D E F



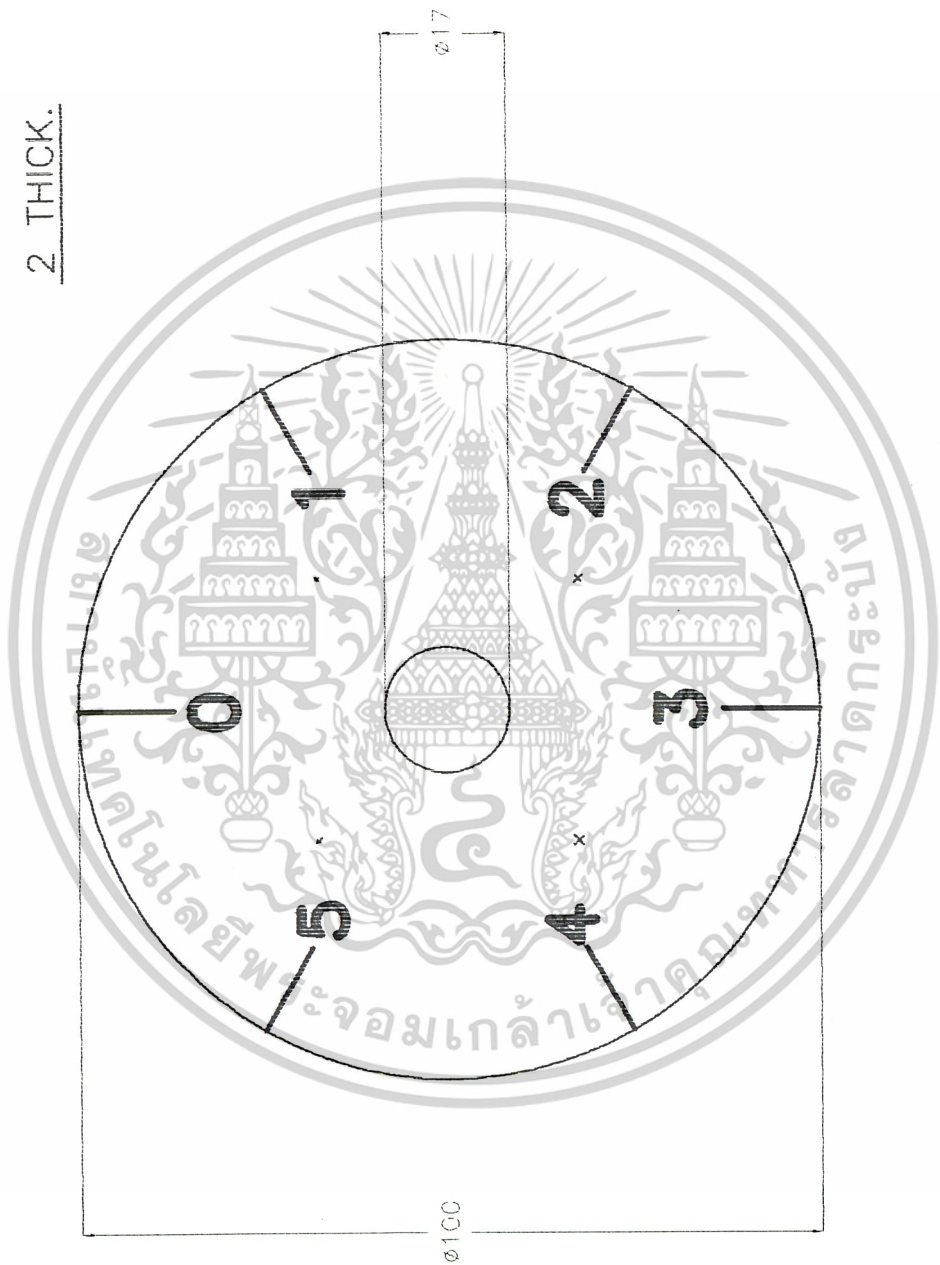
Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
		Filename	Scale
		Article No./Reference	1:1
		Date	31/03/2005
		Edition	1
		Sheet	12/1
		เครื่องทดสอบแรงบิด	
		มือหมุนเพลาคับ	
		12	
		4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A B C D E F

Rev/No	Revision note	Date	Signature	Checked
--------	---------------	------	-----------	---------

2 THICK.



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
		Filename	Scale
		31/03/2005	
ผู้ควบคุมงาน		ผู้ควบคุมงาน	Edition
			1
			Sheet
			12/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Signature

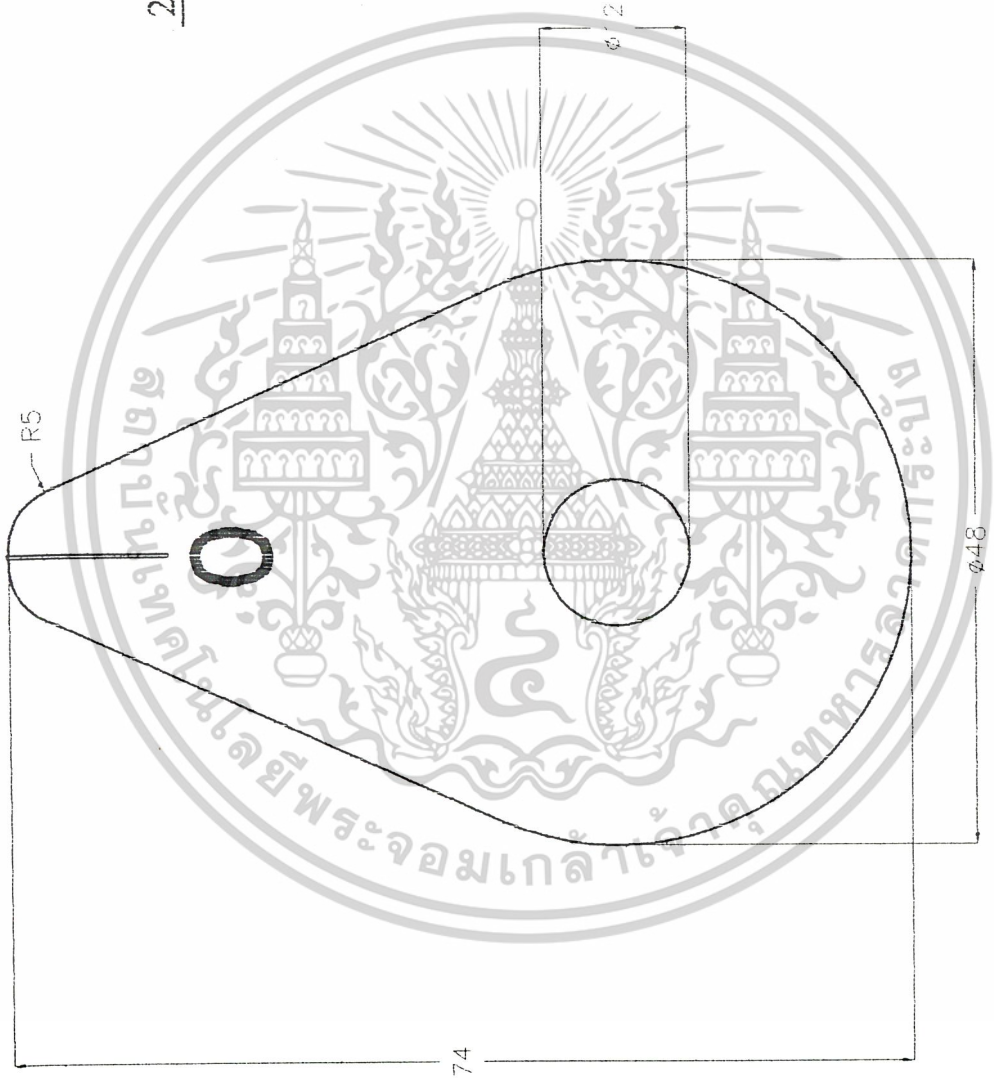
Date

Checked

Rev/No

Revision note

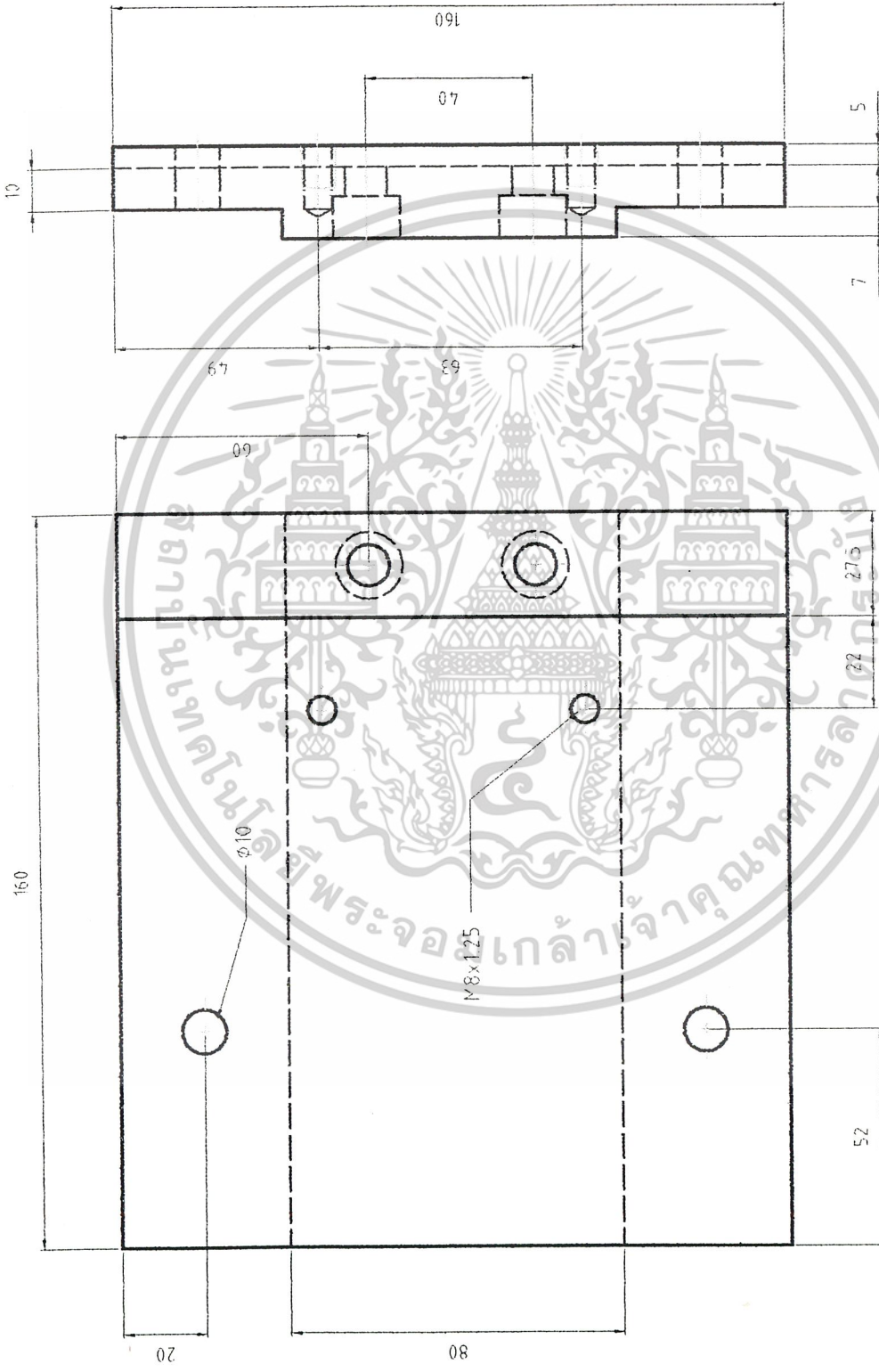
2 THICK.



