

การออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว



นาย สัจจกณ เทียมทินกฤต

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1281-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN UNIAXIAL CREEP TESTING MACHINE



Mr.Satjapon Tiemtinkrit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1281-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบการเคี้ยวแบบเดียว
โดย	นาย สัจจกน เทียมทินกฤต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวรัตน์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ พงศ์สุภสมิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ชินเทพ เพ็ญชาติ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงห์นัดกิจ)

สัจฉน เที่ยมทินกฤต : การออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยว.
(DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN UNIAXIAL CREEP TESTING MACHINE)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย, 226 หน้า. ISBN 974-53-1281-9.

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยว โดยมีวัตถุประสงค์ คือ 1) พัฒนาขั้นตอนการออกแบบส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย เตา ชุดให้ภาระขึ้นงานทดสอบ คานทดสอบ โครงเครื่อง และชุดควบคุมอุณหภูมิ 2) ประยุกต์ขั้นตอนการออกแบบในการคำนวณมิติชิ้นส่วน และการเขียนแบบเพื่อส่งผลิตเป็นชิ้นส่วน และ 3) การประเมินเครื่องทดสอบ

ในภาพรวม ผลการออกแบบเครื่องทดสอบสอดคล้องกับข้อมูลจำเพาะที่กำหนดไว้ก่อนหน้า เครื่องทดสอบมีความสามารถเชิงภาระเท่ากับ 800 กิโลกรัม และสามารถทดสอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสได้

การประเมินภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ พบว่าความไม่แน่นอนของความเค้นบนชิ้นงานเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ ที่เต็มสเกลภาระ เครื่องทดสอบใช้งานได้ในช่วงขนาดภาระ 200 ถึง 800 กิโลกรัม โดยมีเปอร์เซ็นต์การดัดน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ (ข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM)

การประเมินอุณหภูมิบนชิ้นงานทดสอบ พบว่าบริเวณบริเวณที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอในช่วง ± 1 องศาเซลเซียส มีความยาว 30 มม. ชุดควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในบริเวณดังกล่าวได้แม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียส

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547.....

4570589421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: CREEP / CREEP TESTING MACHINE / TEMPERATURE CONTROLLER / UNIAXIAL

CREEP TEST

SATJAPON TIEMTINKRIT : DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN UNIAXIAL
CREEP TESTING MACHINE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPONG
KASIVITAMNUAY, D.Eng., 226 pp. ISBN 974-53-1281 -9.

This thesis concerned about designing and building of an uniaxial creep testing machine. The objectives are : 1) develop procedures for designing the main components of the machine which are furnace, loading train, lever arm, machine frame and temperature controller, 2) apply the design procedures for component sizing and preparing the working drawings for manufacturing and 3) evaluate the machine.

For an overview, the machine satisfies the specifications defined at the beginning of this study. The machine has a load capacity of 800 kg. and be able to conduct the test at 650°C.

Evaluation of specimen' s loading found that the uncertainty for an applied stress is 1 percent at full scale loading. For an applied load ranges from 200 to 800 kg. the machine produces less than 10 percent of bending which passes the ASTM' s minimum requirement.

Evaluation of specimen' s temperature found that the zone having a uniform temperature distribution within the limit of ± 1 °C was 30 mm long. The temperature controller can control the temperature in that region within ± 1 °C accuracy.

Department Mechanical Engineering Student's signature.....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2004.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความรู้ ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ ประธานกรรมการ อาจารย์ ชินเทพ เพ็ญชาติ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำ และยืมเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้นำมาซึ่งความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสุบิน ชันดี และเจ้าหน้าที่ในหน่วยช่างของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ในการประกอบโครงสร้างของเครื่องทดสอบ รวมทั้งให้คำแนะนำในเรื่องการผลิตชิ้นงาน การใช้เครื่องจักร และความปลอดภัย

ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านกำลังใจและกำลังใจตลอดการทำงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะ นาย ทวิช วงศ์กระบากลาว ที่ให้ข้อเสนอแนะช่วยให้การวิจัยสามารถผ่านพ้นไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ตลอดจนอนุภพาริทุกท่าน ซึ่งอบรมสั่งสอน และให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ ตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

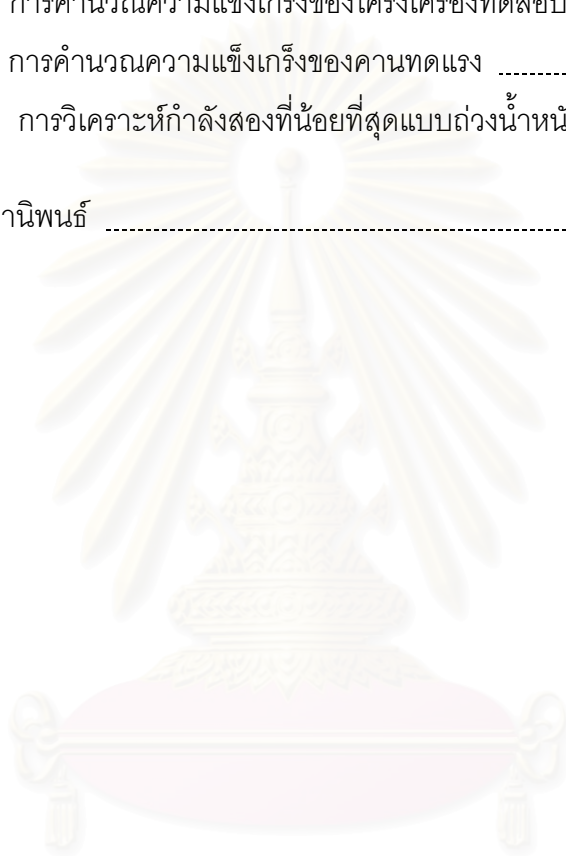
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์	8
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ทฤษฎีการคืบ	10
2.2 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยว	12
2.3 ทฤษฎีถ่ายเทความร้อน	13
2.3.1 การถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้านข้างเตา	14
2.3.2 การถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่างเตา	16
2.3.3 การถ่ายเทความร้อนที่ก้านตั้งชิ้นงานทดสอบ	17
2.4 กำลังความร้อนของเตา	18
2.5 เกณฑ์การออกแบบชิ้นส่วน	18
2.5.1 เกณฑ์การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิห้องด้วยเกณฑ์ความเค้น	19
2.5.2 เกณฑ์การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิห้องด้วยเกณฑ์ความแข็งแรง	19
2.5.3 เกณฑ์การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูงด้วยเกณฑ์ความเค้น	19
2.6 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	20

	หน้า
2.7 เกณฑ์คุณภาพเครื่องทดสอบ	23
2.7.1 เปอร์เซ็นต์การตัดของชิ้นงานทดสอบ	23
2.7.2 มุมเอียงของคานทดสอบ	26
2.7.3 อุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบ	26
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องทดสอบ	27
3.1 ภาพรวมของเครื่องทดสอบการคืบ	27
3.1.1 ส่วนที่ทำหน้าที่ให้ภาระชิ้นงานทดสอบ	27
3.1.2 ส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความร้อนชิ้นงานทดสอบ	27
3.2 ภาพรวมการออกแบบ	28
3.3 องค์ประกอบหลักของเครื่องทดสอบ	28
3.4 ขั้นตอนออกแบบส่วนประกอบหลัก	31
3.4.1 ขั้นตอนออกแบบเตา	32
3.4.2 ขั้นตอนออกแบบชุดให้ภาระ	33
3.4.3 ขั้นตอนออกแบบคานทดสอบ	34
3.4.4 ขั้นตอนออกแบบโครงเครื่องทดสอบ	34
3.4.5 ขั้นตอนออกแบบชุดน้ำหนักรถ่วง	35
3.5 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องของเครื่องต้นแบบ	36
3.5.1 ตำแหน่งของ knife edge	36
3.5.2 การผลิตและจับยึดชิ้นส่วน	38
3.5.3 อุปกรณ์ปรับระยะ	39
3.5.4 การหุ้มฉนวนเตา	39
บทที่ 4 ผลการออกแบบ	40
4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องทดสอบ	40
4.2 ชิ้นงานทดสอบ	41
4.2.1 เกลี่ยวจับยึดชิ้นงานทดสอบ	42
4.2.2 ระยะสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว	44

4.3 เต่า	45
4.3.1 การเลือกโมดูลทำความร้อน	45
4.3.2 การคำนวณความร้อนสูญเสียจากเต่า	45
4.3.3 การคำนวณความปริมาณความร้อนสะสมในชั้นส่วนเต่า	50
4.3.4 การคำนวณกำลังของเต่า	52
4.4 ชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ	53
4.4.1 ภาพรวม	53
4.4.2 ก้านตั้งชิ้นงานทดสอบที่อนบนและที่อนล่าง	54
4.4.3 สลัก และข้อต่อ Universal ตัวกลาง	60
4.4.4 อุปกรณ์ปรับระยะ	65
4.4.5 ข้อต่อ Universal ตัวล่าง และสลัก	65
4.4.6 ก้านตั้ง	67
4.4.7 ข้อต่อ Universal ตัวบน	68
4.5 โครงเครื่องทดสอบ	69
4.5.1 การจำลองปัญหา	70
4.5.2 การกำหนดมิติของเอลิเมนต์	72
4.5.3 ผลเฉลยของปัญหา	74
4.6 คานทอดแรง และ knife edge	76
4.6.1 คานทอดแรง	76
4.6.2 knife edge ตัวกลาง	78
4.6.3 knife edge ชุดให้ภาระ	80
4.6.4 knife edge ชุดน้ำหนักร่อง	82
4.7 ชุดน้ำหนักร่อง	85
4.7.1 ภาพรวม	85
4.7.2 น้ำหนักร่อง	86
4.7.3 โซ่และก้านน้ำหนักร่อง	86
4.8 กลไกจับยึดและปรับตำแหน่งเต่า	87

4.9 ชุดควบคุมอุณหภูมิ	88
4.10 การเขียนแบบใช้งาน	90
4.10.1 ความคลาดเคลื่อนยินยอมเชิงมิติ	91
4.10.2 ความคลาดเคลื่อนยินยอมเชิงเรขาคณิต	94
4.10.3 คุณภาพผิวสำเร็จ	97
บทที่ 5 การประเมินคุณภาพเครื่องทดสอบและการวิเคราะห์ผล	99
5.1 รายการประเมิน	99
5.2 การวัดอัตราทดของคานทอดแรง และเปอร์เซ็นต์การดัดบนชิ้นงานทดสอบ	100
5.2.1 อุปกรณ์การทดลอง	100
5.2.2 วิธีการทดลอง	101
5.2.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล	103
5.3 การวัดการกระจายอุณหภูมิ และการขึ้นลงของอุณหภูมิภายในเตา	106
5.3.1 อุปกรณ์การทดลอง	106
5.3.2 วิธีการทดลอง	107
5.3.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล	108
5.4 การทดสอบการคืบ	112
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	114
6.1 สรุปผลการวิจัย	114
6.1.1 ข้อเสนอโดยรวม	114
6.1.2 ข้อเสนอเกี่ยวกับคุณภาพเครื่องทดสอบ	115
6.2 ข้อเสนอแนะ	116
รายการอ้างอิง	117
ภาคผนวก	120
ภาคผนวก ก. แบบรายละเอียดของเครื่องทดสอบ	121
ภาคผนวก ข. แบบรายละเอียดของอุปกรณ์เปลี่ยนแรงกดเป็นแรงดึง	186
ภาคผนวก ค. การสอบเทียบโหลดเซลล์	192

ภาคผนวก ง. การสอบเทียบตุ้มน้ำหนัก	197
ภาคผนวก จ. ข้อมูลการทดสอบเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การตัด และอัตราทดของคานทดแรง .	199
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณความแข็งแรงของโครงเครื่องทดสอบ	208
ภาคผนวก ช. การคำนวณความแข็งแรงของคานทดแรง	220
ภาคผนวก ญ. การวิเคราะห์กำลังสองที่น้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก	225
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	226



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 รายละเอียดของแต่ละเอลิเมนต์ของโครงเครื่องทดสอบ.....	75
4.2 ความคลาดเคลื่อนยินยอมของชิ้นส่วนในโครงเครื่องทดสอบ.....	91
4.3 ความคลาดเคลื่อนยินยอมของชิ้นส่วนในชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ.....	92
4.4 ความคลาดเคลื่อนยินยอมของชิ้นส่วนในคานทดสอบ.....	93
4.5 ความคลาดเคลื่อนยินยอมของชิ้นส่วนในกลไกปรับเตา.....	93
5.1 เปอร์เซ็นต์การตัดที่ขนาดน้ำหนักถ่วงต่าง ๆ	103
5.2 ขนาดภาระที่โหลดเซลล์ที่ขนาดน้ำหนักถ่วงต่าง ๆ	105
5.3 ข้อมูลการผันแปรของอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ภายในเตา.....	112
ค.1 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 1).....	193
ค.2 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 2).....	194
ค.3 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 3).....	194
ค.4 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 4).....	194
ค.5 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 5).....	195
ง.1 ผลการสอบเทียบตุ้มน้ำหนัก.....	197
ง.2 ผลการคำนวณน้ำหนักสอบเทียบ และค่าความไม่แน่นอน.....	198
จ.1 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 10 กิโลกรัม.....	199
จ.2 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 20 กิโลกรัม.....	200
จ.3 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 30 กิโลกรัม.....	201
จ.4 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 40 กิโลกรัม.....	202
จ.5 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 50 กิโลกรัม.....	203
จ.6 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 60 กิโลกรัม.....	204
จ.7 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 70 กิโลกรัม.....	205
จ.8 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 80 กิโลกรัม.....	206
จ.9 ค่าไคกำลังสองของผลการวัดเปอร์เซ็นต์การตัดที่น้ำหนักถ่วง 10 ถึง 80 กิโลกรัม.....	207

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยวแบบภาระคงที่	
(ก) ชนิดใช้คานเพิ่มขนาดแรงดึง.....	3
(ข) ชนิดถ่วงน้ำหนักโดยตรงกับชิ้นงานทดสอบ.....	4
(ค) ชนิดทดสอบชิ้นงานหลายชิ้นพร้อมกัน.....	4
1.2 เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาระบิด.....	5
1.3 เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาระดึงและภาระบิด.....	6
1.4 เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาระดึงและภาระบิด.....	7
1.5 แบบประกอบของ air bearing.....	7
1.6 แบบประกอบของชิ้นงานทดสอบและก้านดึงชิ้นงานทดสอบ.....	8
2.1 กราฟแสดงพฤติกรรมการคืบที่ความเค้นและอุณหภูมิคงที่	
(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา.....	10
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลา.....	10
2.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบการคืบ.....	12
2.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบ.....	13
2.4 การถ่ายเทความร้อนผ่านทางด้านข้างเตา.....	14
2.5 การถ่ายเทความร้อนผ่านทางด้านบนและล่างของเตา.....	16
2.6 การถ่ายเทความร้อนผ่านครีบทรงกระบอก.....	17
2.7 แสดงการแบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ.....	21
2.8 เอลิเมนต์คานในระบบพิกัดหลัก $X-Y$ และระบบพิกัดเฉพาะที่ $x'-y'$	22
2.9 ผลของแรงดึงและวิธีจับยึดชิ้นงานต่อเปอร์เซ็นต์การคืบ.....	25
2.10 รูปร่างหน้าตัดและตำแหน่งสเตรนเกจของเซนเซอร์สี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	25
3.1 ไดอะแกรมหน้าที่ของการทดสอบการคืบ.....	29
3.2 ไดอะแกรมส่วนประกอบของเครื่องทดสอบการคืบ.....	29
3.3 ไดอะแกรมการทำงานของระบบ.....	30
3.4 ภาพรวมของเครื่องทดสอบที่ออกแบบ.....	31
3.5 ขั้นตอนการออกแบบเตา.....	32
3.6 ขั้นตอนการออกแบบชุดให้ภาระ.....	33

รูปที่	หน้า
3.7 ขั้นตอนการออกแบบคานทอดแรง	34
3.8 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างทดสอบ	35
3.9 ขั้นตอนการออกแบบชุดน้ำหนักถ่วง	36
3.10 แสดงภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนแปลงเมื่อคานทอดแรงเดียว	37
3.11 กลไก turnbuckle	39
4.1 ชิ้นงานทดสอบ	41
4.2 ปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านก้านดึงชิ้นงานทดสอบ	49
4.3 กำลังความร้อนที่ต้องการ	53
4.4 ชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ	54
4.5 ปลายก้านดึงชิ้นงานทดสอบส่วนจับยึดชิ้นงานทดสอบ	56
4.6 การจับยึดก้านดึงชิ้นงานทดสอบกับ universal joint	57
(ก) วิธีการจับยึดด้วยสลัก	57
(ข) ลักษณะปลายก้านดึงชิ้นงานทดสอบ และตัวแปรบอกมิติ	57
4.7 ตำแหน่งก้านดึงชิ้นงานทดสอบเมื่อประกอบกับเตา และชิ้นงานทดสอบ	59
4.8 ภาระที่กระทำต่อสลัก	61
4.9 ข้อต่อ universal ตัวกลาง และตัวแปรบอกมิติ	63
4.10 วิธีกำหนดระยะ h_4	65
4.11 อุปกรณ์ปรับระยะ (รุ่น SK-1802 ยี่ห้อ Duff-Norton)	66
4.12 ข้อต่อ universal ตัวล่าง	66
4.13 ก้านดึง	68
4.14 ข้อต่อ universal ตัวบน	69
4.15 ภาพด้านหน้าของโครงสร้างทดสอบ	70
4.16 การจำลองโครงสร้างของเครื่องทดสอบ	71
(ก) โครงสร้างที่ออกแบบ	71
(ข) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	71
4.17 การส่งผ่านแรงจากจุดหมุนคานทอดแรงไปสู่โครงสร้างทดสอบ	72
4.18 ระยะแฉกตัวของ คานบน คานกลาง และฐาน	75

รูปที่	หน้า
4.19 คานทอดแรงและ knife edge.....	76
4.20 คานทอดแรง.....	77
(ก) ตัวรองรับสลัก knife edge ตัวกลาง.....	77
(ข) การเอียงตัวของคานทอดแรง.....	77
4.21 ภาวะที่กระทำกับสลัก knife edge ตัวกลาง.....	78
4.22 ตัวแขวนชุดให้ภาวะ.....	81
(ก) การประกอบกันระหว่างชุดให้ภาวะขึ้นงานทดสอบ และสลัก knife edge ชุดให้ภาวะ.....	81
(ข) ภาวะที่กระทำกับสลัก knife edge ชุดให้ภาวะ.....	81
4.23 ตัวแขวนชุดน้ำหนักร่อง.....	83
(ก) การประกอบกันระหว่างชุดน้ำหนักร่อง และสลัก knife edge ชุดน้ำหนักร่อง.....	83
(ข) ภาวะที่กระทำกับสลัก knife edge ชุดน้ำหนักร่อง.....	83
4.24 ชุดน้ำหนักร่อง.....	85
4.25 กลไกจับยึดเตา.....	87
4.26 วิธีตั้งศูนย์เตา.....	88
4.27 ไดอะแกรมของชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	89
4.28 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	90
5.1 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยวที่เสร็จสมบูรณ์.....	100
5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตราหดของคานทอดแรงและเปอร์เซ็นต์การดัดบนขึ้นงานทดสอบ.....	102
(ก) โหลดเซลล์ และตำแหน่งสเตรนเกจ.....	102
(ข) สเตรนมิเตอร์ และ switching box.....	102
(ค) dummy strain gage.....	102
5.3 วงจรสเตรนเกจแบบ half bridge ที่มี 1-active gage และ 1-dummy gage.....	103
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดัดและขนาดภาวะที่โหลดเซลล์.....	104
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างภาวะที่โหลดเซลล์ และน้ำหนักร่อง.....	105
5.6 ชิ้นงานที่ใช้วัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตา.....	106
5.7 วิธีติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลกับชิ้นงานทดสอบ.....	107

รูปที่	ณ หน้า
5.8 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาตามแนวความสูงของเตา.....	109
5.9 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาของเครื่องต้นแบบ (อุณหภูมิควบคุม 550°C) และภายในเตาที่ปรับปรุงแล้ว (อุณหภูมิควบคุม 650°C).....	110
5.10 การผันแปรของอุณหภูมิตามเวลา ณ ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ในเตา.....	111
5.11 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบและเกจวัดระยะเคลื่อนตัว.....	112
5.12 เส้นโค้งพฤติกรรมการคืบ.....	113
5.13 อัตราการคืบ.....	113
ค.1 การจัดวางเครื่องมือเพื่อสอบเทียบโหนดเซลล์ที่สร้าง.....	193



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

α	Thermal diffusivity ของอากาศ, มุมระหว่างระนาบหลัก $X-Y$ และ ระนาบย่อย $x' - y'$
β	ความเครียดดัดสูงสุด
δ	ระยะแอนตัว
ε	ความเครียด, Emissivity
$\dot{\varepsilon}_s$	อัตราการคืบ
ν	Kinematics viscosity ของอากาศ
ϕ_{ext}	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของชิ้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว
η	ประสิทธิภาพของโมดูลความร้อน
θ	องศาการหมุน
ρ	ความหนาแน่นของวัสดุ
σ	ความเค้น, Stefan-Boltzman' s constant
$\sigma_{bending}$	ความเค้นดัด
$\sigma_{creep,0.01\%,10^3 h}$	ความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียดคืบ 0.01% ใน 10^3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน
$\sigma_{creep,1\%,10^5 h}$	ความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียดคืบ 1% ใน 10^5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน
$\sigma_{creep,average,10^5 h}$	ค่าเฉลี่ยความเค้นที่อายุการคืบ 10^5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน
$\sigma_{creep,min,10^5 h}$	ความเค้นต่ำสุดที่อายุการคืบ 10^5 ชั่วโมง
σ_{hole}	ความเค้นที่รูร้อยสลัก
σ_u	ความต้านแรงดึงสูงสุด
σ_y	ความต้านแรงดึงคราก
τ	ความเค้นเฉือน
τ_y	ความต้านแรงเฉือนคราก
A	พื้นที่
A_f	พื้นที่หน้าตัดของครีบทรงกระบอก
b	ความสูงของฐานเกลียว, ผลต่างระหว่างความเครียดที่ผิวและความเครียดเฉลี่ย
C	ค่าคงตัวขึ้นกับความแข็งแรง
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ

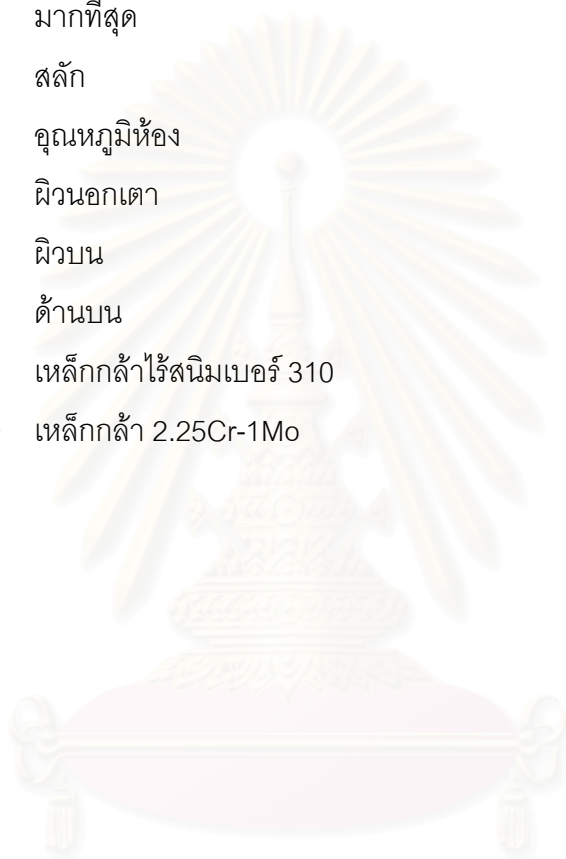
c	ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงผิวโค้ง
d_{root}	เส้นผ่านศูนย์กลางรากเกลียว
d_{gauge}	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบในช่วงความยาวเกจ
$d_{nominal}$	เส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียว
d_{rod}	เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดึงชิ้นงาน
d_{pin}	เส้นผ่านศูนย์กลางของสลัก
E	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น
F_x	แรงกระทำที่จุดต่อในแนวแกน X
F_y	แรงกระทำที่จุดต่อในแนวแกน Y
GL	ความยาวเกจ
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
I	โมเมนต์ความเฉื่อย, กระแสไฟฟ้า
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ
k_t	ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น
K_t	ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นที่ปลายร่องลิ้นภายใต้การระัด
L	ความยาว
L_c	ความยาวคุณลักษณะ
L_{reduce}	ความยาวของส่วนที่หน้าตัดถูกลดขนาด
L_{Thread}	ความยาวของเกลียว
l	ความยาว
M	โมเมนต์ที่จุดต่อ
m	มวล
Nu	Nusselt number
n	จำนวนเกลียว
P	เส้นรอบวง, ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ
PB	คือ เพอร์เซ็นต์การระัด
Pr	Prandtl number
Q	อัตราการสูญเสียความร้อน
R	รัศมีฟิลเลต

Ra	Rayleigh number
r	รัศมี
SF	ตัวประกอบของความปลอดภัย
t_{diff}	ความหนาปลายอุปกรณ์ปรับระยะ
t_{joint}	ความหนาข้อต่อที่รองรับสลัก
t_r	อายุการคืบ
t_{rod}	ความหนาของก้านดิ่งส่วนจับยึดกับ universal joint
t_s	ช่วงเวลาทำอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิใช้งาน
T	อุณหภูมิ
T_i	อุณหภูมิเริ่มต้น
T_f	อุณหภูมิสิ้นสุด
V	ปริมาตรของวัตถุ
w	ความกว้าง
W	น้ำหนักถ่วง
$[K_G]$	เมตริกซ์ความแข็งเกร็ง (stiffness matrix) ในระบบพิกัดหลัก $X-Y$
$[K_L]$	เมตริกซ์ความแข็งเกร็ง (stiffness matrix) ในระบบพิกัดเฉพาะที่ $x-y$
$\{\delta\}$	เวกเตอร์ของระยะเคลื่อนตัวที่จุดต่อ
$\{F\}$	เวกเตอร์ของแรงที่จุดต่อ
$[T]$	Transformation matrix

ตัวห้อย (Subscripts)

$Absorb, Abs$	สะสม
$AISI 4340$	เหล็กกล้า AISI 4340
air	อากาศ
$allowable$	ยอมรับได้
avg	เฉลี่ย
$base$	ฐาน
$bottom$	ผิวล่าง
HT	อุณหภูมิสูง

<i>i</i>	ตัวกลางชั้นที่ <i>i</i>
<i>inside</i>	ภายในเตา
<i>knife</i>	knife edge
<i>Loss</i>	สูญเสีย
<i>lower</i>	ด้านล่าง
<i>max</i>	มากที่สุด
<i>pin</i>	สลัก
<i>RT</i>	อุณหภูมิห้อง
<i>surface</i>	ผิวนอกเตา
<i>top</i>	ผิวดบน
<i>upper</i>	ด้านบน
<i>310S</i>	เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 310
<i>2.25Cr-1Mo</i>	เหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

การคืบ (creep) ของวัสดุ คือ การเสียรูปถาวร (permanent deformation) ของวัสดุที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent) ภายใต้ภาระ (หรือความเค้น) คงที่ การเสียรูปคืบ (creep deformation) ของวัสดุจะปรากฏชัดเจน เมื่อวัสดุถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ของจุดหลอมเหลว (melting point) (1)

การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ท่อไอน้ำ (steam tube) ท่อพักไอน้ำ (header) หม้อต้มน้ำ (boiler) ใบพัดของกังหันไอน้ำ (steam turbine blade) เป็นต้น ผู้ออกแบบจะต้องออกแบบชิ้นส่วนโดยไม่ให้เกิดความเสียหายคืบ (creep failure) ภายในระยะเวลาใช้งาน (service life) ที่กำหนด ดังนั้นจึงต้องทราบข้อมูลการคืบของวัสดุ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการคืบ (creep life) กับความเค้น ที่อุณหภูมิต่าง ๆ หรือความเครียดขณะแตกหัก (fracture strain) เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้อาจค้นหาได้จากคู่มือวัสดุ หรือสอบถามจากผู้ผลิต แต่ข้อมูลก็มีอยู่อย่างจำกัด และอาจไม่สอดคล้องกับสภาวะใช้งาน นอกจากนี้สมบัติการคืบของวัสดุยังมีความกระจัดกระจายสูง ความต้องการข้อมูลที่เชื่อถือได้เป็นสาเหตุที่ทำให้การทดสอบเป็นสิ่งจำเป็น นอกจากนี้ ในการประเมินอายุใช้งานที่เหลือ (remaining life assessment) ของอุปกรณ์ที่มีแนวโน้มเสียหายเนื่องจากการคืบ การประเมินที่แม่นยำต้องการข้อมูลการคืบของวัสดุที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ซึ่งได้จากการทดสอบเท่านั้น (2)

อย่างไรก็ดี การทดสอบเพื่อรวบรวมข้อมูลการคืบของวัสดุสำหรับออกแบบ หรือประเมินอายุใช้งานที่เหลือนั้นใช้ระยะเวลาทดสอบนาน ดังนั้นจึงต้องมีเครื่องทดสอบจำนวนมากเพื่อลดระยะเวลาทดสอบ แต่เนื่องจากเครื่องทดสอบการคืบของต่างประเทศมีราคาสูงทำให้การสร้างเครื่องทดสอบขึ้นใช้เองเป็นสิ่งจำเป็นและคุ้มค่าในระยะยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ต้องใช้เครื่องทดสอบจำนวนมาก

การพัฒนาเครื่องทดสอบการคืบนั้นมีประวัติศาสตร์ที่ยาวนาน จนปัจจุบันมีเครื่องทดสอบการคืบหลากหลายชนิดซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป อย่างไรก็ตามในบรรดาเครื่องทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้น เครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยว (ชิ้นงานทดสอบรับภาระดึง) ยังคงเป็นเครื่องทดสอบ

พื้นฐานที่จำเป็น จากการค้นคว้างานวิจัยภายในประเทศไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว ส่วนงานวิจัยของต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องทดสอบแบบนี้ (3) หรือแบบอื่น ๆ (4,5,6) จะแสดงเพียงผลลัพธ์ของการออกแบบและข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของเครื่องทดสอบ แต่ไม่ได้อธิบายถึงรายละเอียดของการออกแบบชิ้นส่วน (และเครื่อง) วัสดุที่ใช้ และมีติของชิ้นส่วน กล่าวคือมีรายละเอียดไม่เพียงพอสำหรับการสร้างตั้งนั้นการพัฒนาขั้นตอนการออกแบบที่นำไปสู่การกำหนดมิติของชิ้นส่วน และเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียวจึงยังเป็นสิ่งที่จำเป็น การพัฒนานี้จะทำให้เข้าใจอุปสรรคในการออกแบบ และความเชื่อถือได้ของเกณฑ์การออกแบบต่าง ๆ ที่นำมาใช้ได้อย่างถ่องแท้ยิ่งขึ้น ความรู้เหล่านี้จะเป็นพื้นฐานการออกแบบเครื่องทดสอบการคืบชนิดเดียวกันแต่มี capacity ต่างกัน หรือเครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะผสมต่อไป

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว โดยศึกษาข้อบกพร่องที่สำคัญของเครื่องต้นแบบ (7) ได้แก่ ภาวะดัดบนชิ้นงานทดสอบ และความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิตามแนวความยาวเกจ ที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM (American society of testing material standard) จากนั้นจึงออกแบบแก้ไขและสร้างตามลำดับ เครื่องทดสอบที่สร้างเสร็จจะถูกทดสอบเพื่อประเมินคุณภาพ

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง ชนิดของเครื่องทดสอบการคืบ และหลักการทำงานของเครื่องทดสอบแต่ละชนิดโดยสรุป

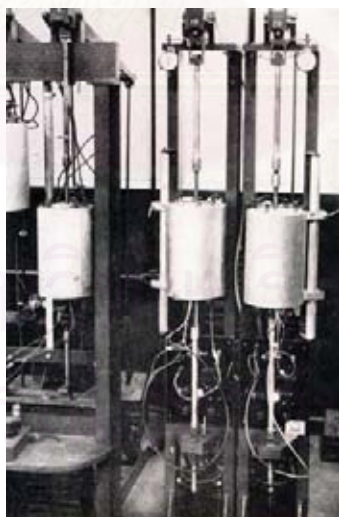
หากจำแนกเครื่องทดสอบการคืบโดยใช้โหมดของภาวะที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบเป็นเกณฑ์แล้ว จะแบ่งเครื่องทดสอบออกได้เป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มแรกเครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะอย่างง่าย (simple loading) กลุ่มที่สองเครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะผสม (combine loading) และกลุ่มที่สามเครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะหลายแกน (multiaxial loading)

เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะอย่างง่าย หมายถึง เครื่องทดสอบที่ให้ภาวะกับชิ้นงานทดสอบแล้วทำให้เกิดความเค้นเพียงชนิดเดียวที่ชิ้นงานทดสอบ ตัวอย่างเครื่องทดสอบแบบนี้ ได้แก่ เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะดึงแกนเดียว (uniaxial tension) หรือเรียกย่อ ๆ ว่าเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว และเครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะบิด (torsional creep testing machine) ภาวะที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ คือแรงดึงแนวแกน และแรงบิด ตามลำดับ

เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะผสม หมายถึง เครื่องทดสอบที่ให้ภาวะกับชิ้นงานทดสอบแล้วทำให้เกิดความเค้นต่างชนิดกันบนชิ้นงานทดสอบ เช่น ความเค้นเฉือนกับความเค้นดึง เป็นต้น

เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะหลายแกน หมายถึง เครื่องทดสอบที่ให้ภาวะกับชิ้นงานทดสอบแล้วทำให้เกิดความเค้นชนิดเดียวกันบนชิ้นงานทดสอบ แต่ทิศทางของความเค้นแตกต่างกัน เช่น ชิ้นงานที่อยู่ภายใต้แรงดึง 2 ทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน (biaxial tension) เป็นต้น

เครื่องทดสอบการคืบชนิดแรกที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น คือ เครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว ซึ่งน่าจะเป็นผลงานของ Andrade ในราวปี ค.ศ. 1910 (8) เครื่องทดสอบของ Andrade เป็นเครื่องทดสอบแบบความเค้นคงที่ (constant stress) ซึ่งหมายความว่า เครื่องทดสอบจะปรับลดขนาดของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบขณะที่การทดสอบดำเนินไป อัตราการลดลงของภาระจะสอดคล้องกับอัตราการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบที่กำลังยืดออกเพื่อให้ความเค้นมีขนาดคงที่ อย่างไรก็ตาม เครื่องทดสอบที่ได้รับความนิยมมากกว่าและใช้แพร่หลายมาจนถึงปัจจุบัน คือ เครื่องทดสอบการคืบแบบภาระคงที่ (constant load) ตัวอย่างของเครื่องทดสอบแบบนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 1.1 (3) ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบมาจากน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักซึ่งอาจจะถูกกดให้มีขนาดเพิ่มขึ้นด้วยหลักการของคานดังที่จะสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 1.1(ก) อย่างไรก็ตามถ้าต้องการ



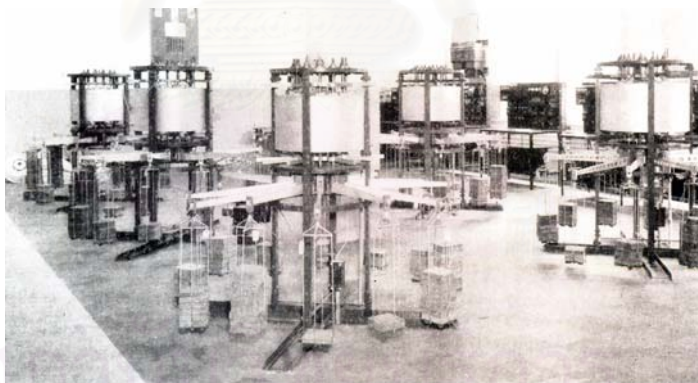
(ก)

รูปที่ 1.1 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดียวแบบภาระคงที่

- (ก) ชนิดใช้คานเพิ่มขนาดของแรงดึงที่ชิ้นงานทดสอบ (3)
- (ข) ชนิดถ่วงน้ำหนักโดยตรงกับชิ้นงานทดสอบ (9)
- (ค) ชนิดทดสอบชิ้นงานหลายชิ้นพร้อมกัน (3)



(ข)

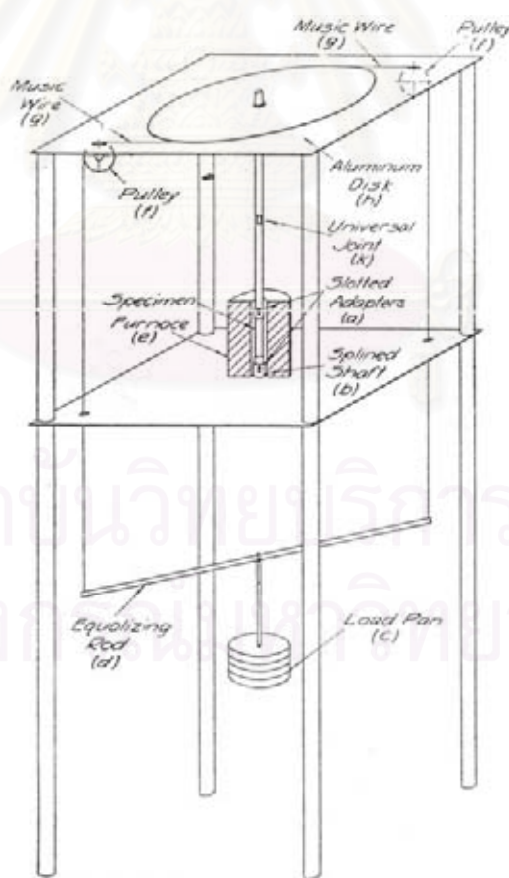


(ค)

รูปที่ 1.1 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดียวแบบภาระคงที่ (ต่อ)

ทดสอบที่ขนาดภาระไม่มาก ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบควรจะมาจากการถ่วงน้ำหนักโดยตรง ตัวอย่างของเครื่องทดสอบแบบนี้แสดงอยู่ในรูปที่ 1.1(ข) (9) เครื่องทดสอบแบบนี้ยังถูกดัดแปลงให้สามารถทดสอบกับชิ้นงานได้หลายชิ้นในคราวเดียวกันโดยการใช้เตาขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 1.1(ค))

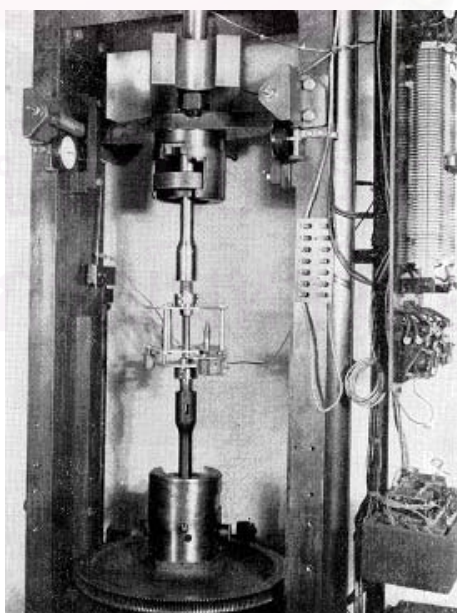
เครื่องทดสอบการคืบอีกชนิดหนึ่งที่ถูกสร้างต่อมาก็คือ เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะบิด โดย Franklin และคณะ ในราวปี คศ. 1931 (4) ลักษณะของเครื่องทดสอบแสดงในรูปที่ 1.2 เหตุผลที่ทดสอบการคืบของวัสดุภายใต้ความเค้นเฉือนเนื่องจากมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการทดสอบภายใต้ความเค้นดึง ดังนี้ 1) การเปลี่ยนแปลงมุมบิดไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้ความผิดพลาดในการวัดความเครียดเฉือนเนื่องจากการแกว่ง (fluctuate) ของอุณหภูมิน้อยกว่ากรณีวัดความเครียดตรง (normal strain) 2) วิธีวัดความเครียดโดยมีความละเอียดสูงทำได้ง่ายกว่าวิธีวัดความเครียดดึง 3) การรักษาขนาดโมเมนต์บิดที่ทำกับชิ้นงานทดสอบให้คงที่ทำได้ง่ายกว่ากรณีชิ้นงานทดสอบรับแรงดึง เพราะในกรณีหลังจะต้องคอยปรับคานทอดแรงให้อยู่ในแนวระดับเพื่อให้ขนาดของแรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบคงที่ และ 4) สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความแข็งแรงของวัสดุในโหมดเฉือน โดยไม่ต้องประมาณจากความความแข็งแรงในโหมดดึง หลักการทำงานของเครื่องทดสอบอธิบายได้ดังนี้ น้ำหนักถ่วงจะสร้างแรงคู่ควบ (couple) บนวงล้อที่ต่อกับก้านจับยึด



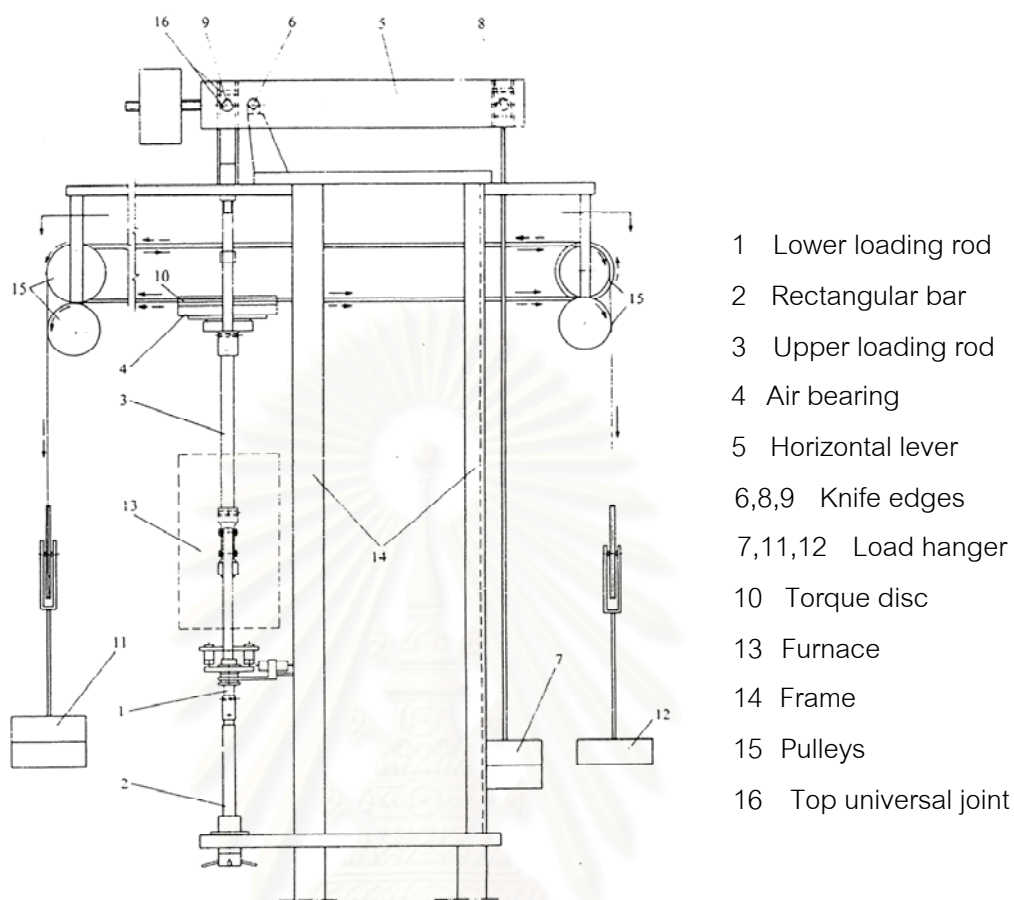
รูปที่ 1.2 เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะบิด (4)

ชิ้นงานทดสอบ ปลายด้านหนึ่งของชิ้นงานทดสอบจะต่อกับก้านจับยึดชิ้นงานทดสอบ ขณะที่อีก ปลายจะถูกยึดตาย (fix) ชิ้นงานทดสอบเป็นท่อผนังบางเพื่อให้กระเดียนท์ของความเค้นเฉือนตาม แนวรัศมีมีค่าน้อย

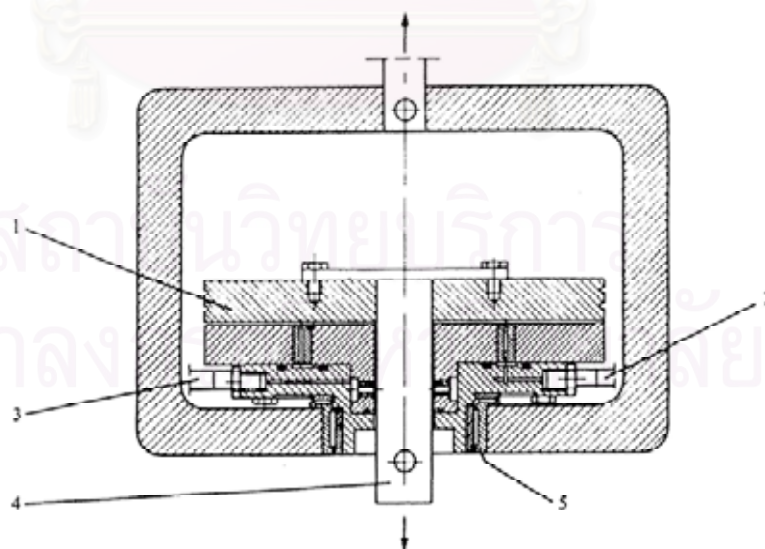
เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาระอย่างง่ายมีจุดอ่อนตรงที่ไม่สามารถจำลองสถานะความเค้นในโครงสร้างซึ่งมักจะเป็นความเค้นผสม (combine stress) จึงมีการพัฒนาเครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาระโหมดผสม และภายใต้ภาระหลายแกน ภาระโหมดผสมที่นิยมคือภาระดึงและ ภาระบิด ส่วนภาระหลายแกนที่นิยมคือภาระดึงที่กระทำตั้งฉากกัน รูปที่ 1.3 แสดงเครื่องทดสอบ การคืบภายใต้ภาระดึงและภาระบิดที่พัฒนาโดย Davis (5) และรูปที่ 1.4 เป็นเครื่องชนิดเดียวกันที่ พัฒนาโดย Trampczynski et al. (6) หลักการให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบของเครื่องทั้งสองนั้น เหมือนกัน จากรูปที่ 4 ภาระดึงได้จากการทดแรงที่มาจากน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักหมายเลข 7 ภาระ บิดเกิดขึ้นจากการที่น้ำหนักของตุ้มน้ำหนักหมายเลข 11 และ 12 บิดจานหมายเลข 10 รูปที่ 1.5 แสดงแบบประกอบของ air bearing ซึ่งรองรับ torque disc ให้หมุนโดยมีความเสียดทานน้อย ขณะที่ torque disc shaft ถูกดึง รูปที่ 1.6 แสดงแบบประกอบของชิ้นงานทดสอบกับก้านดึง ชิ้นงาน จากรูปจะมีข้อต่อ universal ที่ปลายบนและล่างเพื่อกำจัดการเยื้องแนวแกนซึ่งทำให้เกิด โมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ นอกจากที่ปลายบนและล่างของชิ้นงานทดสอบยึดกับก้านดึงด้วย การสอดสลักที่ทำมุมตั้งฉากกันเพื่อลดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ ในงานวิจัยนี้รายงานว่ เปรอร์เซ็นต์การดัดบนชิ้นงานภายใต้แรงดึง ภายใต้ภาระบิด ภายใต้ภาระผสม มีค่าไม่เกิน 3, 4 และ 3 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



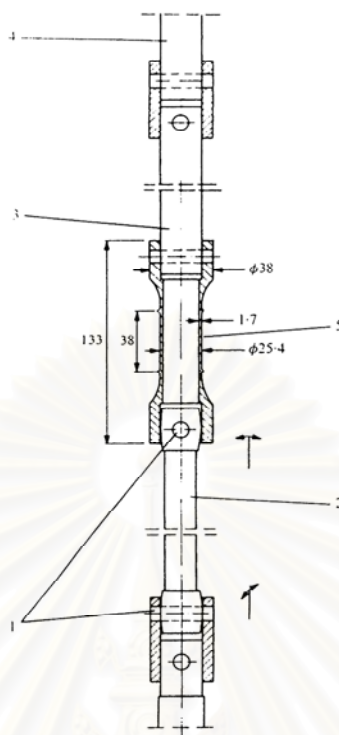
รูปที่ 1.3 เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาระดึงและภาระบิด (5)



รูปที่ 1.4 เครื่องทดสอบการคืบภายใต้ภาวะดึงและภาวะบิด (6)



รูปที่ 1.5 แบบประกอบของ air bearing (6)



รูปที่ 1.6 แบบประกอบของชิ้นงานทดสอบและก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (6)

1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว ไม่รวมการทดสอบการคืบของวัสดุ และการออกแบบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวของชิ้นงานทดสอบ
- 2) ประเมินคุณภาพของเครื่องทดสอบด้วยการทดสอบหา
 - เปอร์เซ็นต์การดัด (percent bending) บนชิ้นงานทดสอบ
 - ความเที่ยง (precision) ในการควบคุมอุณหภูมิ
 - การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานทดสอบตามแนวความยาวแกน

1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีการคืบ
- 2) ศึกษาวิธีทดสอบการคืบของวัสดุและเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว
- 3) ออกแบบโครงสร้างประกอบรวม และออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว

- 4) สร้างขึ้นส่วนของเครื่องทดสอบ
- 5) ประกอบเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว
- 6) ประเมินคุณภาพเครื่องทดสอบ และวิเคราะห์ผล
- 7) สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถลดค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องทดสอบของต่างประเทศได้
- 2) สามารถเผยแพร่ผลการออกแบบให้กับหน่วยงานที่สนใจเพื่อนำไปสู่การสร้างเครื่องข่ายงานวิจัยแขนงนี้
- 3) สร้างความรู้ด้านการออกแบบที่เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบเครื่องทดสอบภายใต้ภาวะผสม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

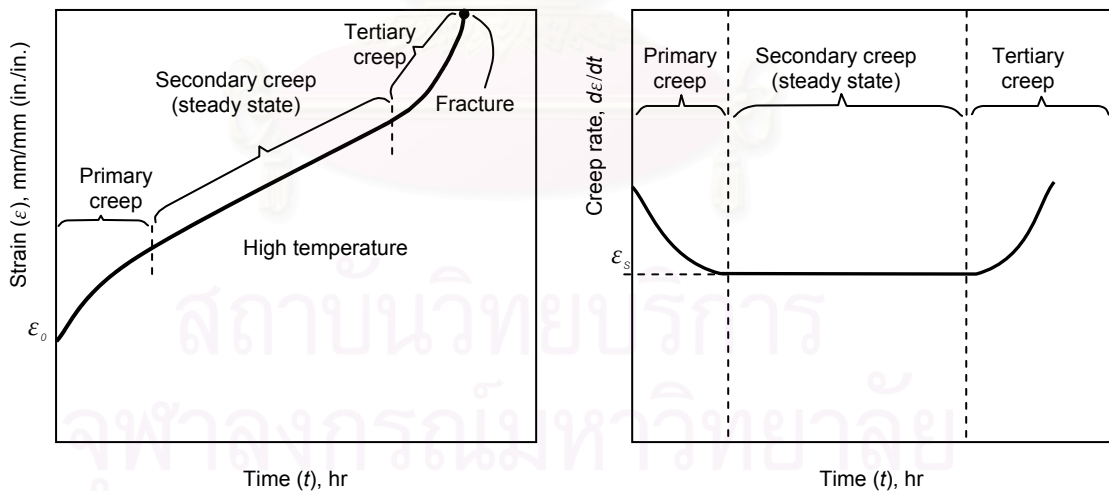
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องทดสอบการคืบ ประกอบด้วย ทฤษฎีการคืบ เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมการคืบของวัสดุ และ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบการคืบ

2.1 ทฤษฎีการคืบ

การคืบ (creep) ของวัสดุ คือ การเสียรูปถาวร (permanent deformation) ของวัสดุที่ขึ้นกับเวลา (time-dependent) ภายใต้ภาวะ (หรือความเค้น) คงที่ การเสียรูปคืบ (creep deformation) ของวัสดุจะปรากฏชัดเจน เมื่อวัสดุถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ ของอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวภายใต้ความเค้น โดยทั่วไปที่อุณหภูมิและแรงดึงคงที่ พฤติกรรมการคืบ ซึ่งแสดงในรูปของความเครียดกับเวลาจะมีลักษณะแสดงดังรูปโดยรูปที่ 2.1(ก) ซึ่งถ้าคำนวณอัตราการคืบ (creep rate) จะได้ความสัมพันธ์กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข) (10)



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคืบกับเวลา

รูปที่ 2.1 กราฟแสดงพฤติกรรมการคืบที่ความเค้นและอุณหภูมิคงที่

พฤติกรรมการคืบในรูปแบบที่ 2.1 (ก) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

- 1) การคืบช่วงปฐมภูมิ (primary creep) ในช่วงนี้อัตราการคืบจะลดลงเมื่อเวลาและความเครียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุมีความต้านทานการเสียรูปมากกว่าตอนเริ่มต้นรับภาระ
- 2) การคืบช่วงทุติยภูมิ (secondary creep) ในช่วงนี้อัตราการคืบมีค่าคงที่ ($\dot{\epsilon}_s$) การคืบในช่วงนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การคืบในสถานะคงตัว (steady state creep)
- 3) การคืบช่วงตติยภูมิ (tertiary creep) ในช่วงนี้อัตราการคืบเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาและความเครียดเพิ่มขึ้น

กลไกระดับจุลภาค (micromechanism) ที่อยู่เบื้องหลังพฤติกรรมการคืบในช่วงปฐมภูมิ และการคืบช่วงทุติยภูมิ คือ กลไก work hardening และ กลไก heat recovery (10) กลไก Work hardening คือ กลไกที่ทำให้วัสดุเสียรูปยากขึ้นเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น กลไกนี้เกิดจากโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมากขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของเกรนขัดขวางกันและกัน กลไก heat recovery คือ กลไกที่ทำให้วัสดุเสียรูปง่ายขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงโครงสร้างสามารถจัดเรียงตัวใหม่จนมีระเบียบมากขึ้น

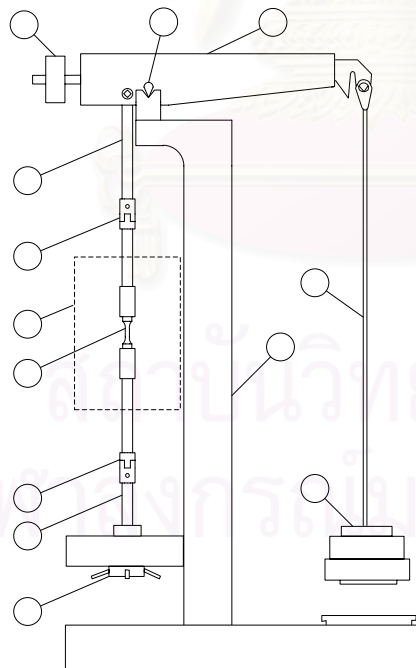
จากรูปที่ 2.1 หลังจากวัสดุเริ่มต้นรับภาระจะเกิดความเครียดเริ่มต้น ϵ_0 และเข้าสู่การคืบช่วงปฐมภูมิ ในช่วงนี้ กลไก work hardening จะเด่นกว่ากลไก recovery ทำให้วัสดุคืบยากขึ้น เมื่อเข้าสู่การคืบช่วงทุติยภูมิ กลไก work hardening และ กลไก heat recovery จะสมดุลกันทำให้อัตราการคืบคงที่ เมื่อเข้าสู่การคืบช่วงตติยภูมิอัตราการคืบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเสียหายจุลภาค เช่น creep cavity, microcrack เพิ่มจำนวนขึ้นทำให้พื้นที่ตัดที่รับแรงลดลง ดังนั้นความเค้นจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งชิ้นงานขาด

พฤติกรรมการคืบนั้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ โครงสร้างจุลภาค อุณหภูมิ ความเค้น เป็นต้น การพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ หรือการนำวัสดุไปใช้งานในสภาวะใช้งานที่ยังไม่มีข้อมูลทดสอบ ผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบ (โดยการทดสอบ) ว่าวัสดุเหมาะสมกับสภาวะใช้งานหรือไม่ การทดสอบการคืบ (creep test) คือ การวัดระยะเคลื่อนตัว (displacement) ของชิ้นงานทดสอบที่เวลาต่างๆ ตั้งแต่เริ่มให้ภาระกับชิ้นงานจนชิ้นงานทดสอบเสียหาย สำหรับการทดสอบจะทำการที่อุณหภูมิสูง ระยะเวลานับจากเริ่มทดสอบจนชิ้นงานทดสอบแตกหัก คืออายุการคืบ (creep life or

time to rupture, t_r) การทดสอบการคืบโดยทั่วไปจะเป็นแบบภาระคงที่ (constant-load testing) หมายความว่า แรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบมีขนาดคงที่

2.2 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว

เครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยวแบบภาระคงที่ โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 จากรูป หลักการทำงานของเครื่องทดสอบ คือแรงเนื่องจากน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักจะส่งไปยังคานทอดแรงด้วยก้านน้ำหนักถ่วง (หมายเลข 4) คานทอดแรง (หมายเลข 2) จะเพิ่มขนาดของแรงและส่งไปยังชิ้นงานทดสอบผ่านก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (หมายเลข 6) อัตราทดของคานทอดแรงโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 3:1 ถึง 20:1 (11) ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าผู้ออกแบบต้องการให้เครื่องทดสอบใช้ทดสอบที่ภาระสูงสุดขนาดเท่าใด จุดหมุนของคานทอดแรง (หมายเลข 3) จะเป็น knife edge วางบนรองรับ จุดต่อระหว่างคานทอดแรงกับก้านดึงชิ้นงานทดสอบและก้านน้ำหนักถ่วงจะเป็น knife edge เช่นกัน เหตุผลที่ใช้จุดหมุนแบบนี้ เพื่อลดแรงเสียดทานและเพื่อให้ตำแหน่งของแรงที่กระทำกับคานทอดแรงไม่เปลี่ยนแปลง ปัจจัยทั้งสองนี้มีผลต่อขนาดของแรงที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบการคืบ

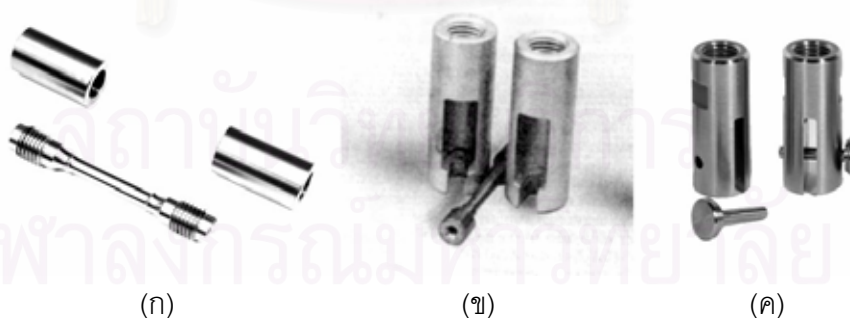
วิธีจับยึดชิ้นงานทดสอบขึ้นอยู่กับลักษณะปลายของชิ้นงานทดสอบ (รูปที่ 2.3) โดยทั่วไปมี 3 วิธี คือ (12)

- 1) จับยึดด้วยเกลียว วิธีนี้ใช้กับชิ้นงานทดสอบทรงกระบอกทำเกลียวหัวท้าย
- 2) จับยึดด้วยการทำบารับปลายชิ้นงาน วิธีนี้ใช้กับชิ้นงานทดสอบทรงกระบอกที่ปลายมีขนาดใหญ่กว่าลำตัว หรือเรียกว่าหัวกระดุม (button head)
- 3) จับยึดด้วยสลัก วิธีนี้นิยมใช้กับชิ้นงานทดสอบแผ่นแบน

2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก ดังนั้นเตาที่ใช้จึงเป็นทรงกระบอกเพื่อให้ความร้อนถ่ายเทไปที่ชิ้นงานทดสอบได้สม่ำเสมอในแนวเส้นรอบวง ในการออกแบบเตาจะต้องคำนวณหาความร้อนสูญเสีย (heat loss) เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกกำลังวัตต์ของเตาและกำหนดความหนาของฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิภายนอกเตาสูงเกินไปจนมีผลกระทบต่ออุปกรณ์อื่น ๆ เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะสมการที่ใช้คำนวณความร้อนสูญเสียจากส่วนต่าง ๆ ของเตา

วิธีการจับยึดชิ้นงานทดสอบมีผลโดยตรงกับขนาดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ โดยการจับยึดวิธีที่สองจะช่วยลดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบได้ดีกว่าอีกสองแบบที่เหลือ



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบ (12)

- (ก) จับยึดด้วยเกลียว (thread type adapter)
- (ข) จับยึดด้วยการทำบารองรับ (button head)
- (ค) จับยึดด้วยสลัก (pin type adapter)

2.3.1 การถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้านข้างของเตา

รูปที่ 2.4 แสดงภาพตัดของเตา ชั้นในสุดคือ โมดูลทำความร้อน (heating module) ชั้นถัดมาเป็นฉนวนความร้อน และชั้นนอกสุดเป็นเปลือกเตาทำด้วยโลหะ

สำหรับการถ่ายเทความร้อนในสถานะคงตัว (steady state) ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการนำ คือ

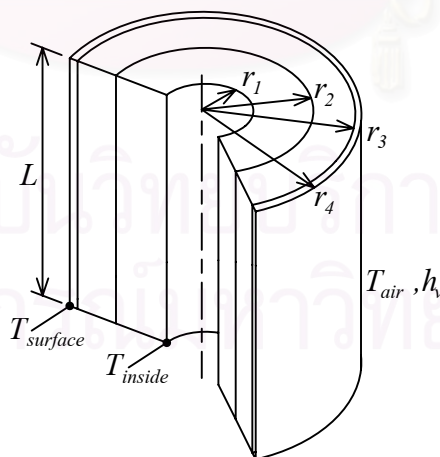
$$Q = \frac{(T_{inside} - T_{surface})}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_3 L}} \quad (2.1)$$

ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการพาที่ผิวของเตา คือ

$$Q = h_v A_0 (T_{surface} - T_{air}) + \varepsilon \sigma A_0 (T_{surface,side}^4 - T_{air}^4) \quad (2.2)$$

และ

$$h_v = Nu \frac{k_{air}}{L_c} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังด้านข้างเตา

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (2.4)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.5)$$

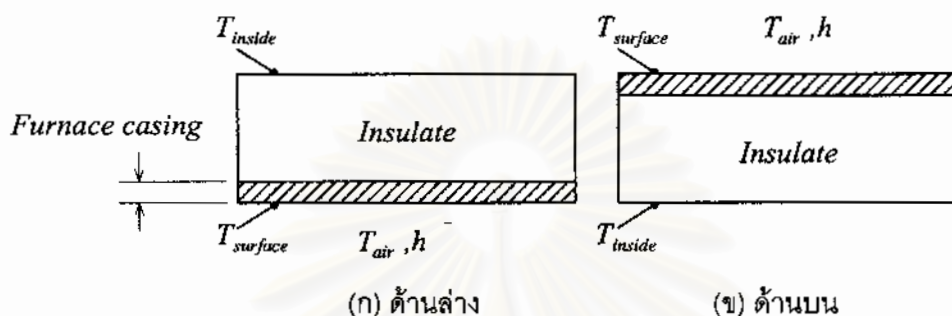
$$Ra = \frac{g}{T_{surface}} (T_{surface} - T_{air}) L_c^3 \quad (2.6)$$

$$v\alpha$$

โดย	Q	คือ อัตราการสูญเสียความร้อน (W)
	T_{inside}	คือ อุณหภูมิภายในเตา (K)
	$T_{surface}$	คือ อุณหภูมิผิวของเตา (K)
	T_{air}	คือ อุณหภูมิอากาศภายนอก (K)
	r_i	คือ รัศมีด้านในของชั้นที่ i (m)
	k_i	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวกลางชั้นที่ i (W/m.K)
	L	คือ ความสูงของเตา (m)
	A_0	คือ พื้นที่ผิวของเปลือกเตา (m^2)
	h_v	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระของพื้นผิวแนวดิ่ง ($W/m^2.K$)
	Nu	คือ Nusselt number (ไร้หน่วย)
	Pr	คือ Prandtl number (ไร้หน่วย)
	Ra	คือ Rayleigh number (ไร้หน่วย)
	L_c	คือ ความยาวคุณลักษณะ (characteristic length, m)
	ν	คือ Kinematics viscosity ของอากาศ (m^2/s)
	ε	คือ Emissivity
	σ	คือ Stefan-Boltzman' s constant
	k_{air}	คือ Thermal conductivity ของอากาศ (W/m.K)
	α	คือ Thermal diffusivity ของอากาศ (m^2/s)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ($9.807 m/s^2$)

2.3.2 การถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้านบนและด้านล่างของเตา

ผนังด้านบนและล่างของเตาจะเป็นผนังวงกลมซ้อนกัน 2 ชั้น ชั้นในคือฉนวนและชั้นนอกคือเปลือกเตา รูปที่ 2.5(ก) และ (ข) แสดงการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังด้านล่าง และด้านบนตามลำดับ



รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังด้านบนและล่างของเตา

การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการนำ คือ

$$Q = \frac{A(T_{inside} - T_{surface})}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}} \quad (2.7)$$

โดย A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับทิศการนำความร้อน (m^2)

L_i คือ ความหนาของตัวกลางชั้นที่ i (m)

ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการพา คือ

$$Q = hA(T_{surface} - T_{air}) + \epsilon\sigma A(T_{surface}^4 - T_{air}^4) \quad (2.8)$$

และ

$$h = Nu \frac{k_{air}}{L_c} \quad (2.9)$$

สำหรับผนังด้านบน (อากาศเย็นอยู่เหนือผิวร้อน)

$$Nu = \begin{cases} 0.54Ra^{1/4}, & 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \\ 0.15Ra^{1/3}, & 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \end{cases} \quad (2.10)$$

สำหรับผนังด้านล่าง (อากาศเย็นอยู่ใต้ผิวร้อน)

$$Nu = 0.27Ra^{1/4} \quad (2.11)$$

2.3.3 การถ่ายเทความร้อนที่ก้ำนตั้งขึ้นงานทดสอบ

เนื่องจากก้ำนตั้งขึ้นงานทดสอบยื่นออกมาจากด้านบนและด้านล่างเตาทำให้เตาสถูญเสียความร้อนสู่ภายนอกด้วยการนำได้ ในที่นี้จะจำลองก้ำนตั้งขึ้นงานทดสอบเป็นครีบทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งอัตราการการสูญเสียความร้อน คือ

$$Q_f = (T_{base} - T_{air}) \left(\sqrt{h_{air} P k A_f} \right) \tanh(m L_f) \quad (2.12)$$

และ
$$m = \sqrt{\frac{h_{air} P}{k A_f}} \quad (2.13)$$

โดย A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของครีบทรงกระบอก (m^2)

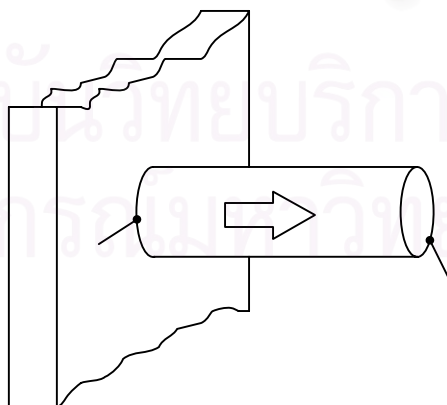
P คือ เส้นรอบวงของครีบทรง (m)

T_{base} คือ อุณหภูมิที่ฐาน (K)

h_{air} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระของอากาศ ($W/m^2.K$)

L_f คือ ความยาวของครีบทรง (m)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของครีบทรง ($W/m.K$)



รูปที่ 2.6 การถ่ายเทความร้อนผ่านครีบทรงกระบอก

2.4 กำลังความร้อนของเตา

กำลังของเตาที่ต้องใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจากค่าเริ่มต้น ถึงค่าสิ้นสุดภายในระยะเวลาที่กำหนด P สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (13)

$$P = \left(\frac{Q_{Absorb}}{t_s} + \frac{2}{3} Q_{Loss} \right) \frac{SF}{\eta} \quad (2.14)$$

โดย Q_{Absorb} คือ ปริมาณความร้อนสะสมในชิ้นส่วนเตา

t_s คือ ช่วงเวลาทำอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิใช้งาน

Q_{Loss} คือ ปริมาณความร้อนสูญเสียจากเตา (ในสถานะคงตัว) ณ อุณหภูมิใช้งาน

SF คือ ตัวประกอบความปลอดภัย สำหรับระบบขนาดเล็กเอกสารอ้างอิง (13)

แนะนำว่าควรเผื่อ 10 เปอร์เซ็นต์ (หรือ $SF = 1.1$)

η คือ ประสิทธิภาพของโมดูลทำความร้อนสำเร็จรูป

ปริมาณความร้อนที่วัตถุมวล m เก็บสะสม แทนด้วยสัญลักษณ์ Q_{Abs} สามารถหาได้

$$Q_{Abs} = mC_p(T_f - T_i) \quad (2.15)$$

หรือ
$$Q_{Abs} = \rho VC_p(T_f - T_i) \quad (2.16)$$

โดย C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ

ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

V คือ ปริมาตรของวัตถุ

T_i, T_f คือ อุณหภูมิเริ่มต้นและสิ้นสุดของวัตถุ ตามลำดับ

2.5 เกณฑ์การออกแบบชิ้นส่วน

เนื่องจากหน้าที่และอุณหภูมิใช้งานของชิ้นส่วนในเครื่องทดสอบการสืบแตกต่างกัน จึงต้องเลือกใช้เกณฑ์การออกแบบที่เหมาะสม สำหรับชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิห้องจะใช้เกณฑ์ว่าความเค้นบนชิ้นส่วนเท่ากับความเค้นที่ยอมรับได้ หรือความแข็งแรงของชิ้นส่วนเท่ากับความแข็งแรงที่ยอมรับได้ สำหรับชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูงจะใช้เกณฑ์ความเค้นบนชิ้นส่วนเท่ากับความเค้นที่ยอมรับได้ รายละเอียดของเกณฑ์การออกแบบเหล่านี้จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.5.1 การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิห้องด้วยเกณฑ์ความเค้น

สมการออกแบบ คือ

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_y}{SF} \quad (2.17)$$

โดย σ_{max} คือ ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วน

σ_y คือ ความต้านแรงดึงคราก (yield strength) ของวัสดุ

SF คือ ตัวประกอบความปลอดภัย (safety factor)

2.5.2 การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิห้องด้วยเกณฑ์ความแข็งแรง

สำหรับชิ้นส่วนที่อยู่ภายใต้ภาระดัด เช่น สลัก หรือโครงของเครื่องทดสอบ เกณฑ์การออกแบบที่เหมาะสม คือเกณฑ์ความแข็งแรง (rigidity) ด้วยเกณฑ์การออกแบบนี้ระยะแอ่นตัว (deflection) δ จะถูกควบคุมให้ไม่เกินค่าที่ยอมรับ อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกจะเขียนสมการออกแบบในรูปที่ถูกระยะระหว่างจุดรองรับ L ดังนี้

$$\frac{\delta}{L} \leq C \quad (2.18)$$

โดย C คือ ค่าคงตัวขึ้นกับความแข็งแรงที่ต้องการ เอกสารอ้างอิง (14) แนะนำค่า C ไว้ดังนี้

สำหรับชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไป $C = 5 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$

สำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง $C = 1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$

สำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง $C = 1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-5}$

2.5.3 การออกแบบชิ้นส่วนที่ใช้งาน ณ อุณหภูมิสูงด้วยเกณฑ์ความเค้น

สมการออกแบบคือ

$$\sigma_{max} = \sigma_{allowable} \quad (2.19)$$

โดย $\sigma_{allowable}$ คือ ความเค้นยอมรับ (allowable stress) ซึ่งเท่ากับค่าต่ำสุดของความแข็งแรงของวัสดุ 6 กรณีต่อไปนี้ (2)

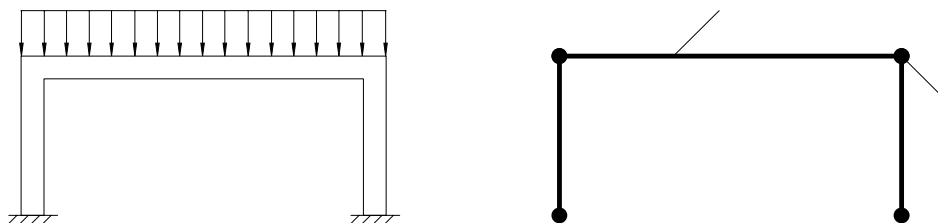
- 1) 25% ของค่าต่ำสุดของความต้านแรงดึงสูงสุด (ultimate strength) ที่อุณหภูมิห้อง $\sigma_{u,RT}$
- 2) 25% ของความต้านแรงดึงที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{u,HT}$
- 3) 67% ของค่าต่ำสุดของความต้านแรงดึงครากที่อุณหภูมิห้อง $\sigma_{y,RT}$
- 4) 67% ของความต้านแรงดึงครากที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{y,HT}$
- 5) ค่าต่ำสุดระหว่าง
 - 5.1) 100% ของความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียดคืบ (creep strain) 0.01% ใน 10^3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{creep,0.01\%,10^3 h}$ และ
 - 5.2) 100% ของความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียดคืบ 1% ใน 10^5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{creep,1\%,10^5 h}$
- 6) ค่าต่ำสุดระหว่าง
 - 6.1) 67% ของค่าเฉลี่ยความเค้นที่อายุการคืบ 10^5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{creep,average,10^5 h}$
 - 6.2) 80% ของความเค้นต่ำสุดที่อายุการคืบ 10^5 ชั่วโมง (โดยใช้การประมาณค่านอกช่วง) ที่อุณหภูมิใช้งาน $\sigma_{creep,min,10^5 h}$

2.6 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) คือ วิธีหาผลเฉลยประมาณ (approximate solution) ของสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีเงื่อนไขขอบเขตซับซ้อน เนื่องจากวิธานิพนธ์นี้ประยุกต์วิธีนี้เพื่อหาระยะแอ่นตัว (deflection) ของโครงสร้างทดสอบจึงจะกล่าวถึงแนวคิดของวิธีการนี้โดยย่อ

ในภาพรวมแล้วระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 5 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 แบ่งปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 2.7 คานรูปตัวยูคว่ำถูกแทนที่ด้วยเอลิเมนต์เส้นตรง 3 เอลิเมนต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดงการแบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

ขั้นตอนที่ 2 สร้างสมการเอลิเมนต์ (element equation) สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ย่อย สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ใช้เอลิเมนต์คาน (beam element) 2 มิติ สมการที่เกี่ยวข้องกับเอลิเมนต์ชนิดนี้จะกล่าวถึงในเนื้อหาส่วนถัดไป

ขั้นตอนที่ 3 ประกอบสมการเอลิเมนต์ทั้งหมดเพื่อสร้างสมการระบบ (system equation)

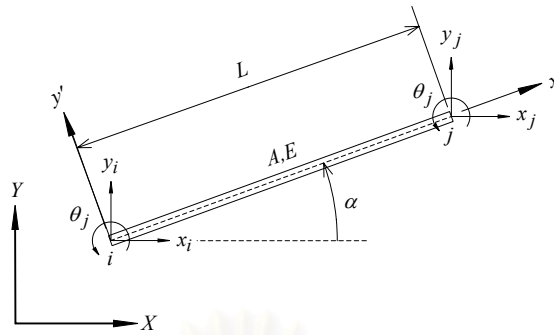
$$\Sigma(\text{element equation}) = [K_G]_{\text{sys}} \{\delta\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.20)$$