Item/Ref	Quantity	TR/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
		Filename	Scale
			31/03/2005
แผ่นรองก้าน			เครื่องทดสอบแรงบิด
		16	Sheet 16/1
			Edtion 1

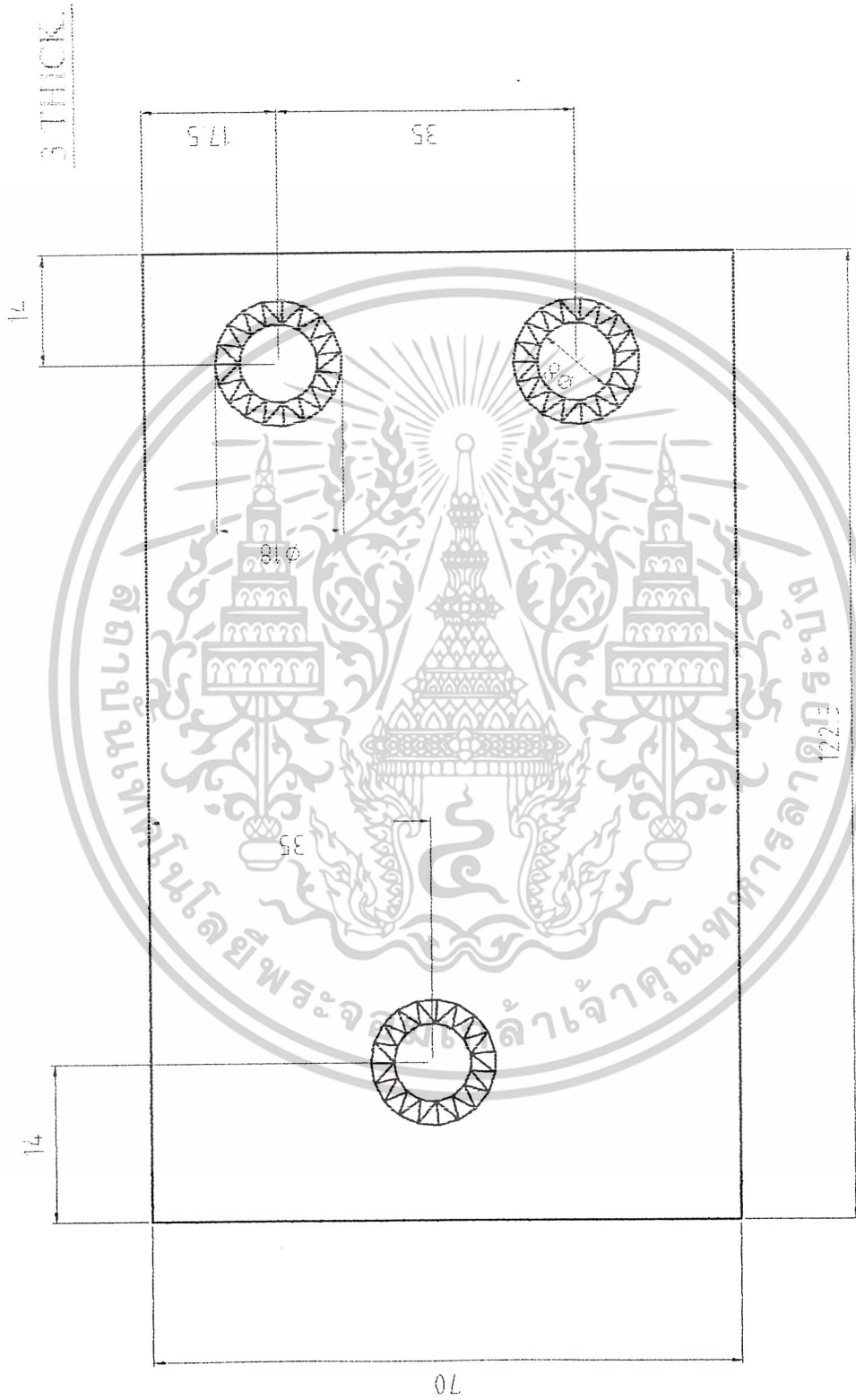
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A B C D E



Item ref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
		Filename	Scale
ฐานเดิน เครื่องทดสอบวัสดุ			31/03/2005
			1
			15/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใดๆ ทั้งสิ้น หากทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



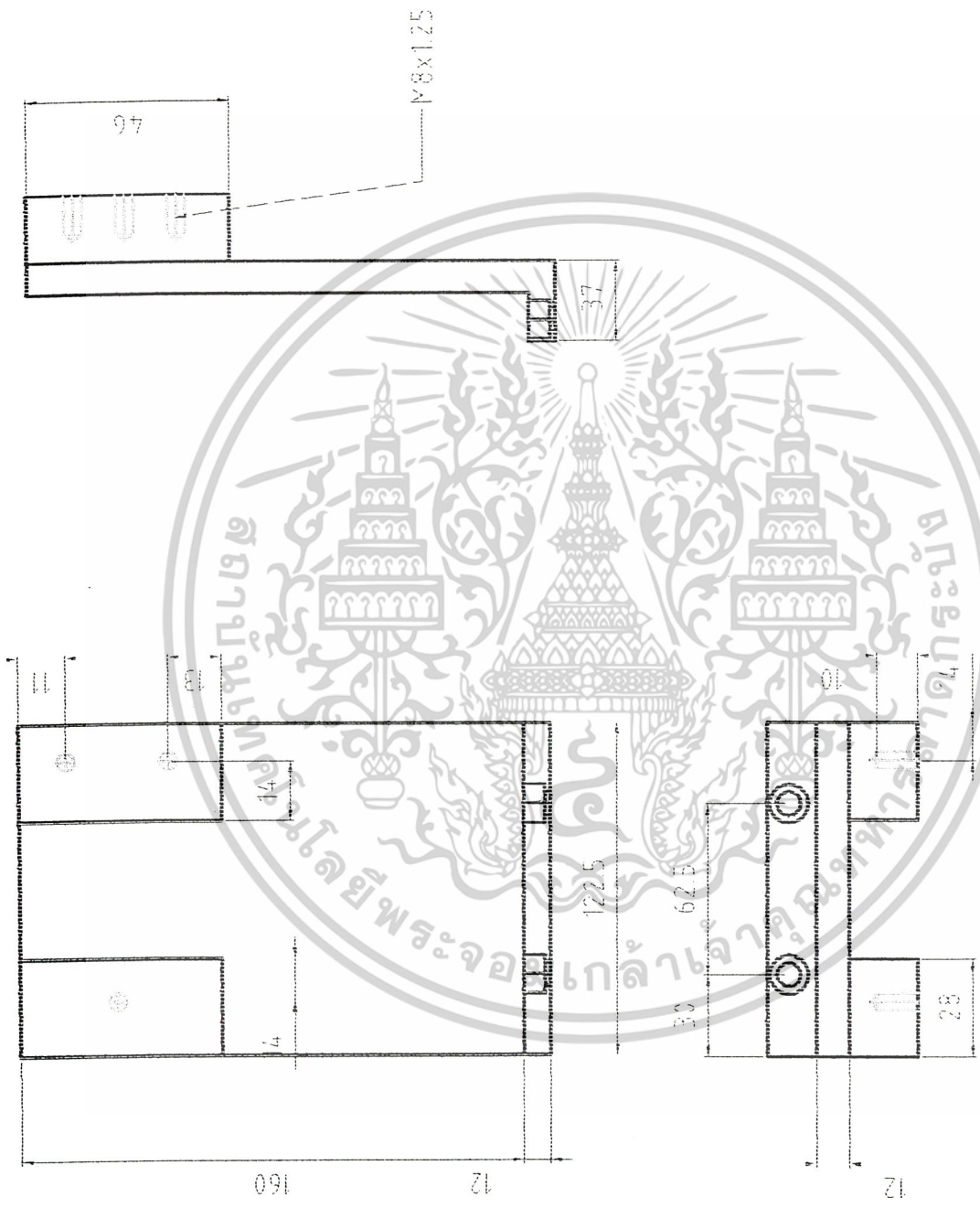
3 THICK

Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
		Filename	Scale
17 14 70 17.5 35			31/03/2005
17 14 70 17.5 35			1
17 14 70 17.5 35			17/1

กรมการช่างศิลป์

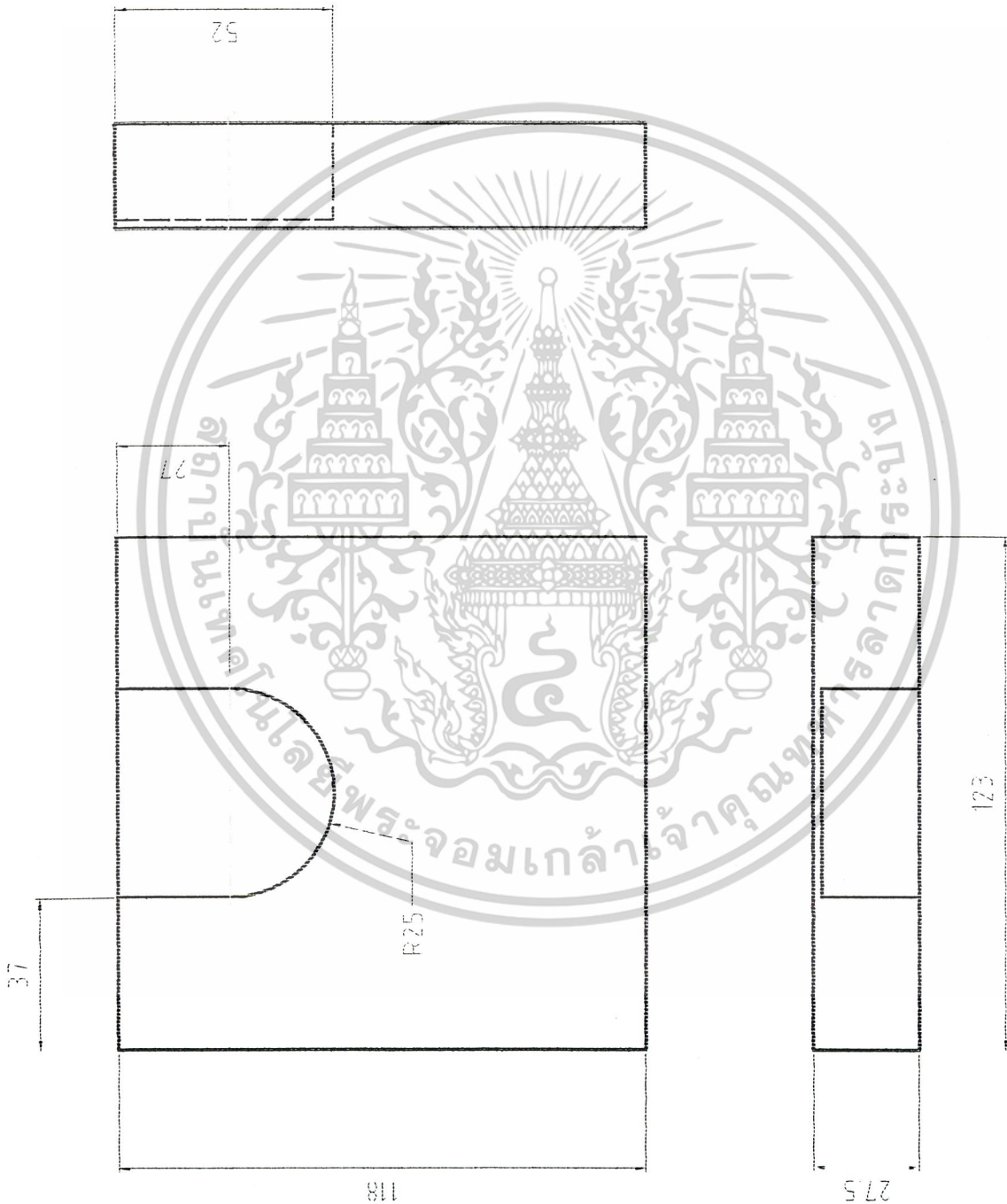
แผนผังประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Item/Ref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by		Checked by	Date
		Approved by - date	Scale
		Filename	
		ชื่อของผู้ออกแบบ	Sheet
		1	10/1
		1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference
Designed by	Checked by	Approved by - date	Date
		Filename	Scale
			31/03/2005
ชานาญประเสริฐ		เครื่องตัดขอบไม้ระแนง	
Edition		Sheet	
1		19/1	

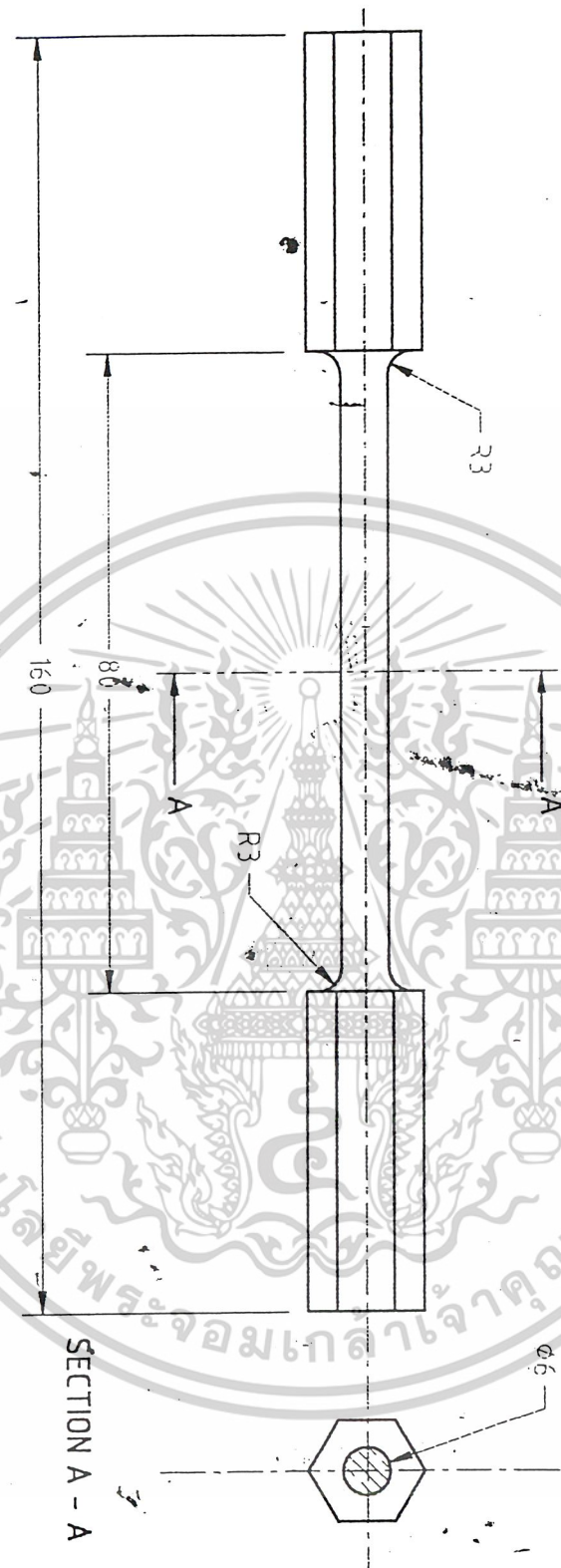
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกัรนำไปใช้



แบบชิ้นงานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ผก 3  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1	2	3	4
RevNo	Revision note	Date	Signature Checked



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Designed by	Checked by Somchai N.	Approved by - date Somchai N.	Filename	Date 1/11/2000	Scale
KMITL			Specimen		
Edition				Sheet 1/1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารตัวอย่างเครื่องทดสอบแรงบิดแบบ SM21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
พษ 2  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

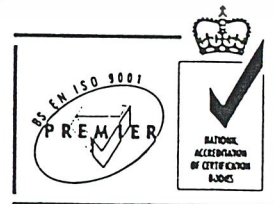


# SM21 Torsion Testing Machine

The equipment described in this manual is  
manufactured and distributed by

**TECQUIPMENT LIMITED**

Suppliers of technological laboratory  
equipment designed for teaching.



---

BONSALL STREET, LONG EATON, NOTTINGHAM, NG10 2AN, ENGLAND.

Tel: +44 (0)115 9722611 : Fax: +44 (0)115 9731520

E-Mail: General Enquiries: *Internet*, [sales@tecquip.co.uk](mailto:sales@tecquip.co.uk)

E-Mail: Parts & Service: *Internet*, [service@tecquip.co.uk](mailto:service@tecquip.co.uk)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ Tecquip Limited. Information is available on the Internet at: <http://www.tecquip.co.uk> นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

© TecQuipment Limited

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording or any information storage and retrieval system without the express permission of TecQuipment Limited. Exception to this restriction is given to bona fide customers in educational or training establishments in the normal pursuit of their teaching duties.

Whilst all due care has been taken to ensure that the contents of this manual are accurate and up to date, errors or omissions may occur from time to time. If any errors are discovered in this manual please inform TecQuipment Ltd. so the problem may be rectified.

A Packing Contents List is supplied with the equipment and it is recommended that the contents of the package(s) are carefully checked against the list to ensure that no items are missing, damaged or discarded with the packing materials.

In the event that any items are missing or damaged, contact your local TecQuipment agent or TecQuipment directly as soon as possible.

# CONTENTS

SECTION		PAGE
1.0	INTRODUCTION	1-1
2.0	ASSEMBLY AND OPERATION	2-1
2.1	Assembly Instructions	2-1
2.2	Operation	2-2
2.2.1	General Notes	2-2
2.2.2	Preparation for Use	2-3
2.2.3	Torsion Test to Failure	2-4
2.2.4	Other Tests and Analysis of Results	2-4
3.0	DESCRIPTION OF THE APPARATUS	3-1
3.1	Introduction	3-1
3.2	Construction	3-1
3.3	Use and Operation	3-2
3.3.1	Use	3-2
3.3.2	Attachment	3-2
3.3.3	Operation	3-3
4.0	THEORY	4-1
4.1	Twisting of a Solid Circular Bar into the Plastic Region	4-1
4.2	Analysis	4-2
4.3	Residual Stress	4-5
4.4	Residual Shear-Stress Distribution	4-5
5.0	EXPERIMENTAL PROCEDURE	5-1
5.1	Introduction	5-1
5.2	Tests on Mild Steel	5-2
5.2.1	Residual Stresses	5-2
5.2.2	Testing in the Plastic Region	5-2
5.2.3	Nominal Shear-Stress versus Shear-Strain	5-4
5.2.4	Fluctuation of Results	5-5
5.3	Other Experiments	5-5
5.3.1	Demonstration of Upper and Lower Yield Points	5-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CONTENTS

SECTION		PAGE
5.3.2	Nominal Shear-Stress versus Shear-Strain for Specimens of Different Diameters	5-6
5.3.3	Tests of Thin Walled Cylinders	5-7
6.0	ANCILLARY SPECIMENS AND EQUIPMENT	6-1
APPENDIX	MACHINE SPECIFICATION	A1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Space Required

For satisfactory use of this equipment a floor area of approximately 1.5 m × 1.5 m (5 ft × 5 ft) is recommended.

## Dimensions and Weights

Nett: 1100 mm (43") × 1300 mm (41") × 1550 mm (61");  
150 kg (330 lb)

Gross: (approximate; as packed for export) 1.2 m<sup>3</sup> (42 ft<sup>3</sup>);  
250 kg (550 lb).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SECTION 1.0 INTRODUCTION

The SM21 Advanced Torsion Testing Machine enables forward and reverse torsion tests on a range of sizes and lengths of specimens requiring test torques of up to 200 Nm (1750 lbf-in). Load is applied by a variable speed electric motor driving through a 5:1 belt drive and a 1200:1 reduction gearbox. The torque reaction is provided by a pendulum whose movement is measured by a linear potentiometer. The potentiometer is connected to a digital meter giving a readout calibrated in torque units (Nm or lbf-in). Input rotation is measured by a digital counter, one unit being equal to  $0.3^\circ$  of the input shaft rotation. The pendulum angle is measured by a scale and pointer. The twist of the specimen can be regarded as the difference between the angle of rotation of the input shaft and the pendulum angle.

The test specimens are held at each end by sockets mounted on the input and pendulum shafts, various sizes being supplied to enable use of a variety of specimens. Although intended for testing larger specimens the machine can also be used for testing the smaller 6 mm/0.25" diameter specimens normally employed on the TecEquipment SM1 Torsion Machine. Accurate measurements of twist angle, and hence of strain can be obtained using the SM2 Torsiometer (small specimens only). The TecEquipment Torsiometers (SM21a and SM21b) can be supplied for use with specimens having hexagonal ends up to 24 mm A/F and also with the Avery-type specimens.