ขั้นตอนที่ 4 ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ลงในสมการ (2.20) แล้วแก้สมการหาค่าของ $\{\delta\}_{\text{sys}}$ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่ไม่รู้ค่าที่จุดต่อ

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าของพารามิเตอร์อื่นที่ต้องการรู้ เช่น ความเค้น ความเครียด เป็นต้น จากผลเฉลยที่จุดต่อ

เอลิเมนต์คาน (beam element) ในรูปที่ 2.8 แต่ละจุดต่อ (node) จะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 3 ตัว คือ

- 1) ระยะเวลาเคลื่อนตัวที่จุดต่อในแนวแกน X แทนด้วย x
- 2) ระยะเวลาเคลื่อนตัวที่จุดต่อในแนวแกน Y แทนด้วย y
- 3) มุมเอียงที่จุดต่อ แทนด้วย θ ในระบบพิกัดหลัก $X-Y$ (global coordinate) และ ระบบพิกัดเฉพาะที่ $x' - y'$ (local coordinate)



รูปที่ 2.8 เอลิเมนต์คานในระบบพิกัดหลัก $X-Y$ และระบบพิกัดเฉพาะที่ $x' - y'$

สมการเอลิเมนต์ในระบบพิกัดหลัก คือ

$$[K_G] \{\delta\} = \{F\} \quad (2.21)$$

(6×6) (6×1) (6×1)

โดย $[K_G]$ คือ เมตริกซ์ความแข็งเกร็ง (stiffness matrix) ในระบบพิกัดหลัก $X-Y$

$\{\delta\}$ คือ เวกเตอร์ของระยะเคลื่อนตัวที่จุดต่อ

$\{F\}$ คือ เวกเตอร์ของแรงที่จุดต่อ

เมตริกซ์นี้ $[K_G]$ จะสัมพันธ์กับเมตริกซ์ความแข็งเกร็งในระบบพิกัดเฉพาะที่ $[K_L]$ ตามสมการต่อไปนี้ (15)

$$[K_G] = [T]^T [K_L] [T] \quad (2.22)$$

โดย $[T]$ คือ Transformation matrix

$$[K_L] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\{\delta\} = [x_i \quad y_i \quad \theta_i \quad x_j \quad y_j \quad \theta_j]^T \quad (2.25)$$

$$\{F\} = [Fx_i \quad Fy_i \quad M_i \quad Fx_j \quad Fy_j \quad M_j]^T \quad (2.26)$$

โดย	L	คือ ความยาวของเอลิเมนต์
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดเอลิเมนต์
	E	คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น
	I	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเอลิเมนต์
	α	คือ มุมระหว่างระนาบหลัก $X-Y$ และ ระนาบย่อย $x' - y'$
	Fx	คือ แรงกระทำที่จุดต่อในแนวแกน X
	Fy	คือ แรงกระทำที่จุดต่อในแนวแกน Y
	M	คือ โมเมนต์ที่จุดต่อ

2.7 เกณฑ์คุณภาพของเครื่องทดสอบ

2.7.1 เปอร์เซ็นต์การตัดของชิ้นงานทดสอบ

ในการออกแบบเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียว ภาวะที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบจะต้องทำให้เกิดความเค้นบนหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม ชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบที่ผลิตจาก machine shop ทั่วไปมีความคลาดเคลื่อน (tolerances) ± 0.05 ถึง ± 0.25 มม. (16) เมื่อนำชิ้นส่วนมาประกอบ จึงมีการเยื้องศูนย์ในชุดให้ภาวะชิ้นงานทดสอบ ทำให้ชิ้นงานทดสอบต้องรับโมเมนต์ดัด โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้การกระจายความเค้นบนหน้าตัดชิ้นงานทดสอบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้อายุการคืบของชิ้นงานทดสอบลดลงจากกรณีที่ไม่ม่มีโมเมนต์ดัด

(17)สาเหตุของการเยื้องศูนย์ได้แก่

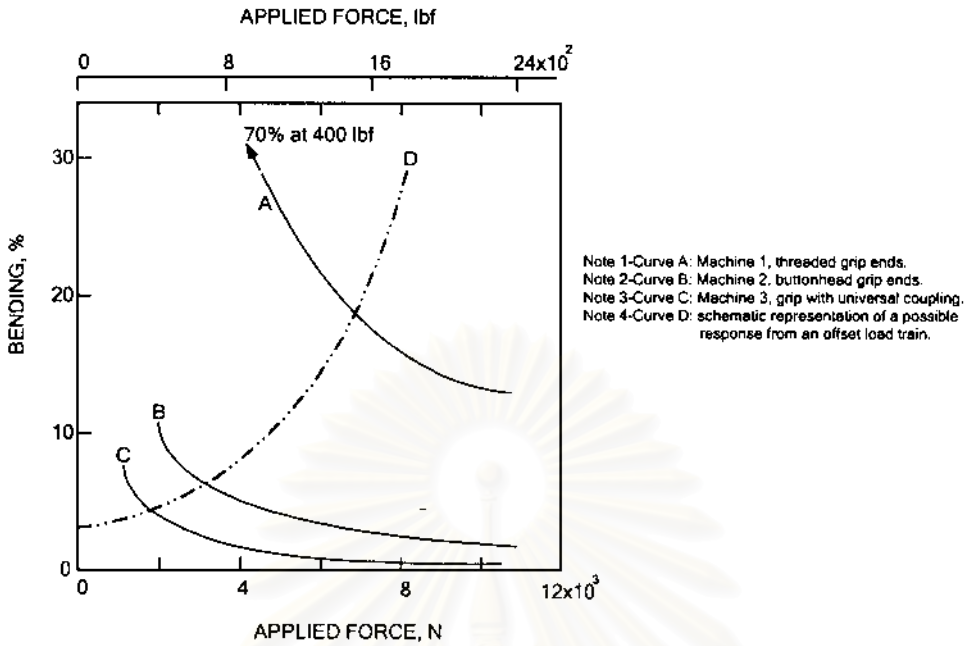
- ตัวจับชิ้นงานทดสอบ (grip) ตัวบนและตัวล่างไม่ร่วมศูนย์กัน
- ชิ้นงานทดสอบไม่ร่วมศูนย์กับตัวจับชิ้นงานทดสอบไม่ร่วมศูนย์
- ความผิดพลาดในการผลิตชิ้นงานทดสอบ เช่น ปลายของชิ้นงานทดสอบทั้งสองด้านไม่ร่วมศูนย์กัน หรือ หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบไม่สมมาตร

การบ่งชี้ว่าชิ้นงานทดสอบรับโมเมนต์ดัดมากน้อยเพียงใด จะพิจารณาจาก เปอร์เซ็นต์การดัด (percent bending) ซึ่งมีนิยามว่า อัตราส่วนของความเครียดที่ผิวของชิ้นงานต่อความเครียดเฉลี่ย มาตรฐาน ASTM E139 (18) กำหนดว่าเปอร์เซ็นต์การดัดควรมีค่าน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ Hayhurst (6) แนะนำว่าควรมีค่าน้อยกว่า 7 เปอร์เซ็นต์

วิธีการลดเปอร์เซ็นต์การดัดนอกจากการควบคุมคุณภาพการผลิตชิ้นส่วนแล้วยังทำได้โดย

- 1) ออกแบบชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ (loading train) ให้มีข้อต่อ (joint) ที่ให้ตัวได้ 2 ทิศทาง หรือข้อต่อ universal อย่างน้อย 2 ตำแหน่ง ที่จุดซึ่งอยู่เหนือและอยู่ใต้ชิ้นงานทดสอบ ตามลำดับ
- 2) ใช้วิธีจับยึดชิ้นงานทดสอบแบบที่ไม่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่ตำแหน่งจับยึด ซึ่งได้แก่ วิธีทำบารองรับชิ้นงาน (button head)

รูปที่ 2.9 แสดงผลของวิธีจับยึดชิ้นงานทดสอบที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดัดที่ขนาดแรงดึงต่าง ๆ (19) จากรูป เส้นโค้ง D แสดงกรณีที่ไม่ใช้ข้อต่อ universal ทำให้เปอร์เซ็นต์การดัดเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดึงมีขนาดเพิ่มขึ้น เส้นโค้ง A ถึง C แสดงแนวโน้มกรณีที่ใช้ข้อต่อ universal ในชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ จะเห็นว่าข้อต่อ universal ช่วยให้เปอร์เซ็นต์การดัดลดลงเมื่อขนาดแรงดึงสูงขึ้นสำหรับการจับยึดชิ้นงานทดสอบทุกวิธี นอกจากนี้การจับยึดชิ้นงานด้วยข้อต่อ universal อีกชุดหนึ่ง (เส้นโค้ง C) จะทำให้เปอร์เซ็นต์การดัดน้อยกว่าการจับยึดแบบทำบารองรับ (เส้นโค้ง B) และแบบเกลียว (เส้นโค้ง C)



รูปที่ 2.9 ผลของแรงดึงและวิธีจับยึดชิ้นงานต่อเปอร์เซ็นต์การดัด (18)

การวัดเปอร์เซ็นต์การดัดทำได้โดย ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเครียดที่ตำแหน่งของชิ้นงานทดสอบ ในมาตรฐาน ASTM E1012 (19) จะมีรายละเอียดของเซนเซอร์หน้าตัดต่าง ๆ และตำแหน่งของสเตรนเกจสำหรับหน้าตัดแต่ละชนิดรวมทั้งวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบ อย่างไรก็ตาม วิทยาลัยนิพนธ์นี้เลือกใช้เซนเซอร์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นจะกล่าวถึงสมการที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์ชนิดนี้เท่านั้น รูปที่ 2.10 แสดงเซนเซอร์หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา (thick rectangular section) และตำแหน่งติดสเตรนเกจ



รูปที่ 2.10 รูปร่างหน้าตัดและตำแหน่งสเตรนเกจของเซนเซอร์สี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา

เมื่อเซนเซอร์รับแรงดึง จะเกิดความเครียดที่สเตรนเกจหมายเลข 1 ถึง 4 เท่ากับ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ และ ε_4 ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การตัด PB จะคำนวณได้จาก

$$PB = \frac{\beta}{\varepsilon_{avg}} \times 100 \quad (2.27)$$

และ

$$\varepsilon_{avg} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{4} \quad (2.28)$$

$$\beta = \frac{|b_1 - b_3| + |b_2 - b_4|}{2} \quad (2.29)$$

$$b_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon_{avg} \quad (2.30 \text{ ก})$$

$$b_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_{avg} \quad (2.30 \text{ ข})$$

$$b_3 = \varepsilon_3 - \varepsilon_{avg} \quad (2.30 \text{ ค})$$

$$b_4 = \varepsilon_4 - \varepsilon_{avg} \quad (2.30 \text{ ง})$$

2.7.2 มุมเอียง (inclination angle) ของคานทดสอบ

ในระหว่างการทดสอบชิ้นงานทดสอบจะยืดออกตามเวลา ทำให้อัตราทดของคานทดสอบเปลี่ยนแปลงเนื่องจากคานทดสอบเอียงจากแนวระดับ มาตรฐาน ASTM E139 (18) กำหนดขอบเขตมุมเอียงของคานทดสอบไว้ไม่เกิน ± 10 องศา กับแนวระดับในกรณีที่ไม่มีการปรับมุมเอียงของคานทดสอบ

2.7.3 อุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบ

เกณฑ์เกี่ยวกับอุณหภูมิมินผิวชิ้นงานทดสอบ มีดังนี้

- 1) การทดสอบที่อุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 982°C (1800°F) อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานทดสอบจะต้องเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $\pm 1.7^\circ\text{C}$ ($\pm 3^\circ\text{F}$) ส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ กำหนดให้เปลี่ยนแปลงในช่วง $\pm 2.8^\circ\text{C}$ ($\pm 5^\circ\text{F}$) (18)
- 2) ผลต่างของอุณหภูมิในช่วงความยาวเกจ ควรมีค่าน้อยกว่า 1°C (18)

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องทดสอบ

3.1 ภาพรวมของเครื่องทดสอบการคืบ

เครื่องทดสอบการคืบของวัสดุ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

- 1) ส่วนที่ทำหน้าที่ให้ภาระขึ้นงานทดสอบ
- 2) ส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความร้อนขึ้นงานทดสอบ

3.1.1 ส่วนที่ทำหน้าที่ให้ภาระขึ้นงานทดสอบ

การให้ภาระต้องการต้นกำเนิดแรง และวิธีส่งทอดแรงจากต้นกำเนิดไปสู่ชิ้นงาน ต้นกำเนิดแรงที่มีใช้กันได้แก่ ได้แก่ ตั้มน้ำหนัก, ตั้มน้ำหนักร่วมกับคานทอดแรง, actuator เป็นต้น วิทยานิพนธ์นี้เลือกวิธีทอดแรงจากตั้มน้ำหนักด้วยคานทอดแรง เพราะว่าช่วยลดขนาดแรงต้นกำเนิด (น้ำหนักถ่วง) ได้ และไม่ต้องการอุปกรณ์ควบคุมซับซ้อนเหมือน actuator

3.1.2 ส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความร้อนขึ้นงานทดสอบ

การให้ความร้อนขึ้นงานต้องการต้นกำลังที่สอดคล้องกับวิธีให้ความร้อนที่เลือก และต้องควบคุมอุณหภูมิชิ้นงานให้ได้ตามที่กำหนดและไม่ผันแปรตามเวลาจนเกินขอบเขตที่ยอมรับ วิธีให้ความร้อนที่นิยมใช้เช่น ขดลวดความต้านทาน, การเหนี่ยวนำ (induction) ในการทดสอบการคืบ ภายใต้อุณหภูมิคงที่ (isothermal creep test) นิยมใช้เตาขดลวดความต้านทาน เพราะว่าเตาชนิดนี้มีเกรเดียนท์ของอุณหภูมิภายในเตาน้อยกว่าวิธีให้ความร้อนแบบอื่น การให้ความร้อนด้วยวิธีเหนี่ยวนำเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีความยาวเกจน้อย และการทดสอบที่ต้องการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น การทดสอบ Thermal fatigue หรือ Thermo-mechanical fatigue เป็นต้น ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้เลือกวิธีให้ความร้อนเป็นเตาขดลวดความต้านทาน

3.2 ภาพรวมของการออกแบบ

ภาพรวมของการออกแบบ แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. แจกแจงส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบ และการเขียนรูปร่างของเครื่องทดสอบ
2. สร้างขั้นตอนการออกแบบ (design procedure) ส่วนประกอบหลัก
3. กำหนดข้อมูลจำเพาะ (specification) ของเครื่องทดสอบ โดยอาศัยแนวทางจากข้อมูลเครื่องทดสอบเชิงพาณิชย์และบทความวิจัย
4. ออกแบบ (รูปร่าง, กลไก, ชนิดวัสดุ, ขนาด) ชิ้นส่วนในแต่ละส่วนประกอบหลัก
5. เขียนแบบภาพประกอบ (assembly drawing) ของเครื่องทดสอบ
6. เขียนแบบภาพรายละเอียด (detail drawing) ของเครื่องทดสอบ

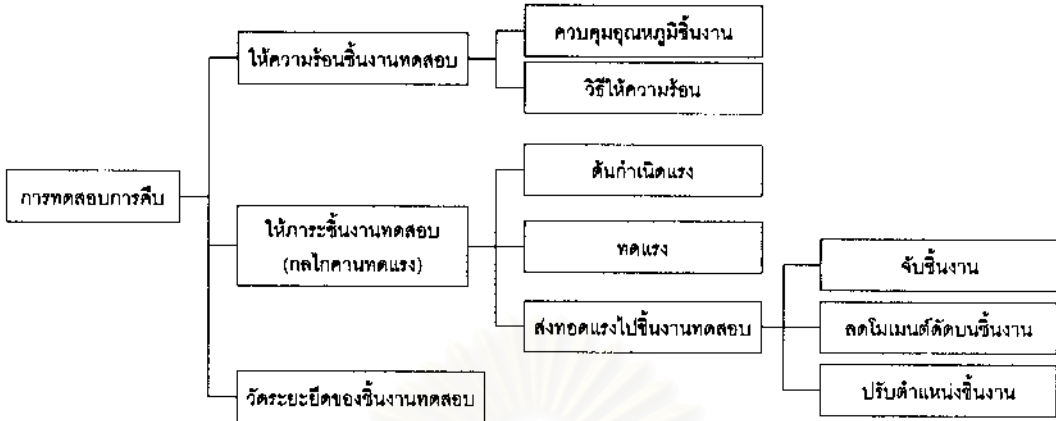
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนที่ 1 และ 2 เท่านั้น ส่วนขั้นตอนที่ 3-6 จะกล่าวในบทที่ 4

3.3 องค์ประกอบหลักของเครื่องทดสอบ

ในที่นี้การจำแนกส่วนประกอบของเครื่องทดสอบเริ่มจาก การแจกแจงสิ่งที่ต้องทำในการทดสอบการคืบโดยแสดงในรูปของไดอะแกรมหน้าที่ (functional diagram) จากนั้นระบุว่าต้องใช้ส่วนประกอบอะไรเพื่อทำหน้าที่แต่ละอย่างที่กำหนดไว้ เมื่อระบุครบแล้วเราจะได้อะเอียดส่วนประกอบ (component diagram) ส่วนประกอบเหล่านี้จะถูกจัดกลุ่มเป็นองค์ประกอบหลักของเครื่องทดสอบเพื่อสร้างขั้นตอนการออกแบบต่อไป

รูปที่ 3.1 แสดงไดอะแกรมหน้าที่ของเครื่องทดสอบการคืบ ซึ่งแบ่งได้ 3 อย่าง คือ การให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบ การให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบ(กลไกคานทอดแรง) และการวัดระยะยืดของชิ้นงานทดสอบ

จากไดอะแกรมหน้าที่ หน้าที่แต่ละอย่างจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อหาส่วนประกอบที่เหมาะสมกับหน้าที่นั้น รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมส่วนประกอบที่ได้ เมื่อพิจารณาส่วนประกอบที่แจกแจงไว้จะสามารถจัดกลุ่มส่วนประกอบหลักได้ทั้งสิ้น 6 กลุ่ม คือ เตา ชุดควบคุมอุณหภูมิ ชุดน้ำหนักถ่วง คานทอดแรง ชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ และ โครงเครื่องทดสอบ (ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ไม่ครอบคลุมการออกแบบอุปกรณ์วัดระยะยืดตัว)



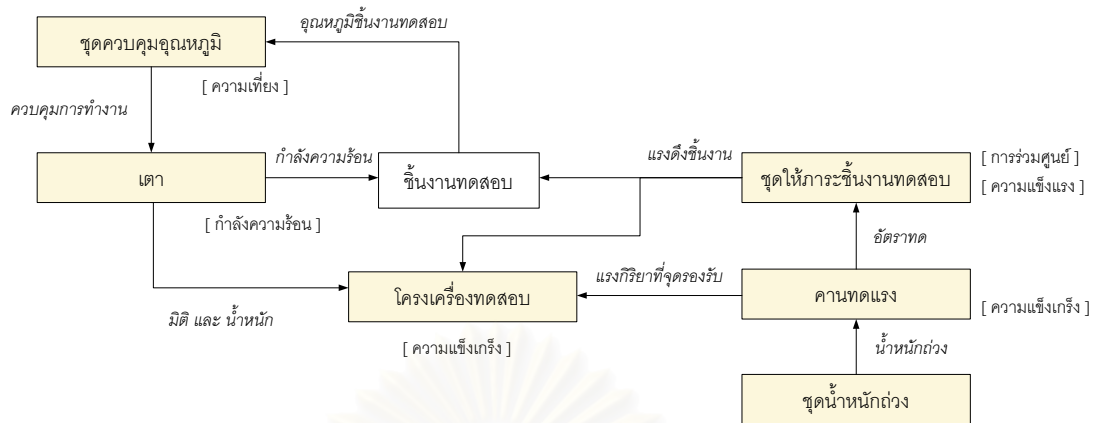
รูปที่ 3.1 ไตอะแกรมหน้าที่ของการทดสอบการคืบ



□ องค์ประกอบหลัก

รูปที่ 3.2 ไตอะแกรมส่วนประกอบของเครื่องทดสอบการคืบ

จากส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบในรูปที่ 3.2 จะสามารถเขียนไตอะแกรมการทำงานของระบบได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากรูปองค์ประกอบแต่ละอันจะเชื่อมโยงด้วยข้อมูลซึ่งทิศทางการไหลของข้อมูลแสดงด้วยลูกศร ส่วนชนิดข้อมูลกำกับด้วยตัวอักษรเรียง เงื่อนไขบังคับ (constraint) ที่สำคัญของแต่ละส่วนประกอบหลักจะเขียนด้วยตัวอักษรตรงอยู่ในวงเล็บใหญ่ “[]”



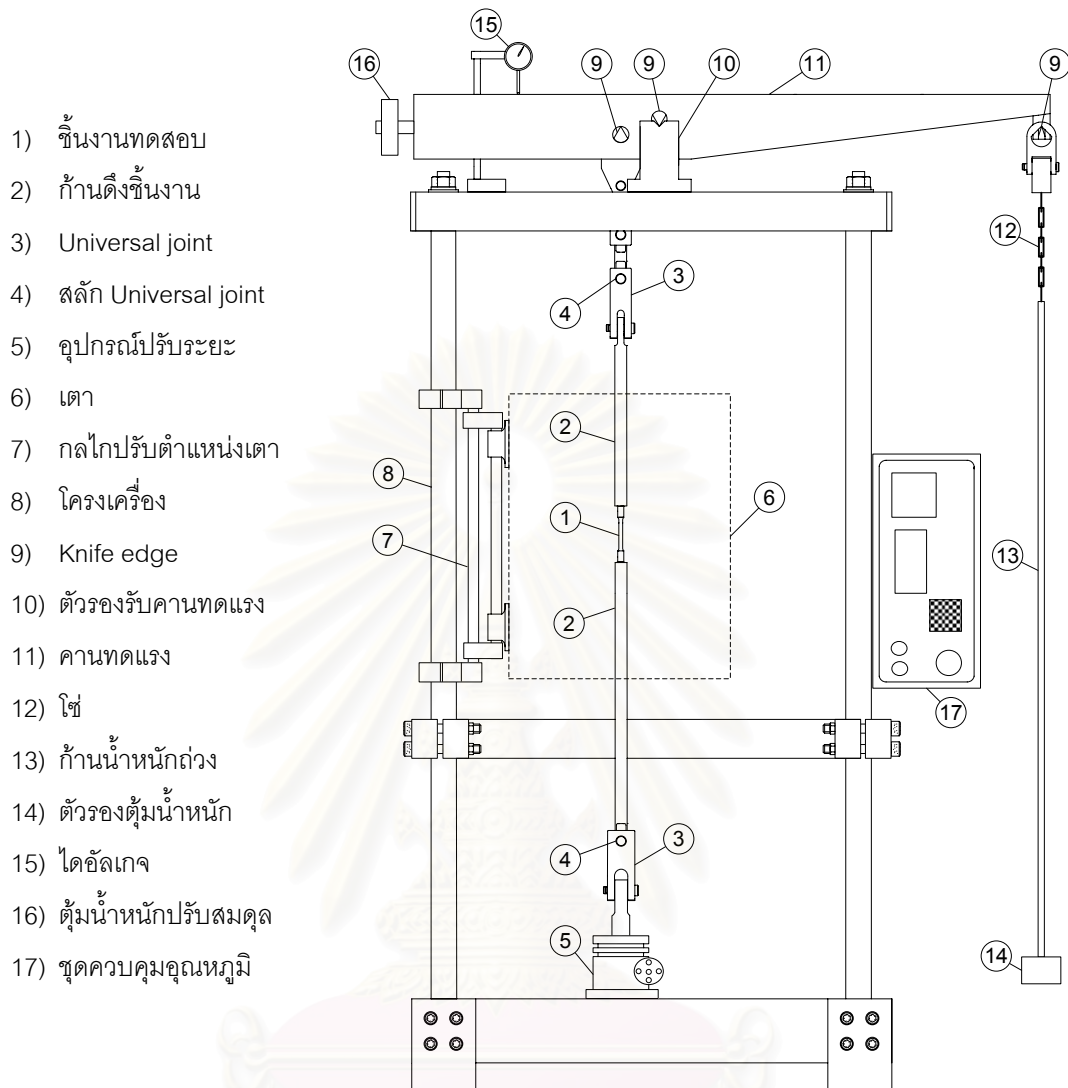
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมการทำงานของระบบ

การทำงานของระบบในรูปที่ 3.2 ในส่วนของอุณหภูมิ อธิบายได้ดังนี้ เตาทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิชิ้นงานทดสอบ จากนั้นเทอร์โมคัปเปิ้ลจะอ่านอุณหภูมิชิ้นงานทดสอบป้อนให้ชุดควบคุมอุณหภูมิประมวลผลและส่งสัญญาณควบคุมการทำงานให้เตาเพื่อให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ตั้งไว้กับอุณหภูมิจริงน้อยที่สุด ในส่วนของกรให้ภาระชิ้นงานชุดน้ำหนักถ่วงจะส่งทอดน้ำหนักจากตุ้มน้ำหนักไปให้คานทอดแรง คานทอดแรงจะทำหน้าที่เพิ่มขนาดของภาระและส่งทอดไปให้ชิ้นงานทดสอบ ตามลำดับ เครื่องทดสอบทำหน้าที่จับยึดกลไกการส่งทอดแรง และเตา ดังนั้นจะต้องรับภาระเนื่องจาก น้ำหนักเตา แรงปฏิกิริยาของจุดรองรับคานทอดแรง และแรงดึงชิ้นงานทดสอบ

จากไดอะแกรมส่วนประกอบและไดอะแกรมการทำงาน จะสามารถออกแบบแบบลักษณะโดยรวมของเครื่องทดสอบได้ ภาพรวมของเครื่องทดสอบแสดงที่ใช้กลไกคานทอดแรงแสดงในรูปที่

3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



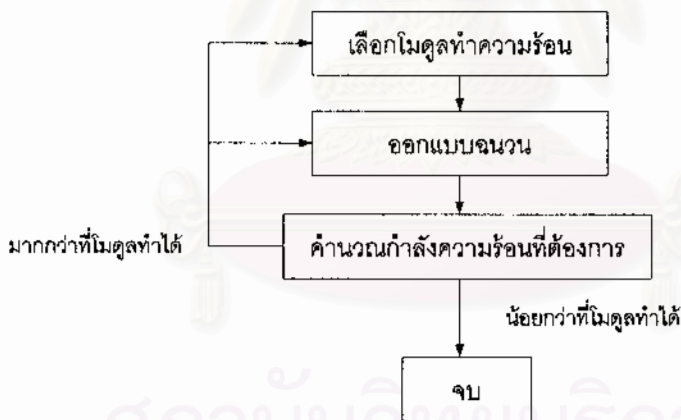
รูปที่ 3.4 ภาพรวมของเครื่องทดสอบที่ออกแบบ

3.4 ขั้นตอนการออกแบบส่วนประกอบหลัก

ในหัวข้อนี้จะแสดงขั้นตอนทั่วไปในการออกแบบส่วนประกอบหลักของเครื่องทดสอบการคืบแกนเดียวได้แก่ เตา ชุดน้ำหนักถ่วง คานทอดแรง ชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ และ โครงเครื่องทดสอบ

3.4.1 ขั้นตอนการออกแบบเตา

ขั้นตอนการออกแบบเตาแสดงอยู่ในรูปที่ 3.4 เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้เลือกวิธีทำความร้อนด้วยเตาขดลวดความต้านทาน ขั้นตอนแรกจึงเป็นการเลือกโมดูลทำความร้อนสำเร็จรูปจากคู่มือสินค้า รุ่นของโมดูลความร้อนที่เลือกต้องมีเนื้อที่ว่างภายในพอสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว ถัดมาในขั้นตอนการออกแบบฉนวน สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ ชนิด และความหนาของฉนวน ในที่นี้เลือกฉนวนแข็ง (แคลเซียมซิลิเกต) สำหรับด้านบนและล่างของโมดูลทำความร้อน และออกแบบรูปร่างให้สามารถยึดโมดูลทำความร้อนในตำแหน่งที่ต้องการได้ สำหรับด้านข้างของโมดูลทำความร้อนจะหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วเนื่องจากห้งอได้ และป้องกันการสูญเสียความร้อนได้ดีกว่าฉนวนแข็ง ขั้นตอนสุดท้าย คือการคำนวณหา กำลังความร้อนที่ต้องใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิชิ้นงานทดสอบให้ถึงค่าที่กำหนด หากกำลังที่ต้องการมากกว่ากำลังของโมดูลที่เลือกจะต้องแก้ไขที่การหุ้มฉนวน หรือเลือกโมดูลทำความร้อนที่มีกำลังมากขึ้น แต่ถ้าผลออกมาว่ากำลังที่ต้องการน้อยกว่ารุ่นที่เลือกก็จะจบการออกแบบ



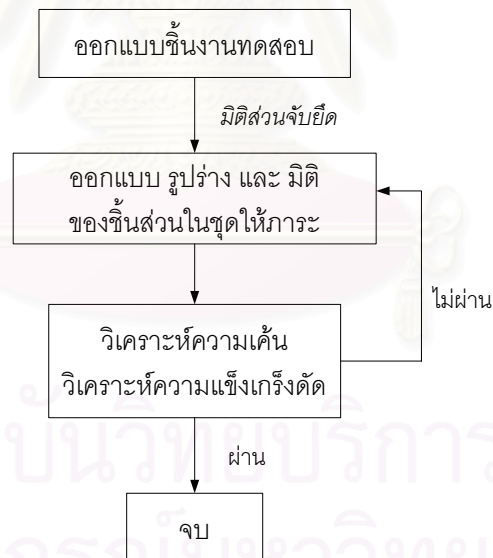
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการออกแบบเตา

3.4.2 ขั้นตอนการออกแบบชุดให้ภาระ

จากภาพรวมของเครื่องทดสอบ (รูปที่ 3.4) ชุดให้ภาระประกอบด้วย

- ก้านดึงชิ้นงานทดสอบตัวบนและตัวล่าง
- Universal joint
- อุปกรณ์ปรับระยะ

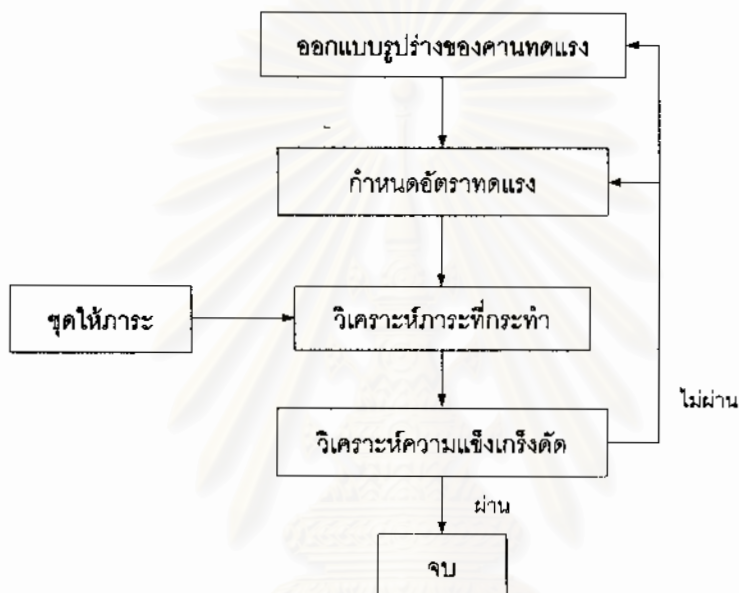
ก้านดึงชิ้นงานทดสอบจะทำหน้าที่จับยึดและส่งแรงดึงไปยังชิ้นงานทดสอบ โดยมี universal joint ประกอบอยู่ในชุดให้ภาระเพื่อลดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ อุปกรณ์ปรับระยะทำหน้าที่ปรับระยะเพื่อชดเชยการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากภาระและความร้อนขณะทดสอบ ขั้นตอนการออกแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการออกแบบชุดให้ภาระ

3.4.3 ขั้นตอนการออกแบบคานทอดแรง

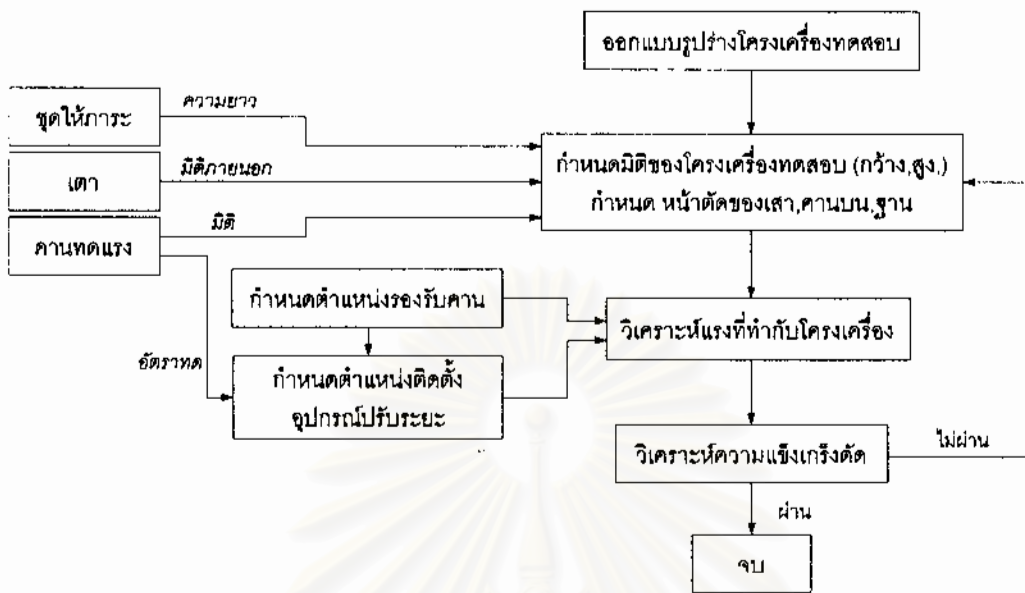
ขั้นตอนการออกแบบคานทอดแรงแสดงอยู่ในรูปที่ 3.6 ขั้นตอนแรก คือการออกแบบรูปร่าง และกำหนดอัตราทอดของคานทอดแรง ขั้นถัดมาคือ วิเคราะห์แรงที่กระทำกับคานทอดแรง และความแข็งแรงตัดของคานตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการออกแบบคานทอดแรง

3.4.4 ขั้นตอนการออกแบบโครงเครื่องทดสอบ

ขั้นตอนการออกแบบโครงเครื่องแสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 ขั้นตอนแรก คือการออกแบบรูปร่างของโครงเครื่อง และกำหนดตำแหน่งจับยึดชิ้นส่วน ในที่นี้ออกแบบให้โครงเครื่องเป็นกรอบรูปสี่เหลี่ยม มีส่วนประกอบหลักคือ ฐาน, เสา และ คานบน (รูปที่ 3.4) เตาถูกออกแบบให้จับยึดจากด้านข้างของเสาเพื่อเพิ่มเนื้อที่ใช้สอยและลดจำนวนชิ้นส่วน อุปกรณ์ปรับระยะกำหนดให้ติดตั้งที่ฐาน โดยอยู่ร่วมแกนกับชุดให้ภาระ เมื่อทราบตำแหน่งจับยึดอุปกรณ์หลักแล้ว ขั้นถัดไป คือการกำหนดมิติ (กว้าง, สูง) ของโครงเครื่องที่เพียงพอสำหรับติดตั้งอุปกรณ์หลัก ขั้นถัดไป คือการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับโครงเครื่อง และความแข็งแรงตัดตามลำดับ

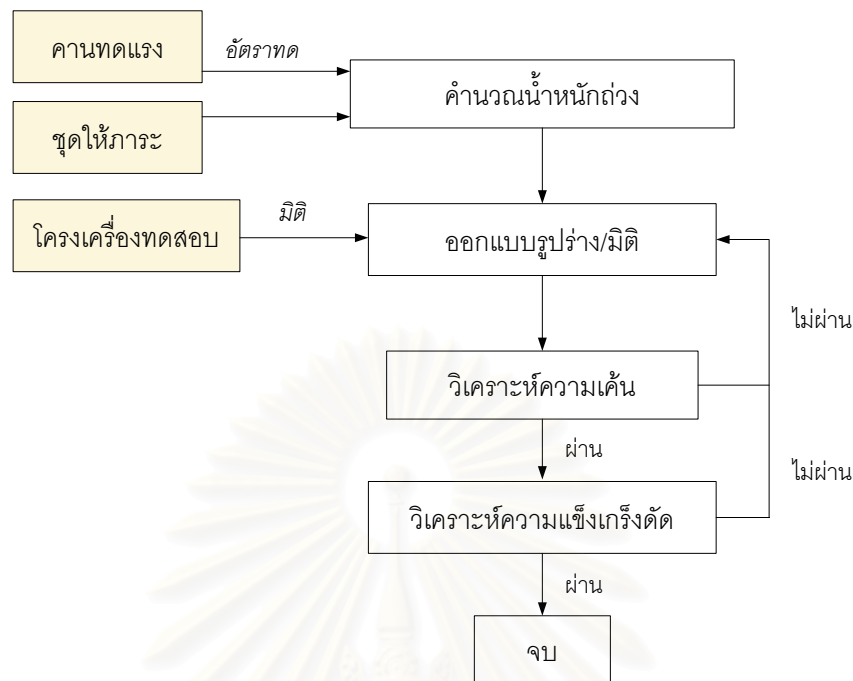


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างทดสอบ

3.4.5 ขั้นตอนการออกแบบชุดน้ำหนักรถ่วง

ชุดน้ำหนักรถ่วง ประกอบด้วย ไซ้, ก้านน้ำหนักรถ่วง และ ตัวรองตุ้มน้ำหนัก ไซ้จะทำหน้าที่คล้าย universal joint ทำให้แรงจากน้ำหนักรถ่วงกระทำกับคานาทดแรงที่ตำแหน่งเดิมและมีทิศทางแนวตั้งเสมอ (เนื่องจากน้ำหนักรถ่วงมีรูปร่างไม่สมมาตรทุกทิศทาง และ ก้านน้ำหนักรถ่วงอาจจะคดงอ)

ขั้นตอนการออกแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 ขั้นตอนแรก คือการคำนวณน้ำหนักของชุดน้ำหนักรถ่วง ซึ่งเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักของชุดให้ภาระ จากนั้นออกแบบรูปร่าง (ความยาว ,มิติหน้าตัด การจับยึด) ภายใต้ข้อบังคับของน้ำหนัก ขั้นถัดไปคือ วิเคราะห์ความเค้น และความแข็งแรงของชิ้นส่วนว่าเพียงพอที่จะรับน้ำหนักรถ่วงสูงสุดได้หรือไม่



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการออกแบบชุดน้ำหนักถ่วง

3.5 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องของเครื่องต้นแบบ

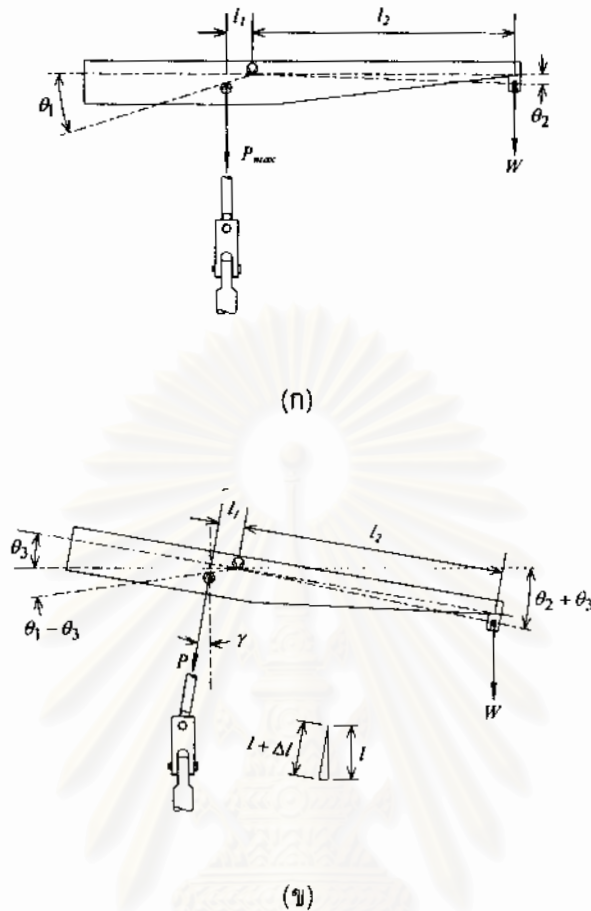
ผลการวิเคราะห์ข้อบกพร่องของเครื่องต้นแบบ (7) สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องทดสอบ โดยสรุปได้ดังนี้

3.5.1 ตำแหน่งของ knife edge

ตำแหน่งของ knife edge ทั้ง 3 ตัวจะต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน เพราะมีผลต่อขนาดของภาระที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบเมื่อคานทอดแรงเอียง โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากรูปที่ 3.9 (ก) เมื่อคานทอดแรงอยู่แนวระดับ และ knife edge ไม่ได้อยู่บนแนวเส้นตรงเดียวกัน แต่ทำมุม θ_1 และ θ_2 กับแนวระดับ ภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ P_{max} เท่ากับ

$$P_{max} = W \frac{l_2}{l_1}$$



รูปที่ 3.10 แสดงภาวะที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนแปลงเมื่อคานทอดแรงเอียง

เมื่อชิ้นงานทดสอบยึดตัวเป็นระยะ Δl จะทำให้คานทอดแรงเอียงจากแนวระดับเป็นมุม θ_3 และชุดให้ภาะชิ้นงานทดสอบเอียงทำมุมกับแนวตั้งเท่ากับ γ (รูป 3.10(ข)) ภาวะที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบจะเปลี่ยนไปมีขนาดเท่ากับ P โดย

$$P \cos(\gamma) \times l_1 \cos(\theta_1 - \theta_3) = W \times l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$P = \frac{W \times l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)}{\cos(\gamma) \times l_1 \cos(\theta_1 - \theta_3)} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ (3.1) จะเห็นว่าอัตราทดเปลี่ยนแปลงตามมุมเอียงของคานทอดแรง อย่างไรก็ตาม ถ้าตำแหน่งของ knife edge ทั้งหมดอยู่บนแนวเส้นตรงเดียวกัน ($\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$) จะได้

$$P = \frac{W \times l_2 \cos(\theta_3)}{\cos(\gamma) \times l_1 \cos(\theta_3)}$$

$$P = W \frac{l_2}{\cos(\gamma) \times l_1} \quad (3.2)$$

จากรูป

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{l + \Delta l}{l}\right)$$

แต่ว่า $l \gg \Delta l$ ดังนั้น $\gamma \approx 0$

$$P \approx P_{\max} = W \frac{l_2}{l_1} \quad (3.3)$$

จากผลการวิเคราะห์สรุปว่า เมื่อตำแหน่งของ knife edge ทั้งหมดอยู่บนแนวเส้นตรงเดียวกันแล้ว จะถือว่า ภาวะที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบจะเปลี่ยนแปลงตามมุมเอียงของคานทดสอบน้อยกว่า กรณีที่ knife edge ไม่อยู่บนแนวเส้นตรงเดียวกัน

3.5.2 การผลิตและการจับยึดชิ้นส่วน

เครื่องทดสอบการคืบต้นแบบเลือกการจับยึดชิ้นส่วน (เช่น โครงเครื่องทดสอบ) ด้วยการ เชื่อม และไม่สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (tolerance) ของชิ้นส่วนได้ตามที่ระบุ การประกอบชิ้นส่วนเกิดความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ ส่งผลให้ โมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบมากกว่าค่าที่ยอมรับ (18)

ข้อบกพร่องอีกประการที่พบในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบการคืบต้นแบบคือ การ เลือกใช้วัสดุที่เป็น เหล็กเส้น หรือ รางเหล็กสำเร็จรูป พบว่าไม่สามารถควบคุมความตรงของ ชิ้นส่วนได้ ส่วนมากจะคงอเนื่องจากการจัดเก็บและการขนส่งของผู้จำหน่าย

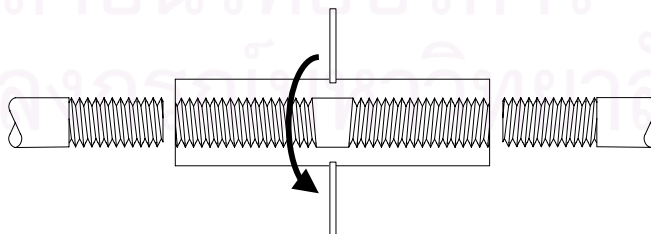
วิทยานิพนธ์นี้ปรับปรุงการออกแบบโดย ใช้ชิ้นส่วนที่ผ่านการ machining และกำหนด ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับในการผลิต และ โครงเครื่องประกอบกันโดยวิธีสวมและจับยึดด้วย เกลียว (แทนการเชื่อม)

3.5.3 อุปกรณ์ปรับระยะ

เครื่องทดสอบต้นแบบใช้กลไกปรับระยะแบบ turnbuckle และใช้เกลียวรูปตัววี (รูปที่ 3.11) กลไกดังกล่าวใช้งานได้ที่ภาระทดสอบน้อย ๆ แต่ไม่สามารถใช้งานได้ที่ภาระทดสอบสูงสุด เนื่องจากมีความฝืดมาก การแก้ไขสามารถทำได้โดยเปลี่ยนไปใช้เกลียวรูปสี่เหลี่ยมคางหมู หรือรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส อย่างไรก็ตาม วิทยานิพนธ์นี้ใช้อุปกรณ์ปรับระยะสำเร็จรูป เพื่อลดระยะเวลา และประหยัดค่าใช้จ่ายในการพัฒนาเครื่องทดสอบ

3.5.4 การหุ้มฉนวนเตา

การหุ้มฉนวนเตาด้านบนจะต้องมิดชิดและมีความหนาเพียงพอที่จะป้องกันความร้อนสูญเสียที่ผนังด้านบนของเตา และชุดให้ภาระขึ้นงานทดสอบ จากการศึกษาเครื่องทดสอบการคืบต้นแบบพบว่าการหุ้มฉนวนด้านบนยังไม่เพียงพอ และมีช่องเปิดด้านบนกว้าง ทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในเตามีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิสูง วิทยานิพนธ์นี้จึงแก้ไขการออกแบบเตาโดยเพิ่มความหนาฉนวนด้านบน และด้านล่างเพื่อลดเกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายในเตา



รูปที่ 3.11 กลไก Turnbuckle

บทที่ 4

ผลการออกแบบ

4.1 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องทดสอบ

ข้อมูลจำเพาะของเครื่องทดสอบ ประกอบด้วย ภาวะทดสอบสูงสุด และอุณหภูมิทดสอบสูงสุด การกำหนดข้อมูลจำเพาะดังกล่าวทำได้ 2 วิธีคือ วิธีแรกใช้การรวบรวมข้อมูลจำเพาะของเครื่องทดสอบที่มีขายแล้วเลือกข้อมูลจำเพาะที่ต้องการ วิธีที่สองคือกำหนดจากการใช้งานเครื่องทดสอบว่าต้องการนำไปทดสอบวัสดุอะไร และวัสดุนั้นนิยมทดสอบที่สภาวะใด วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีที่สอง

วัสดุที่ต้องการทดสอบคือ วัสดุที่ใช้ทำหม้อต้ม (เหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo) อุณหภูมิใช้งานอยู่ที่ประมาณ 540 องศาเซลเซียส (2) ดังนั้นกำหนดอุณหภูมิทดสอบสูงสุด T_{max} คือ

$$T_{max} = 650 \text{ องศาเซลเซียส} \quad (4.1)$$

ถัดไปเป็นการคำนวณหาขนาดภาวะทดสอบสูงสุดของเครื่อง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และอายุการคืบของวัสดุนี้คือ (20)

$$T(\log(t_r) + 15.956) = 18600.626 + 659.767(\log \sigma) - 2655.786(\log \sigma)^2 \quad (4.2)$$

โดย T คือ อุณหภูมิ (K)

t_r คือ อายุของการคืบ (hour)

σ คือ ความเค้น (kgf/mm^2)

ความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาทดสอบที่น้อยที่สุด (หรืออายุการคืบมีค่าน้อยที่สุด) และอุณหภูมิทดสอบต่ำสุด ในที่นี้กำหนดระยะเวลาทดสอบที่น้อยที่สุดเท่ากับ 20 ชั่วโมง และอุณหภูมิทดสอบต่ำสุด เท่ากับ 813.15 K (540 °C) เมื่อแทนค่าในสมการที่ (4.2) จะแก้สมการหา σ ซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดบนชิ้นงานทดสอบได้เท่ากับ 271.1 MPa

เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบในช่วงความยาวเกจ d_{gauge} เท่ากับ

$$d_{gauge} = 6 \text{ มม.} \quad (4.3)$$

ดังนั้นขนาดภาระสูงสุดที่กระทำกับชิ้นงาน P_{max} คำนวณได้จาก

$$P_{max} = \sigma \left(\frac{\pi}{4} d_{gauge}^2 \right) \quad (4.4)$$

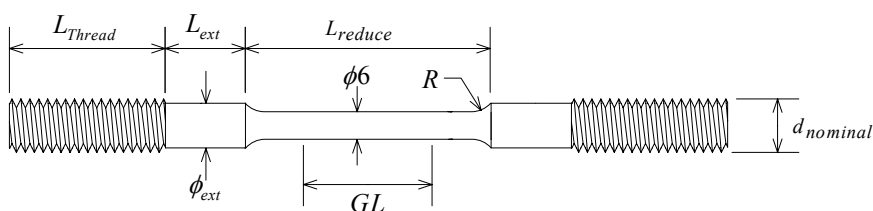
$$P_{max} = 7,665 \text{ นิวตัน}$$

ดังนั้นเลือก $P_{max} = 8,000$ นิวตัน (4.5)

จากการสืบค้นเครื่องทดสอบที่มีขาย (11) พบว่าอัตราทดของคานทดแรงที่นิยมใช้คือ 1:3, 1:5, 1:10, 1:20 สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เลือกอัตราทด 1:10 เพราะที่อัตราทดสูงกว่านี้คานทดแรงจะมีความยาวมาก ความผิดพลาดในการผลิตชิ้นส่วนก็จะมากขึ้น และยังทำให้เครื่องทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ที่อัตราทดต่ำกว่านี้จะต้องใช้ตุ้มน้ำหนักจำนวนมากหากต้องการทดสอบที่ภาระทดสอบสูงสุด (8,000 นิวตัน)

4.2 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบที่เลือก คือ ชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก ทำเกลียวที่ปลายทั้งสองสำหรับจับยึด ลักษณะของชิ้นงานทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 เหตุผลที่เลือกรูปร่างชิ้นงานทดสอบนี้เพราะการทดสอบการคืบแกนเดี่ยวส่วนใหญ่ในชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก ส่วนเหตุผลที่เลือกการจับยึดด้วยเกลียวเพราะออกแบบชิ้นส่วนที่จะมาจับยึดชิ้นงานทดสอบได้ง่าย และประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.1 ชิ้นงานทดสอบ

จากมาตรฐาน ASTM E8-96 (21) สำหรับ $d_{gauge} = 6$ มม. จะได้

$$\text{ความยาวเกจ} \quad GL = 30.0 \text{ มม.} \quad (4.6)$$

$$\text{รัศมีฟิลเลต} \quad R = 6 \text{ มม.} \quad (4.7)$$

ความยาวของส่วนที่หน้าตัดถูกลดขนาด L_{reduce} มาตรฐานกำหนดให้มีค่าน้อย 36 มม. จากเอกสารของผู้ผลิตเครื่องทดสอบ (22) เลือก

$$L_{reduce} = 55 \text{ มม.} \quad (4.8)$$

รายละเอียดของชิ้นงานทดสอบแสดงอยู่ในแบบรายละเอียดหมายเลข 030 ในภาคผนวก ก

4.2.1 เกลียวจับยึดชิ้นงานทดสอบ

มาตรฐาน ASTM E8 M (21) แนะนำว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียว $d_{nominal}$ ควรมีค่าน้อย 1.6 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่วงความยาวเกจ (6 มม.) สำหรับงานวิจัยนี้เลือกอัตราส่วนเท่ากับ 2 เท่า เพื่อลดโอกาสที่ชิ้นงานทดสอบจะเสียหายตรงบริเวณจับยึด ดังนั้น

$$d_{nominal} = 12 \text{ มม.} \quad (4.9)$$

ระยะพิทช์ (pitch) p ที่เลือกใช้ เท่ากับ 1 มม. ซึ่งเป็นเกลียวละเอียด เหตุผลที่เลือกเกลียวละเอียด เพราะว่า เกลียวละเอียดมีระยะเผื่อ (clearance) ระหว่างยอดเกลียวและท้องเกลียวน้อยทำให้สามารถจับยึดชิ้นงานทดสอบได้เที่ยงตรงกว่าเกลียวหยาบ ดังนั้นเกลียวที่ใช้คือ M12X1

ความยาวของเกลียว L_{Thread} ถูกกำหนดโดยจำนวนเกลียวที่สามารถรับภาระทดสอบสูงสุด เนื่องจากการออกแบบอ้างอิงกับการทดสอบวัสดุเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo ดังนั้นการออกแบบชิ้นงานทดสอบจึงอ้างอิงกับวัสดุดังกล่าว ข้อมูลความแข็งแรงของวัสดุนี้ (20) คือ

$$\sigma_{u,RT} = 496.44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{u,HT} = 282.70 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y,RT} = 272.35 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y,HT} = 110.32 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{creep,1\%,10^5 h} = 31.716 \text{ MPa}$$

จากหัวข้อที่ 2.5 ความเค้นที่ยอมรับได้คือ 31.716 MPa แต่เนื่องจากเป็นข้อมูลจากคู่มือ ดังนั้น จะชดเชยความไม่แน่นอนของข้อมูลความแข็งแรง 10 เปอร์เซ็นต์ (23) กล่าวคือ ใช้ตัวประกอบความปลอดภัย SF (safety factor) เท่ากับ 1.1 ดังนั้นความเค้นที่ยอมรับได้ $\sigma_{allow, 2.25Cr-1Mo}$ คือ

$$\sigma_{allow, 2.25Cr-1Mo} = \frac{1}{SF} \times 31.716 = 28.83 \text{ MPa} \quad (4.10)$$

ความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ สามารถประมาณได้จาก

$$\tau_{allow, 2.25Cr-1Mo} = \frac{1}{2} \times \sigma_{allow, 2.25Cr-1Mo} = 14.41 \text{ MPa} \quad (4.11)$$

ความเสียหายของเกลียวที่เป็นไปได้คือ เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง และ เกลียวครากเนื่องจากความเค้นกด การคำนวณหาจำนวนเกลียว n ทั้งสองกรณีแสดงอยู่ในหัวข้อย่อยต่อไป

ก) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง

พื้นที่ที่รับความเค้นเฉือนของเกลียว n เกลียว A_{root} คือ

$$A_{root} = bn\pi d_{root} \quad (4.12)$$

โดย b คือ ความสูงของฐานเกลียว มีค่าเท่ากับ $\frac{3}{4}p$

d_{root} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก มีค่าเท่ากับ $d_{nominal} - \frac{5\sqrt{3}}{8}p$

สำหรับเกลียวที่ใช้ $p = 1$ มม. ดังนั้น

$$d_{root} = 10.917 \text{ มม.} \quad (4.13)$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{3P_{max}}{2A_{root}} = \tau_{allow, 2.25Cr-1Mo} \quad (4.14)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.5), (4.11) และ (4.13) ลงในสมการที่ (4.14) จะได้

$$n = 33 \text{ เกลียว} \quad (4.15)$$

ข) เกลียวยครากเนื่องจากความเค้นอัด

พื้นที่ที่รับความเค้นอัดของเกลียว n เกลียว A คือ

$$A = \frac{\pi n}{4} (d_{nominal}^2 - d_{root}^2) \quad (4.16)$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{P_{max}}{A} = \sigma_{allow, 2.25Cr-1Mo} \quad (4.17)$$

แทนสมการ (4.16) ลงใน (4.17) และแทนค่าจากสมการ (4.5), (4.9), (4.10) และ (4.13) ลงใน (4.17) จะได้

$$n = 15 \text{ เกลียว} \quad (4.18)$$

จากผลการคำนวณในสมการ (4.15) และ (4.18) เลือกจำนวนเกลียว

$$n = 35 \quad (4.19)$$

ความยาวเกลียว L_{Thread} คือ ผลคูณของจำนวนเกลียวและพิทช์ ดังนั้น

$$L_{Thread} = 35 \text{ มม.} \quad (4.20)$$

4.2.2 ระยะสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว

อุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว (extensometer) ที่กำลังออกแบบ(24)ต้องการระยะติดตั้ง 15 มม. ดังนั้น กำหนดให้

$$L_{ext} = 18 \text{ มม.} \quad (4.21)$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบ ณ ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว ϕ_{ext} กำหนดให้เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอง (minor diameter) ของเกลียว เพื่อลด stress concentration บริเวณที่เปลี่ยนจากเกลียวมาเป็นผิวเรียบ

$$\phi_{ext} = 10 \text{ มม.} \quad (4.22)$$

4.3 เต้า

เต้าที่ใช้เป็นชนิดขดลวดความต้านทาน เพราะสร้างระบบควบคุมได้ง่าย และต้นทุนน้อยกว่าวิธีอื่น ขั้นตอนการออกแบบเต้า คือ การเลือกโมดูลทำความร้อน (heating module) และการออกแบบฉนวนหุ้มโมดูลทำความร้อนและตัวเรือนโลหะ

4.3.1 การเลือกโมดูลทำความร้อน

เนื่องจากเลือกชิ้นงานทดสอบรูปทรงกระบอก โมดูลทำความร้อนที่ใช้จึงมีพื้นที่ว่างภายในเป็นรูปทรงกระบอก เพื่อให้การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานตามแนวเส้นรอบวงสม่ำเสมอ

การเลือกโมดูลทำความร้อนจากแคตตาล็อกของผู้ผลิต จะพิจารณาถึง

- 1) พื้นที่ว่างภายในเต้า เกณฑ์ที่ใช้ก็คือ มีพื้นที่กว้างพอสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว และความสูง (ภายใน) ของเต้าต้องมากกว่าความยาวของชิ้นงานทดสอบ
- 2) อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้ เกณฑ์ที่ใช้คือ สามารถทำอุณหภูมิได้มากกว่าอุณหภูมิทดสอบสูงสุด T_{max} ซึ่งในที่นี้กำหนดไว้เท่ากับ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากเอกสารของผู้ผลิต (25) เลือก โมดูลทำความร้อนรูปครึ่งทรงกระบอก ของบริษัท Kanthal รุ่น HAS 100/250/57.5 ใช้กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ (ต่อ 1 ซีก) เมื่อประกอบเป็นเต้าทรงกระบอก (2 ซีกประกบกัน) จะให้กำลังความร้อน 1,300 วัตต์ อย่างไรก็ดี หลังจากออกแบบฉนวนและคำนวณการสูญเสียความร้อนโหมดต่าง ๆ แล้วจะต้องตรวจสอบอีกครั้งว่ากำลังความร้อนเพียงพอหรือไม่

4.3.2 การคำนวณความร้อนสูญเสียจากเต้า

โมดูลทำความร้อนที่เลือกจะถูกหุ้มด้วยฉนวนความร้อนอีกชั้นหนึ่ง เพื่อลดปริมาณความร้อนสูญเสีย และควบคุมอุณหภูมิที่เปลือกเต้าไม่ให้สูงเกิน 150 องศาเซลเซียส

ก) ความร้อนที่สูญเสียจากผนังด้านข้างของเตา

เนื่องจากโมดูลทำความร้อนเป็นรูปทรงกระบอก จึงเลือกฉนวนความร้อนแบบ blanket เพราะสามารถพันรอบโมดูลทำความร้อนได้ ความหนาของฉนวนที่เลือกคือ 50 มม.

อุณหภูมิที่ผิวนอกของเตาคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$\frac{(T_{inside} - T_{surface,side})}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_3 L}} = h_v A_0 (T_{surface,side} - T_{air}) + \epsilon \sigma A_0 (T_{surface,side}^4 - T_{air}^4)$$

และ ปริมาณความร้อนสูญเสียคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$Q_{side} = \frac{(T_{inside} - T_{surface,side})}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_3 L}}$$

แทนค่าตัวแปรที่ทราบค่าแล้ว ดังนี้

อุณหภูมิภายในเตา $T_{inside} = 650^\circ\text{C} = 923.15 \text{ K}$

อุณหภูมิอากาศภายนอก $T_{air} = 27^\circ\text{C} = 300.15 \text{ K}$

ค่า Emissivity $\epsilon = 0.17$ (เหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิ 400 K)

ค่าคงตัว Boltzman $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

ความสูงเตา $L = 250 \text{ mm.}$

รัศมีในของโมดูลทำความร้อน $r_1 = 50 \text{ mm.}$

รัศมีนอกของโมดูลทำความร้อน $r_2 = 125 \text{ mm.}$

รัศมีของฉนวน $r_3 = 175 \text{ mm.}$

รัศมีนอกของเปลือกเตา $r_4 = 177 \text{ mm.}$

พื้นที่ผิวนอกเตา $A_0 = 2\pi r_4 L$

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

โมดูลทำความร้อน (Fibrothal) $k_1 = 0.170 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (ประมาณที่ 900 K)

ฉนวน $k_2 = 0.105 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (ประมาณที่ 645 K) (25)

เปลือกเตา (เหล็กกล้าสเตนเลส) $k_3 = 15.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (ประมาณที่ 400 K)

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระของพื้นผิวแนวตั้ง h_v (สมการที่ 2.3) และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k จะมีค่าแปรตามอุณหภูมิ การคำนวณจึงต้องสมมติค่าอุณหภูมิที่ผิวเตา แล้วคำนวณหาผลเฉลยเพื่อปรับค่าเริ่มต้นจนกว่าค่าเริ่มต้นจะลู่อู่เข้าสมการที่เกี่ยวข้องคือสมการที่ (2.1) – (2.6) ผลการคำนวณที่ได้คือ

$$Q_{side} = 102.4 \text{ W} \quad (4.23)$$

$$T_{surface, side} = 89.68 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.24)$$

ข) ความร้อนที่สูญเสียจากผนังด้านบนและด้านล่างของเตา

คำนวณความร้อนที่ด้านบนและล่างของโมดูลทำความร้อนที่ใช้เป็นชนิดแข็ง (SILCAL 1100) เพื่อให้โมดูลทำความร้อนติดตั้งอยู่ในเตาตามตำแหน่งออกแบบ

อุณหภูมิที่ผิวนอกของเตาคำนวณได้จากสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) ดังนี้

$$\frac{A(T_{inside} - T_{surface})}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}} = hA(T_{surface} - T_{air}) + \varepsilon\sigma A(T_{surface}^4 - T_{air}^4)$$

และ ปริมาณความร้อนสูญเสียคำนวณได้จากสมการที่ (2.7)

$$Q_{top} = \frac{A(T_{inside} - T_{surface})}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}}$$

แทนค่าตัวแปรที่ทราบค่ามีดังนี้

อุณหภูมิภายในเตา $T_{inside} = 650^\circ\text{C} = 923.15 \text{ K}$

อุณหภูมิอากาศภายนอก $T_{air} = 27^\circ\text{C} = 300.15 \text{ K}$

ความหนาของฉนวน $L_1 = 100 \text{ mm.}$

ความหนาผนังเตา $L_2 = 10 \text{ mm.}$

พื้นที่ตั้งฉากกับทิศการนำความร้อน $A = \pi(r_4)^2$

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ฉนวน $k_1 = 0.170 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (ประมาณที่ 900 K)

เปลือกเตา (เหล็กกล้าสเตนเลส) $k_2 = 15.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (ประมาณที่ 400 K)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระของพื้นผิวแนวระดับ h และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k จะขึ้นกับอุณหภูมิ การคำนวณจึงต้องสมมติค่าอุณหภูมิที่ผิวเตา แล้วคำนวณหาผลเฉลยเพื่อปรับค่าเริ่มต้นจนกว่าค่าเริ่มต้นจะลู่เข้า สมการที่เกี่ยวข้องคือสมการที่ (2.7) – (2.11) ผลการคำนวณที่ได้คือ

ผนังด้านบน

$$Q_{top} = 79.3 \text{ W} \quad (4.25)$$

$$T_{surface, top} = 134.3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.26)$$

ผนังด้านล่าง

$$Q_{bottom} = 73.3 \text{ W} \quad (4.27)$$

$$T_{surface, bottom} = 173.62 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

ค) ความร้อนที่สูญเสียผ่านก้านตั้งขึ้นงานทดสอบ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านตั้งขึ้นงานทดสอบเท่ากับ 20 มม. (ผลการออกแบบแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 4.4.2ค) ปริมาณความร้อนสูญเสียคำนวณได้จากสมการที่ (2.12)

$$Q_f = (T_{base} - T_{air}) \left(\sqrt{h_{air} P k A_f} \right) \tanh(m L_f)$$

และ

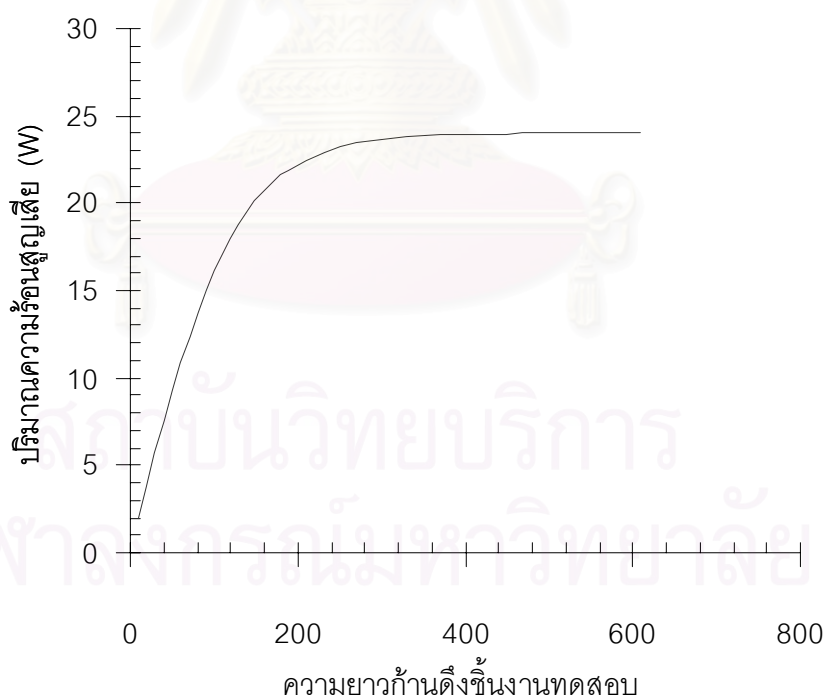
$$m = \sqrt{\frac{h_{air} P}{k A_f}}$$

แทนค่าตัวแปรที่ทราบค่าดังนี้

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	h	$= 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}^{-1}$
เส้นรอบวงของก้านตั้งขึ้นงานทดสอบ	P	$= 62.8 \text{ mm.}$
พื้นที่หน้าตัดของครีบทรงกระบอก	A_f	$= 314.2 \text{ mm.}^2$
อุณหภูมิฐาน (ปลายที่ร้อน)	T_{base}	$= 650^\circ\text{C} = 923.15 \text{ K}$
อุณหภูมิอากาศ	T_{air}	$= 27^\circ\text{C} = 300.15 \text{ K}$

ผลการคำนวณที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ (4.2) จากรูปจะเห็นว่า Q_f เพิ่มขึ้นเมื่อก้านตั้งขึ้นงานทดสอบยาวขึ้น แต่ว่าที่ความยาวตั้งแต่ 300 มม. Q_f จะเข้าสู่ค่าคงที่ (เพราะอุณหภูมิที่ผิวเข้าใกล้อุณหภูมิอากาศ) ดังนั้นก้านตั้งขึ้นงานควรจะยื่นออกจากเตาอย่างน้อย 300 มม ก่อนจะไปยึดกับชิ้นส่วนอื่นเมื่อแทนค่า L_f เท่ากับ 300 มม. จะได้ Q_f เท่ากับ 24 W ถ้าประมาณให้การสูญเสียความร้อนที่ก้านตั้งขึ้นงานที่อนบนและที่อนล่างเท่ากันแล้วจะได้

$$Q_f = 2 \times 24 = 48 \text{ W} \quad (4.29)$$



รูปที่ 4.2 ปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านก้านตั้งขึ้นงานทดสอบ

¹ สำหรับการพาอิสระ h จะมีค่าอยู่ในช่วง 2-25 W/m²K

ง) ปริมาณความร้อนสูญเสียสุทธิ

ปริมาณความร้อนสูญเสียสุทธิจากเตา Q_{Loss} คือผลรวมของปริมาณความร้อนสูญเสียที่กล่าวไปในหัวข้อย่อย ก) ถึง ค) ดังนั้น

$$Q_{Loss} = Q_{side} + Q_{top} + Q_{bottom} + Q_f \quad (4.30)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.23), (4.25), (4.27) และ (4.29) ลงในสมการที่ (4.30) จะได้

$$Q_{Loss} = 302.7 \text{ W} \quad (4.31)$$

4.3.3 การคำนวณปริมาณความร้อนสะสมในชิ้นส่วนเตา

ก) ปริมาณความร้อนสะสมในโมดูลทำความร้อน Q_{Abs1}

อุณหภูมิสิ้นสุด T_f กำหนดให้เท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่จุดต่อ ดังนั้น

$$T_f = 0.5(650 + 298.63) = 474.32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

มวลของโมดูลทำความร้อน 2 ซีก (25)

$$m = 2.4 \text{ kg.}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.16) และกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น T_i เท่ากับ 27°C จะได้

$$Q_{Abs1} = 959.7 \text{ kJ} \quad (4.32)$$

ข) ปริมาณความร้อนสะสมในฉนวนความร้อนด้านข้าง Q_{Abs2}

อุณหภูมิสิ้นสุด T_f กำหนดให้เท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่จุดต่อ ดังนั้น

$$T_f = 0.5(298.63 + 89.72) = 194.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho = 48 \text{ kg/m}^3$
 ความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 0.037 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
 ปริมาตรของฉนวน $V = \pi(r_3^2 - r_2^2)L = 0.012 \text{ m}^3$
 แทนค่าในสมการที่ (2.16) และกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น T_i เท่ากับ 27°C จะได้

$$Q_{Abs2} = 3.44 \text{ J} \quad (4.33)$$

ค) ปริมาณความร้อนสะสมในฉนวนด้านบน Q_{Abs3}

อุณหภูมิสิ้นสุด T_f กำหนดให้เท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่จุดต่อ ดังนั้น

$$T_f = 0.5(650+134.29) = 392.1 \text{ }^\circ\text{C}$$

ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho = 290 \text{ kg/m}^3$
 ความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
 ปริมาตรของฉนวน $V = \pi(r_3^2 - r_1^2)L_1 = 8.84 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 แทนค่าในสมการที่ (2.16) และกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น T_i เท่ากับ 27°C จะได้

$$Q_{Abs3} = 748.8 \text{ kJ} \quad (4.34)$$

ง) ปริมาณความร้อนสะสมในฉนวนด้านล่าง Q_{Abs4}

อุณหภูมิสิ้นสุด T_f กำหนดให้เท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่จุดต่อ ดังนั้น

$$T_f = 0.5(650+173.6) = 411.8 \text{ }^\circ\text{C}$$

ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho = 290 \text{ kg/m}^3$
 ความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
 ปริมาตรของฉนวน $V = \pi(r_3^2 - r_2^2)L_1 = 8.84 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

แทนค่าในสมการที่ (2.16) และกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น T_i เท่ากับ 27°C จะได้

$$Q_{Abs4} = 789.2 \text{ kJ} \quad (4.35)$$

จ) ปริมาณความร้อนสะสมในก้านดึงชิ้นงานและชิ้นงานทดสอบ Q_{Abs5}

เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จะสมมุติให้ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับก้านดึงชิ้นงานทดสอบ ($d_{rod} = 20$ มม.)

อุณหภูมิสิ้นสุด	$T_f = 600^\circ\text{C}$
ความหนาแน่นของวัสดุ	$\rho = 8238 \text{ kg/m}^3$
ความจุความร้อนจำเพาะ	$C_p = 504 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
ปริมาตรของฉนวน	$V = \frac{\pi}{4} d^2 L = 7.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$

แทนค่าในสมการที่ (2.15) และกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น T_i เท่ากับ 27°C จะได้

$$Q_{Abs5} = 364.7 \text{ kJ} \quad (4.36)$$

ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมทั้งหมด Q_{Absorb} คือ

$$Q_{Absorb} = Q_{Abs1} + Q_{Abs2} + Q_{Abs3} + Q_{Abs4} + Q_{Abs5} \quad (4.37)$$

แทนสมการที่ (4.32) – (4.36) ลงในสมการที่ (4.37) จะได้

$$Q_{Absorb} = 2866 \text{ kJ} \quad (4.38)$$

4.3.4 การคำนวณกำลังของเตา

กำลังความร้อนของเตาที่ต้องการ P หาได้จากสมการที่ (2.14)

$$P = \left(\frac{Q_{Absorb}}{t_s} + \frac{2}{3} Q_{Loss} \right) \frac{SF}{\eta}$$

แทนค่าต่อไปนี้

Q_{Loss} , Q_{Absorb} จากสมการที่ (4.31) และ (4.38) ตามลำดับ

$SF = 1.1$ (เอกสารอ้างอิง (13) แนะนำว่า ระบบขนาดเล็กควรเผื่อไว้ 10 เปอร์เซ็นต์)

$\eta = 0.7$ (เอกสารอ้างอิง (25) แนะนำค่า $\eta = 70$ เปอร์เซ็นต์)

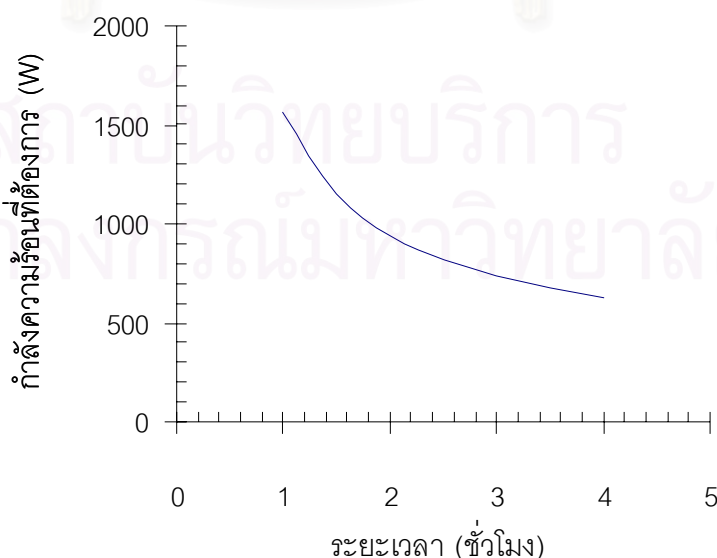
กำลังของเตาที่ต้องการเพื่อทำอุณหภูมิให้ถึง 650 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา t_s เท่ากับ 1 ถึง 4 ชั่วโมง แสดงอยู่ในรูปที่ 4.3 จากหัวข้อที่ 4.3.1 กำลังของโมดูลทำความร้อน คือ 1,300 วัตต์ ดังนั้นจะสามารถทำอุณหภูมิถึง 650 °C ในระยเวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ (4-6 ชั่วโมง) จึงสรุปว่าโมดูลทำความร้อนที่เลือกมีความเหมาะสม

4.4 ชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ

4.4.1 ภาพรวม

ลักษณะการประกอบชิ้นส่วนของชุดให้ภาระ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 จากรูป ชิ้นส่วนในชุดให้ภาระประกอบด้วย

- 1) ข้อต่อ universal จำนวน 3 ชิ้น (ตัวบน, ตัวกลาง และ ตัวล่าง)
- 2) ก้านดึงชิ้นงาน จำนวน 3 ท่อน (ก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนบน, ก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนล่าง และก้านดึง)



รูปที่ 4.3 กำลังความร้อนที่ต้องการ



รูปที่ 4.4 ชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ

4.4.2 ก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนบนและท่อนล่าง

ก) วัสดุ

วัสดุสำหรับทำก้านจะต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดี กลุ่มวัสดุที่เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิใช้งาน (600°C) ได้แก่ เหล็กกล้าสแตนเลส (stainless steel) และซูเปอร์อัลลอย (superalloy) (26) เป็นต้น ในที่นี้เลือกใช้เหล็กกล้าสแตนเลสชนิดออสเทนนิติก (austenitic) เบอร์ 310S เพราะ มีความแข็งแรงและความต้านทานออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงดี และหาซื้อได้ภายในประเทศ ข้อมูลความแข็งแรงที่ทราบมีดังนี้ (2)

$$\begin{aligned}\sigma_{u,310S,RT} &= 627 \text{ MPa} \\ \sigma_{u,310S,HT} &= 440 \text{ MPa} \\ \sigma_{y,310S,RT} &= 290 \text{ MPa} \\ \sigma_{y,310S,HT} &= 151.13 \text{ MPa} \\ \sigma_{creep,1\%,10^5 h} &= 54.25 \text{ MPa}\end{aligned}$$

ความเค้นดึงที่ยอมรับได้ของวัสดุนี้ที่อุณหภูมิสูง (สมการที่ (2.19)) คือ

$$\sigma_{allow,310S,HT} = 54.25 \text{ MPa} \quad (4.39)$$

ความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ของวัสดุนี้ที่อุณหภูมิสูง คือ

$$\tau_{allow,310S,HT} = \frac{1}{2} \times \sigma_{allow,310S,HT} = 27.13 \text{ MPa} \quad (4.40)$$

ข) ปลายจับยึดกับชิ้นงานทดสอบ

เนื่องจากก้านดึงชิ้นงานทดสอบยึดกับชิ้นงานทดสอบด้วยเกลียว (หัวข้อที่ 4.2) ดังนั้นที่ปลายจับยึดกับชิ้นงานทดสอบจะทำรูเกลียวไว้ เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุที่ทำก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (สมการที่ (4.40)) และ วัสดุที่ทำชิ้นงานทดสอบ (สมการที่ (4.11)) จะเห็นว่าวัสดุที่ทำก้านดึงชิ้นงานทดสอบแข็งแรงกว่า ดังนั้น จำนวนเกลียวที่ก้านดึงชิ้นงานทดสอบจึงถูกกำหนดโดยจำนวนเกลียวที่ปลายของชิ้นงานทดสอบ (M12X1 ความยาวเกลียว 35 มม.)

ค) ส่วนลำตัวของก้านดึงชิ้นงานทดสอบ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดึงชิ้นงาน d_{rod} (รูปที่ 4.5) ในเบื้องต้นจะประมาณจากคำแนะนำในเอกสารอ้างอิง (27) ว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกควรมีค่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดเกลียว d_{thread} (12 มม.) ดังนั้น

$$d_{rod} \geq 1.5 \times 12 = 18 \text{ มม.}$$

เลือก

$$d_{rod} = 20 \text{ มม.}$$

ถัดไปพิจารณาความแข็งแรงของก้านดึงขึ้นงานว่าเพียงพอหรือไม่ ความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ของก้านดึงขึ้นงานทดสอบ คือก้านดึงขาดภายใต้ความเค้นดึง จากรูปที่ 4.4 พื้นที่รับแรงดึงที่น้อยที่สุด คือ พื้นที่วงแหวนรอบรูเกลียว A โดย

$$A = \frac{\pi}{4} (d_{rod}^2 - d_{thread}^2)$$

แทนค่าตัวแปรจะได้ $A = 2.01 \times 10^{-4} \text{ มม.}^2$

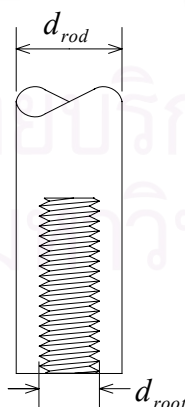
ความเค้น ณ ภาระทดสอบสูงสุด $P_{max} = 8000$ นิวตัน คือ

$$\sigma = \frac{P_{max}}{A} = 39.8 \text{ MPa.}$$

จากผลการคำนวณ ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าความเค้นดึงที่ยอมรับได้ของวัสดุ (สมการที่ (4.39)) ดังนั้นเลือก

$$d_{rod} = 20 \text{ มม.} \quad (4.41)$$

เหตุผลประกอบอื่นในการเลือกใช้ขนาดดังกล่าวแทนที่จะใช้ขนาดใกล้เคียงกับขนาดมาตรฐาน (1 นิ้ว (25.4 มม.)) เนื่องจากก้านดึงขึ้นงานทดสอบเป็นชิ้นส่วนที่ต้องมีความเที่ยงตรงสูงในเรื่องของความตรง (straightness) ความร่วมศูนย์ระหว่างก้านกับศูนย์กลางของรูเกลียว ดังนั้นแม้ว่าจะต้องกลึงปอกเพลลาจากขนาด 25.4 มม. ให้เหลือ 20 มม. ก็เป็นสิ่งที่จำเป็น



รูปที่ 4.5 ปลายก้านดึงขึ้นงานทดสอบส่วนจับยึดขึ้นงานทดสอบ

ง) ส่วนจับยึดกับ Universal

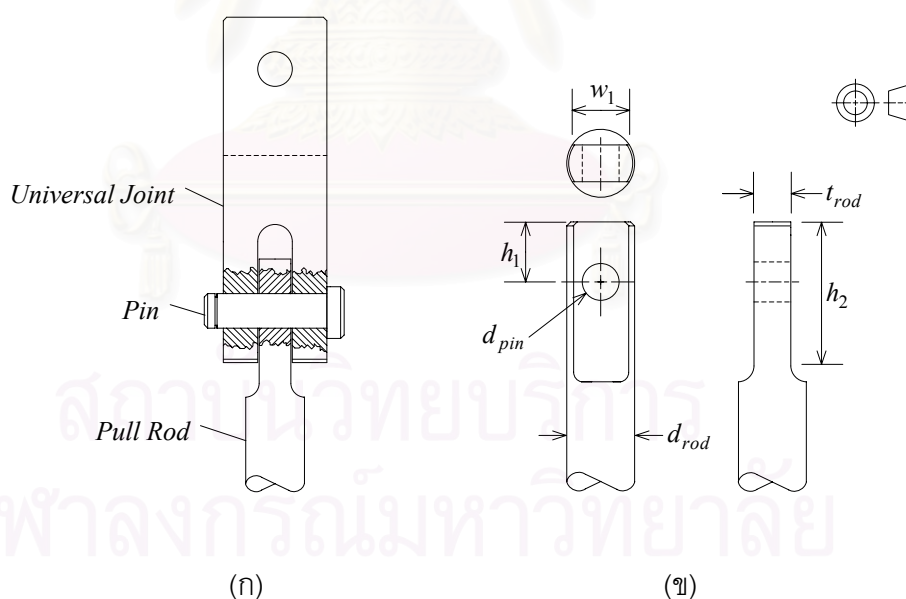
ปลายอีกข้างของก้านดึงขึ้นงานทดสอบจะจับยึดกับ universal joint ด้วยสลัก ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับบริเวณนี้ คือความเค้นดึงที่รุ่มมากกว่าความเค้นดึงที่ยอมรับได้ จากรูปที่ 4.6 จะเขียนสมการออกแบบได้ดังนี้

$$k_t \frac{P_{max}}{(w_1 - d_{pin})t_{rod}} = \sigma_{allow,310S,RT} \quad (4.42)$$

โดย k_t คือตัวประกอบความเค้นหนาแน่น (stress concentration factor)

จากรูปที่ 4.6 มิติ w_1 สัมพันธ์กับมิติ d_{rod} และ t_{rod} ตามสมการ

$$w_1 = 2\sqrt{\frac{d_{rod}^2}{4} - \frac{t_{rod}^2}{4}} \quad (4.43)$$



รูปที่ 4.6 การจับยึดก้านดึงขึ้นงานทดสอบกับ universal joint

(ก) วิธีการจับยึดด้วยสลัก

(ข) ลักษณะปลายก้านดึงขึ้นงานทดสอบ และตัวแปรบอกมิติ

เนื่องจากปลายด้านนี้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นความแข็งแรงของวัสดุที่เกี่ยวข้องคือ ความต้านแรงดึงครากที่อุณหภูมิห้อง (หัวข้อที่ 4.4.1(ก)) เลือกใช้ตัวประกอบความปลอดภัย SF เท่ากับ 1.2^2 จะได้ความเค้นที่ยอมรับได้คือ

$$\sigma_{allow,310S,RT} = \frac{\sigma_{y,310S,RT}}{SF} = 241.67 \text{ MPa} \quad (4.44)$$

สมมุติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูร้อยสลัก d_{pin} เท่ากับ 10 มม.(จะตรวจสอบในหัวข้อที่ 4.4.2.ข)) และเลือก $h_1 / w_1 = 1$

ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นที่ $h_1 / w_1 = 1$ คือ (27)

$$k_t = 1.6357 \left(\frac{d_{pin}}{w_1} \right)^{-0.6019} \quad (4.45)$$

แทนสมการที่ (4.43) - (4.45) ลงในสมการที่ (4.42) แล้วแก้สมการจะได้

$$t_{rod} = 12 \text{ มม.} \quad (4.46)$$

จากอัตราส่วนระหว่าง h_1 และ w_1 ที่กำหนด จะได้

$$h_1 = 16 \text{ มม.} \quad (4.47)$$

² เอกสารอ้างอิง (23) แนะนำวิธีกำหนดค่าของตัวประกอบความปลอดภัย FS ว่าเท่ากับผลคูณของตัวประกอบความปลอดภัยของ วัสดุ ความเค้น เรขาคณิต โหมดความเสียหาย และความเชื่อถือได้ (reliability) โดยแทนด้วย

สัญลักษณ์ $SF_{material}$, SF_{stress} , $SF_{geometry}$, $SF_{failure}$, $SF_{reliability}$ ตามลำดับ ในวิทยานิพนธ์นี้ เลือก

$SF_{material} = 1.1$ เพราะใช้สมบัติของวัสดุจากคู่มือ หรือผู้ผลิต

$SF_{stress} = 1.0$ เพราะขนาดภาระสูงสุดที่กระทำกับชิ้นส่วนมีขนาดที่แน่นอน และเป็นภาระสถิตย์

$SF_{geometry} = 1.0$ เพราะผู้ผลิตชิ้นส่วนมีความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนให้มีความเที่ยงตรงสูง

$SF_{failure} = 1.0$ เพราะสมการที่ใช้คำนวณความเค้น และเกณฑ์การออกแบบภายใต้โหมดความเสียหายที่คาดว่า จะพบสอดคล้องกับการใช้งานจริง

$SF_{reliability} = 1.1$ ที่ระดับความเชื่อถือได้ 90 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น $SF = 1.1 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.1 \approx 1.2$

แทนสมการที่ (4.46) ลงในสมการที่ (4.43) จะได้

$$w_1 = 16 \text{ มม.} \quad (4.48)$$

และกำหนด $h_2 = 44 \text{ มม.} \quad (4.49)$

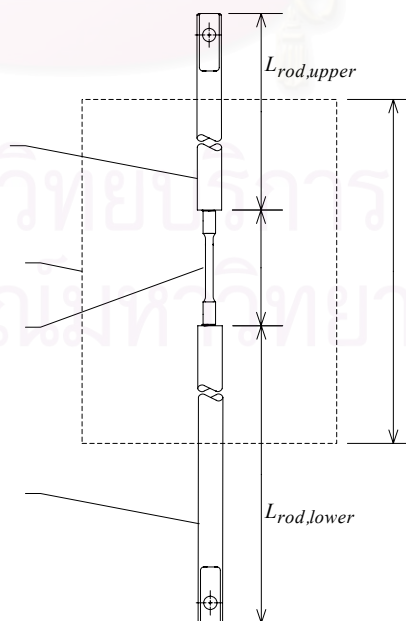
จ) ความยาวของก้านดึงชิ้นงานทดสอบ

การกำหนดความยาวก้านดึงชิ้นงานทดสอบก่อนบน ใช้หลักพิจารณา ดังนี้ กำหนดกึ่งกลางความสูงของเตาอยู่ระดับเดียวกับกึ่งกลางความยาวของชิ้นงานทดสอบ (รูปที่ (4.7)) เมื่อประกอบก้านดึงก่อนบนกับชิ้นงานแล้ว ระยะจากปลายก้านดึงที่อยู่นอกเตาถึงผิวบนของเตา คือ $225 - 91/2 = 179.5 \text{ มม.}$ แต่ต้องเผื่อระยะสำหรับเลื่อนเตาขึ้น (เพื่อปรับการกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงานทดสอบ) ดังนั้นเลือก ความยาวของก้านดึงชิ้นงานทดสอบก่อนบน

$$L_{rod,upper} = 300 \text{ มม.} \quad (4.50)$$

การกำหนดความยาวของก้านดึงชิ้นงานทดสอบก่อนล่าง จะพิจารณาบริเวณว่าง (space) เพียงพอสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว (24) ดังนั้นกำหนดให้ ความยาวของก้านดึงชิ้นงานทดสอบก่อนล่าง

$$L_{rod,lower} = 460 \text{ มม.} \quad (4.51)$$



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งก้านดึงชิ้นงานทดสอบเมื่อประกอบกับเตาและชิ้นงานทดสอบ

4.4.3 สลัก และข้อต่อ Universal ตั๊กกลาง

ก) วัสดุ

วัสดุที่ทำสลักและข้อต่อ universal ตั๊กกลาง (intermediate universal joint) คือ เหล็กกล้า AISI 4340 ซึ่งมีความต้านทานแรงดึงครากที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ (14)

$$\sigma_{y, AISI 4340, RT} = 896.3 \text{ MPa}$$

ความเค้นเฉือนครากประมาณได้จาก

$$\tau_{y, AISI 4340, RT} = \frac{1}{2} \sigma_{y, AISI 4340, RT} = 448.16 \text{ MPa}$$

เลือกตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 1.2 ดังนั้น ความเค้นดึงที่ยอมรับได้ และ ความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้คือ

$$\sigma_{allow, AISI 4340, RT} = \frac{1}{1.2} \sigma_{y, AISI 4340, RT} = 746.9 \text{ MPa} \quad (4.52)$$

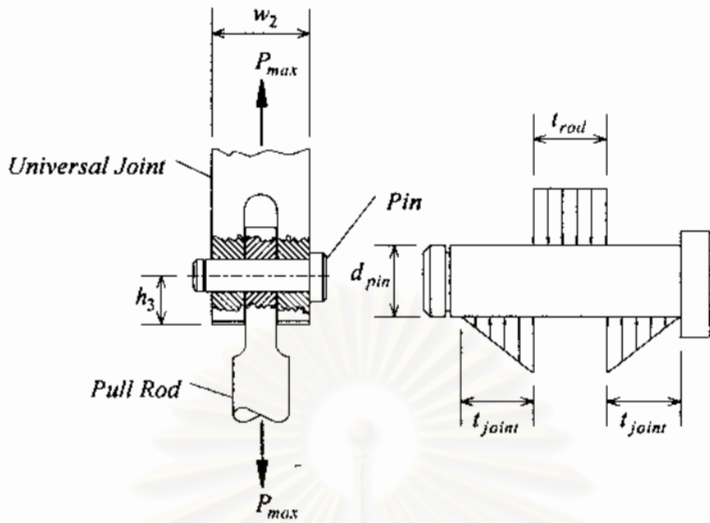
$$\tau_{allow, AISI 4340, RT} = \frac{1}{1.2} \tau_{y, AISI 4340, RT} = 373.5 \text{ MPa} \quad (4.53)$$

ข) สลัก

โหมดความเสียหายของสลักที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย

- 1) เสียหายเนื่องจากโมเมนต์ดัด
- 2) เสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน
- 3) ความแข็งเกร็งการดัด (bending rigidity) ไม่เพียงพอ

ภาวะที่กระทำกับสลักแสดงอยู่ในรูปที่ 4.8 ในที่นี้จำลองให้ภาวะจากก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบเป็นภาวะกระจายสม่ำเสมอ และภาวะจากข้อต่อ universal เป็นภาวะกระจายเชิงเส้น



รูปที่ 4.8 ภาวะที่กระทำต่อสลัก

ความหนาของข้อต่อ universal ที่ทำหน้าที่รองรับสลัก t_{joint} ควรมีค่าน้อยน้อย 0.75 เท่า ของความหนาของปลายก้านดึงชิ้นงานทดสอบที่ประกบกับข้อต่อ universal t_{rod} (27) ดังนั้นจากสมการที่ (4.46) จะได้ $t_{joint} \geq 9$ มม. ในที่นี้เลือก

$$t_{joint} = 10 \text{ มม.} \quad (4.54)$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ระบุ) ของสลัก d_{pin} เท่ากับขนาดรูเจาะบนก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (หัวข้อ 4.4.2 ง) ดังนั้น

$$d_{pin} = 10 \text{ มม.} \quad (4.55)$$

พิจารณาโมเมนต์ความเสียหายเนื่องจากความเค้นดัด จากรูปที่ 4.8 ภายใต้ภาวะทดสอบสูงสุด P_{max} โมเมนต์ดัดสูงสุด M_{max} เกิดขึ้นที่กึ่งกลางความยาวสลัก และมีขนาดเท่ากับ

$$M_{max} = \frac{P_{max}}{2} \left(\frac{t_{joint}}{3} + \frac{t_{rod}}{2} \right) - \frac{P_{max}}{2} \times \frac{t_{rod}}{4} \quad (4.56)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.5), (4.54) และ (4.46) ลงในสมการที่ (4.56) จะได้

$$M_{max} = 25.3 \text{ N-m}$$

ความเค้นดัดสูงสุด คือ

$$\sigma_{bending, max} = \frac{32M_{max}}{\pi d_{pin}^3} \quad (4.57)$$

แทนค่า M_{max} และสมการที่ (4.55) ลงในสมการที่ (4.57) จะได้

$$\sigma_{bending, max} = 258.04 \text{ MPa}$$

ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเค้นที่ยอมรับได้ (สมการที่ (4.52)) ดังนั้นขนาดสลักที่เลือกมีความเหมาะสม

พิจารณาโหมดความเสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน จากรูปที่ 4.8 พื้นที่หน้าตัดที่รับความเค้นเฉือน เท่ากับสองเท่าของพื้นที่หน้าตัดสลัก ดังนั้นความเค้นเฉือนสูงสุด คือ

$$\tau_{pin, max} = \frac{P_{max}}{2 \left(\frac{\pi}{4} d_{pin}^2 \right)} \quad (4.58)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.5) และ (4.55) ลงในสมการที่ (4.58) จะได้

$$\tau_{pin, max} = 50.93 \text{ MPa}$$

ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเค้นที่ยอมรับได้ (สมการที่ (4.53)) ดังนั้นขนาดสลักที่เลือกสามารถใช้งานได้

สุดท้ายพิจารณาว่าความแข็งเกร็งการดัดของสลักเพียงพอหรือไม่ เพื่อให้การคำนวณง่ายจะจำลองสลักเป็นคานารับภาระสมมาเสมอและมีระยะระหว่างรองรับเท่ากับ t_{rod} (12 มม.) กำหนดให้ชนิดรองรับคือ simply support ดังนั้นระยะแอนตัวต่อระยะระหว่างรองรับ คือ (14)

$$\frac{\delta_{max}}{t_{rod}} = \frac{5P_{max}t_{rod}^2}{384E \left(\frac{\pi}{64} d_{pin}^4 \right)} \quad (4.59)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.5) (4.46) และ (4.55) ลงในสมการที่ (4.59) และใช้ค่า $E = 200 \text{ GPa}$ จะได้

$$\frac{\delta_{max}}{t_{rod}} \approx 1.5 \times 10^{-4}$$

ซึ่งอยู่ภายในเกณฑ์ของชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง ($1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$) ดังนั้นยอมรับได้

ค) ข้อต่อ universal ตัวกลาง

จากรูปที่ 4.8 ความกว้างของข้อต่อ universal คือ

$$w_2 = 2t_{joint} + t_{rod} \quad (4.60)$$

แทนสมการที่ (4.46) และ (4.54) ลงในสมการที่ (4.60) จะได้

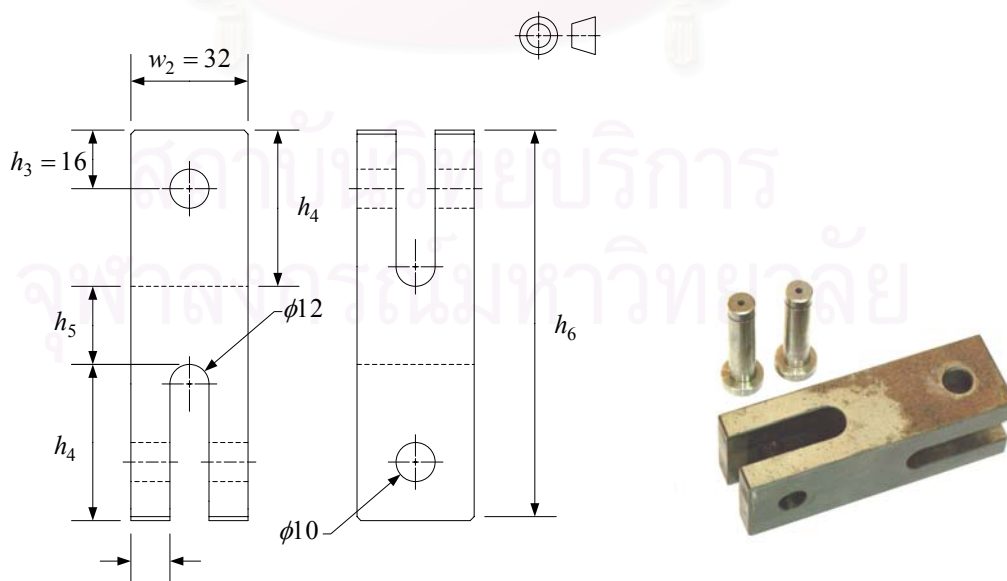
$$w_2 = 32 \text{ มม.} \quad (4.61)$$

รูปที่ 4.9 แสดงภาพด้านหน้า และด้านข้างของข้อต่อ universal ในวิทยานิพนธ์นี้ ออกแบบให้ข้อต่อมีความสมมาตรของมิติเพื่อลดจำนวนตัวแปรบอกมิติที่ต้องคำนวณ ทำให้ภาพในวิวทั้งสองเป็นภาพจากกระจก (mirror)

เพื่อตรวจสอบว่าความหนาของข้อต่อ universal ที่ทำหน้าที่รองรับสลัก t_{joint} มีขนาดเพียงพอหรือไม่ (ค่าปัจจุบันคือ 10 มม.) จะคำนวณความเค้นดึงสูงสุดที่รู้ หาได้จากสมการ

$$\sigma_{hole,max} = k_t \frac{P_{max} / 2}{(w_2 - d_{pin})t_{joint}} \quad (4.62)$$

โดย k_t คือตัวประกอบความเค้นหนาแน่น (stress concentration factor)



รูปที่ 4.9 ข้อต่อ universal ตัวกลางและตัวแปรบอกมิติ

กำหนดระยะ $h_3 = 16$ มม.

สำหรับกรณี $h_3 / w_2 = 0.5$ จาก (28)

$$k_t = 1.61 \left(\frac{d_{pin}}{w_2} \right)^{-0.7514} \quad (4.64)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.55) และ (4.61) ลงในสมการที่ (4.64) จะได้ $k_t = 3.86$ นำค่านี้แทนในสมการที่ (4.62) ร่วมกับสมการที่ (4.5), (4.54) (4.55) และ (4.61) จะได้

$$\sigma_{hole,max} = 24.12 \text{ MPa}$$

ความเค้นดึงสูงสุดที่รู้น้อยกว่าความเค้นที่ยอมรับได้ของวัสดุ(สมการที่(4.52)) ดังนั้น t_{joint} ที่เลือกไว้สามารถใช้งานได้

ระยะ h_4 บนข้อต่อ universal กำหนดโดยใช้เกณฑ์ว่าต้องเพียงพอที่จะทำให้ก้านดึงขึ้นงานทดสอบหมุนได้ 180° การกำหนดค่าใช้วิธีวาดรูปหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายก้านดึงขึ้นงานทดสอบที่ไกลที่สุด (รูปที่ 4.10) จากนั้นเพื่อระยะอีกเล็กน้อยจะได้ตำแหน่งศูนย์กลางส่วนโค้งของห้องร่อง สุดท้ายแล้วเลือกค่า

$$h_4 = 41 \text{ มม.} \quad (4.65)$$

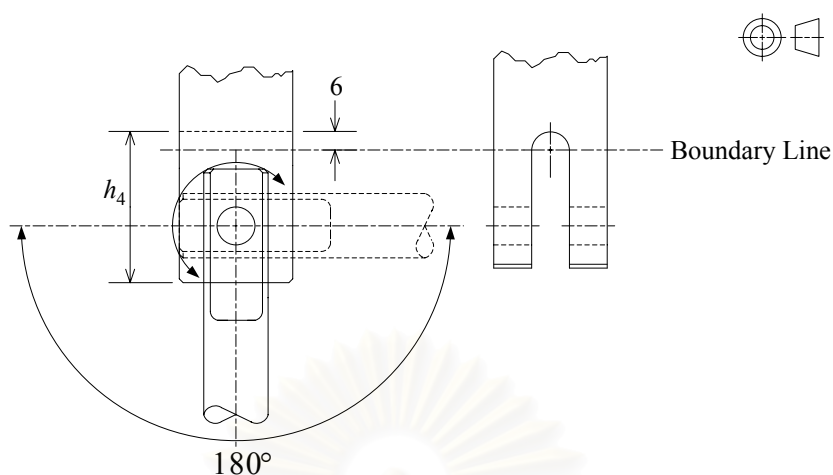
นอกจากนี้กำหนดให้

$$h_5 = 18 \text{ มม.} \quad (4.66)$$

ดังนั้นจากรูปที่ 4.9 จะได้

$$h_6 = h_5 + 2h_4 \quad (4.67)$$

$$h_6 = 100 \text{ มม.} \quad (4.68)$$



รูปที่ 4.10 วิธีกำหนดระยะ h_4

4.4.4 อุปกรณ์ปรับระยะ

อุปกรณ์ปรับระยะที่ใช้คือ machine screw actuator โดยเลือกใช้ ผลิตภัณฑ์ รุ่น SK-1802 ยี่ห้อ Duff-Norton (รับภาระได้ 2 ตัน) และเลือกชนิดปลายจับยึดเป็นแบบร้อยสลัก (clevis end type) ลักษณะของอุปกรณ์แสดงอยู่ในรูปที่ 4.11

4.4.5 ข้อต่อ universal ตัวล่าง และสลัก

ก) วัสดุ

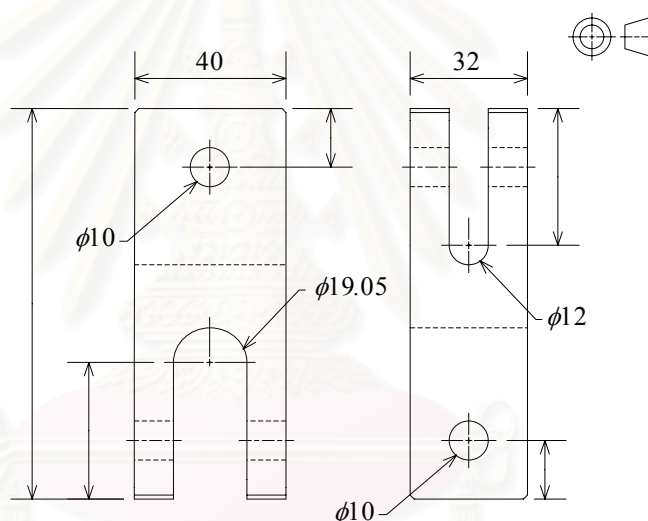
วัสดุที่ใช้ทำข้อต่อ universal ตัวล่าง และสลักเป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ทำข้อต่อตัวบน ดังนั้นความเค้นที่ยอมรับได้ คือค่าในสมการที่ (4.52) และ (4.53)

ข) ข้อต่อ universal ตัวล่าง

ข้อต่อ universal ตัวล่างออกแบบให้มีรูปร่างเหมือนกับข้อต่อ universal ตัวกลาง แต่มีร่องด้านที่ประกบกับอุปกรณ์ปรับระยะมีความกว้างมากกว่า เพราะความหนาของก้านของอุปกรณ์ปรับระยะ t_{duff} เท่ากับ $3/4$ นิ้ว (19.05 มม.) ซึ่งมากกว่าปลายของก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (12 มม.) รูปที่ 4.12 แสดงรูปร่างและมิติของข้อต่อตัวล่าง จากรูปความกว้างของร่องที่สวมกับอุปกรณ์ปรับระยะคือ 19.05 มม. และจากผลการคำนวณก่อนหน้าความหนาของส่วนที่รองรับสลัก t_{joint}



รูปที่ 4.11 อุปกรณ์ปรับระยะ (รุ่น SK-1802 ยี่ห้อ Duff-Norton)



รูปที่ 4.12 ข้อต่อ universal ตัวล่าง

เท่ากับ 10 มม. ดังนั้นความกว้างของข้อต่อที่คำนวณคือ 39.05 มม. แต่เพื่อให้เป็นตัวเลขที่ลงตัวจึงเลือกความกว้างเท่ากับ 40 มม. (ทำให้ส่วนที่รองรับสลักมีความหนาประมาณ 10.5 มม.)

จากมิติที่กำหนดในรูปที่ 4.12 ผู้ออกแบบจำเป็นต้องตรวจสอบความแข็งแรงของชิ้นส่วนด้วย อย่างไรก็ตามก็สามารถพิจารณาคร่าว ๆ ได้ทันทีว่ามิติที่กำหนดในรูปนั้นผ่านเกณฑ์การออกแบบเนื่องจาก 1) ความกว้างของข้อต่อตัวล่างเพิ่มขึ้นจากเดิม (พื้นที่รับแรงมากขึ้น) ทำให้ความเค้นสูงสุดที่รูด้านบนลดลง และ 2) ความหนาของส่วนรองรับสลัก (ด้านที่ประกอบกับอุปกรณ์ปรับระยะเพิ่มขึ้นจากเดิม ดังนั้นความเค้นจะลดลง)

ค) สลัก

สลักที่ร้อยผ่านรูด้านบนสามารถใช้ผลการออกแบบที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.4.3 ข) ได้ ดังนั้นจะกล่าวเฉพาะสลักที่ร้อยผ่านรูด้านล่างเนื่องจากมีระยะห่างระหว่างรองรับมากขึ้น (เดิม 12 มม. เปลี่ยนมาเป็น 19.05 มม.)

พิจารณาความเสียหายเนื่องจากการดัด โมเมนต์ดัดสูงสุด M_{max} สามารถหาได้จากสมการที่ (4.56) โดยแทนค่า t_{joint} เท่ากับ 10.5 มม. และ t_{rod} เท่ากับ 19.05 มม. ผลลัพธ์ที่ได้คือ $M_{max} = 33.05$ N-m เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (4.57) จะได้ $\sigma_{bending,max} = 336.5$ MPa ซึ่งน้อยกว่าความเค้นดึงที่ยอมรับได้ (สมการที่ (4.52)) ดังนั้น สลักไม่เสียหายเนื่องจากการดัด

พิจารณาความเสียหายเนื่องจากการเฉือน เนื่องจากภาระตามขวางที่กระทำต่อสลักมีค่าเท่าเดิม (8000 นิวตัน) ดังนั้นความเค้นเฉือนสูงสุดที่สลักจึงเท่ากับที่คำนวณในหัวข้อ 4.4.3 ข) ซึ่งผ่านเกณฑ์ ดังนั้น สลักไม่เสียหายเนื่องจากการเฉือน

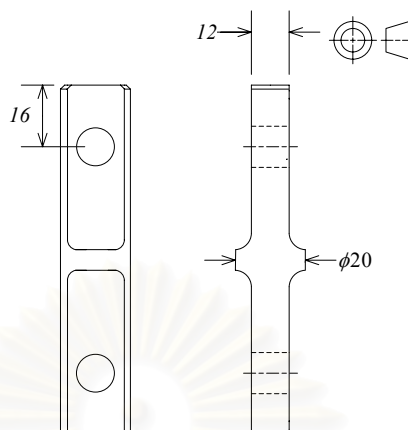
พิจารณาความแข็งแรงดึงดัดของสลัก จากสมการที่ (4.59) โดยแทนค่า t_{rod} เท่ากับ 19.05 มม. จะได้ $\delta_{max}/t_{diff} = 3.7 \times 10^{-4}$ ซึ่งอยู่ภายในเกณฑ์ของชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง ($1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$) ดังนั้น ขนาดของสลักที่เลือกจึงใช้งานได้

4.4.6 ก้านดิ่ง

ก้านดิ่งถูกเพิ่มเข้ามาในชุดให้ภาระด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ 1) เพื่อลดขนาดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ และ 2) เพื่อไว้สำหรับการปรับเปลี่ยนชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ

จากรูปที่ 4.13 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำตัวของก้านดิ่งมีขนาดเท่ากับของก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบ (20 มม. สมการที่ (4.41)) และทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย จึงสรุปว่าลำตัวของก้านดิ่งไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากภาระดึง

ปลายทั้งสองของก้านดิ่งถูกปาดออกให้มีความหนาเท่ากับปลายก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบ (12 มม. (สมการที่ 4.46)) และตำแหน่งของรูเจาะจะอยู่ห่างจากปลายเท่ากับที่ข้อต่อ



รูปที่ 4.13 ก้านดิ่ง

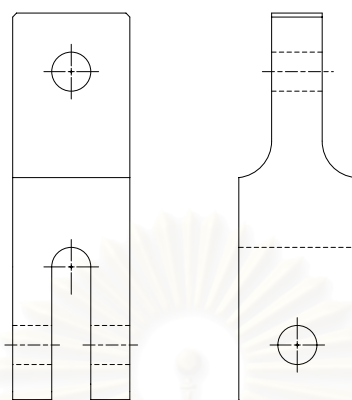
universal ตัวกลาง (16 มม. (สมการที่ 4.62)) ดังนั้น ปลายทั้งสองของก้านดิ่งจึงไม่เสียหายเนื่องจากภาวะดิ่ง

4.4.7 ข้อต่อ universal ตัวบน

รูปร่าง และมิติของข้อต่อ universal ตัวบน แสดงอยู่ในรูปที่ 4.14 มิติต่าง ๆ ของข้อต่อสามารถกำหนดได้โดยอ้างอิงผลการคำนวณในหัวข้อย่อยก่อนหน้านี้ได้ ดังนี้

ปลายของข้อต่อ universal ตัวบนที่สวมกับปลายก้านดิ่ง มีความกว้าง ความหนา และตำแหน่งรูเหมือนกับข้อต่อ universal ตัวกลาง (หัวข้อที่ 4.4.3ค) ดังนั้นสรุปว่าที่ปลายด้านนี้จะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากภาวะดิ่ง

ปลายอีกด้านของ universal ตัวบน (แบบรายละเอียดหมายเลข 017 ในภาคผนวก ก) ที่สวมกับชิ้นส่วนซึ่งจะไปแขวนอยู่กับคานทอดแรง (ในที่นี้ตั้งชื่อว่า load train hanger) ก็มีขนาดหน้าตัดใหญ่กว่าปลายของก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบ ดังนั้น จึงสรุปว่าที่ปลายนี้จะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากภาวะดิ่ง



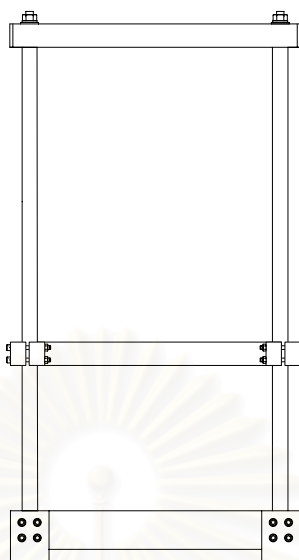
รูปที่ 4.14 ข้อต่อ universal ตัวบน

4.5 โครงเครื่องทดสอบ

เกณฑ์ที่ใช้ออกแบบโครงเครื่องทดสอบ คือ ความแข็งแรง (ระยะแฉกต่อความยาวของคาน) ของโครงสร้างต้องอยู่ในช่วงของชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง (สมการที่ (2.18)) การคำนวณระยะแฉกจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การออกแบบจะใช้วิธีสมมุติขนาดหน้าตัด และความยาวของแต่ละเอลิเมนต์ จากนั้นคำนวณระยะแฉกตัวของโครงเครื่องทดสอบ แล้วนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับกับเกณฑ์ที่ยอมรับ หากไม่ผ่านเกณฑ์ก็จะปรับพื้นที่หน้าตัดให้มีขนาดเพิ่มขึ้น หรือลดความยาวของเอลิเมนต์

ลักษณะของโครงเครื่องทดสอบที่ออกแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.15 ส่วนประกอบของโครงเครื่องทดสอบ คือ ฐาน คานกลาง คานบน และเสา 4 ต้น โดยแต่ละส่วนประกอบมีหน้าที่ดังนี้

- 1) ฐาน ทำหน้าที่รองรับอุปกรณ์ปรับระยะ และจับยึดเสา
- 2) คานกลาง ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง
- 3) คานบน ทำหน้าที่รองรับคานทดแรง
- 4) เสา ทำหน้าที่ตั้งระยะระหว่างคานบน และฐาน และเป็นที่จับยึดของเตา



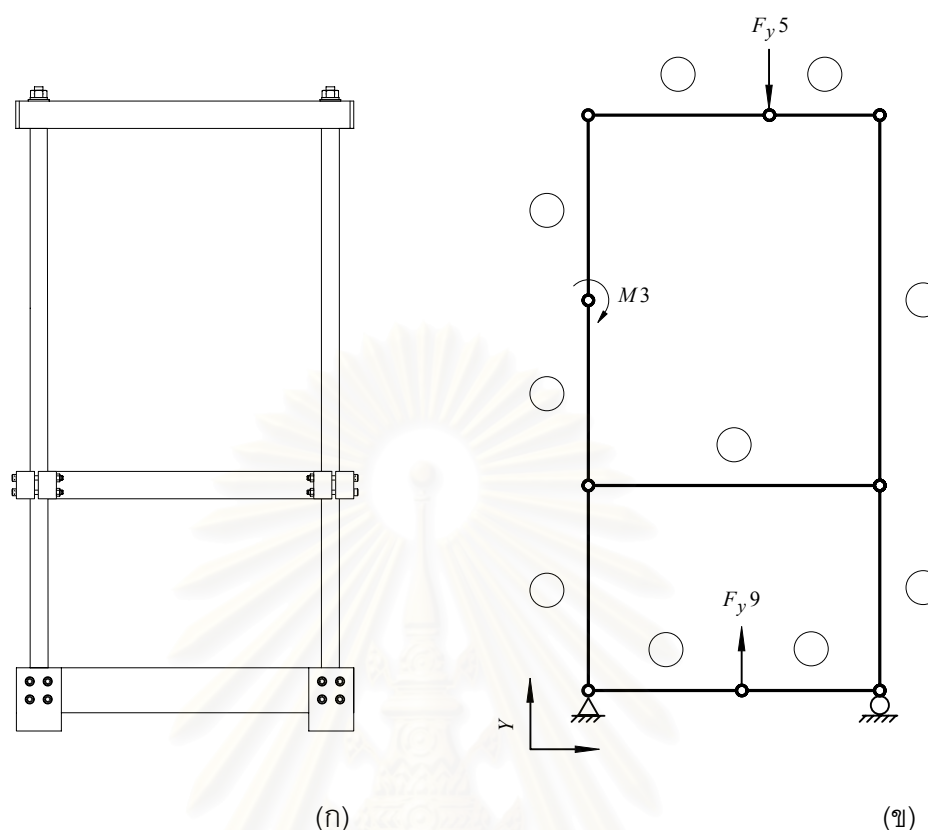
รูปที่ 4.15 ภาพด้านหน้าของโครงเครื่องทดสอบ

4.5.1 การจำลองปัญหา

โครงสร้างของเครื่องทดสอบที่ออกแบบ รูปที่ 4.16 (ก) สามารถแทนด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติได้ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข) ซึ่งประกอบด้วยจุดต่อ 9 จุด และเอลิเมนต์ 13 เอลิเมนต์ เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ปัญหาในสองมิติจึงต้องแบ่งโครงสร้างเป็นสองส่วนตามแนวความหนา และภาวะที่กระทำกับแบบจำลองก็จะถูกแบ่งครึ่งด้วยเช่นกัน

ภาวะที่กระทำกับเครื่องทดสอบประกอบด้วย

- 1) แรงปฏิกิริยาที่จุดหมุนคานาทดแรง (fulcrum) ซึ่งอยู่ที่จุดต่อหมายเลข 5
- 2) โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักเตา ซึ่งอยู่ที่จุดต่อหมายเลข 3
- 3) แรงปฏิกิริยาของชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบที่จุดต่อหมายเลข 9



รูปที่ 4.16 การจำลองโครงสร้างของเครื่องทดสอบ

(ก) โครงสร้างที่ออกแบบ

(ข) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แรงปฏิกิริยาที่จุดหมุนคานทอดแรง F มีค่าเท่ากับผลบวกของ ภาระทดสอบสูงสุด P_{\max} (8,000 นิวตัน) น้ำหนักของคานทอดแรง และน้ำหนักถ่วง (800 นิวตัน) ในที่นี้จะไม่คติน้ำหนักของคานทอดแรง ดังนั้นจากรูปที่ 4.17 จะได้

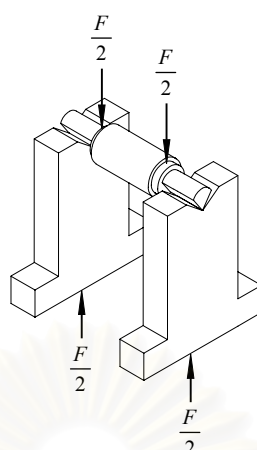
$$F = 8,800 \text{ นิวตัน} \quad (4.69)$$

และ $F_{y5} = 4,400 \text{ นิวตัน} \quad (4.70)$

แรงปฏิกิริยาที่ฐาน F_{y9} มีค่าเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของภาระทดสอบสูงสุด ดังนั้น

$$F_{y9} = 4,000 \text{ นิวตัน} \quad (4.71)$$

โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักเตา M_3 จะเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของผลคูณระหว่างน้ำหนักเตา และระยะจากศูนย์กลางเตาถึงศูนย์กลางของเสา (เท่ากับความยาวของเอลิเมนต์หมายเลข 9 โดย



รูปที่ 4.17 การส่งผ่านแรงจากจุดหมุนคานทอดแรงไปสู่โครงเครื่องทดสอบ

ประมาณ) ในที่นี้ เตามีน้ำหนักประมาณ 30 กิโลกรัม และเอลิเมนต์หมายเลข 9 มีความยาวประมาณ 0.34 เมตร (หัวข้อที่ 4.5.2) ดังนั้น

$$M_3 = -50 \text{ นิวตัน-เมตร} \quad (4.72)$$

เงื่อนไขขอบเขตที่จุดต่อ กำหนดไว้ดังนี้

- 1) จุดต่อหมายเลข 1 ไม่มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง x และ y หรือ $x_1 = 0, y_1 = 0$
- 2) จุดต่อหมายเลข 8 ไม่มีการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง $y_8 = 0$

4.5.2 การกำหนดมิติของเอลิเมนต์

ก) เอลิเมนต์แนวระดับ

จากรูปที่ 4.16 เอลิเมนต์แนวระดับ ประกอบด้วยเอลิเมนต์หมายเลข 4, 5, 8, 9 และ 10 ความยาวของเอลิเมนต์เหล่านี้คำนวณได้เมื่อทราบ ความกว้างของโครงเครื่องทดสอบ ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ปรับระยะ และจุดหมุนของคานทอดแรง

กำหนดให้แนวแกนของชุดให้ภาระขึ้นงานทดสอบอยู่ห่างจากเสาด้านซ้ายมือเป็นระยะ 340 มม. ทำให้มีช่องว่างระหว่างผนังเตาด้านนอกกับเสาประมาณ 163 มม. (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเตา 2 เท่าของ r_4 คือ 354 มม. (จากหัวข้อที่ 4.3)) ซึ่งเพียงพอสำหรับจะเปิด

เตาได้อย่างน้อย 90 องศา และสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ยึดเตา (mounting bracket) กับเสาดังนั้น $L_9 = 340$ มม. ถ้าเผื่อช่องว่างด้านขวามืออีกอย่างน้อย 100 มม. จะได้ความกว้างของเครื่องอย่างน้อย 617 มม. ดังนั้นเลือกความกว้างเท่ากับ 650 มม. และจะได้ $L_8 = 650 - L_9 = 310$ มม.

กำหนดระยะระหว่าง knife-edge ของชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบกับจุดหมุนคานาทดแรงเท่ากับ 60 มม. ดังนั้น $L_5 = L_8 - 60 = 250$ มม. และ $L_4 = 650 - 250 = 400$ มม.

รูปร่าง และขนาดหน้าตัดของเอลิเมนต์แนวระดับสามารถดูได้จากแบบรายละเอียดในภาคผนวก ก จากแบบรายละเอียดหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม และมีมิติดังนี้

- 1) คานบน (เอลิเมนต์หมายเลข 4 และ 5) กว้าง 45 มม.³ สูง 60 มม.
- 2) คานกลาง (เอลิเมนต์หมายเลข 10) กว้าง 20 มม.⁴ สูง 60 มม.
- 3) รูลาน (เอลิเมนต์หมายเลข 8 และ 9) กว้าง 100 มม.⁵ สูง 100 มม.

มิติความกว้างที่ระบุข้างต้นจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างในแบบรายละเอียด

ข) เอลิเมนต์แนวตั้ง

จากรูปที่ 4.16 เอลิเมนต์แนวตั้งประกอบด้วย เอลิเมนต์ที่ 1, 2, 3, 6 และ 7 จากผลการออกแบบชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ (หัวข้อที่ 4.4) เมื่อนำชิ้นส่วนประกอบกัน (รูปที่ 4.4) แล้ววัดระยะจากฐานของอุปกรณ์ปรับระยะถึงตำแหน่งรูร้อยสลักตัวบนของก้านดึง จะได้ความยาวโดยรวมของชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบประมาณ 1,237 มม. ซึ่งอุปกรณ์ปรับระยะสามารถปรับชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบขึ้นและลงได้อีก 20 มม. และ 80 มม. ตามลำดับ ดังนั้นกำหนดให้ระยะความสูง (ภายใน) โครงเครื่องทดสอบเท่ากับ 1,240 มม.

³ เท่ากับครึ่งหนึ่งของมิติที่แสดงในแบบรายละเอียด

⁴ เท่ากับครึ่งหนึ่งของมิติที่แสดงในแบบรายละเอียด

⁵ เท่ากับครึ่งหนึ่งของมิติที่แสดงในแบบรายละเอียด

ความยาวของเอลิเมนต์แนวตั้งจะกำหนดให้เริ่มวัดจากกึ่งกลางคานบน ถึง กึ่งกลางฐาน ดังนั้น จากรูปที่ 4.16 จะได้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_6 + L_7 = 1240 + \frac{60}{2} + \frac{100}{2} = 1320 \text{ มม.}$$

จากรูปที่ 4.16 จุดต่อหมายเลข 2 และ 7 เป็นตำแหน่งติดตั้งคานกลาง ซึ่งต้องอยู่ได้เตา จากการพิจารณา กำหนดให้ $L_1 = L_7 = 450$ มม. ดังนั้น

$$L_6 = 1320 - L_7 = 870 \text{ มม.}$$

จากรูปที่ 4.16 จุดต่อที่ 3 เป็นตำแหน่งที่โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักเตากระทำ จากการพิจารณา กำหนดให้

$$L_2 = L_3 = \frac{870}{2} = 435 \text{ มม.}$$

เสาโครงสร้างทดสอบจะเลือกจากเพลามาตรฐาน พิจารณานาขนาดเอกสารผู้ผลิตเลือกเพลานาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว (38.1 มม.) ดังนั้น หน้าตัดของเอลิเมนต์ที่วางตัวแนวตั้งทั้งหมดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 38.1 มม.

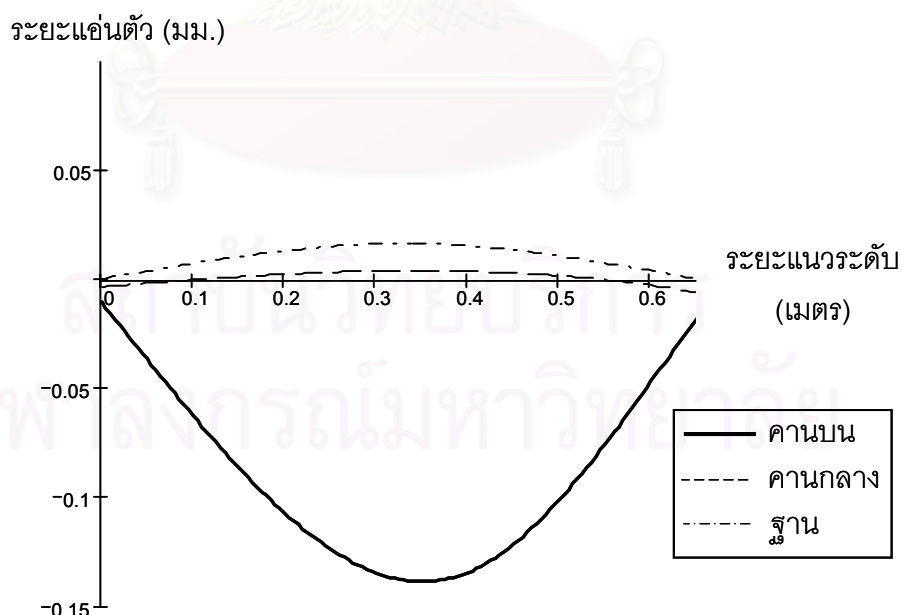
4.5.3 ผลเฉลยของปัญหา

วิธีหาผลเฉลยที่ใช้คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รายละเอียดของการคำนวณหาระยะเคลื่อนตัวที่จุดต่อแสดงอยู่ในภาคผนวก ข เมื่อนำระยะเคลื่อนตัวที่จุดต่อมาคำนวณหาระยะเคลื่อนตัวที่จุดใด ๆ ในเอลิเมนต์โดยใช้ฟังก์ชันประมาณค่าภายใน (interpolation function) จะได้เส้นโค้งการแอ่นตัว (deflection curve) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.18

จากรูปที่ 4.18 จะได้ระยะแอ่นตัวสูงสุดของคานบน คานกลาง และฐาน เท่ากับ -0.139 มม. 0.01 มม. และ 0.016 มม. ตามลำดับ เมื่อหารค่าเหล่านี้ด้วยความกว้างของเครื่องทดสอบ (650 มม.) จะได้ ค่าคงที่ C เท่ากับ 2.14×10^{-4} , 1.54×10^{-5} และ 2.46×10^{-5} ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ความแข็งแรงสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง ในสมการที่ (2.18) ที่กำหนดให้ $C = 1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$ สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างของเครื่องทดสอบผ่านเกณฑ์ความแข็งแรงที่ตั้งไว้

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของแต่ละเอลิเมนต์ของโครงเครื่องทดสอบ

เอลิ- เมนต์	จุด ต่อ	ลักษณะ หน้าตัด	มิติ (mm)	ความยาว (m)	โมเมนต์ ความเฉื่อย (m ⁴)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	ยังก์โมดูลัส (GPa)
1	1 2	○	∅=38.1	0.450	1.30×10^{-7}	1.14×10^{-3}	180
2	2 3	○	∅=38.1	0.435	1.30×10^{-7}	1.14×10^{-3}	180
3	3 4	○	∅=38.1	0.435	1.30×10^{-7}	1.14×10^{-3}	180
4	4 5	□	45×60	0.400	8.10×10^{-7}	2.70×10^{-3}	200
5	5 6	□	45×60	0.250	8.10×10^{-7}	2.70×10^{-3}	200
6	6 7	○	∅=38.1	0.870	1.30×10^{-7}	1.14×10^{-3}	180
7	7 8	○	∅=38.1	0.450	1.30×10^{-7}	1.14×10^{-3}	180
8	8 9	□	80×100	0.310	6.67×10^{-6}	8.00×10^{-3}	200
9	1 9	□	80×100	0.340	6.67×10^{-6}	8.00×10^{-3}	200
10	2 7	□	20×60	0.650	3.60×10^{-7}	1.20×10^{-3}	200



รูปที่ 4.18 ระยะแฉับตัวของ คานบน คานกลาง และฐาน

4.6 คานทอดแรง และ knife edge

4.6.1 คานทอดแรง

คานทอดแรง (lever arm) ที่ออกแบบมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 4.19 จากรูป คานทอดแรงประกอบด้วยสลักทั้งหมด 3 อัน จุดแรกจากซ้ายมือสำหรับรองรับชุดให้ภาวะขึ้นงานทดสอบ จุดที่สองสำหรับรองรับคานทอดแรง และจุดที่สามสำหรับรองรับชุดน้ำหนักถ่วง สลักทั้งหมดออกแบบให้มีลักษณะเป็นขอบมีด (knife edge) ในส่วนที่ต้องรองรับกับชิ้นส่วนอื่น ทั้งนี้เพื่อลดแรงเสียดทานที่จุดหมุน นอกจากนี้จุดรองรับทั้งหมดอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันเพื่อให้อัตราทดของคานทอดแรงคงที่ แม้ว่าจะเอียงทำมุมกับแนวระดับ

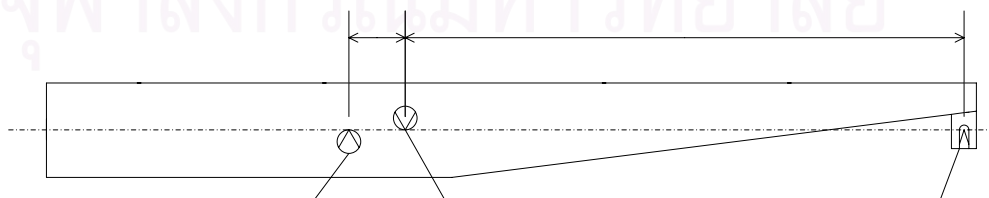
คานทอดแรงประกอบด้วยชิ้นส่วนหลัก ๆ คือ แผ่นประกบข้าง (ซ้าย-ขวา) 2 แผ่น (แบบรายละเอียดหมายเลข 017 ในภาคผนวก ก) และตัวตั้งระยะ (spacer) 4 ตัว (แบบรายละเอียดหมายเลข 01ค, 019, 020 และ 024 ในภาคผนวก ก) ตัวตั้งระยะนี้ยังทำหน้าที่เป็นน้ำหนักถ่วงให้จุดศูนย์ถ่วงของคานทอดแรงที่ประกอบชุดให้ภาวะขึ้นงานทดสอบ และชุดถ่วงน้ำหนักแล้ว อยู่ที่ knife edge ต่อกกลาง

ในการออกแบบ กำหนดอัตราทดของคาน เท่ากับ 10 เท่า และกำหนดระยะระหว่างจุดรองรับชุดให้ภาวะกับจุดรองรับคานทอดแรง l_2 ดังนี้

$$l_2 = 60 \text{ มม.} \quad (4.73)$$

ดังนั้น

$$l_1 = 600 \text{ มม.} \quad (4.74)$$

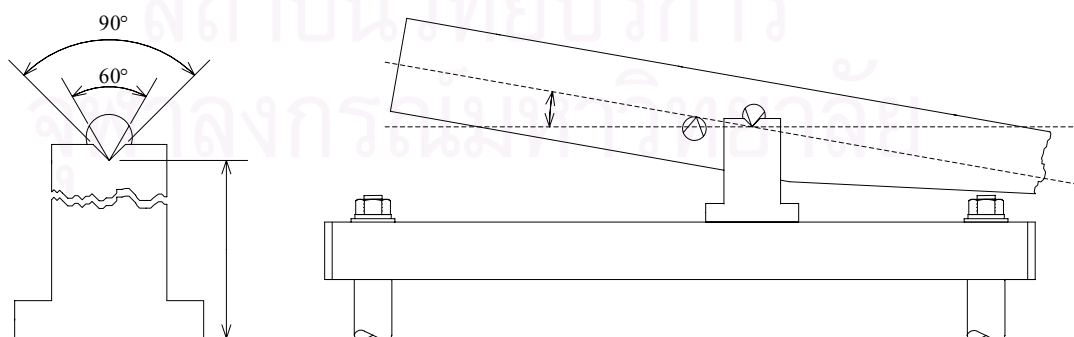


รูปที่ 4.19 คานทอดแรง และ knife edge

เนื่องจากส่วนขวามือของคานทอดแรง (รูปที่ 4.8) มีความยาวมากกว่า ดังนั้นคานจึงต้องมีรูปร่างเรียวเพื่อให้จุดศูนย์กลางของคานอยู่ก่อนมาทางด้านซ้ายมือมากขึ้น นอกจากนี้ความเรียวของคานยังช่วยให้คานเอียงตัวได้มากขึ้น

การตรวจสอบความแข็งแรงของคานทอดแรง เริ่มจากการจำลองปัญหาให้ง่ายขึ้น โดยคิดว่าคานทอดแรงประกอบด้วยแผ่นประกบข้างเท่านั้น และมีจุดรองรับ 2 จุด จุดแรกอยู่ที่ knife edge ชุดให้ภาระ และจุดที่สองอยู่ที่ knife edge ตัวกลาง ภาระที่กระทำต่อคานอยู่ที่ตำแหน่ง knife edge ชุดหน้าหน้าถ่วง โดยมีขนาด 800 นิวตัน (ทึลลง) รายละเอียดของการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ข จากผลการคำนวณพบว่าตำแหน่งที่มีระยะแฉกตัวสูงสุด δ_{max} คือตำแหน่งที่ภาระกระทำ โดยมีขนาดเท่ากับ 0.375 มม. เมื่อหารด้วยระยะจาก knife edge ตัวกลางถึงตำแหน่งที่ภาระกระทำ L (600 มม.) จะได้ $C = \frac{\delta_{max}}{L} = 6.25 \times 10^{-4}$ จากเกณฑ์ที่กำหนดในสมการที่ (2.18) แม้ว่าคานทอดแรงจะมีความแข็งแรงตกอยู่ในช่วงสำหรับชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไป แต่ก็อยู่ค่อนข้างต่ำ ทางช่วงสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง ด้วยเหตุนี้ จึงยอมรับผลการออกแบบ

ความสูงของตัวรองรับคานทอดแรง (รูปที่ 4.20 ก) กำหนดจากมุมเอียงที่ยอมให้คานทอดแรงหมุนจากแนวระดับ ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 10 องศาตามมาตรฐาน ASTM (18) โดยใช้มิติของคานทอดแรงที่ทราบจะสามารถประมาณเส้นทางการเคลื่อนที่ของขอบด้านล่างของคานทอดแรงว่าชนกับผิวบนของคานบนเมื่อคานทอดแรงเอียงทำมุมกับแนวระดับกี่องศา โดยวิธีกราฟิก (รูปที่ 4.20 ข) จะได้ตำแหน่งจุดรองรับอยู่สูงจากผิวบนของคานบนเท่ากับ 100 มม. (รายละเอียดของชิ้นส่วนแสดงอยู่ในแบบรายละเอียด หมายเลข 016 ในภาคผนวก ก) มุมยอดของร่องรูปตัววีกำหนดให้เท่ากับ 90 องศา



(ก) ตัวรองรับ knife edge ตัวกลาง

(ข) การเอียงตัวของคานทอดแรง

รูปที่ 4.20 คานทอดแรง

4.6.2 knife edge ตั๊กกลาง

โหมดความเสียหายของ knife edge ตั๊กกลางพิจารณาประกอบด้วย 1) เสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน 2) เสียหายเนื่องจากโมเมนต์ดัด และ 3) ความแข็งแกร่งการตัดไม่เพียงพอ

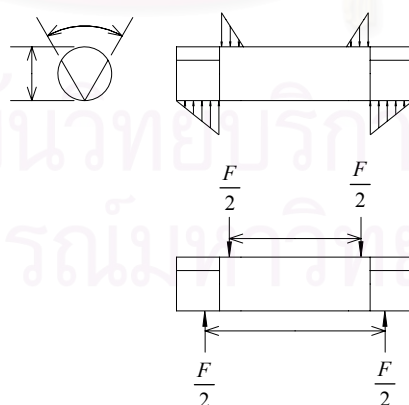
วัสดุที่ใช้ทำสลัก คือ เหล็กกล้า AISI 4340 ภาวะที่กระทำกับสลัก knife edge ตั๊กกลาง แสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 (รายละเอียดของสลัก knife edge ตั๊กกลาง แสดงอยู่ในแบบรายละเอียดหมายเลข 021 ในภาคผนวก ก) ในที่นี้จะจำลองปัญหาให้ง่ายขึ้นโดยกำหนดให้หน้าตัดของสลักเป็นรูปสามเหลี่ยมฐานโค้งตลอดความยาวสลัก สำหรับการประมาณนี้จะได้

พื้นที่หน้าตัดของสลัก knife edge ตั๊กกลาง คือ

$$A_{knife} = 275.5 \text{ มม}^2 \quad (4.75)$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ คือ

$$I_{knife} = 7885.98 \text{ มม}^4 \quad (4.76)$$



รูปที่ 4.21 ภาวะที่กระทำกับสลัก knife edge ตั๊กกลาง

พิจารณาโหมดความเสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน ความเค้นเฉือนสูงสุด คือ

$$\tau_{knife,max} = \frac{F/2}{A_{knife}} \quad (4.77)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.69) และ (4.75) ลงในสมการที่ (4.77) จะได้

$$\tau_{knife,max} = 15.97 \text{ MPa}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่ยอมรับได้ (สมการที่ (4.53)) พบว่ามีค่าน้อยกว่า ดังนั้น สลักจึงไม่เสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน

พิจารณาโหมดความเสียหายเนื่องจากความเค้นดัด จากรูปที่ 4.21 จะได้โมเมนต์ดัดสูงสุด M_{max} (ซึ่งคงที่ตลอดความยาว l) คือ

$$M_{max} = \frac{F}{2} \left(\frac{L-l}{2} \right) \quad (4.78)$$

จากแบบรายละเอียดหมายเลข 021 ในภาคผนวก ก และรูปที่ 4.21 จะได้ ระยะระหว่างภาระที่กระทำ และระหว่างแรงปฏิกิริยา คือ $L = 83.33$ มม. และ $l = 56$ มม.

แทนค่า L , l และสมการที่ (4.69) ลงในสมการที่ (4.78) จะได้

$$M_{max} = 30.06 \text{ N}\cdot\text{m}$$

ความเค้นดัดสูงสุดเนื่องจากโมเมนต์ดัดจะเกิดขึ้นที่ด้านขอบมีด โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_{bending,max} = \frac{M_{max}c}{I_{knife}} \quad (4.79)$$

โดย c คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบมีด ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 14.72 มม.

แทนค่า c , M_{max} และสมการที่ (4.76) ลงในสมการที่ (4.79) จะได้

$$\sigma_{bending,max} = 56.10 \text{ MPa}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่ยอมรับได้ (สมการที่ (4.52)) พบว่ามีค่าน้อยกว่า ดังนั้น สลักจึงไม่เสียหายเนื่องจากความเค้นดัด

พิจารณาความแข็งเกร็งการดัด ตำแหน่งที่สลัก knife edge แอ่นตัวมากที่สุดอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ โดยการจำลองให้ภาระที่กระทำเป็นภาระกระทำที่จุด (point load) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะได้ระยะแอ่นตัวสูงสุด δ_{max} คือ (14)

$$\delta_{max} = \frac{F/2}{24EI_{knife}} \left(\frac{L-l}{2} \right) \left[3L^2 - 4 \left(\frac{L-l}{2} \right)^2 \right] \quad (4.80)$$

แทนค่า $E = 200$ GPa, L, l สมการที่ (4.69) และ (4.76) ลงในสมการที่ (4.80) จะได้

$$\delta_{max} = 3.19 \times 10^{-2} \text{ มม.}$$

นอร์มัลไลซ์ด้วยระยะระหว่างจุดรองรับ L จะได้ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ภายในเกณฑ์ของชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง ดังนั้นยอมรับได้

4.6.3 knife edge ชุดให้ภาระ

โหมดความเสียหายของสลัก knife edge ชุดให้ภาระ ที่พิจารณาประกอบด้วย 1) เสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน 2) เสียหายเนื่องจากโมเมนต์ดัด และ 3) ความแข็งเกร็งการดัดไม่เพียงพอ

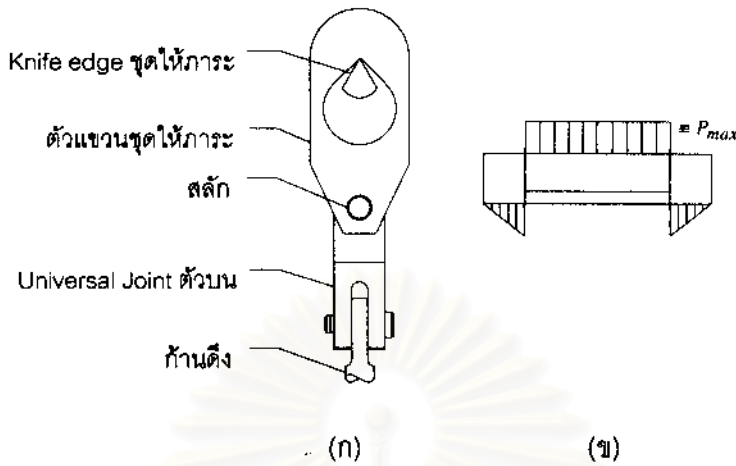
วัสดุที่ใช้ทำสลัก คือ เหล็กกล้า AISI 4340 ภาระที่กระทำกับสลัก knife edge ชุดให้ภาระ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.22 (รายละเอียดของสลัก knife edge ชุดให้ภาระ แสดงอยู่ในแบบรายละเอียดหมายเลข 014 ในภาคผนวก ก) จากแบบจะได้ พื้นที่หน้าตัดของสลัก และโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ เท่ากับของสลัก knife edge ตัวกลาง (สมการที่ (4.75) และ (4.76)) พิจารณาโหมดความเสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน ความเค้นเฉือนสูงสุด คือ

$$\tau_{knife,max} = \frac{P_{max}}{2A_{knife}} \quad (4.81)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.5) และ (4.75) ลงในสมการที่ (4.81) จะได้

$$\tau_{knife,max} = 14.52 \text{ MPa}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่ยอมรับได้ (สมการที่ (4.53)) พบว่ามีค่าน้อยกว่า ดังนั้น สลักจึงไม่เสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน



รูปที่ 4.22 ก) การประกอบกันระหว่างขุดให้ภาวะชิ้นงานทดสอบ และสลัก knife edge ขุดให้ภาวะ
ข) ภาวะที่กระทำกับสลัก knife edge ขุดให้ภาวะ

พิจารณาโหมดความเสียหายเนื่องจากความเค้นดัด จากรูปที่ 4.22 จะได้โมเมนต์ดัดสูงสุด M_{max} คือ

$$M_{max} = 80.5 \text{ N-m} \quad (4.82)$$

สำหรับสลัก knife edge ของขุดให้ภาวะ ความเค้นดัดสูงสุดเนื่องจากโมเมนต์ดัดจะเกิดขึ้นที่ด้านร่องลิ้ม (ด้านที่เป็นผิวโค้ง) ในที่นี้จะประมาณให้จุดปลายของร่องลิ้มเป็นจุดที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด (เป็นการประมาณด้านปลอดภัย (conservative)) ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณความเค้น คือ

$$\sigma_{bending,max} = K_t \frac{M_{max}c}{I_{knife}} \quad (4.83)$$

โดย c คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงผิวโค้ง ในที่นี้มีค่าเท่ากับ $24 - 14.72 = 9.28$ มม.

K_t คือ ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น (stress concentration factor) ที่ปลายร่องลิ้ม ภายใต้ภาวะดัด

สำหรับสลัก knife edge ขุดให้ภาวะ อัตราส่วนระหว่างความกว้างของร่องลิ้มกับเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา คือ $6/24 = 0.25$ และอัตราส่วนระหว่างความลึกของร่องลิ้มกับเส้นผ่าน

ศูนย์กลางเพลลา คือ $3/24 = 0.125$ หากกำหนดให้รัศมีฟิลเลตที่ฐานร่องลิ่มเท่ากับ 0.2 มม แล้ว
จะได้ $K_t = 2.9$ (29) แทนค่า c , M_{max} , K_t และสมการที่ (4.76) ลงในสมการที่ (4.83) จะได้

$$\sigma_{bending,max} = 274.72 \text{ MPa}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่ยอมรับได้ (สมการที่ (4.52)) พบว่ามีค่าน้อยกว่า ดังนั้น สลักจึงไม่
เสียหายเนื่องจากการดัด

พิจารณาความแข็งแรงการดัด จากรูปที่ 4.22 เราสามารถจำลองปัญหาให้ง่ายขึ้น
โดยกำหนดให้ภาระกระจายสม่ำเสมอกระทำตลอดระยะระหว่างจุดรองรับ (เป็นการประมาณด้าน
ปลอดภัย) และความแข็งแรงดัดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{\delta_{max}}{L} = \frac{5P_{max}L^2}{384EI_{knife}} \quad (4.84)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.5), (4.76) แทนค่า $E = 200 \text{ GPa}$ และ $L = 50 \text{ มม}$. ลงในสมการที่ (4.84) จะ
ได้

$$\frac{\delta_{max}}{L} = 1.65 \times 10^{-4}$$

ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ภายในเกณฑ์ของชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง ดังนั้นยอมรับได้

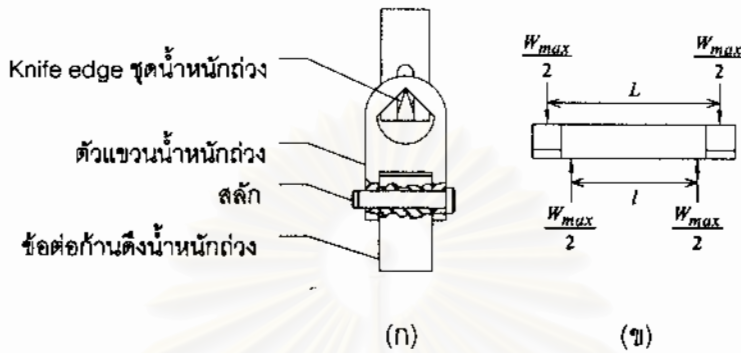
4.6.4 Knife edge ชุดน้ำหนักถ่วง

โหมดความเสียหายของ knife edge ชุดน้ำหนักถ่วงที่พิจารณาประกอบด้วย 1)
เสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน 2) เสียหายเนื่องจากโมเมนต์ดัด และ 3) ความแข็งแรงการดัดไม่
เพียงพอ

วัสดุที่ใช้ทำสลัก คือ เหล็กกล้า AISI 4340 ภาระที่กระทำกับ knife edge ชุด
น้ำหนักถ่วง แสดงอยู่ในรูปที่ 4.23 (รายละเอียดแสดงอยู่ในแบบรายละเอียดหมายเลข 023 ใน
ภาคผนวก ก) จากแบบจะได้ พื้นที่หน้าตัดของสลัก และโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ ดังนี้

$$A_{knife} = 200 \text{ มม}^2 \quad (4.85)$$

$$I_{knife} = 6666.67 \text{ มม}^4 \quad (4.86)$$



รูปที่ 4.23 ก) การประกอบกันระหว่างขุดน้ำหนักถ่วงและ knife edge ขุดน้ำหนักถ่วง
ข) ภาวะที่กระทำกับสลัก knife edge ขุดน้ำหนักถ่วง

แรงที่กระทำต่อขุดถ่วงน้ำหนักจะมีขนาดสูงสุด ณ ขนาดภาระทดสอบสูงสุด P_{max} เท่ากับ 8,000 นิวตัน (สมการที่ (4.5)) เนื่องจากอัตราทดของคานทอดแรงคือ 10 เท่า ดังนั้นภาระสูงสุดที่กระทำต่อขุดถ่วงน้ำหนัก W_{max} คือ

$$W_{max} = 800 \text{ นิวตัน} \quad (4.87)$$

พิจารณาโหมดความเสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน ความเค้นเฉือนสูงสุด คือ

$$\tau_{knife,max} = \frac{W_{max}}{2A_{knife}} \quad (4.88)$$

แทนค่าในสมการที่ (4.85) และ (4.87) ลงในสมการที่ (4.88) จะได้

$$\tau_{knife,max} = 2 \text{ MPa}$$

พิจารณาโหมดความเสียหายเนื่องจากความเค้นดัด จากรูปที่ 4.23 จะได้โมเมนต์ดัดสูงสุด M_{max} (ซึ่งคงที่ตลอดความยาว l) คือ

$$M_{max} = \frac{W_{max}}{2} \left(\frac{L-l}{2} \right) \quad (4.89)$$

จากแบบรายละเอียดหมายเลข 023 ในภาคผนวก ก และรูปที่ 4.20 จะได้ ระยะระหว่างภาชนะที่กระทำ และระหว่างแรงปฏิกิริยา คือ $L = 58.33$ มม. และ $l = 20$ มม.

แทนค่า L, l และสมการที่ (4.69) ลงในสมการที่ (4.78) จะได้

$$M_{max} = 7.67 \text{ N}\cdot\text{m}$$

ความเค้นดึงสูงสุดเนื่องจากโมเมนต์ดัดจะเกิดขึ้นที่ผิวล่างของ knife edge โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_{bending,max} = \frac{M_{max}c}{I_{knife}} \quad (4.90)$$

โดย c คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงผิวล่าง ในที่นี้มีค่าเท่ากับ 10 มม.