This twist can be taken to be that over the total length of the specimen. For accurate work it is essential to use a torsiometer to measure the twist over a known gauge length. The TecEquipment SM21a Torsiometer is specially designed for this purpose.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SECTION 2.0 ASSEMBLY AND OPERATION

2.1 Assembly Instructions

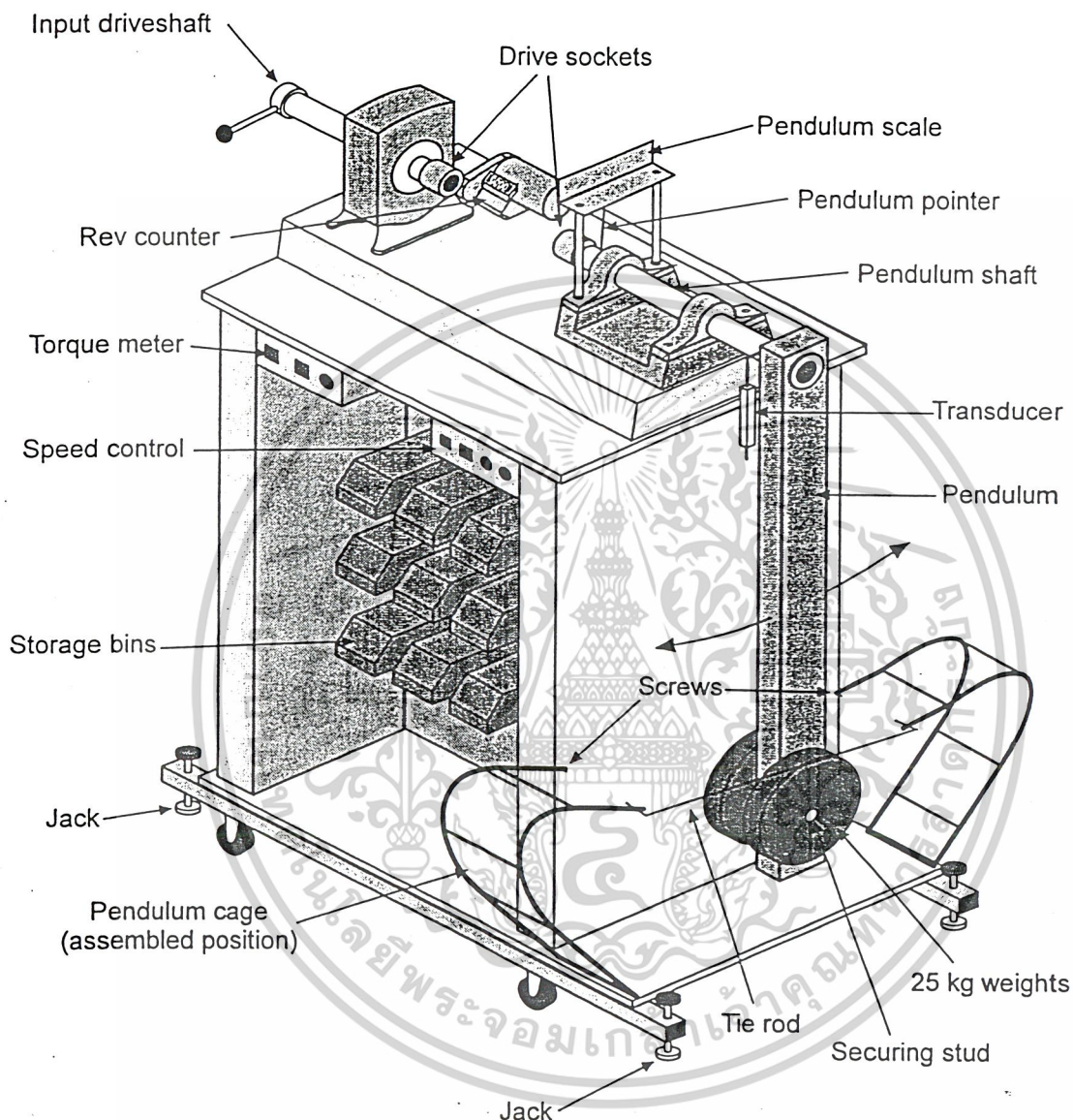


Figure 2.1 SM21 Torsion Testing Machine

The machine is despatched partly disassembled. Assemble on site referring to Figure 2.1 as follows:

1. Remove all loose items from their packing and check all items off against the Packing Contents list. **Note:** Do not discard any of the packing material until the machine has been completely assembled and

เอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Remove the two screws securing the two halves of the pendulum cage to the side of the cabinet. Swing the cage halves outwards and re-fit the screws to lock the cages in their outer position.
3. Fit the plated securing studs through the hole in the lower end of the pendulum and fit a washer and plain nut on the inner end.
4. Carefully slide one pendulum weight (slot downwards) over the stud and the locating peg behind the pendulum so that it rests on the stud. Fit the other weight similarly at the front and then lock both weights in position by fitting the dome nut and washer and tightening up.
5. Fit the tie rod into the holes in each end of the outer arms of the pendulum cages.
6. Slide the pointer onto the inner end of the pendulum shaft and clamp it in position with the thumb screw provided.

## 2.2 Operation

### 2.2.1 General Notes

- (a) **Speed Control** - The motor will always start in the direction selected on the speed control. To change the direction of the motor stop the unit using the speed control, ensuring that the pendulum has stopped, and then select the opposite direction on the control.

**Warning!**

**Damage to the motor may result if the pendulum has not stopped swinging before changing direction.**

**Note:** This unit is fitted with a 3A fuse (spare fuses are supplied.)

- (b) Sockets - Four hexagon sizes are supplied, three being 1/2" drive for which adaptors are provided. The sockets are intended for use with the following specimens:

3/16" Whitworth: All 6 mm and 1/4" diameter specimens except cast iron.

12 mm AF: 6 mm and 1/4" diameter cast iron specimens (note: it may be necessary to remove rough edges from the hexagonal ends of some specimens).

17 mm AF: The larger specimens supplied with the rig, and for further optional experiments when these become available.

- (c) Torque Meter Calibration - the torque meter is calibrated before leaving the factory and can be checked using the values stated on the label. Setting zero at zero pendulum angle and checking values at  $\pm 10$  gives a reasonable check on calibration but there may be small zeroing errors. A more accurate check can be carried out by setting zero at  $-10$  and checking that the value at  $+10$  is double the value stated on the label.

## 2.2.2 Preparation for Use

1. Jack up the pendulum end of the rig using the two jacking screws in order to prevent movement of the rig due to any swinging of the pendulum during tests (This should occur only when a specimen fractures).
2. Connect the speed control and torque meter modules to a single phase mains supply and switch on<sup>1</sup>.
3. Fit the appropriate sized sockets (and adaptors if required) to the input and pendulum shafts.

<sup>1</sup> The machine will be supplied to suit the voltage quoted when ordering the machine.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. With the pendulum steady, set the torque meter to zero using the 'Set Zero' control at the rear of the meter unit and set the pointer to zero on the pendulum angle scale.
5. Withdraw the input shaft through the gearbox and insert the specimen in one of the sockets. Run the motor using the speed control until the second socket will slide onto the other end of the specimen. Ensure that the input shaft is pushed inwards as far as it will go before applying any load.
6. Slowly inch the motor until the torque meter reading just begins to change, then set the input revolution counter to zero by pressing the trip lever on the left.

### 2.2.3 Torsion Test to Failure

1. Use the motor to rotate the input shaft in increments of say  $1.5^\circ$  (i.e. 5 revs of the counter). At each value record the counter reading, the torque value and the pendulum angle. This can be carried out incrementally or continuously (constant strain rate).
2. Continue until the specimen has yielded, then increase the interval between readings to, say  $6^\circ$  (20 revs) and later to  $15^\circ$  (50 revs) or more if testing relatively ductile specimens. If strain rate is not considered important, the motor speed can be increased during these later stages of the test.

### 2.2.4 Other Tests and Analysis of Results

Other tests include demonstration of upper and lower yield strengths for normalised steel specimens, and demonstration of the Bauschinger effect and other effects relating to work hardening and heat treatment.

Such tests generally involve releasing the load, or reversing it. On the SM21 apparatus this is achieved simply by reversing the speed control module and running the motor until the desired condition is obtained.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If it is required to remove a strained specimen before fracture (for example for heat treatment), reverse the motor and run it until the pendulum angle falls to zero, and sockets become loose on the specimen. Then withdraw the sliding input shaft and remove the specimen.

**Warning!**

No attempt should be made to remove a specimen when under load.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SECTION 3.0 DESCRIPTION OF THE APPARATUS

## 3.1 Introduction

The TecQuipment Torsiometer Model SM21a is specially designed to fit onto the standard specimens supplied by TecQuipment for all of their torsion testing machines. This torsiometer can accommodate total strains of any magnitude due to the facility of being able to adjust the dial indicator drive. It can be used therefore to measure strains accurately in both the elastic and plastic regions.

## 3.2 Construction

A sectional arrangement of the TecQuipment Torsiometer Model SM21a is shown in Figure 3.1 to which reference should be made.

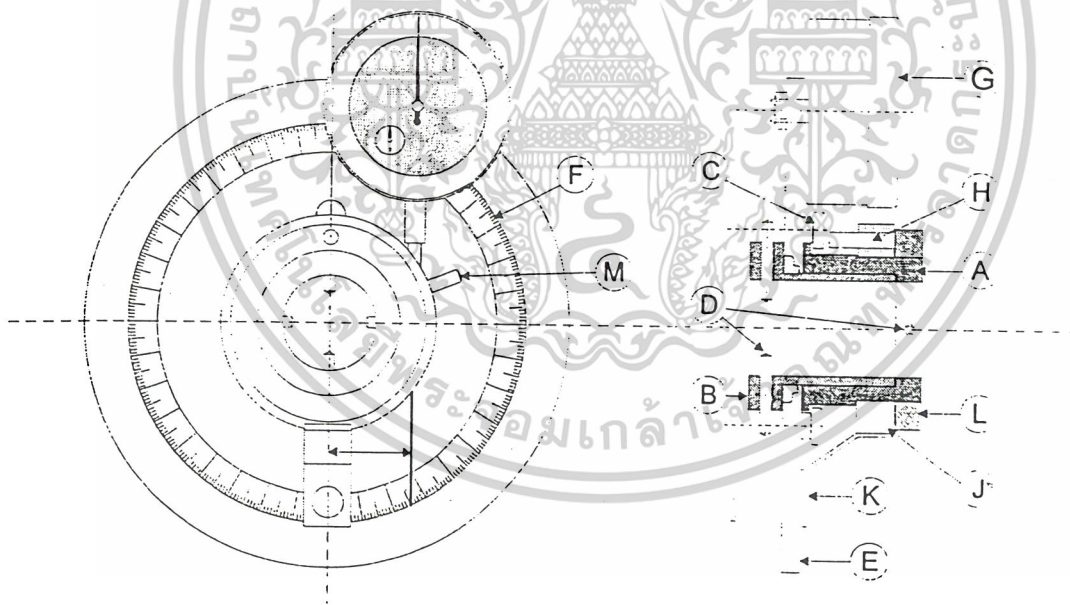


Figure 3.1 SM21a Torsiometer

The torsiometer consists basically of two cylindrical components A and B which are capable of relative rotation but are constrained against relative axial movement by two shoulder screws C. Each part, A and B, contains two diametrically opposite screws D which have 90 cone points. The screws in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

part A are short socket drive screws whilst those in B are much longer for ease of manipulation. These sets of screws are used to clamp the torsionmeter to the specimen and set the gauge length to 50 mm.

Integral with component B is disc E carrying a scale F marked out in degrees. Dial gauge G is also attached to the disc E in such a position that its axis is 25 mm from the axis of the specimen.

The dial gauge plunger should rest on the flat portion of the rod H which is attached to ring J. Also attached to J is a cursor K which moves over the scale F. This assembly is held in position on component A by the locating ring L.

**Note:** In Figure 3.1 ring J is shown 90° out of position.

The locking screw M in ring J is used to set the zero position of the dial gauge (and the initial position of the cursor). It is also used to adjust the position of J during testing so as to accommodate large strain readings.

### 3.3 Use and Operation

#### 3.3.1 Use

If it is merely required to demonstrate a torsion test a torsionmeter is not essential: if, however, results of any scientific interest are required it is essential to use a torsionmeter. Use of the TecQuipment Torsionmeter Model SM21a will allow accurate measurements of strain to be obtained in both elastic and plastic regions. The modulus of rigidity can be determined accurately and accurate measurement of the work-hardening properties of a material can be made.