แทนค่า c, M_{max} และสมการที่ (4.86) ลงในสมการที่ (4.90) จะได้

$$\sigma_{bending,max} = 11.5 \text{ MPa}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับความเค้นที่ยอมรับได้ (สมการที่ (4.52)) พบว่ามีค่าน้อยกว่า ดังนั้น knife edge จึงไม่เสียหายเนื่องจากความเค้นดัด

พิจารณาความแข็งเกร็งการดัด ตำแหน่งที่ Knife edge แอนตัวมากที่สุดอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ สำหรับภาชนะที่กระทำเป็นภาชนะกระทำที่จุด (point load) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 เมื่อแทนค่า $L = 58.33$ มม. และ $l = 20$ มม., $E = 200$ GPa และ สมการที่ (4.86) ลงในสมการที่ (4.80) จะได้ระยะแอนตัวสูงสุด คือ

$$\delta_{max} = 2.09 \times 10^{-3} \text{ มม.} \quad (4.80)$$

นอร์มัลไลซ์ด้วยระยะระหว่างจุดรองรับ จะได้

$$\frac{\delta_{max}}{L} = 3.58 \times 10^{-5}$$

ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ภายในเกณฑ์ของชิ้นส่วนที่ต้องการความเที่ยงตรงปานกลาง ดังนั้นยอมรับได้

4.7 ชุดน้ำหนัถ่วง

4.7.1 ภาพรวม

ลักษณะการประกอบชิ้นส่วนของชุดน้ำหนัถ่วง แสดงอยู่ในรูปที่ 4.24 จากรูปชิ้นส่วนในชุดน้ำหนัถ่วงประกอบด้วย

- 1) ข้อต่อก้านดึงน้ำหนัถ่วง
- 2) โซ่
- 3) ก้านน้ำหนัถ่วง
- 4) ตัวรองน้ำหนัถ่วง



รูปที่ 4.24 ชุดน้ำหนัถ่วง

4.7.2 น้ำหนักถ่วง

จากหัวข้อการกำหนดภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 7665 นิวตัน และกำหนดอัตราทดของคานทอดแรงเท่ากับ 10 ดังนั้นขนาดของน้ำหนักถ่วง W จะหาได้จาก

$$W = \frac{7665}{10 \times 9.81} = 78.13 \approx 80 \text{ กิโลกรัม}$$

ตุ้มน้ำหนักถ่วง(ที่มี)ประกอบด้วยตุ้มน้ำหนักถ่วงหลายขนาดด้วยกัน และตามข้อกำหนดของ ASTM ต้องทำการสอบเทียบก่อนใช้ในการทดสอบ รายละเอียดและผลการสอบเทียบแสดงในภาคผนวก ง

4.7.3 โซ่และก้านน้ำหนักถ่วง

จากหัวข้อ 4.7.1 ขนาดของภาระที่กระทำต่อชุดก้านดึงน้ำหนักถ่วง

$$W = 766.5 \text{ นิวตัน}$$

เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านน้ำหนักถ่วง d_{weight} และโซ่ d_{chain} เท่ากับ 8 และ 4 มม. ตามลำดับ (จากขนาดมาตรฐาน) วัสดุที่ใช้คือ เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ค่าความเค้นที่ยอมรับได้คือ

$$\sigma_{allow,304,RT} = 241.67 \text{ MPa}$$

ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นคือ

$$\sigma = \frac{W}{\pi \frac{d^2}{4}}$$

$$\sigma_{weight} = 15.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{chain} = 61 \text{ MPa}$$

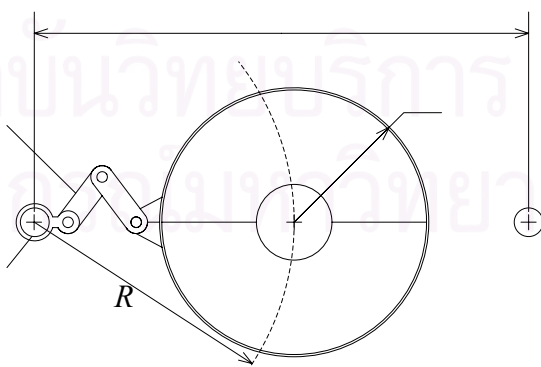
ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นน้อยกว่าความเค้นที่ยอมรับได้ดังนั้นชิ้นส่วนจึงไม่เสียหายเนื่องจากความเค้น

4.8 กลไกการจับยึดและปรับตำแหน่งเตา

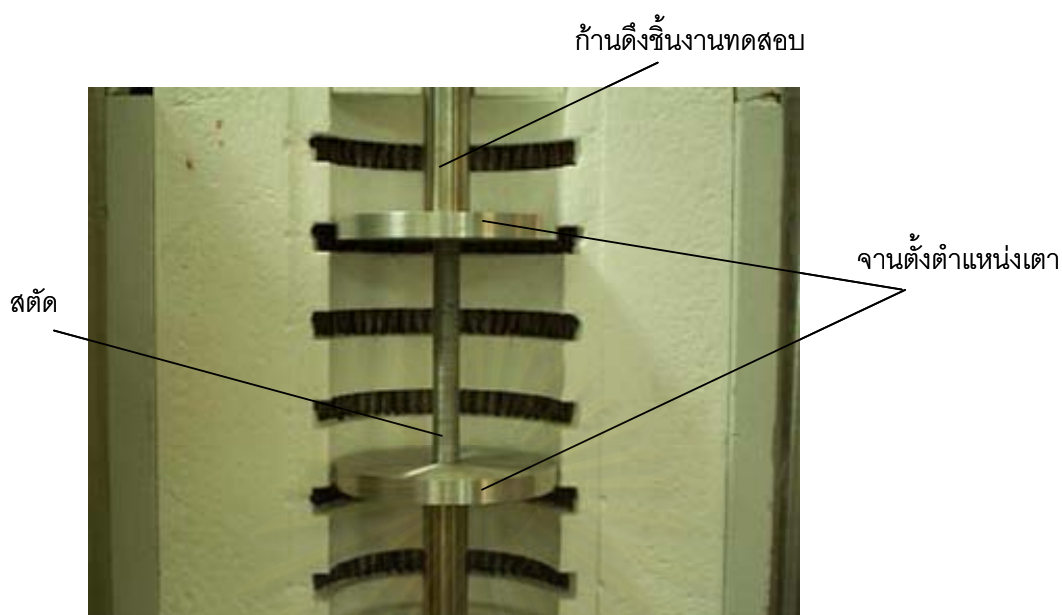
กลไกจับยึดเตาและปรับตำแหน่งเตา มีความจำเป็นเนื่องจากความผิดพลาดในการผลิต และประกอบชิ้นส่วนอาจทำให้ชิ้นงานทดสอบไม่อยู่ ณ ตำแหน่งที่ออกแบบ ดังนั้นเตาต้องปรับตำแหน่งโดยให้แนวศูนย์กลางของเตาอยู่ร่วมกับแนวแกนของชิ้นงานทดสอบได้ ทั้งนี้ก็เพื่อให้การกระจายอุณหภูมิตามแนวเส้นรอบวงของชิ้นงานทดสอบสม่ำเสมอ กลไกการปรับที่ออกแบบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.25 ตำแหน่งเตาสามารถเปลี่ยนได้ด้วยการปรับระยะ R และหมุนเตารอบจุดหมุนที่อยู่ถัดจากเสาโครงเครื่องทดสอบ ชุดกลไกสามารถปรับตำแหน่งตามแนวตั้งได้ ทั้งนี้เพื่อให้ตำแหน่งภายในเตาที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอครอบคลุมความยาวเกจของชิ้นงานทดสอบ

ระยะระหว่างจุดหมุนของแขนยึดเตา (mounting bracket) แต่ละชิ้น กำหนดให้เท่ากับ 76 มม. เมื่อนำมาประกอบกันจะสามารถปรับระยะ R ได้ในช่วง 300-420 มม. ซึ่งเพียงพอสำหรับการปรับตำแหน่งศูนย์กลางของเตา (ระยะ R ตามแบบ เท่ากับ 340 มม.)

วิธีปรับตำแหน่งศูนย์กลางของเตาให้ร่วมศูนย์กลางกับชิ้นงานทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.26 จากรูปมีสตัดเกลียวตลอดติดตั้งในตำแหน่งชิ้นงานทดสอบ บนลำตัวของสตัดติดตั้งจานกลมจำนวน 2 แผ่น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตา ในที่นี้จะถือว่าเตาร่วมศูนย์กลางกับชิ้นงานทดสอบเมื่อผนังด้านในของเตาแนบกับจานทั้งสองพอดี



รูปที่ 4.25 กลไกจับยึดเตา



รูปที่ 4.26 วิธีตั้งศูนย์เตา

4.9 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

ชุดควบคุมอุณหภูมิที่ออกแบบมีไดอะแกรมของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ชุดควบคุมมีแหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด ชุดแรกขนาด 110 โวลต์ จ่ายให้กับเตาความร้อน⁶ ชุดที่สอง 220 โวลต์ จ่ายให้กับตัวควบคุมอุณหภูมิ⁷ นอกจากนี้เพื่อลดสัญญาณรบกวนและไฟกระชาก จึงติด line filter ก่อนจ่ายกระแสเข้าตัวควบคุมอุณหภูมิ ตัวควบคุมจะรับสัญญาณอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ตัวควบคุมจะส่งสัญญาณขาออกเป็นแรงดันไฟฟ้าให้กับโซลิดสเตทรีเลย์ (solid state relay)⁸ เพื่อตัดต่อวงจรเตา กระแสที่ไหลในวงจรเตาจะถูกวัดและแสดงผลด้วยดิจิตัลแอมมิเตอร์⁹ แต่เนื่องจาก

⁶ ชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปที่เลือกมีรูปร่างเป็นครึ่งทรงกระบอก ทำความร้อนโดยใช้ขดลวดความต้านทาน จากคู่มือสินค้าชุดให้ความร้อนแต่ละซีกกินกำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ และทนแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมได้ 57.5 โวลต์ เมื่อต่ออนุกรมจะทนแรงดันได้ 115 โวลต์ ในที่นี้เลือกแหล่งจ่ายไฟขนาด 110 โวลต์ ดังนั้นกระแสผ่านขดลวดเตาคือ I คือ 11.8 แอมแปร์ ทำให้การเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้ากำหนดไว้ว่าต้องทนกระแสได้อย่างน้อย 15 แอมแปร์

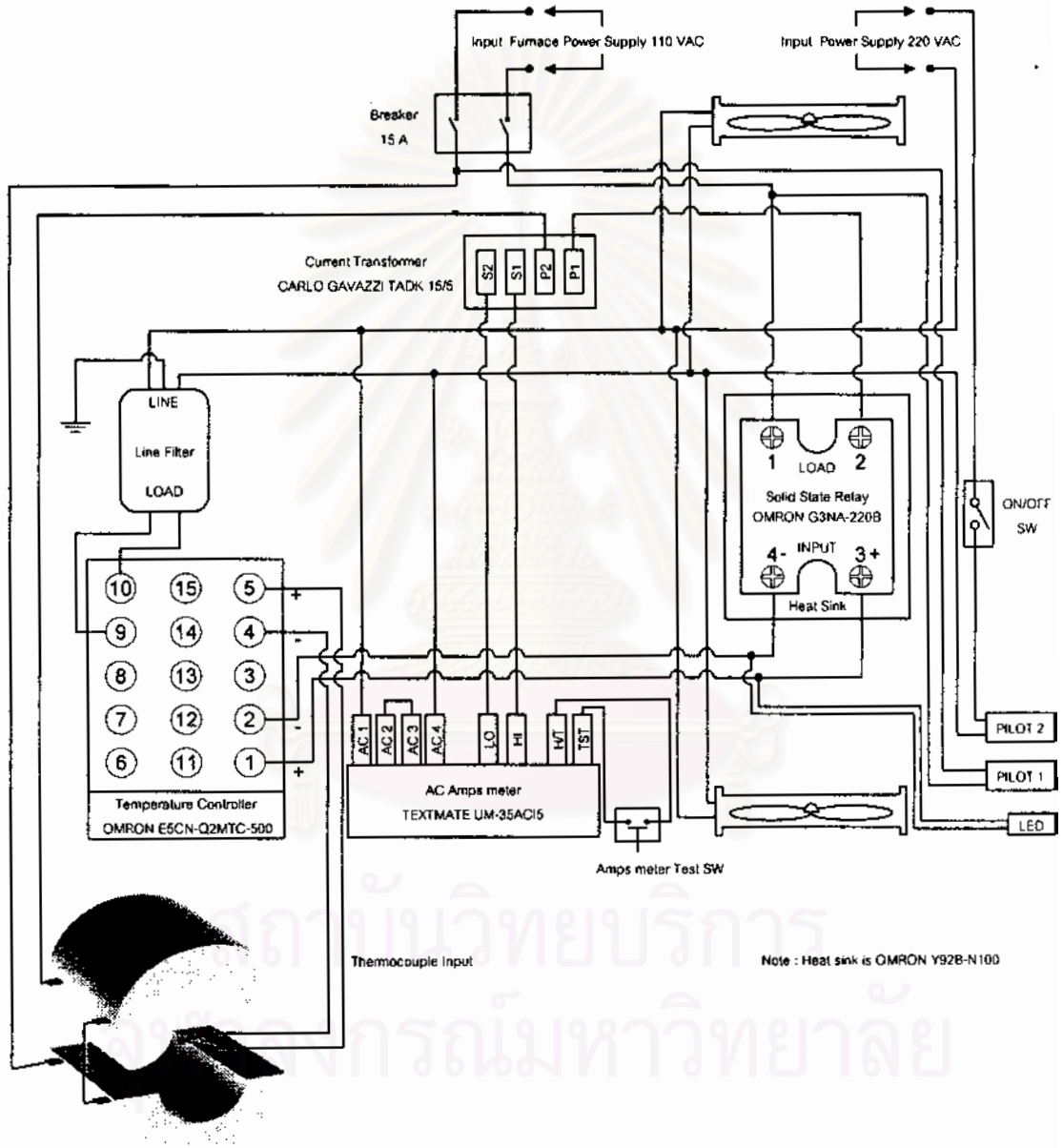
⁷ ยี่ห้อ OMRON รุ่น E5CN-Q2MTC-500 สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง $-200^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$ (สำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K) โดยมีความแม่นยำ $\pm 1^{\circ}\text{C}$

⁸ ยี่ห้อ Omron รุ่น G2NA-220B ติดแผงระบายความร้อนยี่ห้อ Omron รุ่น Y92B-N10 เพื่อให้โซลิดสเตทรีเลย์รับกระแสสูงสุดได้ 20 แอมแปร์ (หากไม่ติดแผงระบายความร้อนจะรับกระแสได้เพียง 5 แอมแปร์)

⁹ ยี่ห้อ TEXMATE รุ่น UM-35ACI5

แอมมิเตอร์รับกระแสได้สูงสุด 5 แอมแปร์ จึงต้องติดตั้งหม้อแปลงกระแส (current transformer)

¹⁰ ที่วงจรถูกตัดจากนั้นจึงต่อสัญญาณขาออกจากหม้อแปลงกระแสเข้าแอมมิเตอร์ ไฟสัญญาณต่าง ๆ ได้แก่ PILOT 1 (สีแดง) แสดงสถานะทำงานของเตาความร้อน PILOT 2 (สีเหลือง) แสดงสถานะทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิและ LED (สีฟ้า) แสดงสถานะทำงานของโซลิตสเททรีเลย์ ภายใน



รูปที่ 4.27 ไดอะแกรมของชุดควบคุมอุณหภูมิ

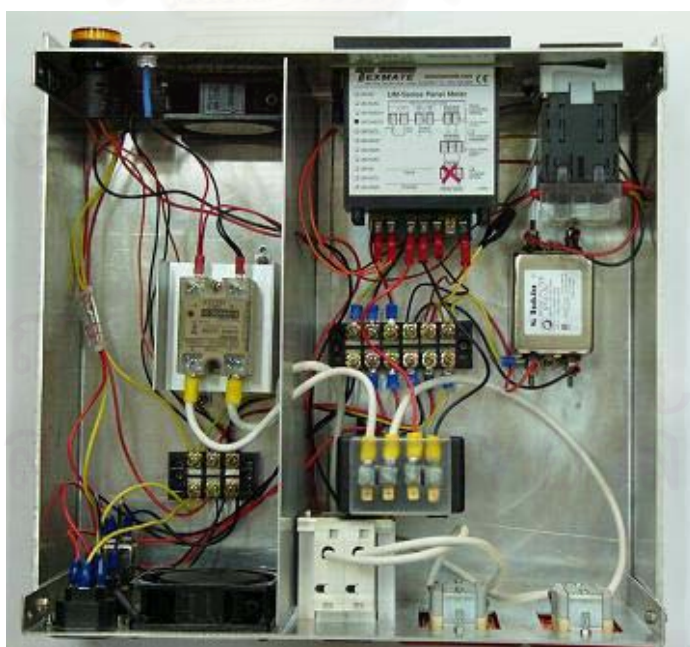
¹⁰ CT 15/5 class 1

ชุดควบคุมจะมีพัดลม 2 ตัว เพื่อระบายความร้อนของโซลิตสเตททรีไลย์ ชุดควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งอุปกรณ์ และต่อวงจรเสร็จเรียบร้อยแล้ว แสดงอยู่ในรูปที่ 4.27

4.10 การเขียนแบบใช้งาน

จากผลการออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยวที่กล่าวไปแล้ว ในหัวข้อที่ 4.1 ถึง 4.7 มิติของชิ้นส่วนจะถูกนำไปใช้เขียนแบบรายละเอียด (detail drawings) และแบบประกอบ (assembly drawings) ในขั้นตอนการเขียนแบบนี้ อาจมีการปรับแก้รูปร่างของชิ้นส่วนบ้าง เพื่อ 1) เพิ่มความเที่ยงตรงในการประกอบ 2) อำนวยความสะดวกในการประกอบ และ 3) อำนวยความสะดวกในการผลิต แบบใช้งานของเครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยวถูกรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก

หลังจากปรับแก้รูปร่างชิ้นส่วน และตรวจสอบว่าไม่มีปัญหาใด ๆ ในการประกอบแล้ว ขั้นตอนถัดไป คือการเลือกความคลาดเคลื่อนยินยอม (tolerance) ด้านมิติ (dimension) และด้านเรขาคณิต (geometric) และการเลือกคุณภาพผิวสำเร็จ (finished surface) โดยรายละเอียดของการระบุสิ่งเหล่านี้จะกล่าวถึงในหัวข้อย่อยต่อไป



รูปที่ 4.27 การติดตั้งอุปกรณ์ภายในชุดควบคุมอุณหภูมิ

4.10.1 ความคลาดเคลื่อนยินยอมเชิงมิติ

ความคลาดเคลื่อนยินยอมเชิงมิติ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ 1) ความคลาดเคลื่อนยินยอมทั่วไป และ 2) ความคลาดเคลื่อนยินยอมเฉพาะที่

สำหรับความคลาดเคลื่อนยินยอมทั่วไป กำหนดไว้ที่ ± 0.2 มม. ส่วนความคลาดเคลื่อนยินยอมเฉพาะที่ กำหนดโดยใช้หลักการต่อไปนี้

1) ชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ และต้องถอดประกอบ เลือกใช้ระดับชั้นความพอดี (class of fit) เป็น sliding fit (H7g6) เพราะให้ความเที่ยงตรงของการประกอบ และอำนวยความสะดวกในการถอด-ใส่ ตัวอย่างงานสวมประเภทนี้ ได้แก่ การสอดสลัก เป็นต้น

2) ชิ้นส่วนที่ต้องยึดแน่นกับชิ้นส่วนอื่น และไม่ต้องถอดออก เลือกใช้ Locational transition fit (H7k6) ตัวอย่างงานสวมประเภทนี้ ได้แก่ การตอกลิ้ม เป็นต้น

ตารางที่ 4.2 - 4.5 แสดงความคลาดเคลื่อนยินยอมเชิงมิติของ ชิ้นส่วนในเครื่องทดสอบ ชิ้นส่วนในชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ ชิ้นส่วนในคานทดสอบ และชิ้นส่วนในกลไกปรับตำแหน่งเตา ตามลำดับ คอลัมน์ที่สองของตารางจะแสดงชื่อของชิ้นส่วนหรือตำแหน่งที่ชิ้นส่วนประกอบกัน รายละเอียดของชิ้นส่วนดูได้จากแบบรายละเอียดตามหมายเลขที่ระบุในคอลัมน์ที่ 3 คอลัมน์ที่ 4 แสดงระดับชั้นความพอดีในการประกอบ คอลัมน์ที่ 5 และ 6 แสดงมิติระบุ (normal size) และขอบเขตของมิติ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ความคลาดเคลื่อนยินยอมของชิ้นส่วนในเครื่องทดสอบ

ลำดับ	ชื่อชิ้นส่วน หรือ ตำแหน่งประกอบ	หมายเลข แบบ ⁽ⁿ⁾	ระดับชั้น ความพอดี	มิติระบุ (มม.)	ขอบเขต
1	เส้า	011	Sliding fit (H7/g6)	Ø 36	-0.009 / -0.025
	รูพื้นฐาน	010		Ø 36	+0.025 / +0.000
2	เส้า	011	-	Ø 36	-0.009 / -0.025
	รูที่คานบน	013		Ø 36	+0.20 / +0.10

ตารางที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับของชิ้นส่วนในชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ

ลำดับ	ชื่อชิ้นส่วน หรือตำแหน่งประกอบ	หมายเลขแบบ ⁽ⁿ⁾	ระดับชั้นความพอดี	มิติระบุ (มม.)	ขอบเขต
1	ก้านของอุปกรณ์ปรับระยะ	-	-	19.05	-
	ข้อต่อ universal ตัวล่าง	035		19.05	+0.02 / +0.01
2	สลัก	037	Sliding fit (H7/g6)	Ø 10	-0.005 / -0.014
	รูที่ก้านของอุปกรณ์ปรับระยะ	-		Ø 10	-
	รูที่ข้อต่อ universal ตัวล่าง	035		Ø 10	+0.015 / +0.000
3	ก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนล่าง	032	Sliding fit (H7/g6)	12	-0.006 / -0.017
	ข้อต่อ universal ตัวล่าง	035		12	+0.018 / +0.000
4	สลัก	037	Sliding fit (H7/g6)	Ø 10	-0.005 / -0.014
	รูที่ก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนล่าง	032		Ø 10	+0.015 / +0.000
	รูที่ข้อต่อ universal ตัวล่าง	035		Ø 10	+0.015 / +0.000
5	ก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนบน	031	Sliding fit (H7/g6)	12	-0.006 / -0.017
	ข้อต่อ universal ตัวกลาง	034		12	+0.018 / +0.000
6	สลัก	037	Sliding fit (H7/g6)	Ø 10	-0.005 / -0.014
	รูที่ก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนบน	031		Ø 10	+0.015 / +0.000
	รูที่ข้อต่อ universal ตัวกลาง	034		Ø 10	+0.015 / +0.000
7	ก้านดึง	036	Sliding fit (H7/g6)	12	-0.006 / -0.017
	ข้อต่อ universal ตัวกลาง	034		12	+0.018 / +0.000
8	สลัก	037	Sliding fit (H7/g6)	Ø 10	-0.005 / -0.014
	รูที่ก้านดึง	036		Ø 10	+0.015 / +0.000
	รูที่ข้อต่อ universal ตัวกลาง	034		Ø 10	+0.015 / +0.000
9	ก้านดึง	036	Sliding fit (H7/g6)	12	-0.006 / -0.017
	ข้อต่อ universal ตัวบน	033		12	+0.018 / +0.000
10	สลัก	037	Sliding fit (H7/g6)	Ø 10	-0.005 / -0.014
	รูที่ก้านดึง	036		Ø 10	+0.015 / +0.000
	รูที่ข้อต่อ universal ตัวบน	033		Ø 10	+0.015 / +0.000

⁽ⁿ⁾ ดูแบบภาพประกอบในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.4 ความคลาดเคลื่อนที่ยินยอมของชิ้นส่วนในคานทอดแรง

ลำดับ	ชื่อชิ้นส่วน หรือตำแหน่งประกอบ	หมายเลขแบบ ⁽ⁿ⁾	ระดับชั้นความพอดี	มิติระบุ (มม.)	ขอบเขต
1	knife edge ชุดให้ภาชนะขึ้นงาน	022	Sliding fit (H7/g6)	Ø 24	-0.007 / -0.020
	รูที่คานทอดแรง	017		Ø 24	+0.021 / +0.000
2	ลิ้ม	027	Locational	6	+0.009 / +0.001
	ร่องลิ้มบน knife edge ชุดให้ภาชนะขึ้นงานทดสอบ	022	Transition fit (H7/k6)	6	+0.012 / +0.000
	ร่องลิ้มบนคานทอดแรง	017		6	+0.012 / +0.000
3	knife edge รองรับคานทอดแรง	021	Sliding fit (H7/g6)	Ø 24	-0.007 / -0.020
	รูที่คานทอดแรง	017		Ø 24	+0.021 / +0.000
4	ลิ้ม	027	Locational	6	+0.009 / +0.001
	ร่องลิ้มบน knife edge รองรับคานทอดแรง	021	Transition fit (H7/k6)	6	+0.012 / +0.000
	ร่องลิ้มบนคานทอดแรง	017		6	+0.012 / +0.000

⁽ⁿ⁾ ดูแบบภาพประกอบในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนที่ยินยอมของชิ้นส่วนในกลไกปรับเตา

ลำดับ	ชื่อชิ้นส่วน หรือตำแหน่งประกอบ	หมายเลขแบบ ⁽ⁿ⁾	ระดับชั้นความพอดี	มิติระบุ (มม.)	ขอบเขต
1	เพลลาที่ประกบติดกับเตา	046	Sliding fit (H7/g6)	Ø 14	-0.006 / -0.017
				Ø 20	-0.007 / -0.020
	รูที่หูเตา (แบบที่ 1)	043		Ø 14	+0.018 / +0.000
	รูที่หูเตา (แบบที่ 2)	044		Ø 20	+0.021 / +0.000
2	เพลลาที่ประกบติดกับเสา	047	Sliding fit (H7/g6)	Ø 14	-0.006 / -0.017
	รูบนแท่นรองรับ	048		Ø 14	+0.018 / +0.000
	รูบนแขนหมุน	046		Ø 14	+0.018 / +0.000
3	เพลลาที่อยู่ระหว่างเสากับเตา	047	Sliding fit (H7/g6)	Ø 14	-0.006 / -0.017
				Ø 20	-0.007 / -0.020
	รูบนแขนหมุน	046		Ø 14	+0.018 / +0.000
	รูบนแขนหมุน	046		Ø 14	+0.018 / +0.000

⁽ⁿ⁾ ดูแบบภาพประกอบในภาคผนวก ก

4.10.2 ความคลาดเคลื่อนยินยอมเชิงเรขาคณิต

ความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิตที่ระบุในแบบรายละเอียด มีดังนี้

1. ความตรง (straightness)
2. ความเรียบ (flatness)
3. ความฉาก (perpendicularity)
4. ความขนาน (parallelism)
5. ตำแหน่ง (position)
6. ความร่วมศูนย์ (concentricity)
7. ความสมมาตร (symmetry)

ตัวอย่างชิ้นส่วน (ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นชิ้นส่วนในชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ (รูปที่ 4.4) และเหตุผลในการระบุความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิตชนิดต่าง ๆ จะกล่าวในหัวข้อต่อไป นี้ รายละเอียดของชิ้นส่วนตามหมายเลขที่อ้างอิงสามารถดูได้ในภาคผนวก ก

ก) ชิ้นส่วนมีการควบคุมความตรง

ในกรณีนี้ ได้แก่

- เส้า (แบบหมายเลข 011) เพื่อให้สามารถประกอบคานบนได้
- ก้านนำหนักถ่วง (แบบหมายเลข 041)

ข) ชิ้นส่วนที่มีการควบคุมความเรียบ

ในกรณีนี้ ชิ้นส่วนต้องมีพื้นผิวที่ประกบกับชิ้นงานอื่น โดยในการประกบต้องการทั้งความแนบสนิท และความแม่นยำของตำแหน่ง ชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องควบคุม ได้แก่

- คานบน (แบบหมายเลข 012) ที่ผิวสำหรับติดตั้งตัวรองรับคานทดสอบ (แบบหมายเลข 016)
- ปลายที่สวมกับข้อต่อ universal ของก้านตั้งชิ้นงานทดสอบที่คานบนและที่ด้านล่าง (แบบหมายเลข 031,032) สาเหตุที่ระบุเพื่อให้การแกว่งของก้านตั้งไม่ติดขัดเนื่องจากความไม่เรียบของผิว

- ปลายข้อต่อ universal ตัวบน (แบบหมายเลข 033) และปลายของก้านดิ่ง (แบบหมายเลข 036)

ค) ชิ้นส่วนที่มีการควบคุมความฉาก

โดยทั่วไปแล้วชิ้นส่วนที่มีการควบคุมความฉาก คือ ชิ้นส่วนที่มีรูสำหรับให้ชิ้นงานอื่นสวม ตัวอย่างชิ้นงานเหล่านี้ได้แก่

- ฐาน (แบบหมายเลข 010) แนวศูนย์กลางของรูสำหรับสวมเส้า จะต้องตั้งฉากกับพื้นผิวที่ติดตั้งอุปกรณ์ปรับระยะ เพื่อลดความผิดพลาดเกี่ยวกับตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ติดตั้งที่คานบน

- ตัวรองรับคานทดแรง (แบบหมายเลข 016) แนวของร่องตัววีต้องตั้งฉากกับผิวอ้างอิงเพื่อให้ขอบมีดของสลัก knife edge ตัวกลาง (แบบหมายเลข 021) แนบตลอดความหนาของตัวรองรับ

- ตัวแขวนชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ (แบบหมายเลข 025) รูสำหรับร้อยสลักเพื่อยึดกับปลายของก้านดิ่ง (แบบหมายเลข 036) และร่องตัววี ต้องฉากกับกับผิวอ้างอิงเพื่อรักษาความตรงของชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ

- ก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบท่อนบน และล่าง (แบบหมายเลข 031 และ 032) รูสำหรับร้อยสลักต้องตั้งฉากกับแนวของก้านดิ่งเพื่อรักษาความตรงของชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ

- ข้อต่อ universal ตัวบน, ตัวกลาง และตัวล่าง (แบบหมายเลข 033, 034 และ 035) รูสำหรับร้อยสลักต้องตั้งฉากกับแนวของก้านดิ่งเพื่อรักษาความตรงของชุดให้ภาระชิ้นงานทดสอบ

- หูเตา (แบบหมายเลข 043 และ 044) ฝิวด้านบนและล่างต้องตั้งฉากกับผิวที่ประกบกับตัวเรือนเตา เพื่อให้เตาอยู่ในแนวระดับ

ง) ชิ้นส่วนที่มีการควบคุมความขนาน

ตัวอย่างชิ้นงานเหล่านี้ได้แก่

- ตัวรองรับคานทดแรง (แบบหมายเลข 016) แนวของร่องตัววีต้องขนานกับฐาน เพื่อให้ขอบมีดของสลัก knife edge ตัวกลาง (แบบหมายเลข 021) แนบตลอดความหนาของตัวรองรับ

- สลัก knife edge ตัวกลาง (แบบหมายเลข 021) ขอบมีดต้องขนานกับแนวแกนของลำตัว เพื่อให้คานทดแรงไม่เอียง
- สลัก knife edge ชุดให้ภาวะ (แบบหมายเลข 022) ขอบมีดต้องขนานกับแนวแกนของลำตัว เพื่อรักษาความตรงของชุดให้ภาวะขึ้นงานทดสอบ
- สลัก knife edge ชุดน้ำหนักร่อง (แบบหมายเลข 023) ขอบมีดต้องขนานกับแนวแกนของลำตัว เพื่อรักษาความตรงของชุดน้ำหนักร่อง
- ตัวตั้งระยะตัวหน้า ตัวกลาง ตัวหลัง และตุ้มน้ำหนักปรับสมดุล (แบบหมายเลข 018, 019, 020 และ 024) ผิวที่ถูกระบายด้วยแผ่นข้าง (แบบหมายเลข 017) จะต้องขนานกันเพื่อให้แนบกับผิวของแผ่นข้างได้สนิท และประกอบเป็นคานทดแรงที่มีมิติ รูปร่าง ใกล้เคียงกับที่ออกแบบ

๑) ชิ้นส่วนที่มีการควบคุมตำแหน่ง

ตัวอย่างชิ้นงานเหล่านี้ได้แก่

- ฐาน (แบบหมายเลข 010) ตำแหน่งศูนย์กลางของรูสำหรับสวมเส้า จะต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนดเพื่อให้การประกอบคานบน (แบบหมายเลข 012) เป็นไปอย่างเรียบร้อย
- แผ่นข้าง (แบบหมายเลข 017) ตำแหน่งศูนย์กลางของรูสำหรับสวมสลัก knife edge จะต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด เพื่อให้อัตราทดใกล้เคียงกับที่ออกแบบ
- ก้านตั้งชิ้นงานทดสอบที่อนบน และล่าง (แบบหมายเลข 031 และ 032) และก้านตั้ง (แบบหมายเลข 036) ตำแหน่งศูนย์กลางรูสำหรับร้อยสลักต้องอยู่ตรงกับแนวของแกนก้านตั้งเพื่อไม่ให้เกิดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ
- ข้อต่อ universal ตัวบน, ตัวกลาง และตัวล่าง (แบบหมายเลข 033, 034 และ 035) รูสำหรับร้อยสลักต้องอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางความหนาเพื่อรักษาความตรงของชุดให้ภาวะขึ้นงานทดสอบ (ลดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ)
- หูเตา (แบบหมายเลข 043 และ 044) ศูนย์กลางรูเจาะต้องอยู่ห่างจากผิวที่ประกบกับตัวเรือนเตาในขอบเขตที่กำหนดเพื่อให้การปิดเปิดเตาทำได้ราบรื่น

ฉ) ความร่วมศูนย์ (concentricity)

ตัวอย่างชิ้นงานเหล่านี้ ได้แก่

- สลัก knife edge ตัวกลาง และ (แบบหมายเลข 021) ปลายทั้งสองข้างต้องร่วมศูนย์เพื่อให้คานทดสอบไม่เอียง
- สลัก knife edge ชุดให้ภาวะ (แบบหมายเลข 022) ปลายทั้งสองข้างต้องร่วมศูนย์เพื่อรักษาความตรงของชุดให้ภาวะชิ้นงานทดสอบ
- ก้านตั้งชิ้นงานทดสอบที่อนบน และล่าง (แบบหมายเลข 031 และ 032) และ ก้านตั้ง (แบบหมายเลข 036) ตำแหน่งศูนย์กลางรูสำหรับร้อยสลักต้องอยู่ตรงกับแนวของแกนก้านตั้งเพื่อไม่ให้เกิดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ

ช) ความสมมาตร (symmetry)

ส่วนของชิ้นงานที่ต้องควบคุมความสมมาตร คือ ตำแหน่งของร่องสำหรับสวมชิ้นงาน ตัวอย่างชิ้นงานเหล่านี้ ได้แก่

- ตัวแขวนชุดให้ภาวะ (แบบหมายเลข 025) ร่องสำหรับสวมก้านตั้งต้องสมมาตรกับความหนาของตัวแขวน เพื่อรักษาความตรงของชุดให้ภาวะชิ้นงานทดสอบ
- ก้านตั้งชิ้นงานทดสอบที่อนบน และล่าง (แบบหมายเลข 031 และ 032) และ ก้านตั้ง (แบบหมายเลข 036) ปลายที่ถูกปาดเป็นระนาบจะต้องสมมาตรกับแกนก้านตั้งเพื่อลดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ
- ข้อต่อ universal ตัวบน, ตัวกลาง และตัวล่าง (แบบหมายเลข 033, 034 และ 035) ร่อง และปลายที่ถูกปาดให้มีความหนาลดลง (เพื่อประกอบกับชิ้นงานอื่น) จะต้องสมมาตรกับความหนาของชิ้นส่วน กลางความหนาเพื่อลดโมเมนต์ดัดบนชิ้นงานทดสอบ

4.10.3 คุณภาพผิวสำเร็จ

หลักเกณฑ์ทั่วไปในการระบุคุณภาพผิวสำเร็จในแบบรายละเอียด (ภาคผนวก ก) มีดังนี้

- 1) ผิวที่ไม่เกี่ยวข้องกับการประกอบ และไม่มีผลต่อความแม่นยำในการทำรายละเอียดส่วนอื่นบนชิ้นงาน จะไม่ระบุสัญลักษณ์คุณภาพผิว

2) ฝิวที่ไม่เกี่ยวข้องกับการประกอบ แต่มีผลต่อความแม่นยำในการทำรายละเอียด ส่วนอื่นบนชิ้นงาน จะระบุสัญลักษณ์ “▽”

3) ฝิวที่เกี่ยวข้องกับการประกอบ ทั้งแบบที่มีและไม่มี การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่าง ชิ้นส่วน จะระบุสัญลักษณ์ “▽▽”



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การประเมินคุณภาพเครื่องทดสอบ และการวิเคราะห์ผล

5.1 รายการประเมิน

การประเมินคุณภาพเครื่องทดสอบ ประกอบด้วยรายการต่อไปนี้

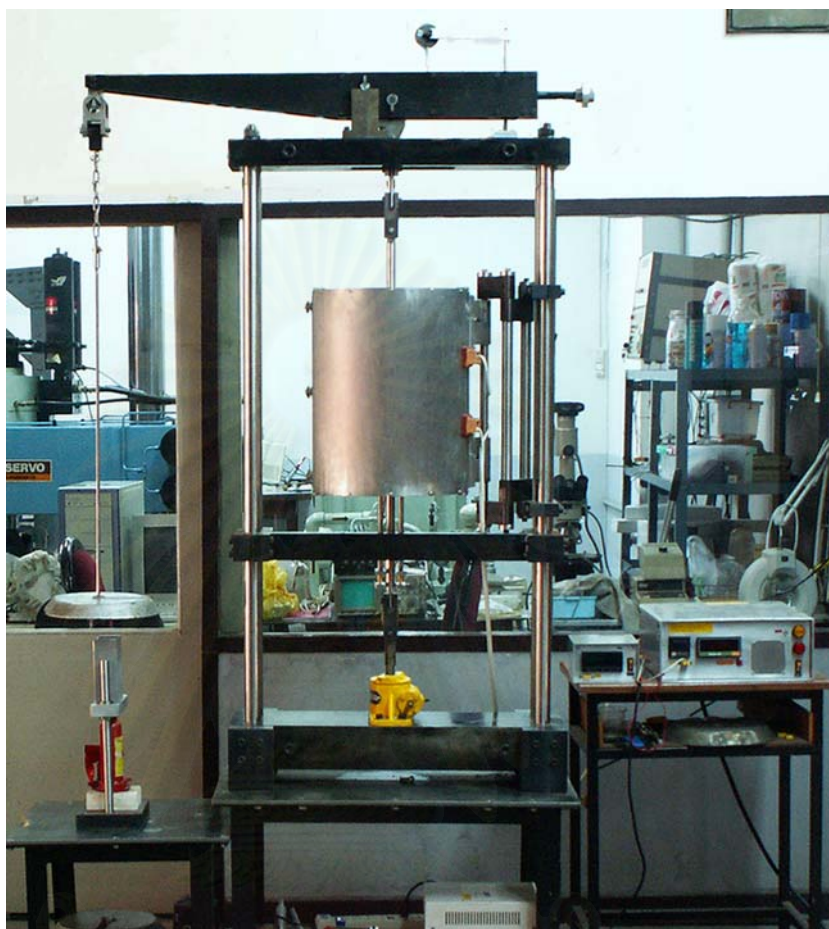
- 1) การวัดอัตราทดของคานทอดแรง และเปอร์เซ็นต์การดัดบนชิ้นงานทดสอบ

การวัดอัตราทดของคานทอดแรง ทำเพื่อให้ทราบว่าภาระที่แท้จริงบนชิ้นงานทดสอบเท่ากับ
กี่เท่าของขนาดน้ำหนักถ่วง

การวัดเปอร์เซ็นต์การดัด ทำเพื่อ ตรวจสอบว่าภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบเป็นภาระ
แนวแกนโดยสมบูรณ์เพียงใด

- 2) การวัดการกระจาย (distribution) ของอุณหภูมิ และการขึ้นลง (fluctuation) ของ
อุณหภูมิในเตา

การวัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตา ทำเพื่อระบุตำแหน่งภายในเตาและความยาวช่วง
ที่การกระจายอุณหภูมิต่ำมีความสม่ำเสมอตามเกณฑ์ที่มาตรฐานการทดสอบกำหนด ผลการวัดนี้จะ
ทำให้ทราบว่าจำเป็นต้องติดตั้งชิ้นงานทดสอบไว้ตำแหน่งใดของเตา หรือในทางกลับกันจะทำให้ทราบ
ว่าต้องเลื่อนเตาขึ้น-ลงเป็นระยะเท่าใด จึงจะทำให้ส่วนที่อุณหภูมิต่ำสม่ำเสมอครอบคลุมความยาว
แกนของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 5.1 เครื่องทดสอบการคืบแกนเดียวที่เสร็จสมบูรณ์

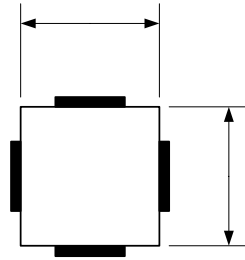
5.2 การวัดอัตราทดของคานทอดแรง และเปอร์เซ็นต์การดัดบนชิ้นงานทดสอบ

5.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

- 1) โหลดเซลล์ (รูปที่ 5.2(ก))
- 2) สเตอริโอมิเตอร์ และ Switching box (รูปที่ 5.2(ข))
- 3) Dummy strain gauge ติดบนวัสดุชนิดเดียวกับที่ใช้ทำโหลดเซลล์ (รูปที่ 5.2(ค))

5.2.2 วิธีการทดลอง

- 1) นำตุ้มน้ำหนักทั้งหมดออกจากที่รองตุ้มน้ำหนัก
- 2) ต่อดวงจรมอเตอร์แบบ Half bridge ที่มี active gauge 1 ตัว และ dummy gauge 1 ตัว โดยมอเตอร์แบบโพลีเซลล์แต่ละตัว (หมายเลข 1-4) เป็น active gauge วงจรที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 5.2
- 3) ติดตั้งโพลีเซลล์กับก้านดึงชิ้นงานทดสอบ และหมุนโพลีเซลล์จนตำแหน่งของมอเตอร์เกจหมายเลข 1 อยู่ที่ด้านหน้าของเครื่องทดสอบ (หันเข้าหาผู้ทำการทดลอง)
- 4) ปรับคานทดสอบให้อยู่ในแนวระดับด้วยการปรับช่วงชักของอุปกรณ์ปรับระยะ (ในที่นี้เมื่อ dial gauge อ่านค่า 0.15 มม. คานทดสอบจะอยู่ในแนวระดับพอดี)
- 5) ปรับศูนย์ค่าที่อ่านจากสเตรนมิเตอร์
- 6) ใส่ตุ้มน้ำหนักขนาด 10 กิโลกรัม แล้วปรับคานทดสอบให้อยู่ในแนวระดับ บันทึกค่าความเครียดของมอเตอร์เกจตำแหน่งที่ 1 ถึง 4
- 7) ยกตุ้มน้ำหนักในข้อ 6 ออก และถอดโพลีเซลล์จากก้านดึงชิ้นงานทดสอบ
- 8) ทำขั้นตอนที่ 4 ถึง 7 ซ้ำ จนกระทั่งได้ข้อมูลเพียงพอสำหรับการทดสอบไคกำลังสอง (Chi-square) ในที่นี้คือ 15 ถึง 21 ครั้ง
- 9) คำนวณความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} , เปอร์เซ็นต์การตัด PB โดยใช้สมการที่ (2.27) – (2.30)
- 10) คำนวณภาวะของโพลีเซลล์ P จากค่าความเครียดเฉลี่ยของข้อ 10 (ภาคผนวก ค)
- 11) ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4 แต่เพิ่มขนาดน้ำหนักถ่วงอีก 10 กิโลกรัม หากขนาดน้ำหนักที่เพิ่มเท่ากับ 80 กิโลกรัม แล้วจะถือว่าเสร็จสิ้นการทดสอบ



(ก) โหลดเซลล์ และตำแหน่งสเตรนเกจ

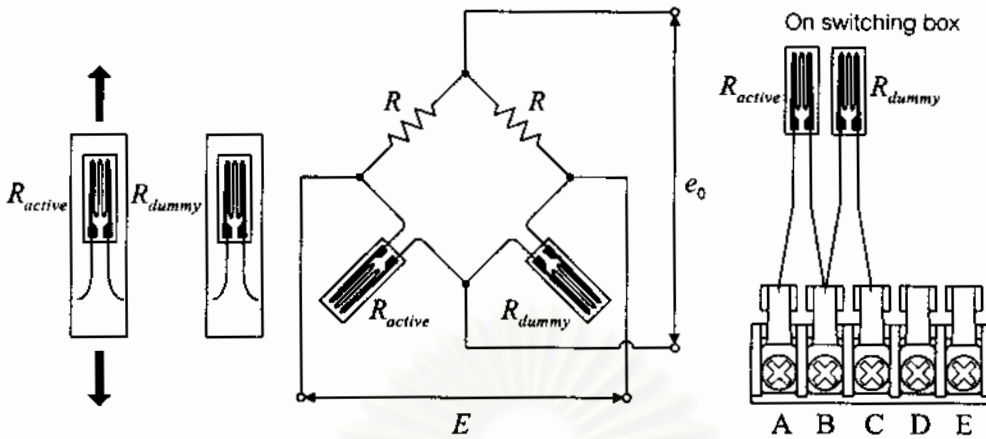


(ข) สเตรนมิเตอร์ และ Switching box



(ค) dummy strain gauge

รูปที่ 5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอัตราทดของคานทอดแรง และเปอร์เซ็นต์การดัดบนชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 5.3 วงจรสะพานเกจแบบ Half bridge ที่มี 1-active gauge และ 1-dummy gauge

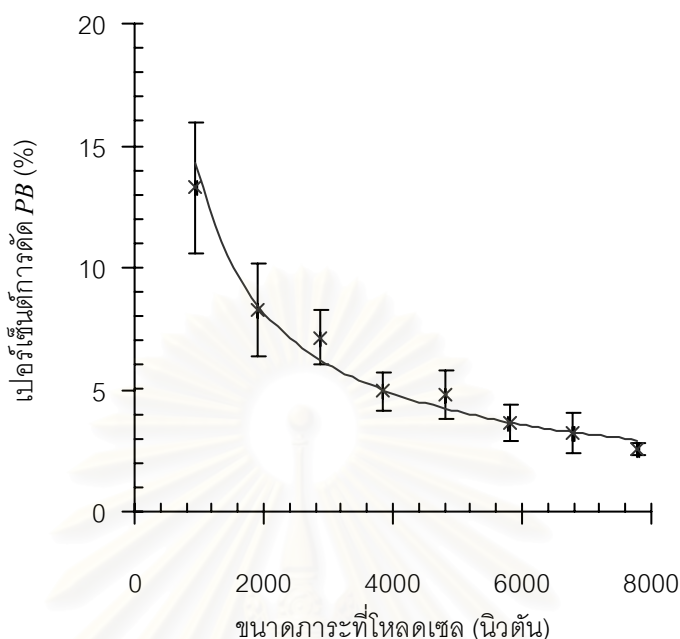
5.2.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

ผลการวัดความเครียดที่เกิดขึ้น ณ สเตรนเกจหมายเลข 1-4 ในการทดลองซ้ำ ๆ ที่ขนาดน้ำหนักถ่วง W ตั้งแต่ 10 - 80 กิโลกรัม แสดงอยู่ในภาคผนวก จ ตารางที่ จ.1 - จ.8 ความเครียด ณ ตำแหน่งทั้ง 4 จะถูกนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การตัด PB โดยใช้สมการที่ (2.27) - (2.30) ผลการคำนวณแสดงอยู่ในตารางที่ 5.1 เมื่อนำข้อมูลในตารางไปพล็อตจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.1 เปอร์เซ็นต์การตัดที่ขนาดน้ำหนักถ่วงต่าง ๆ

ขนาดน้ำหนักถ่วง (กก.)	ขนาดภาระระบุ P (นิวตัน) ^(*)	เปอร์เซ็นต์การตัด PB (%)
10	981	13.3 ± 2.7
20	1,961	8.3 ± 1.9
30	2,942	8.0 ± 1.6
40	3,923	4.9 ± 0.8
50	4,903	4.8 ± 1.0
60	5,884	3.6 ± 0.7
70	6,864	3.2 ± 0.8
80	7,845	2.6 ± 0.3

^(*) คำนวณจากขนาดน้ำหนักถ่วงคูณด้วยอัตราทดเท่ากับ 10



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การตัดและขนาดภาวที่โหลดเซล

จากรูป จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การตัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อภาวที่โหลดเซล ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยอื่น (18) ที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.5.1

จากตารางที่ 5.1 ถ้าใช้เกณฑ์ของมาตรฐาน ASTM E139-95 (17) ซึ่งกำหนดว่าเปอร์เซ็นต์การตัดต้องน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ แล้วขอบเขตการใช้งานของเครื่องทดสอบจะเริ่มต้นที่ 1,961 นิวตัน (น้ำหนักถ่วง 20 กิโลกรัม) ถึง 7,845 นิวตัน (น้ำหนักถ่วง 80 กิโลกรัม) นอกจากนี้มาตรฐาน ASTM E4 (30) ยังกำหนดให้ความแม่นยำของภาวที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบต้องอยู่ที่ไม่เกิน ± 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเครื่องทดสอบที่สร้าง ความแม่นยำของภาวที่เต็มสเกล คือ $\pm 80/7761.1$ เท่ากับ ± 1 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นสรุปว่าผ่านเกณฑ์

ตารางที่ 5.2 แสดงขนาดภาวที่โหลดเซล P และขนาดน้ำหนักถ่วง W โดยขนาดน้ำหนักถ่วงที่แท้จริงทราบได้จากผลการสอบเทียบ (ภาคผนวก ง) ขนาดภาวที่โหลดเซล P คำนวณจากผลการสอบเทียบโหลดเซล (ภาคผนวก ค) โดยแทนค่าความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ลงในสมการ (ค.6) รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของขนาดภาวที่โหลดเซล และค่าเฉลี่ยของขนาดน้ำหนักถ่วง จากรูปความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

แบบถ่วงน้ำหนัก (weighted least square) ซึ่งรายละเอียดสรุปอยู่ในภาคผนวก ก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ คือ

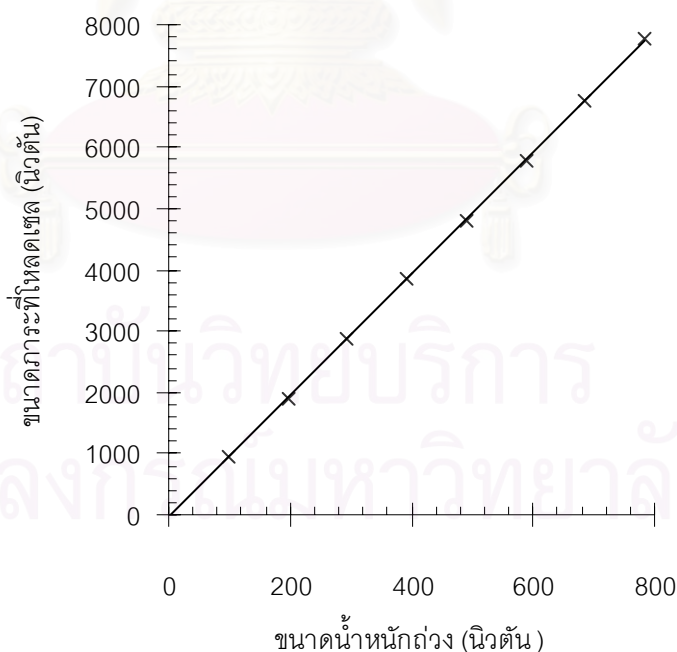
$$P = (9.87 \pm 0.1)W - (26.36 \pm 29.1) \text{ นิวตัน}^1 \quad (5.1)$$

ตารางที่ 5.2 ขนาดภาระที่โหลดเซลล์ที่ขนาดน้ำหนักถ่วงต่าง ๆ

น้ำหนักถ่วง W (กก.)		ความเครียดเฉลี่ย	ขนาดภาระที่โหลดเซลล์
ขนาดระบุ	ค่าสอบเทียบ ^(ก)	$\epsilon_{avg} (\mu\epsilon)$	P (นิวตัน) ^(ข)
10	$9.998 \pm 6.0 \times 10^{-5}$	223.7 ± 0.3	949 ± 14
20	$19.993 \pm 8.5 \times 10^{-5}$	448.8 ± 0.3	$1,903 \pm 15$
30	$29.991 \pm 10.4 \times 10^{-5}$	676.7 ± 0.4	$2,870 \pm 24$
40	$39.991 \pm 12.0 \times 10^{-5}$	905.4 ± 0.4	$3,840 \pm 28$
50	$49.988 \pm 13.4 \times 10^{-5}$	$1,133.1 \pm 0.4$	$4,806 \pm 30$
60	$59.987 \pm 14.7 \times 10^{-5}$	$1,362.2 \pm 0.8$	$5,778 \pm 44$
70	$69.986 \pm 16.3 \times 10^{-5}$	$1,595.8 \pm 0.6$	$6,768 \pm 44$
80	$79.985 \pm 16.4 \times 10^{-5}$	$1,829.8 \pm 1.6$	$7,761 \pm 80$

^(ก) ภาคผนวก ง

^(ข) ภาคผนวก ค



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่โหลดเซลล์และน้ำหนักถ่วง

¹ คิดความเร่งโน้มถ่วงของโลก $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$

จากรูปที่ 5.5 ความชันของกราฟ หมายถึงอัตราการผลิตของคานทอดแรง และจุดตัดแกนตั้ง หมายถึง ขนาดภาระที่ไหลดเซด (หรือชิ้นงานทดสอบ) ขณะที่ไม่ค้ำน้ำหนักถ่วง และคานทอดแรงอยู่ในแนวระดับ ดังนั้นจากสมการที่ (5.1) อัตราการผลิตของคานทอดแรง คือ 9.87 ± 0.1 เท่า และภาระเริ่มต้นขณะไม่มีน้ำหนักถ่วง เท่ากับ -26.4 ± 29.1 นิวตัน (หรือ -55.5 ถึง 2.7 นิวตัน) ความแม่นยำ (accuracy) ของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบสูงสุด คือ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ภาระ 948.7 นิวตัน

5.3 การวัดการกระจายอุณหภูมิ และการขึ้นลงของอุณหภูมิภายในเตา

5.3.1 อุปกรณ์การทดลอง

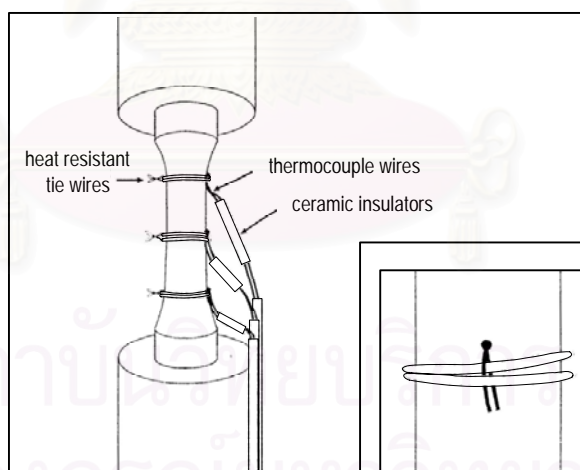
- 1.) ชิ้นงานยาวพิเศษ (รูปที่ 5.6)
- 2.) ลวดเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K (TC element) ชนิดสายเปลือย
- 3.) ลวดนำสัญญาณ (TC compensated lead wire)
- 4.) ปลอกเซรามิก
- 5.) ลวดทนความร้อน
- 6.) เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 5.6 ชิ้นงานที่ใช้วัดการกระจายอุณหภูมิภายในเตา

5.3.2 วิธีการทดลอง

- 1) ทำความสะอาดชิ้นงาน
- 2) ตัดลวดเทอร์โมคัปเปิ้ล (ขั้วบวก และขั้วลบ) ความยาวประมาณ 50 ซม. จากนั้นเชื่อมปลายลวดทั้งสองเส้นให้มีลักษณะเป็นปม (รูปที่ 5.7)
- 3) ร้อยปลอกเซรามิกเข้ากับลวดเทอร์โมคัปเปิ้ล
- 4) ยึดปลายของเทอร์โมคัปเปิ้ลที่เชื่อมไว้กับชิ้นงานทดสอบด้วยการมัดลวดทนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 5.7
- 5) ต่อกับปลายอีกข้างของเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้าเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ (ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส)
- 6) เพิ่มอุณหภูมิของเตา ครั้งละ 50 องศาเซลเซียส แต่ทุกครั้งควรปล่อยให้อุณหภูมิอยู่ตัวประมาณ 30 นาที ทำเช่นนี้ซ้ำ ๆ จนกว่าจะถึงอุณหภูมิที่ต้องการ แล้วให้อุณหภูมิเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) อีกประมาณ 4 ชั่วโมง
- 7) บันทึกค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ทุก ๆ 30 นาที



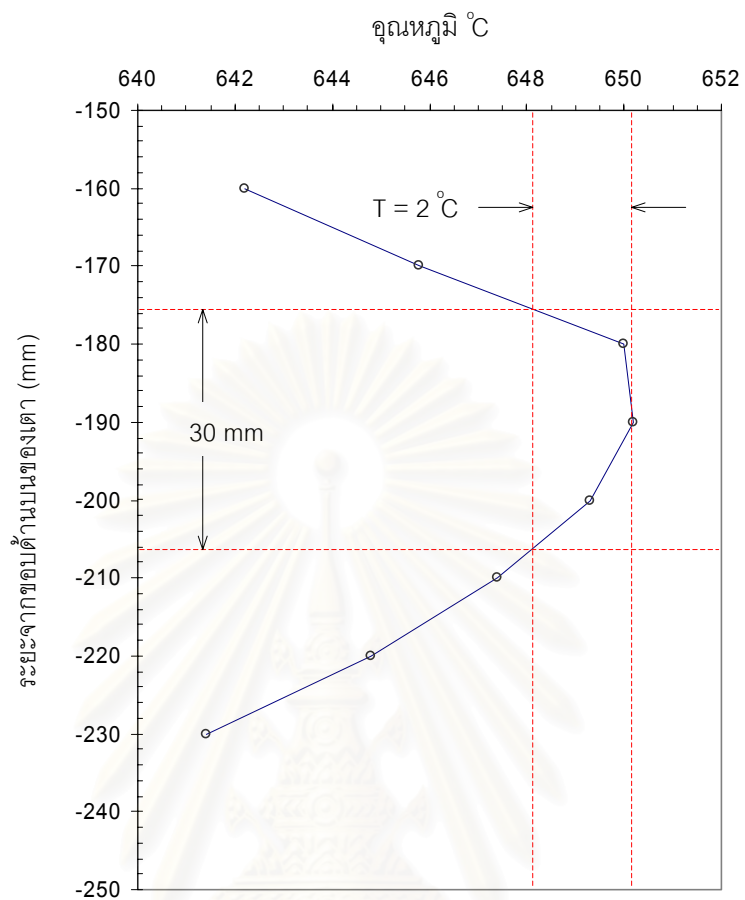
รูปที่ 5.7 วิธีติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลกับชิ้นงานทดสอบ

5.3.3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

อุณหภูมิภายในเตา มีการกระจายดังแสดงในรูปที่ 5.8 ในรูป แกนตั้ง คือระยะจากขอบบนของเตา ในที่นี้เริ่มวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งประมาณ 150 มม. จากขอบบน และวัดอีกที่ตำแหน่งถัดไปทุก ๆ 10 มม. รวมทั้งสิ้น 8 จุด แกนนอนแทนอุณหภูมิที่วัดได้ ค่าที่นำมาพล็อต คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของอุณหภูมิ ณ จุดเดียวกัน ในช่วงเวลาทดสอบ

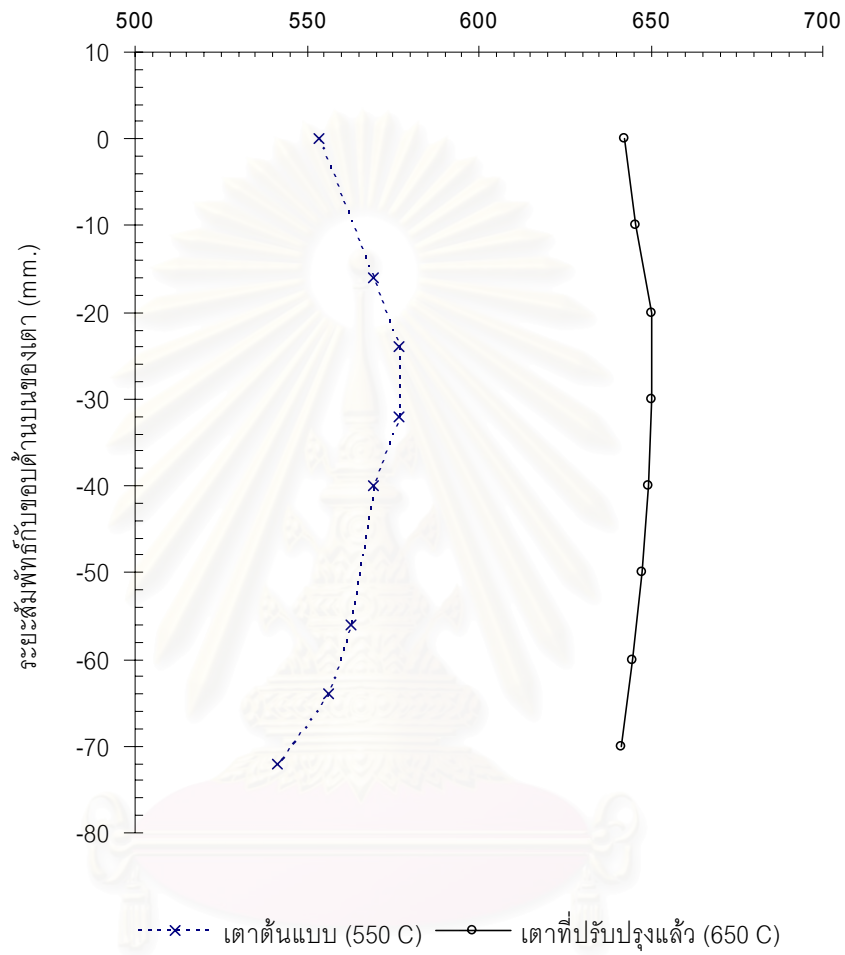
เทอร์โมคัปเปิ้ลที่ตำแหน่ง 180 มม. จากขอบบน ทำหน้าที่อ่านค่าสำหรับควบคุมอุณหภูมิ ในที่นี้กำหนดอุณหภูมิควบคุมเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าตำแหน่งที่อุณหภูมิมีค่าสูงสุดคือ ตำแหน่ง 190 มม. จากขอบบน (ถัดจากตำแหน่งควบคุมไปด้านล่าง 10 มม.) หากใช้ค่าสูงสุดนี้เป็นค่าอ้างอิงและประยุกต์เกณฑ์ที่ว่า “อุณหภูมิในช่วงความยาวเกจจะต้องต่างกันไม่เกิน ± 1 องศา” จะสามารถประมาณช่วงที่อุณหภูมิแปรผันในขอบเขตที่มาตรฐานยอมรับจากกราฟได้ โดยความยาวที่อ่านได้คือ 30 มม. โดยประมาณ ถ้าเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิกับของเตาของเครื่องต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 จากรูปจะเห็นว่า การกระจายอุณหภูมิในเตาของเครื่องที่สร้างใหม่มีความสม่ำเสมอกว่า

การผันแปรของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิที่ตำแหน่งควบคุมบนชิ้นงาน มีการผันแปรไปตามเวลา (แกนนอน) ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ระยะเวลาทดสอบ คือ 22 ชั่วโมง ค่าสูงสุด ต่ำสุดของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในระยะเวลาที่ทดสอบ แสดงอยู่ในตารางที่ 5.2 จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่า การพิสัยการผันแปรของอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิอยู่ห่างจากตำแหน่งที่ควบคุม โดยอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนสุดมีพิสัยการผันแปรสูงสุดเท่ากับ 7.8 องศาเซลเซียส เหตุผลอีกประการที่ทำให้การควบคุมอุณหภูมิที่จุดนี้ไม่ดี เป็นเพราะตำแหน่งนี้อยู่ใกล้กับช่องเปิดด้านบนซึ่งความร้อนสามารถสูญเสียออกไปได้ง่ายกว่า ทำให้อุณหภูมิที่จุดนี้ไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมภายนอกมากกว่าที่จุดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเฉพาะช่วงที่อุณหภูมิมีความสม่ำเสมอแล้ว พิสัยการผันแปรสูงสุดคือ 1.5 องศาเซลเซียส โดยประมาณ ซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐาน ASTM E139 (17) กำหนด (± 1.6 องศาเซลเซียส)



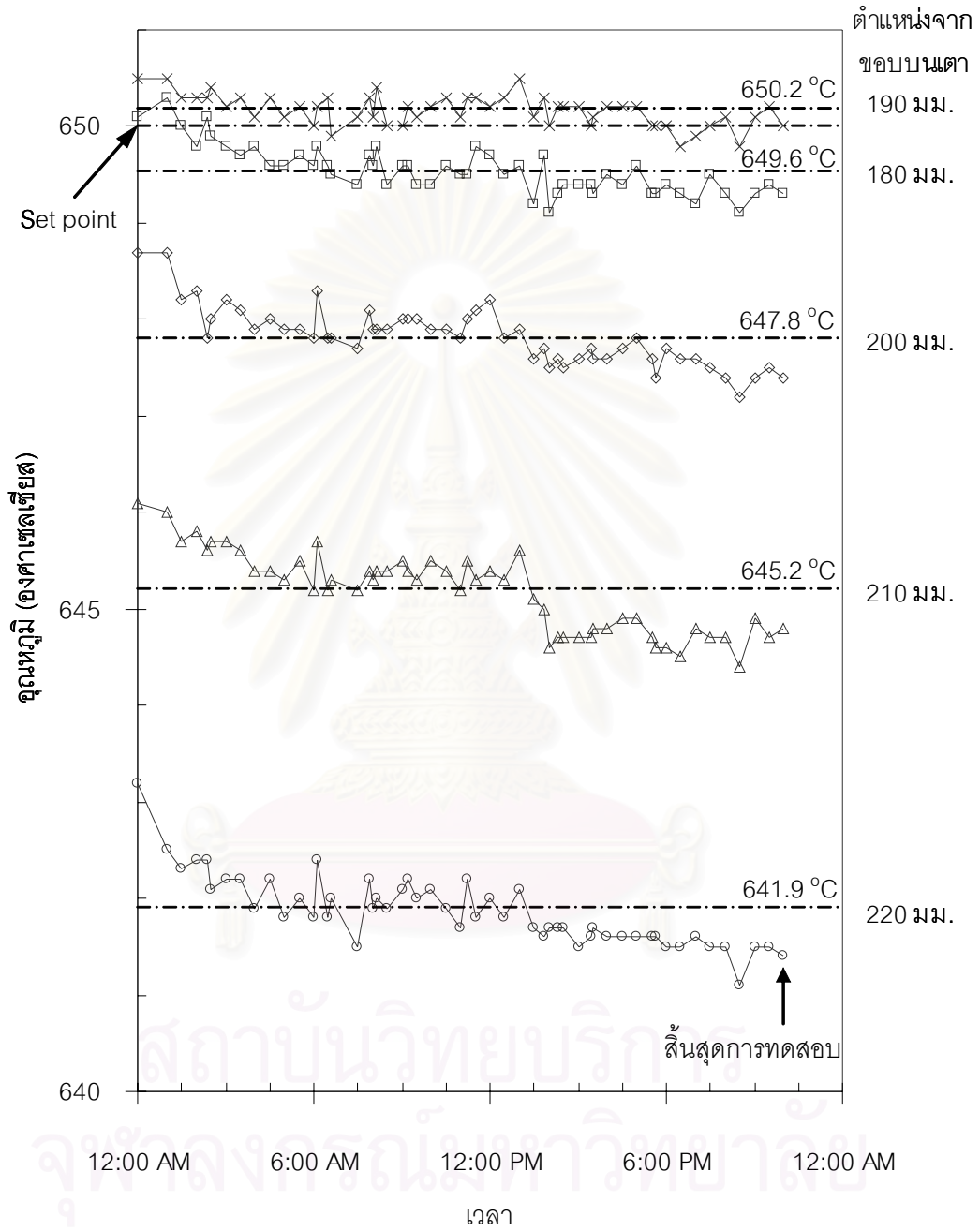
รูปที่ 5.8 การกระจายอุณหภูมิภายในเตาตามแนวความสูงของเตา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิภายในเตาของเครื่องต้นแบบ (อุณหภูมิควบคุม 550 °C) และภายในเตาที่ปรับปรุงแล้ว (อุณหภูมิควบคุม 650 °C)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 การผันแปรของอุณหภูมิตามเวลา ณ ตำแหน่งความสูงต่างๆ ในเตา

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลการผันแปรของอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ภายในเตา

ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลวัด จากขอบบนของเตา (มม)	อุณหภูมิสูงสุด ^(น) (°C)	อุณหภูมิต่ำสุด ^(น) (°C)	ผลต่าง (°C)	ค่าเฉลี่ย (°C)
160	646.4	642.0	7.8	642.2
170	648.1	644.3	4.2	645.8
180 ^(ข)	650 ^(ค)	650 ^(ค)	0	650
190	650.5	649.8	0.7	650.2
200	650.3	649.1	1.2	649.6
210	648.7	647.2	1.5	647.8
220	646.1	644.4	1.7	645.2
230	643.2	641.1	2.1	641.9

^(น) ความละเอียดของเครื่องมือ เท่ากับ 0.1 องศาเซลเซียส

^(ข) ตำแหน่งควบคุมอุณหภูมิ

^(ค) ความละเอียดของเครื่องมือ เท่ากับ 1 องศาเซลเซียส

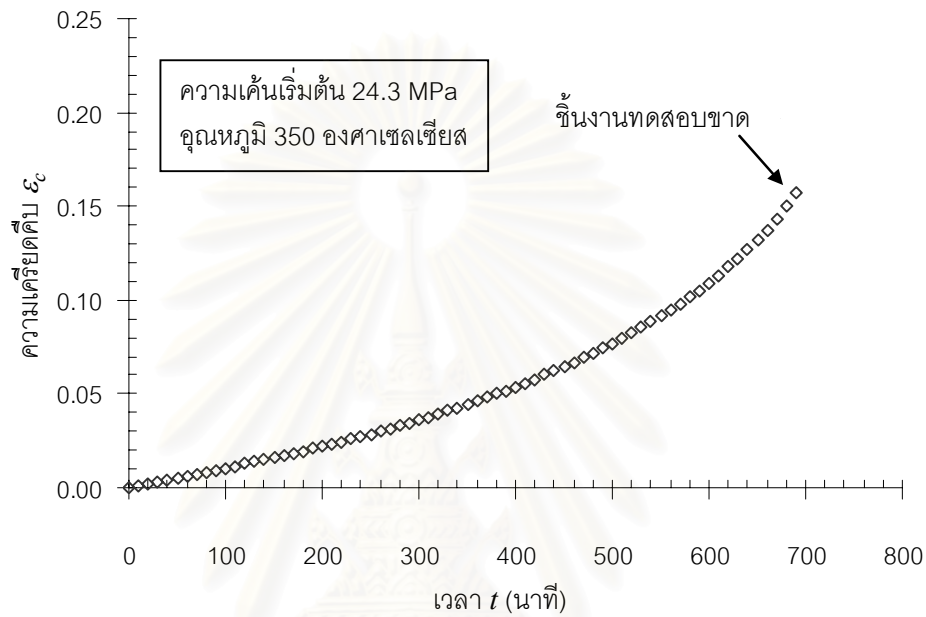
5.4 การทดสอบการคืบ

เครื่องทดสอบที่ออกแบบถูกนำไปใช้ทดสอบการคืบเพื่อตรวจสอบการทำงานโดยรวม วัสดุที่ใช้ทดสอบคือทองเหลือง อุณหภูมิทดสอบคือ 350 องศาเซลเซียส แรงที่ดึงขึ้นงาน คือ 687 นิวตัน นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งเกจวัดระยะเคลื่อนตัวที่สร้างขึ้น (24) เพื่อวัดระยะยืดตัวของขึ้นงาน รูปที่ 5.11 แสดงการติดตั้งขึ้นงานทดสอบและเกจวัดระยะเคลื่อนตัวภายในเตา

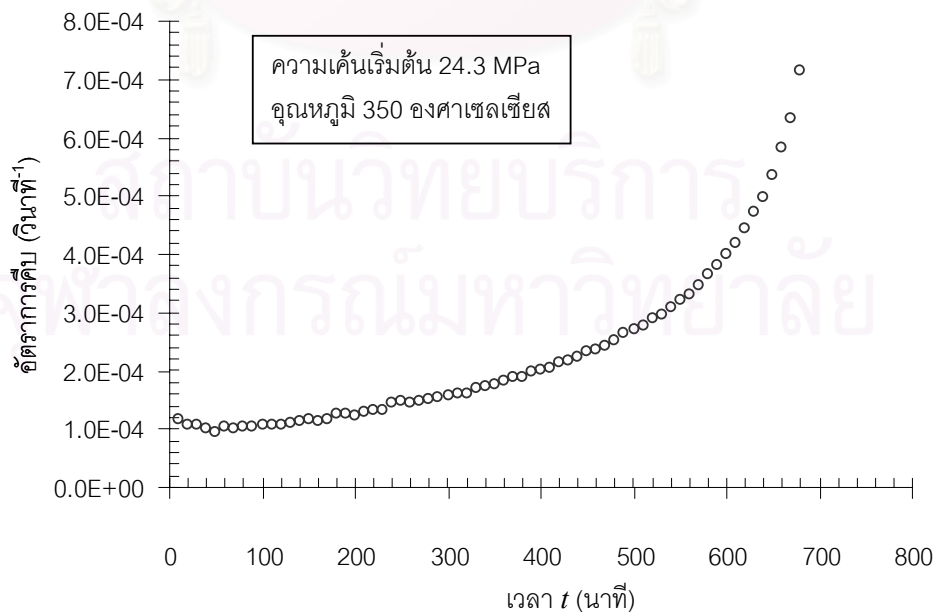


รูปที่ 5.11 การติดตั้งขึ้นงานทดสอบและเกจวัดระยะเคลื่อนตัว

เส้นผ่านศูนย์กลางช่วงความยาวเท่ากับ 6 มม. ผลการทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 5.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคืบ ϵ_c กับเวลา t อายุการคืบของชิ้นงานคือ 694 นาที และความเหนียวคืบ (creep ductility) เท่ากับ 15.8 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบใช้งานจริงพบว่าเครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยวที่สร้างสามารถใช้งานได้



รูปที่ 5.12 เส้นโค้งพฤติกรรมการคืบ



รูปที่ 5.13 อัตราการคืบ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 ข้อสรุปโดยรวม

- 1) ได้ศึกษาข้อบกพร่องในการออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบต้นแบบ แล้วนำมาแก้ไขในการออกแบบเครื่องทดสอบเครื่องปัจจุบัน ดังสรุปในตารางที่ 6.1
- 2) ได้พัฒนาขั้นตอนการออกแบบเครื่องทดสอบการคืบ
- 3) ได้สร้างเครื่องทดสอบการคืบแบบแกนเดี่ยวเสร็จสมบูรณ์และได้ประเมินคุณภาพของเครื่องทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย ความแม่นยำของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ เบอร์เซนต์การคืบบนชิ้นงานทดสอบ อัตราทดของคานทดแรง
- 4) ความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ และการกระจายของอุณหภูมิภายในเตา ในทิศทางความสูงของเตา โดยได้เปรียบเทียบผลการวัดกับเกณฑ์ที่มาตรฐานการทดสอบกำหนด

ตารางที่ 6.1 สิ่งที่ปรับปรุงจากเครื่องทดสอบต้นแบบ

ลำดับ	รายการ	เครื่องทดสอบต้นแบบ	การแก้ไข
1	ตำแหน่งของ knife edge	ตำแหน่งของ knife edge ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันส่งผลให้อัตราทดแรงเปลี่ยนแปลงเมื่อคานทดแรงเอียง	ออกแบบให้ตำแหน่งของ knife edge อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน
2	การผลิตและการจับยึดชิ้นส่วน	ใช้การเชื่อม และการผลิตชิ้นส่วนมีความคลาดเคลื่อนมาก	ใช้จับยึดด้วยเกลียว และควบคุมความคลาดเคลื่อนในการผลิตชิ้นส่วน
3	อุปกรณ์ปรับระยะ	ใช้กลไก turnbuckle ซึ่งใช้งานที่ภาระทดสอบสูงสุดไม่ได้	ใช้อุปกรณ์ปรับระยะสำเร็จรูป
4	การหุ้มฉนวนเตา	การหุ้มฉนวนเตาด้านบนไม่มิดชิด และความหนาแน่นน้อยเกินไป	หุ้มฉนวนให้หนาขึ้นและปิดช่องที่ความร้อนจะรั่วไหลได้

6.1.2 ข้อสรุปเกี่ยวกับคุณภาพของเครื่องทดสอบ

- 1) เปอร์เซ็นต์การดัดบนชิ้นงานทดสอบขึ้นกับขนาดภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบ โดยเปอร์เซ็นต์การดัดมีค่าลดลงเมื่อขนาดภาระเพิ่มขึ้น ขนาดภาระทดสอบที่มีเปอร์เซ็นต์การดัดน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ (ผ่านเกณฑ์) อยู่ในช่วง 1,961 ถึง 7,845 นิวตัน
- 2) ความแม่นยำของภาระที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบจากค่าระบุ (nominal) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.5 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 948.7 นิวตัน) และต่ำสุด 0.6 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 4,806 นิวตัน)
- 3) เตาสามารถทำอุณหภูมิทดสอบได้ตามที่ต้องการ (650 องศาเซลเซียส) โดยการผันแปรของอุณหภูมิตามเวลาอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด
- 4) บริเวณภายในเตาที่ทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานสม่ำเสมอในช่วง ± 1 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิทดสอบ 650 องศาเซลเซียส มีความยาว 30 มม. โดยประมาณ
- 5) ชุดควบคุมอุณหภูมิสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานได้แม่นยำในช่วง ± 1 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิทดสอบ 650 องศาเซลเซียส
- 6) เครื่องทดสอบเครื่องปัจจุบันมีคุณภาพสูงกว่าเครื่องต้นแบบ (ตารางที่ 6.2) และมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับใช้ทดสอบหาสมบัติการคืบของวัสดุ

ตารางที่ 6.2 ผลการเปรียบเทียบคุณภาพระหว่างเครื่องทดสอบต้นแบบและเครื่องทดสอบที่ปรับปรุง

รายการประเมินคุณภาพ	เครื่องทดสอบต้นแบบ	เครื่องทดสอบปัจจุบัน	เกณฑ์
เปอร์เซ็นต์การดัด ⁽ⁿ⁾	7%-160%	$2.6 \pm 0.3\%$	< 10%
การกระจายของอุณหภูมิในช่วงความยาวเกจ	$\pm 6^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	< $\pm 1^{\circ}\text{C}$
ความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ	$\pm 2^{\circ}\text{C}^{(m)}$	$\pm 1^{\circ}\text{C}^{(k)}$	< $\pm 1.6^{\circ}\text{C}$

⁽ⁿ⁾ ที่ภาระทดสอบสูงสุด

^(m) ที่อุณหภูมิ 550 °C

^(k) ที่อุณหภูมิ 650 °C

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรใช้เตาความร้อนชนิดที่มีเขตลวด 3 ชุด และ ชุดควบคุมอุณหภูมิแยกอิสระจากกัน (3 zones furnace) เพื่อให้บริเวณที่อุณหภูมิสม่ำเสมอมีความยาวเพิ่มขึ้น
- 2) ควรลดความยาวโดยรวมของคานทอดแรงเพื่อเพิ่มความแม่นยำ ขนาดที่เล็กลงจะช่วยให้ขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนสะดวก และมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า
- 3) ควรออกแบบกลไกปรับระดับเตาที่ใช้งานได้สะดวกกว่านี้
- 4) ควรเพิ่มกลไกป้องกันการลัดของก้านดึงชิ้นงานทดสอบที่อนล่าง เมื่อชิ้นงานทดสอบขาด
- 5) ควรปรับปรุงอุปกรณ์สำหรับวางตุ้มน้ำหนัก
- 6) ควรติดมอเตอร์และเซนเซอร์สำหรับปรับระดับคานทอดแรงอัตโนมัติ
- 7) ควรติดลิimitsวิตช์สำหรับตัดการทำงานของเตาเมื่อชิ้นงานขาด
- 8) ควรติด hour meter เพื่อให้ทราบว่าการทดสอบผ่านไปนานเท่าใด

รายการอ้างอิง

1. Evans, R. W., and Wilshire, B. **Introduction to creep**. London: The Institute of Materials, 1993.
2. Viswanathan, R. **Damage mechanisms and life assessment of high temperature components**. Ohio: ASM International, 1989.
3. Hetenyi, M., eds. **Testing machines in handbook of experimental stress analysis**. New York: John Wiley and Sons, 1966.
4. Everett, F. I. The strength of materials subjected to shear at high temperatures. **Trans ASME** 53 (1931): 117-135.
5. Davis, E. A. Combined tension-torsion tests on a 0.35 percent carbon steel. **Trans ASME** 62 (1940): 577-586.
6. Trampczynski, W., Morrison, C., and Topliss, W. E. A tension-torsion creep-rupture testing machine. **Journal of Strain Analysis** 15, 3 (1980): 151-157
7. ทวีช วงศ์กระบอกถาวร. **ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบการคืบแบบแกนเดียว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
8. Dowling, N. E. **Mechanical behavior of materials**. London: Prentice-Hall, 1993.
9. Applied test systems [ATS]. **ATS series 2100 direct load creep testing systems product bulletin** [online]. 2003. Available from: <http://www.atspa.com> [2004.June]
10. Whittenberger, D. J., and McDemus, R. Creep, stress-rupture, and stress-relaxation testing. In **American society for testing materials, mechanical handbook**. 8 vols, 9th ed. Material testing, pp. 301-360. USA: American society for testing materials, 1986.
11. Applied test systems [ATS]. **ATS series 2300/2400/2500 lever arm creep testing systems product bulletin** [online]. 2003. Available from: <http://www.atspa.com> [2004.June]
12. Lohr, R. D., and Steen, M. **Ultra high temperature mechanical testing**. Cambridge: Woodhead Publishing, 1996.