#### 3.3.2 Attachment

The TecQuipment Torsionmeter Model SM21a is attached to a specimen by threading the specimen through the centre of the torsionmeter after unscrewing, but not removing, the four gripping screws D (two at each end).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Place the two segments corresponding to the specimen diameter in position as shown in Figure 2.2. Then, holding the torsionmeter in the required position relative to the length of the specimen, tighten the two gripping screws so that the clearance between the segment and the specimen is the same for each segment.

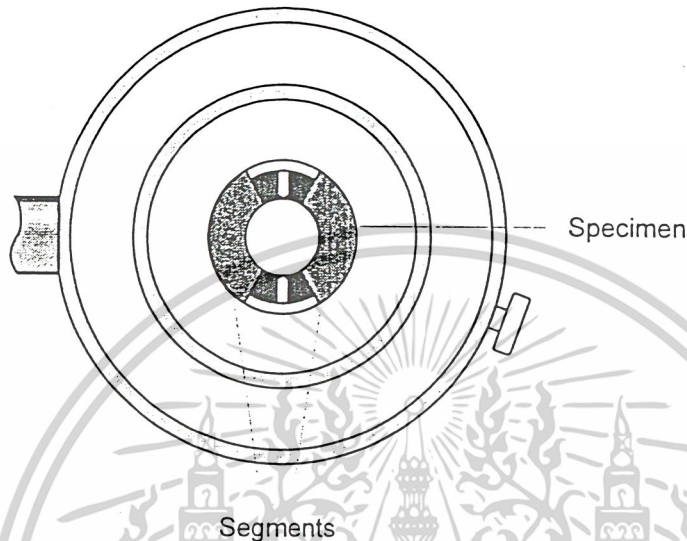


Figure 2.2 Torsionmeter Segment Positions

After these two screws have been tightened tipping the whole assembly upside down will allow the segments to fall out of position. The segments should now be placed in the corresponding position at the other end of the torsionmeter. Rotate this end so that the two sets of gripping screws are at 90° to each other and tighten up as before.

Remove the segments and insert the assembly in the torsion machine as described below.

### 3.3.3 Operation

The dial gauge is easier to read if the specimen is inserted into the machine with the end B of the torsionmeter adjacent to the pendulum scale.

Withdraw the drive shaft to its full extent. Slide the end of the specimen into the drive socket attached to the pendulum shaft then push the drive shaft toward the specimen. At this stage it may be necessary to drive/inch the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

motor to line up the drive socket with the specimen. Slide the drive shaft so that the specimen is fully engaged by the drive socket.

The torsionmeter is now ready for use. Should the full-scale deflection of the dial gauge be insufficient at the first clamp position of ring J, it may be adjusted to enable further readings to be taken by slackening the screw M and resetting the ring J. This does not disturb the clamping of the torsionmeter in any way and allows continual adjustment throughout the test.



## SECTION 4.0 THEORY

## 4.1 Twisting of a Solid Circular Bar into the Plastic Region

During transition from elastic to plastic behaviour there is no change in either the condition of equilibrium or the geometric conditions but there is a change in the shear-stress versus shear-strain relationship. Generally speaking, the stress-strain relationship changes from a linear to non-linear relationship at the torsional yield stress. For some materials there may be a second change back to a linear relationship with a much reduced slope when the shear-strain reaches values in excess of about twice the yield strain. The slope of this second linear portion is sometimes referred to as the work-hardening modulus or coefficient.

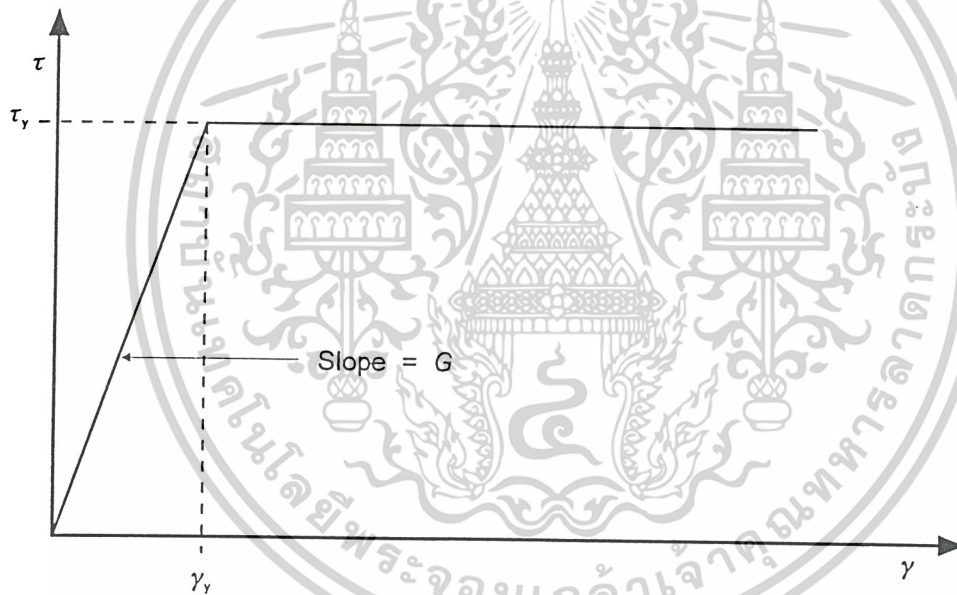


Figure 4.1 Graph of Shear-Stress versus Shear-Strain

When studying the theoretical behaviour of materials in the plastic region it is usual to commence by considering an elastic-perfectly plastic model. The shear-stress versus shear-strain curve for such a material is shown in Figure 4.1 in which  $\tau_y$  is the yield shear stress and  $\gamma_y$  is the yield shear strain.

If a solid shaft of this ideal material is twisted progressively until it becomes 'fully plastic' the shear-stress distribution can be characterised at four distinct stages as shown in Figure 4.2. Figure 4.2(a) shows the stress distribution.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

when all of the material is below the yield stress. Figure 4.2(b) shows the distribution when the outer fibres of the shaft just reach the yield stress; in this case the whole shaft is still elastic. Figure 4.2(c) shows the condition when the applied torque has caused yielding to a depth  $h$ , and Figure 4.2(d) shows 'full' plasticity. In the latter case of course there must remain a small elastic core which has an almost insignificant effect and for theoretical purposes, is ignored.

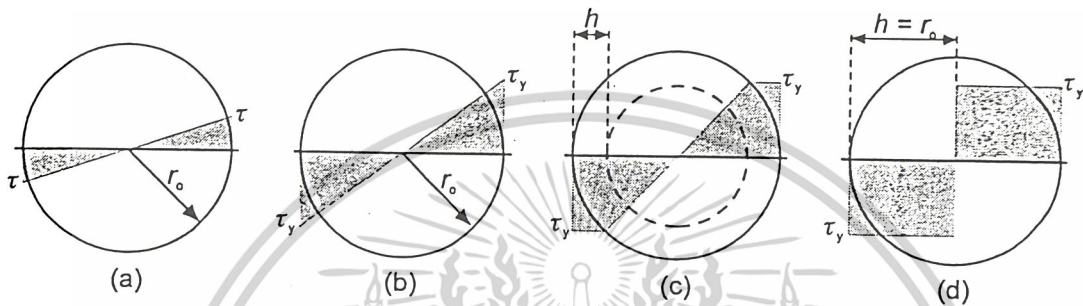


Figure 4.2 Shear-Stress Distribution Characteristics

#### 4.2 Analysis

Consider case (b) of Figure 4.2. The torque required to produce this state is given by:

$$T_y = \frac{\tau_y J}{r_o} = \frac{\pi}{2} \tau_y r_o^3 \tag{4-1}$$

The corresponding twist is:

$$\theta_y = \frac{\tau_y L}{G r_o} \tag{4-2}$$

where:  $L$  = length of shaft;

$T_y$  = torque to produce yield stress at outer fibre;

$\theta_y$  = twist in radius over length of shaft  $L$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Now consider case (c) of Figure 4.2. The shear strain is still proportional to radius even for material strained plastically.

Let

$$r_o - h = r_y$$

then for  $\theta > \theta_y$

$$\gamma = r \frac{d\theta}{dL} = r \frac{\theta}{L} \tag{4-3}$$

$$\therefore r_y = \frac{L\gamma_y}{\theta} = \frac{r_o \theta_y}{\theta} \tag{4-4}$$

Equation (4-4) gives the depth of the yield surface for an angle of twist  $\theta > \theta_y$ . The shear-stress distribution is discontinuous at  $r$  and is given by two equations:

For  $0 < r \leq r_y$

$$\tau = \tau_y \cdot \frac{r}{r_y} \tag{4-5}$$

For  $r_y \leq r < r_o$

$$\tau = \tau_y \tag{4-6}$$

Considering the equilibrium of the cross-section by equating the resisting torque due to the stress distribution to the applied torque. Then:

$$\begin{aligned} T &= \int_r^r r\tau \cdot 2\pi r \, dr \\ &= \int_0^{r_y} r \left( \frac{r}{r_y} \tau_y \right) \cdot 2\pi r \, dr + \int_{r_y}^{r_o} r \tau_y \cdot 2\pi r \, dr \end{aligned}$$

$$= \frac{2\pi}{3} \tau r_o^3 \left( 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{r_y}{r_o} \right)^3 \right) \tag{4-7}$$

Substituting Equations (4-1) and (4-4) in Equation (4-7) we obtain:

$$T = \frac{4}{3} T_y \left( 1 - \frac{1}{4} \left( \frac{\theta_y}{\theta} \right)^3 \right) \tag{4-8}$$

Equation (4-8) is the non-linear  $t - \theta$  relationship for twists greater than  $\theta_y$ . For twists less than  $\theta_y$  the usual elastic relationship holds viz:

$$T = \frac{GJ\theta}{L} = T_y \frac{\theta}{\theta_y} \tag{4-9}$$

From Equation (4-8) it is seen that if  $\theta \rightarrow \infty$  then  $T = \frac{3}{4} T_y$  i.e. the limit torque is  $1.333 T_y$ . Substituting a value of  $\theta = 3\theta_y$  into Equation (4-8) gives  $T = 1.32 T_y$  which indicates a rapid approach to the limit torque after yield occurs. Figure 4.3 shows a plot of  $T$  against  $\theta$  using Equations (4-8) and (4-9).

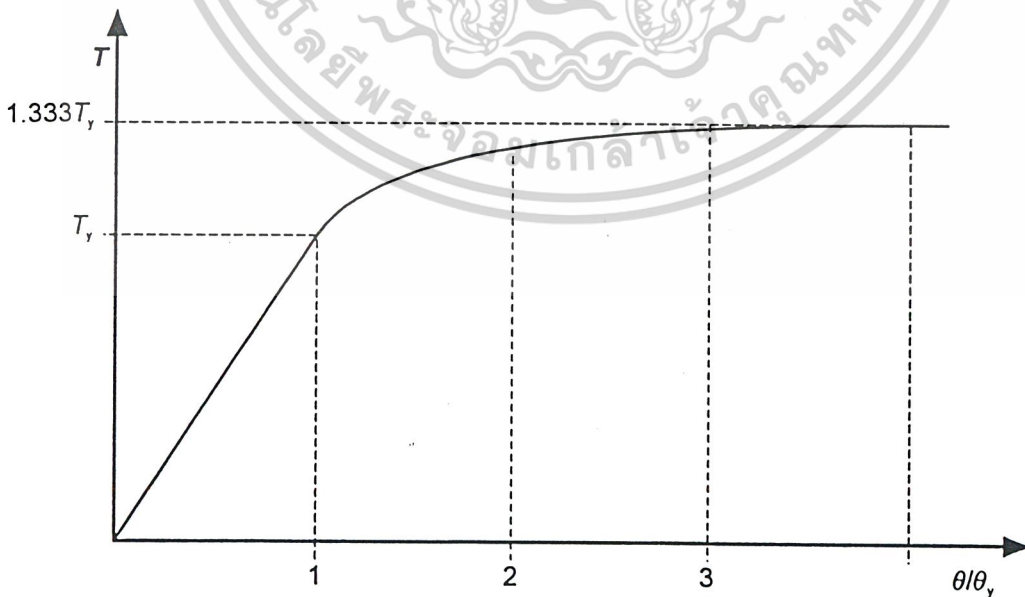


Figure 4.3 Graph of Torque versus Twist

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 Residual Stress

Suppose a shaft has been twisted to produce the shear-stress distribution shown in Figure 4.2(c). If the applied torque is maintained constant, then provided that effects of creep can be ignored (normally the case) the stress distribution remains the same.

If the applied torque is now reduced it is expected that the twist will also reduce which in fact occurs. Now, when a stressed material, particularly a metal, sheds load it does so elastically and usually with the normal modulus of elasticity (in this case the Modulus of Rigidity). This phenomenon coupled with the fact that the conditions of torsional equilibrium and the geometric constraints are unchanged causes the unloading line on the  $T - \theta$  diagram to be parallel to the elastic loading line as shown in Figure 4.1. On reaching zero torque, it is seen, there is residual twist in the shaft which can be called the plastic twist for reasons which are obvious.

Since there is no externally applied torque to produce this twist, it must be due to internal (residual) stresses.

### 4.4 Residual Shear-Stress Distribution

An understanding of the residual shear-stress distribution in a steel shaft which has been overstrained can be obtained by considering superposition of an elastic stress distribution which would produce a torque equal and opposite to the applied torque.

In Figure 4.4(a) we have the stress distribution of Figure 4.2(c) due to torque  $+T$ ; Figure 4.4(b) is the stress distribution (linear) which produces a torque  $-T$ . Figure 4.4(c) is obtained by superposition of Figure 4.4(b) on Figure 4.4(a) and shows that, despite the fact that the resultant torque is zero, residual stresses exist at the central part of the shaft which are of the same sense as the original stresses, and at the outer part of the shaft of opposite sense as shown in Figure 4.4(d). Obviously since the resultant torque is zero then the resultant moment of the stress diagram about the axis of the bar is zero, i.e. the moment of area  $a$  and  $0$  is equal to the moment of area  $b$  about  $0$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

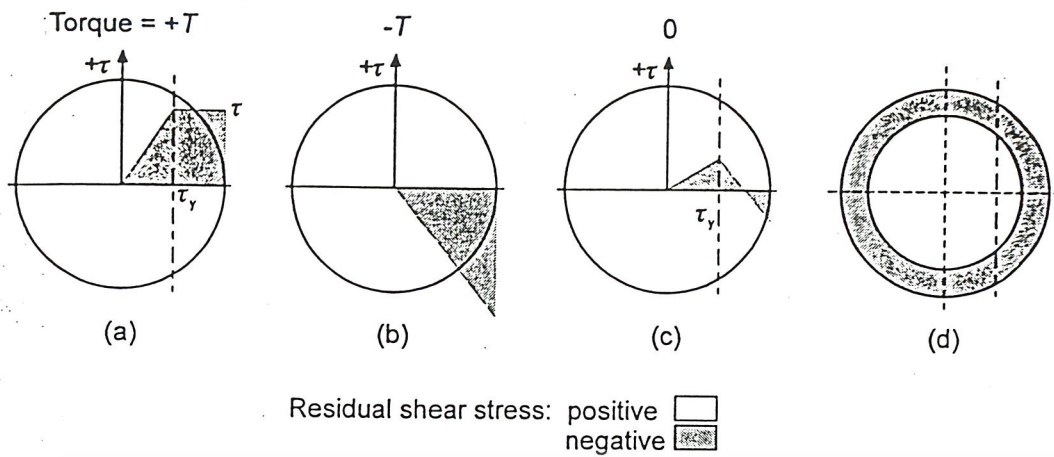


Figure 4.4 Shear-Stress Distribution

**Note:** If the 'negative' residual shear-stress intensity should exceed the yield shear-stress then the principle of superposition no longer holds because the behaviour becomes non-linear during the reverse stressing cycle. The application of Strain History Analysis then becomes necessary which is beyond the scope of this manual.

## SECTION 5.0 EXPERIMENTAL PROCEDURE

### 5.1 Introduction

Before proceeding with experimental work two points must be carefully noted:

1. If accuracy is required it is not sufficient to measure deflection between the grips of a testing machine; it is essential to use an extensometer measuring deflection over an accurately specified gauge length. In the present case a torsionmeter is required, e.g. TecEquipment SM21a or SM21b. Deflection between the grips of a machine may be used to demonstrate general behaviour and to obtain approximate values; sometimes this is all that is required.

The obtaining of accurate results is time consuming and requires clear and careful logging of readings. It must be remembered that in destructive testing there is no opportunity to go back and check readings!

2. In torsion testing the observed readings are those of torque and twist. the results of scientific interest are those of shear-stress and shear-strain in particular the shear-stress versus shear-strain characteristics of the material. This is due to our interest in stress analysis for design purposes. If we merely require the torsional strength of a shaft we can apply torque to that shaft and measure the deflection over its length. In carrying out a tension test the assumption that the stress is uniform over the cross-section is from force to stress. In the case of the torsion of a solid circular shaft the stress varies directly as the radius; it is not a simple matter to convert from torque to shear-stress.

One way in which this difficulty can be overcome is to use thin walled tubular specimens but these are expensive to produce and are prone to buckling when subjected to large plastic strains.

For purposes of comparison what is usually done is to plot the **Nominal Shear-Stress versus Shear-Strain curve.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 Tests on Mild Steel

### 5.2.1 Residual Stresses

As was shown in Section 4.4 theory predicts that overstraining (i.e. straining beyond the yield point and then unloading) in torsion induces residual stresses in the torsion bar, shaft or specimen. In practice it is found that two types of residual stresses are induced:

1. Stresses in and between crystals due to deformation of the individual crystals. These stresses are called **textural stresses** and can be removed by low temperature heat treatment (200 - 300°C). If textural stresses are not removed they will cause displacement or distortion of components in service when they are released due to service loading. Textural stresses are said, therefore, to be harmful.
2. The stresses distributed as indicated in Figure 4.4(d) are referred to as **body stresses** or **macro stresses** (Textural stresses could be referred to as **micro stresses**). The macro stresses affect the bulk of the material and are beneficial because they allow higher loading of components than would otherwise be possible without yielding taking place.

### 5.2.2 Testing in the Plastic Region

Figure 5.1 shows the torque versus twist characteristics obtained for a mild steel specimen (not normalised) tested in the TecQuipment SM21 Torsion Testing Machine using the TecQuipment SM21a Torsiometer.

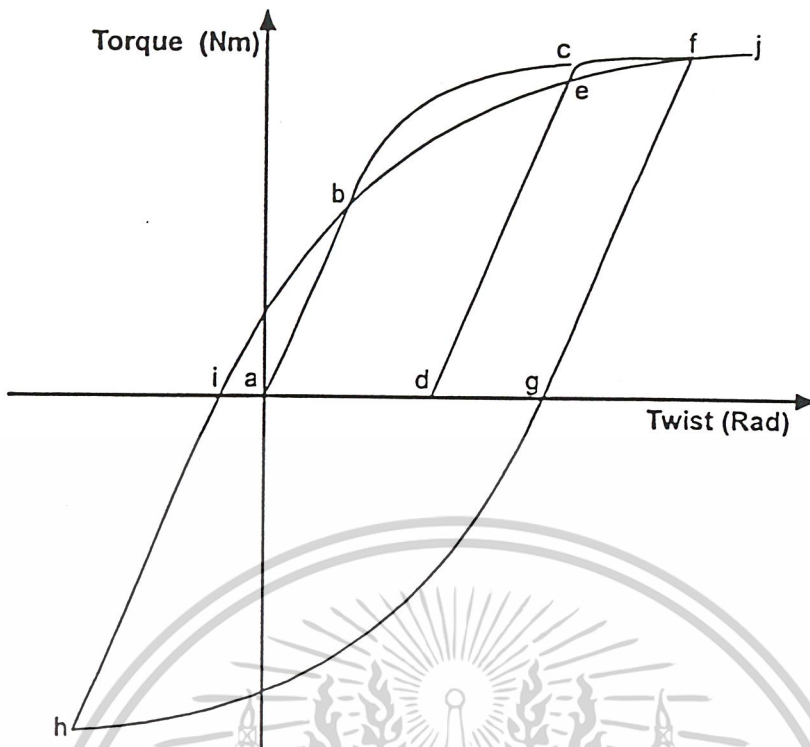


Figure 5.1 Torque versus Twist Characteristics

The initial load cycle is shown by the section (abc) in which (ab) is the elastic line and (bc) is the transition between the elastic limit and the limit torque (see Figure 4.3). In this case the limit torque is given by:

$$T_L = 1.5T_y \tag{5-1}$$

The modulus of rigidity will be given by:

$$G = \frac{L}{J} \frac{dT}{d\theta} \tag{5-2}$$

within the range (a) to (b).

The unloading line (cd) is not shown but lies close to (de) and ends at (d). The residual twist, i.e. the plastic twist, is (ad) and therefore the residual strain,  $\gamma^1$  is given by:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma_r^1 = \frac{r \cdot \Delta d}{L} \quad (5-3)$$

at the outside fibres this becomes:

$$\gamma_r^1 = \frac{r_o \cdot \Delta d}{L} \quad (5-4)$$

Reloading takes place along (def). The portion (de) is parallel to the elastic line (ab) indicating that the presence of residual stresses does not affect the modulus of rigidity, however, they do affect the elastic limit raising it by approximately 35% in this case. (Mild steel is never used for prestressed torsion bars!). Note that the transition zone between the yield torque and the limit torque is now very short.

Unloading from (f) produces the line (fg) which is almost parallel to (ab). The residual twist at zero torque is (ag) and reverse loading produces the curve (gh). Note the shortness of the elastic portion in reverse loading and also that the torque at (h) is approximately equal to that at (f). Would it be expected that the limit torque would be the same for either direction of twisting?

Unloading from (h) produces the line (hi) which is again almost parallel to (ab) and gives a residual twist at zero torque of (ai) which is negative relative to the previous residual twists (ad) and (ag).

Reversing the direction of the machine next allows the characteristic (ij) to be obtained again with only a very short elastic portion following reversal. Again, it is seen, the limit torque is unaltered and the points (bcf) and (j) form a continuous curve. This supports the theory that the limit torque is unaltered regardless of the way in which it is achieved.

### 5.2.3 Nominal Shear-Stress versus Shear-Strain

There is no need to replot the torque versus twist characteristic in order to obtain the nominal shear-stress versus shear-strain characteristic. All that is necessary is to scale the axes:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3} \text{ N/m}^2 \quad (5-5)$$

where:  $T$  = Torque (Nm),  
 $d$  = Diameter of specimen (m).

$$\gamma = \frac{d\theta}{2L} \quad (5-6)$$

where:  $\theta$  = Twist (rad),  
 $L$  = Gauge length (m).