13. Eric, C. G., and David, L. **Handbook of applied thermal design**. USA: McGraw-Hill, 1989.
14. Mott, R. L. **Machine elements in machine design**. 4th ed. USA: Prantice-Hall, 2004.
15. Chandrupatla, T. R., and Belegundu, A. D. **Introduction to finite elements in engineering**. 2nd ed. USA: Prantice-Hall, 1997.
16. Christ, B. W., and Swanson, S. R. Alignment problems in the tensile test. **Journal of Testing and Evaluation** 4, 6 (November 1976): 405-417.
17. Schimieder, A. K. Effect of misalignment on the time to rupture. **Journal of Testing and Evaluation** 13, 4 (1985): 292-298.
18. American society for testing materials [ASTM]. E139 Standard practice for conducting creep, creep-rupture and stress rupture tests of metallic materials. In **1996 Annual book of ASTM standards**. 03.01 vols. pp. 252-262. USA: American society for testing materials, 1996.
19. American society for testing materials [ASTM]. E1012 Standard practice for verification of specimen alignment under tensile loading. In **1996 Annual book of ASTM standards**. 03.01 vols. pp. 705-712. USA: American society for testing materials, 1996.
20. Nihon-kikai. **Creep data**. Tokyo: Japanese Society of High Pressure Vessel, 1999.
21. American society for testing materials [ASTM]. E8M Standard test methods for tension testing of metallic materials. In **1996 Annual book of ASTM standards**. 03.01 vols. pp. 55-96. USA: American society for testing materials, 1996.
22. Shimadzu Corporation. **Optional accessories for Shimadzu servopluser material testing machines**. Japan: Shimadzu Corporation, (n.d.)
23. Ullman, D. G. **The mechanical design process**. 3rd ed. USA: McGraw-Hill, 2003.

24. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย. การออกแบบ และสร้างอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว
สำหรับใช้ในอุณหภูมิต่ำ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
25. Kanthal AB. Fibrothal handbook heating and insulation systems. Sweden:
Vastra Aros Tryckeri, 1955
26. Farag, M. M. Selection of materials and manufacturing process for engineering
design. . Cambridge: Prentice Hall International, 1989
27. Khurmi, R. S., and Gupta, I. K. Machine design. 11th ed. New Delhi: Eurasia
Publishing House, 1990
28. Osgood, C. C. Fatigue design. 2nd ed. New Jersey: Pergamon Press, 1982.
29. Peterson, R. E. Stress concentration factors. New York: John Wiley and Sons,
1974.
30. American society for testing materials [ASTM]. E4 Practice for force verification
of testing machines. In 1996 Annual book of ASTM standards. 03.01
vols. pp. 24-32. USA: American society for testing materials, 1996.



ภาคผนวก

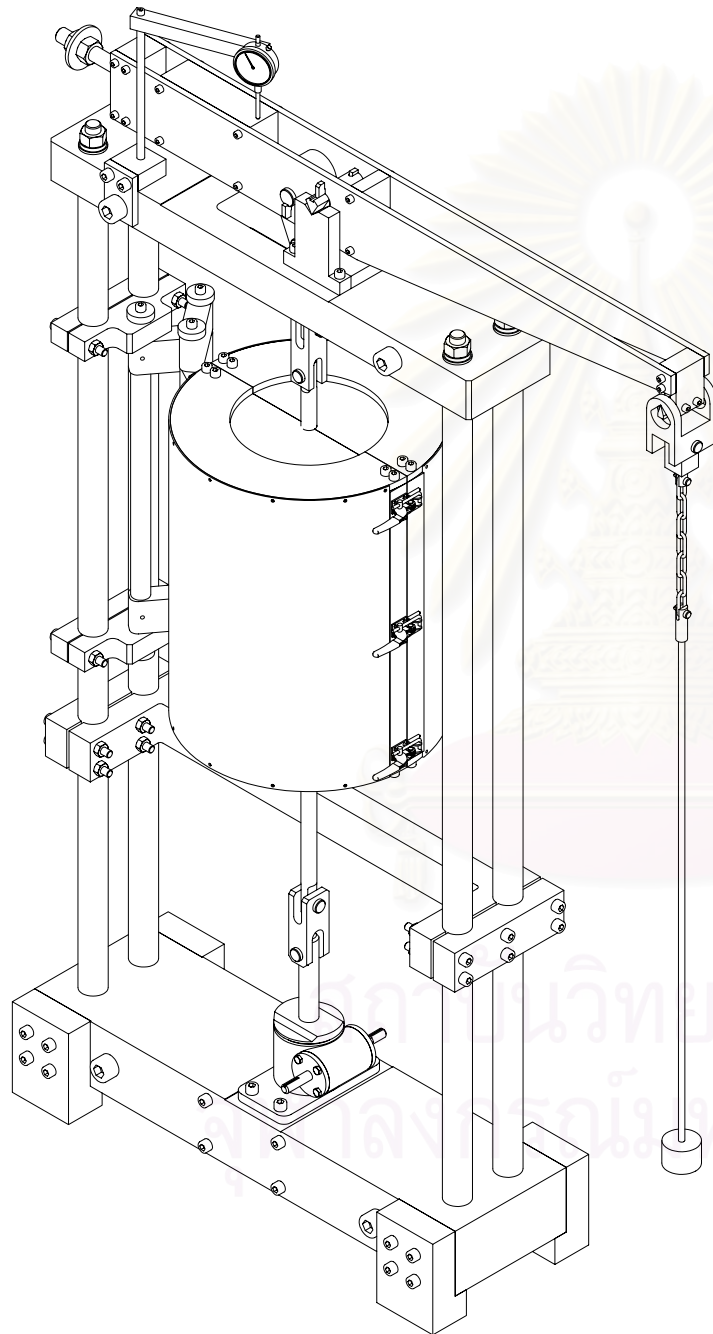
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

แบบรายละเอียดของเครื่องทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

AN UNIAXIAL CREEP TESTING MACHINE

SCALE: 1:9

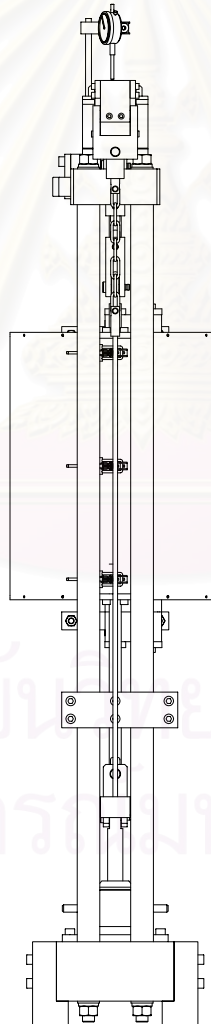
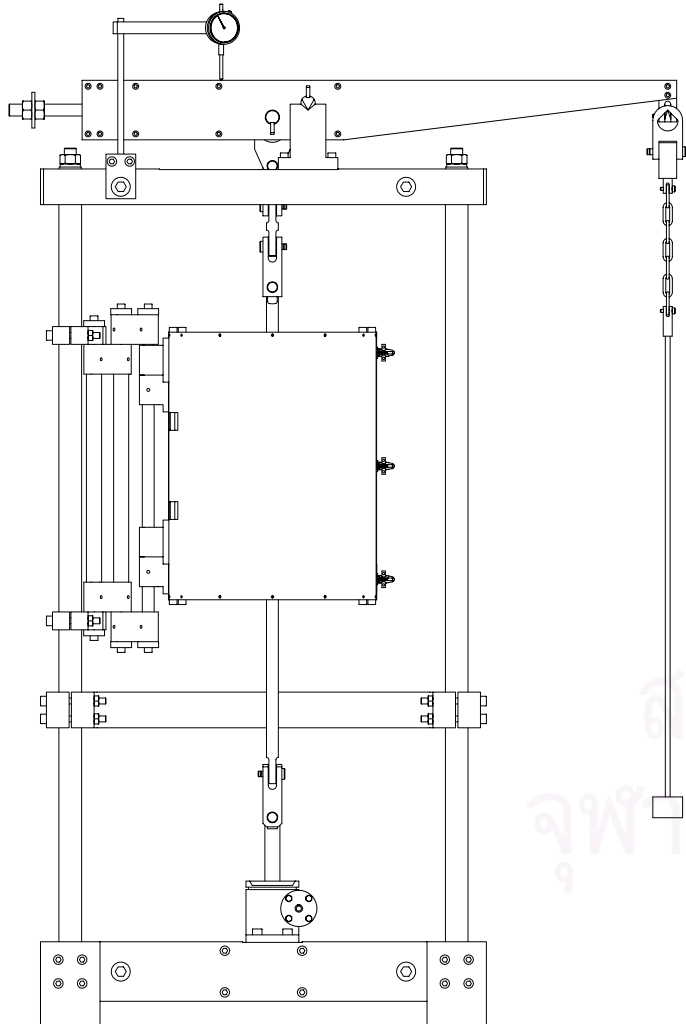
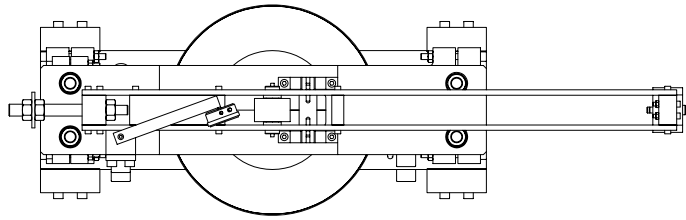
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

001



สถาบันส่งเสริมบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

AN UNIAXIAL CREEP TESTING MACHINE

SCALE: 1:12

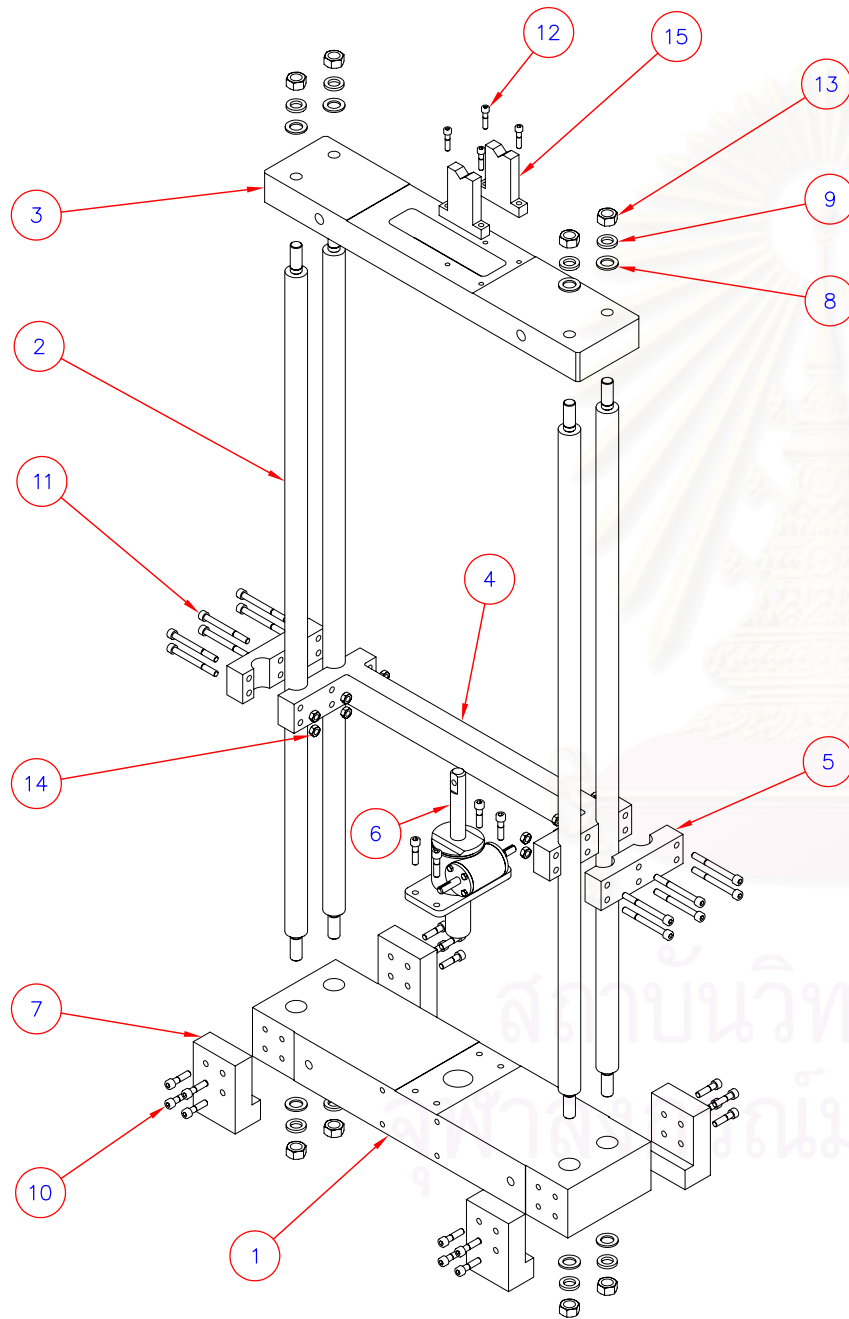
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 11/04/05

DRAWN BY: TOON

002



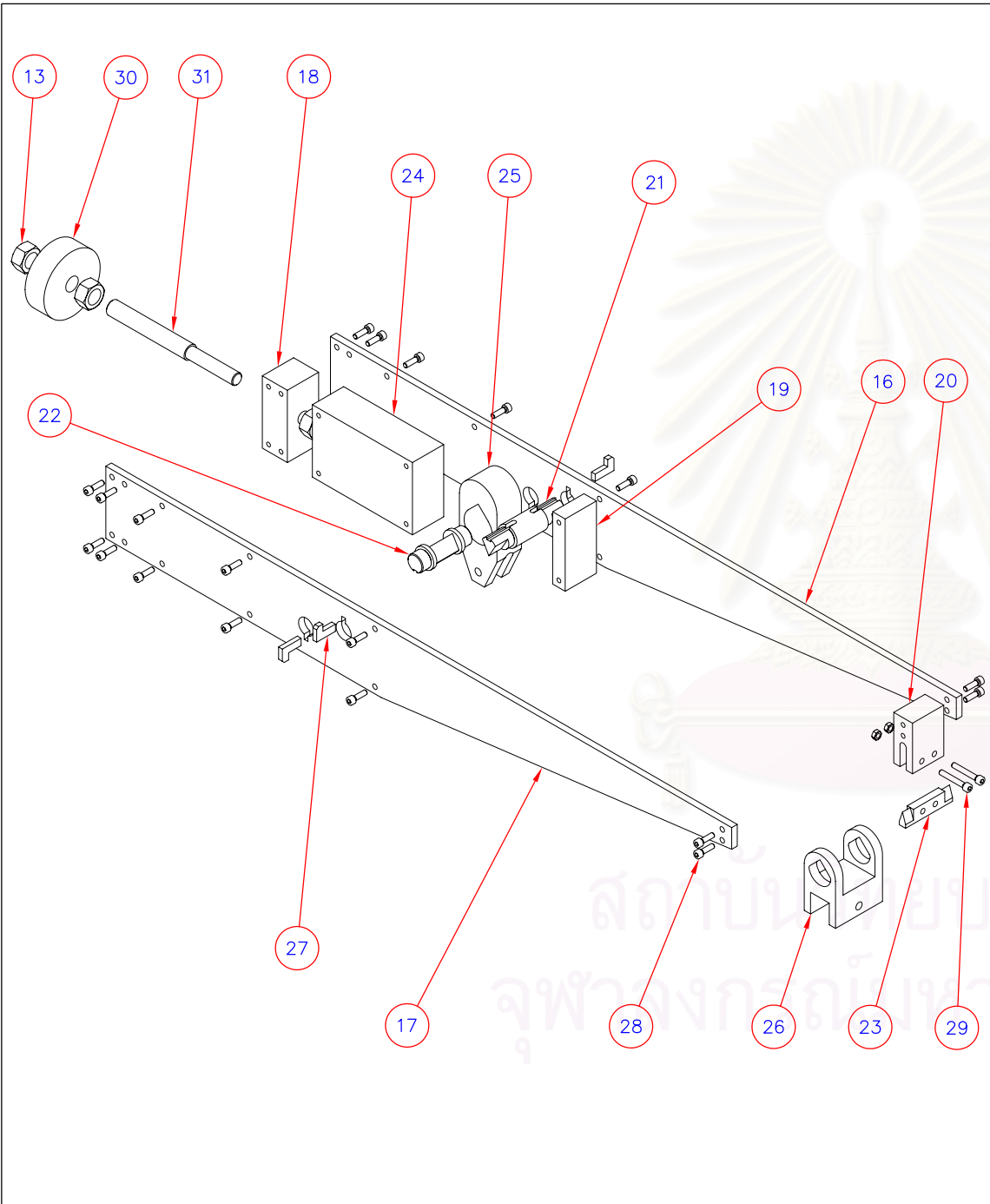
15	FULCRUM	2	AISI 4340
14	HEX NUT	16	M10
13	HEX NUT	12	M20
12	HEX SOCKET BOLT	10	M8, 35 LONG , 20 THREAD LENGTH
11	HEX SOCKET BOLT	20	M10, 90 LONG , 30 THREAD LENGTH
10	HEX SOCKET BOLT	16	M10, 60 LONG , 25 THREAD LENGTH
9	SPRING WASHER	8	M20
8	PLAIN WASHER	8	M20
7	LEG	4	SS 400
6	SCREW ACTUATOR	1	DUFF-NORTON, MODEL SK 1802
5	MIDDLE BAR CLAMP	2	SS 400
4	MIDDLE BAR	1	SS 400
3	TOP PLATE	1	SS 400
2	COLUMN	4	STAINLESS STEEL 304
1	BASE	1	SS 400
ITEM	NAME	REQ.	NOTES

PARTS LIST

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

FRAME ASSEMBLY

SCALE: 1:12	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	003



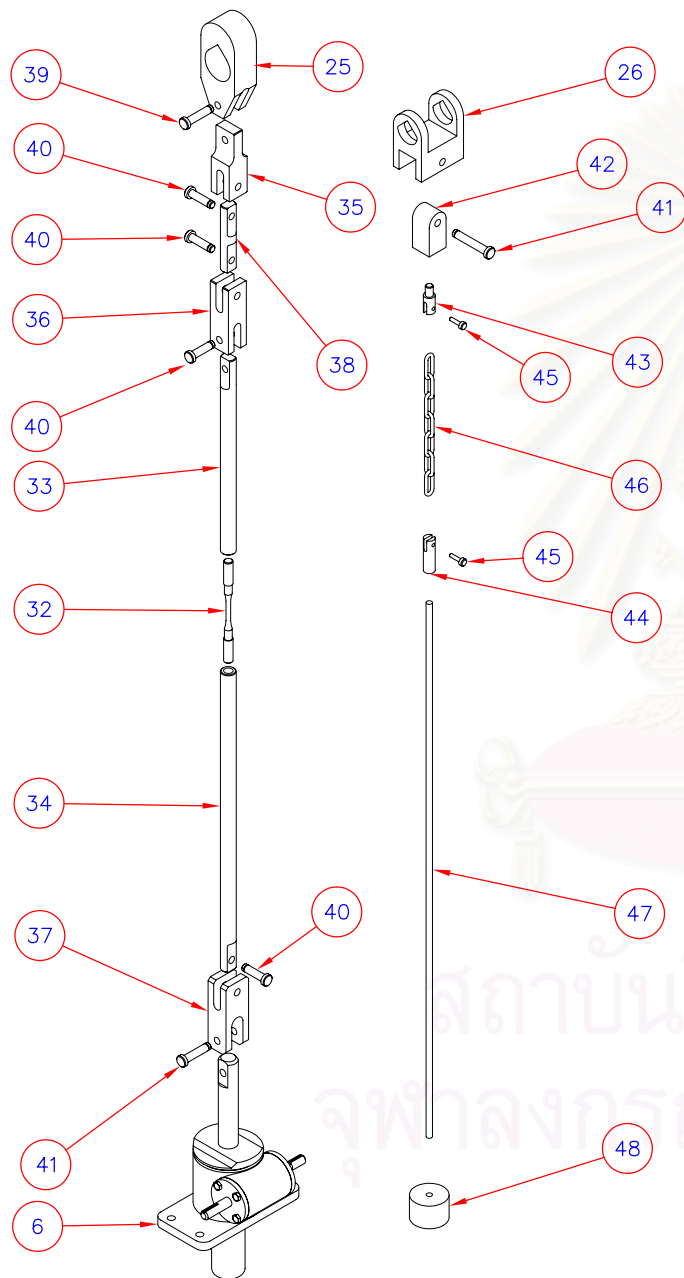
31	BALANCING ROD	1	
30	BALANCING WEIGHT	1	
29	HEX SOCKET BOLT	2	M6, 40 LONG, 30 THREAD LENGTH
28	HEX SOCKET BOLT	30	M6, 20 LONG, 18 THREAD LENGTH
27	KEY	4	AISI 4340
26	WEIGHT HANGER	1	AISI 4340
25	LOAD HANGER	1	AISI 4340
24	BALANCE WEIGHT	1	SS 400
23	WEIGHT KNIFE EDGE	1	AISI 4340
22	LOAD KNIFE EDGE	1	AISI 4340
21	CENTRAL KNIFE EDGE	1	AISI 4340
20	REAR SPACER	1	SS 400
19	MIDDLE SPACER	1	SS 400
18	FRONT SPACER	1	SS 400
17	LEFT SIDE PLATE	1	SS 400
16	RIGHT SIDE PLATE	1	SS 400
ITEM	NAME	REQ.	NOTES

PARTS LIST

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

LEVER ARM ASSEMBLY

SCALE: 1:9	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	004



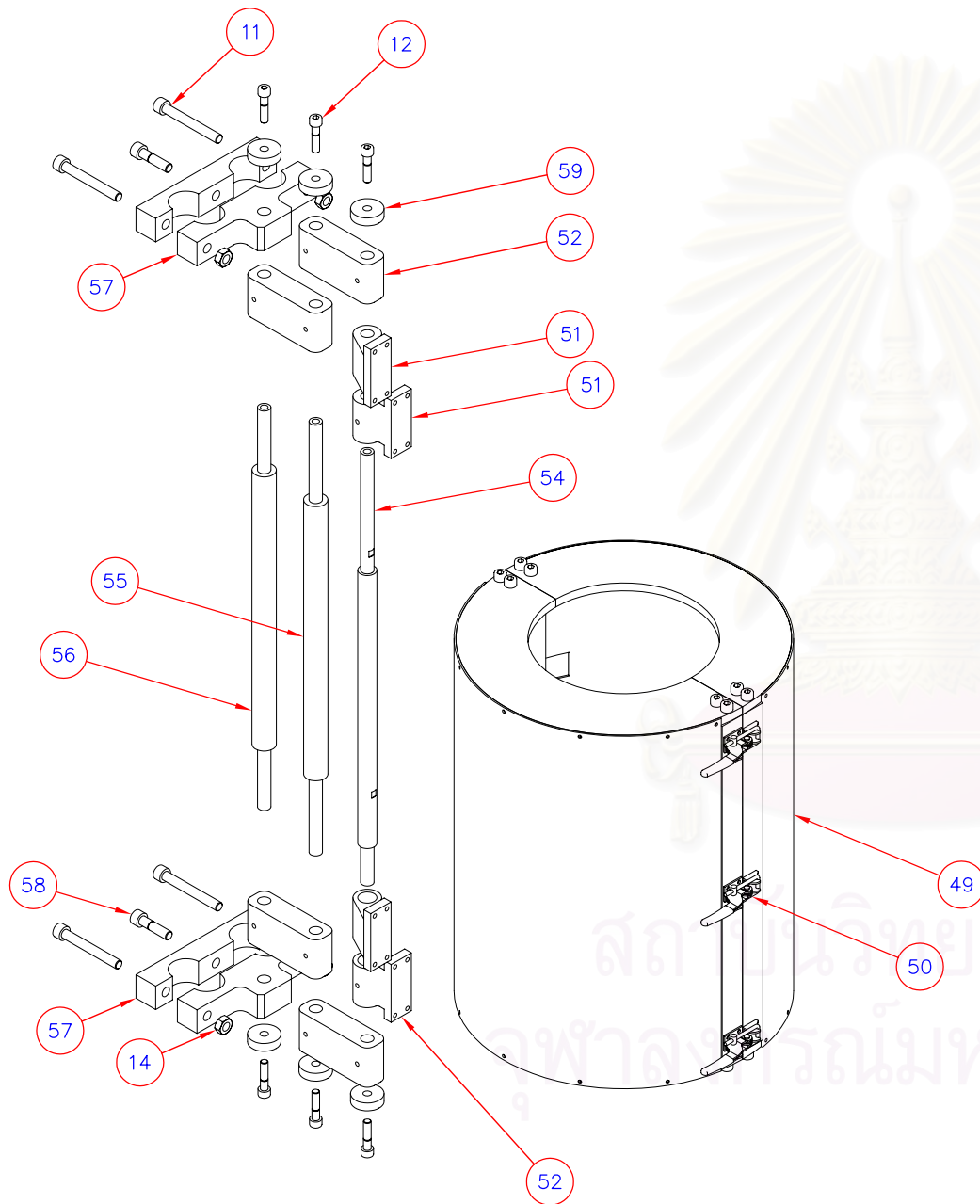
48	WEIGHT BUTTON	1	SS400
47	WEIGHT ROD	1	STAINLESS STEEL 304
46	CHAIN	1	STAINLESS STEEL 304
45	CHAIN PIN	2	STAINLESS STEEL 304
44	CHAIN JOINT II	1	STAINLESS STEEL 304
43	CHAIN JOINT I	1	STAINLESS STEEL 304
42	WEIGHT TRAIN JOINT	1	AISI 4340
41	PIN III	2	AISI 4340
40	PIN II	4	AISI 4340
39	PIN I	2	AISI 4340
38	TRANSITION PULL ROD	1	STAINLESS STEEL 310S
37	UNIVERSAL JOINT III	1	AISI 4340
36	UNIVERSAL JOINT II	1	AISI 4340
35	UNIVERSAL JOINT I	1	AISI 4340
34	LOWER PULL ROD	1	STAINLESS STEEL 310S
33	UPPER PULL ROD	1	STAINLESS STEEL 310S
32	SPECIMEN		
ITEM	NAME	REQ.	NOTES

PARTS LIST

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

LOAD TRAIN & WEIGHT TRAIN ASSEMBLY

SCALE: 1: 9	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	005



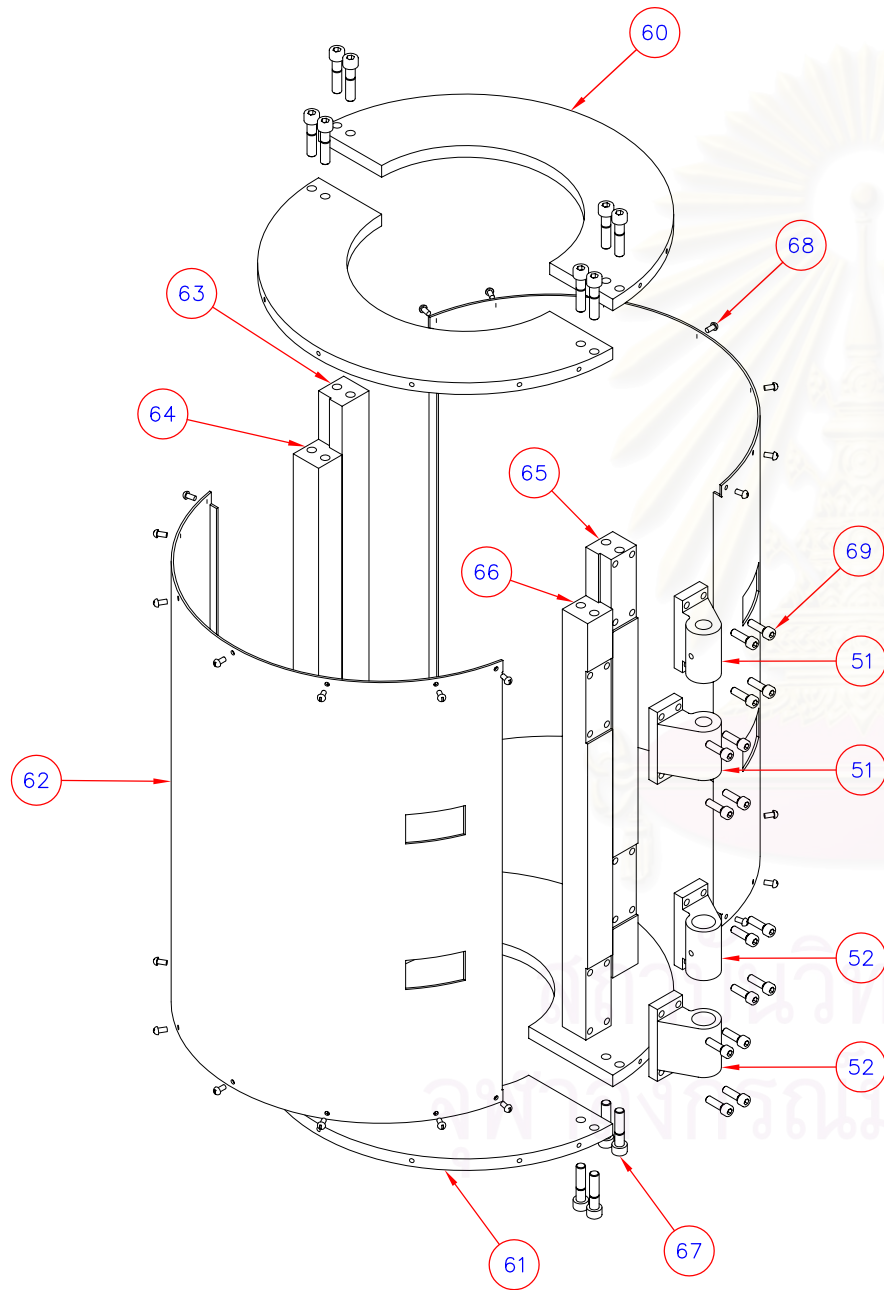
59	WASHER	6	STAINLESS STEEL 304
58	HEX SOCKET BOLT	4	M10, 75 LONG, 20 THREAD LENGTH
57	FURNANCE SUPPORT	2	SS 400
56	FRAME ROD	1	STAINLESS STEEL 304
55	INTERMEDIATE ROD	1	STAINLESS STEEL 304
54	CASING ROD	1	STAINLESS STEEL 304
53	MOUNTING BRACKET	4	SS 400
52	CASING BRACKET II	2	STAINLESS STEEL 304
51	CASING BRACKET I	2	STAINLESS STEEL 304
50	LATCH CLAMP	3	DE-STA-CO, MODEL 323-MSS
49	FURNANCE CASING	1	STAINLESS STEEL 304
ITEM	NAME	REQ.	NOTES

PARTS LIST

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

FURNACE MOUNTING ASSEMBLY

SCALE: 1:7	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	006



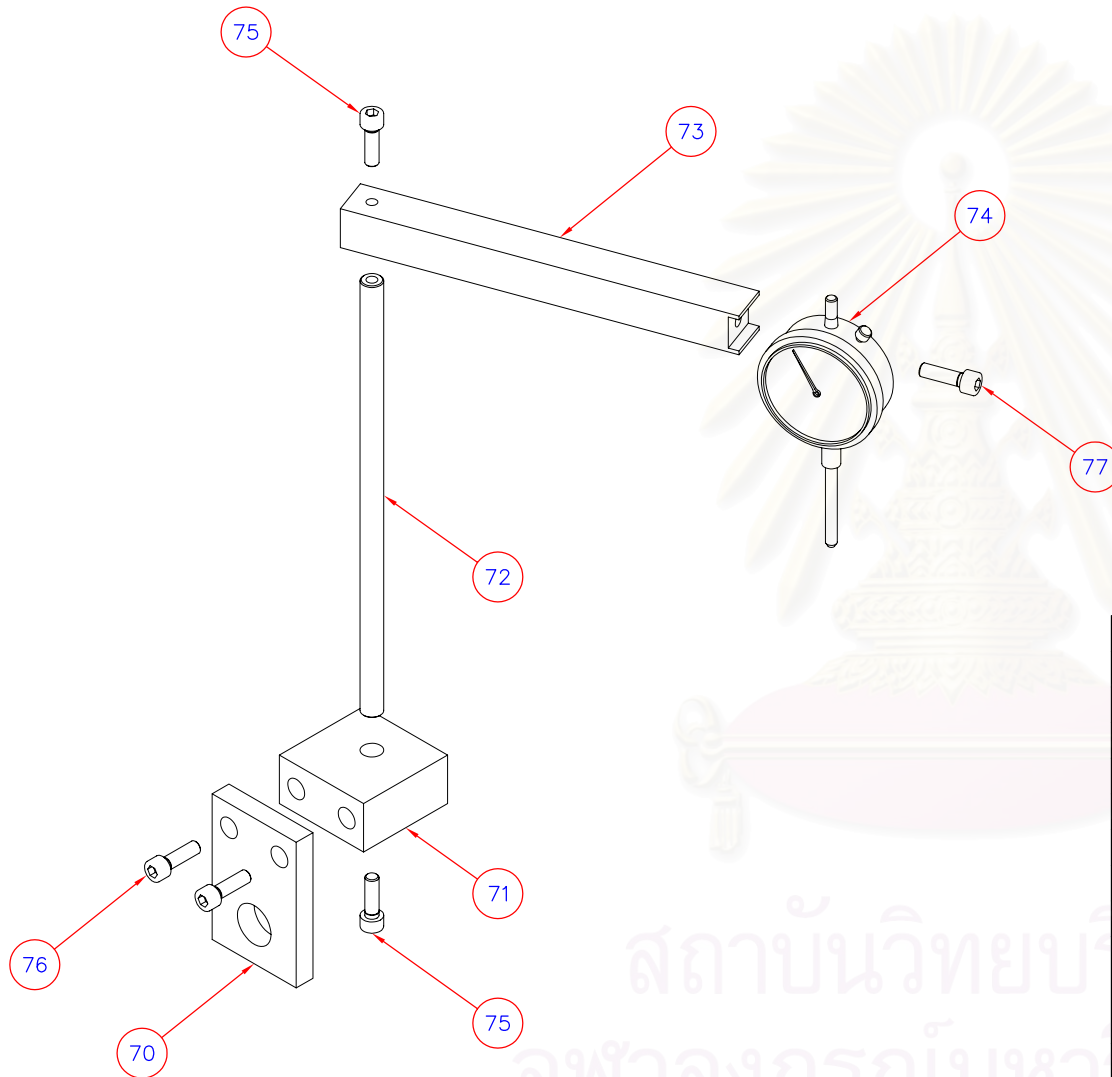
69	HEX SOCKET BOLT	16	M5, 25 LONG, 20 THREAD LENGTH
68	HR-SCREW	28	M4, 10 LONG, STAINLESS STEEL
67	HEX SOCKET BOLT	16	M8, 25 LONG, STAINLESS STEEL
66	FACE BAR IV	1	STAINLESS STEEL 304
65	FACE BAR III	1	STAINLESS STEEL 304
64	FACE BAR II	1	STAINLESS STEEL 304
63	FACE BAR I	1	STAINLESS STEEL 304
62	CASING SHELL	2	STAINLESS STEEL 304
61	BOTTOM PLATE	2	STAINLESS STEEL 304
60	TOP PLATE	2	STAINLESS STEEL 304
ITEM	NAME	REQ.	NOTES

PARTS LIST

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

FURNACE CASING ASSEMBLY

SCALE: 1: 5	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	007



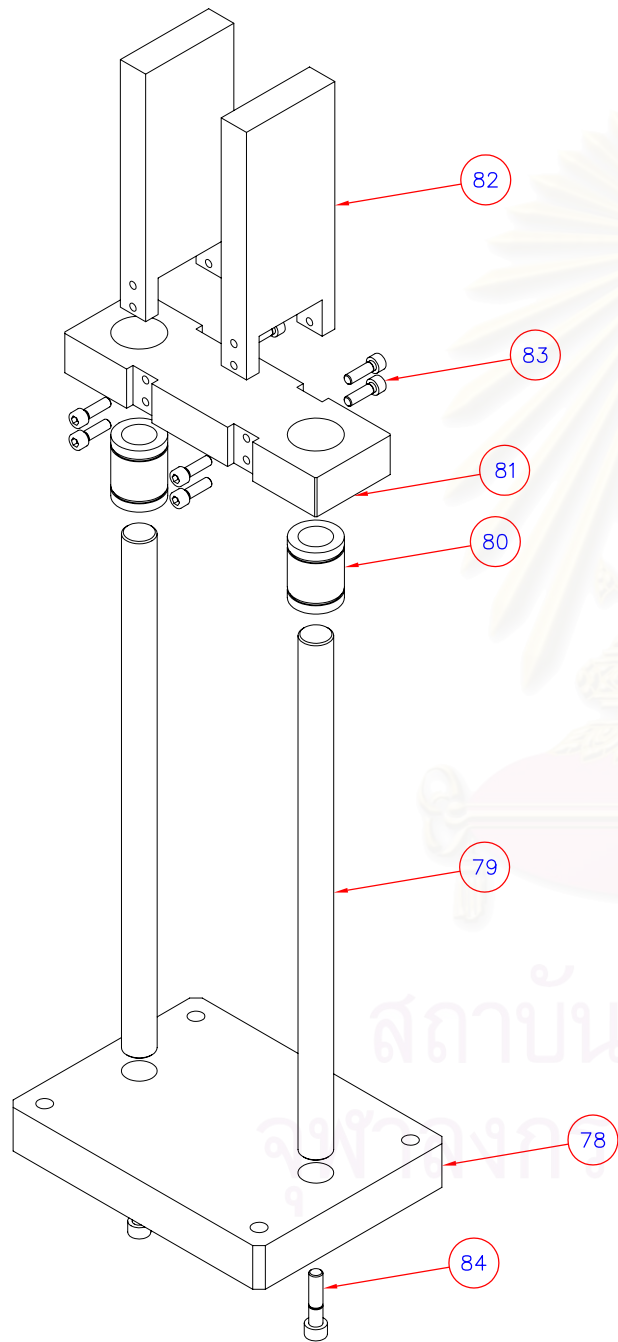
77	HEX SOCKET BOLT	1	M6, 10 THREAD LENGTH
76	HEX SOCKET BOLT	2	M10, 20 THREAD LENGTH
75	HEX SOCKET BOLT	2	M5, 25 LONG, 20 THREAD LENGTH
74	DIAL GAUGE	1	Mitutoyo 2052 FE
73	STAND ARM	1	ALUMINIUM 7075
72	STAND ROD	1	STAINLESS STEEL 304
71	STAND BASE	1	ALUMINIUM 7075
70	STAND HOLDER	1	ALUMINIUM 7075
ITEM	NAME	REQ.	NOTES

PARTS LIST

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

DIAL GAUGE STAND ASSEMBLY

SCALE: 1: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	008



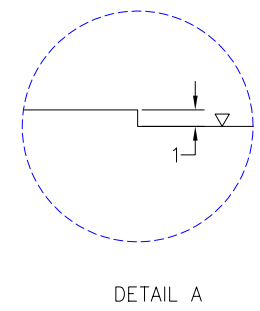
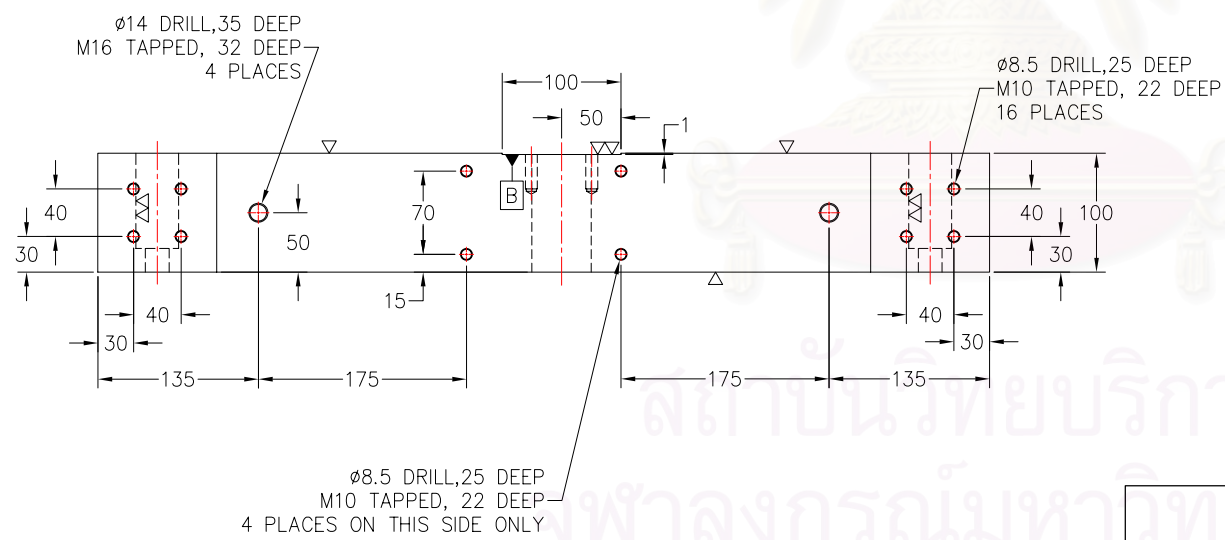
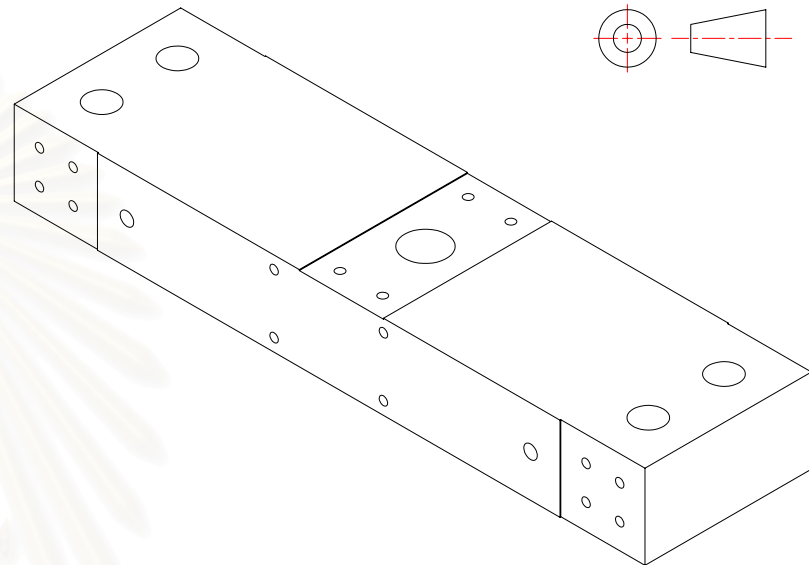
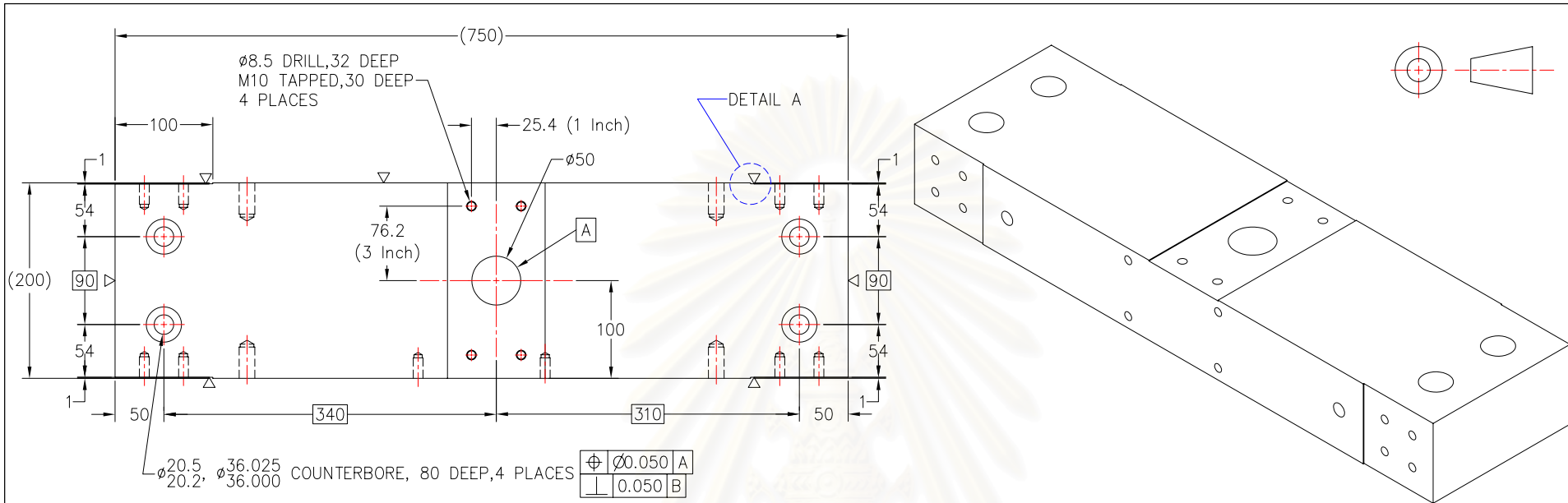
84	HEX SOCKET BOLT	4	M8, 25 THREAD LENGTH
83	HEX SOCKET BOLT	8	M6, 25 LONG, 20 THREAD LENGTH
82	WEIGHT SUPPORT	2	ALUMINIUM 7075
81	SLIDING BAR	1	ALUMINIUM 7075
80	SLIDING BUSH	2	ØID 20mm ,ØOD 32mm
79	SLIDING ROD	2	STAINLESS STEEL 304
78	ELEVATOR BASE	1	SS 400
ITEM	NAME	REQ.	NOTES

PARTS LIST

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

WEIGHT ELEVATOR ASSEMBLY

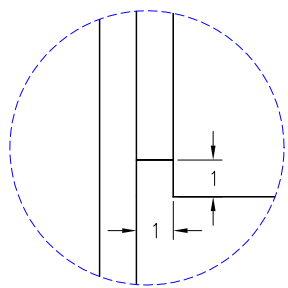
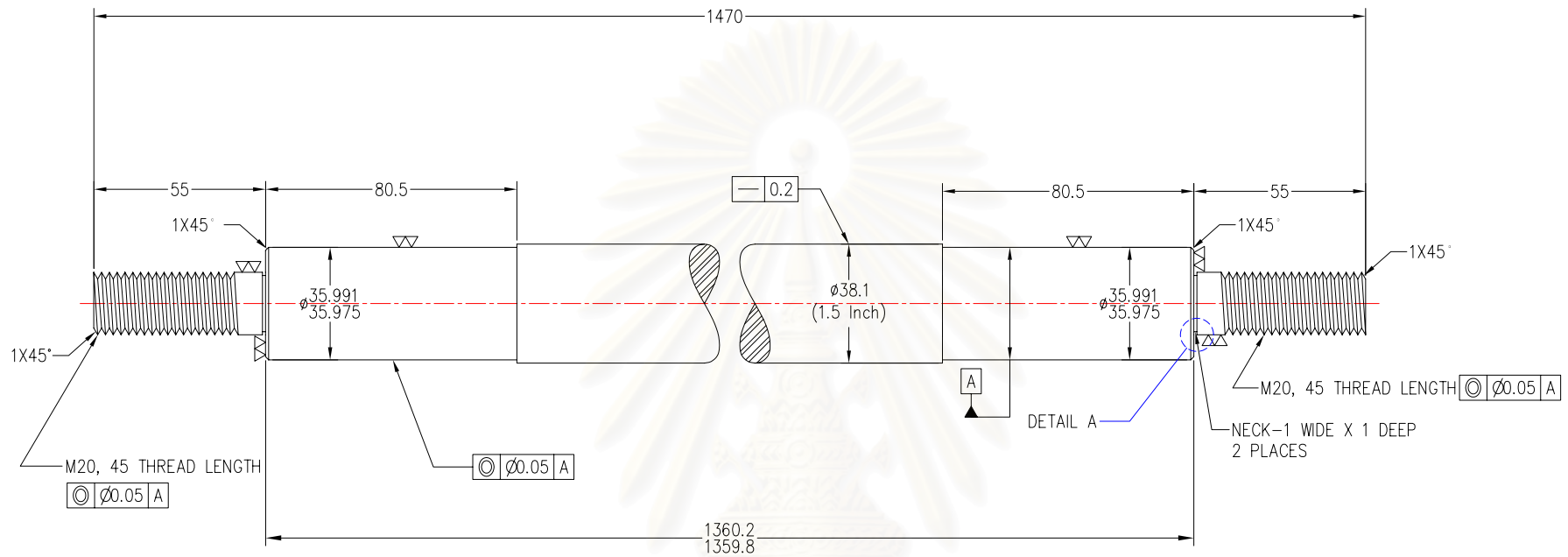
SCALE: 1: 4	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	009



1 BASE, SS 400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
BASE		
SCALE: 1: 6	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	010



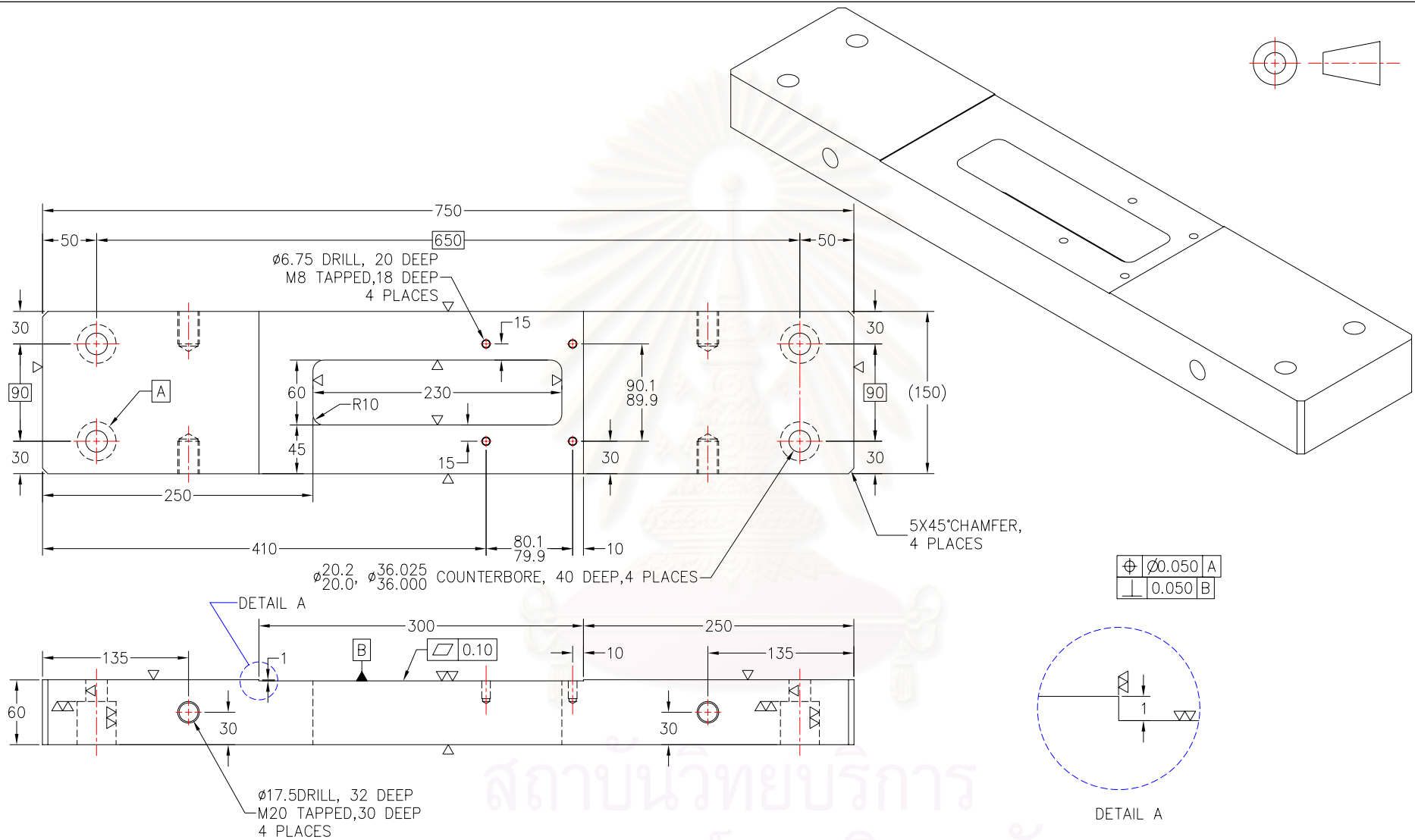
DETAIL A

2 COLUMN, STAINLESS STEEL 304, 4 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ±0.2 mm. unless otherwise specified

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 FACULTY OF ENGINEERING
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

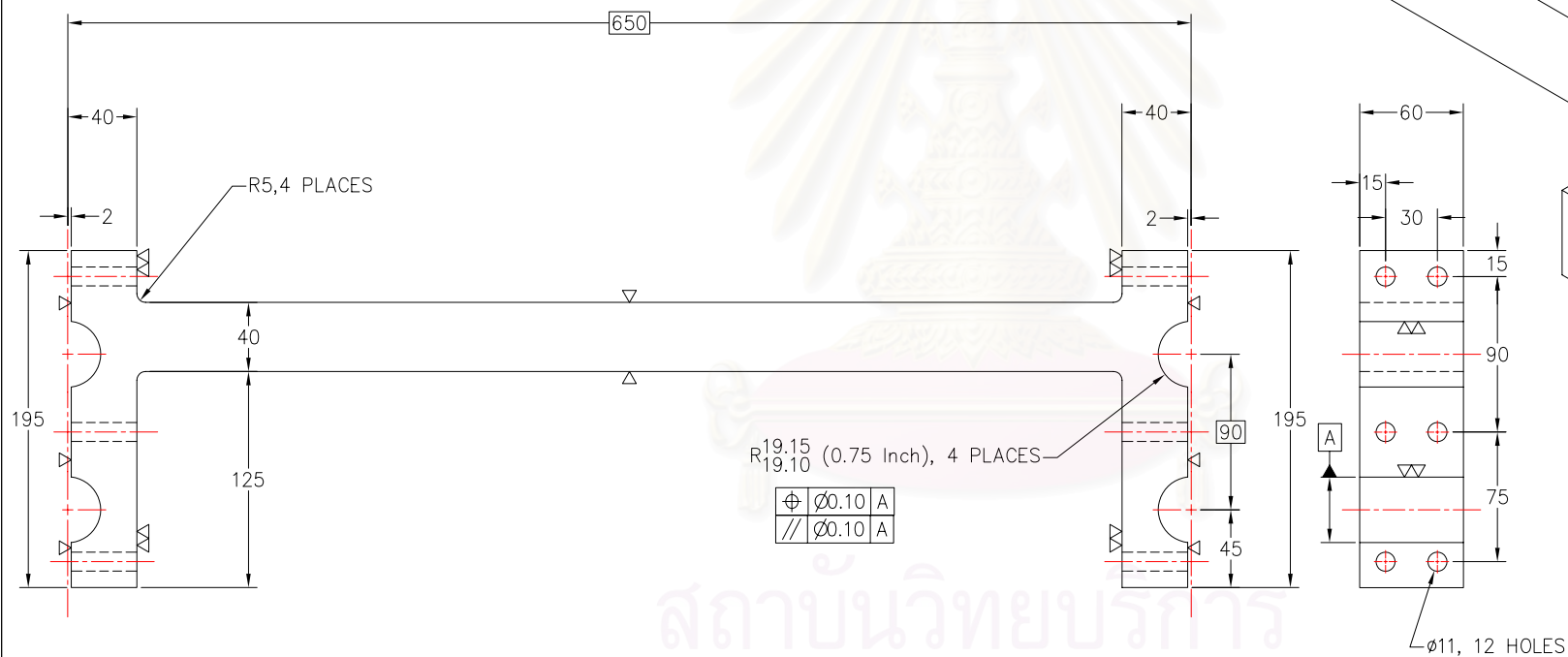
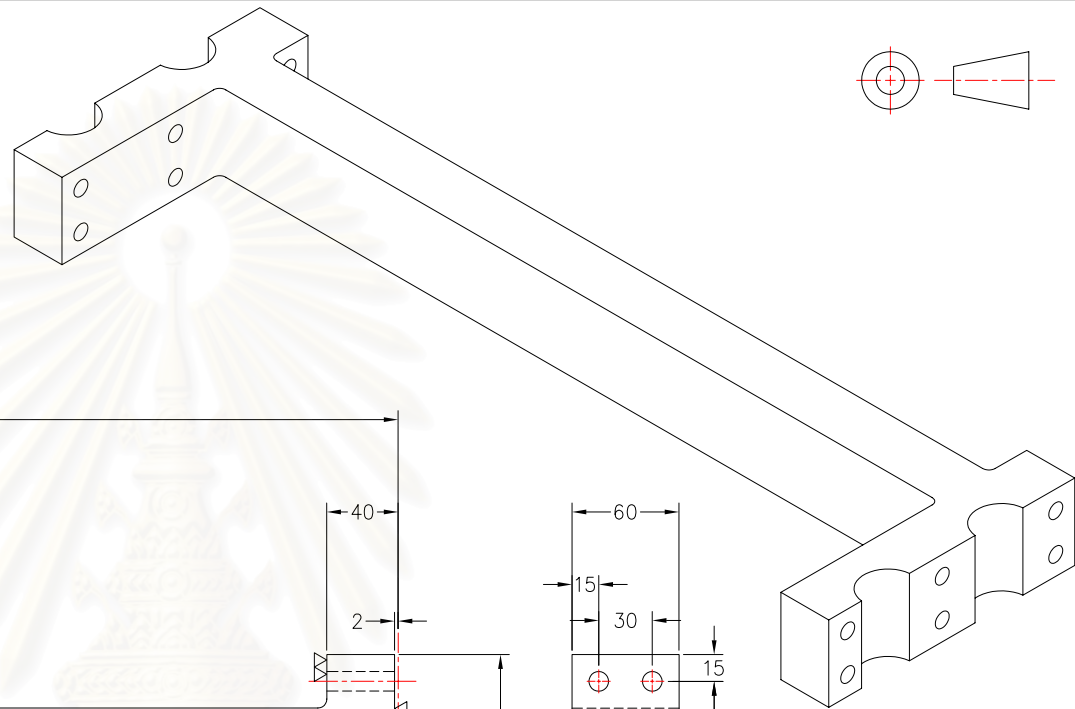
COLUMN		
SCALE: 1:2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	011



3 TOP PLATE, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
TOP PLATE		
SCALE: 1: 5	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	012



4 MIDDLE BAR, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

MIDDLE BAR

SCALE: 1: 4

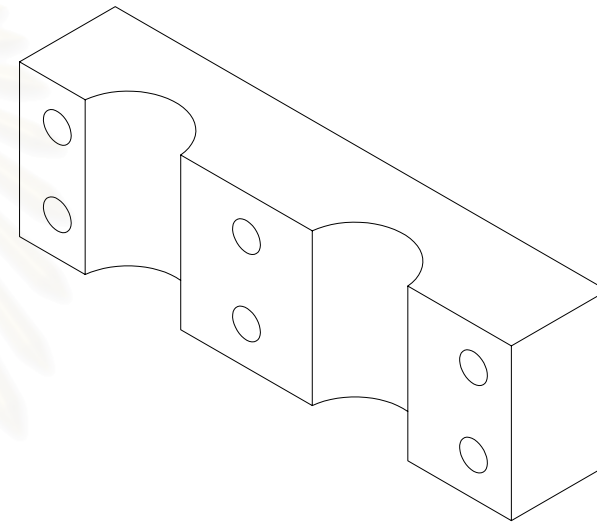
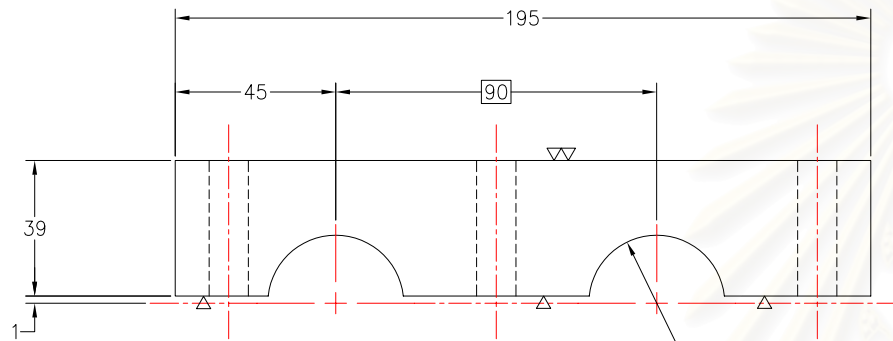
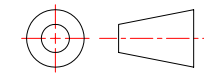
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

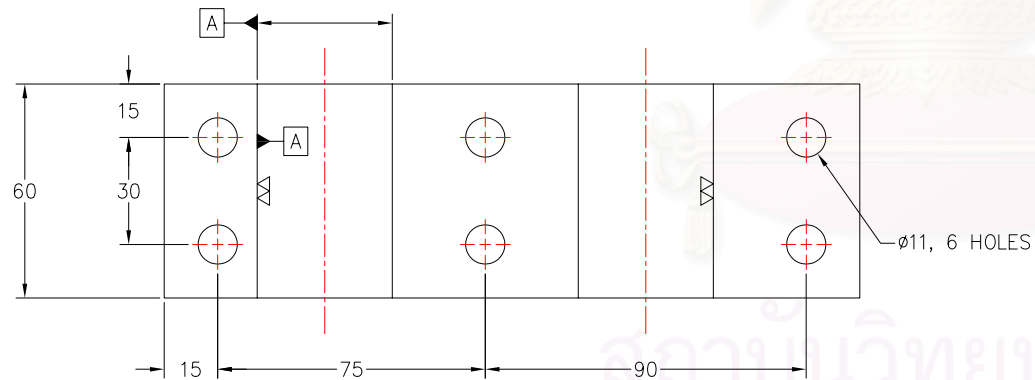
DWN: SATJAPON

013



$\varnothing 38.3$
 38.2 , 2 PLACES

\oplus	$\varnothing 0.1$ A
$//$	$\varnothing 0.10$ A



$\varnothing 11$, 6 HOLES

5 MIDDLE BAR CLAMP, SS400, 2 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

MIDDLE BAR CLAMP

SCALE: 1:2

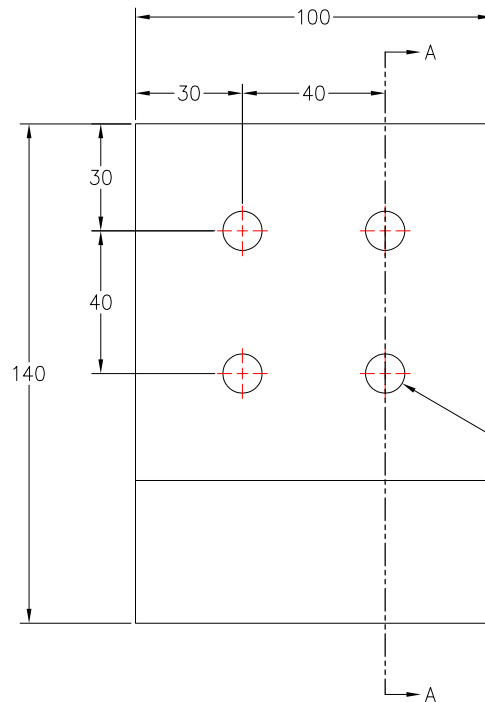
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

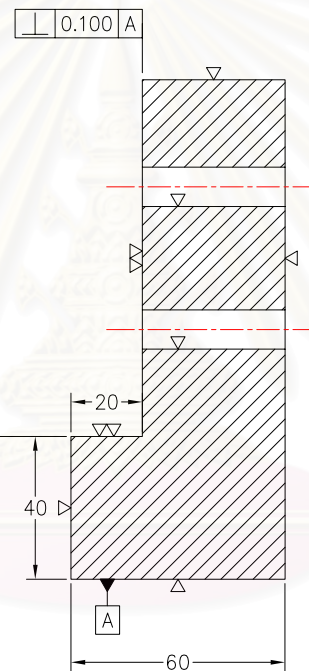
DWN: SATJAPON

014

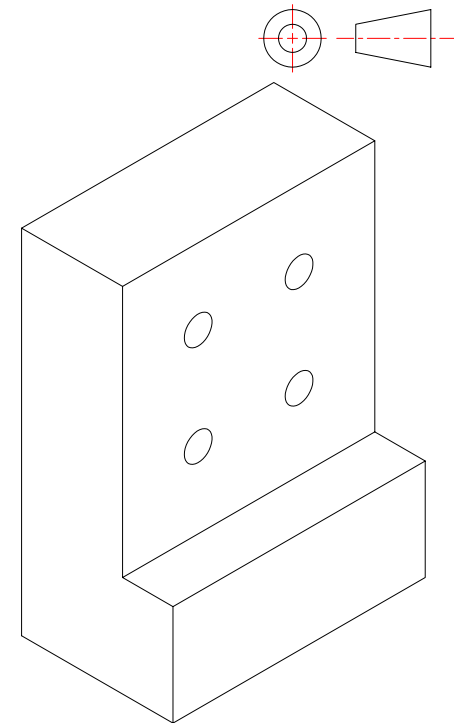


∅10 DRILL, 4 HOLES

∥ 0.100 | A



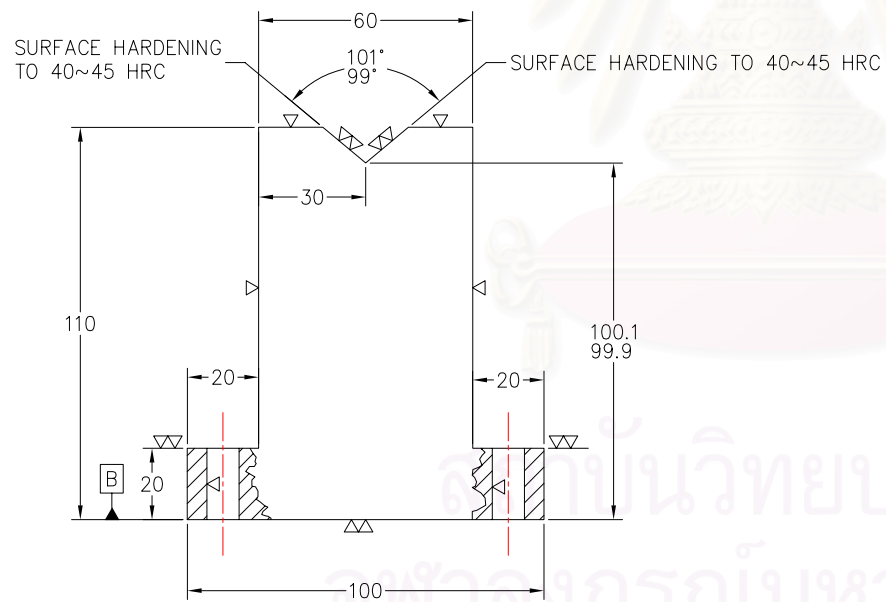
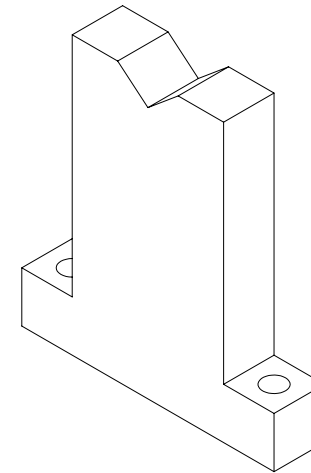
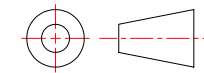
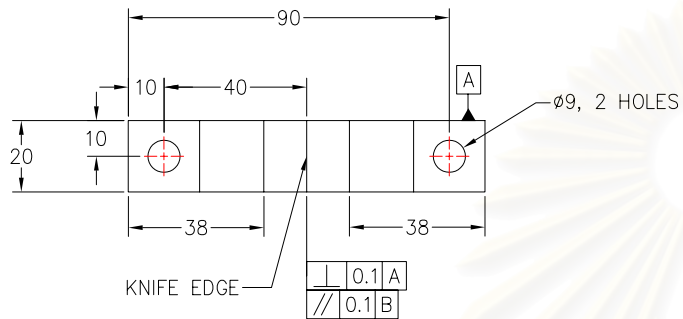
SECTIONAL VIEW A-A



7 LEG, SS400, 4 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
LEG		
SCALE: 1:2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	015



15 FULCRUM, AISI 4340, 2 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

FULCRUM

SCALE: 1:2

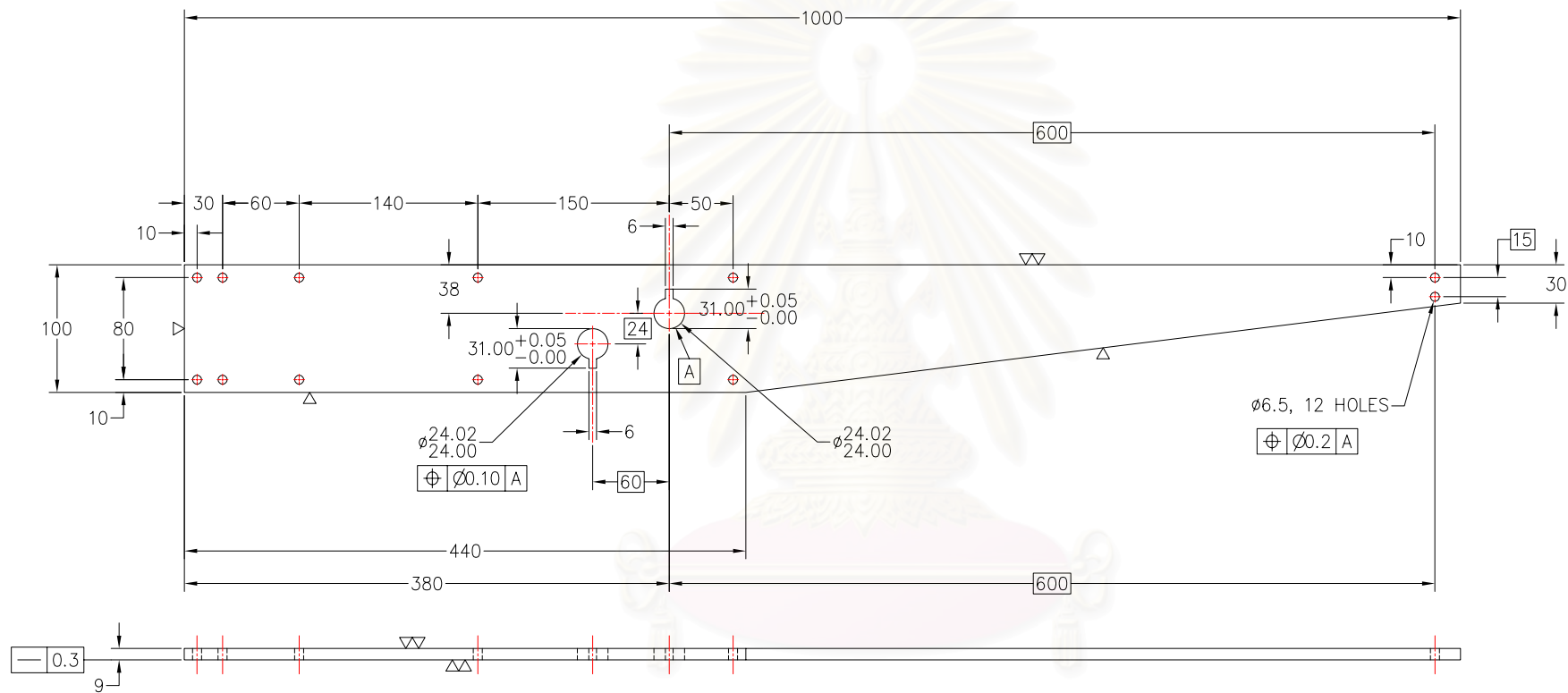
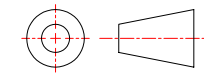
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

016



16 LEFT SIDE PLATE, SS400, 1 REQUIRED

17 RIGHT SIDE PLATE, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

SIDE PLATE

SCALE: 1: 5

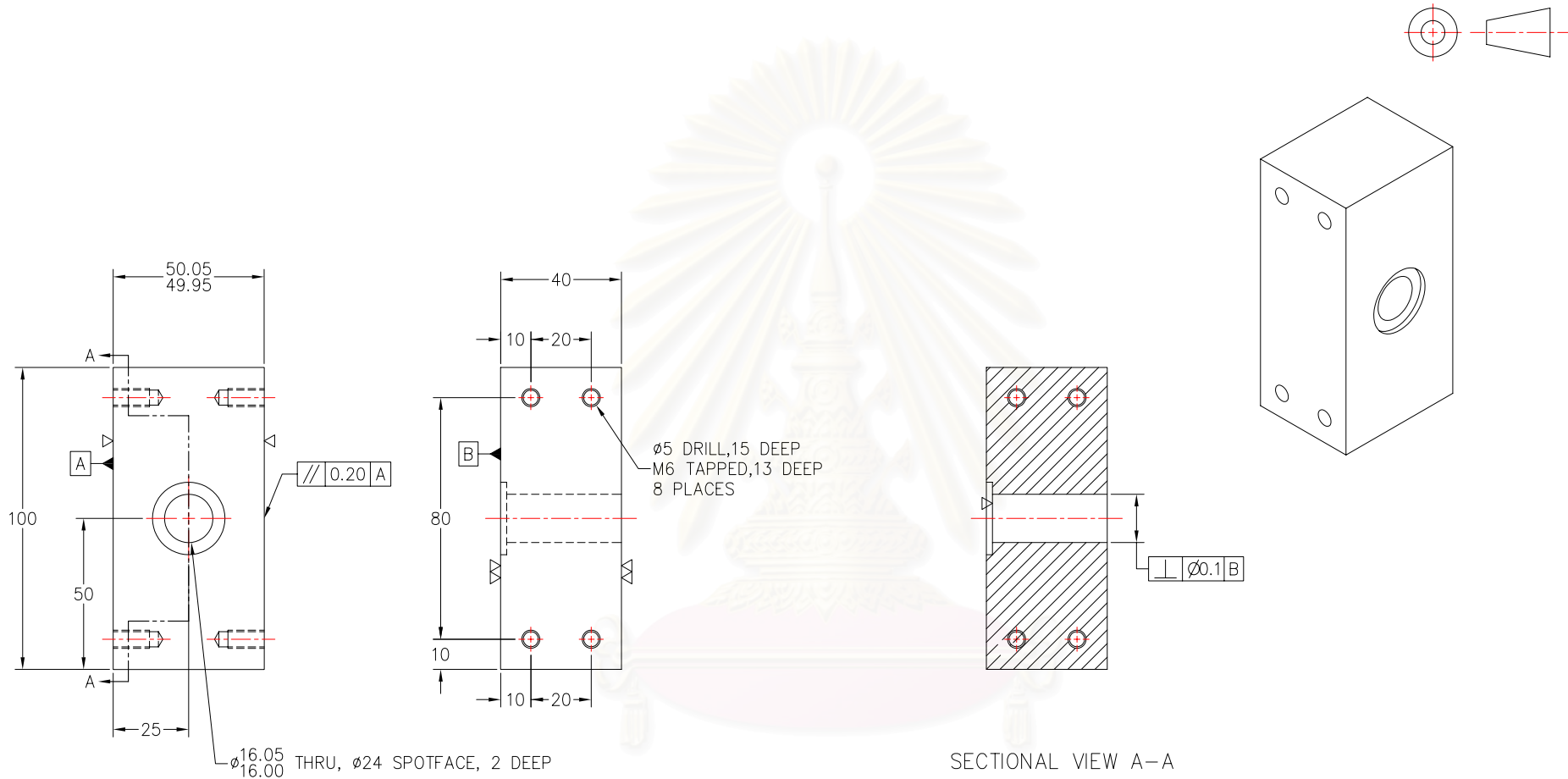
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

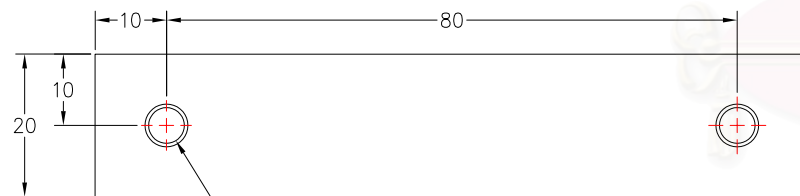
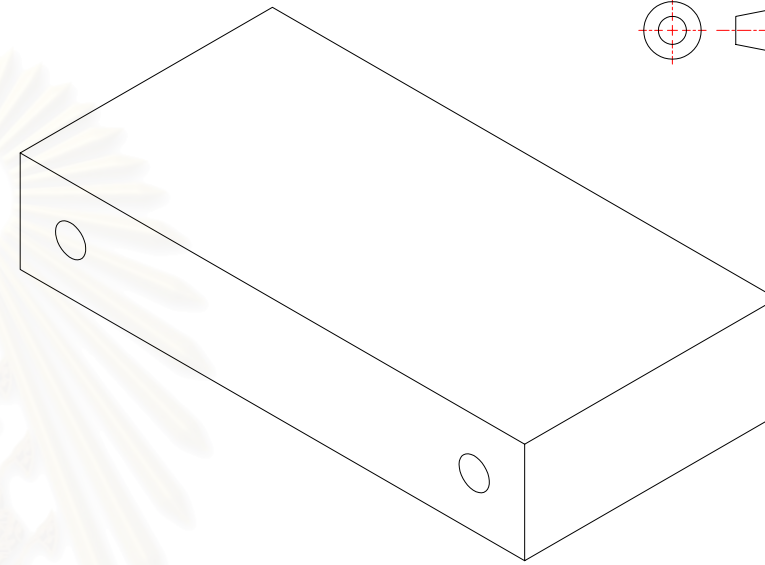
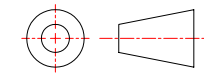
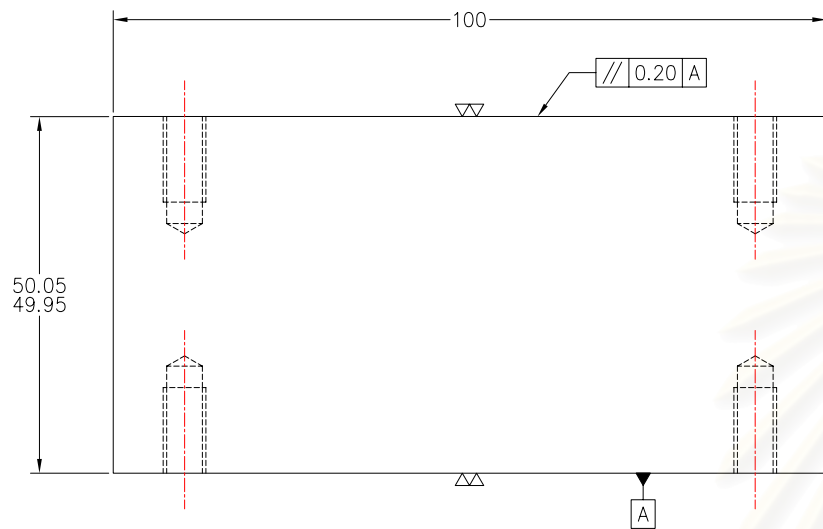
017



18 FRONT SPACER, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
FRONT SPACER		
SCALE: 1: 2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	018



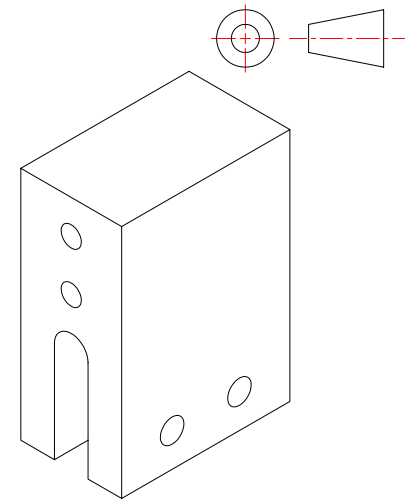
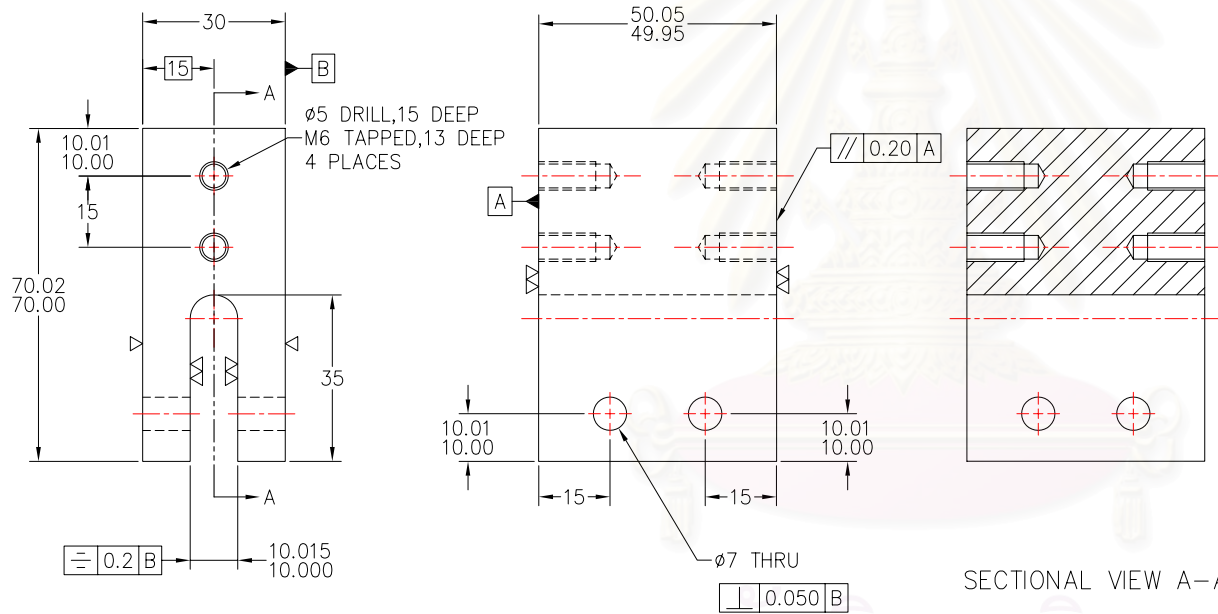
ø5 DRILL,15 DEEP
 M6 TAPPED,13 DEEP
 4 PLACES

19 MIDDLE SPACER, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 FACULTY OF ENGINEERING
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
MIDDLE SPACER		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	019

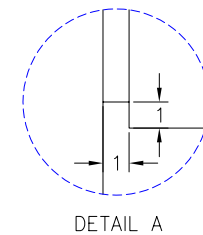
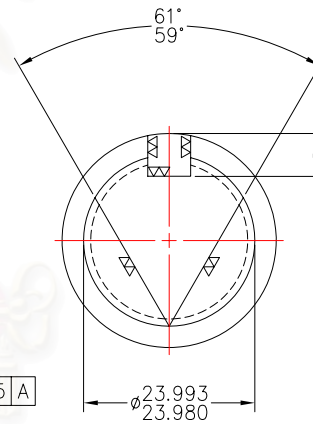
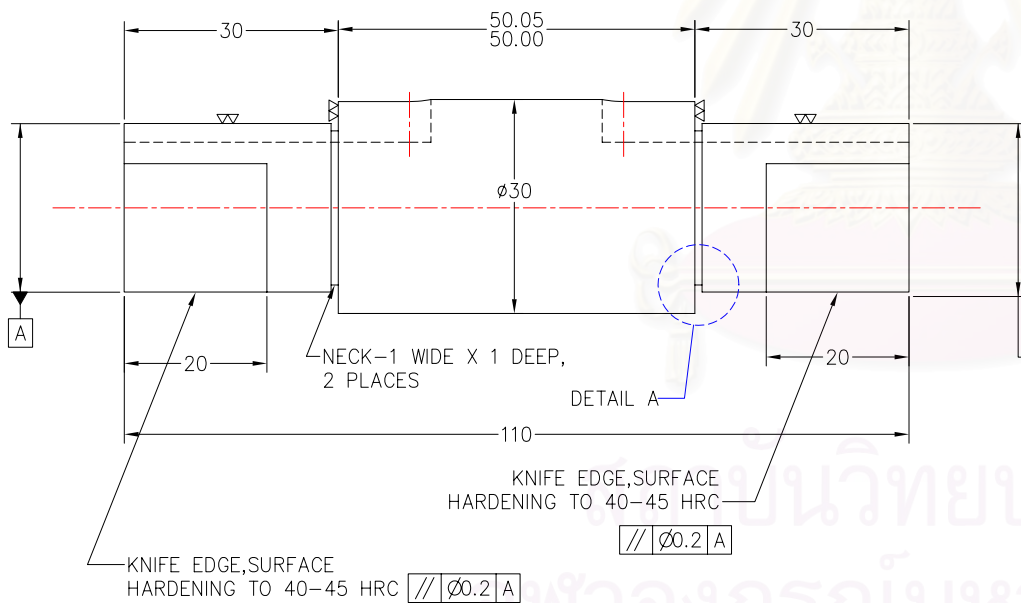
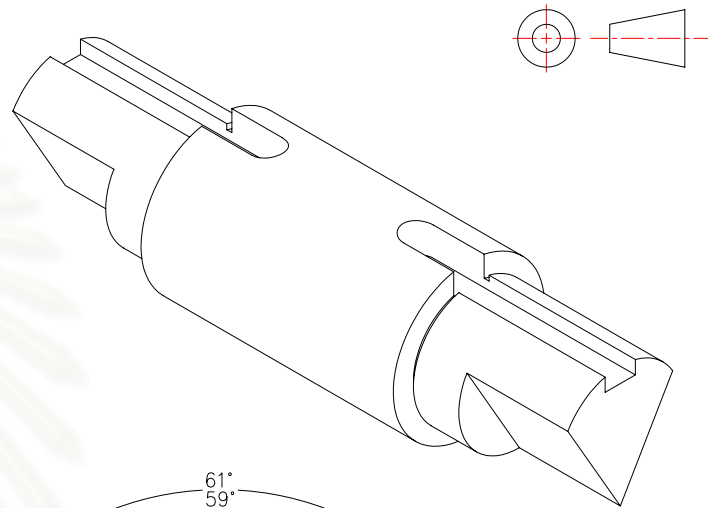
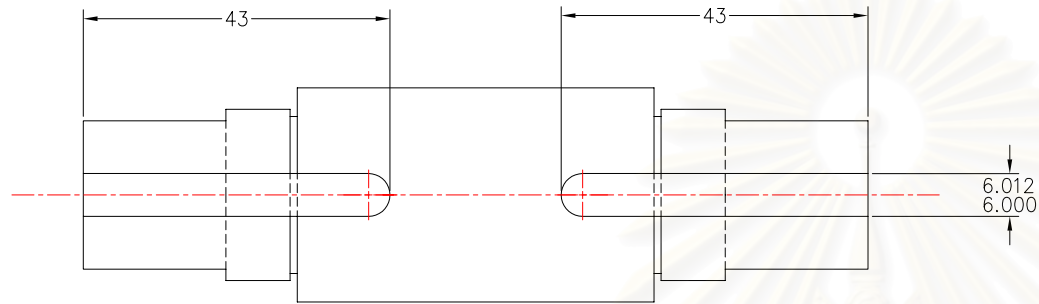


SECTIONAL VIEW A-A

20 REAR SPACER, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

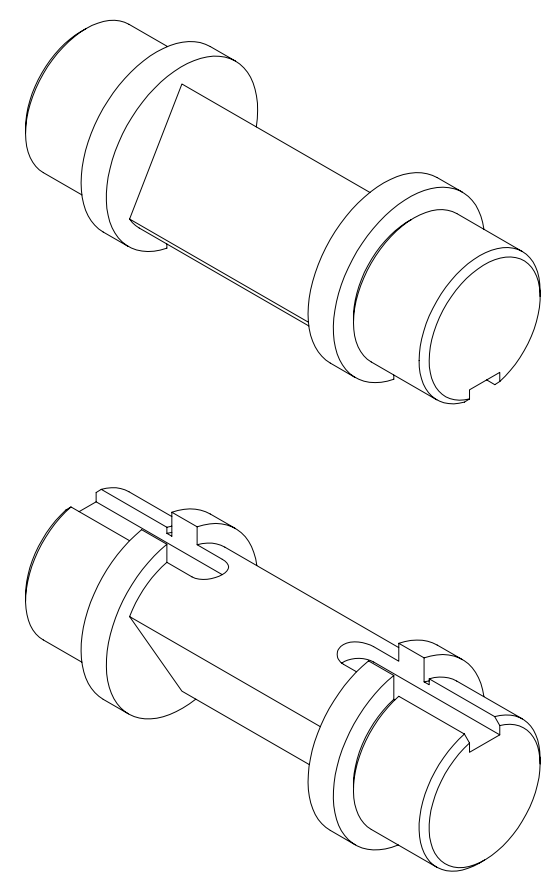
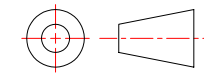
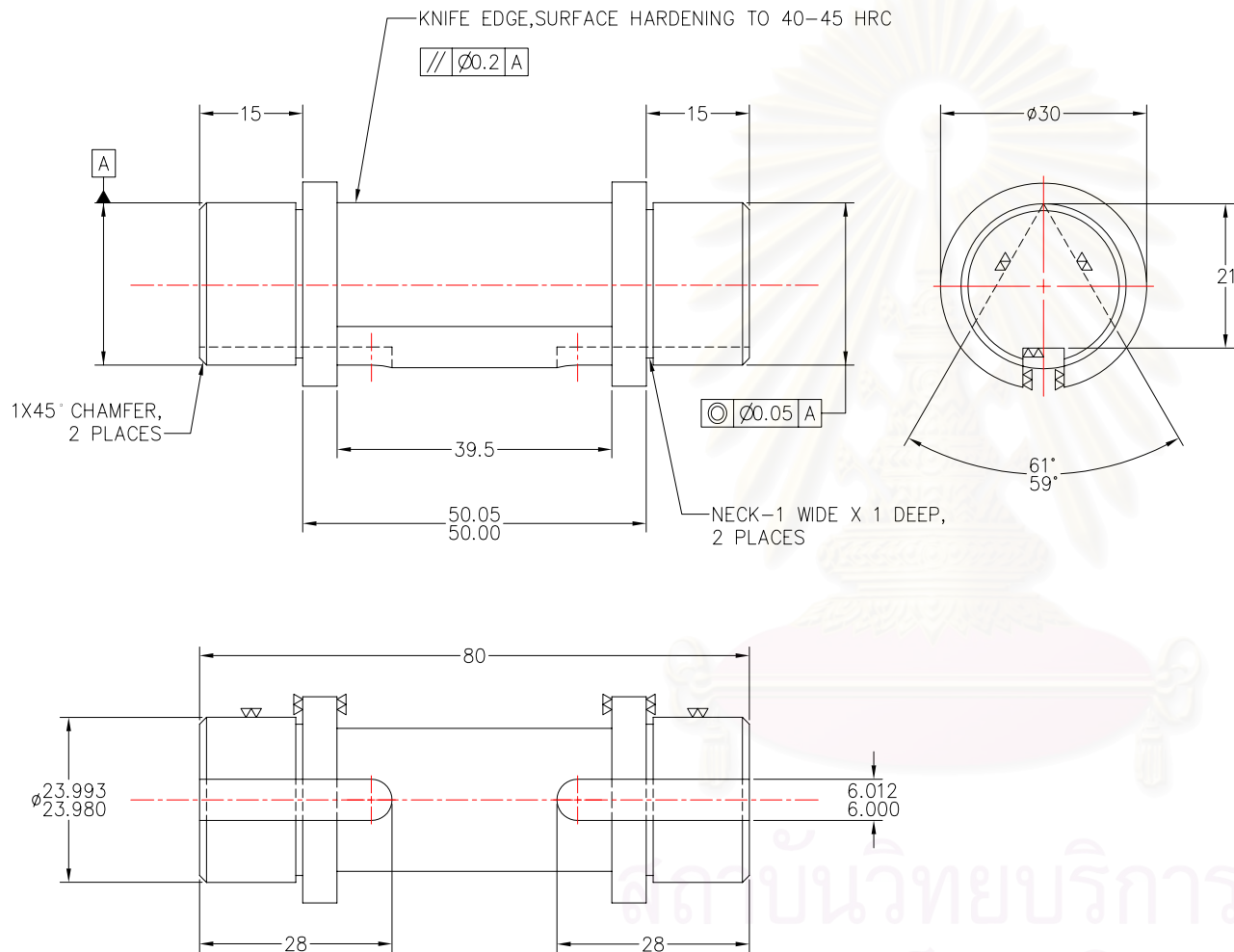
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
REAR SPACER		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	020



21 CENTRAL KNIFE EDGE, AISI 4340, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ±0.2 mm. unless otherwise specified

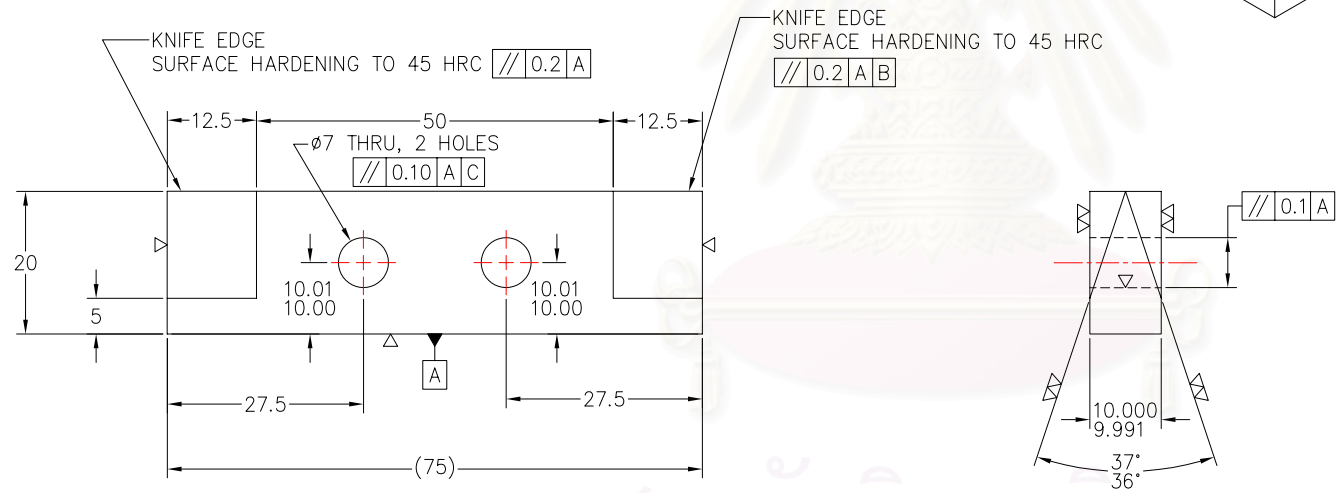
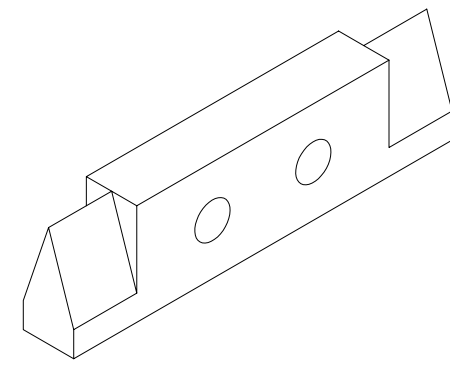
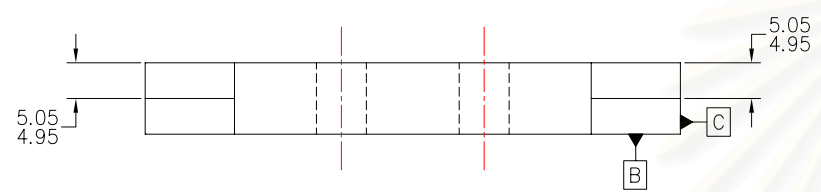
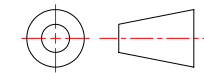
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
CENTRAL KNIFE EDGES		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	021



22 LOAD KNIFE EDGE, AISI 4340, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

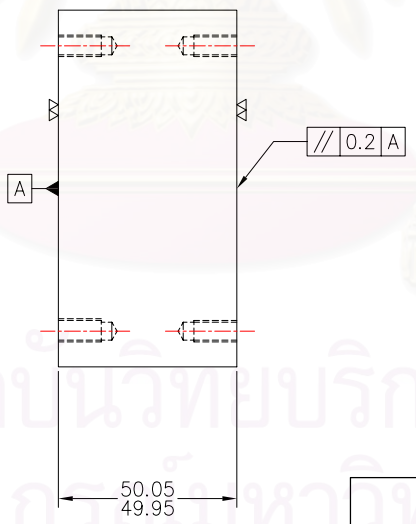
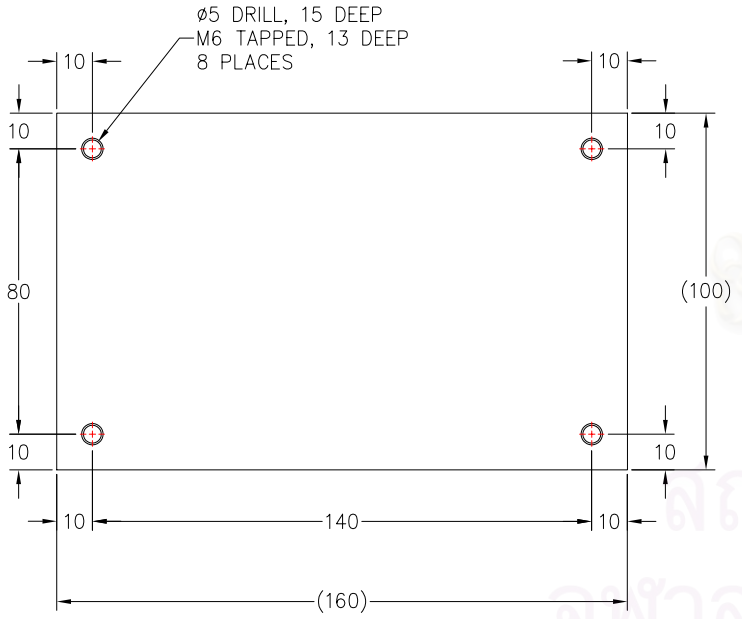
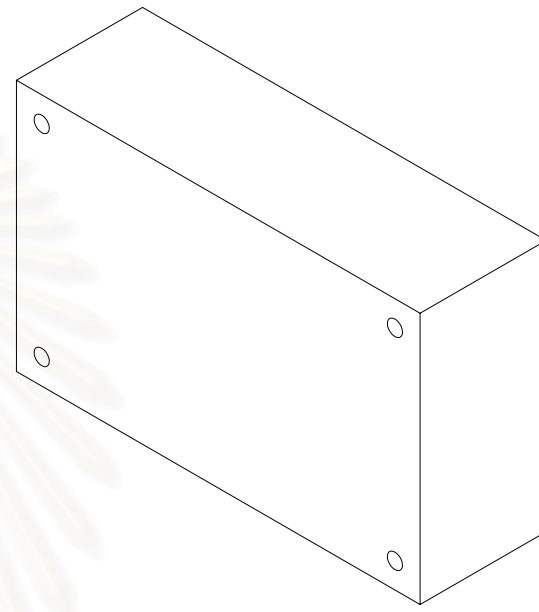
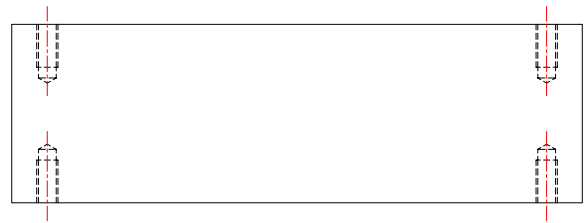
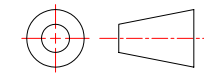
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
LOAD KNIFE EDGE		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	022



23 WEIGHT KNIFE EDGE, AISI 4340, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

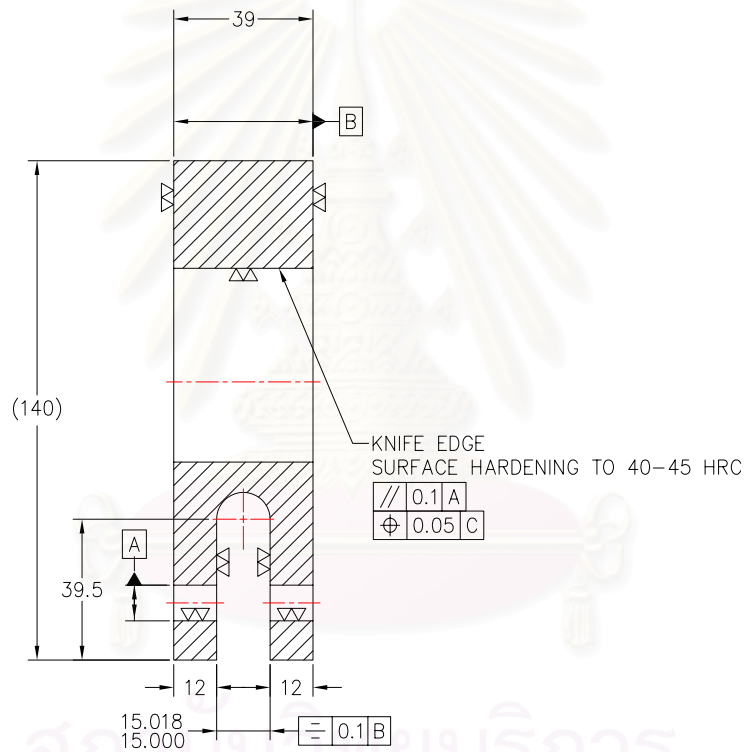
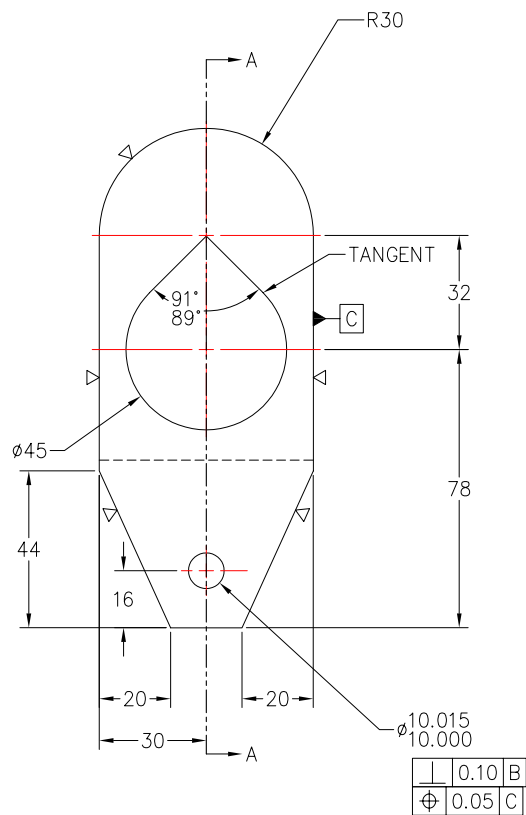
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
WEIGHT KNIFE EDGE		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	023



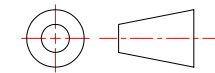
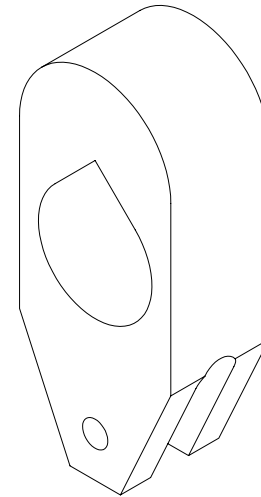
24 MAJOR BALANCE WEIGHT, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
MAJOR BALANCE WEIGHT		
SCALE: 1: 2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	024



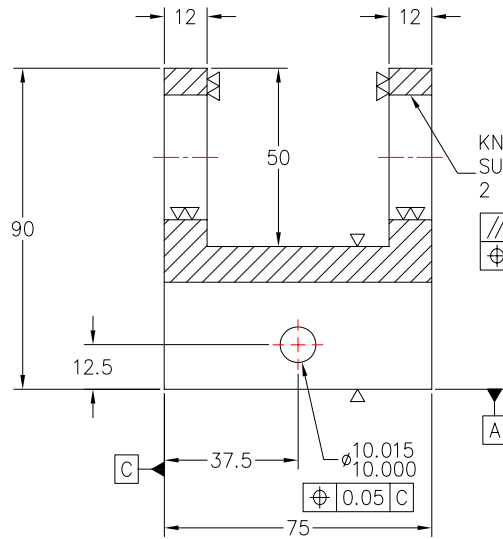
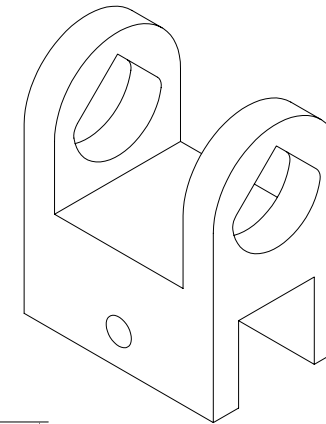
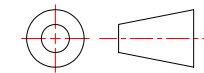
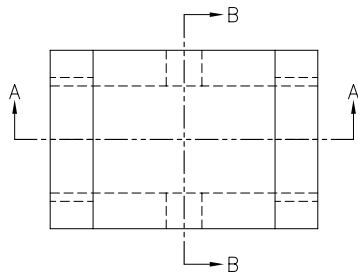
SECTIONAL VIEW A-A



25 LOAD TRAIN HANGER, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

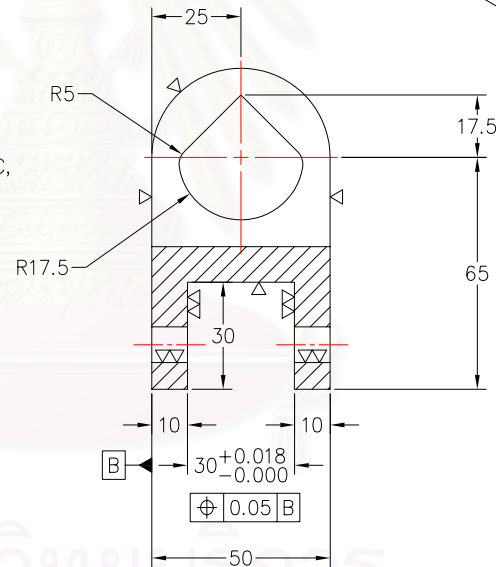
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
LOAD TRAIN HANGER		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	025



SECTIONAL VIEW A-A

KNIFE EDGE
SURFACE HARDENING TO 40-45 HRC,
2 PLACES

∕∕ ∅0.10 | A
⊕ 0.05 | B



SECTIONAL VIEW B-B

26 WEIGHT HANGER, SS400, 1 REQUIRED

Note: All dimensions are in millimetres

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

WEIGHT HANGER

SCALE: 1:2

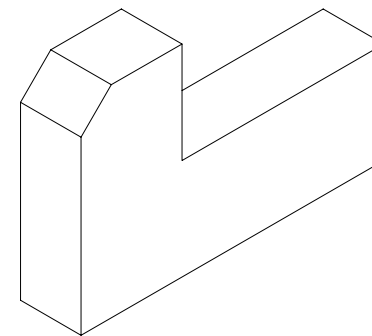
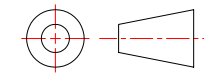
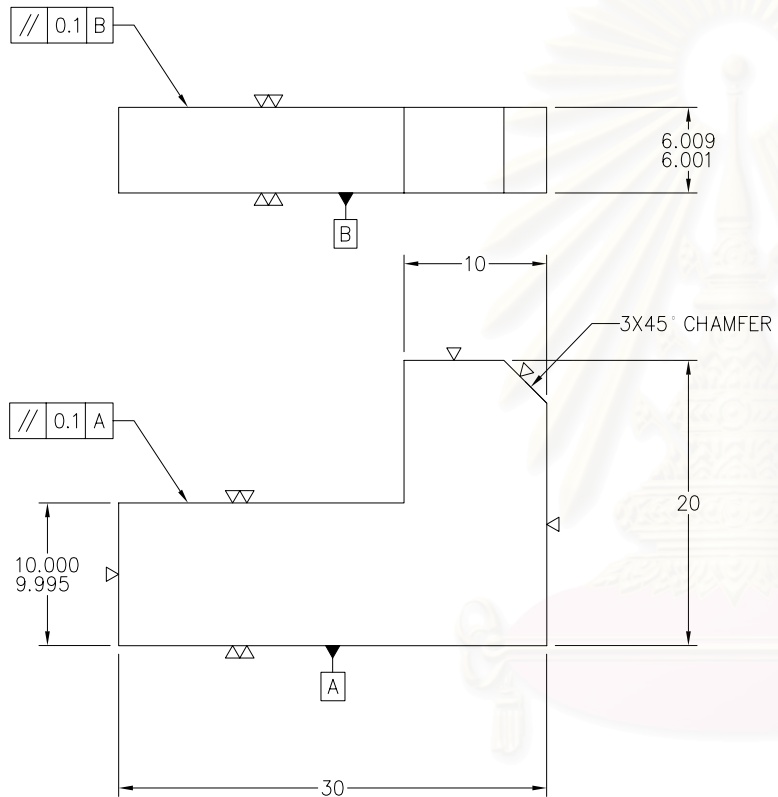
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

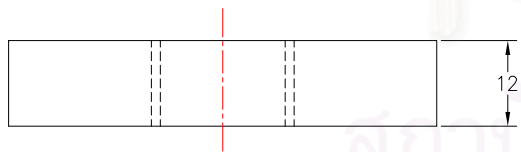
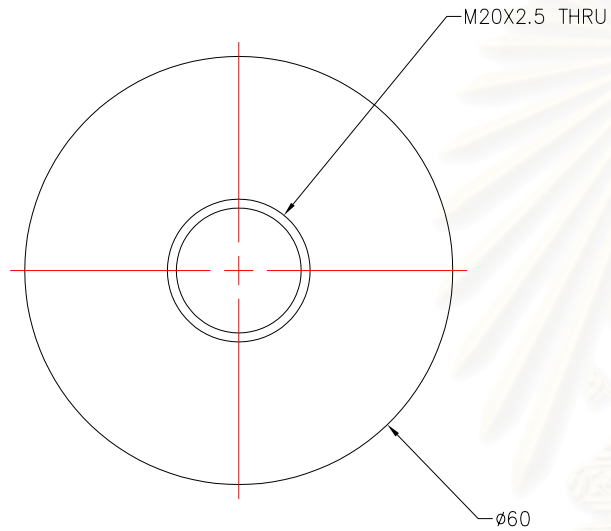
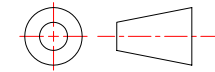
026



27 KEY, AISI 4340, 4 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
KEY		
SCALE:2:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	027



30 MINOR BALANCING WEIGHT, ALUMINIUM 7075, 1 REQUIRED

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

MINOR BALANCING WEIGHT

SCALE: 1:1

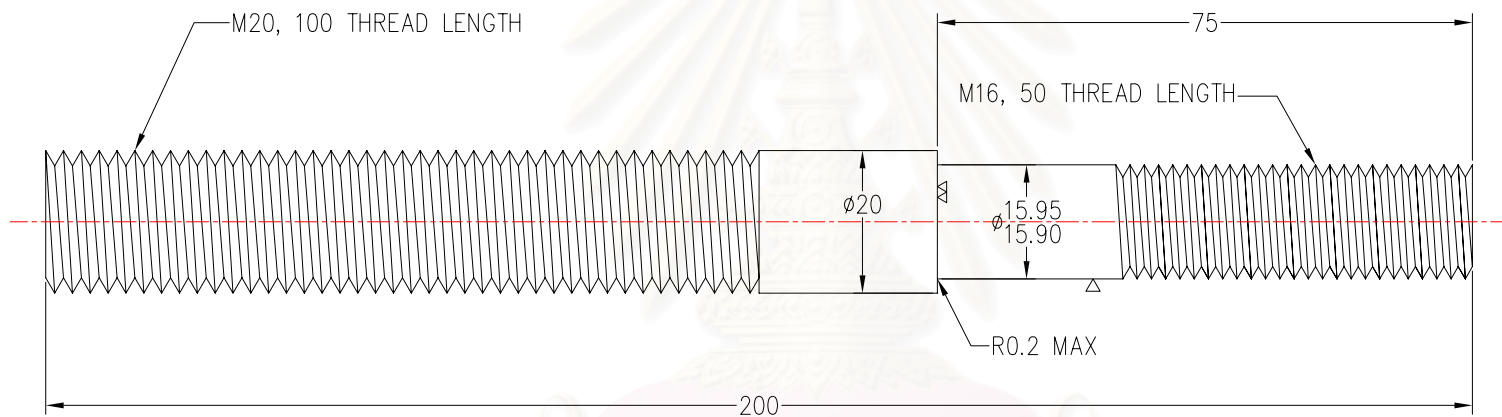
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

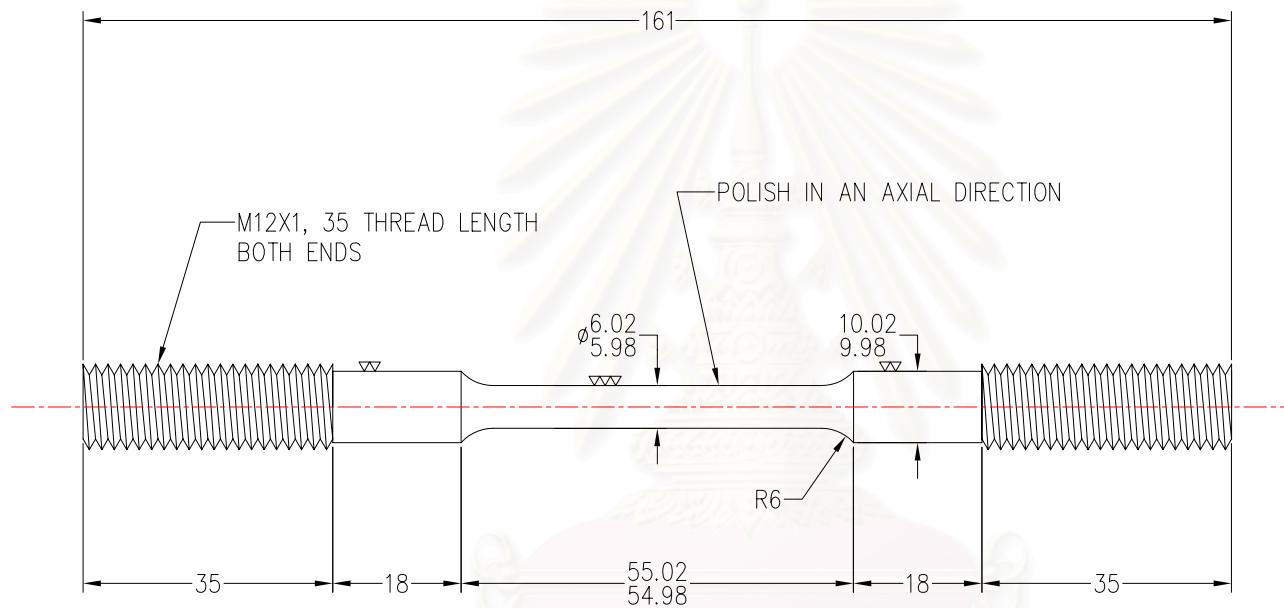
028



31 MINOR BALANCE WEIGHT ADJUSTER, SS400, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

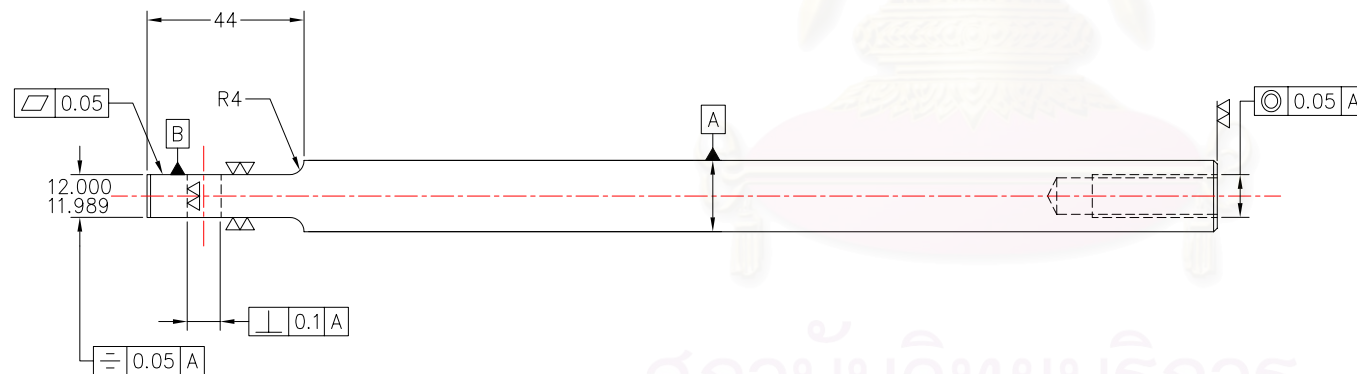
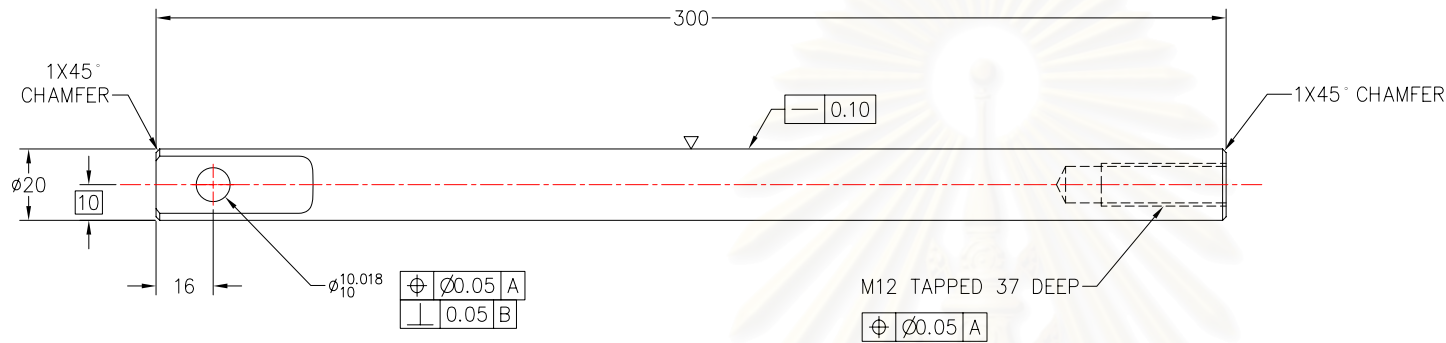
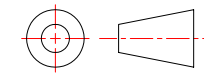
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
MINOR BALANCE WEIGHT ADJUSTER		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	029



32 SPECIMEN (GL=30 mm)

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

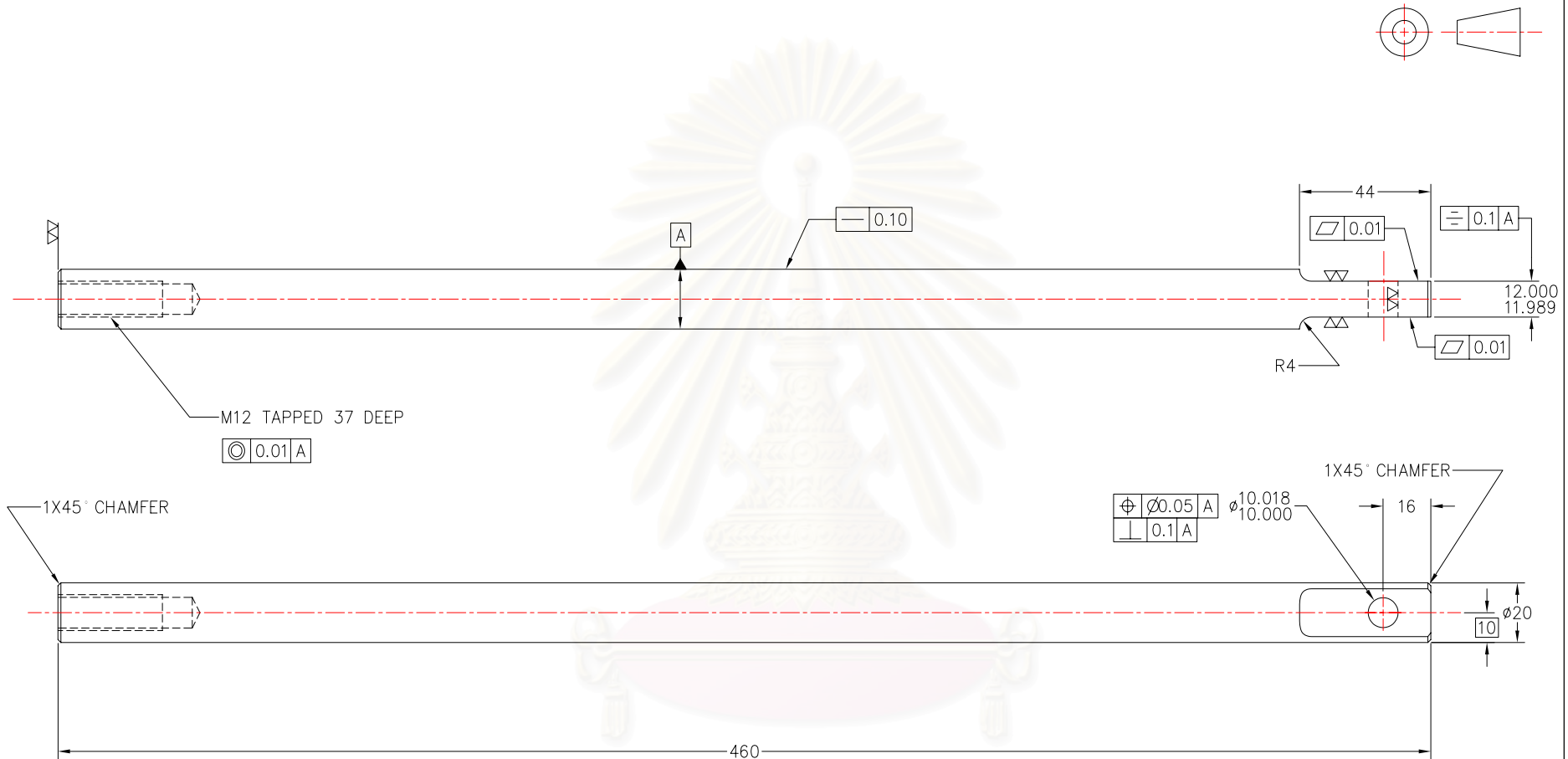
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
SPECIMEN		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	030



33 UPPER PULL ROD, STAINLESS 310S, 1 REQUIRED

- Note:
1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified
 3. This part is very very important ,be carefull

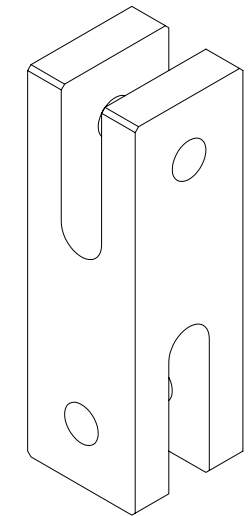
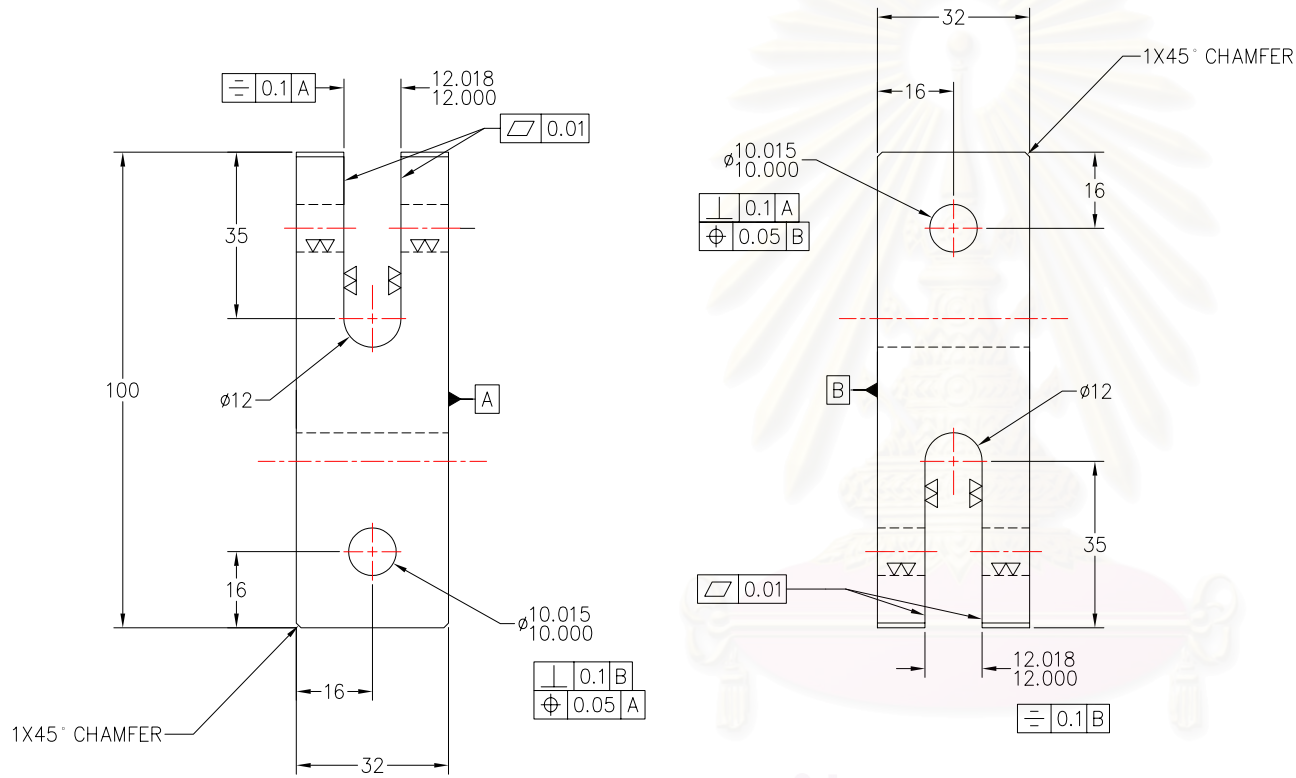
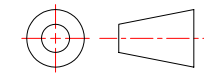
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
UPPER PULL ROD		
SCALE: 1:2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	031



34 LOWER PULL ROD, STAINLESS 310S, 1 REQUIRED

- Note:
1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified
 3. This part is very very important ,be carefull

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
LOWER PULL ROD		
SCALE: 1: 2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	032

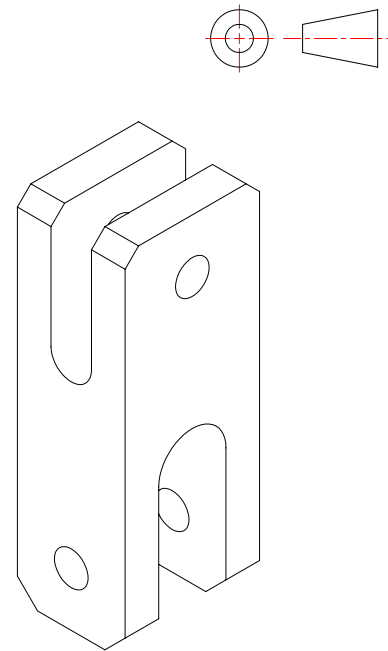
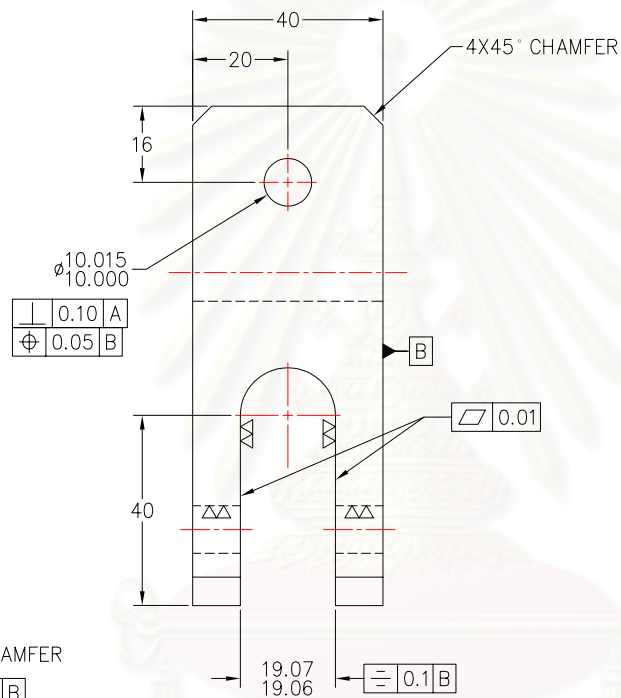
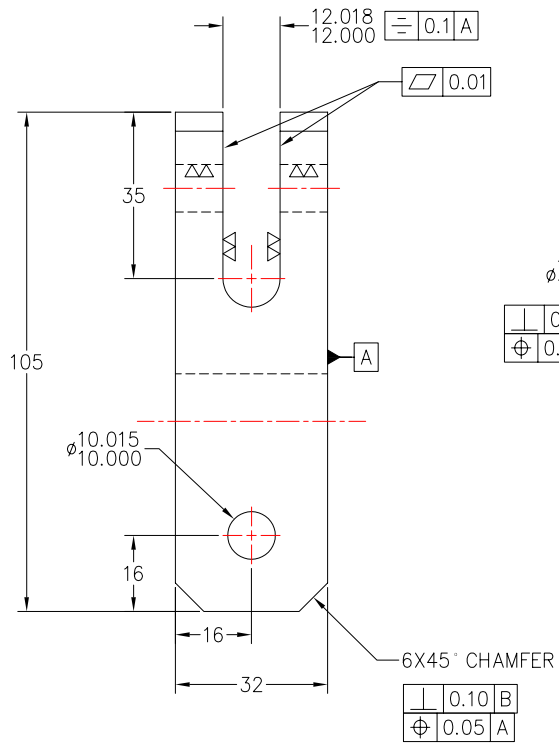


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

36 UNIVERSAL JOINT II, AISI 4340, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

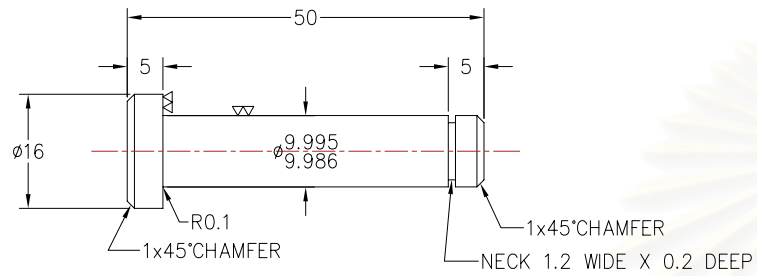
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
UNIVERSAL JOINT II		
SCALE: 2; 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	034



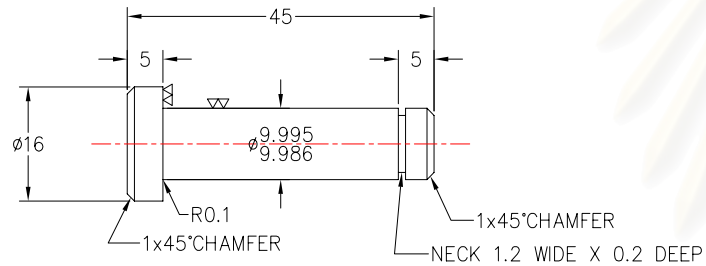
37 UNIVERSAL JOINT III, AISI 4340, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

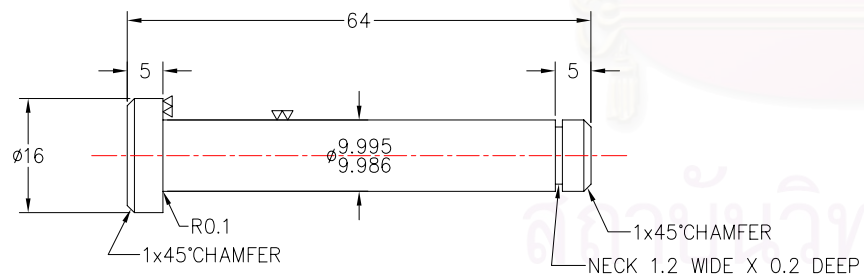
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
UNIVERSAL JOINT III		
SCALE: 2; 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	035



39 PIN I, AISI 4340, 2 REQUIRED



40 PIN II, AISI 4340, 4 REQUIRED



41 PIN III, AISI 4340, 2 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

LOAD TRAIN PINS

SCALE: 1:1

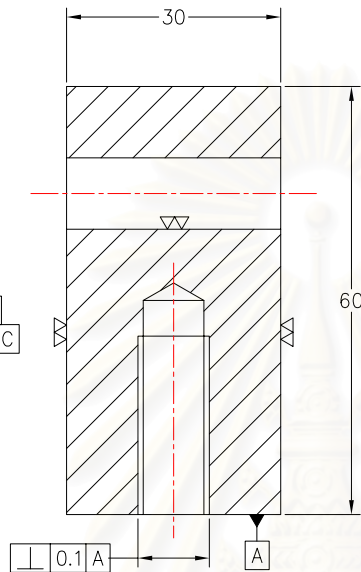
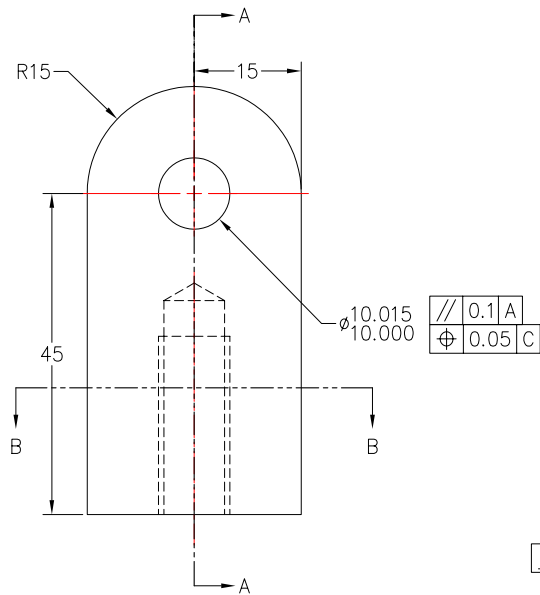
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

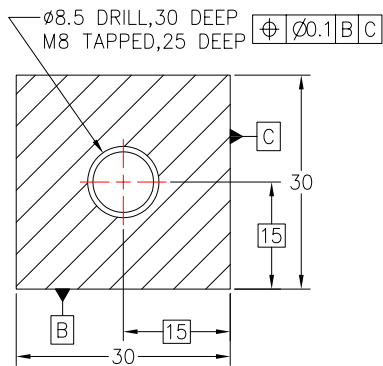
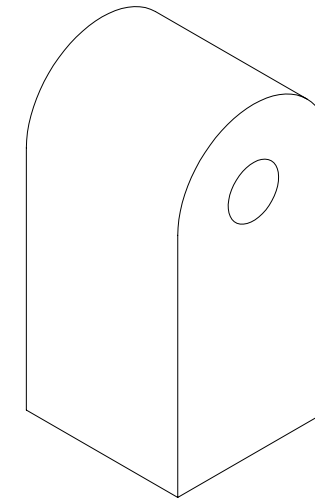
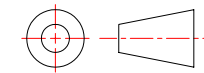
DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

037



SECTIONAL VIEW A-A

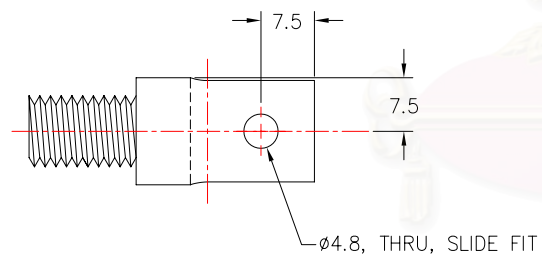
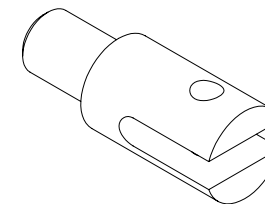
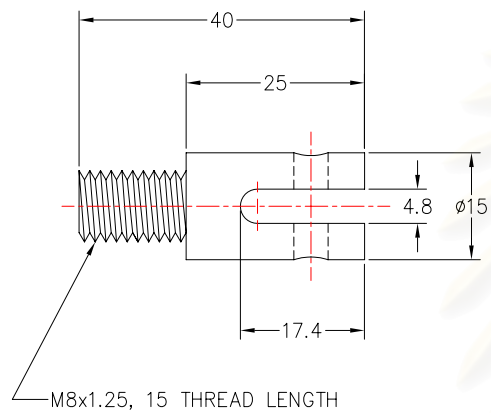
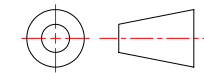


SECTIONAL VIEW B-B

42 WEIGHT TRAIN JOINT, AISI 4340, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

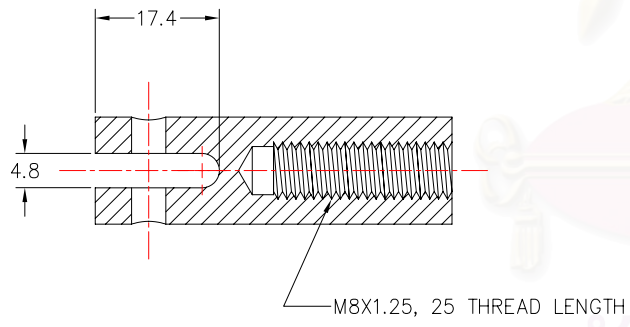
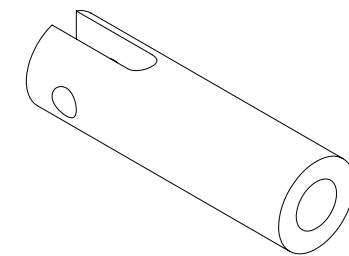
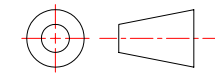
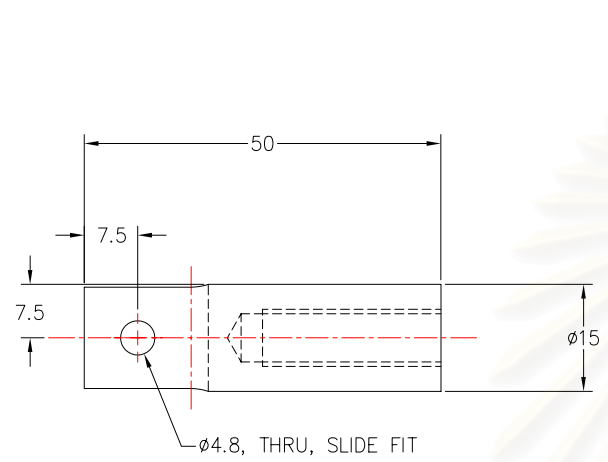
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
WEIGHT TRAIN JOINT		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	038



45 CHAIN JOINT I, STAIN LESS STEEL 304, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

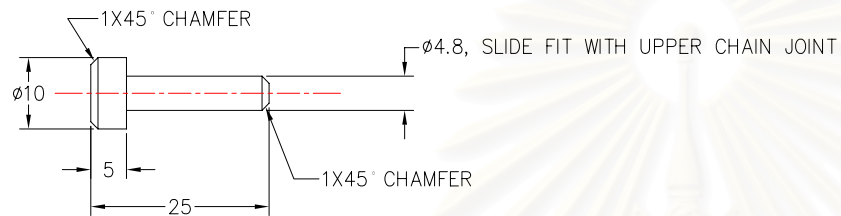
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
CHAIN JOINT I		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	039



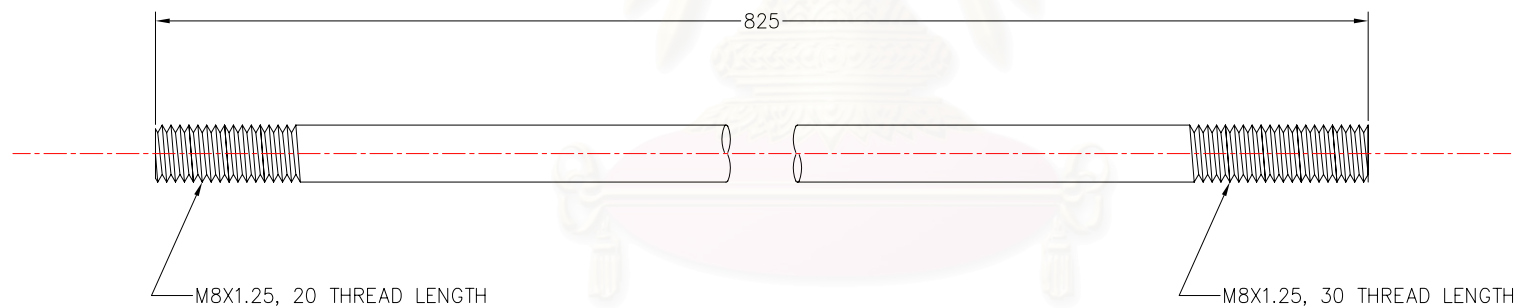
44 CHAIN JOINT II, STAIN LESS STEEL 304, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ±0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
CHAIN JOINT II		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	040



45 CHAIN PIN, STAINLESS STEEL 304, 2 REQUIRED



47 WEIGHT ROD, STAINLESS STEEL 304, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

CHAIN PIN & WEIGHT ROD

SCALE: 1:1

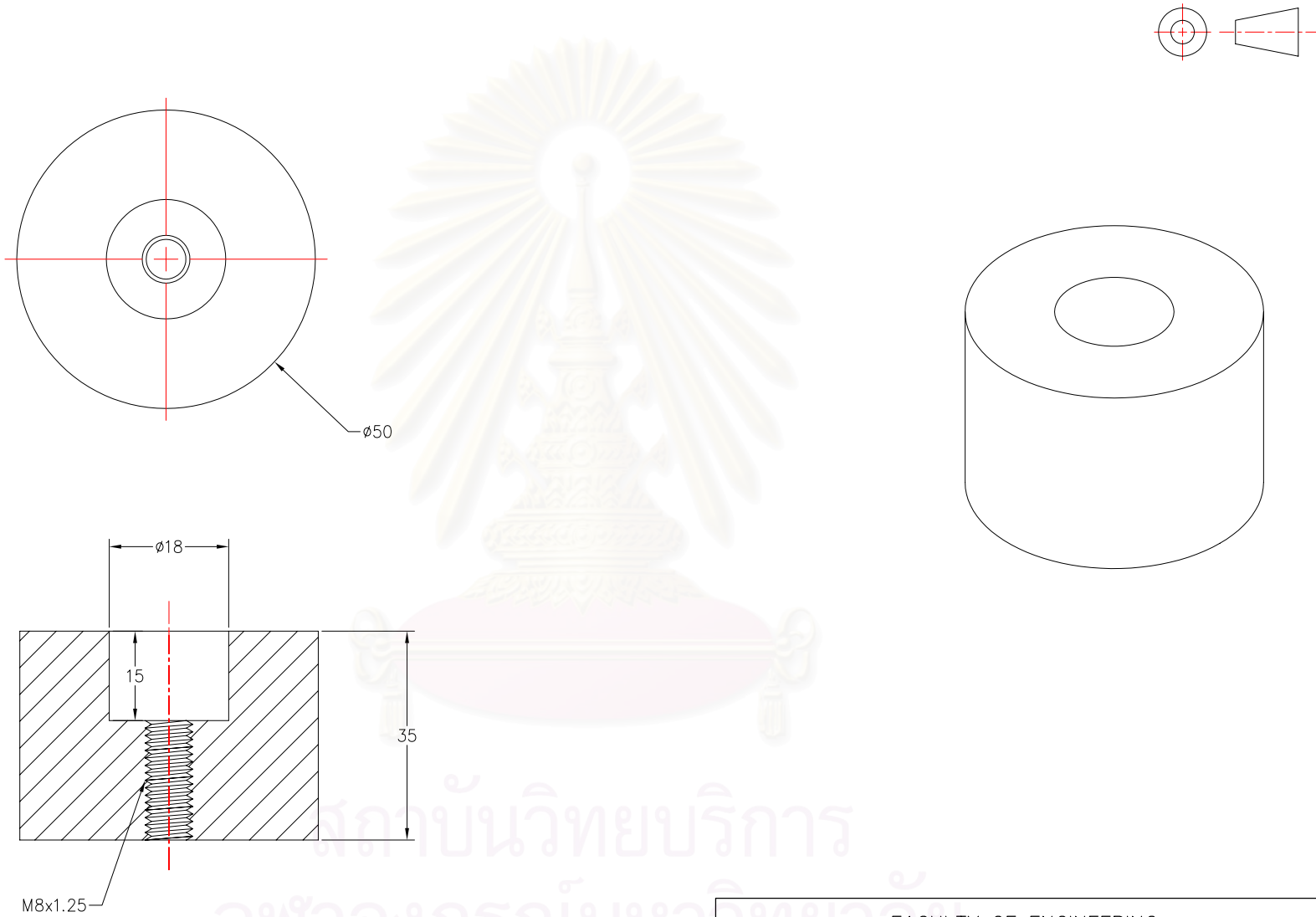
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

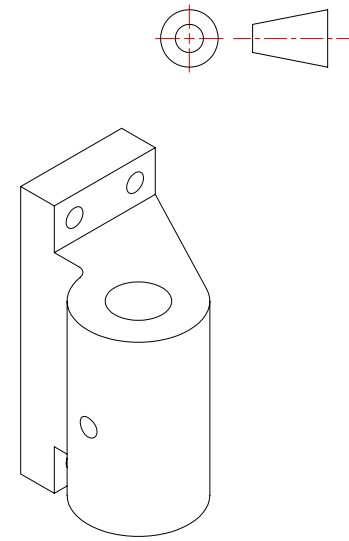
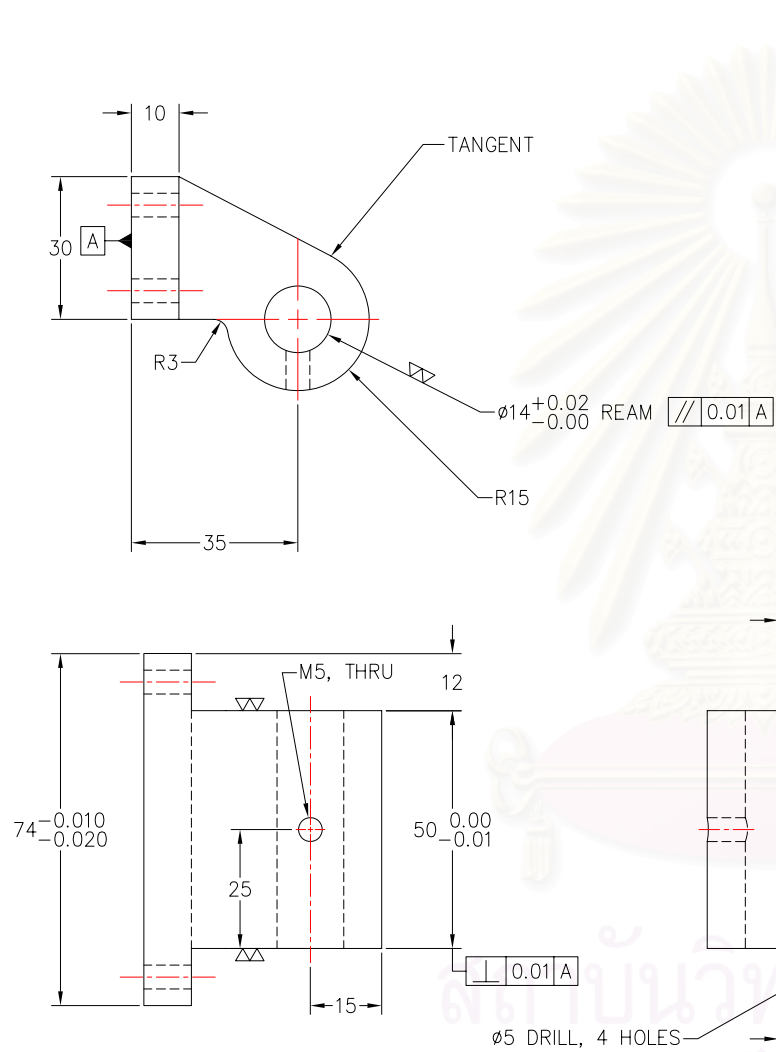
041