#### 5.2.4 Fluctuation of Results

It may be noticed during continuous straining in the plastic region that the readings on the torque meter fluctuate. This is due to the shearing action taking place within the specimen and is also evident on observing the very slight oscillation of the pendulum of the machine.

### 5.3 Other Experiments

#### 5.3.1 Demonstration of Upper and Lower Yield Points

If a **normalised** mild steel specimen is tested it should be observed that an upper and lower yield point may be encountered. This is due to the fact that a higher stress is required to initiate yield than to propagate yield along the specimen. This phenomenon is illustrated in Figure 5.2 where, after initial yielding of the specimen, (point A) the load immediately fell to a lower value (point B). The strain was then reduced until the specimen was again in the elastic range (point C) but when re-loaded it yielded at the lower yield strength (point D) showing that, with normalised mild steel, yield propagates at the 'lower yield point' stress value.

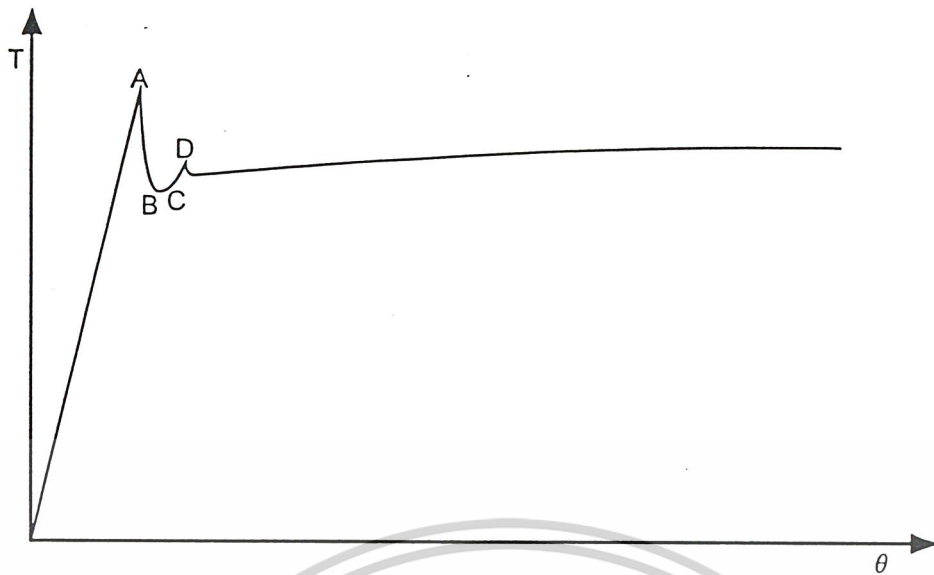


Figure 5.2 Yield Points

### 5.3.2 Nominal Shear-Stress versus Shear-Strain for Specimens of Different Diameters

In both elastic and plastic regions of torsional strain the shear-stress is related to the torque by:

$$\tau = \frac{kT}{d^3}$$

(5-7)

where  $k$  is a constant with a value of  $16/\pi$  in the elastic region.

This value of  $k$  is used throughout a torsion test when plotting the nominal shear-stress against the shear strain. (The true shear-stress is less than the nominal shear-stress in the plastic region.)

Equation (5-7) can be justified by testing specimens of the same material but different diameters. Figure 5.3 shows the results of a series of three such tests. The curve a was obtained using a 5/32" diameter specimen, b and c were obtained from 7/32" and 1/4" diameter specimens respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

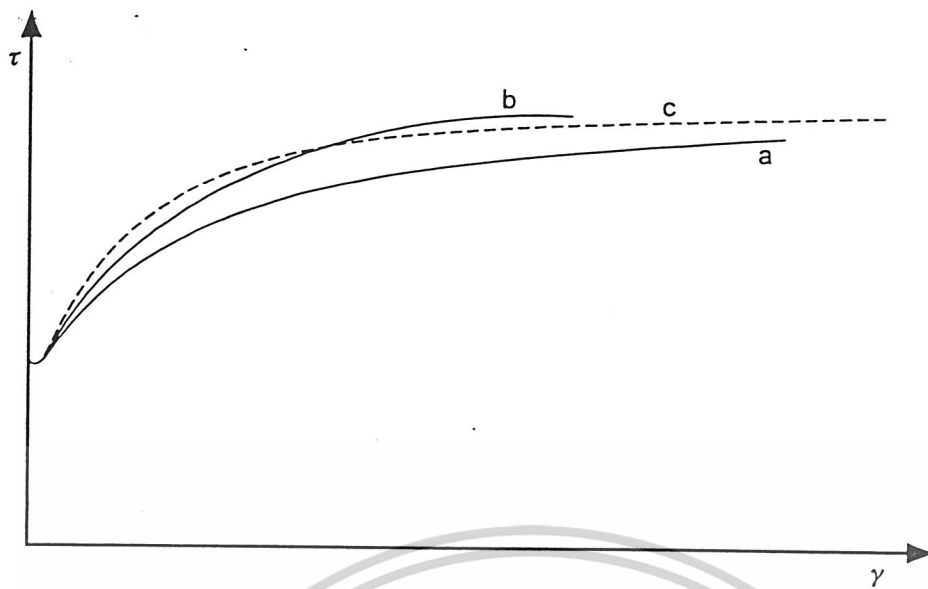


Figure 5.3 Comparison of Different Diameter Specimens

### 5.3.3 Tests of Thin Walled Specimens

The true shear-stress versus shear-strain curve for a material can be produced by testing a thin-walled tubular specimen. The main assumption is that the wall is thin enough to produce a uniform shear-stress distribution across it given by:

$$\tau = \frac{16d_o T}{\pi(d_o^4 - d_i^4)}$$

where:  $t$  = wall thickness,  
 $d_o$  = outer diameter,  
 $d_i$  = inner diameter.

The bore must be smooth otherwise stress raisers will be present and give erroneous result and premature failure. Care must be taken not to distort the specimen when fitting the torsionmeter.

**Note:** Hollow specimens are not provided as standard.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SECTION 6.0 ANCILLARY SPECIMENS AND EQUIPMENT

## Range of Experiments

A wide range of tests on standard (solid) specimens of different materials can be carried out including:

1. Verification of the elastic torsion equation.
2. Determination of modulus of rigidity and yield shear stress.
3. Determination of upper and lower yield stresses for normalised steel specimens.
4. Investigation of the behaviour of materials under plastic deformation, the phenomenon of work hardening and the effect of varying strain rate.
5. Determination of modulus of rupture in torsion.
6. Reversed torsion tests to demonstrate the Bauschinger effect and the effects of residual body and textural stresses on torsional strength.
7. If heat treatment facilities are available various tests can be carried out to demonstrate the effect of heat treatment on residual stresses and torsional strength.

Additional specimens and ancillary equipment can be supplied to enable:

8. Analysis of surface stresses in solid and hollow section specimens of various shapes.

**Note:** The use of a torsionmeter (SM21a or b) is required for accurate determination of these quantities.

The SM21a mechanical torsionmeter is primarily designed for accurate measurements in the elastic range and the initial stages of plastic deformation. As an alternative, the SM21b electronic torsionmeter provides an accurate, continuous digital readout both for small strains in the elastic range and for twists of up to 5 revolutions as may be encountered in the plastic range. The outputs from this unit and the digital torque meter can be used to plot results automatically on an xy plotter or to provide outputs for a data logging system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A wide range of standard (solid) test specimens are available in different diameters and materials. Special strain gauged solid and hollow section specimens of various shapes can be supplied to customers' requirements for stress analysis under loads in the elastic range. Additional ancillary equipment can also be supplied for heat treatment of specimens and to enable torsion tests at elevated temperatures. The specification of such equipment can be tailored to suit individual customer requirements.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## APPENDIX: MACHINE SPECIFICATION

Max torque:	199.9 Nm (1999 lbf·in)
Main gearbox ratio:	1200:1
	Rated torque 240 Nm (2100 lbf·in)
Drive motor:	187 W, 3000 rev/min with 4:1 reduction gearbox
Maximum strain rate:	225°/min
Digital counter:	5 digit resettable type (1 revolution = 0.3)
Pendulum angle:	-30 to +30 in 0.5 divisions
Pendulum bob weights:	2 off 25 kg
Drive shaft ends:	19 mm (0.75") square
Drive sockets:	3/16" Whitworth; 12, 17 and 24mm A/F supplied as standard (two off each)
Speed (strain) control:	Thyristor drive with tachometer feedback and digital readout of strain rate
Torque meter:	TecEquipment E101 digital measuring system with three digit display and Nm/lbf·in changeover switch

## Optional Ancillaries

1. SM21a Mechanical Torsiometer: for use with specimens having ends up to 24mm A/F hex.
2. SM21b Digital Torsiometer: electronic version of SM21a complete with digital meter suitable for continuous reading up to 5 revolutions.
3. Additional ancillary equipment for heat treatment of specimens and testing at elevated temperatures can be supplied to customers' requirements.

Micrometers, rulers, etc are **not** supplied.

## Services Required

Single-phase earthed AC mains electrical supply 220/240V or 110/120V 50/60Hz. Voltage to be specified on all orders.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างอุปกรณ์วัดแรงบิด

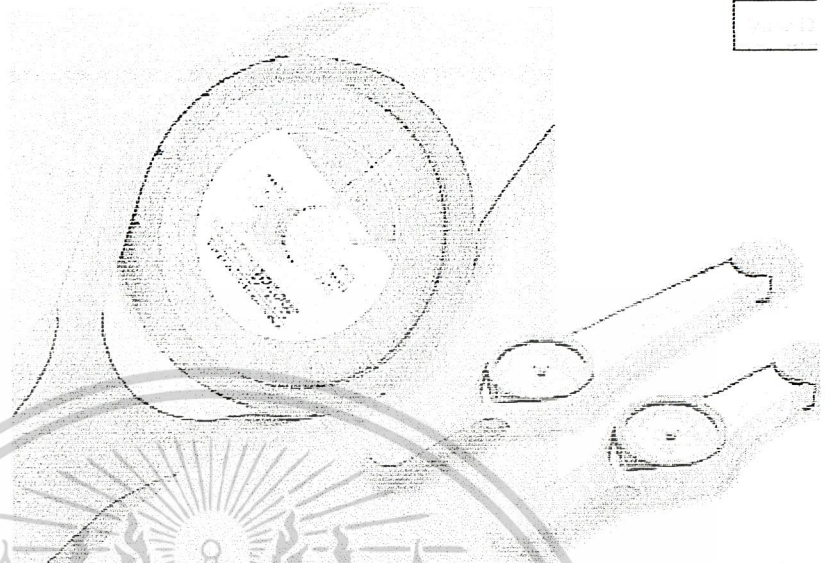


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PLATINUM Series Newton Meter Single Scale

### FEATURES

- Comfort Cushion Grip reduces strain for prolonged use
- Tough Composite Body
- Low Profile construction allows for easy access to restrictive areas
- Rubber Boot protects work piece
- Packaged in sturdy Blow Molded Plastic Box for maximum protection
- Accuracy:  $\pm 3\%$  of indicated value, CW & CCW, from 20% to 100% of full scale
- Individually serialized with matching certificate of calibration traceable to N.I.S.T.



The **Platinum** series Dial Torque Wrench features a slim, low profile design. The durable, composite and stainless steel body provides accurate service. Torque capacities range from 15 in. lbs. to 50 ft. lbs. 1/4" and 3/8" square drives.



Awarded by *Business Week Magazine*

and the *Industrial Designers Society of America*

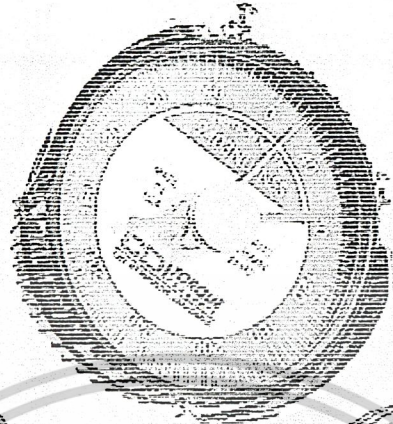
Part Number	Torque Range	Drive Size	Incr.	A in. [mm]	B in. [mm]	C in. [mm]	D in. [mm]	W Lb
1.81NLDNP	0-1.8 Nm	1/4"	.05 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.8!
3.51NLDNP	0-3.5 Nm	1/4"	.1 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.8!
91NLDNP	0-9 Nm	1/4"	.2 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.8!
92NLDNP	0-9 Nm	3/8"	.2 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.8!
182NLDNP	0-18 Nm	3/8"	.5 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.8!
302NLDNP	0-30 Nm	3/8"	.5 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.8!
352NLDNP	0-35 Nm	3/8"	1 Nm	11.25 (285.8)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	.8!
702NLDNP	0-70 Nm	3/8"	2 Nm	14.47 (367.54)	1.63 (41.40)	1.75 (44.45)	3.12 (79.25)	1.4!

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CLASSIC Series Newton Meter Single Scale

### FEATURES

- Sturdy body construction insures maximum durability
- Easy to Read Laser Marked Single Scale
- Large easy to read dial is shock resistant and protected by a tough metal guard
- Memory needle retains highest torque reading applied
- Calibrated in both CW and CCW direction
- Accuracy: ± 3% of indicated value, CW & CCW, from 20% to 100% of full scale
- Individually serialized with matching certificate of calibration traceable to N.I.S.T.



The CLASSIC Series continues to offer a body design that guarant maximum durability and performance. Torque capacities range from 2,000 ft. lbs. in 1/2", 3/4" and 1" drives.



Electric Signaling Model features LED light and Buzzer

Part Number	Torque Range	Drive Size	Incr.	A in. [mm]	B in. [mm]	C in. [mm]	D in. [mm]
1403NLDNSS	0-140 Nm	1/2"	2.5 Nm	21.50 (546.10)	2.00 (50.80)	2.00 (50.80)	2.75 (69.85)
2403NLDNSS	0-240 Nm	1/2"	5 Nm	21.50 (546.10)	2.00 (50.80)	2.00 (50.80)	2.75 (69.85)
3503NLDNSS	0-350 Nm	1/2"	10 Nm	21.50 (546.10)	2.00 (50.80)	2.00 (50.80)	2.75 (69.85)
4804NLDNSS	0-480 Nm	3/4"	10 Nm	28.88 (708.15)	2.00 (50.80)	2.75 (69.85)	2.75 (69.85)
8004NLDNSS*	0-800 Nm	3/4"	20 Nm	46.50 (1181.10)	2.13 (54.10)	3.00 (76.20)	2.75 (69.85)
14005NLDNSS*	0-1400 Nm	1"	25 Nm	74.00 (1879.60)	2.25 (57.15)	3.50 (88.90)	3.00 (76.20)

#### ELECTRIC SIGNALING MODELS

8004NLDESS*	0-800 Nm	3/4"	20 Nm	46.50 (1181.10)	2.13 (54.10)	3.00 (76.20)	2.75 (69.85)
14005NLDESS*	0-1400 Nm	1"	25 Nm	74.00 (1879.60)	2.25 (57.15)	3.50 (88.90)	3.00 (76.20)
25005NLDESS**	0-2500 Nm	1"	50 Nm	122.00 (3098.80)	3.50 (88.90)	6.50 (165.10)	3.50 (88.90)

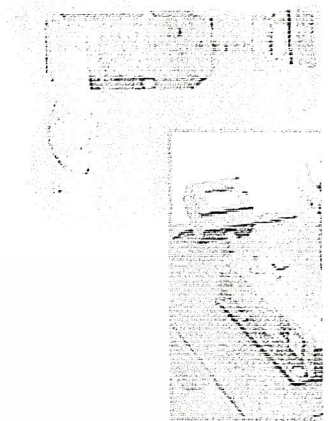
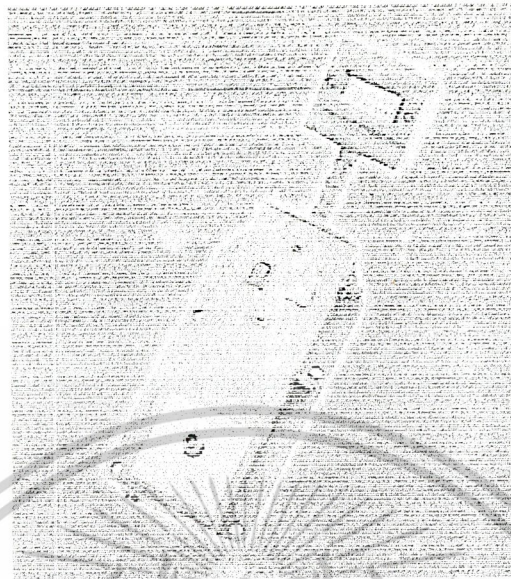
\* NOTE: 8004NLDNSS and 14005NLDNSS includes 1 Extension handle. Letter "E" includes indicating light and buzzer.  
 \*\* NOTE: 25005NLDESS is a "T" style wrench with 1" drive fem. Head for use with torque multiplier.  
 Includes 5 Extension Handles and indicating LED light and buzzer.  
 Letter "E" features indicating light and buzzer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ETT™ Electronic Torque Tester

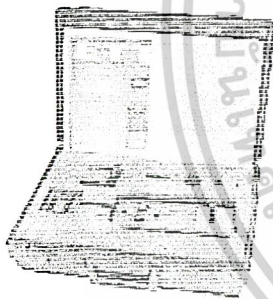
## FEATURES

- Integral transducer and sturdy housing allow mounting in virtually any position
- Unique neck design allows the operator to see the LCD display when testing long torque wrenches
- Accuracy:  $\pm 0.5\%$  of indicated value, CW & CCW, from 10% to 100% of full scale + 1 increment or least significant digit
- Four modes of operation: Peak mode, Power Tool mode, First Peak mode and Track mode
- Dual scale (English/Nm or English/cNm, dNm)
- Auto/manual display reset
- Reads bi-directionally (CW and CCW)
- Rechargeable NiCad batteries
- Designed to be a sturdy low cost tester, ETT can be placed on the wall in the factory, on a portable cart or on a bench allowing operators to test torque wrenches or power tools without having to leave their station



Mounts easily to any vertical horizontal flat surface

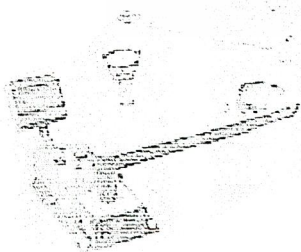
The **ETT (Electronic Torque Tester)** is CDI's portable torque tester a torque calibration system, which can be used to generate a torque certification, the ETT is a portable, battery powered stand-alone torque tester. It can also be used on AC power. Its primary use is to check the accuracy of dial and click type torque wrenches, as well as torque screwdrivers to maintain their accuracy in between calibrations. With addition of a joint rate simulator, ETT can also check stall and clutch pneumatic and electronic torque tools. It should not be used with any or pulse type tools. There are eight models with torque ranges from ounces up to 600 foot pounds.



Includes ETT custom case and charger individually serialized with matching certificate of calibration traceable to N.I.S.T.

Part No.	Torque Range English	Torque Range Newton Meter	Drive Size	Wt. Lbs.
1001-G-ETT	10 - 100 in. oz.	7.0 - 70.6 cNm	1/4"	4.5
4001-G-ETT	40 - 400 in. oz.	28 - 280 cNm	1/4"	4.5
501-I-ETT	5 - 50 in. lb.	5.6 - 56 dNm	1/4"	4.5
1001-I-ETT	10 - 100 in. lb.	11.3 - 113 dNm	1/4"	4.5
2502-I-ETT	25 - 250 in. lb.	28 - 280 dNm	3/8"	4.5
10002-I-ETT	100 - 1000 in. lb.	113 - 1130 dNm	3/8"	4.5
2503-F-ETT	25 - 250 ft. lb.	34 - 339 Nm	1/2"	4.5
6004-F-ETT	60 - 600 ft. lb.	81 - 813 Nm	3/4"	5.0

- Use joint simulator with Power Tools
- Power adapter cord included - Part #P115-30
- Bench bracket available - Part #343-25
- Socket adapter included with tester (female to female) suited for size of square ETT



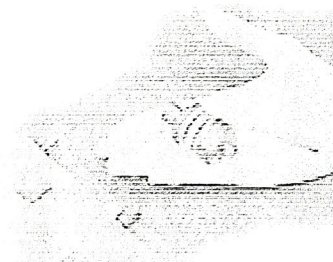
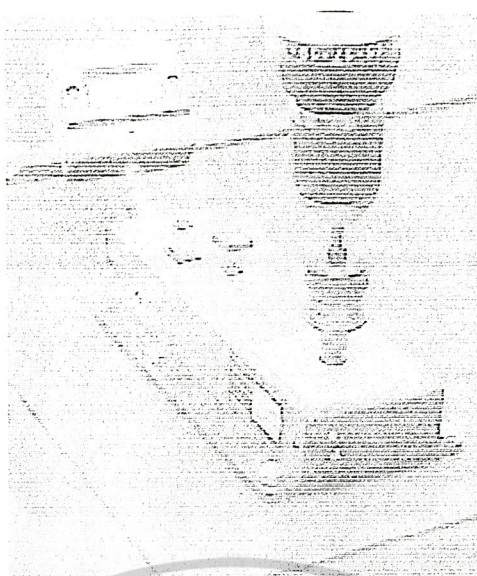
Perfect for checking dial torque wrenches.

## ETT™ Joint Rate Simulator Adapter

The joint rate simulator adapter

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

is used with electronic and pneumatic tools on CDI's ETT (Electronic Torque Tester) and with CDI's transducers. The joint rate adapter is placed on top of square drive of ETT or CDI's transducers and secured with a set screw. An adapter bit is inserted into the power tool and is mated to top of the joint rate adapter. By stacking Belleville washers in set patterns, the joint rate adapter can simulate soft, medium or hard joints.



Choose from three capacities: 50 in. lb., 400 in. lb., and 1000 in. lb.

Part No.	Tester Drive	Capacity	Adapter Bit	Load
900-0-1KIT	1/4"	50 in. lb.	1/4" Male Hex. x 3/16" Male Hex.	1/4 -
900-2-01KIT	3/8"	400 in. lb.	3/8" Sq. Fem. x 3/8" Male Hex.	7/16
900-3-01KIT	3/8"	1000 in. lb.	3/8" Sq. Fem. x 1/2" Male Hex.	5/8 -



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้