48 WEIGHT BUTTON, SS 400, 1 REQUIRED

- 1. All dimensions are in millimetres
- 2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

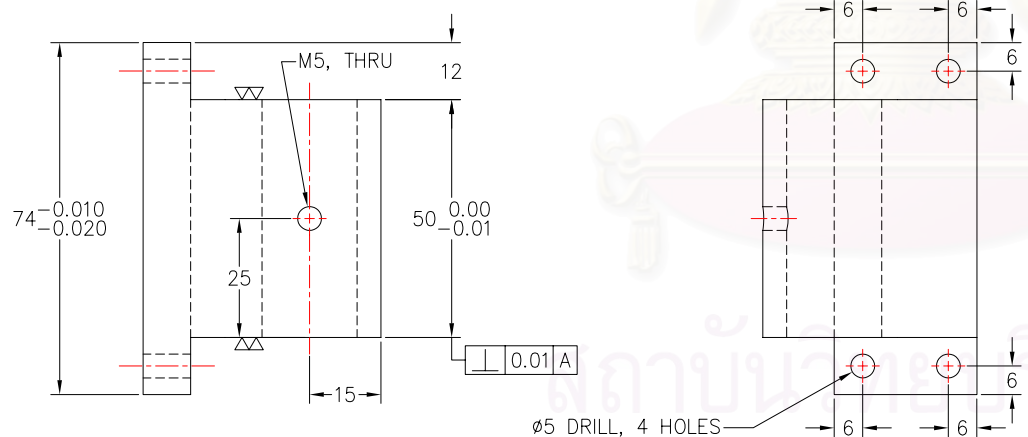
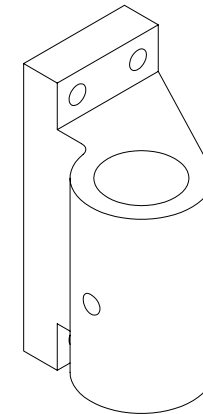
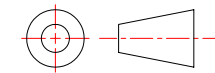
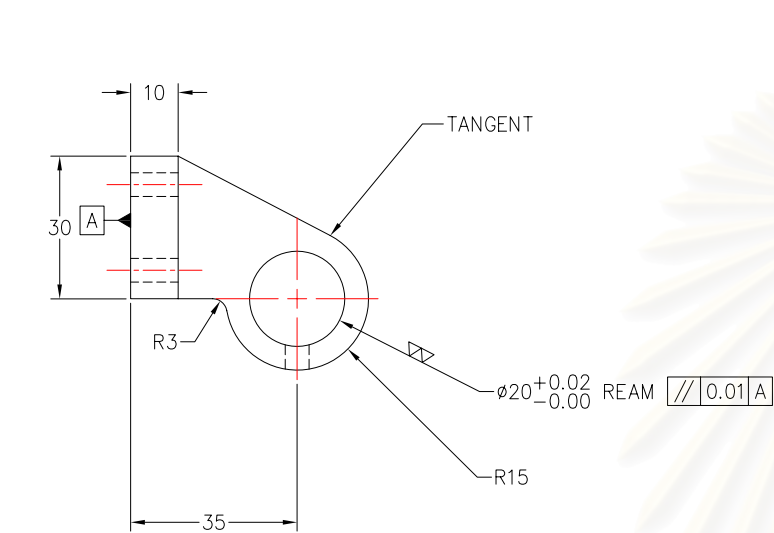
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
WEIGHT BUTTON		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	042



51 CASING BRACKET I, STAINLESS STEEL 304, 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.05 mm. unless otherwise specified

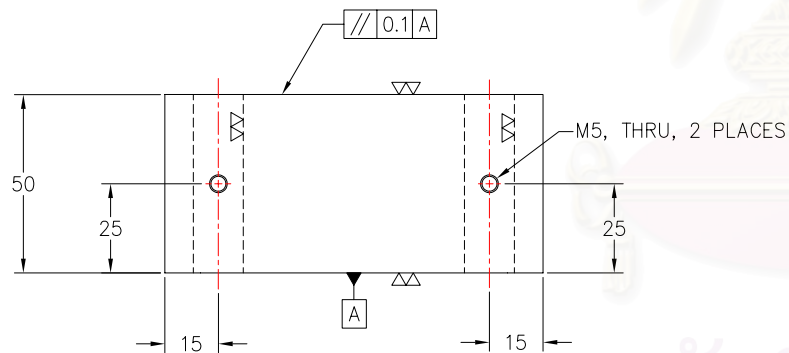
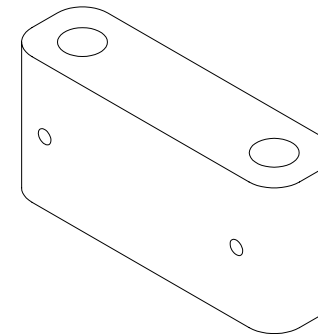
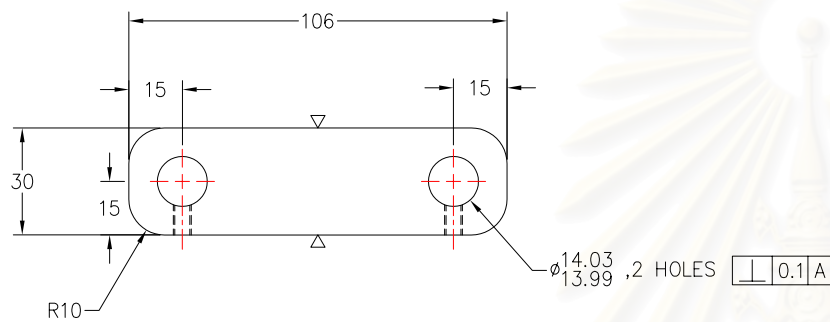
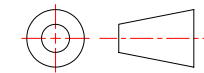
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
CASING BRACKET I		
SCALE: 2: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	043



52 CASING BRACKET II, STAINLESS STEEL 304, 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.05 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
CASING BRACKET II		
SCALE: 2; 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	044



53 MOUNTING BRACKET, SS 400, 4 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

MOUNTING BRACKET

SCALE: 1:2

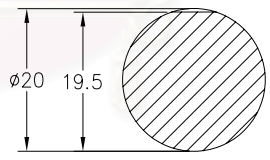
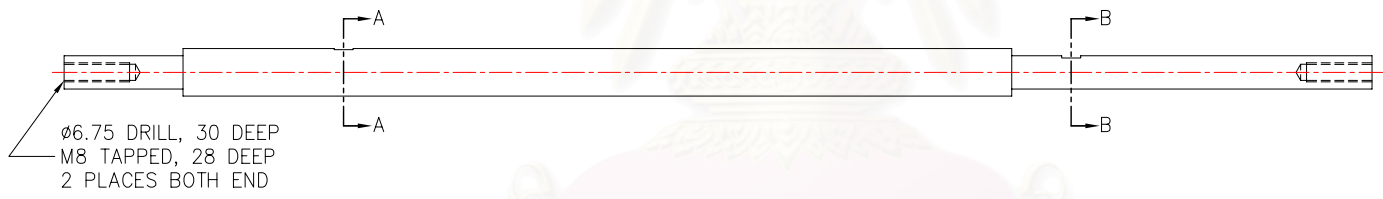
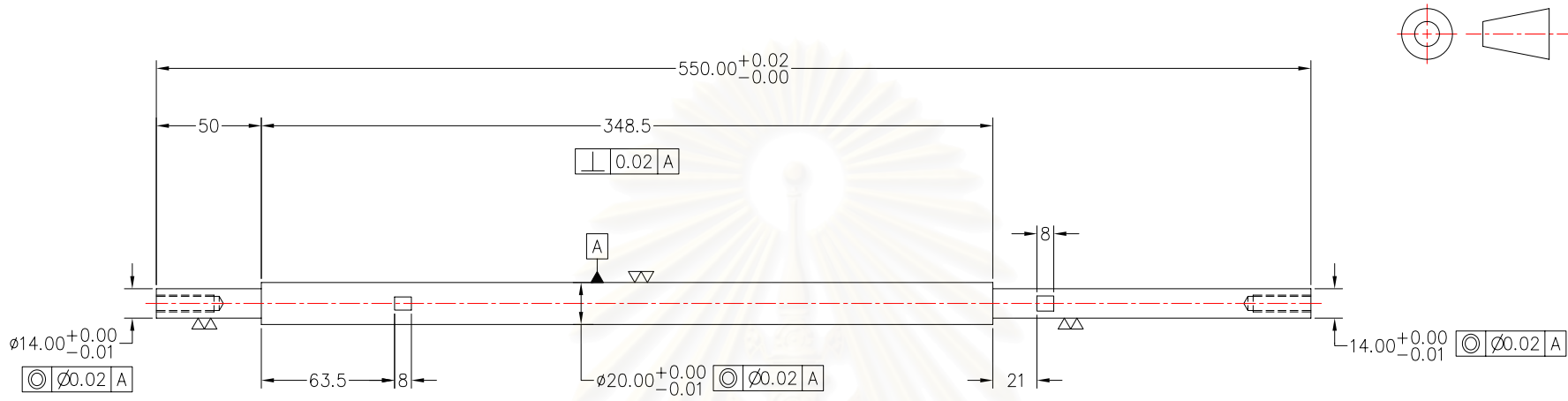
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

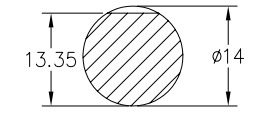
DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

045



SECTION A-A
Scale 1:1

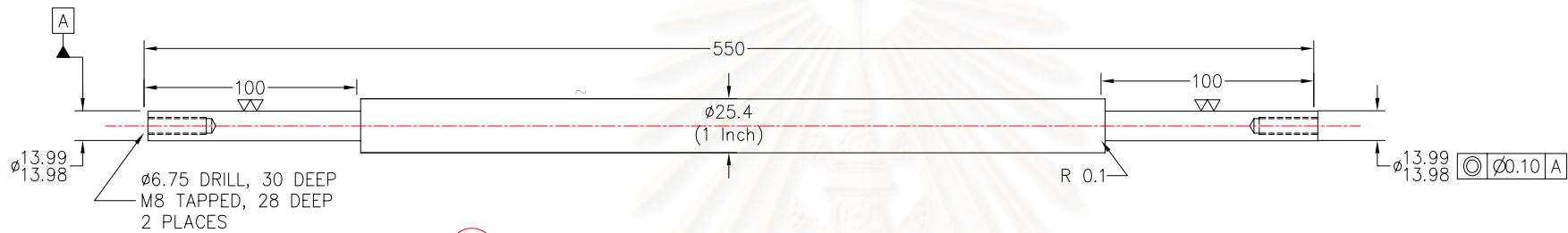


SECTION B-B
Scale 1:1

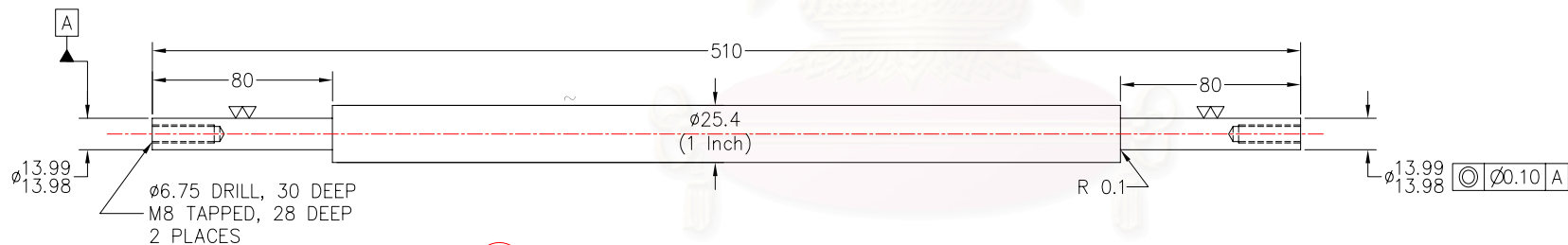
54 CASING ROD, STAINLESS STEEL 304, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
CASING ROD		
SCALE: 1: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	046



55 INTERMEDIATE ROD II, STAINLESS 304, 1 REQUIRED

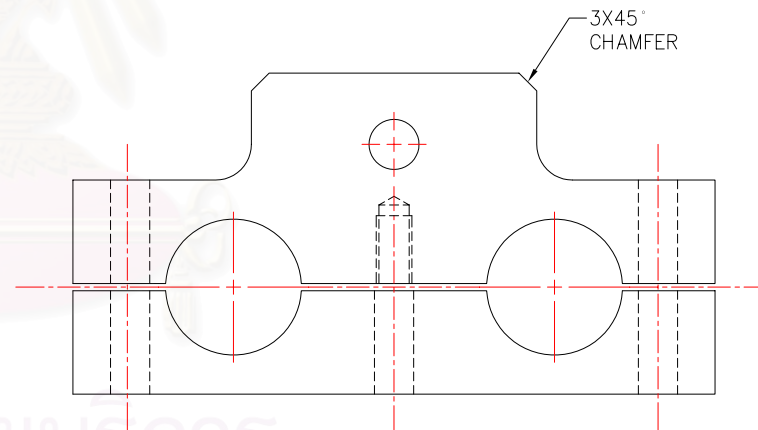
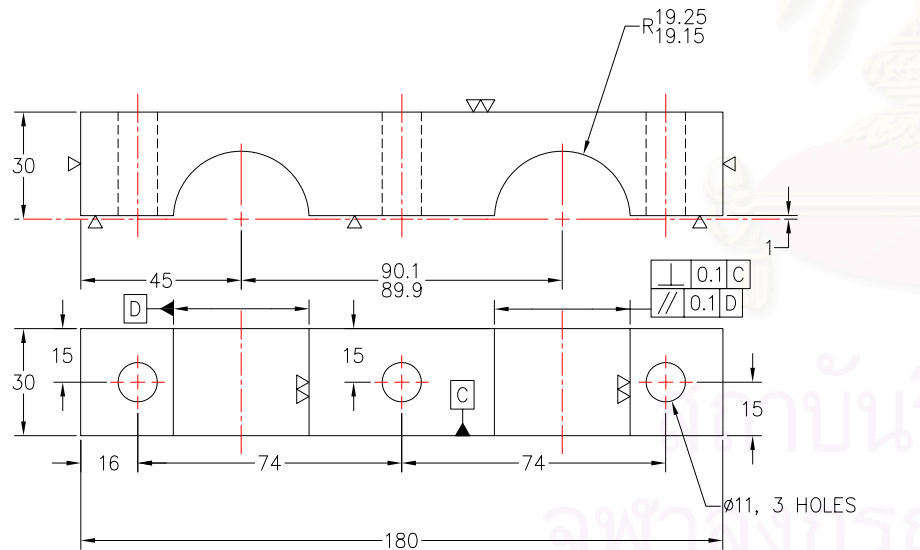
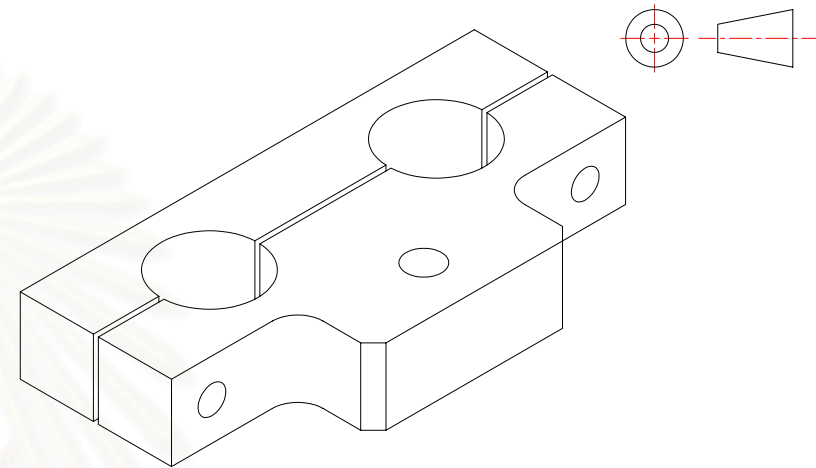
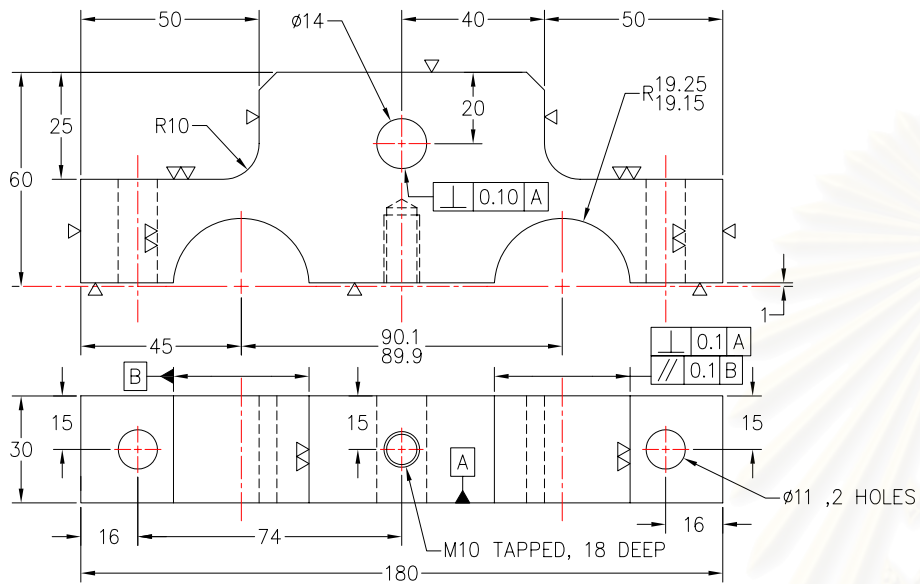


56 FRAME ROD III, STAINLESS 304, 1 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
 2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 FACULTY OF ENGINEERING
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

MOUNTING ROD		
SCALE: 1: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	047



ASSEMBLY

57 FURNANCE SUPPORT, SS 400, 2 SETS REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

FURNANCE SUPPORT

SCALE: 1:2

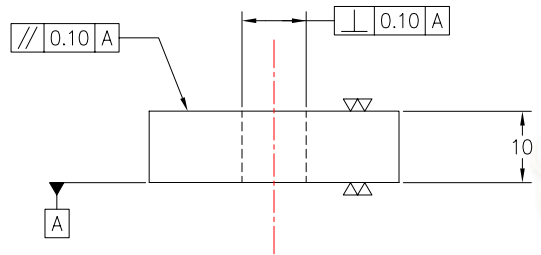
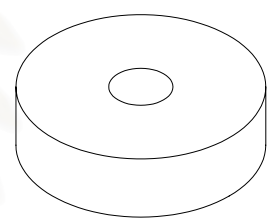
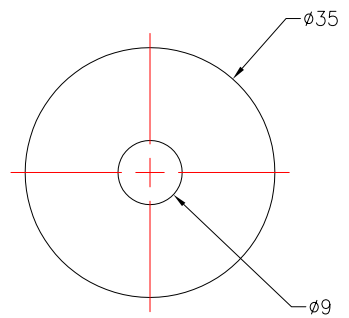
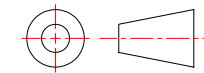
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

048

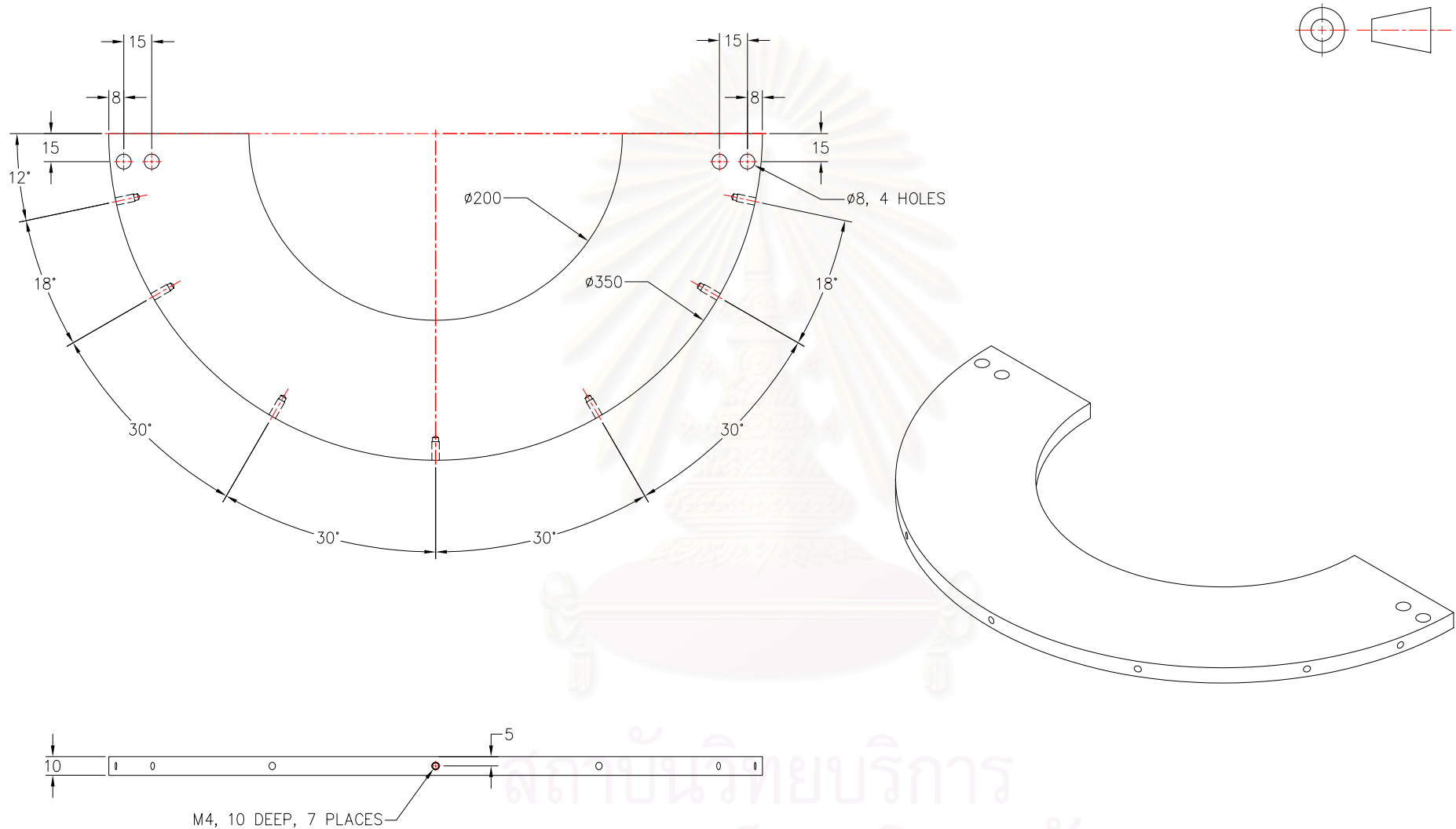


59 WASHER, STAINLESS STEEL 304, 6 REQUIRED

Note: 1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

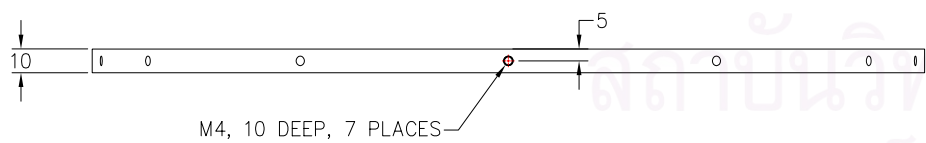
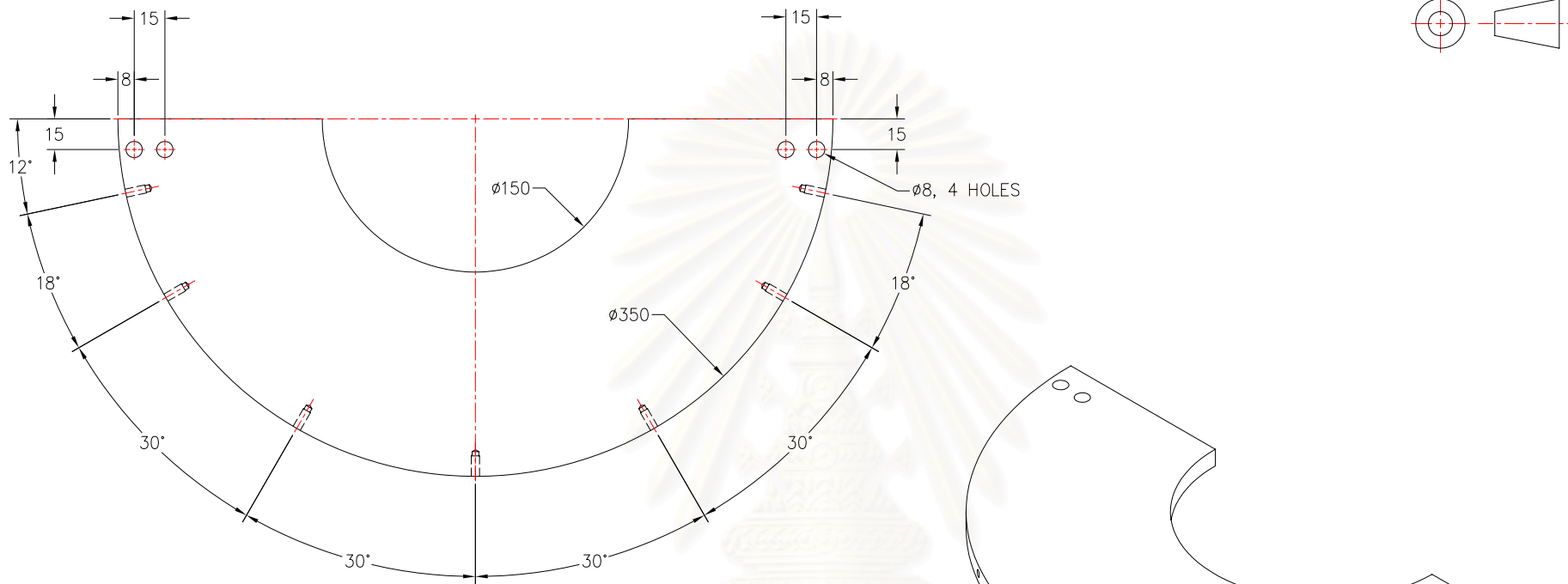
WASHER		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	049



60 TOP PLATE, STAINLESS STEEL 304, 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.05 mm. unless otherwise specified

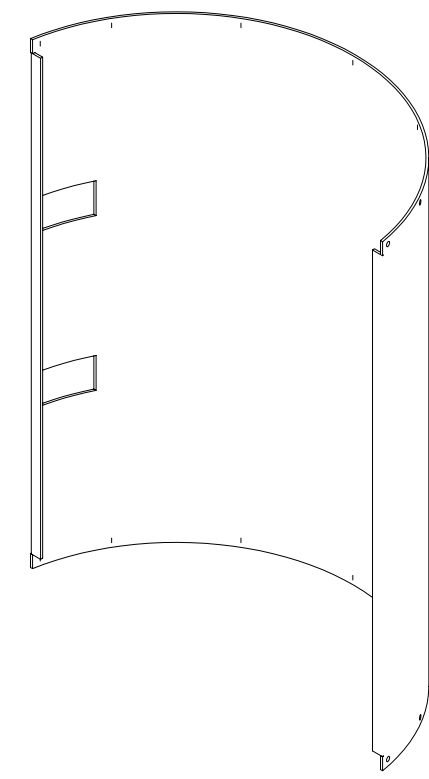
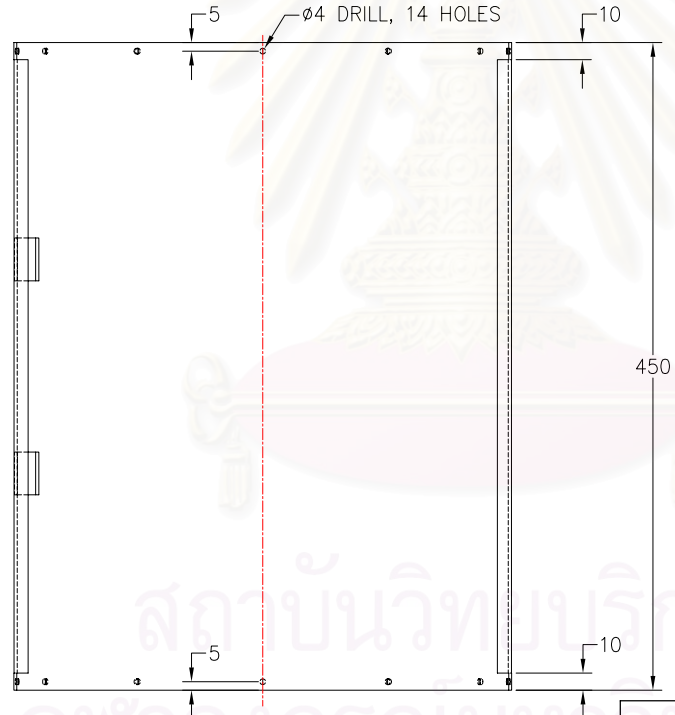
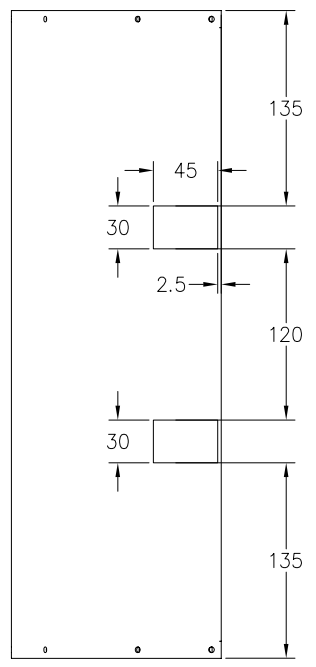
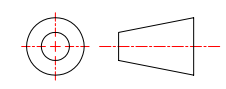
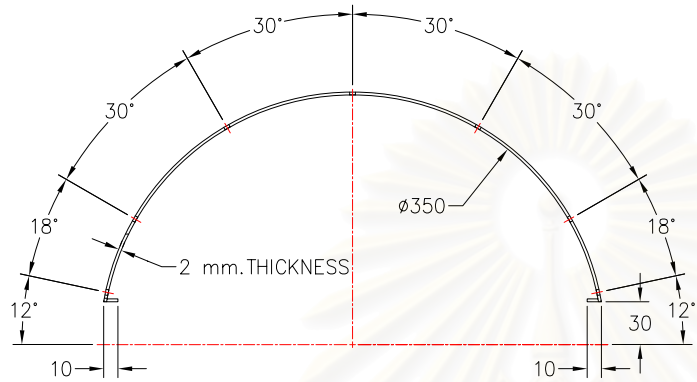
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
TOP PLATE		
SCALE: 1: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	050



61 BOTTOM PLATE, STAINLESS STEEL 304, 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.05 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
BOTTOM PLATE		
SCALE: 1: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	051



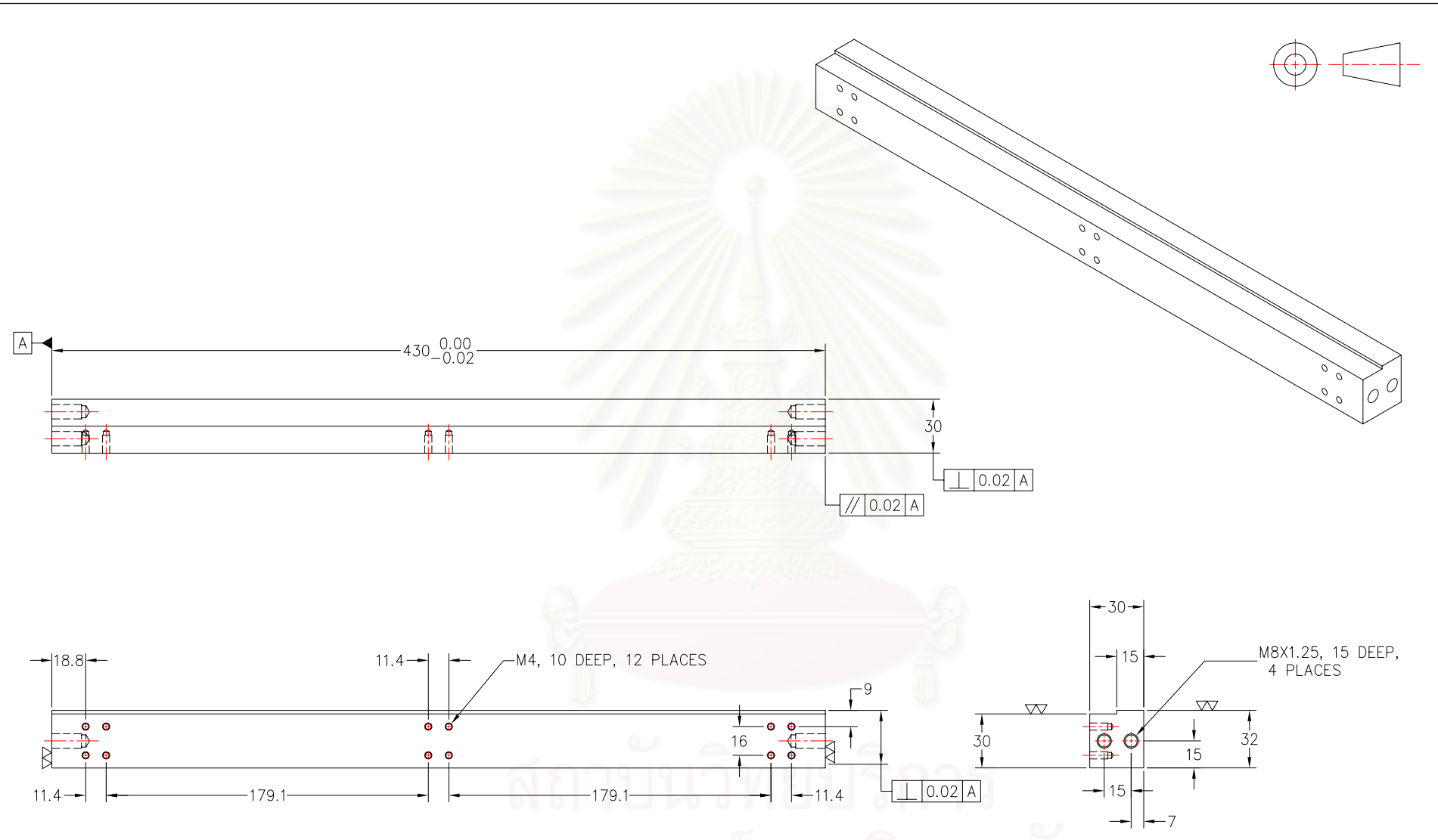
62 CASING SHELL, STAINLESS STEEL 304 PLATE 2 mm THICKNESS , 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

CASING SHELL

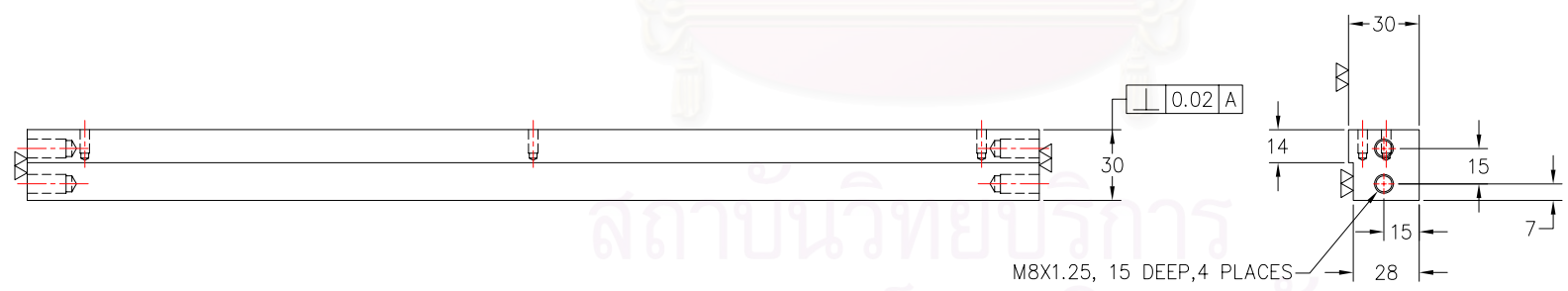
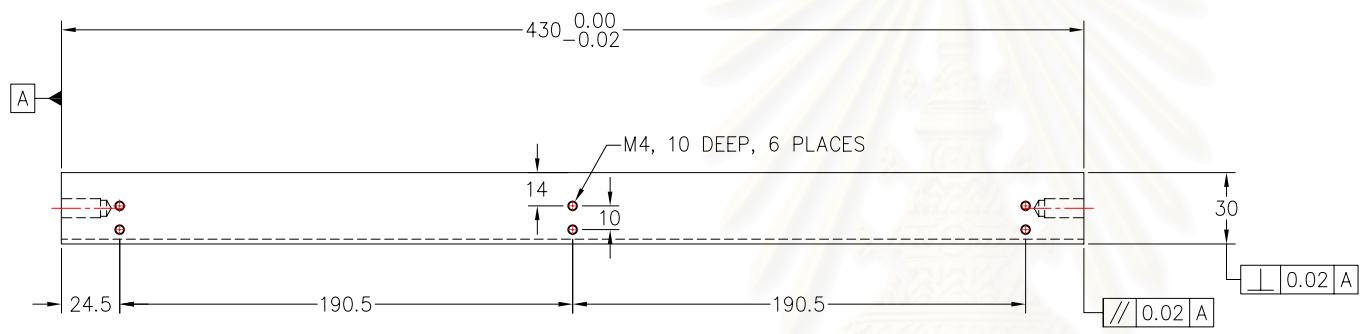
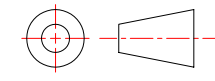
SCALE: 1: 5	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	052



63 FACE BAR I, STAINLESS STEEL 304, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.05 mm. unless otherwise specified

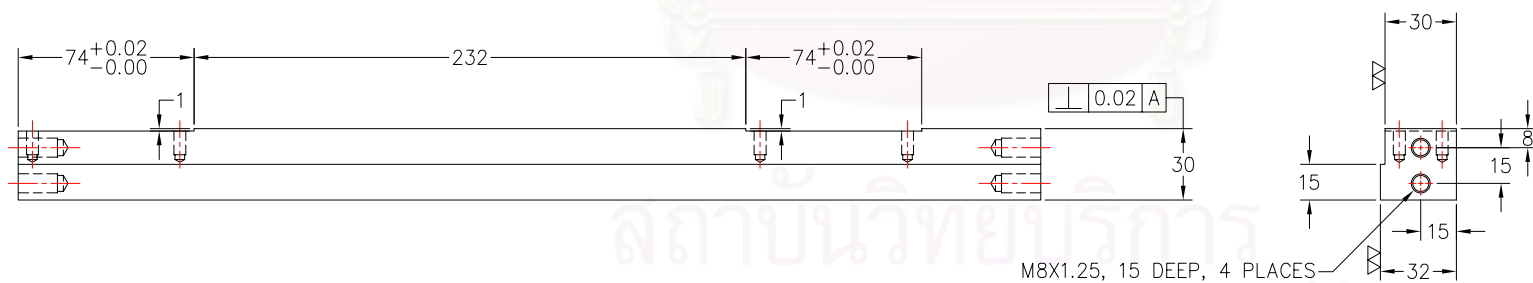
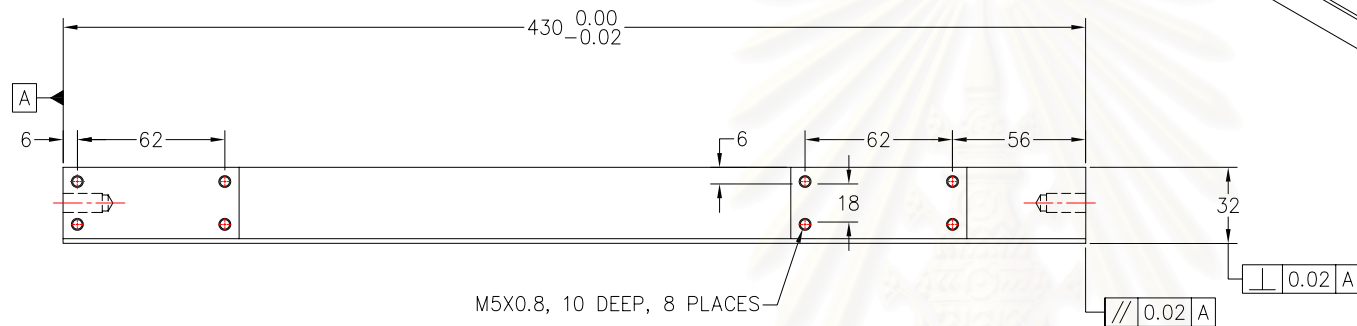
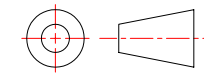
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
FACE BAR I		
SCALE: 1: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	053



64 FACE BAR II, STAINLESS STEEL 304, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.05 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
FACE BAR II		
SCALE: 1: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	054



65 FACE BAR III, STAINLESS STEEL 304, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.05 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

FACE BAR III

SCALE: 1: 3

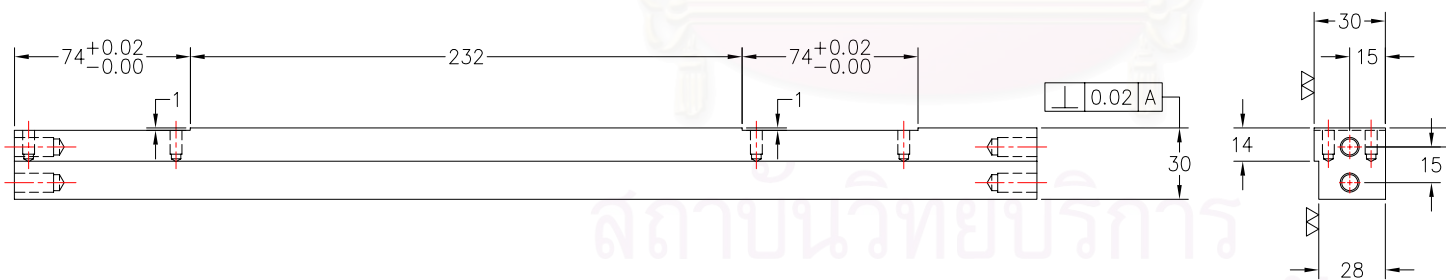
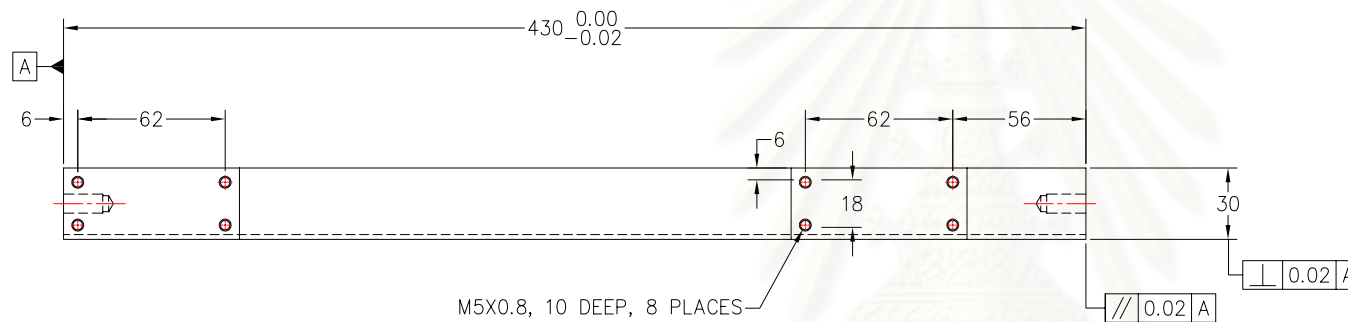
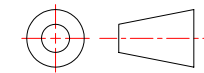
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

055



66 FACE BAR IV, STAINLESS STEEL 304, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.05 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

FACE BAR IV

SCALE: NT

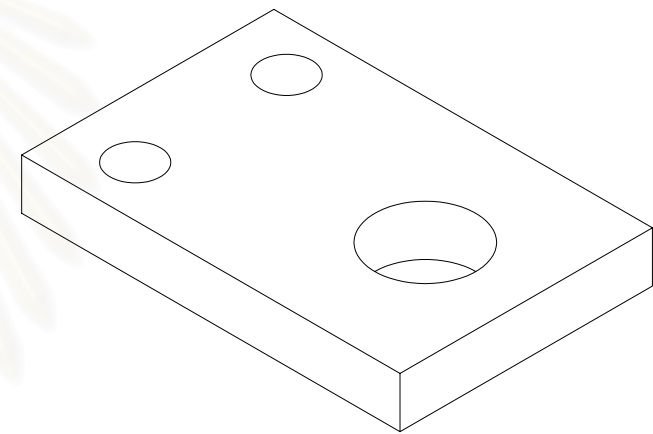
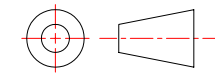
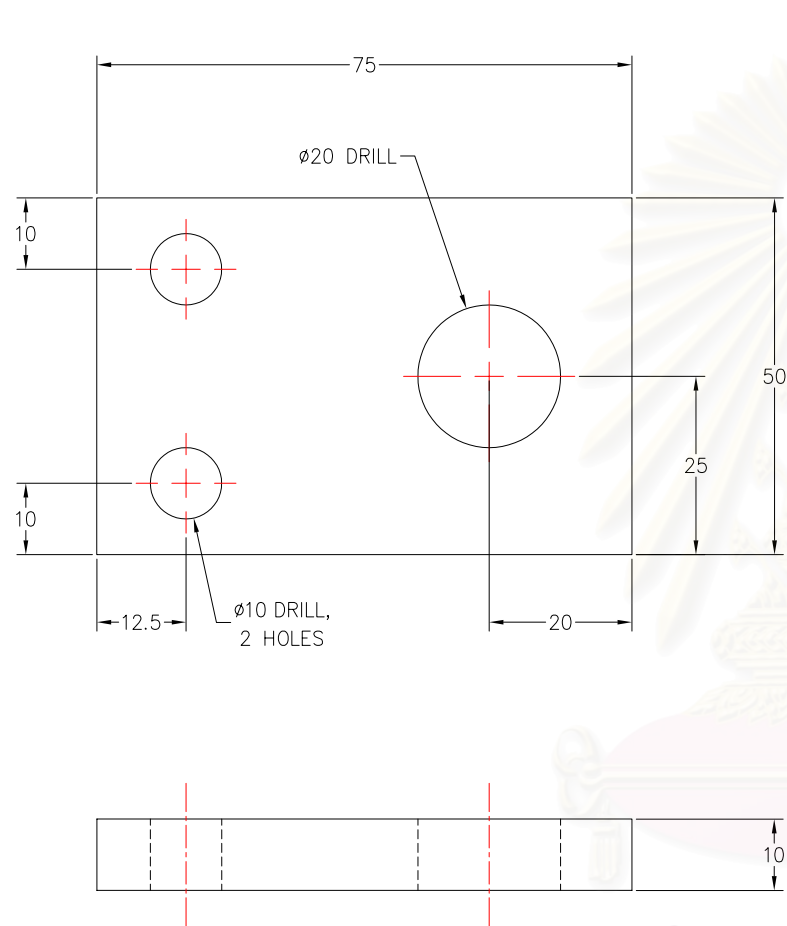
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

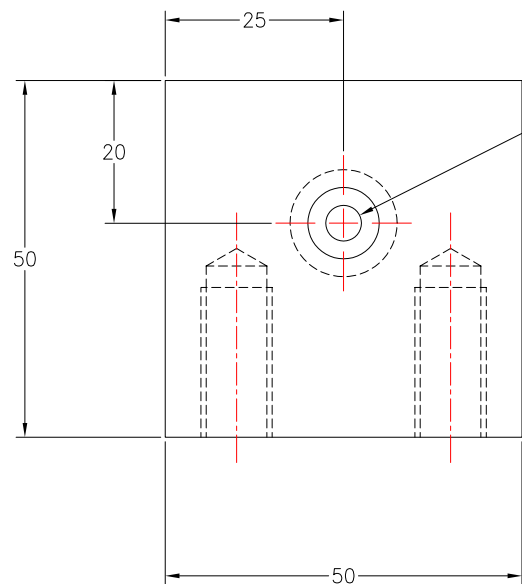
056



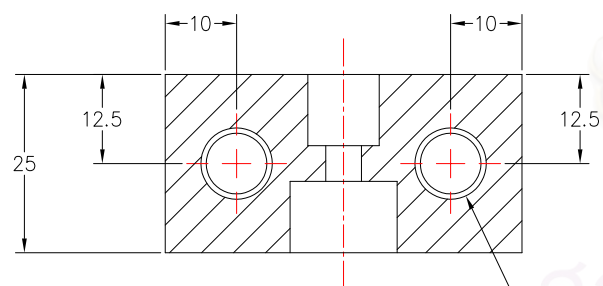
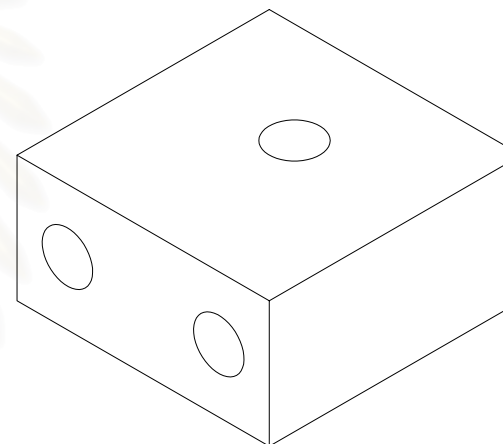
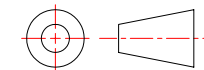
70 STAND HOLDER, ALUMINIUM 7075, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
STAND HOLDER		
SCALE: 1:1	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	057



$\varnothing 5$ DRILL
 $\varnothing 10^{+0.18}_{0.00}$, 10 DEEP SLIDE FIT
 $\varnothing 15^{+0.18}_{0.00}$, 10 DEEP



M10 TAPPED, 20 DEEP
2 PLACES

71 STAND BASE, ALUMINIUM 7075, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm, unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

STAND BASE

SCALE: 1:1

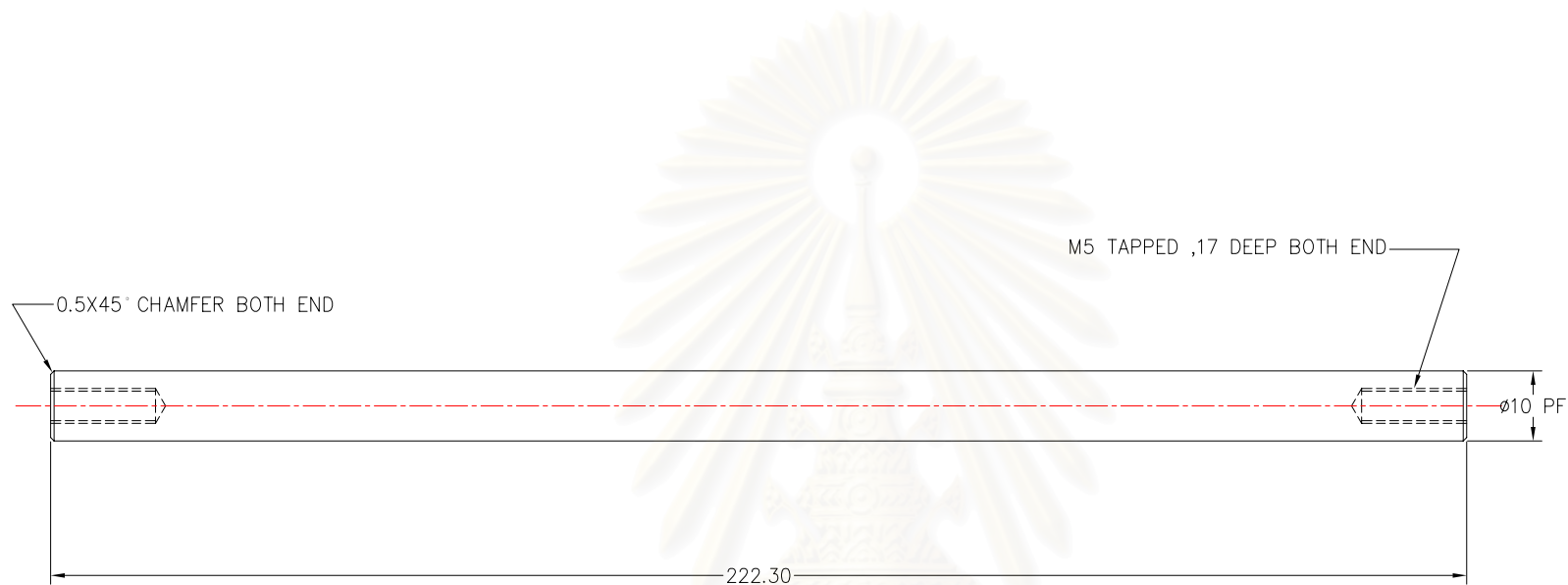
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

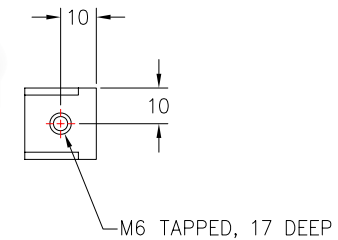
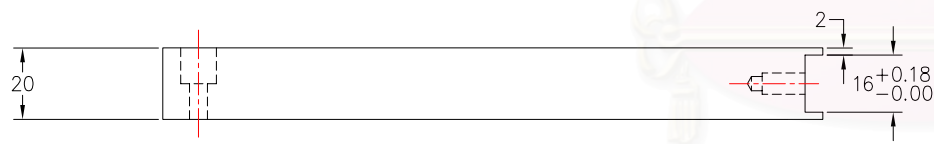
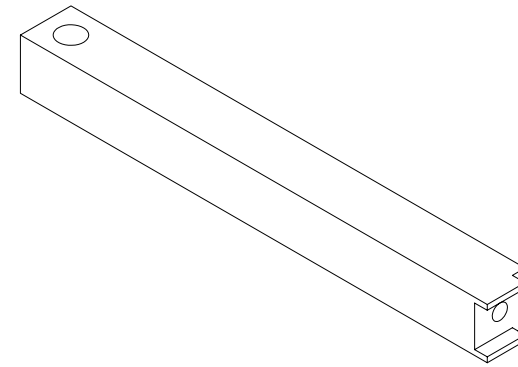
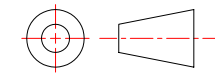
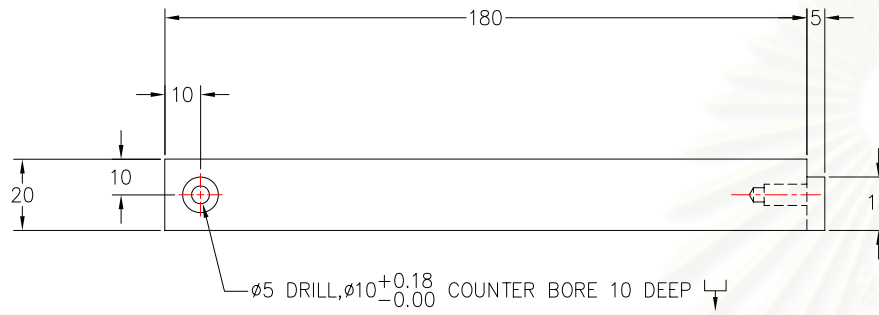
058



72 STAND ROD, STAINLESS STEEL 304, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

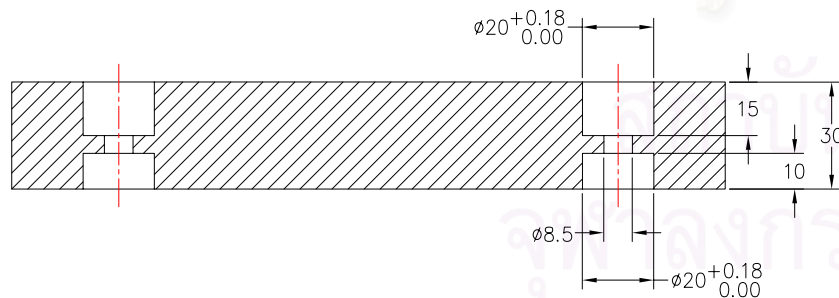
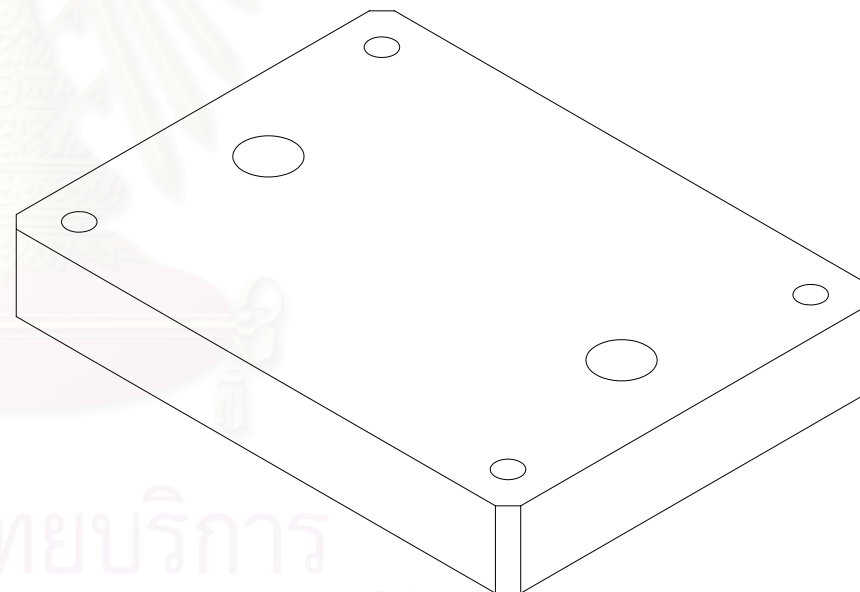
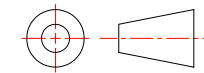
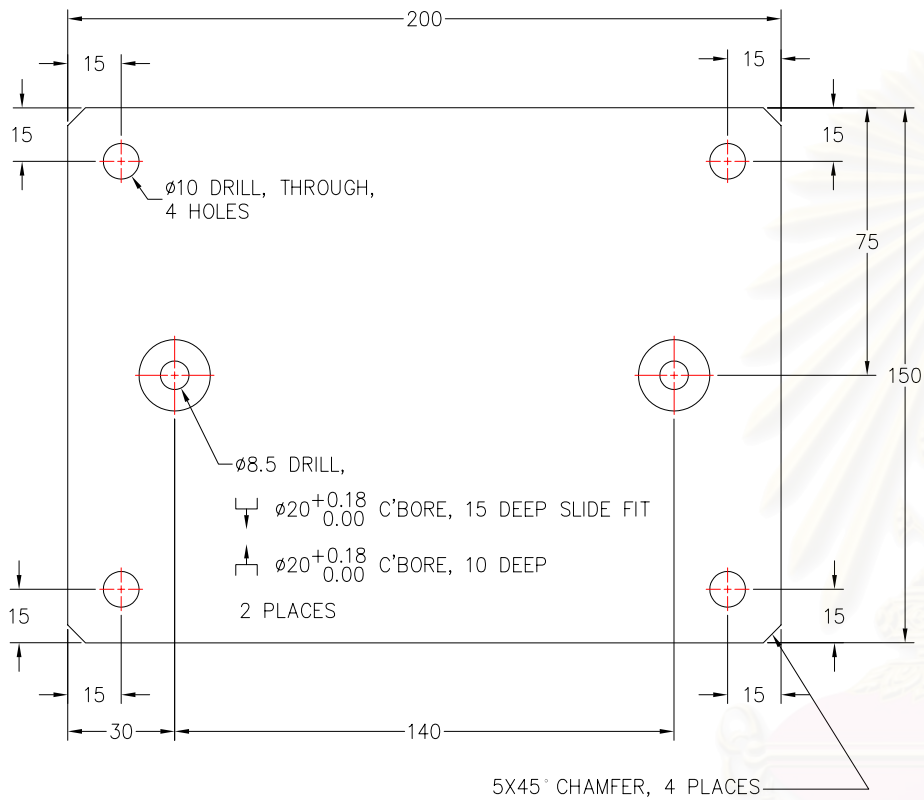
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
STAND ROD		
SCALE: 1: 3	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	059



73 STAND ARM, ALUMINIUM 7075, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
STAND ARM		
SCALE: 1:2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	060



78 ELEVATOR BAXE, SS400, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

WEIGHT ELEVATOR BASE

SCALE: 1: 2

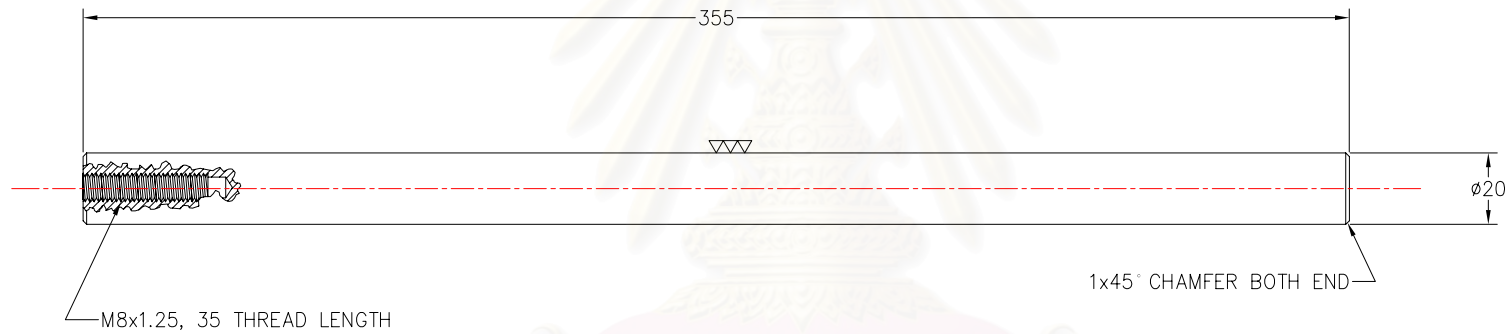
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

061



79 SLIDING ROD, STAINLESS 304 , 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

SLIDING ROD

SCALE: 1:2

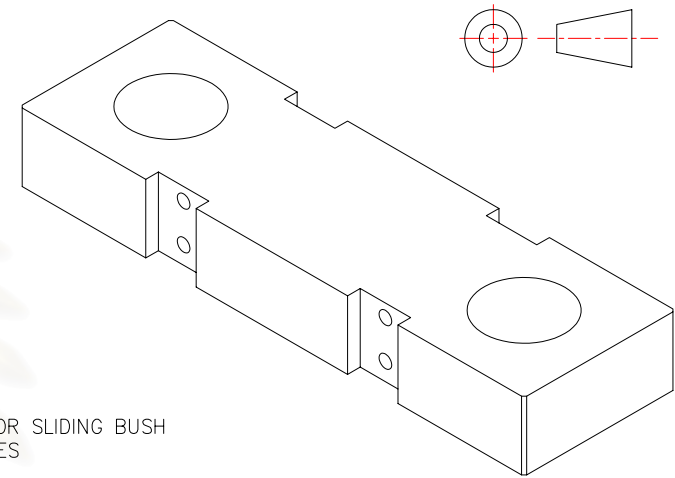
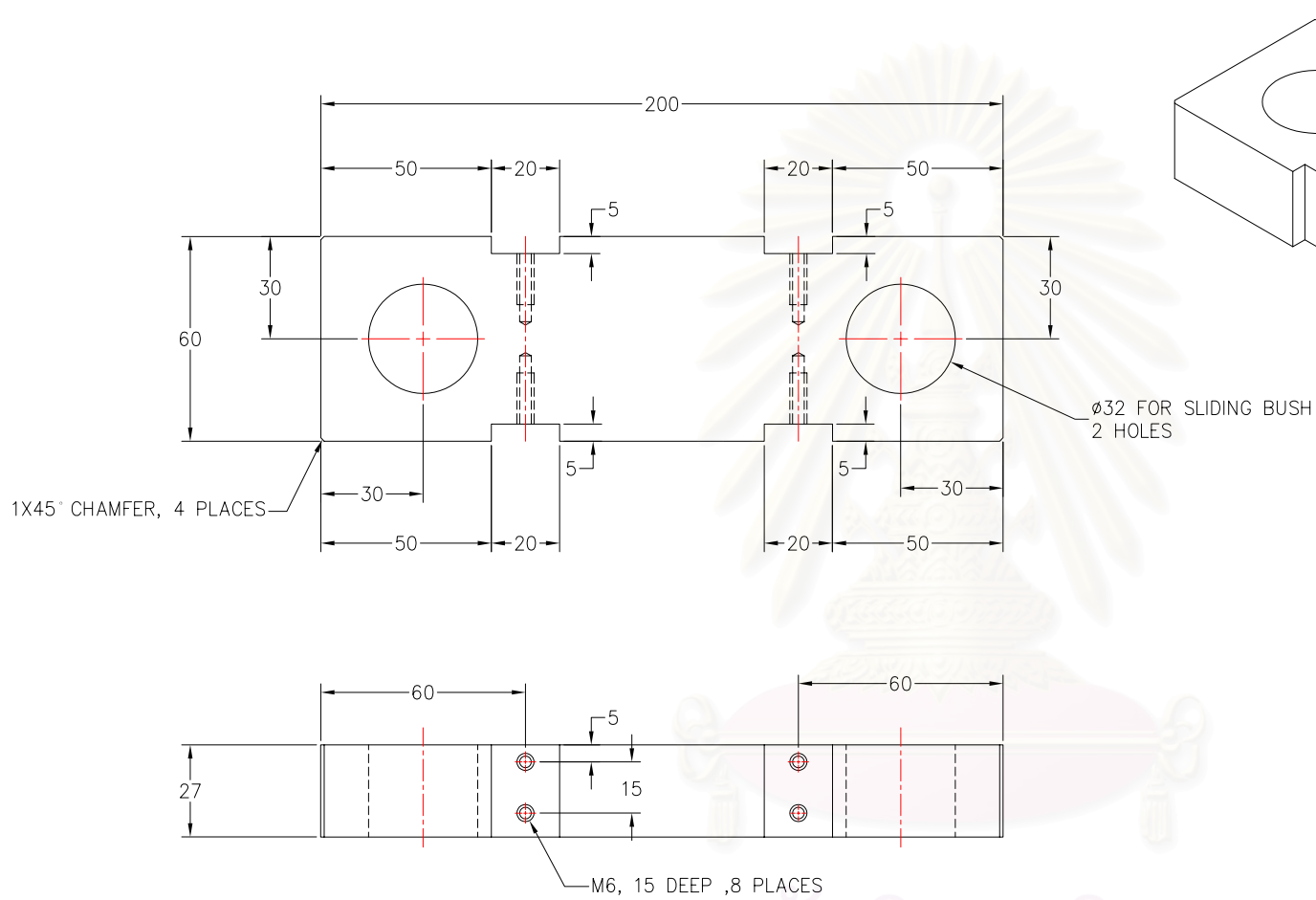
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

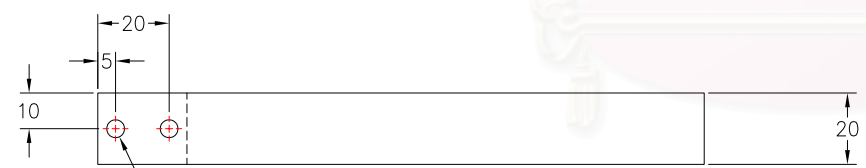
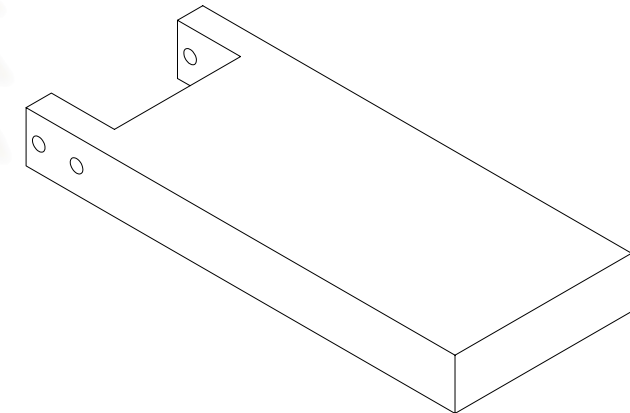
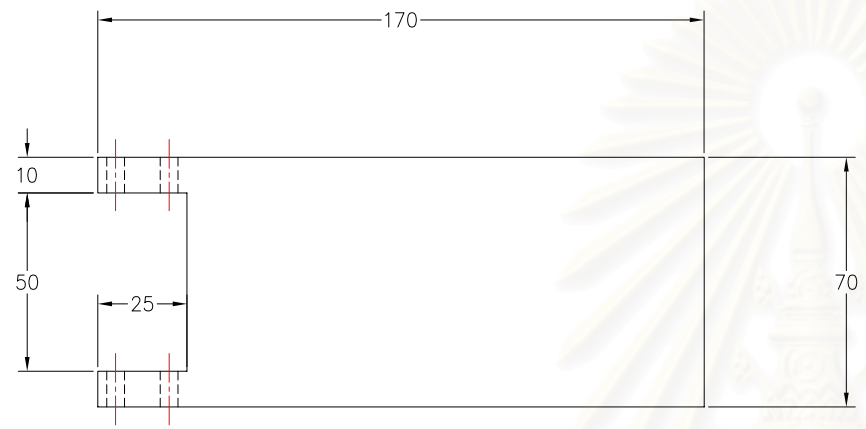
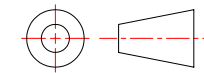
062



81 SLIDING BAR, SS400, BLACKENING, 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
SLIDING BAR		
SCALE: 1: 2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	063



∅5.5 THRU, 4 HOLES

82 WEIGHT SUPPORT, ALUMINIUM 7075, 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

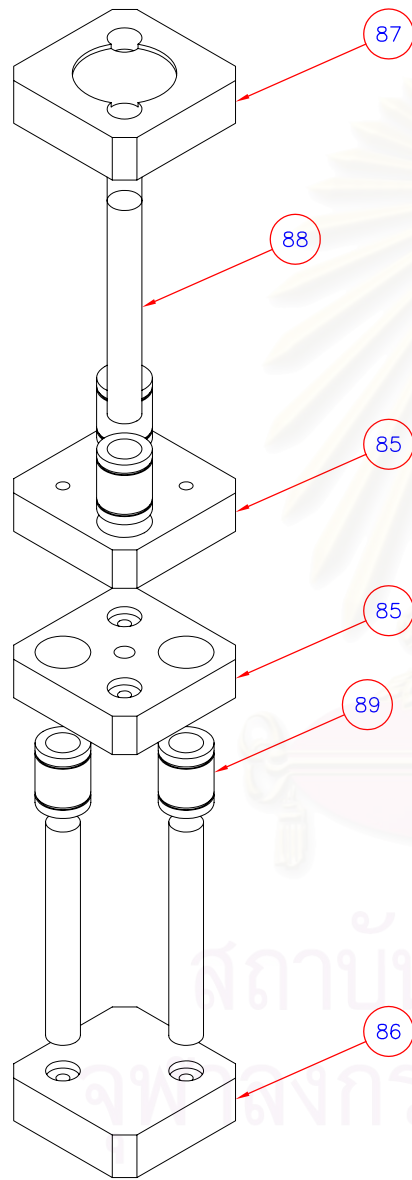
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
WEIGHT SUPPORT		
SCALE: 1: 2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	064



ภาคผนวก ข

แบบรายละเอียดของ COMPRESSION-TENSION CONVERTER

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



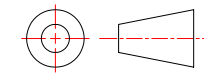
89	SLIDE BUSH	4	ID 20, OD 32
88	GUIDE POST	4	STAINLESS STEEL 304
87	UPPER BLOCK	1	SS 400, BLACKENING
86	BASE	1	SS 400, BLACKENING
85	CROSS GUIDING GRIP	2	SS 400, BLACKENING
ITEM	NAME	REQ.	NOTES

PARTS LIST

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

COMPRESSION-TENSION CONVERTER ASSEMBLY

SCALE: 1: 5	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	065



$\varnothing 8.25$, $\varnothing 20^{+0.18}_{-0.00}$ C'BORE, $5^{+0.015}_{-0.000}$ DEEP
SLIDING FIT, 2 PLACES

\perp 0.01 A

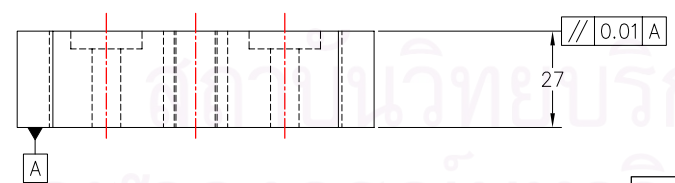
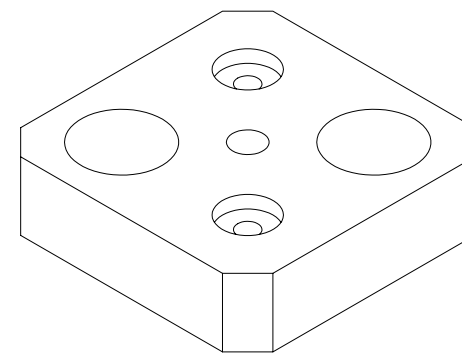
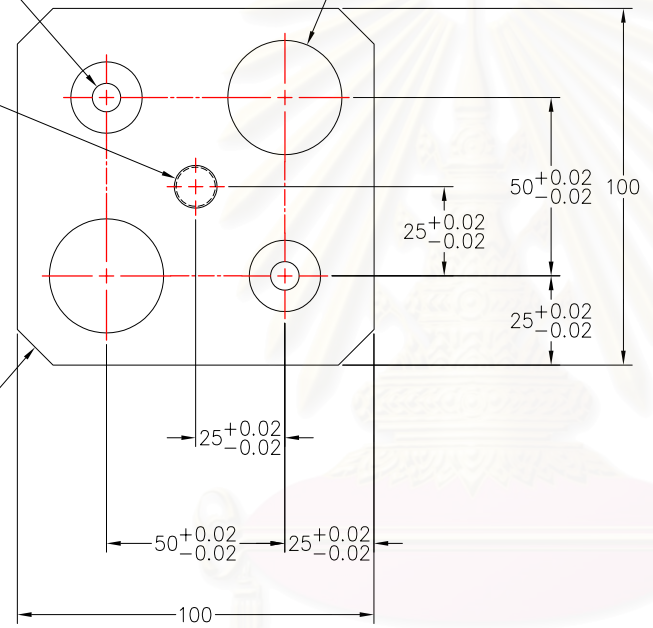
$\varnothing 32^{+0.01}_{-0.00}$ REAM, THROUGH (SLIDING FIT WITH SLIDE BUSH)
, 2 HOLES

\perp 0.01 A

M12X1, THROUGH

\perp 0.01 A

10X45° CHAMFER
4 PLACES

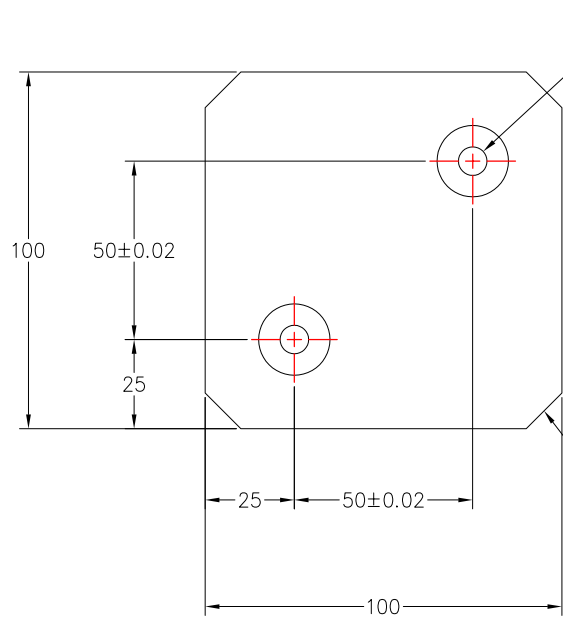
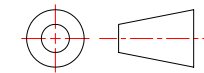


\parallel 0.01 A

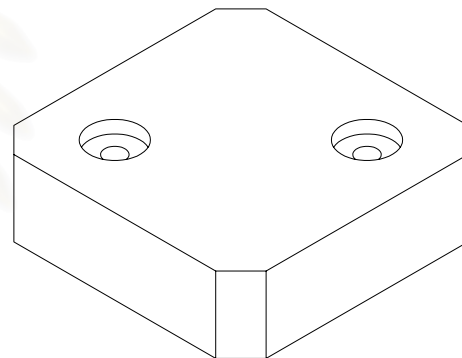
85 CROSS GUIDING GRIP, SS400, BLACKENING , 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

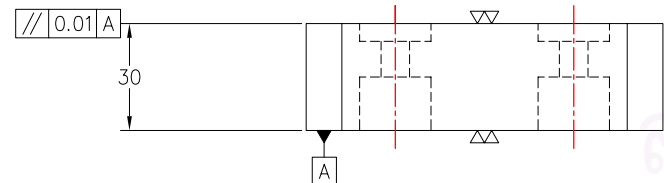
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
CROSS GUIDING GRIP		
SCALE: 1:2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	066



$\varnothing 8.25$
 $\varnothing 20^{+0.18}_{0.00}$ C'BORE, $5^{+0.015}_{-0.000}$ DEEP (SLIDE FIT WITH GUIDE POST)
 $\varnothing 20^{+0.18}_{0.00}$ C'BORE, 12.5 DEEP
 2 PLACES
 [0.01|A]



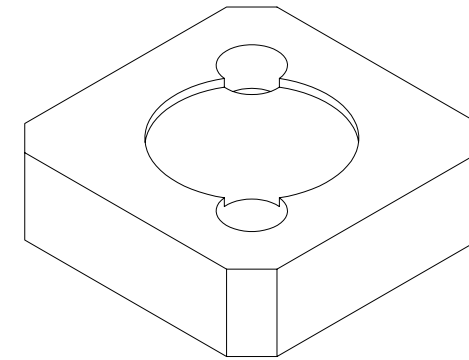
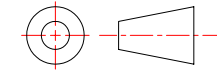
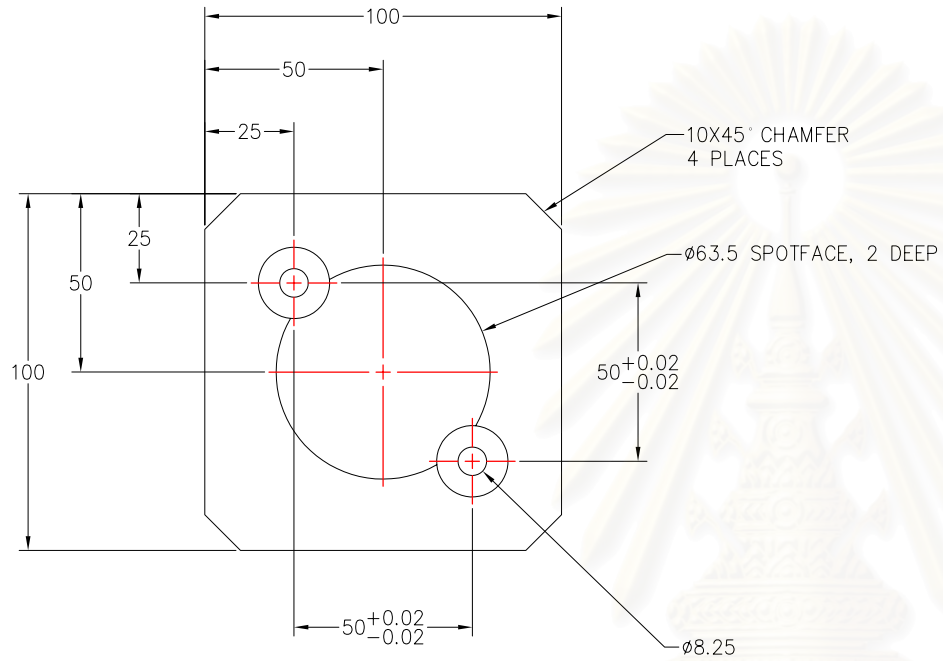
10X45° CHAMFER
 4 PLACES



86 BASE, SS400, BLACKENING , 1 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY		
BASEE		
SCALE: 1: 2	CODE: 4570589421	DRAWING NUMBER
DATE: 27/04/2005	DWN: SATJAPON	067

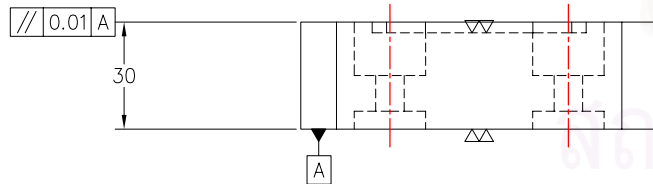


∅20^{+0.18}_{0.00} C'BORE, 15^{+0.015}_{-0.000} DEEP

∅20^{+0.18}_{0.00} C'BORE, 5^{+0.015}_{-0.000} DEEP (SLIDE FIT WITH GUIDE POST)

2 PLACES

∥ 0.01 | A



87 UPPER BLOCK, SS400. BLACKENING, 2 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

UPPER BLOCK

SCALE: 1:2

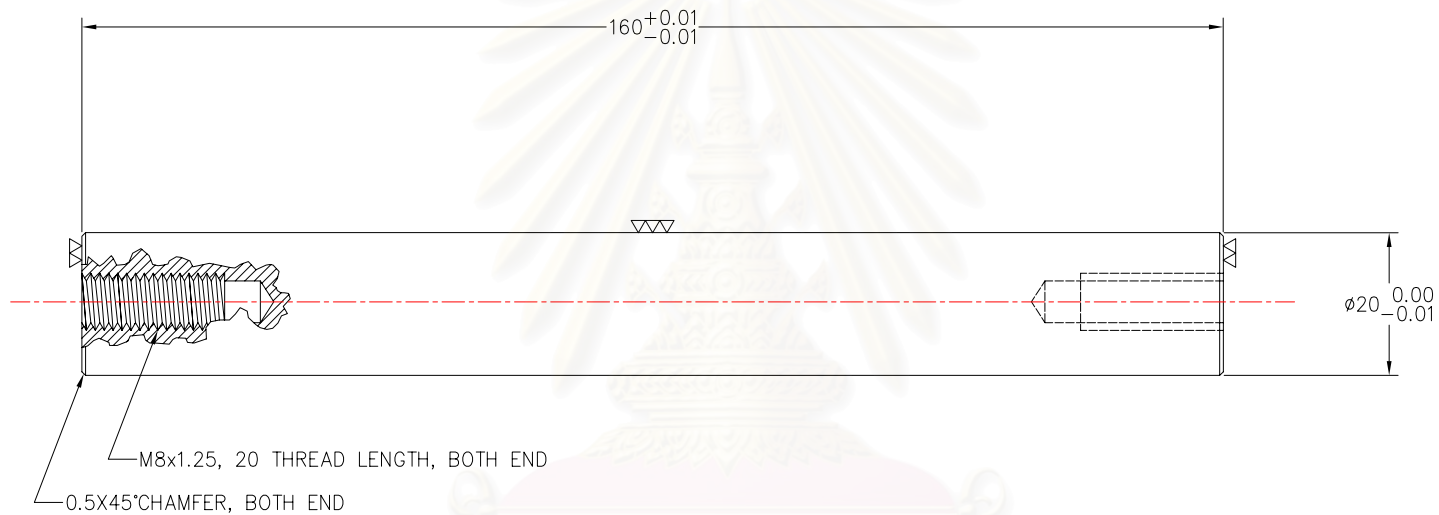
CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

068



88 GUIDE POST, STAINLESS 304 , 4 REQUIRED

1. All dimensions are in millimetres
2. All tolerances are ± 0.2 mm. unless otherwise specified

FACULTY OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

GUIDE POST

SCALE: 11

CODE: 4570589421

DRAWING NUMBER

DATE: 27/04/2005

DWN: SATJAPON

069

ภาคผนวก ค

การสอบเทียบโหลดเซลล์

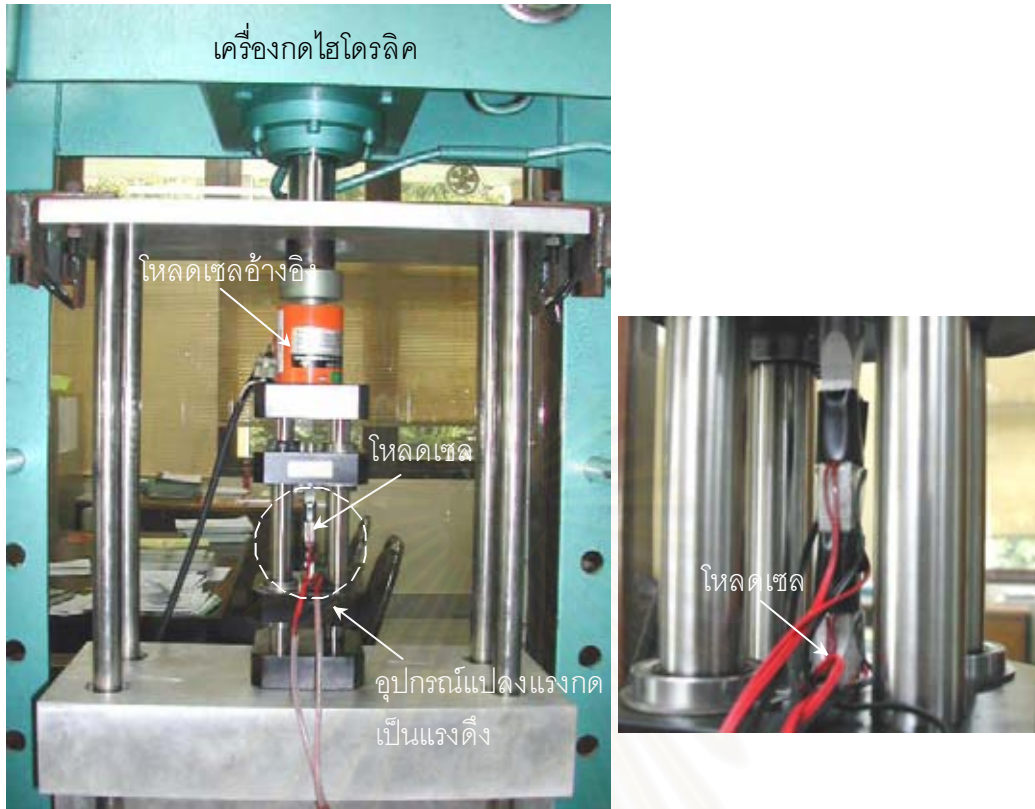
ค.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการสอบเทียบ คือหาความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับค่าเฉลี่ยของความเครียดที่อ่านจากเกจความเครียด จำนวน 4 ตัวซึ่งติดตั้งอยู่บนด้านทั้งสี่ของโหลดเซลล์ในทิศตามยาวของโหลดเซลล์ด้านละ 1 ตัว

ค.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ

ขั้นตอนการสอบเทียบโหลดเซลล์ที่สร้างขึ้น มีดังนี้

1. ประกอบโหลดเซลล์ที่สร้างกับอุปกรณ์เปลี่ยนแรงกดเป็นแรงดึง (รูปที่ ค.1)
2. วางอุปกรณ์ ฯ บนแท่นวางของเครื่องกดไฮดรอลิค (รูปที่ ค.1)
3. วางโหลดเซลล์อ้างอิงเหนือแท่นอันบนของอุปกรณ์เปลี่ยนแรงกดเป็นแรงดึง
4. ต่อวงจรสเตรนเกจแบบ half bridge โดยสเตรนเกจบนโหลดเซลล์เป็น active gage และสเตรนเกจบนชิ้นงานอ้างอิง (ที่ทำจากวัสดุเดียวกันกับโหลดเซลล์) เป็น dummy gage เพื่อชดเชยผลของอุณหภูมิ
5. ต่อสายไฟจากสเตรนเกจทั้งหมดเข้า switching box ซึ่งต่อกับสเตรนมิเตอร์
6. ปรับศูนย์ค่าความเครียดที่อ่านจากสเตรนมิเตอร์
7. ให้ภาระโหลดเซลล์
8. อ่านค่า ภาระและความเครียดจากสเตรนมิเตอร์
9. ทำขั้นตอนที่ 7 และ 8 ซ้ำ แต่เพิ่มขนาดภาระ การทดสอบสิ้นสุดเมื่อโหลดเซลล์รับภาระประมาณ 8,000 นิวตัน



รูปที่ ค.1 การจัดวางเครื่องมือเพื่อสอบเทียบโหลดเซลล์ที่สร้าง

ค.3 ข้อมูลความเครียดที่ขนาดภาระต่าง ๆ

ตารางที่ ค.1 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 1)

แรงดึง P (นิวตัน)	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย
	1	2	3	4	ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)
0	0	0	0	0	0
1,160	267	282	273	264	272
2,460	561	587	568	552	567
5,060	1,178	1,225	1,182	1,161	1,187
6,500	1,517	1,575	1,521	1,495	1,527
7,930	1,867	1,944	1,867	1,828	1,877

ตารางที่ ค.2 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 2)

แรงดึง P (นิวตัน)	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)
	1	2	3	4	
0	0	0	0	0	0
1,070	242	257	251	242	248
2,400	555	584	567	550	564
5,070	1,194	1,243	1,206	1,181	1,206
6,500	1,530	1,594	1,542	1,511	1,544
7,640	1,818	1,900	1,829	1,787	1,834
7,940	1,871	1,957	1,882	1,808	1,880

ตารางที่ ค.3 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 3)

แรงดึง P (นิวตัน)	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)
	1	2	3	4	
0	0	0	0	0	0
1,140	259	271	266	259	264
2,270	523	545	533	521	531
2,740	618	644	629	615	627
5,170	1,194	1,241	1,203	1,183	1,205
6,540	1,512	1,570	1,522	1,496	1,525
7,670	1,791	1,866	1,801	1,765	1,806
7,940	1,858	1,937	1,868	1,757	1,855

ตารางที่ ค.4 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 4)

แรงดึง P (นิวตัน)	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)
	1	2	3	4	
0	0	0	0	0	0
1,240	272	283	292	287	284
2,440	552	574	582	570	570
5,470	1,252	1,301	1,301	1,278	1,283
6,600	1,526	1,587	1,578	1,551	1,561
7,800	1,816	1,895	1,869	1,829	1,852

ตารางที่ ค.5 ผลการวัดความเครียด ณ ตำแหน่ง 1-4 ที่ขนาดภาระต่าง ๆ (ครั้งที่ 5)

แรงดึง P (นิวตัน)	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)
	1	2	3	4	
0	0	0	0	0	0
1,060	242	257	256	247	251
2,460	565	595	581	564	576
5,630	1,310	1,366	1,331	1,302	1,327
6,600	1,537	1,604	1,557	1,525	1,556
7,830	1,826	1,912	1,847	1,802	1,847

ค.4 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ

ข้อมูลแรงดึง P และความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ที่แสดงในตารางที่ ค.1 – ค.5 จะถูกนำมาวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (least square regression analysis) โดยสมการที่ใช้อยู่ในรูป

$$P = C\epsilon_{avg} \quad (\text{ค.1})$$

โดย C คือ สัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุด (best fit coefficient)

โดยอาศัยจุดข้อมูล N จุด ค่าประมาณที่ดีที่สุด (best estimate) สำหรับความไม่แน่นอนในผลการวัดแรงดึง P คือ

$$\delta P = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (P_i - C\epsilon_{avg,i})^2} \quad (\text{ค.2})$$

และความไม่แน่นอนใน C คือ

$$\delta C = \frac{\delta P}{\sqrt{\sum \epsilon_{avg,i}^2}} \quad (\text{ค.3})$$

เนื่องจากทำการทดลองซ้ำ ดังนั้นผลการทดลองแต่ละครั้งจะมีค่า C และ δC แตกต่างกัน วิทยานิพนธ์นี้หาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก จากสมการต่อไปนี้

$$\bar{C} = \frac{\sum \left(\frac{1}{\delta C_i^2} C_i \right)}{\sum \left(\frac{1}{\delta C_i^2} \right)} \quad (\text{ค.4})$$

และความไม่แน่นอนของค่า C คือ

$$\Delta C = \frac{1}{\sqrt{\sum \left(\frac{1}{\delta C_i^2} \right)}} \quad (\text{ค.5})$$

สัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุด C และความไม่แน่นอน δC ของการทดลองครั้งที่ 1-5 คือ

ครั้งที่	C	δC
1	4.248	1.139×10^{-2}
2	4.202	9.508×10^{-3}
3	4.277	9.576×10^{-3}
4	4.232	1.195×10^{-2}
5	4.242	2.571×10^{-3}

แทนค่าในสมการที่ (ค.5) จะได้

$$\bar{C} = 4.242 \text{ และ } \Delta C = 2.306 \times 10^{-3}$$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง P และความเครียดเฉลี่ย ε_{avg} ที่ได้จากการทดลองคือ

$$P = (4.242 \pm 0.0023) \varepsilon_{avg} \quad (\text{ค.6})$$

โดย P มีหน่วยเป็นนิวตัน และ ε_{avg} มีหน่วยเป็น $\mu\varepsilon$

ภาคผนวก ง

การสอบเทียบตุ้มน้ำหนัก

ง.1 ผลการสอบเทียบ

ตุ้มน้ำหนักที่ใช้ถูกสอบเทียบโดย สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น (สสท.) เมื่อวันที่ 14 ธันวาคม 2547 ผลการสอบเทียบสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ ง.1 ผลการสอบเทียบตุ้มน้ำหนัก

รหัส	น้ำหนักระบุ (กิโลกรัม)	ค่าเบี่ยงเบนจากน้ำหนักระบุ (กรัม)	ความไม่แน่นอน (มิลลิกรัม)
1	10	-2.16	60
2	10	-4.78	60
3	10	-2.42	60
4	10	-0.10	60
A	10	-2.35	60
B	10	-1.63	60
C	5	-0.12	50
D	5	-0.48	50
E	2	-0.069	8
F	2	-0.134	8
G	2	-0.02	8
H	1	-0.237	5
I	1	-0.363	5
J	1	-0.080	5
K	0.5	-0.050	3
L	0.5	+0.045	3

ง.2 การคำนวณค่าความไม่แน่นอน

ในการประเมินคุณภาพของเครื่องทดสอบ จะใช้ตุ้มน้ำหนักหลายก้อนรวมกันเพื่อให้ได้ขนาดน้ำหนักถ่วงระบุ 10, 20, 30, ... ,80 กิโลกรัม ค่าประมาณที่ดีที่สุด (best estimate) ของน้ำหนักถ่วง จะเท่ากับผลบวกของน้ำหนักจริงของตุ้มน้ำหนักที่นำมาใช้รวมกัน ส่วนความไม่แน่นอนจะเท่ากับรากที่สองของผลบวกกำลังสอง (root sum square) ดังนั้น ถ้าใช้ตุ้มน้ำหนัก N ก้อนรวมกัน โดยแต่ละก้อนมีขนาด $w_1 = \bar{w}_1 \pm \delta w_1$, $w_2 = \bar{w}_2 \pm \delta w_2$, ... , $w_N = \bar{w}_N \pm \delta w_N$ จะได้น้ำหนักถ่วง คือ

$$W = \bar{W} \pm \delta W \quad (\text{ง.1})$$

โดย
$$\bar{W} = \bar{w}_1 + \bar{w}_2 + \dots + \bar{w}_N \quad (\text{ง.2})$$

และ
$$\delta W = \sqrt{\delta w_1^2 + \delta w_2^2 + \dots + \delta w_N^2} \quad (\text{ง.3})$$

ตารางที่ ง.2 แสดงรหัสต้อน้ำหนักที่ใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้น้ำหนักถ่วง 10 – 80 กิโลกรัม คอลัมน์ที่สองแสดงขนาดน้ำหนักถ่วงที่ได้จากการสอบเทียบ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (ง.2) คอลัมน์ที่สาม แสดงค่าความไม่แน่นอนของน้ำหนักถ่วง ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (ง.3)

ตารางที่ ง.2 ผลการคำนวณน้ำหนักสอบเทียบ และค่าความไม่แน่นอน

น้ำหนักถ่วง W (กิโลกรัม)		ค่าความไม่แน่นอน δW (มิลลิกรัม)	รหัสต้อน้ำหนักที่ใช้
ค่าระบุ	ค่าสอบเทียบ		
10	9.998	60	1
20	19.993	85	1,2
30	29.991	104	1,2,3
40	39.991	120	1,2,3,4
50	49.988	134	1,2,3,4,A
60	59.987	147	1,2,3,4,A,B
70	69.986	163	1,2,3,4,A,B,C,D
80	79.985	164	1,2,3,4,A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดสอบเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การตัด และอัตราทดของคานทอดแรง

จ.1 ข้อมูลความเครียดที่น้ำหนักถ่วงขนาดต่าง ๆ

ตารางที่ จ.1 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1-4 ที่น้ำหนักถ่วง 10 กิโลกรัม ⁽ⁿ⁾

การทดลอง ครั้งที่	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ การตัด PB
	1	2	3	4		
1	232	193	213	259	224	19.0
2	224	193	220	256	223	15.0
3	239	193	207	255	224	21.0
4	232	198	213	252	224	16.3
5	229	211	214	238	223	9.4
6	233	213	209	235	223	10.3
7	225	219	220	229	223	3.4
8	239	188	207	262	224	23.7
9	248	215	199	236	225	15.6
10	218	209	228	241	224	9.4
11	234	182	212	269	224	24.3
12	229	217	216	232	224	6.3
13	236	217	209	231	223	9.2
14	252	244	194	209	225	20.7
15	233	209	211	241	224	12.1
16	231	197	215	255	225	16.5
17	241	229	202	222	224	10.3
18	232	229	211	219	223	7.0
19	215	219	229	232	224	6.0
20	235	210	207	238	223	12.6
21	229	207	219	245	225	10.7
ค่าเฉลี่ย					224	13.3
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ					0.7	6.0
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย σ_{mean} (95%)					0.3	2.7

⁽ⁿ⁾ ใช้ตุ้มน้ำหนักรหัส "1"

ตารางที่ ๑.2 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1- 4 ที่น้ำหนักถ่วง 20 กิโลกรัม ⁽ⁿ⁾

การทดลอง ครั้งที่	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\varepsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ε_{avg} ($\mu\varepsilon$)	เปอร์เซ็นต์ การตัด PB
	1	2	3	4		
1	466	439	427	461	448	6.8
2	452	459	440	443	449	3.1
3	467	487	426	417	449	12.4
4	444	378	446	524	448	16.5
5	458	448	438	456	450	3.1
6	454	416	441	485	449	9.1
7	480	426	410	474	448	13.2
8	466	409	428	495	450	13.8
9	484	453	408	449	449	8.9
10	476	429	419	472	449	11.1
11	456	448	439	453	449	2.4
12	448	410	444	491	448	9.5
13	449	431	443	471	449	5.1
14	469	418	424	482	448	12.2
15	457	444	435	456	448	3.8
16	449	462	447	439	449	2.8
17	425	459	469	443	449	6.7
18	469	438	422	465	449	8.2
19	446	433	448	471	450	4.4
20	468	422	427	481	450	11.1
21	435	422	458	481	449	9.1
ค่าเฉลี่ย					449	8.3
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ					0.6	4.1
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย σ_{mean} (95%)					0.3	1.9

⁽ⁿ⁾ ใช้ตุ้มน้ำหนักรหัส "1" และ "2"

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.3 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1- 4 ที่น้ำหนักถ่วง 30 กิโลกรัม ⁽ⁿ⁾

การทดลอง ครั้งที่	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ การตัด PB
	1	2	3	4		
1	649	646	699	717	678	8.9
2	676	713	671	648	677	5.2
3	699	693	643	663	675	6.4
4	674	695	669	662	675	2.8
5	679	650	666	709	676	5.3
6	712	661	633	699	676	8.7
7	712	711	637	654	679	9.7
8	661	651	687	708	677	6.1
9	706	729	641	636	678	11.7
10	710	679	636	679	676	5.5
11	711	701	635	659	677	8.7
12	709	654	641	705	677	8.8
13	695	686	653	675	677	3.9
14	709	696	639	662	677	7.7
15	660	652	687	709	677	6.2
16	712	689	633	671	676	7.2
17	706	697	642	666	678	7.0
18	689	709	657	652	677	6.6
19	683	696	662	664	676	3.9
20	659	644	689	717	677	7.6
21	715	719	632	639	676	12.1
ค่าเฉลี่ย					677	8.0
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ					0.9	3.6
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย σ_{mean} (95%)					0.4	1.6

⁽ⁿ⁾ ใช้ตุ้มน้ำหนักรหัส "1", "2" และ "3"

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.4 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1- 4 ที่น้ำหนักถ่วง 40 กิโลกรัม ⁽ⁿ⁾

การทดลอง ครั้งที่	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ การตัด PB
	1	2	3	4		
1	916	925	881	893	904	3.7
2	909	963	894	858	906	6.6
3	927	925	875	896	906	4.5
4	874	879	928	938	905	6.2
5	909	894	895	928	907	2.6
6	929	937	867	885	905	6.3
7	900	866	903	957	907	5.2
8	913	926	889	893	905	3.1
9	927	900	875	920	906	4.0
10	902	874	900	948	906	4.2
11	948	918	851	900	904	6.4
12	940	930	864	890	906	6.4
13	912	927	890	892	905	3.1
14	926	933	876	885	905	5.4
15	935	933	868	885	905	6.4
ค่าเฉลี่ย					905	4.9
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ					0.8	1.4
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย σ_{mean} (95%)					0.4	0.8

⁽ⁿ⁾ ใช้ตุ้มน้ำหนักรหัส "1", "2", "3" และ "4"

ตารางที่ ๑.5 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1- 4 ที่น้ำหนักถ่วง 50 กิโลกรัม ⁽ⁿ⁾

การทดลอง ครั้งที่	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ การตัด PB
	1	2	3	4		
1	1,156	1,167	1,098	1,108	1,132	5.2
2	1,135	1,172	1,118	1,104	1,132	3.8
3	1,126	1,088	1,127	1,188	1,132	4.5
4	1,188	1,162	1,065	1,116	1,133	7.5
5	1,162	1,188	1,091	1,089	1,133	7.5
6	1,130	1,098	1,118	1,188	1,134	4.5
7	1,132	1,132	1,122	1,142	1,132	0.9
8	1,136	1,104	1,121	1,169	1,133	3.5
9	1,172	1,184	1,082	1,094	1,133	7.9
10	1,176	1,155	1,082	1,120	1,133	5.7
11	1,137	1,066	1,118	1,211	1,133	7.2
12	1,153	1,136	1,102	1,140	1,133	2.4
13	1,187	1,166	1,070	1,111	1,134	7.6
14	1,138	1,114	1,121	1,163	1,134	2.9
15	1,183	1,142	1,072	1,138	1,134	5.1
16	1,149	1,140	1,107	1,139	1,134	1.9
17	1,128	1,117	1,129	1,164	1,135	2.1
18	1,158	1,148	1,098	1,132	1,134	3.4
19	1,108	1,097	1,148	1,181	1,134	5.5
20	1,172	1,178	1,086	1,102	1,135	7.1
21	1,136	1,099	1,119	1,175	1,132	4.1
ค่าเฉลี่ย					1,133	4.8
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ					0.8	2.1
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย σ_{mean} (95%)					0.4	1.0

⁽ⁿ⁾ ใช้ตุ้มน้ำหนักรหัส "1", "2", "3", "4" และ "A"

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.6 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1- 4 ที่น้ำหนักถ่วง 60 กิโลกรัม ⁽ⁿ⁾

การทดลอง ครั้งที่	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ การตัด PB
	1	2	3	4		
1	1,350	1,355	1,363	1,388	1,364	1.7
2	1,353	1,350	1,362	1,386	1,363	1.7
3	1,365	1,400	1,347	1,338	1,363	2.9
4	1,405	1,360	1,302	1,378	1,361	4.4
5	1,380	1,343	1,332	1,394	1,362	3.6
6	1,333	1,342	1,375	1,391	1,360	3.3
7	1,318	1,346	1,388	1,392	1,361	4.3
8	1,428	1,358	1,279	1,378	1,361	6.2
9	1,398	1,366	1,316	1,376	1,364	3.4
10	1,381	1,356	1,330	1,384	1,363	2.9
11	1,407	1,357	1,300	1,377	1,360	4.7
12	1,397	1,374	1,308	1,365	1,361	3.6
13	1,350	1,356	1,361	1,388	1,364	1.6
14	1,403	1,351	1,308	1,388	1,363	4.8
15	1,397	1,401	1,317	1,341	1,364	5.1
ค่าเฉลี่ย					1,362	3.6
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ					1.4	1.4
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย σ_{mean} (95%)					0.8	0.7

⁽ⁿ⁾ ใช้ตุ้มน้ำหนักรหัส "1", "2", "3", "4", "A" และ "B"

ตารางที่ ๑.7 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1- 4 ที่น้ำหนักถ่วง 70 กิโลกรัม ⁽ⁿ⁾

การทดลอง ครั้งที่	ความเครียดที่อ่าน ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ การตัด PB
	1	2	3	4		
1	1,608	1,619	1,563	1,587	1,594	2.4
2	1,615	1,591	1,564	1,612	1,596	2.3
3	1,563	1,559	1,612	1,649	1,596	4.4
4	1,577	1,611	1,598	1,595	1,595	1.2
5	1,611	1,636	1,560	1,570	1,594	3.7
6	1,649	1,580	1,526	1,629	1,596	5.4
7	1,638	1,627	1,535	1,583	1,596	4.6
8	1,645	1,621	1,530	1,585	1,595	4.7
9	1,631	1,588	1,542	1,620	1,595	3.8
10	1,619	1,595	1,558	1,617	1,597	2.6
11	1,635	1,580	1,543	1,630	1,597	4.4
12	1,602	1,599	1,569	1,608	1,595	1.3
13	1,605	1,634	1,573	1,581	1,598	2.7
14	1,563	1,558	1,613	1,652	1,597	4.5
15	1,592	1,605	1,583	1,605	1,596	0.3
ค่าเฉลี่ย					1,596	3.2
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ					1.1	1.5
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย σ_{mean} (95%)					0.6	0.8

⁽ⁿ⁾ ใช้ตุ้มน้ำหนักรหัส "1", "2", "3", "4", "A", "B", "C" และ "D"

ตารางที่ ๑.8 ความเครียดของสเตรนเกจหมายเลข 1- 4 ที่น้ำหนักถ่วง 80 กิโลกรัม⁽ⁿ⁾

การทดลอง ครั้งที่	ความเครียด ณ เกจความเครียด ($\mu\epsilon$)				ความเครียดเฉลี่ย ϵ_{avg} ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ การตัด PB
	1	2	3	4		
1	1,811	1,792	1,831	1,890	1,831	3.2
2	1,818	1,807	1,820	1,871	1,829	1.8
3	1,857	1,864	1,783	1,818	1,831	3.3
4	1,848	1,856	1,788	1,821	1,828	2.6
5	1,818	1,793	1,819	1,884	1,829	2.5
6	1,816	1,789	1,823	1,887	1,829	2.9
7	1,841	1,829	1,788	1,847	1,826	1.9
8	1,828	1,794	1,812	1,884	1,830	2.9
9	1,841	1,807	1,800	1,874	1,831	3.0
10	1,820	1,789	1,818	1,889	1,829	2.8
11	1,829	1,806	1,814	1,871	1,830	2.2
12	1,825	1,800	1,812	1,877	1,829	2.5
13	1,847	1,828	1,804	1,880	1,840	2.6
14	1,837	1,819	1,803	1,858	1,829	2.0
15	1,838	1,818	1,798	1,860	1,829	2.2
ค่าเฉลี่ย					1,830	2.6
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ					3.0	0.5
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย σ_{mean} (95%)					1.6	0.3

⁽ⁿ⁾ ใช้ตุ้มน้ำหนักรหัส “1”, “2”, “3”, “4”, “A”, “B”, “C”, “D”, “E”, “F”, “G”, “H”, “I”, “J”, “K” และ “L”

๑.2 การทดสอบไคกำลังสอง (Chi-square test χ^2)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบไคกำลังสองในที่นี้ คือเพื่อตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลเปอร์เซ็นต์การตัด PB ว่ามีลักษณะเป็นการแจกแจงปกติ (normal distribution) หรือไม่ การตรวจสอบข้อมูลในตารางที่ ๑.1 - ๑.8 เริ่มจากแบ่งช่วงข้อมูลออกเป็น 4 ช่วงคือ $x \leq \bar{x} - \sigma$, $\bar{x} - \sigma < x \leq \bar{x}$, $\bar{x} < x \leq \bar{x} + \sigma$ และ $\bar{x} > \bar{x} + \sigma$ ดังนั้นองศาอิสระ (degree of freedom) จะมีค่าเท่ากับ 1 จากนั้นคำนวณค่าไคกำลังสองวิกฤติ χ_c^2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (และที่องศาอิสระเท่ากับ 1) จะได้ $\chi_c^2 = 3.84$ สุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบค่าไคกำลังสองของข้อมูลกับค่าวิกฤติ หากค่าที่ได้จากข้อมูลน้อยกว่าค่าวิกฤติแล้วจะสรุปว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ ผลการคำนวณค่าไคกำลังสองสรุปอยู่ในตารางที่ ๑.9 จากตารางสรุปได้ว่า เปอร์เซ็นต์การตัดที่ขนาดภาวะใด ๆ มีการแจกแจงปกติ

ตารางที่ ๑.๑ ค่าไคกำลังสองของผลการวัดเปอร์เซ็นต์การตัดที่น้ำหนักถ่วง 10 ถึง 80 กิโลกรัม

ขนาดน้ำหนักถ่วง (กิโลกรัม)	χ^2
10	0.99
20	1.58
30	0.18
40	0.61
50	3.58
60	0.61
70	0.61
80	0.61

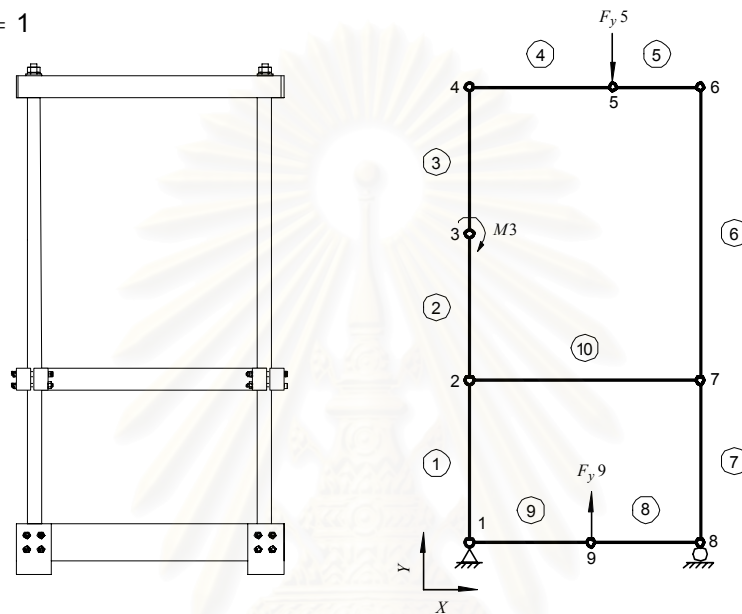


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การคำนวณความแข็งแรงของโครงสร้างทดสอบ

ORIGIN := 1



1) CONFIGURATION DATA

Number of element NE := 10 j := 1..NE

Number of node NN := 9 i := 1..NN

Number of degree of freedom per node NDF := 3

Nodal coordinates

$x_i :=$ $y_i :=$

0·m	0·m
0·m	0.45·m
0·m	0.885·m
0·m	1.32·m
0.4·m	1.32·m
0.65·m	1.32·m
0.65·m	0.45·m
0.65·m	0·m
0.34·m	0·m

Element connectivity

CON :=

1	2
2	3
3	4
4	5
5	6
6	7
7	8
9	8
1	9
2	7

2) ELEMENT PROPERTIES

209

Material properties

Section properties

Young' s modulus

Cross-section area

Moment of inertia

$$E_j :=$$

$$A_j :=$$

$$I_j :=$$

$180 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$180 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$180 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$200 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$200 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$180 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$180 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$200 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$200 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$
$200 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$

$1.14 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$1.14 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$1.14 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$2.70 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$2.70 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$1.14 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$1.14 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$8.00 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$8.00 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$
$1.20 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$

$1.3 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^4$
$1.3 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^4$
$1.3 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^4$
$8.10 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^4$
$8.10 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^4$
$1.3 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^4$
$1.3 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^4$
$6.67 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^4$
$6.67 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m}^4$
$3.60 \cdot 10^{-7} \cdot \text{m}^4$

3) APPLY LOADS

3.1 Distributed load

$$p_j := 0 \cdot \frac{\text{newton}}{\text{m}} \quad \{\text{No distributed load in our model}\}$$

3.2 Nodal loads

$$q := 1 \dots \text{NN} \cdot \text{NDF}$$

Initialize

$$P_q := 0$$

Assign values

$$P_{14} := -4400 \quad \{\text{newton}\}$$

$$P_{26} := 4000 \quad \{\text{newton}\}$$

$$P_9 := -50 \quad \{\text{newton-m}\}$$

NOTE : Subscript denotes the DOF number

Nodal load vector due to point force and point moment is (partially display)

$$p^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	1	0	0	0	0	0	0	0	-50	0	0	0	0

4) FORMULATION OF AN ELEMENT EQUATION

210

Dimensionless all input variables

$$E := E \cdot \text{Pa}^{-1} \quad I := I \cdot \text{m}^{-4} \quad A := A \cdot \text{m}^{-2} \quad p := p \cdot \frac{\text{m}}{\text{newton}}$$

Element length

$$L_{e_j} := \sqrt{\left[x(\text{CON}_{j,1}) - x(\text{CON}_{j,2}) \right]^2 + \left[y(\text{CON}_{j,1}) - y(\text{CON}_{j,2}) \right]^2} \cdot \text{m}^{-1}$$

Transformaiton matrix

$$M_j := \frac{\left[y(\text{CON}_{j,2}) - y(\text{CON}_{j,1}) \right] \cdot \text{m}^{-1}}{L_{e_j}}$$

$$L_j := \frac{\left[x(\text{CON}_{j,2}) - x(\text{CON}_{j,1}) \right] \cdot \text{m}^{-1}}{L_{e_j}}$$

$$LT_j := \begin{pmatrix} L_j & M_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -M_j & L_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_j & M_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -M_j & L_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$k_{p_j} := \begin{bmatrix} \frac{E_j \cdot A_j}{L_{e_j}} & 0 & 0 & -\frac{E_j \cdot A_j}{L_{e_j}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^3} & \frac{6 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^2} & 0 & -\frac{12 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^3} & \frac{6 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^2} & \frac{4 \cdot E_j \cdot I_j}{L_{e_j}} & 0 & -\frac{6 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^2} & \frac{2 \cdot E_j \cdot I_j}{L_{e_j}} \\ -\frac{E_j \cdot A_j}{L_{e_j}} & 0 & 0 & \frac{E_j \cdot A_j}{L_{e_j}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^3} & -\frac{6 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^2} & 0 & \frac{12 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^3} & -\frac{6 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^2} \\ 0 & \frac{6 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^2} & \frac{2 \cdot E_j \cdot I_j}{L_{e_j}} & 0 & -\frac{6 \cdot E_j \cdot I_j}{(L_{e_j})^2} & \frac{4 \cdot E_j \cdot I_j}{L_{e_j}} \end{bmatrix}$$

Local equivalent nodal load vector due to uniformly distributed load p

$$f_{p_j} := \begin{bmatrix} 0 & \frac{p_j \cdot L_{e_j}}{2} & \frac{p_j \cdot (L_{e_j})^2}{12} & 0 & \frac{p_j \cdot L_{e_j}}{2} & -\frac{p_j \cdot (L_{e_j})^2}{12} \end{bmatrix}^T$$

Global element stiffness matrix and nodal load vector due to distributed load p

$$k_j := L T_j^T \cdot k_{p_j} \cdot L T_j$$

$$f_j := L T_j^T \cdot f_{p_j}$$

$$k_1 = \begin{pmatrix} 30.8 & 0.0 & -6.9 & -30.8 & 0.0 & -6.9 \\ 0.0 & 4560.0 & 0.0 & 0.0 & -4560.0 & 0.0 \\ -6.9 & 0.0 & 2.1 & 6.9 & 0.0 & 1.0 \\ -30.8 & 0.0 & 6.9 & 30.8 & 0.0 & 6.9 \\ 0.0 & -4560.0 & 0.0 & 0.0 & 4560.0 & 0.0 \\ -6.9 & 0.0 & 1.0 & 6.9 & 0.0 & 2.1 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_2 = \begin{pmatrix} 34.1 & 0.0 & -7.4 & -34.1 & 0.0 & -7.4 \\ 0.0 & 4717.2 & 0.0 & 0.0 & -4717.2 & 0.0 \\ -7.4 & 0.0 & 2.2 & 7.4 & 0.0 & 1.1 \\ -34.1 & 0.0 & 7.4 & 34.1 & 0.0 & 7.4 \\ 0.0 & -4717.2 & 0.0 & 0.0 & 4717.2 & 0.0 \\ -7.4 & 0.0 & 1.1 & 7.4 & 0.0 & 2.2 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_3 = \begin{pmatrix} 34.1 & 0.0 & -7.4 & -34.1 & 0.0 & -7.4 \\ 0.0 & 4717.2 & 0.0 & 0.0 & -4717.2 & 0.0 \\ -7.4 & 0.0 & 2.2 & 7.4 & 0.0 & 1.1 \\ -34.1 & 0.0 & 7.4 & 34.1 & 0.0 & 7.4 \\ 0.0 & -4717.2 & 0.0 & 0.0 & 4717.2 & 0.0 \\ -7.4 & 0.0 & 1.1 & 7.4 & 0.0 & 2.2 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_4 = \begin{pmatrix} 13500.0 & 0.0 & 0.0 & -13500.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 303.7 & 60.7 & 0.0 & -303.7 & 60.7 \\ 0.0 & 60.7 & 16.2 & 0.0 & -60.7 & 8.1 \\ -13500.0 & 0.0 & 0.0 & 13500.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -303.7 & -60.7 & 0.0 & 303.7 & -60.7 \\ 0.0 & 60.7 & 8.1 & 0.0 & -60.7 & 16.2 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_5 = \begin{pmatrix} 21600.0 & 0.0 & 0.0 & -21600.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1244.2 & 155.5 & 0.0 & -1244.2 & 155.5 \\ 0.0 & 155.5 & 25.9 & 0.0 & -155.5 & 13.0 \\ -21600.0 & 0.0 & 0.0 & 21600.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -1244.2 & -155.5 & 0.0 & 1244.2 & -155.5 \\ 0.0 & 155.5 & 13.0 & 0.0 & -155.5 & 25.9 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_6 = \begin{pmatrix} 4.3 & 0.0 & 1.9 & -4.3 & 0.0 & 1.9 \\ 0.0 & 2358.6 & 0.0 & 0.0 & -2358.6 & 0.0 \\ 1.9 & 0.0 & 1.1 & -1.9 & 0.0 & 0.5 \\ -4.3 & 0.0 & -1.9 & 4.3 & 0.0 & -1.9 \\ 0.0 & -2358.6 & 0.0 & 0.0 & 2358.6 & 0.0 \\ 1.9 & 0.0 & 0.5 & -1.9 & 0.0 & 1.1 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_6 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_7 = \begin{pmatrix} 30.8 & 0.0 & 6.9 & -30.8 & 0.0 & 6.9 \\ 0.0 & 4560.0 & 0.0 & 0.0 & -4560.0 & 0.0 \\ 6.9 & 0.0 & 2.1 & -6.9 & 0.0 & 1.0 \\ -30.8 & 0.0 & -6.9 & 30.8 & 0.0 & -6.9 \\ 0.0 & -4560.0 & 0.0 & 0.0 & 4560.0 & 0.0 \\ 6.9 & 0.0 & 1.0 & -6.9 & 0.0 & 2.1 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_7 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_8 = \begin{pmatrix} 51612.9 & 0.0 & 0.0 & -51612.9 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 5373.4 & 832.9 & 0.0 & -5373.4 & 832.9 \\ 0.0 & 832.9 & 172.1 & 0.0 & -832.9 & 86.1 \\ -51612.9 & 0.0 & 0.0 & 51612.9 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -5373.4 & -832.9 & 0.0 & 5373.4 & -832.9 \\ 0.0 & 832.9 & 86.1 & 0.0 & -832.9 & 172.1 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_8 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_9 = \begin{pmatrix} 47058.8 & 0.0 & 0.0 & -47058.8 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 4072.9 & 692.4 & 0.0 & -4072.9 & 692.4 \\ 0.0 & 692.4 & 156.9 & 0.0 & -692.4 & 78.5 \\ -47058.8 & 0.0 & 0.0 & 47058.8 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -4072.9 & -692.4 & 0.0 & 4072.9 & -692.4 \\ 0.0 & 692.4 & 78.5 & 0.0 & -692.4 & 156.9 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_9 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$k_{10} = \begin{pmatrix} 3692.3 & 0.0 & 0.0 & -3692.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 31.5 & 10.2 & 0.0 & -31.5 & 10.2 \\ 0.0 & 10.2 & 4.4 & 0.0 & -10.2 & 2.2 \\ -3692.3 & 0.0 & 0.0 & 3692.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -31.5 & -10.2 & 0.0 & 31.5 & -10.2 \\ 0.0 & 10.2 & 2.2 & 0.0 & -10.2 & 4.4 \end{pmatrix} 10^5 \quad f_{10} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

5) ASSEMBLE AN ELEMENT EQUATION

214

Global stiffness matrix [K] and global load vector {F} are the assemble results of global element matrix previously shown at a corresponding degree of freedom number.

5.1) Assembly of the element stiffness matrix

```
K := | NNODE ← 2
      | NDF ← 3
      | for i ∈ 1 .. NDF·NN
      |   | SYSFi ← 0
      |   | for j ∈ 1 .. NDF·NN
      |   |   | SYSKi,j ← 0
      |   | for j ∈ 1 .. NE
      |   |   | for NR ∈ 1 .. NNODE
      |   |   |   | NODR ← CONj, NR
      |   |   |   | for MR ∈ 1 .. NDF
      |   |   |   |   | NSR ← (NODR - 1)·NDF + MR
      |   |   |   |   | NER ← (NR - 1)·NDF + MR
      |   |   |   |   | SYSFNSR ← SYSFNSR + (fj)NER
      |   |   |   |   | for NC ∈ 1 .. NNODE
      |   |   |   |   |   | NODC ← CONj, NC
      |   |   |   |   |   | for MC ∈ 1 .. NDF
      |   |   |   |   |   |   | NSC ← (NODC - 1)·NDF + MC
      |   |   |   |   |   |   | NEC ← (NC - 1)·NDF + MC
      |   |   |   |   |   |   | SYSKNSR, NSC ← SYSKNSR, NSC + (kj)NER, NEC
      |   |   |   |   |   |   | SYSK
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2) Assembly of the element nodal load vector

```

F :=
  NNODE ← 2
  NDF ← 3
  for i ∈ 1..NDF·NN
    SYSFi ← 0
  for j ∈ 1..NE
    for NR ∈ 1..NNODE
      NODR ← CONj, NR
      for MR ∈ 1..NDF
        NSR ← (NODR - 1)·NDF + MR
        NER ← (NR - 1)·NDF + MR
        SYSFNSR ← SYSFNSR + (fj)NER
      SYSF ← SYSF + P
    SYSF
  
```

The results are partially shown below. ($[K]$ is a matrix of 27×27 , $\{F\}$ is a vector of 27×1)

	1	2	3	4	5	6	7
1	4708.964	0	-0.693	-3.081	0	-0.693	0
2	0	863.287	69.239	0	-456	0	0
3	-0.693	69.239	15.902	0.693	0	0.104	0
4	-3.081	0	0.693	375.724	0	-0.049	-3.411
5	0	-456	0	0	930.87	1.022	0
6	-0.693	0	0.104	-0.049	1.022	0.866	0.742
7	0	0	0	-3.411	0	0.742	6.823
8	0	0	0	0	-471.724	0	0
9	0	0	0	-0.742	0	0.108	0
10	0	0	0	0	0	0	-3.411
11	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	-0.742
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0

10^6

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-50.00	0.00

6) SOLVE FOR UNKNOWN DISPLACEMENT

216

Herein, we use the penalty approach to find the unknown displacements. Therefore, it is necessary to modify the elements of stiffness matrix at DOF number which the displacements are known to be zero.

$$\text{DOFN} := 1 \quad K_{\text{DOFN},\text{DOFN}} := 2500 \cdot K_{\text{DOFN},\text{DOFN}} \quad \{\text{No horizontal displacement at node \#1}\}$$

$$\text{DOFN} := 2 \quad K_{\text{DOFN},\text{DOFN}} := 2500 \cdot K_{\text{DOFN},\text{DOFN}} \quad \{\text{No vertical displacement at node \#1}\}$$

$$\text{DOFN} := 23 \quad K_{\text{DOFN},\text{DOFN}} := 2500 \cdot K_{\text{DOFN},\text{DOFN}} \quad \{\text{No vertical displacement at node \#8}\}$$

Nodal displacement vector is $Q := \text{geninv}(K) \cdot F \cdot 1000$

	1
1	0
2	0
3	0.073
4	0.004
5	-0.004
6	0.034
7	-0.008
8	-0.007
9	-0.16
10	0.1
11	-0.011
12	-0.521
13	0.1
14	-0.135
15	0.173
16	0.1
17	-0.018
18	0.585
19	0.005
20	-0.006
21	-0.072
22	-0
23	-0
24	-0.075
25	-0
26	0.016
27	-0.005

{in mm}

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
 ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

7. DEFLECTION CURVE OF HORIZONTAL PARTS

217

Interpolation function for **vertical deflection**

$$N_1(x,i) := 1 - \frac{3 \cdot x^2}{(L_{e_i})^2} + \frac{2 \cdot x^3}{(L_{e_i})^3} \quad N_2(x,i) := x - \frac{2 \cdot x^2}{L_{e_i}} + \frac{x^3}{(L_{e_i})^2}$$

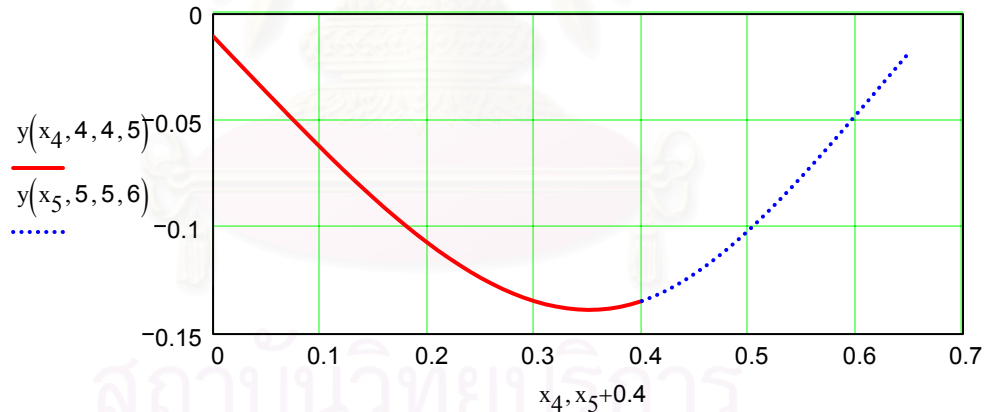
$$N_3(x,i) := \frac{3 \cdot x^2}{(L_{e_i})^2} - \frac{2 \cdot x^3}{(L_{e_i})^3} \quad N_4(x,i) := \frac{x^3}{(L_{e_i})^2} - \frac{x^2}{L_{e_i}}$$

Deflection curve for element with known nodal displacements is given by

$$y(x, \text{elem}, \text{node}_i, \text{node}_j) := N_1(x, \text{elem}) \cdot Q_{3, \text{node}_i-1} + N_2(x, \text{elem}) \cdot Q_{3, \text{node}_i} \dots \\ + N_3(x, \text{elem}) \cdot Q_{3, \text{node}_j-1} + N_4(x, \text{elem}) \cdot Q_{3, \text{node}_j}$$

7.1 TOP BEAM

$$x_4 := 0, 0.01 \dots 0.4 \quad x_5 := 0, 0.01 \dots 0.25$$



The maximum deflection is

$$w_{\text{top_max}} := -0.139 \cdot \text{mm}$$

Normalized with the span (650 mm) yield

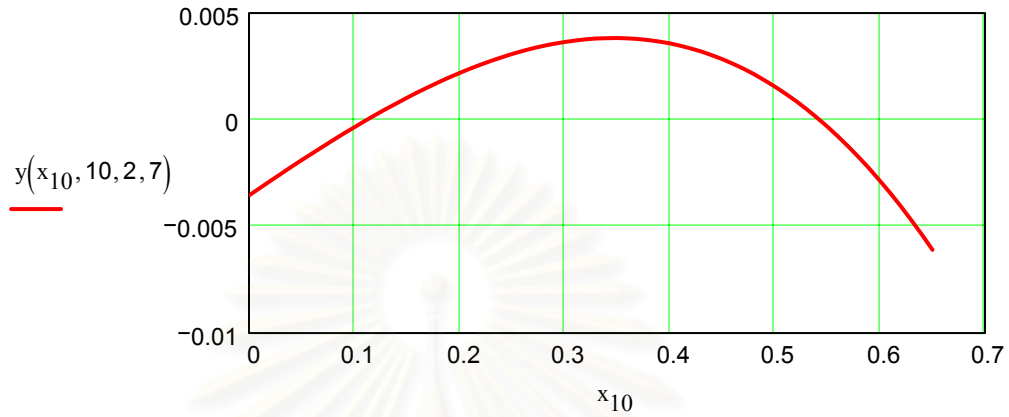
$$C := \left| \frac{w_{\text{top_max}}}{650 \cdot \text{mm}} \right|$$

$$C = 2.138 \times 10^{-4}$$

7.2 MIDDLE BEAM

218

$$x_{10} := 0, 0.01 \dots 0.65$$



The maximum deflection is

$$w_{\text{middle_max}} := (0.004 + Q_{20}) \cdot \text{mm}$$

Normalized with the span (650 mm) yield

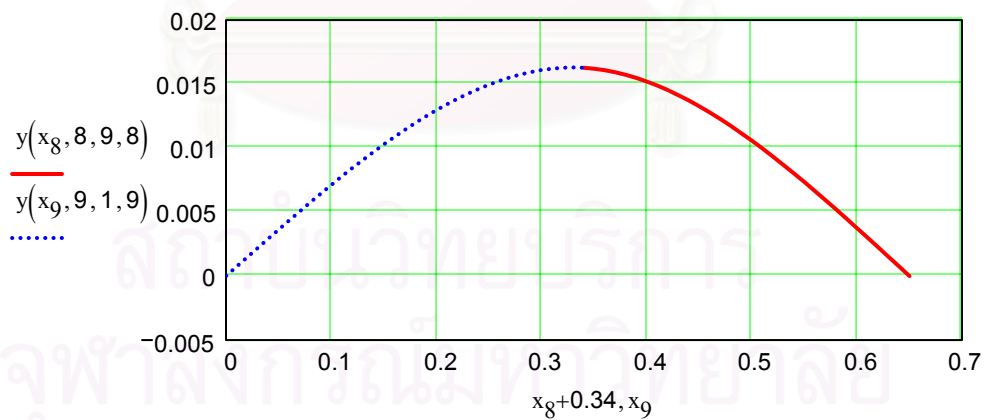
$$C := \left| \frac{w_{\text{middle_max}}}{650 \cdot \text{mm}} \right|$$

$$C = 3.232 \times 10^{-6}$$

7.3 BASE

$$x_8 := 0, 0.01 \dots 0.31$$

$$x_9 := 0, 0.01 \dots 0.34$$



The maximum deflection is

$$w_{\text{base_max}} := 0.016 \cdot \text{mm}$$

Normalized with the span (650 mm) yield

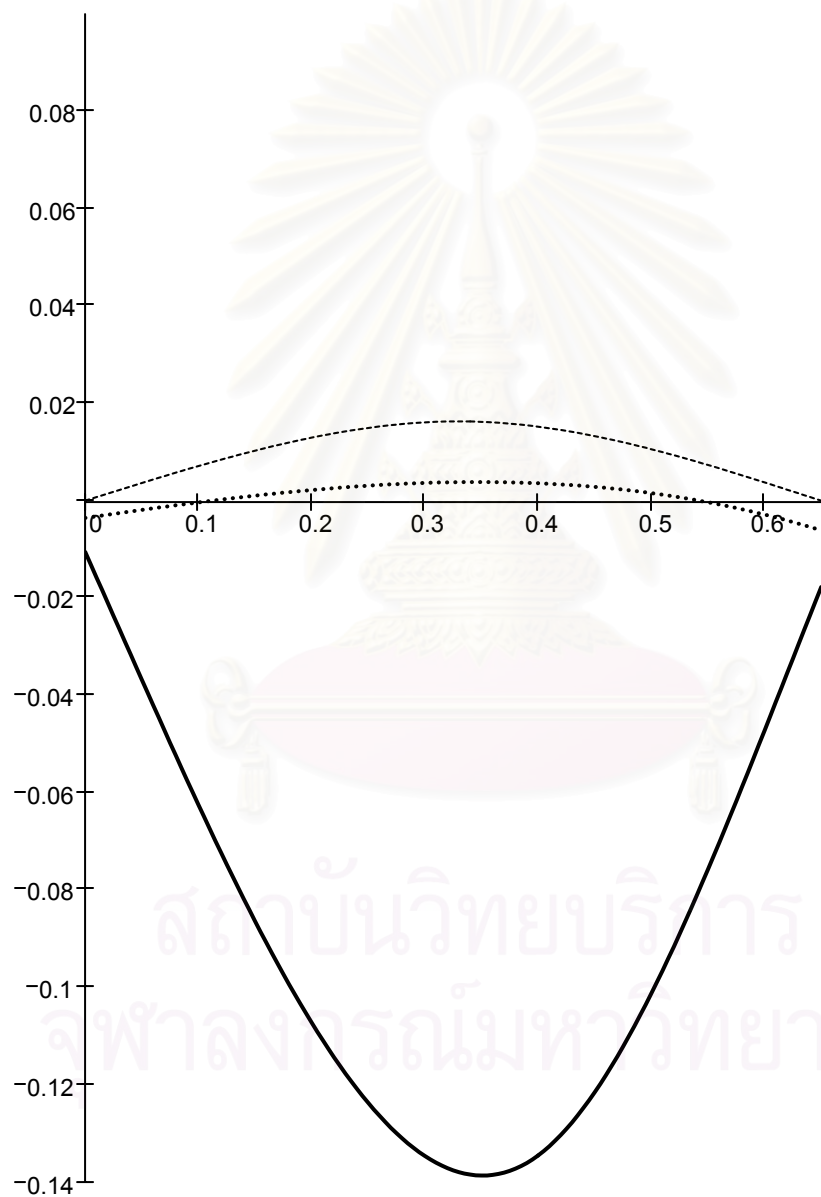
$$C := \left| \frac{w_{\text{base_max}}}{650 \cdot \text{mm}} \right|$$

$$C = 2.462 \times 10^{-5}$$

$$x_4 := 0,0.005 \dots 0.4 \quad x_5 := 0,0.005 \dots 0.25$$

$$x_{10} := 0,0.005 \dots 0.65$$

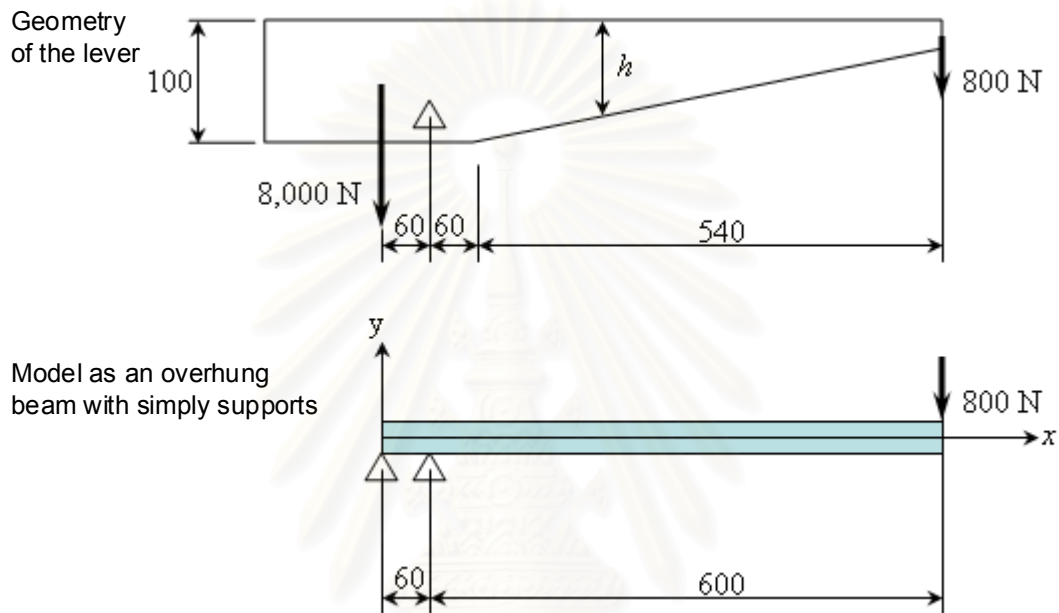
$$x_8 := 0,0.005 \dots 0.31 \quad x_9 := 0,0.005 \dots 0.34$$



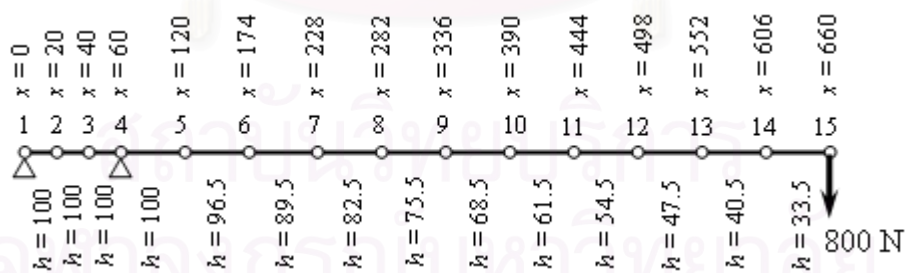
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

การคำนวณความแข็งแรงของคานทอดแรง



Finite element model (15 nodes, 14 elements)



$N := \text{newton}$ $\text{ORIGIN} := 1$ $\text{kN} := 10^3 \cdot \text{N}$
 Beam length $L := 660 \cdot \text{mm}$ $E := 207 \cdot 10^9 \cdot \text{Pa}$ $t := 9 \cdot \text{mm}$
 No. of Node $\text{NNODE} := 15$

NODAL DATA $i := 1 .. \text{NNODE}$

Nodal coordinates (from the left end)	Point Load magnitude	Lever arm height	
		Left side of node	Right side of node
$x_{p_i} :=$	$F_i :=$	$hL_i :=$	$hR_i :=$
0·mm	0·N	100·mm	100·mm
20·mm	0·N	100·mm	100·mm
40·mm	0·N	100·mm	100·mm
60·mm	0·N	100·mm	100·mm
120·mm	0·N	100·mm	96.5·mm
174·mm	0·N	96.5·mm	89.5·mm
228·mm	0·N	89.5·mm	82.5·mm
282·mm	0·N	82.5·mm	75.5·mm
336·mm	0·N	75.5·mm	68.5·mm
390·mm	0·N	68.5·mm	61.5·mm
444·mm	0·N	61.5·mm	54.5·mm
498·mm	0·N	54.5·mm	47.5·mm
552·mm	0·N	47.5·mm	40.5·mm
606·mm	0·N	40.5·mm	33.5·mm
660·mm	-800·N	33.5·mm	33.5·mm

Support location $x_A := 0 \cdot \text{mm}$ $x_B := 660 \cdot \text{mm}$

Area moment of Inertia $IL_i := 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot t \cdot (hL_i)^3 \right]$ $IR_i := 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot t \cdot (hR_i)^3 \right]$

{Factor 2 is used because the lever arm is composed of two side plates}

Compute the support reactions

$$R_A := \frac{1}{x_B - x_A} \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{NNODE}} F_i \cdot (x_{p_i} - x_B) \right] \quad \boxed{R_A = -8000 \text{ N}}$$

$$R_B := \frac{-1}{x_B - x_A} \cdot \left[\sum_{i=1}^{\text{NNODE}} F_i \cdot (x_{p_i} - x_A) \right] \quad \boxed{R_B = 8800 \text{ N}}$$

$$w(X) := R_A \cdot \left[(X - x_A)^{-1} \cdot \Phi(X - x_A) \right] + R_B \cdot \left[(X - x_B)^{-1} \cdot \Phi(X - x_B) \right] \dots$$

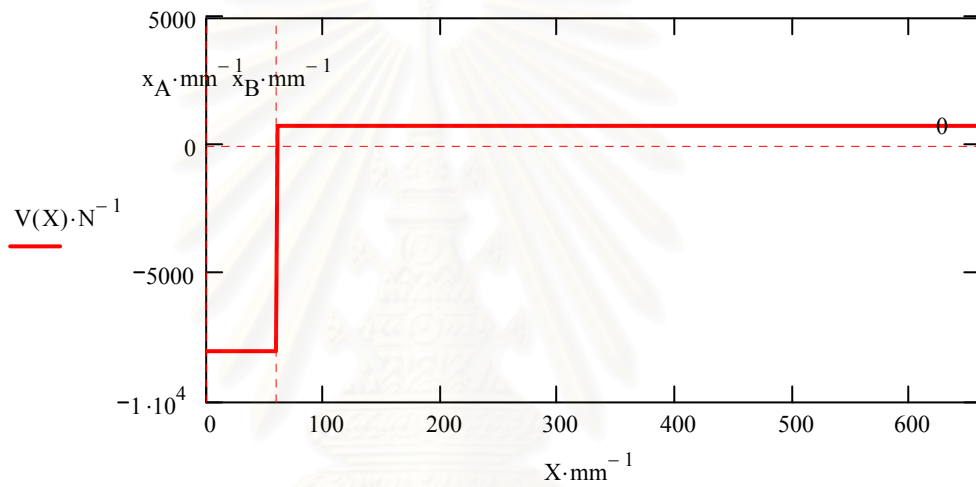
$$+ \sum_{i=1}^{N\text{NODE}} F_i \cdot \left[(X - x_{p_i})^{-1} \cdot \Phi(X - x_{p_i}) \right]$$

Shear force distribution

$$V(X) := R_A \cdot \Phi(X - x_A) + R_B \cdot \Phi(X - x_B) + \sum_{i=1}^{N\text{NODE}} F_i \cdot \Phi(X - x_{p_i})$$

SFD

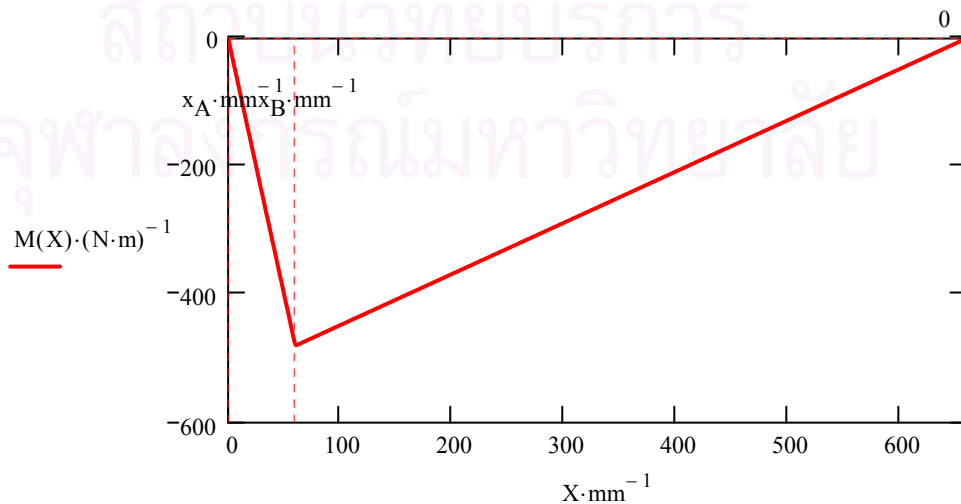
X := 0·mm, 0.002·L .. 1·L



Bending moment distribution

$$M(X) := R_A \cdot \Phi(X - x_A) \cdot (X - x_A) + R_B \cdot \Phi(X - x_B) \cdot (X - x_B) + \sum_{i=1}^{N\text{NODE}} F_i \cdot \Phi(X - x_{p_i}) \cdot (X - x_{p_i})$$

BMD



$$MEI_{2:i-1} := \frac{M(xp_i)}{E \cdot IL_i} \qquad MEI_{2:i} := \frac{M(xp_i)}{E \cdot IR_i}$$

$$XP_{2:i-1} := xp_i \qquad XP_{2:i} := xp_i$$

j := 1 .. 2NNODE - 1

First integration

$$A_1 := \frac{1}{2} \cdot (MEI_2 + MEI_1) \cdot (XP_2 - XP_1)$$

$$A_{j+1} := A_j + \frac{1}{2} \cdot (MEI_{j+1} + MEI_j) \cdot (XP_{j+1} - XP_j)$$

$$\phi_i := A_{2:i-1}$$

Second integration

$$AA_1 := \frac{1}{2} \cdot (A_2 + A_1) \cdot (XP_2 - XP_1)$$

$$AA_{j+1} := AA_j + \frac{1}{2} \cdot (A_{j+1} + A_j) \cdot (XP_{j+1} - XP_j)$$

$$\psi_i := AA_{2:i-1}$$

$\phi =$

	1
1	0
2	-5.153·10 ⁻⁶
3	-2.061·10 ⁻⁵
4	-4.638·10 ⁻⁵
5	-1.345·10 ⁻⁴
6	-2.139·10 ⁻⁴
7	-3.03·10 ⁻⁴
8	-4.033·10 ⁻⁴
9	-5.168·10 ⁻⁴
10	-6.454·10 ⁻⁴
11	-7.907·10 ⁻⁴
12	-9.532·10 ⁻⁴
13	-1.128·10 ⁻³
14	-1.298·10 ⁻³
15	-1.398·10 ⁻³

$\psi =$

	1
1	0
2	-5.153·10 ⁻⁸
3	-3.092·10 ⁻⁷
4	-9.791·10 ⁻⁷
5	-6.405·10 ⁻⁶
6	-1.581·10 ⁻⁵
7	-2.977·10 ⁻⁵
8	-4.884·10 ⁻⁵
9	-7.368·10 ⁻⁵
10	-1.051·10 ⁻⁴
11	-1.438·10 ⁻⁴
12	-1.909·10 ⁻⁴
13	-2.471·10 ⁻⁴
14	-3.126·10 ⁻⁴
15	-3.854·10 ⁻⁴

m

Apply boundary conditions. In our problem the deflection at node 1 and 4 have to be zero. Therefore,

$$C_1 := \frac{\psi_4 - \psi_1}{x_A - x_B} \quad C_1 = 1.632 \times 10^{-5}$$

$$C_2 := -\psi_4 - C_1 \cdot x_B \quad C_2 = 0 \text{ mm}$$

where both are undetermined coefficients of an equation $y = \psi_i + C_1 \cdot xp_i + C_2$

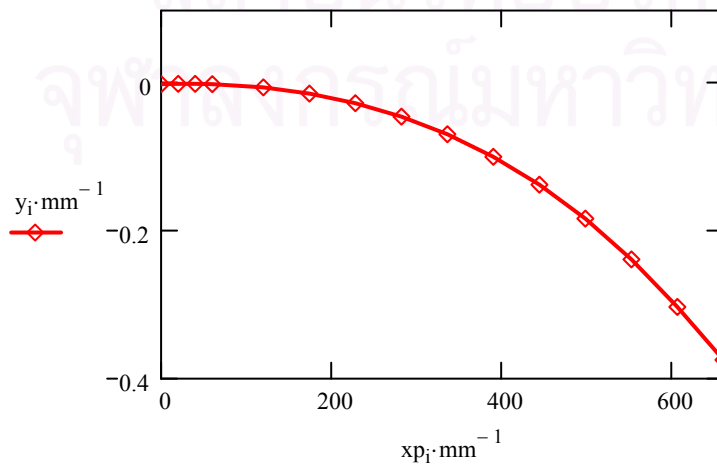
Calculation of the nodal displacement and slop yields

Slope along the shaft $\theta_i := \phi_i + C_1$

Deflection along the shaft		$y_i := \psi_i + C_1 \cdot xp_i + C_2$	1	
θ =	1	0.0009	1	0.0000
	2	0.0006	2	0.0003
	3	-0.0002	3	0.0003
	4	-0.0017	4	0.0000
	5	-0.0068	5	-0.0044
	6	-0.0113	6	-0.0130
	7	-0.0164	7	-0.0260
	8	-0.0222	8	-0.0442
	9	-0.0287	9	-0.0682
	10	-0.0360	10	-0.0987
	11	-0.0444	11	-0.1366
	12	-0.0537	12	-0.1828
	13	-0.0637	13	-0.2381
	14	-0.0734	14	-0.3028
	15	-0.0792	15	-0.3747

deg y = mm

Deflection Curve



$$w_{tip_max} := -0.375 \cdot \text{mm}$$

$$C := \left| \frac{w_{tip_max}}{600 \cdot \text{mm}} \right|$$

$$C = 6.25 \times 10^{-4}$$

ภาคผนวก ญ

การวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก

สมมติว่ามีข้อมูล N ตัว ของตัวแปร x และ y ที่มีค่า (x_i, y_i) และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองเขียนได้ในรูปฟังก์ชันเชิงเส้น

$$y = A + Bx \quad (\text{ญ.1})$$

ถ้า x_i มีค่าความไม่แน่นอนที่สามารถละทิ้งได้ และ y_i มีค่าความไม่แน่นอนต่าง ๆ กัน เท่ากับ σ_i แล้ว ค่าประมาณที่ดีที่สุดของสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (ญ.1) จะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$A = \frac{\sum wx^2 \sum wy - \sum wx \sum wxy}{\sum w \sum wx^2 - (\sum wx)^2} \quad (\text{ญ.2})$$

$$B = \frac{\sum wx \sum wxy - \sum wx \sum wy}{\sum w \sum wx^2 - (\sum wx)^2} \quad (\text{ญ.3})$$

โดย $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$

ความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 68 เปอร์เซ็นต์ ของค่าสัมประสิทธิ์ A, B แทนด้วยสัญลักษณ์ σ_A และ σ_B ตามลำดับ สามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum wx^2}{\sum w \sum wx^2 - (\sum wx)^2}} \quad (\text{ญ.4})$$

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{\sum w}{\sum w \sum wx^2 - (\sum wx)^2}} \quad (\text{ญ.5})$$

ความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ของค่าสัมประสิทธิ์ A, B แทนด้วยสัญลักษณ์ δA และ δB ตามลำดับ สามารถหาได้จากสมการ

$$\delta A = 1.96\sigma_A \quad (\text{ญ.6})$$

$$\delta B = 1.96\sigma_B \quad (\text{ญ.7})$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สัจภณ เทียมทินกฤต เกิดเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดแพร่ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2544 และได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย