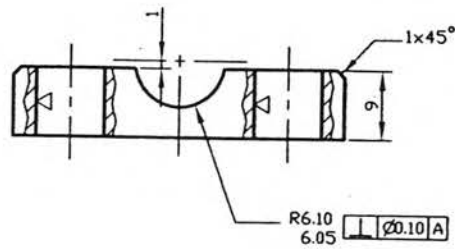
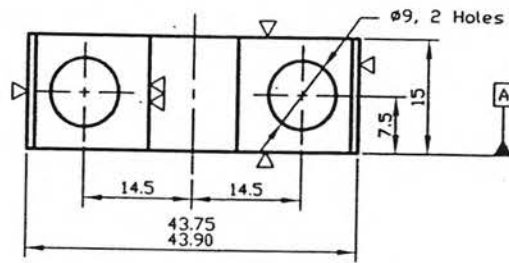


รายการอ้างอิง

1. Daniel Whittenberger, J. Introduction of Creep. Material Engineer, NASA Lewis Research Center, (n.d.)
2. Manjoine, M.J. New Machines for Creep and Creep-Rupture Test. Westinghouse Electric and Manufacturing Company East Pittsburgh, 1945.
3. Evans, R.W., and Wilshire, B. Introduction to Creep. Department of Materials Engineering, University College. Swansea, 1993.
4. Rick Meyer. 632.59 High Temperature Axial Extensometer. Available from :<http://www.mts.com/menusystem>. [2005.September 10]
5. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวสำหรับใช้ในอุณหภูมิต่ำ. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
6. Boyle, J.T., and Spenc, J. Stress Analysis for Creep. Department of Mechanics of Material, University of Stranthclyde. Glasgow: Butterworth, 1983.
7. Viswanathan, R. Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components. Generation and Storage Division, Electric Power Research Institute: ASM International, 1989.
8. Egor Popov, P., and Touder A-Balan. Engineering Mechanics of Solid. University of California-Berkley: Prentice Hall International, 1999.
9. Clauss, F.J. Engineering Guide to High-Temperature Material. Addison Wesley Publishing, (n.d.)
10. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และ ชาญ ถนัคงาน. การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยุคเคชั่น, 2537.
11. สัจฉน เทียมทินกฤต. การพัฒนาเครื่องทดสอบการคืบแกนเดี่ยว. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
12. John R. Taylor. An Introduction to Error Anavlsis. The Study of Uncertainties in Physical Measurements, University of Colorado: Oxford University Press, 1982.
13. Dyson, B.F., Loveday, M.S., and Gee, M.G. Material Metrology and Standards for Structural Performance. Division of Materials Metrology, National Physical Labolatory Teddington . UK: Chapman & Hall, 1995.

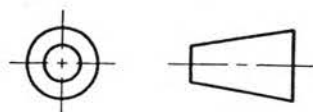
14. ยอดยิ่ง หมวกงาม. การพัฒนาและการประยุกต์ใช้clipเกจกับการทดสอบการแตกหัก. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
15. อนุสรณ์ ทนหมื่นไวย. การสอบเทียบไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียด้วยเกจบล็อก. สถาบันมาตรวัดวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.กรุงเทพมหานคร, 2546
16. Figliola, R.S., and Beasley, D.E. Theory and Design for Mechanical Measurement (3rd ed.): John Wiley & Son, 2001.
17. Fleck, N.A. Some Aspects of Clip Gage Design. Cambridge University Engineering Department. Trumpington Street, Cambridge, 1983.
18. William Murray, M., and William Miller, R. The Bonded Electrical Resistance Strain Gage. Massachusetts Institute of Technology, 1992.
19. KYOWA. A Complete Lineup of High Performance Strain Gages and Accessories. KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENT, (n.d.)

ภาคผนวก

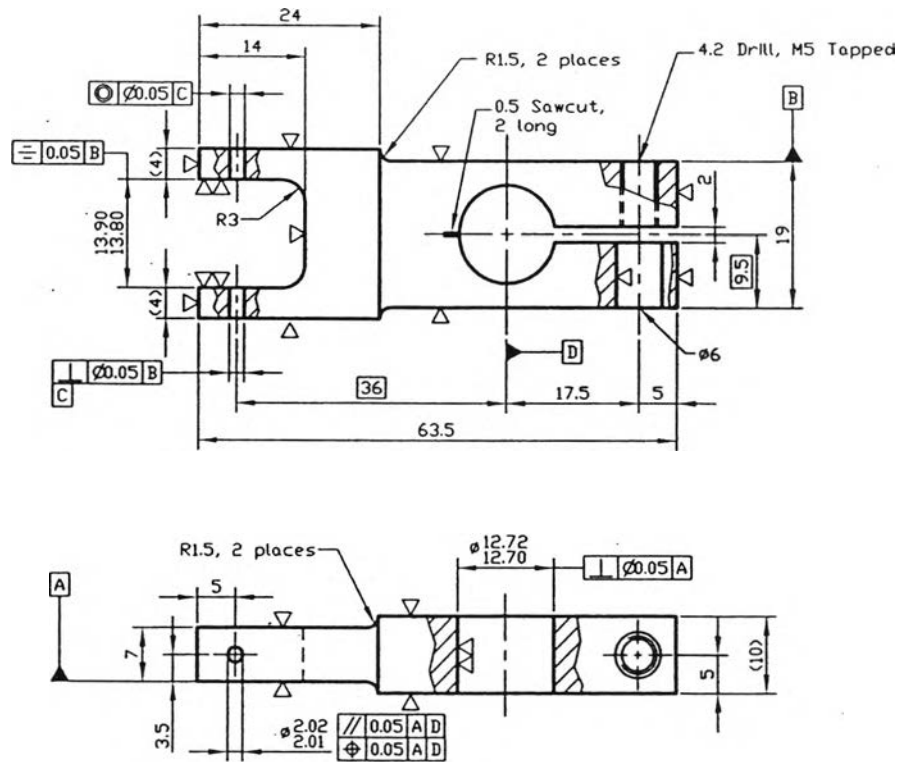


3 Clamp, Stainless steel 310S, 2 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

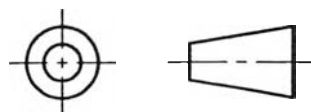


CLAMP		Scale 1:1
Dwg. NO.	HTEX03	Drawn by Rattasit
Sheet	3/12	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		

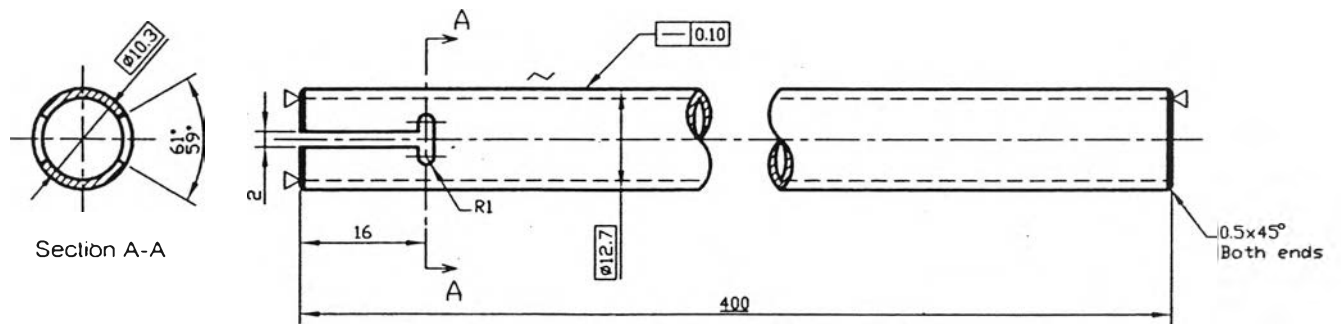


4 Upper support, Stainless steel 310S, 2 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

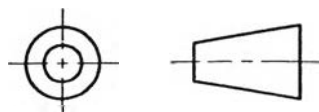


UPPER SUPPORT		Scale 1:1
Dwg. NO.	HTEX04	Drawn by Rattasit
Sheet	4/12	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		

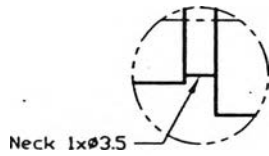
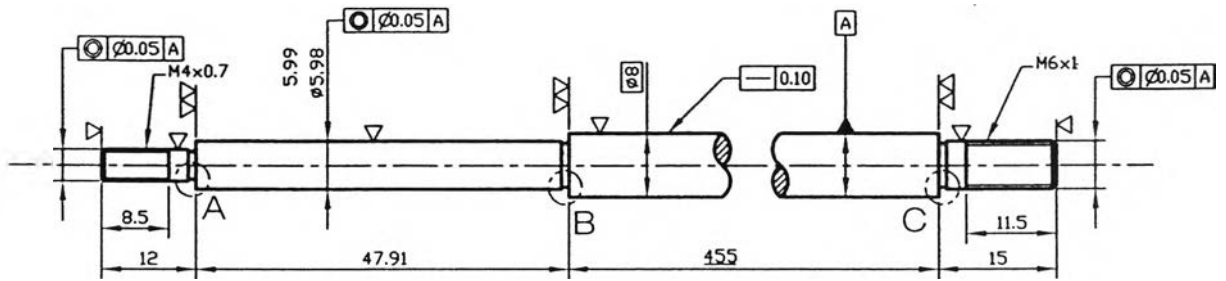


6 Transfer tube, Stainless steel 310S, 2 Req.

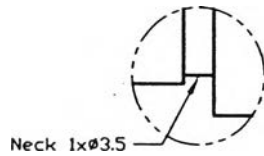
- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.



TRANSFER TUBE		Scale 1:1
Dwg. NO.	HTEX06	Drawn by Rattasit
Sheet	6/12	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



Detail A
Scale 4:1



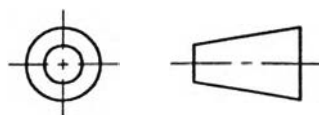
Detail B
Scale 4:1



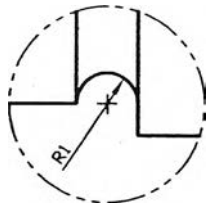
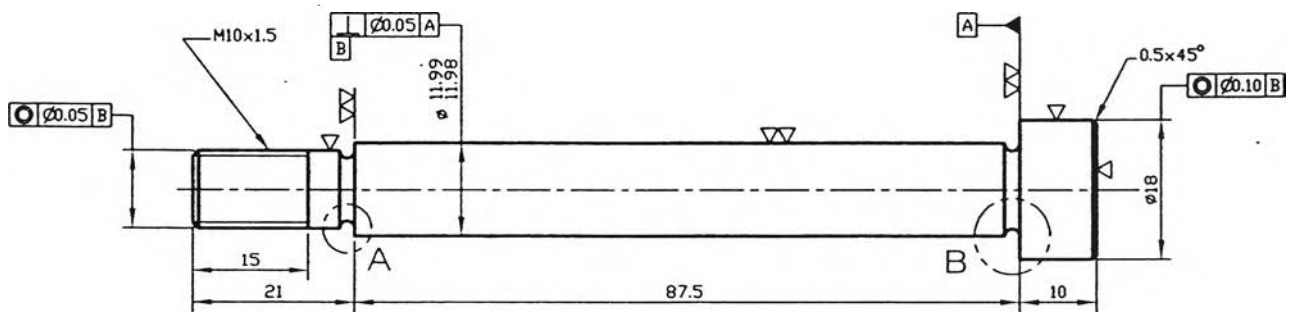
Detail C
Scale 4:1

7 Transfer rod, Stainless steel 310S, 2 Req.

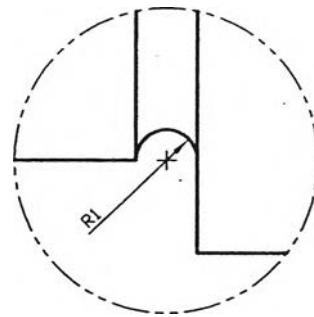
- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
2. General tolerances are ± 0.05 mm unless otherwise specified.



TRANSFER ROD		Scale 1:1
Dwg. NO.	HTEX07	Drawn by Rattasit
Sheet	7/12	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



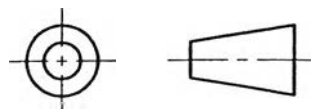
Detail A
Scale 4:1



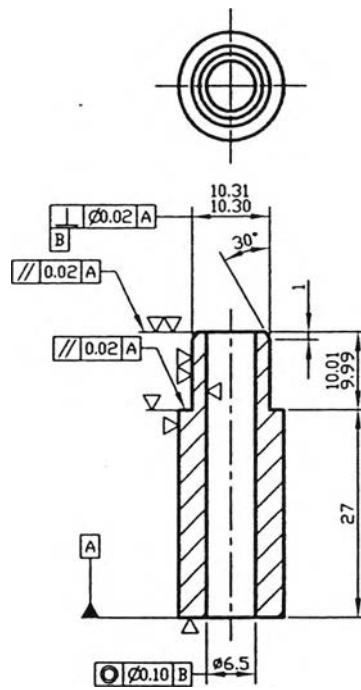
Detail B
Scale 4:1

8 Stopper, Stainless steel 310S, 2 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

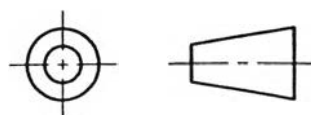


STOPPER		Scale 1:1
Dwg. NO.	HTEX08	Drawn by Rattasit
Sheet	8/12	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		

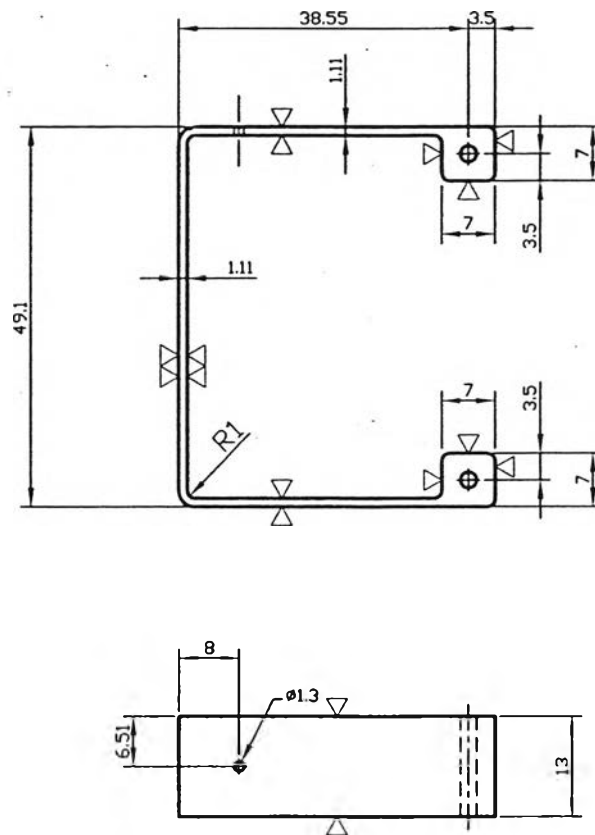


9 Bush, Brass, 2 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

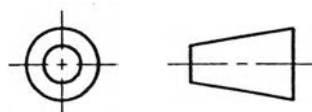


BUSH		Scale 1:1
Dwg. NO.	HTEX09	Drawn by Rattasit
Sheet	9/12	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		

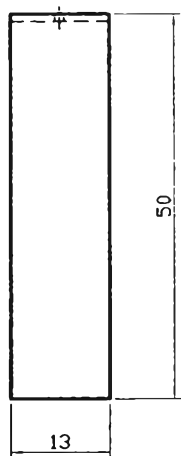
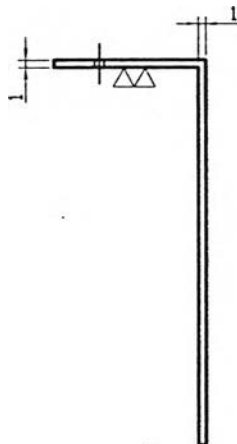
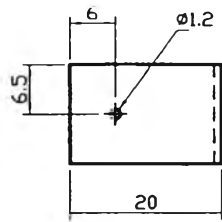


10 Clip Gage, Al. Alloy 7075-T651 , 2 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

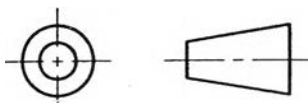


BUSH		Scale 1:1
Dwg. NO.	HTEX10	Drawn by Rattasit
Sheet	10/12	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



11 PrototrClip Gage, Al. Alloy 7075-T651,
2 Req.

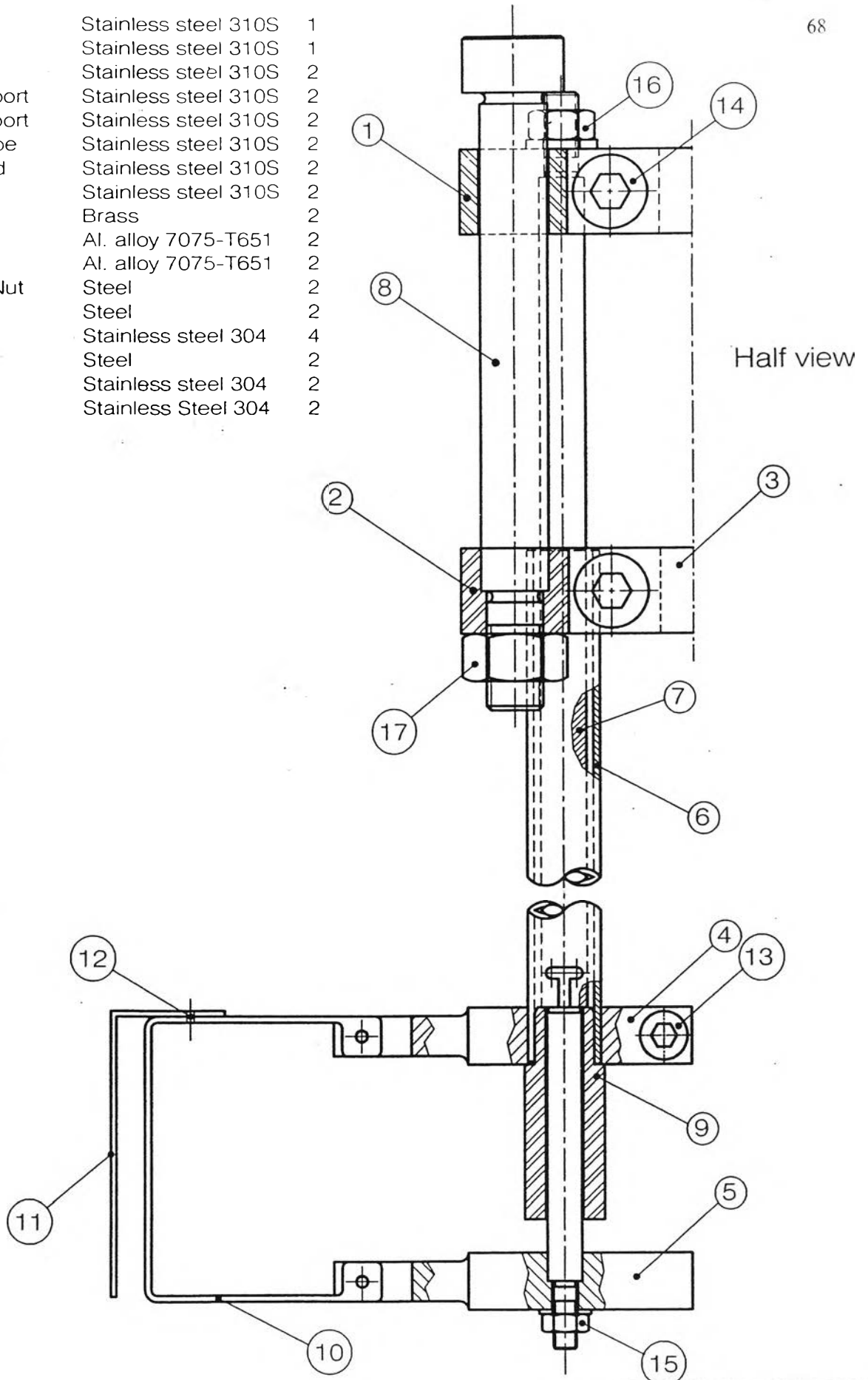
NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.



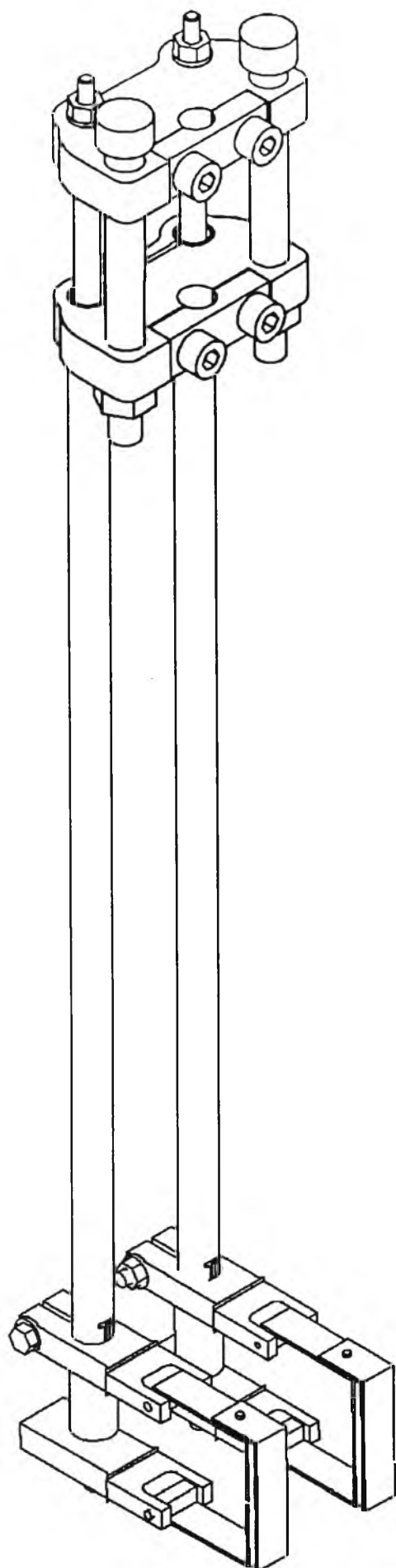
PROTECTOR		Scale 1:1
Dwg. NO.	HTEX11	Drawn by Rattasit
Sheet	11/12	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		

No. Name Material Quantity

1	Upper Grip	Stainless steel 310S	1
2	Lower Grip	Stainless steel 310S	1
3	Clamp	Stainless steel 310S	2
4	Upper support	Stainless steel 310S	2
5	Lower support	Stainless steel 310S	2
6	Transfer tube	Stainless steel 310S	2
7	Transfer rod	Stainless steel 310S	2
8	Stopper	Stainless steel 310S	2
9	Bush	Brass	2
10	Clip gage	Al. alloy 7075-T651	2
11	Protector	Al. alloy 7075-T651	2
12	M1 Bolt & Nut	Steel	2
13	M5 HSMC	Steel	2
14	M8 HSMC	Stainless steel 304	4
15	M4 Nut	Steel	2
16	M6 Nut	Stainless steel 304	2
17	M10 Nut	Stainless Steel 304	2



High Temperature Extensometer		Scale	1:1
Dwg. NO.	HTEX12	Drawn by	Rattasit
Sheet	12/12	Revised	26/9/2548
Chulalongkorn University			

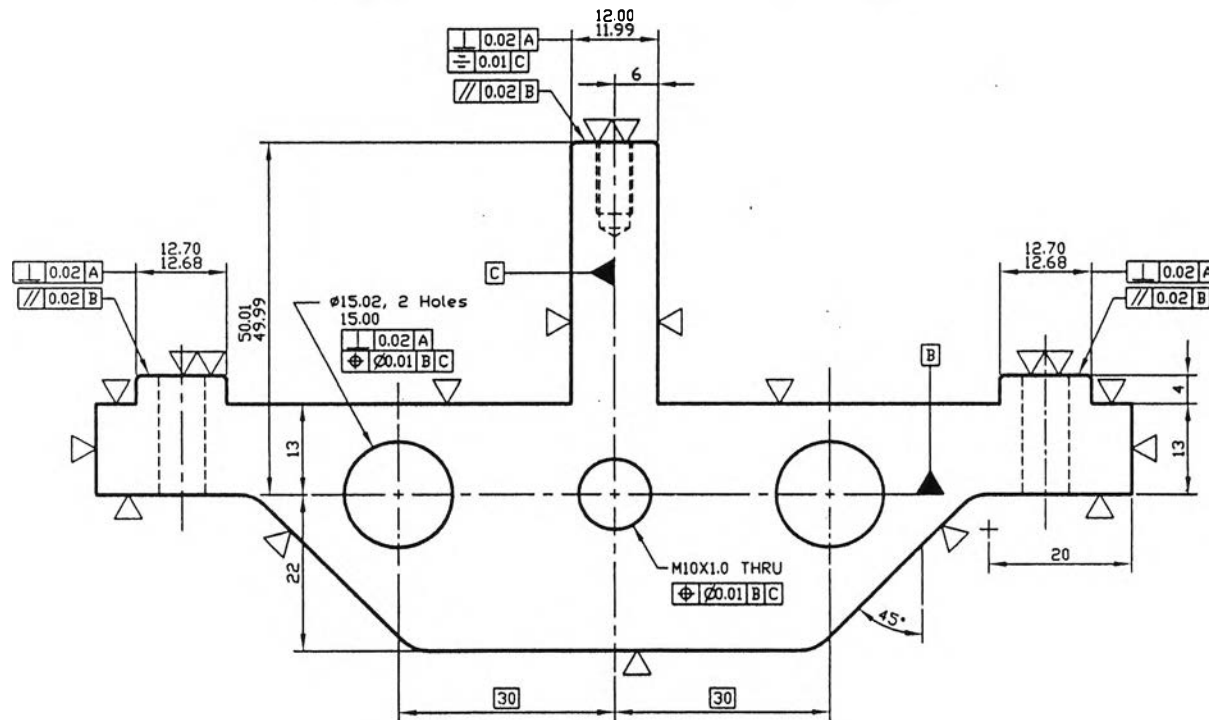
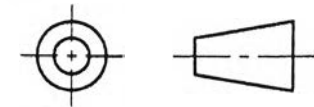
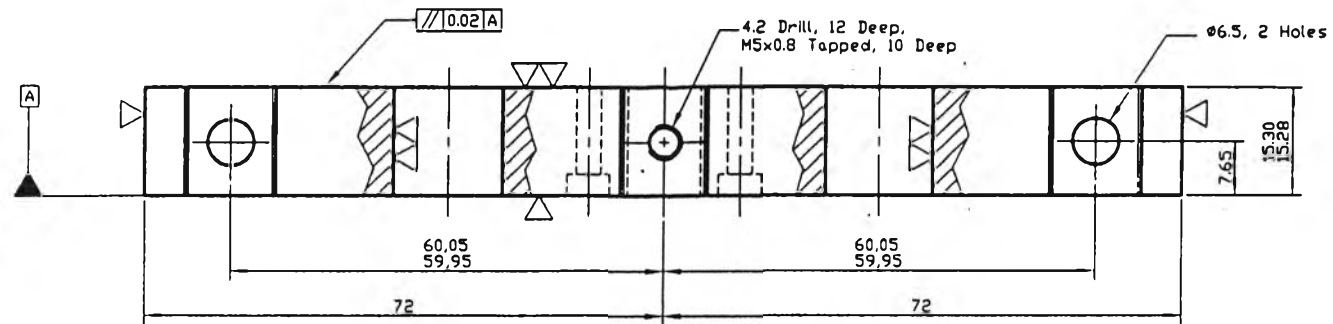


High Temperature Extensometer (ASSEMBLY)

Drawn by Rattasit

Revised 26/9/2548

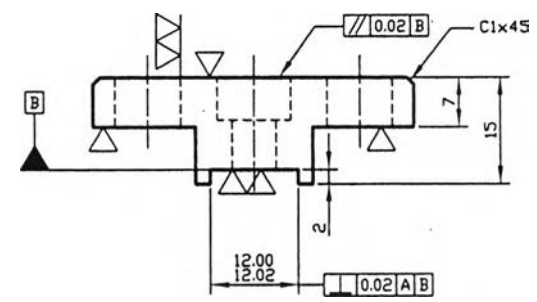
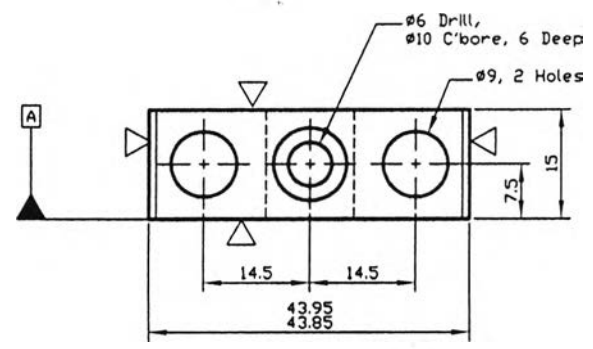
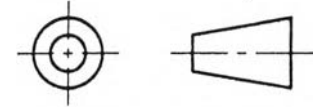
Chulalongkorn University



2. Cross Bar, Stainless steel 304, 1 Req.

- NOTES :
1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.
 3. All fillets and rounds are 5 mm.
 4. All chamfers are $0.5 \times 45^\circ$.

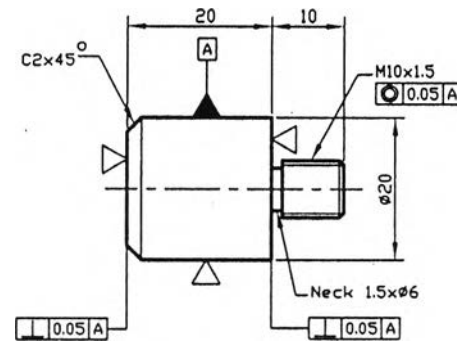
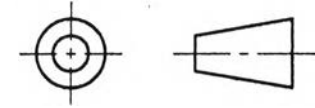
CROSS BAR		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL02	Drawn by Rattasit
Sheet	2/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



4. Grip, Stainless steel 304, 2 Req.

NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

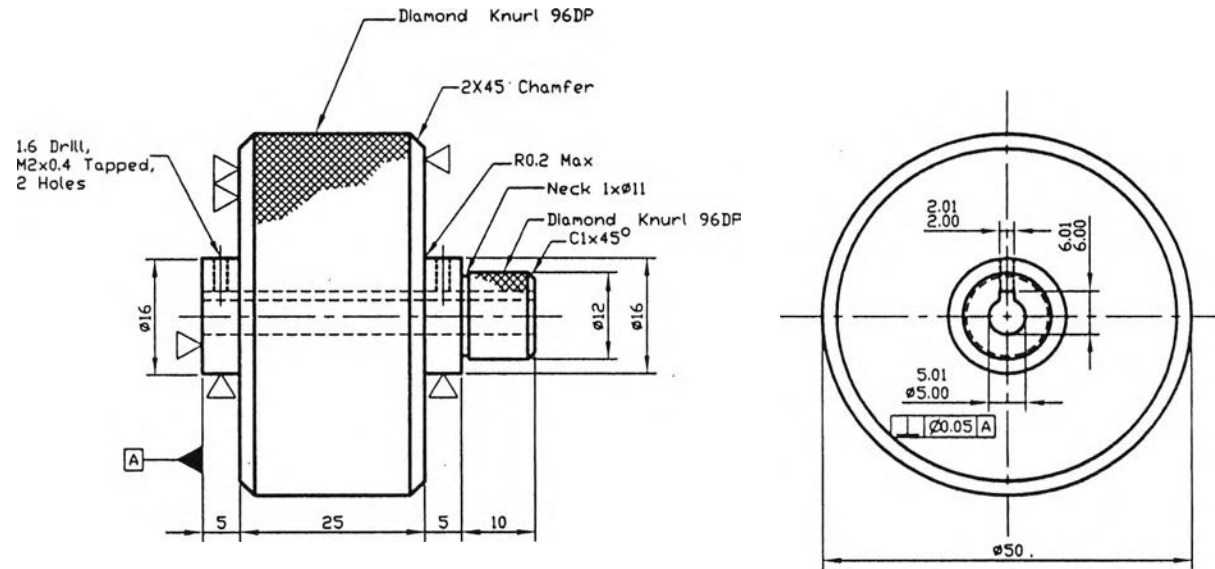
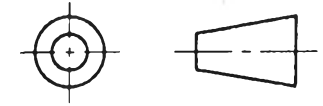
GRIP		Scale 1:1
Dwg NO	CAL04	Drawn by Rattasit
Sheet	4/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



5. Leg, Stainless steel 304, 4 Req.

NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

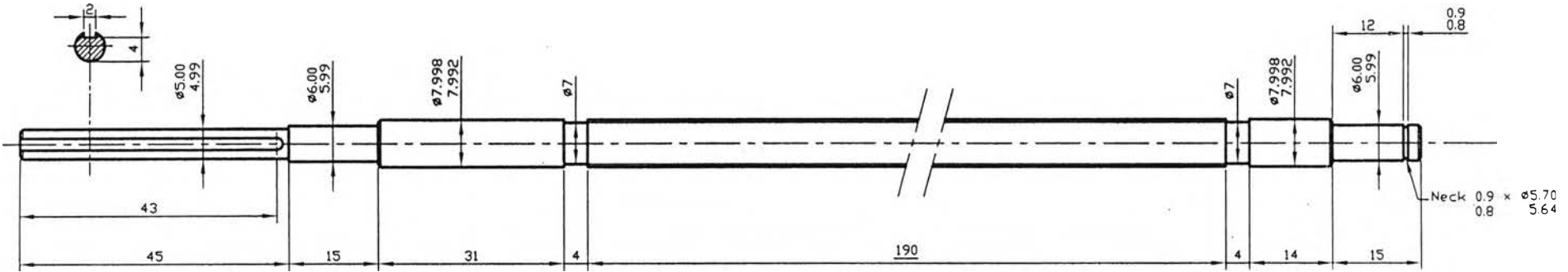
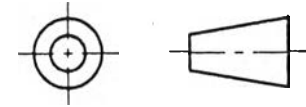
LEG		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL05	Drawn by Rattasit
Sheet	5/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



6. Handle, Stainless steel 304, 1 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

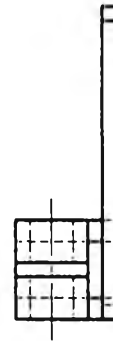
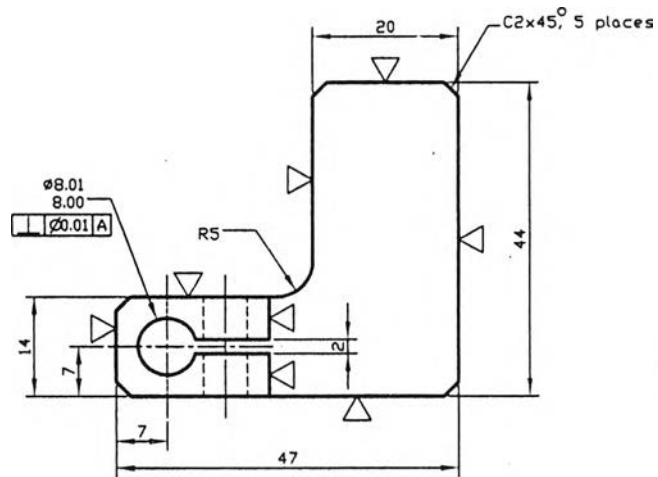
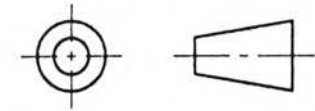
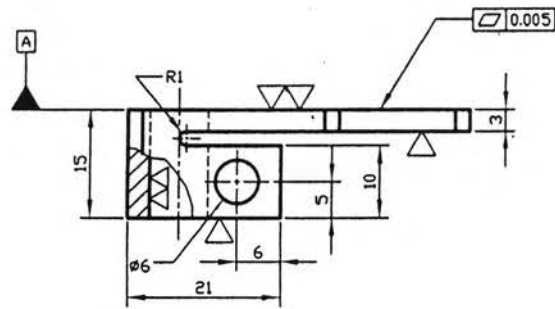
HANDLE		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL06	Drawn by Rattasit
Sheet	6/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



7. Screw Shaft, Steel, 1 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.02 mm unless otherwise specified.

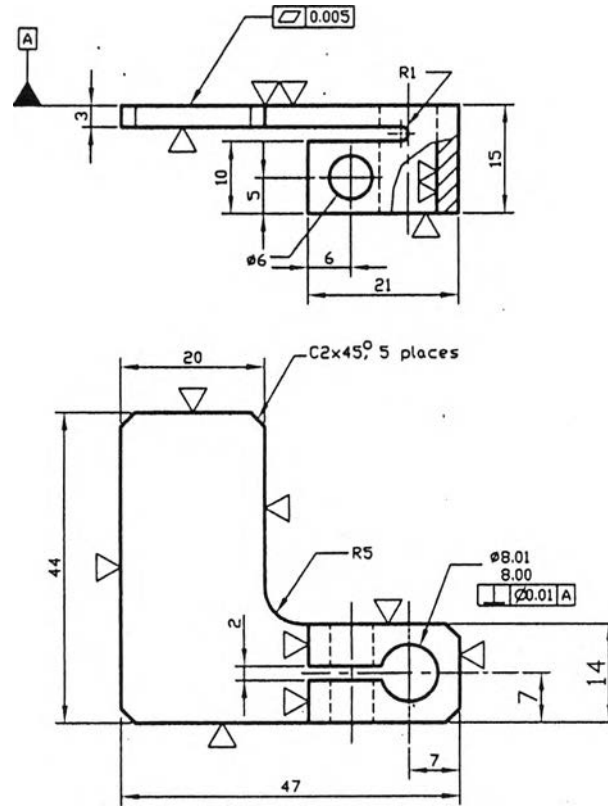
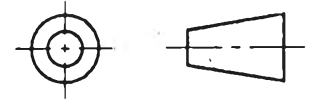
BALL SCREW		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL07	Drawn by Rattasit
Sheet	7/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



8. Reference Plate L, Aluminium alloy 7075-T651, 1 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.
 3. All chamfers are $2 \times 45^\circ$.

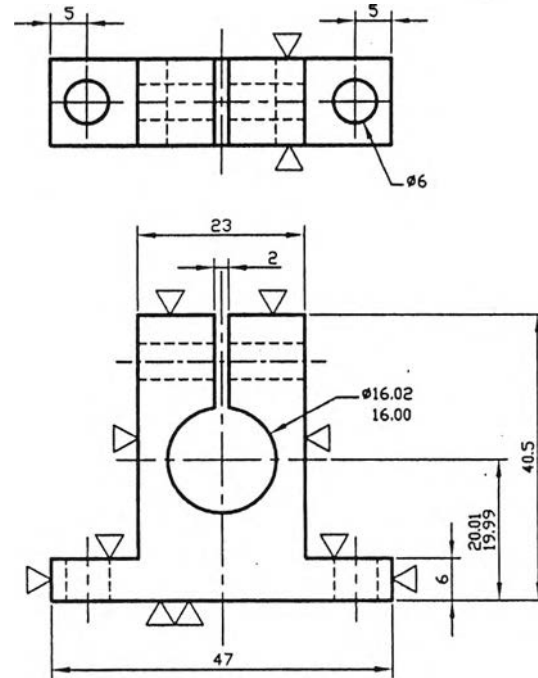
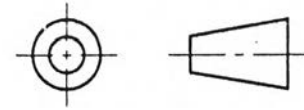
REFERENCE PLATE		Scale	1:1
Dwg. NO.	CAL08	Drawn by	Rattasit
Sheet	8/15	Revised	26/9/2548
Chulalongkorn University			



9. Reference Plate R, Aluminium alloy 7075-T651, 1 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

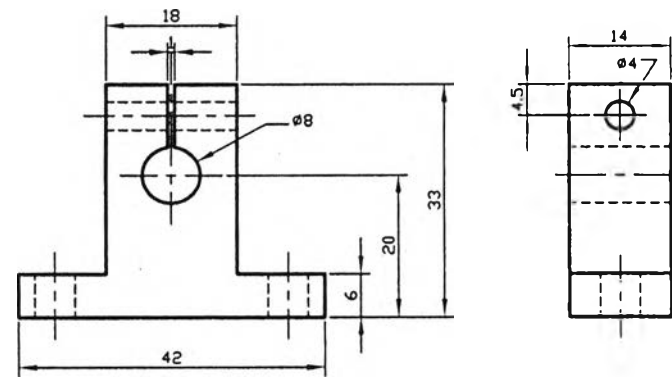
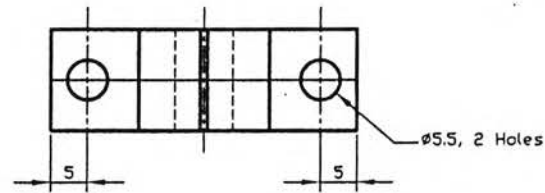
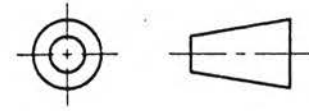
REFERENCE PLATE		Scale	1:1
Dwg. NO.	CAL09	Drawn by	Rattasit
Sheet	9/15	Revised	26/9/2548
Chulalongkorn University			



10. Screw Shaft Support, Aluminium alloy 7075-T651, 2 Req.

NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. General tolerances are ± 0.1 mm unless otherwise specified.

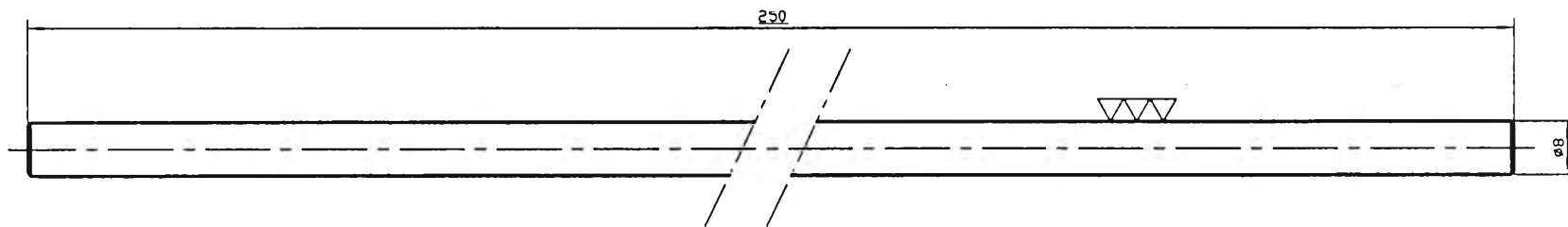
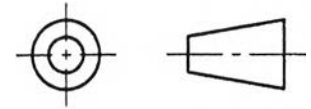
SCREW SHAFT SUPPORT		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL10	Drawn by Rattasit
Sheet	10/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



11. Slide Shaft Support, Al. alloy, 1 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
 2. Detailed dimensions and tolerances are referred to HIWIN shaft supporter model SH8A

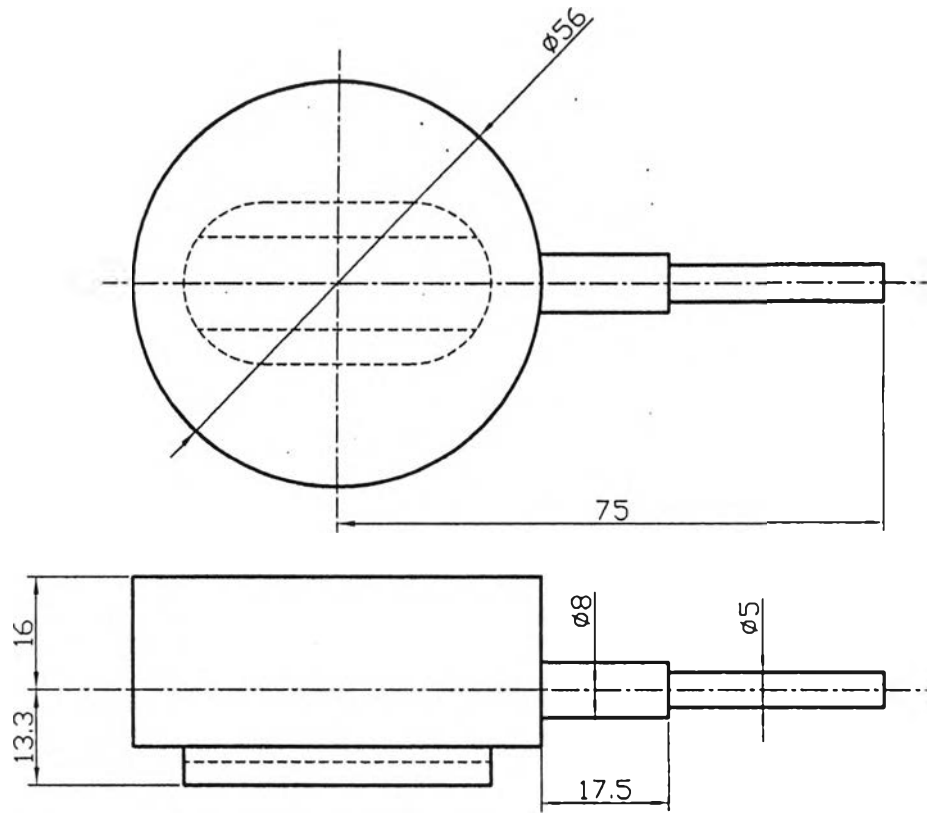
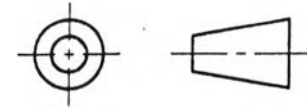
SLIDE SHAFT SUPPORT		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL11	Drawn by Rattasit
Sheet	11/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



12. Slide shaft, Stainless steel 304, 2 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
2. Detailed dimensions and tolerances are referred to HIWIN slide shaft model SNS 8

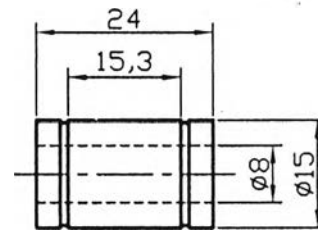
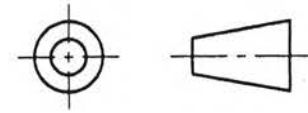
SLIDE SHAFT		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL12	Drawn by Rattasit
Sheet	12/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



13. Dial indicator, 2 Req.

- NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
2. Detailed dimensions are referred to MITUTOYO Dial Indicator Series 2 Model 2050FE with adjustable back model 136026.

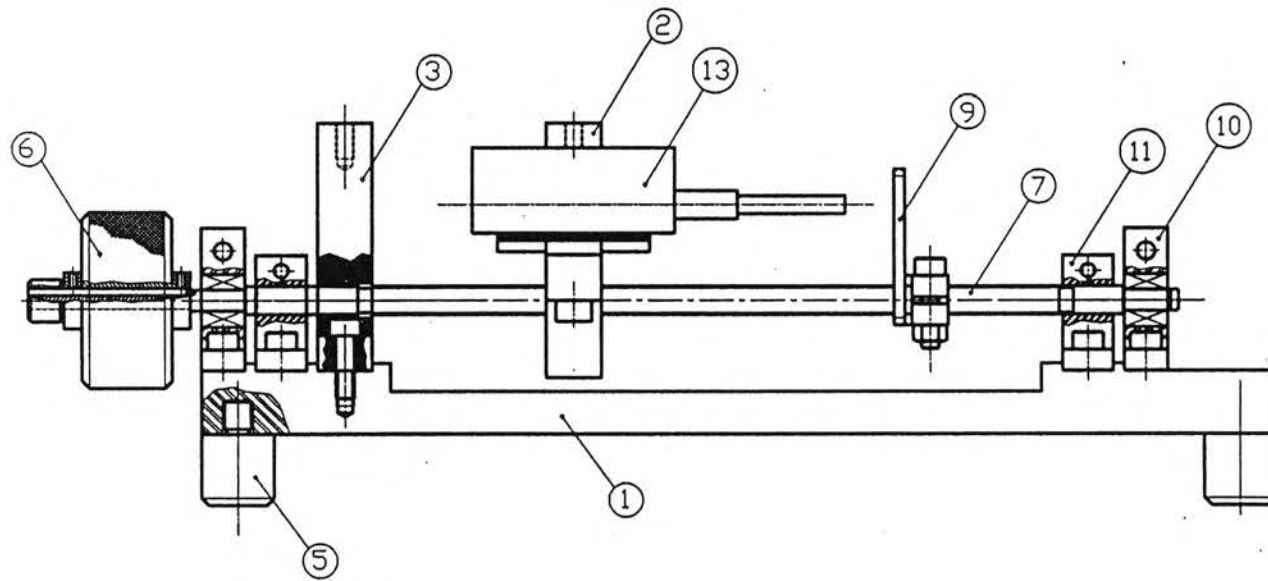
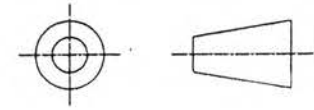
DIAL INDICATOR		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL13	Drawn by Rattasit
Sheet	13/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		



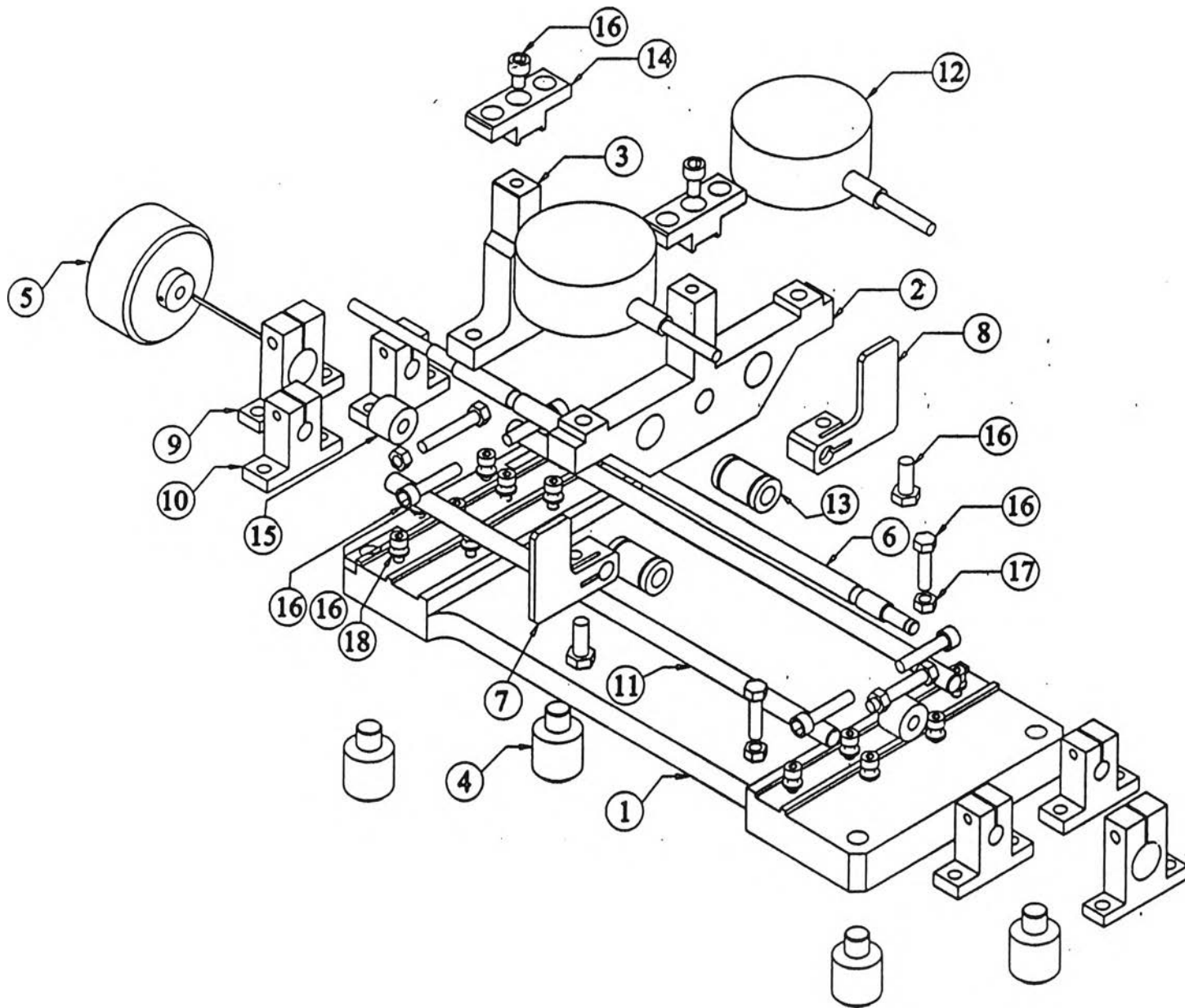
14. Slide Bush, Stainless steel 304, 2 Req.

NOTES : 1. Dimensions in millimeters.
2. Detailed dimensions and tolerances are referred to HIWIN Slide bush model SM 8

SLIDE BUSH		Scale 1:1
Dwg. NO.	CAL14	Drawn by Rattasit
Sheet	14/15	Revised 26/9/2548
Chulalongkorn University		

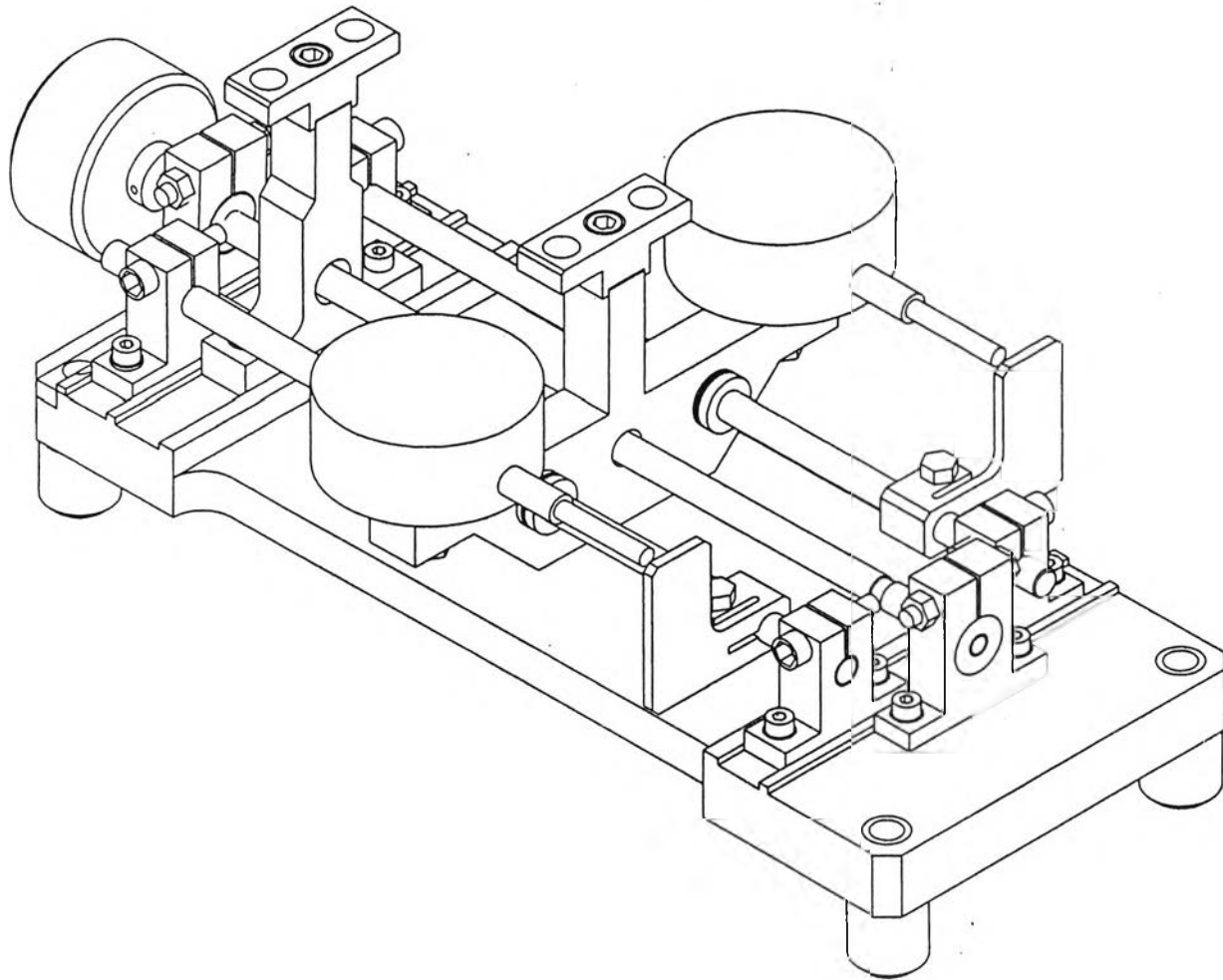


CALIBRATOR		Scale 1:1.5
Dwg. NO.	CAL15	Drawn by Jirapong
Sheet	15/15	Revised 126/9/2548
Chulalongkorn University		



BILL OF MATERIAL		
ITEM	MATERIAL	Qty
1	BASE	1
2	CROSS BAR	2
3	FIX SUPPORT	3
4	LEG	4
5	HANDLE	5
6	BALL SCREW	6
7	REF. PLATE L	7
8	REF. PLATE R	8
9	SCREW SHAFT SUPP.	9
10	SLIDE SHAFT SUPP.	10
11	SLIDE SHAFT	11
12	DIAL IND.	12
13	SLIDE BUSH	13
14	CLAMP	14
15	BUSH	15
16	BOLT M5	16
17	NUT M5	17
18	WASHER	18

CALIBRATOR (PICTORIAL)
Drawn by Rattasit
Revised 26/09/05
Chulalongkorn University



CALIBRATOR
Drawn dy Rattasit
Revised 26/ 09/ 05
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

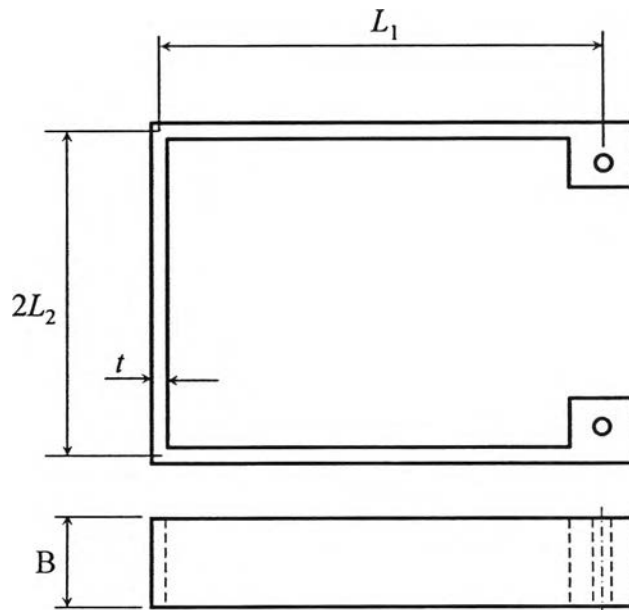
การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างระยะแอ่นตัวและความเครียดของคลิปเกจ

การคำนวณ โดยใช้เทคนิค optimization เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกจ จะเริ่มจากการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ วิทยานิพนธ์นี้จะประยุกต์ทฤษฎีพลังงาน (Energy Method) ของ Castigliano จากรูปที่ ค.1 จะแบ่งพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นเป็น 2 ช่วง (U_1, U_2) โดยที่ U_1 คือ พลังงานความเครียดในช่วง L_1 U_2 คือ พลังงานความเครียดในช่วง L_2 และพลังงานความเครียดแต่ละช่วงจะอยู่ในรูปของสมการที่ (ค.1)

$$U = \frac{1}{2} \int \frac{M^2}{EI} dx \quad (\text{ค.1})$$

โดยที่ E คือค่ายังโมดูลัสของวัสดุ และจากหลักการพลังงานความเครียดรวมของระบบ จะมีค่าเท่ากับผลรวมพลังงานความเครียดย่อยในแต่ละช่วง หรือแสดงให้อยู่ในรูปของ

$$U_{total} = U_1 + U_2 \quad (\text{ค.2})$$



รูปที่ ค.1 รูปร่างคลิปเกจที่ออกแบบ

โดยที่ค่าพลังงานความเครียดแต่ละช่วง (U_1, U_2) มีค่าดังนี้

$$U_1 = \int_0^{L_1} \frac{(Px)^2}{2EI} dx = \frac{P^2 L_1^3}{6EI_1} \quad (\text{ค.3})$$

$$U_2 = \int_0^{L_2} \frac{(Px)^2}{2EI} dx = \frac{P^2 L_1^2 L_2}{2EI_2} \quad (\text{ค.4})$$

กำหนดให้รูปร่างคลิปเกอมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดทั้งรูปร่าง ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อย (I_1, I_2) จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะกำหนดให้ $I_1 = I_2 = I$ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (ค.3) และ (ค.4) พลังงานความเครียดรวมในสมการที่ ค.2 คือ

$$U_{total} = \frac{P^2}{2EI} \left(\frac{L_1^3}{3} + L_1^2 L_2 \right) \quad (\text{ค.5})$$

จากสมการที่ 2.5 จะได้ระยะแอ่นตัวที่ปลายอิสระของคลิปเกอ คือ

$$\delta_{total} = \frac{P}{EI} \left(\frac{L_1^3}{3} + L_1^2 L_2 \right) \quad (\text{ค.6})$$

ความเค้นสูงสุดจากโมเมนต์ดัดจะเกิดที่ตำแหน่งติดเกอความเครียด มีค่าดังแสดงในสมการที่ (ค.7)

$$\sigma_{max} = \frac{My}{I} = \frac{PL_1 \left(\frac{t}{2} \right)}{I} \quad (\text{ค.7})$$

ดังนั้นความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนเกอความเครียด คือ

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{PL_1 \left(\frac{t}{2} \right)}{EI} \quad (\text{ค.8})$$

ความไวเชิงกลของคลิปเกอนิยามอยู่ในรูปของ $\frac{\text{output}}{\text{input}}$ ซึ่งในที่นี้ *output* คือความเครียดที่เกิดขึ้น และ *input* คือระยะแอ่นตัวบริเวณปลายอิสระของคลิปเกอ ดังนั้นความไวเชิงกลที่ได้จะมีค่าดังสมการที่ (ค.9)

$$\text{sensitivity} = \frac{3}{2} \left(\frac{L_1 t}{L_1^3 + 3L_1^2 L_2} \right) \quad (\text{ค.9})$$

สมการที่ (ค.9) คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งใช้ในการคำนวณขนาดที่เหมาะสมของคลิปเกอ โดยกำหนดให้ฟังก์ชันนี้มีค่ามากที่สุด

ภาคผนวก ง

การสอบเทียบเครื่องสอบเทียบคลิปกเกจ

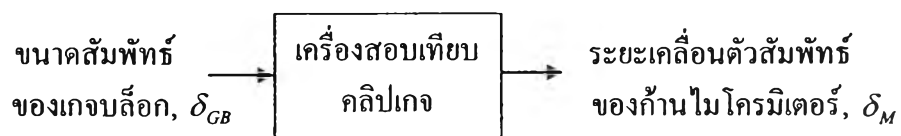
ง.1 หลักการสอบเทียบ

การสอบเทียบเครื่องสอบเทียบคลิปกเกจคือ การเปรียบเทียบระหว่างระยะเคลื่อนตัวสัมผัสของก้านไมโครมิเตอร์กับระยะเคลื่อนตัวสัมผัสที่มีความแม่นยำสูงกว่า ในที่นี้ใช้เกจบล็อกเป็นอุปกรณ์กำหนดระยะเคลื่อนตัวสัมผัสอ้างอิงเพราะว่ามีความแม่นยำสูงกว่าไมโครมิเตอร์ รูปที่ ง.1 แสดงหลักการสอบเทียบที่กล่าวไป ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองสามารถแทนด้วยสมการเส้นตรง

$$\delta_M = C_1 \delta_{GB} \quad (ง.1)$$

โดย δ_M และ δ_{GB} คือ ระยะเคลื่อนตัวสัมผัสของก้านไมโครมิเตอร์ และขนาดสัมผัสของเกจบล็อก ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุดจากการวิเคราะห์การถดถอย คือ

$$C_1 = 0.99987 \quad (ง.2)$$



รูปที่ ง.1 หลักการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบคลิปกเกจ

ง.2 ข้อมูลการสอบเทียบ

ตารางที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเกจบล็อกกับไมโครมิเตอร์^(ก) (14)

ขนาดสัมพัทธ์ ของเกจบล็อก δ_{GB} (มม)	ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ของก้านไมโครมิเตอร์ δ_M ^(ข) (มม)
0	0.000
1	0.996
2	1.996
3	2.996
4	3.996
5	4.996
6	5.998
7	6.999
8	7.997
9	9.000
10	10.002
11	10.998
12	11.999
13	12.996
14	14.004
15	14.996
16	15.995
17	16.997
18	17.996
19	19.000
20	19.998
21	20.998
22	21.997
23	23.000
24	23.997

^(ก) ไมโครมิเตอร์ยี่ห้อ MITUTOYO series 197 Range 0-2" , Graduation 0.005 mm, Accuracy $\pm 5 \mu m$

^(ข) อ่านจากสเกลบนด้ามไมโครมิเตอร์

ง.3 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

ความไม่แน่นอนสำหรับระยะเคลื่อนตัวสัมผัสของก้านไมโครมิเตอร์ U_{δ_M} คือ

$$U_{\delta_M} = \sqrt{U_{B,\delta_M}^2 + U_{P,\delta_M}^2} \quad (ง.3)$$

โดย U_{B,δ_M} คือ ความไม่แน่นอนเชิงระบบ (systematic uncertainty)

U_{P,δ_M} คือ ความไม่แน่นอนสุ่ม (random uncertainty)

สำหรับระบบการวัดที่พิจารณา (รูปที่ ง.1) ความไม่แน่นอนเชิงระบบที่แผ่มายังผลการวัด δ_M คือ ความแม่นยำของเกจบล็อก ซึ่งประกอบด้วย 1) ความแม่นยำของเกจบล็อก $U_{B1,\delta_{GB}}$ ที่สอบเทียบโดยผู้ผลิต และ 2) การเปลี่ยนแปลงขนาดของเกจบล็อกเนื่องจากอุณหภูมิที่สอบเทียบเครื่องมือต่างจากอุณหภูมิที่เกจบล็อกถูกสอบเทียบ (20 องศาเซลเซียส) $U_{B2,\delta_{GB}}$ อย่างไรก็ตามเนื่องจากผู้วิจัยไม่ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับเกจบล็อกที่ใช้จึงต้องประมาณข้อมูลเกี่ยวกับเกจบล็อกดังต่อไปนี้

1) สมมุติให้เกจบล็อกที่ใช้เป็นชนิดเกรดต่ำที่สุด (ความแม่นยำน้อยที่สุด) ซึ่งจากเอกสารอ้างอิง (15) เกจบล็อกที่มีขนาดครบน้อยกว่า 25 มม จะมีความแม่นยำที่ $\pm 0.8 \mu m$ ดังนั้น

$$U_{B1,\delta_{GB}} = 0.8 \mu m$$

2) เนื่องจากเกจบล็อกทำจากสแตนเลส ดังนั้นกำหนดให้สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน $\alpha = 17.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ C^{-1}$ (ค่าสูงสุดที่ปรากฏในตารางของเอกสารอ้างอิงหมายเลข (11)) และกำหนดให้อุณหภูมิของห้องที่สอบเทียบอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ดังนั้นภายในช่วงความยาวที่สอบเทียบ (25 มม) การเปลี่ยนแปลงขนาดสูงสุด คือ

$$17.5 \times 10^{-6} \frac{1}{^\circ C} \times (30 - 20)^\circ C \times 25 \text{ mm} \approx 4 \mu m \quad \text{ดังนั้น}$$

$$U_{B2,\delta_{GB}} = 4 \mu m$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนเชิงระบบของเกจบล็อก $U_{B,\delta_{GB}}$ คือ

$$U_{B,\delta_{GB}} = \sqrt{U_{B1,\delta_{GB}}^2 + U_{B2,\delta_{GB}}^2}$$

แทนค่าจะได้

$$U_{B,\delta_{GB}} = \sqrt{0.8^2 + 4^2} \mu m = 4 \mu m \quad (ง.4)$$

ความไม่แน่นอนเชิงระบบของเกจบล็อกจะแผ่ (propagate) ไปเป็นความไม่แน่นอนเชิงระบบของระยะเคลื่อนตัวสัมผัสของก้านไมโครมิเตอร์ U_{B,δ_M} โดยมี uncertainty propagation equation, UPE ที่หาจากสมการที่ (ง.1) คือ

$$U_{B,\delta_M} = C_1 U_{B,\delta_{GB}}$$

แทนค่าในสมการที่ (ง.2) และ (ง.4) จะได้

$$U_{B,\delta_M} \approx 4 \mu m \quad (ง.5)$$

สำหรับความไม่แน่นอนสุ่มนั้นสามารถหาได้จากผลการสอบเทียบ โดยต้นกำเนิดของความไม่แน่นอนนี้มาจากความผิดพลาดของการแทนที่จุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง (ง.1) (data reduction error) ความไม่แน่นอนสำหรับความชัน (sensitivity error) U_{C_1} ของสมการ (ง.1) คือ (16)

$$U_{C_1} = 0.00004 \quad (ง.6)$$

ดังนั้น ความไม่แน่นอนสุ่มของระยะเคลื่อนตัวสัมผัสของก้านไมโครมิเตอร์ U_{P,δ_M} คือ

$$U_{P,\delta_M} = \sqrt{(0.00004 \times 24 \text{ mm})^2} \approx 1 \mu m \quad (ง.7)$$

ความไม่แน่นอนรวมสำหรับค่าที่อ่านจากด้ามไมโครมิเตอร์ U_{δ_M} คือ

$$U_{\delta_M} = \sqrt{U_{B,\delta_M}^2 + t_{24,95\%}^2 U_{P,\delta_M}^2}$$

จากตารางสถิติ (16) $t_{24,95\%} = 2.08$ และจากสมการที่ (ง.4) และ (ง.7) จะได้

$$U_{\delta_M} = \sqrt{4^2 + (2.08 \times 1)^2} \mu m = 5 \mu m \quad (ง.8)$$

ภาคผนวก จ

ผลการสอบเทียบคลิปเกจ

จ.1 คลิปเกจหมายเลข 1

จ.1.1 ข้อมูลการสอบเทียบ

ตารางที่ จ.1 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (คลิปเกจหมายเลข 1) ที่ระยะแอนต์ตัวต่าง ๆ (หน่วยเป็น $\mu\epsilon$)

ระยะแอนต์ตัว ของคลิปเกจ δ_{clip1} (มม)	ทดลองครั้งที่					ค่าเฉลี่ย ϵ_1 ($\mu\epsilon$)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน $SD_{\epsilon_1}^{(n)}$ ($\mu\epsilon$)
	1	2	3	4	5		
0.000	0	0	0	0	0	0	0.00
0.635	587	590	588	588	586	587.8	0.37
1.270	1170	1171	1170	1168	1170	1169.8	0.27
1.905	1756	1758	1755	1757	1757	1756.6	0.29
2.540	2340	2344	2339	2341	2342	2341.2	0.48
3.175	2933	2936	2932	2933	2935	2933.8	0.41
3.810	3521	3526	3519	3522	3520	3521.6	0.68
4.445	4117	4121	4115	4118	4120	4118.2	0.60
5.080	4708	4714	4706	4711	4713	4710.4	0.84
5.715	5309	5315	5307	5311	5312	5310.8	0.76
6.350	5906	5911	5904	5908	5908	5907.4	0.65
6.985	6509	6514	6508	6512	6516	6511.8	0.84
7.620	7109	7116	7108	7112	7121	7113.2	1.34
8.255	7718	7724	7718	7722	7733	7723	1.54
8.890	8325	8333	8326	8330	8335	8329.8	1.08
9.525	8939	8947	8940	8943	8951	8944	1.25

⁽ⁿ⁾ คำนวณจากความเครียดที่เกิดขึ้นจริง (1/4 ของค่าที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด)

จ.1.2 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระยะแอนตัวสำหรับคลิปเกจหมายเลข 1

การวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุดระหว่าง ความเครียดที่เกิดบนคลิปเกจ ε_1 กับ ระยะแอนตัวของคลิปเกจ δ_{clip1} ในแต่ละการทดลอง โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

$$\varepsilon_1 = C_{2,1} \delta_{clip1} \quad (จ.1)$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ $C_{2,1}$ ของแต่ละการทดลองดังแสดงในตารางที่ จ.2

ตารางที่ จ.2 ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (จ.1) สำหรับการทดลองแต่ละครั้ง

การทดลอง ครั้งที่	$C_{2,1}$ ($\mu\varepsilon/mm$)
1	233.219
2	233.441
3	233.192
4	233.324
5	233.491
ค่าเฉลี่ย $\bar{C}_{2,1}$	233.333
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน $SD_{C_{2,1}}$	0.132

ค่าประมาณที่ดีที่สุดของ $C_{2,1}$ คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ดังนั้น

$$C_{2,1} = 233.33 \frac{\mu\varepsilon}{mm} \quad (จ.2)$$

ส่วนความไม่แน่นอนสำหรับ $C_{2,1}$ นั้นประมาณจากสมการ

$$U_{P,C_{2,1}} = t_{4,95\%} \times \frac{SD_{C_{2,1}}}{\sqrt{N}}$$

จากตารางสถิติ (16) $t_{4,95\%} = 2.7765$ และ $N = 5$ ดังนั้น

$$U_{P,C_{2,1}} = 2.7765 \times \frac{0.132}{\sqrt{5}} = 0.164 \frac{\mu\text{E}}{\text{mm}}$$

กำหนดให้ระยะแอ่นตัวสัมพัทธ์ของก้านไมโครมิเตอร์เท่ากับระยะแอ่นตัวของคลิปเกจ¹ $\delta_{clip1} \equiv \delta_M$ จะได้ ความไม่แน่นอนเชิงระบบของระยะแอ่นตัวของคลิปเกจ U_{δ} เท่ากับ

$$U_{B,\delta_{clip1}} = U_{B,\delta}$$

จากสมการที่ (จ.5) จะได้

$$U_{B,\delta_{clip1}} = 5 \mu\text{m} \quad (\text{จ.3})$$

ความไม่แน่นอนสุ่มสำหรับระยะแอ่นตัวของคลิปเกจหมายเลข 1 หาได้จากสมการต่อไปนี

$$U_{P,\delta_{clip1}} = \frac{\epsilon_1}{C_{2,1}^2} U_{P,C_{2,1}} \quad (\text{ที่ระดับความเชื่อมั่น 95\%}) \quad (\text{จ.4})$$

ตารางที่ จ.3 แสดงผลการคำนวณความไม่แน่นอนเชิงระบบ และความไม่แน่นอนสุ่มสำหรับระยะแอ่นตัวของคลิปเกจหมายเลข 1 โดยใช้สมการที่ (จ.3) และ (จ.4) ผลการคำนวณแสดงอยู่ในคอลัมน์ที่ 4 และ 3 ตามลำดับ ความไม่แน่นอนรวมหาจากสมการที่ (จ.5) และผลลัพธ์แสดงอยู่ในคอลัมน์สุดท้าย

$$U_{\delta_{clip1}} = \sqrt{U_{B,\delta_{clip1}}^2 + U_{P,\delta_{clip1}}^2} \quad (\text{จ.5})$$

¹ ข้อกำหนดนี้หมายความว่า ชิ้นส่วนที่ยึดกับก้านไมโครมิเตอร์และเป็นที่สำหรับติดตั้งคลิปเกจมีความแข็งแรงสูง (ไม่เคลื่อนตัวเมื่อถูกแรงจากคลิปเกจกระทำ) และสลักที่ร้อยผ่านชิ้นส่วนดังกล่าวกับคลิปเกจมีความแข็งแรงสูงเช่นกัน

ตารางที่ จ.3 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนสำหรับระยะแอนตัวของคลิปเกจหมายเลข 1

ระยะแอนตัว ของคลิปเกจ δ_{clip1} (มม)	ความเครียด เฉลี่ย ε_1 ($\mu\varepsilon$) ^(ก)	ความไม่แน่นอน (μm)		
		สุ่ม $U_{P,\delta_{clip1}}$	เชิงระบบ $U_{B,\delta_{clip1}}$	รวม $U_{\delta_{clip1}}$
0.000	0.00	0	5	5
0.635	146.95	0	5	5
1.270	292.45	1	5	5
1.905	439.15	1	5	5
2.540	585.30	2	5	5
3.175	733.45	2	5	5
3.810	880.40	3	5	6
4.445	1029.55	3	5	6
5.080	1177.60	4	5	6
5.715	1327.70	4	5	6
6.350	1476.85	4	5	7
6.985	1627.95	5	5	7
7.620	1778.30	5	5	7
8.255	1930.75	6	5	8
8.890	2082.45	6	5	8
9.525	2236.00	7	5	8

^(ก) คำนวณจากความเครียดที่เกิดขึ้นจริง (1/4 ของค่าที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด)

จ.2 คลิปเกจหมายเลข 2

จ.2.1 ข้อมูลการสอบเทียบ

ตารางที่ จ.4 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด(คลิปเกจหมายเลข 2) ที่ระยะแฉับตัว
ต่าง ๆ (หน่วยเป็น $\mu\epsilon$)

ระยะแฉับตัว ของคลิปเกจ δ_{clip2} (มม)	ทดลองครั้งที่					เฉลี่ย $\bar{\epsilon}_2$ ($\mu\epsilon$)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน $SD_{\bar{\epsilon}_2}$ ⁽ⁿ⁾ ($\mu\epsilon$)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
0.000	0	0	0	0	0	0	0.00
0.635	564	569	570	569	569	568.2	0.60
1.270	1124	1134	1136	1131	1132	1131.4	1.14
1.905	1695	1706	1709	1705	1704	1703.8	1.32
2.540	2261	2274	2278	2275	2273	2272.2	1.63
3.175	2836	2851	2856	2854	2852	2849.8	1.99
3.810	3405	3423	3428	3428	3426	3422	2.43
4.445	3983	4003	4008	4008	4046	4009.6	5.70
5.080	4559	4581	4584	4584	4584	4578.4	2.73
5.715	5139	5164	5169	5169	5169	5162	3.26
6.350	5718	5745	5750	5749	5750	5742.4	3.45
6.985	6302	6331	6336	6336	6338	6328.6	3.77
7.620	6875	6911	6919	6918	6920	6908.6	4.78
8.255	7464	7500	7507	7508	7509	7497.6	4.78
8.890	8052	8086	8094	8095	8096	8084.6	4.66
9.525	8647	8680	8687	8690	8692	8679.2	4.64

⁽ⁿ⁾ คำนวณจากความเครียดที่เกิดขึ้นจริง (1/4 ของค่าที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด)

จ.2.2 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระยะแอนตัวสำหรับคลิปเกจหมายเลข 2

การวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุดระหว่าง ความเครียดที่เกิดบนคลิปเกจ ε_2 กับ ระยะแอนตัวของคลิปเกจ δ_{clip2} ในแต่ละการทดลอง โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

$$\varepsilon_2 = C_{2,2} \delta_{clip2} \quad (จ.6)$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ $C_{2,2}$ ของแต่ละการทดลองดังแสดงในตารางที่ จ.5

ตารางที่ จ.5 ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (จ.6) สำหรับการทดลองแต่ละครั้ง

การทดลอง ครั้งที่	$C_{2,2}$ ($\mu\varepsilon/mm$)
1	225.623
2	226.690
3	226.890
4	226.892
5	227.002
ค่าเฉลี่ย $\bar{C}_{2,2}$	226.615
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน $SD_{C_{2,2}}$	0.568

ค่าประมาณที่ดีที่สุดของ $C_{2,2}$ คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ดังนั้น

$$C_{2,2} = 226.62 \frac{\mu\varepsilon}{mm} \quad (จ.7)$$

ส่วนความไม่แน่นอนสำหรับ $C_{2,2}$ นั้นประมาณจากสมการ

$$U_{P,C_{2,2}} = t_{4,95\%} \times \frac{SD_{C_{2,2}}}{\sqrt{N}}$$

จากตารางสถิติ (16) $t_{4,95\%} = 2.7765$ และ $N = 5$ ดังนั้น

$$U_{P,C_{2,2}} = 2.7765 \times \frac{0.568}{\sqrt{5}} = 0.705 \frac{\mu\epsilon}{mm}$$

กำหนดให้ระยะแอนตัวสัมผัสของก้านไมโครมิเตอร์เท่ากับระยะแอนตัวของ
 คลิปเกจ $\delta_{clip2} \equiv \delta_M$ จะได้ ความไม่แน่นอนเชิงระบบของระยะแอนตัวของคลิปเกจ U_{B,δ_M}
 เท่ากับ

$$U_{B,\delta_{C_{2,2}}} = U_{B,\delta_M}$$

จากสมการที่ (จ.5) จะได้

$$U_{B,\delta_{C_{2,2}}} = 5 \mu m \quad (จ.8)$$

ความไม่แน่นอนสุ่มสำหรับระยะแอนตัวของคลิปเกจหมายเลข 2 หาได้จากสมการ
 ต่อไปนี้

$$U_{P,\delta_{clip2}} = \frac{\epsilon_2}{C_{2,2}} U_{P,C_{2,2}} \quad (\text{ที่ระดับความเชื่อมั่น 95\%}) \quad (จ.9)$$

ตารางที่ จ.6 แสดงผลการคำนวณความไม่แน่นอนเชิงระบบ และความไม่แน่นอน
 สุ่มสำหรับระยะแอนตัวของคลิปเกจหมายเลข 2 โดยใช้สมการที่ (จ.8) และ (จ.9) ผลการคำนวณ
 แสดงอยู่ในคอลัมน์ที่ 4 และ 3 ตามลำดับ ความไม่แน่นอนรวมหาจากสมการที่ (จ.10) และผลลัพธ์
 แสดงอยู่ในคอลัมน์สุดท้าย

$$U_{\delta_{clip2}} = \sqrt{U_{B,\delta_{clip2}}^2 + U_{P,\delta_{clip2}}^2} \quad (จ.10)$$

ตารางที่ จ.6 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนสำหรับระยะแอนตัวของคลิปีเกจหมายเลข 2

ระยะแอนตัว ของคลิปีเกจ δ_{clip2} (มม)	ความเครียด เฉลี่ย ε ^(ก) ($\mu\varepsilon$)	ความไม่แน่นอน (μm)		
		สุ่ม $U_{P,\delta_{clip2}}$	เชิงระบบ $U_{B,\delta_{clip2}}$	รวม $U_{\delta_{clip2}}$
0.000	0.00	0	5	5
0.635	142.05	2	5	5
1.270	282.85	4	5	6
1.905	425.95	6	5	8
2.540	568.05	8	5	9
3.175	712.45	10	5	11
3.810	855.50	12	5	13
4.445	1002.40	14	5	15
5.080	1144.60	16	5	16
5.715	1290.50	18	5	18
6.350	1435.60	20	5	20
6.985	1582.15	22	5	22
7.620	1727.15	24	5	24
8.255	1874.40	26	5	26
8.890	2021.15	28	5	28
9.525	2169.80	30	5	30

^(ก) จำนวนจากความเครียดที่เกิดขึ้นจริง (1/4 ของค่าที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด)

ภาคผนวก ฉ

ผลการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว

ฉ.1 ข้อมูลการสอบเทียบ

ตารางที่ ฉ.1 ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ซึ่งกำหนดโดยเกจบล็อก และอ่านจากไดอัลเกจ (หน่วยเป็น มม)

ขนาดสัมพัทธ์ของ เกจบล็อก δ_{GB} (มม)	ผลการทดลอง ^(a)				เฉลี่ย δ_{dial} (มม)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน $SD_{\delta_{dial}}$ (มม)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.762	0.760	0.775	0.783	0.755	0.768	0.013
2.540	2.540	2.538	2.543	2.510	2.533	0.015
3.302	3.315	3.308	3.323	3.280	3.306	0.019
4.572	4.585	4.580	4.593	4.555	4.578	0.016
5.842	5.860	5.835	5.858	5.825	5.844	0.017
6.858	6.875	6.853	6.863	6.825	6.854	0.021
7.366	7.363	7.358	7.368	7.335	7.356	0.014
8.128	8.135	8.108	8.145	8.118	8.126	0.017
8.890	8.898	8.875	8.878	8.875	8.881	0.011
9.652	9.650	9.625	9.673	9.630	9.644	0.022

^(a) เฉลี่ยจากระยะเคลื่อนตัวที่อ่านจากไดอัลเกจตัวซ้ายมือ และตัวขวามือ

ฉ.2 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

การวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุดระหว่าง ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ซึ่งอ่านจากไดอัลเกจ δ_{dial} กับระยะสัมพัทธ์ที่กำหนดโดยเกจบล็อก δ_{GB} โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

$$\delta_{dial} = C_3 \delta_{GB} \tag{ฉ.1}$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ C_3 ของแต่ละการทดลองดังแสดงในตารางที่ ฉ.2

ตารางที่ จ.2 ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (จ.1) สำหรับการทดลองแต่ละครั้ง

การทดลอง ครั้งที่	C_3
1	1.0010
2	0.9984
3	1.0013
4	0.9971
ค่าเฉลี่ย \bar{C}_3	0.9994
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน SD_{C_3}	0.0018

ค่าประมาณที่ดีที่สุดของ C_3 คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ดังนั้น

$$C_3 = 0.9994 \quad (\text{จ.2})$$

ส่วนความไม่แน่นอนสำหรับ C_3 นั้นประมาณจากสมการ

$$U_{P,C_3} = t_{3,95\%} \times \frac{SD_{C_3}}{\sqrt{N}}$$

จากตารางสถิติ (16) $t_{3,95\%} = 3.182$ และ $N = 4$ ดังนั้น

$$U_{P,C_3} = 3.182 \times \frac{0.0018}{\sqrt{4}} = 0.0033 \quad (\text{จ.3})$$

จากสมการที่ (จ.4) ความไม่แน่นอนเชิงระบบของเกจบล็อก $U_{B,\delta_{GB}}$ คือ $4 \mu\text{m}$ ความไม่แน่นอนนี้จะแผ่ไปเป็นความไม่แน่นอนเชิงระบบสำหรับค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ $U_{B1,\delta_{dial}}$ โดยมี uncertainty propagation equation คือ

$$U_{B1,\delta_{dial}} = C_3 U_{B,\delta_{GB}}$$

แทนสมการที่ (จ.2) และ (จ.4) ลงไปจะได้

$$U_{B1,\delta_{dial}} \approx 4 \mu m \quad (จ.4)$$

ความไม่แน่นอนเชิงระบบสำหรับค่าที่อ่านจากไดอัลเกจอีกส่วนหนึ่งมาความความแม่นยำของไดอัลเกจที่ใช้ $U_{B,dial}$ ในที่นี้ $U_{B,dial} = \pm 20 \mu m$ (จากแคตตาล็อกของผู้ผลิต) อย่างไรก็ตามก็พิจารณาเคลื่อนตัวสัมผัสของฐานเคลื่อนที่ที่อ่านจากไดอัลเกจก็ ค่าเฉลี่ยของค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ 2 ตัวที่สมมาตรกับแนวการเคลื่อนที่ของฐานเคลื่อนที่ ดังนั้น ความไม่แน่นอนเชิงระบบที่เกิดจากการอ่านค่าของไดอัลเกจ $U_{B2,\delta_{dial}}$ คือ

$$U_{B2,\delta_{dial}} = \frac{1}{2} \sqrt{U_{B,dial}^2 + U_{B,dial}^2}$$

$$\text{แทนค่าจะได้ } U_{B2,\delta_{dial}} = \frac{1}{2} \sqrt{20^2 + 20^2} \mu m \approx 14 \mu m \quad (จ.5)$$

ความไม่แน่นอนเชิงระบบรวมสำหรับค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ $U_{B,\delta_{dial}}$ หาได้จาก

$$U_{B,\delta_{dial}} = \sqrt{U_{B1,\delta_{dial}}^2 + U_{B2,\delta_{dial}}^2}$$

แทนสมการที่ (จ.4) และ (จ.5) จะได้

$$U_{B,\delta_{dial}} = \sqrt{4^2 + 14^2} \mu m \approx 15 \mu m \quad (จ.6)$$

ความไม่แน่นอนสุ่มสำหรับค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ $U_{P,\delta_{dial}}$ คือ

$$U_{P,\delta_{dial}} = U_{C3} \delta_{GB} \quad (\text{ที่ระดับความเชื่อมั่น 95\%}) \quad (จ.7)$$

ตารางที่ จ.3 แสดงผลการคำนวณความไม่แน่นอนเชิงระบบ และความไม่แน่นอนสุ่มสำหรับระยะเคลื่อนตัวสัมผัสของฐานเคลื่อนที่ซึ่งอ่านจากไดอัลเกจ โดยใช้สมการที่ (จ.7) และ (จ.6) ผลการคำนวณแสดงอยู่ในคอลัมน์ที่ 4 และ 3 ตามลำดับ ความไม่แน่นอนรวมหาจากสมการที่ (จ.8) และผลลัพธ์แสดงอยู่ในคอลัมน์สุดท้าย

ตารางที่ ๓.3 ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนสำหรับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของ
ฐานเคลื่อนที่ซึ่งอ่านจากไดอัลเกจ

ขนาดสัมพัทธ์ ของเกจบล็อก δ_{GB} (มม)	ค่าที่อ่านจาก ไดอัล δ_{dial} (มม)	ความไม่แน่นอน (μm)		
		สุ่ม $U_{P,\delta_{dial}}$	เชิงระบบ $U_{B,\delta_{dial}}$	รวม $U_{\delta_{dial}}$
0.000	0.000	0	15	15
0.762	0.768	2	15	15
2.540	2.533	8	15	17
3.302	3.306	11	15	18
4.572	4.578	15	15	21
5.842	5.844	19	15	24
6.858	6.854	22	15	27
7.366	7.356	24	15	28
8.128	8.126	26	15	30
8.890	8.881	29	15	32
9.652	9.644	31	15	35

ภาคผนวก ข

ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว

ข.1 ข้อมูลการสอบเทียบ

ตารางที่ ข.1 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ต่าง ๆ (ครั้งที่ 1)

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของ ฐานเคลื่อนที่ที่อ่านจาก ไดอัลเกจ δ_{dial} (มม)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)		ระยะแ่นตัวของ คลิปเกจ δ_{clip} (มม)
	คลิปเกจ หมายเลข 1 ϵ_1	คลิปเกจ หมายเลข 2 ϵ_2	
0.000	0	0	0.000
0.658	556	555	0.604
2.420	2174	2116	2.332
3.210	2923	2851	3.138
4.485	4072	3980	4.377
5.765	5255	5136	5.648
6.785	6213	6071	6.677
7.270	6668	6514	7.165
8.068	7367	7199	7.918
8.840	8055	7862	8.652
9.583	8738	8521	9.381

ตารางที่ ข.2 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ต่าง ๆ (ครั้งที่ 2)

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของ ฐานเคลื่อนที่ที่อ่านจาก ไดอัลเกจ δ_{dial} (มม)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)		ระยะแ่นตัวของ คลิปเกจ δ_{clip} (มม)
	คลิปเกจ หมายเลข 1 ϵ_1	คลิปเกจ หมายเลข 2 ϵ_2	
0.000	0	0	0.000
0.660	562	557	0.608
2.420	2170	2102	2.322
3.210	2894	2804	3.097
4.485	4064	3951	4.356
5.765	5251	5112	5.633
6.783	6200	6040	6.653
7.270	6655	6488	7.144
8.068	7356	7176	7.899
8.843	8048	7847	8.640
9.580	8712	8482	9.346

ตารางที่ ข.3 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ต่าง ๆ (ครั้งที่ 3)

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของ ฐานเคลื่อนที่ที่อ่านจาก ไดอัลเกจ δ_{dial} (มม)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)		ระยะแอ่นตัวของ คลิปปเกจ δ_{clip} (มม)
	คลิปปเกจ หมายเลข 1 ε_1	คลิปปเกจ หมายเลข 2 ε_2	
0.000	0	0	0.000
0.660	573	545	0.608
2.425	2185	2099	2.328
3.210	2913	2798	3.104
4.485	4081	3939	4.359
5.765	5269	5100	5.636
6.785	6218	6029	6.657
7.273	6674	6477	7.148
8.070	7387	7177	7.916
8.850	8084	7853	8.662
9.585	8737	8481	9.359

ตารางที่ ข.4 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ต่าง ๆ (ครั้งที่ 4)

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของ ฐานเคลื่อนที่ที่อ่านจาก ไดอัลเกจ δ_{dial} (มม)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)		ระยะแอ่นตัวของ คลิปปเกจ δ_{clip} (มม)
	คลิปปเกจ หมายเลข 1 ε_1	คลิปปเกจ หมายเลข 2 ε_2	
0.000	0	0	0.000
0.665	579	566	0.622
2.415	2181	2092	2.322
3.210	2911	2799	3.103
4.485	4076	3932	4.352
5.760	5262	5094	5.629
6.785	6216	6029	6.656
7.265	6663	6465	7.136
8.068	7388	7179	7.918
8.848	8078	7858	8.662
9.583	8741	8487	9.364

ตารางที่ ข.5 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดที่ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ต่าง ๆ (ครั้งที่ 5)

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ที่อ่านจากไดอัลเกจ δ_{dial} (มม)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)		ระยะแอนตัวของคลิปเกจ δ_{clip} (มม)
	คลิปเกจหมายเลข 1 ϵ_1	คลิปเกจหมายเลข 2 ϵ_2	
0.000	0	0	0.000
0.673	577	552	0.614
2.433	2193	2115	2.341
3.233	2923	2836	3.130
4.498	4089	3975	4.383
5.783	5275	5139	5.661
6.808	6226	6073	6.685
7.288	6674	6512	7.167
8.085	7407	7232	7.957
8.868	8093	7904	8.695
9.598	8743	8525	9.386

ข.2 การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

การวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุดระหว่างระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ซึ่งอ่านจากไดอัลเกจ δ_{dial} กับระยะแอนตัวของคลิปเกจ δ_{clip} โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

$$\delta_{clip} = C_4 \delta_{dial} \tag{ข.1}$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ C_4 ของการทดลองแต่ละครั้ง ดังแสดงในตารางที่ ข.6 ตารางที่ ข.6 สัมประสิทธิ์ในสมการที่ (ข.1) จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ ข.1-ข.5

การทดลองที่	C_4
1	0.9804
2	0.9767
3	0.9777
4	0.9779
5	0.9794
ค่าเฉลี่ย	0.9789
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD_{C_4}	0.0013

ค่าประมาณที่ดีที่สุดที่สุดของ C_4 คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ดังนั้น

$$C_4 = 0.9784 \quad (\text{ข.2})$$

ความไม่แน่นอนสำหรับ C_4 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ U_{P,C_4} ประมาณจากสมการ

$$U_{P,C_4} = t_{4,95\%} \times \frac{SD_{C_4}}{\sqrt{N}}$$

จากตารางสถิติ (16) $t_{4,95\%} = 2.7765$ และ $N = 5$ ดังนั้น

$$U_{P,C_4} = 2.7765 \times \frac{0.0013}{\sqrt{5}} = 0.0016 \quad (\text{ข.3})$$

สมการที่ (ข.1) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\delta_{dial} = \frac{\delta_{clip}}{C_4}$$

ดังนั้น uncertainty propagation equation คือ

$$U_{\delta_{dial}} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{clip}}{C_4^2} U_{C_4}\right)^2 + \left(\frac{1}{C_4} U_{\delta_{clip}}\right)^2} \quad (\text{ข.4})$$

ดังนั้น ความไม่แน่นอนสำหรับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของฐานเคลื่อนที่ซึ่งอ่านจากไดอัลเกจ คือ

$$U_{P,\delta_{dial}} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{clip}}{C_4^2} U_{P,C_4}\right)^2 + \left(\frac{1}{C_4} U_{P,\delta_{clip}}\right)^2} \quad (\text{ข.5})$$

โดย

$$\delta_{clip} = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_1}{C_{2,1}} + \frac{\varepsilon_2}{C_{2,2}} \right) \quad (ข.6)$$

$$U_{P,\delta_{clip}} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_1}{C_{2,1}} U_{P,C_{2,1}} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_2}{C_{2,2}} U_{P,C_{2,2}} \right)^2} \quad (ข.7)$$

สำหรับความไม่แน่นอนเชิงระบบสำหรับค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ แบ่งออกเป็น 2 องค์ประกอบ คือ 1) ความไม่แน่นอนเชิงระบบที่แผ่มาจากความไม่แน่นอนเชิงระบบสำหรับผลการวัดระยะแอนตัวของคลิปเกจ $U_{B1,\delta_{dial}}$ และ 2) ความไม่แน่นอนเชิงระบบสำหรับค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ (จากการสอบเทียบ) $U_{B2,\delta_{dial}}$

สำหรับองค์ประกอบแรก

$$U_{B1,\delta_{dial}} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{clip}}{C_4} \times U_{B,C_4} \right)^2 + \left(\frac{1}{C_4} U_{B,\delta_{clip}} \right)^2} \quad (ข.8)$$

แต่เนื่องจาก $U_{B,C_4} = 0$ ดังนั้นสมการที่ (ข.8) จึงลดรูปเหลือ

$$U_{B1,\delta_{dial}} = \frac{1}{C_4} U_{B,\delta_{clip}} \quad (ข.9)$$

โดย
$$U_{B,\delta_{clip}} = \frac{1}{2} \sqrt{U_{B,\delta_{clip1}}^2 + U_{B,\delta_{clip2}}^2} \quad (ข.10)$$

แทนสมการที่ (จ.3) และ (จ.8) ลงในสมการที่ (ข.10) และ (ข.9) ตามลำดับ จะได้

$$U_{B1,\delta_{dial}} = 4 \mu m \quad (ข.11)$$

สำหรับองค์ประกอบที่สอง จากสมการที่ (จ.6) จะได้

$$U_{B2,\delta_{dial}} = 15 \mu m \quad (ข.12)$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนเชิงระบบรวมสำหรับค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ (ในการสอบเทียบอุปกรณ์ฯ) $U_{B,\delta_{dial}}$ คือ

$$U_{B,\delta_{dial}} = \sqrt{U_{B1,\delta_{dial}}^2 + U_{B2,\delta_{dial}}^2}$$

แทนสมการที่ (ข.11) และ (ข.12) จะได้

$$U_{B,\delta_{dial}} = \sqrt{4^2 + 15^2} \mu m \approx 16 \mu m \quad (\text{ข.13})$$

ความไม่แน่นอนรวมสำหรับค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ $U_{\delta_{dial}}$ หาได้จากสมการ

$$U_{\delta_{dial}} = \sqrt{U_{B,\delta_{dial}}^2 + U_{P,\delta_{dial}}^2} \quad (\text{ที่ระดับความเชื่อมั่น 95\%}) \quad (\text{ข.14})$$

โดยแต่ละเทอมหาค่าได้จากสมการที่ (ข.5) และ (ข.13)

ตารางที่ ข.7 แสดงผลการคำนวณความไม่แน่นอนของการทดลองครั้งที่ 1¹

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ของฐานเคลื่อนที่ที่อ่าน จากไดอัลเกจ δ_{dial} (มม)	ความเครียดบน คลิปเกจ ($\mu\epsilon$) ^(*)		ระยะแอนตัวของ คลิปเกจ δ_{clip} (มม)	ความไม่แน่นอนของค่าที่อ่านจาก ไดอัลเกจ (ไมโครเมตร)		
	ϵ_1	ϵ_2		เชิงสุ่ม $U_{P,\delta_{dial}}$	เชิงระบบ $U_{B,\delta_{dial}}$	รวม $U_{\delta_{dial}}$
0.000	0.00	0.00	0.000	0	16	16
0.658	139.00	138.75	0.604	1	16	16
2.420	543.50	529.00	2.332	5	16	17
3.210	730.75	712.75	3.138	7	16	18
4.485	1018.00	995.00	4.377	10	16	19
5.765	1313.75	1284.00	5.648	13	16	21
6.785	1553.25	1517.75	6.677	16	16	22
7.270	1667.00	1628.50	7.165	17	16	23
8.068	1841.75	1799.75	7.918	19	16	24
8.840	2013.75	1965.50	8.652	20	16	26
9.583	2184.50	2130.25	9.381	22	16	27

^(*) 1/4 ของค่าที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด

ความไม่แน่นอนของค่าที่อ่านจากไดอัลเกจ $U_{\delta_{dial}}$ จะแผ่ไปเป็นความไม่แน่นอนของระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวจับยึดอุปกรณ์กับชิ้นงานทดสอบ $U_{\delta_{grip}}$ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

¹ หากพิจารณาระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่อ่านจากไดอัลเกจ และความเครียดที่คลิปเกจแต่ละตัวจะพบว่ามีความแตกต่างกันไม่มากนักในแต่ละการทดลอง ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนที่แสดงในตารางที่ ข.7 จึงเท่ากัน (โดยประมาณ) สำหรับผลการทดลองครั้งที่ 2 ถึง 5

จากความสัมพันธ์ของการสอบเทียบเครื่องสอบเทียบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว (สมการที่ (ฉ.1)) ถ้ากำหนดให้ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของตัวจับยึดอุปกรณ์กับชิ้นงานทดสอบ δ_{grip} เท่ากับขนาดสัมพัทธ์ของเกจบล็อก δ_{CB} แล้ว สมการที่ (ฉ.1) จะเขียนได้ใหม่ในรูปของ

$$\delta_{dial} = C_3 \delta_{grip}$$

หรือ
$$\delta_{grip} = \frac{\delta_{dial}}{C_3} \quad (\text{ช.15})$$

ดังนั้น uncertainty propagation equation สำหรับ δ_{grip} คือ

$$U_{\delta_{grip}} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{dial}}{C_3^2} U_{C_3}\right)^2 + \left(\frac{1}{C_3} U_{\delta_{dial}}\right)^2} \quad (\text{ช.16})$$

ตารางที่ ข.8 ผลการคำนวณความไม่แน่นอนสำหรับ δ_{grip} ของผลการทดลองครั้งที่ 1

ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ของฐานเคลื่อนที่ที่อ่าน จากไดอัลเกจ δ_{dial} (มม)	ระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ของตัวยึดอุปกรณ์กับ ชิ้นงาน δ_{grip} (มม)	ความไม่แน่นอน (ไมโครเมตร)	
		$U_{\delta_{dial}}$	$U_{\delta_{grip}}$
0.000	0.000	16	16
0.658	0.658	16	16
2.420	2.421	17	19
3.210	3.212	18	21
4.485	4.488	19	24
5.765	5.768	21	28
6.785	6.789	22	32
7.270	7.274	23	33
8.068	8.072	24	36
8.840	8.845	26	39
9.583	9.588	27	42

ภาคผนวก ซ

ผลการทดสอบความทนทานของคลิปเกจ

ตารางที่ ซ.1 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดหลังการทดสอบครั้งที่ 1-3 (คลิปเกจตัวที่1)

ระยะเคลื่อนตัวของ คลิปเกจ δ_{clip} (มม)	ความเครียดหลังการทดสอบ ครั้งที่ 1 ($\mu\epsilon$)	ความเครียดหลังการทดสอบ ครั้งที่ 2 ($\mu\epsilon$)	ความเครียดหลังการทดสอบ ครั้งที่ 3 ($\mu\epsilon$)
0.00	0	0	0
0.635	590	569	583
1.27	1171	1134	1162
1.905	1758	1706	1748
2.54	2344	2274	2340
3.175	2936	2851	2933
3.81	3526	3423	3522
4.445	4121	4003	4117
5.08	4714	4581	4708
5.715	5314	5164	5309
6.35	5910	5745	5906
6.985	6514	6331	6509
7.62	7116	6911	7109
8.255	7724	7500	7718
8.89	8333	8086	8325
9.525	8947	8680	8939

ระยะเคลื่อนตัวของ คลิปเกจ δ_{clip} (มม)	ความเครียดหลังการทดสอบ ครั้งที่ 1 ($\mu\epsilon$)	ความเครียดหลังการทดสอบ ครั้งที่ 2 ($\mu\epsilon$)	ความเครียดหลังการทดสอบ ครั้งที่ 3 ($\mu\epsilon$)
0.00	0	0	0
0.635	569	583	570
1.27	1134	1162	1136
1.905	1706	1748	1709
2.54	2274	2340	2278
3.175	2851	2933	2856
3.81	3423	3522	3428
4.445	4003	4117	4008
5.08	4581	4708	4584
5.715	5164	5309	5169
6.35	5745	5906	5750
6.985	6331	6509	6336
7.62	6911	7109	6919
8.255	7500	7718	7507
8.89	8086	8325	8094
9.525	8680	8939	8671

ตารางที่ ข.3 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดหลังการทดสอบครั้งที่ 4 (คลิปเกจตัวที่ 1)

ระยะเคลื่อนตัวของ คลิปเกจ δ_{clip} (มม)	การสอบเทียบ ครั้งที่ 1	การสอบเทียบ ครั้งที่ 2	การสอบเทียบ ครั้งที่ 3	การสอบเทียบ ครั้งที่ 4	การสอบเทียบ ครั้งที่ 5
0	- ⁽ⁿ⁾	0	0	0	0
0.635	-	583	582	585	587
1.27	-	1165	1158	1170	1173
1.905	-	1753	1744	1758	1763
2.54	-	2341	2329	2346	2349
3.175	-	2931	2920	2933	2939
3.81	-	3521	3507	3521	3527
4.445	-	4113	4098	4113	4119
5.08	-	4708	4694	4709	4715
5.715	-	5301	5289	5306	5309
6.35	-	5901	5889	5906	5909
6.985	-	6506	6488	6505	6508
7.62	-	7104	7095	7109	7113
8.255	-	7713	7695	7711	7716
8.89	-	8319	8307	8322	8326
9.525	-	8931	8920	8935	8940

⁽ⁿ⁾ ข้อมูลไม่ได้คุณภาพ

ตารางที่ ข.4 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียดหลังการทดสอบครั้งที่ 4 (คลิปเกจตัวที่2)

ระยะเคลื่อนตัวของ คลิปเกจ δ_{clip} (มม)	การสอบเทียบ ครั้งที่ 1	การสอบเทียบ ครั้งที่ 2	การสอบเทียบ ครั้งที่ 3	การสอบเทียบ ครั้งที่ 4	การสอบเทียบ ครั้งที่ 5
0	0	0	0	0	0
0.635	564	570	566	562	565
1.27	1130	1134	1130	1124	1131
1.905	1700	1702	1699	1695	1702
2.54	2269	2270	2268	2264	2270
3.175	2841	2843	2840	2836	2843
3.81	3417	3420	3414	3411	3418
4.445	3994	3995	3991	3988	3996
5.08	4572	4572	4569	4565	4573
5.715	5150	5152	5148	5144	5153
6.35	5731	5730	5728	5726	5734
6.985	6312	6313	6308	6308	6316
7.62	6897	6897	6895	6893	6901
8.255	7484	7486	7479	7479	7487
8.89	8073	8075	8070	8068	8076
9.525	8664	8667	8662	8661	8668

ภาคผนวก ฅ

ผลการทดสอบการคืบ

ฅ.1 ข้อมูลทดสอบ

ตารางที่ ฅ.1 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 34.7 MPa)

เวลา (นาที)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
0	0	0
4	72	55
8	146	126
12	224	202
16	303	274
20	375	345
24	438	404
28	504	464
32	572	527
36	651	601
40	731	675
44	801	741
48	866	803
52	941	873
56	1018	950
60	1103	1031
64	1185	1111
68	1253	1174
72	1331	1250
76	1420	1335
80	1520	1486
84	1615	1524
88	1698	1604
92	1782	1684
96	1873	1773
100	1982	1879
104	1987	2094

เวลา	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
108	2200	2089
112	2294	2181
116	2399	2282
120	2518	2399
124	2835	2708
128	2945	2817
132	3064	2934
136	3212	3081
138	3296	3161
142	3455	3313
146	3596	3450
150	3731	3585
154	3887	3735
158	4075	3920
162	4278	4118
166	4463	4299
170	4632	4465
174	4820	4648
178	5053	4874
182	5319	5135
186	5575	5383
190	5811	5615
194	6066	5864
198	6380	6174
202	6773	6557
206	7192	6966
210	7646	7410

ตารางที่ ฌ.2 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 27.7 MPa)

เวลา (นาทื)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
0	0	0
4	53	52
8	102	99
12	140	137
16	174	171
20	211	205
24	251	244
28	291	283
32	331	323
36	365	355
40	399	390
44	439	428
48	485	473
52	527	514
56	570	555
60	607	593
64	647	633
68	694	677
72	742	724
76	789	771
80	834	815
84	879	859
88	931	908
92	987	963
96	1039	1013
100	1087	1061
104	1141	1114
108	1199	1170
112	1257	1229
116	1320	1289

เวลา	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
120	1379	1348
124	1435	1404
128	1501	1468
132	1570	1538
136	1641	1605
140	1713	1679
144	1779	1743
148	1855	1818
152	1934	1896
156	2017	1979
160	2100	2060
164	2183	2143
168	2270	2229
172	2361	2321
176	2457	2414
180	2563	2519
184	2667	2619
188	2768	2719
192	2877	2826
196	2999	2943
200	3124	3067
204	3254	3194
208	3385	3322
212	3528	3460
216	3679	3608
220	3843	3768
224	4011	3932
228	4187	4101
232	4372	4284
234	4469	4381

ตารางที่ ๓.3 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 24.3 MPa)

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
0	0	0
2	13	10
4	28	22
6	39	29
8	50	38
10	59	48
12	70	60
14	82	70
16	90	79
18	102	90
20	114	98
22	123	108
24	133	119
26	141	125
28	150	135
30	158	143
32	170	153
34	180	164
36	189	173
38	197	181
40	209	194
42	216	202
44	225	210
46	234	220
48	242	228
50	250	235
52	260	247
54	268	255
56	274	261
58	284	271
60	293	281
62	305	293
64	314	301
66	321	310
68	331	321
70	340	330
72	347	339
74	358	348
76	366	354
78	376	365
80	384	374

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
82	392	386
84	401	395
86	411	404
88	421	412
90	431	424
92	439	433
94	447	441
96	458	451
98	469	462
100	477	471
102	486	481
104	497	493
106	506	502
108	515	511
110	527	521
112	533	531
114	540	536
116	550	546
118	559	557
120	571	571
122	579	577
124	589	590
126	602	601
128	610	609
130	621	621
132	630	630
134	642	641
136	649	649
138	660	660
140	670	670
142	680	681
144	692	693
146	700	700
148	710	712
150	722	725
152	731	733
154	744	745
156	751	753
158	763	766
160	774	776
162	783	785

ตารางที่ ๓.3 (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 24.3 MPa)

เวลา (นาที)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
164	794	798
166	806	809
168	817	820
170	824	828
172	837	841
174	848	852
176	858	863
178	868	872
180	877	884
182	891	898
184	903	909
186	911	917
188	923	930
190	935	943
192	945	952
194	956	965
196	968	977
198	981	990
200	990	1000
202	999	1010
204	1012	1024
206	1026	1036
208	1035	1045
210	1045	1057
212	1060	1070
214	1069	1082
216	1079	1092
218	1093	1106
220	1106	1119
222	1116	1130
224	1128	1143
226	1142	1157
228	1149	1161
230	1164	1175
232	1175	1186
234	1187	1199
236	1203	1213
238	1212	1223
240	1225	1237
242	1239	1251
244	1253	1264

เวลา	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
246	1266	1277
248	1280	1291
250	1293	1305
252	1306	1318
254	1319	1331
256	1329	1342
258	1343	1357
260	1357	1370
262	1371	1385
264	1382	1395
266	1395	1410
268	1408	1423
270	1422	1439
272	1438	1452
274	1449	1465
276	1465	1480
278	1475	1491
280	1488	1506
282	1502	1520
284	1517	1533
286	1531	1550
288	1544	1563
290	1558	1577
292	1573	1592
294	1583	1604
296	1598	1618
298	1616	1634
300	1627	1647
302	1639	1662
304	1654	1677
306	1668	1689
308	1683	1706
310	1699	1722
312	1715	1737
314	1728	1750
316	1742	1764
318	1758	1781
320	1769	1794
322	1787	1810
324	1801	1827
326	1817	1843

ตารางที่ ๓.3 (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 24.3 MPa)

เวลา (นาทิจ)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
328	1844	1869
330	1859	1888
332	1874	1899
334	1888	1916
336	1905	1933
338	1920	1948
340	1936	1961
342	1951	1979
344	1967	1995
346	1983	2011
348	1998	2028
350	2015	2044
354	2031	2061
356	2047	2077
358	2062	2092
360	2076	2107
362	2093	2126
364	2108	2141
366	2125	2159
368	2141	2177
370	2160	2193
372	2174	2209
374	2191	2227
376	2208	2243
378	2225	2262
380	2243	2280
382	2257	2296
384	2277	2315
386	2294	2333
388	2309	2349
390	2327	2368
392	2345	2386
394	2362	2402
396	2382	2422
398	2400	2440
400	2418	2460
402	2433	2477
404	2452	2496
406	2469	2515
408	2488	2533
410	2506	2551
412	1844	1869

เวลา (นาทิจ)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
414	2542	2589
416	2561	2608
418	2581	2628
420	2598	2647
422	2617	2668
424	2636	2686
426	2656	2706
428	2675	2726
430	2695	2747
432	2717	2765
434	2735	2786
436	2756	2804
438	2775	2825
440	2792	2845
442	2814	2867
444	2835	2888
446	2856	2908
448	2875	2928
450	2897	2949
452	2917	2971
454	2937	2991
456	2957	3014
458	2978	3036
460	3000	3056
462	3021	3077
464	3041	3099
466	3063	3121
468	3086	3143
470	3104	3166
472	3127	3188
474	3149	3210
476	3174	3234
478	3192	3256
480	3214	3278
482	3240	3303
484	3263	3328
486	3282	3349
488	3306	3373
490	3329	3397
492	3354	3421
494	3375	3444
496	3399	3468

ตารางที่ ๓.3 (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 24.3 MPa)

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
498	3422	3493
500	3449	3519
502	3473	3545
504	3496	3569
506	3518	3593
508	3544	3617
510	3569	3644
512	3592	3668
514	3618	3695
516	3643	3720
518	3669	3747
520	3694	3774
522	3719	3799
524	3747	3825
526	3770	3851
528	3796	3877
530	3826	3907
532	3850	3934
534	3877	3960
536	3906	3988
538	3931	4016
540	3957	4045
542	3988	4072
544	4013	4101
546	4040	4129
548	4072	4158
550	4100	4188
552	4127	4217
554	4155	4246
556	4184	4276
558	4216	4305
560	4245	4337
562	4275	4366
564	4301	4396
566	4332	4428
568	4365	4461
570	4392	4490
572	4425	4522
574	4455	4555
576	4487	4588
578	4520	4622
580	4551	4655

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
582	4585	4687
584	4618	4721
586	4652	4756
588	4682	4789
590	4714	4824
592	4750	4856
594	4785	4894
596	4819	4929
598	4853	4965
600	4890	5002
602	4924	5038
604	4960	5076
606	4998	5114
608	5035	5150
610	5071	5187
612	5107	5227
614	5148	5267
616	5184	5306
618	5224	5346
620	5260	5385
622	5303	5426
624	5343	5467
626	5382	5509
628	5424	5553
630	5465	5593
632	5506	5637
634	5546	5680
636	5591	5724
638	5636	5770
640	5679	5815
642	5724	5862
644	5769	5906
646	5814	5956
648	5863	6004
650	5905	6049
652	5955	6099
654	6003	6150
656	6051	6200
658	6103	6252
660	6153	6304
662	6206	6358
664	6258	6411

ตารางที่ ๓.3 (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 24.3 MPa)

เวลา (นาท)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
666	6309	6465
668	6366	6522
670	6421	6581
672	6476	6638
674	6533	6697
676	6594	6758
678	6653	6820
680	6714	6884
682	6779	6948
684	6842	7013
686	6909	7083
688	6981	7154
690	7058	7232
692	7150	7323
694	7275	7460

ตารางที่ ๓.4 ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 8.7 MPa)

เวลา (นาที)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
0	0	0
10	2	-1
15	6	2
20	6	-4
21	0	-10
41	8	0
61	11	6
81	14	10
101	16	14
121	22	20
141	21	21
161	29	24
181	36	27
201	41	29
221	44	30
241	49	34
261	55	39
281	56	41
301	63	47
321	71	54
341	71	55
361	76	58
381	77	61
401	82	65
421	89	70
441	93	71
461	95	75
481	104	84
501	107	87
521	114	94
541	115	94
561	122	99
581	129	105
601	134	109
621	135	110
641	144	119
661	145	120
681	153	127
701	158	132
721	162	136
741	165	140
761	164	147

เวลา (นาที)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
781	150	169
801	150	171
821	156	178
841	154	178
861	162	188
881	169	194
901	179	203
921	181	207
941	190	214
961	196	223
981	199	225
1001	210	234
1021	216	242
1041	223	247
1061	228	254
1081	242	254
1101	244	258
1121	250	264
1141	258	273
1161	268	278
1181	273	284
1201	281	290
1221	290	301
1241	293	304
1261	299	310
1281	306	308
1301	310	314
1321	319	322
1341	321	325
1361	328	333
1381	336	340
1401	343	350
1421	348	351
1441	358	364
1461	360	364
1481	367	371
1501	377	380
1521	380	383
1541	390	394
1561	394	398
1581	402	405
1601	406	409

ตารางที่ ๓.๔ (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 8.7 MPa)

เวลา (นาที)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
1621	416	422
1641	415	428
1661	417	428
1681	424	438
1701	434	451
1721	439	454
1741	446	462
1761	456	474
1781	460	474
1801	469	484
1821	477	493
1841	479	495
1861	491	508
1881	496	514
1901	502	520
1921	510	528
1941	520	538
1961	525	544
1981	534	551
2001	538	557
2021	547	567
2041	551	569
2061	561	582
2081	569	588
2101	574	594
2121	583	604
2141	591	612
2161	598	618
2181	603	624
2201	612	633
2221	622	644
2241	630	651
2261	633	655
2281	644	664
2301	652	675
2321	659	682
2341	667	690
2361	676	699
2381	680	703
2401	689	712
2421	697	719
2441	703	725

เวลา (นาที)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
2461	734	711
2481	744	721
2501	757	741
2521	762	747
2541	770	753
2561	777	760
2581	790	773
2601	796	779
2621	806	789
2641	814	798
2661	821	802
2681	832	815
2701	841	822
2721	849	831
2741	856	839
2761	866	849
2781	874	856
2801	883	864
2821	894	877
2841	899	881
2861	904	889
2881	916	900
2901	929	911
2921	934	918
2941	942	924
2961	954	936
2981	957	940
3001	965	948
3021	974	957
3041	983	965
3061	994	974
3081	1005	985
3101	1016	997
3121	1027	1007
3141	1039	1019
3161	1048	1027
3181	1055	1034
3201	1064	1043
3221	1075	1053
3241	1082	1059
3261	1093	1069
3281	1100	1077

ตารางที่ ๓.4 (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 8.7 MPa)

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
3301	1109	1087
3321	1118	1093
3341	1126	1103
3361	1137	1114
3381	1146	1125
3401	1159	1134
3421	1169	1144
3441	1179	1155
3461	1188	1162
3481	1197	1172
3501	1210	1183
3521	1219	1193
3541	1229	1204
3561	1242	1215
3581	1247	1220
3601	1259	1230
3621	1265	1239
3641	1280	1253
3661	1291	1263
3681	1301	1271
3701	1309	1280
3721	1318	1289
3741	1329	1300
3761	1341	1311
3781	1355	1325
3801	1365	1335
3821	1377	1346
3841	1388	1357
3861	1397	1366
3881	1410	1375
3901	1418	1385
3921	1431	1398
3941	1443	1409
3961	1454	1420
3981	1464	1429
4001	1477	1440
4021	1489	1453
4041	1497	1462
4061	1510	1476
4081	1519	1485
4101	1532	1498
4121	1541	1507

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
4141	1557	1523
4161	1565	1531
4181	1578	1544
4201	1593	1557
4221	1607	1569
4241	1621	1581
4261	1635	1593
4281	1649	1605
4301	1663	1617
4321	1677	1629
4341	1691	1641
4361	1705	1653
4381	1719	1665
4401	1733	1677
4421	1747	1689
4441	1761	1701
4461	1775	1713
4481	1789	1725
4501	1803	1737
4521	1817	1749
4541	1831	1761
4561	1845	1773
4581	1859	1785
4601	1873	1797
4621	1887	1809
4641	1901	1821
4661	1915	1833
4681	1929	1845
4701	1943	1857
4721	1957	1869
4741	1971	1881
4761	1985	1893
4781	1999	1905
4801	2013	1917
4821	2027	1929
4841	2041	1941
4861	2055	1953
4881	2069	1965
4901	2083	1977
4921	2097	1989
4941	2111	2001
4961	2125	2013

ตารางที่ ๓.๔ (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 8.7 MPa)

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
4981	2139	2025
5001	2153	2037
5021	2167	2049
5041	2181	2061
5061	2195	2073
5081	2209	2085
5161	2265	2133
5181	2279	2145
5201	2293	2157
5221	2307	2169
5241	2321	2181
5261	2335	2193
5281	2349	2205
5301	2363	2217
5321	2377	2229
5341	2391	2241
5361	2405	2253
5381	2419	2265
5401	2433	2277
5421	2447	2289
5441	2461	2301
5461	2475	2313
5481	2489	2325
5501	2503	2337
5521	2517	2349
5541	2531	2361
5561	2545	2373
5581	2559	2385
5601	2573	2397
5621	2587	2409
5641	2601	2421
5661	2615	2433
5681	2624	2445
5701	2629	2457
5721	2634	2469
5741	2640	2481
5761	2645	2495
5781	2653	2513
5801	2660	2529
5821	2671	2556

เวลา	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
5841	2675	2572
5861	2681	2599
5881	2685	2613
5901	2699	2627
5921	2713	2641
5941	2727	2655
5961	2741	2669
5981	2751	2683
6001	2765	2705
6021	2780	2718
6041	2795	2735
6061	2813	2752
6081	2831	2770
6101	2849	2787
6121	2862	2800
6141	2879	2817
6161	2896	2833
6181	2915	2852
6201	2934	2870
6221	2948	2883
6241	2967	2902
6261	2984	2917
6281	3001	2936
6301	3018	2952
6321	3038	2972
6341	3052	2986
6361	3073	3007
6381	3091	3026
6401	3109	3041
6421	3127	3058
6441	3147	3079
6461	3164	3095
6481	3183	3115
6501	3204	3133
6521	3221	3151
6541	3241	3169
6561	3260	3191
6581	3277	3193
6601	3307	3222
6621	3326	3237

ตารางที่ ๓.4 (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 8.7 MPa)

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
6641	3345	3255
6661	3368	3282
6681	3388	3297
6701	3407	3317
6721	3428	3347
6741	3445	3361
6761	3464	3383
6781	3483	3399
6801	3503	3421
6821	3523	3440
6841	3543	3461
6861	3564	3481
6881	3586	3506
6901	3604	3523
6921	3630	3549
6941	3650	3569
6961	3670	3589
6981	3688	3609
7001	3720	3635
7021	3740	3658
7041	3760	3678
7061	3782	3701
7081	3802	3725
7101	3833	3746
7121	3852	3772
7141	3879	3795
7161	3900	3817
7181	3924	3836
7201	3949	3863
7221	3967	3883
7241	3990	3906
7261	4024	3935
7281	4041	3952
7301	4065	3975
7321	4092	4002
7341	4112	4022
7361	4137	4046
7381	4165	4072
7401	4190	4099
7421	4209	4106

เวลา	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
7441	4235	4133
7461	4260	4156
7481	4284	4181
7501	4310	4205
7521	4339	4233
7541	4362	4257
7561	4388	4280
7581	4413	4306
7601	4440	4332
7621	4467	4360
7641	4494	4385
7661	4520	4411
7681	4548	4437
7701	4574	4464
7721	4602	4490
7741	4630	4515
7761	4658	4545
7781	4688	4573
7801	4718	4601
7821	4746	4629
7841	4774	4656
7861	4806	4686
7881	4832	4713
7901	4861	4743
7921	4890	4772
7941	4920	4801
7961	4945	4825
7981	4981	4853
8001	5010	4880
8021	5039	4907
8041	5072	4938
8061	5104	4969
8081	5134	4999
8101	5166	5027
8121	5202	5057
8141	5236	5090
8161	5267	5115
8181	5291	5160
8201	5325	5197
8221	5354	5227

ตารางที่ ๗.4 (ต่อ) ความเครียดที่อ่านจากมิเตอร์ความเครียด (ความเค้นเริ่มต้น 8.7 MPa)

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
8241	5380	5258
8261	5403	5285
8281	5440	5322
8301	5476	5355
8321	5510	5388
8341	5543	5422
8361	5573	5451
8381	5610	5488
8401	5645	5521
8421	5678	5552
8441	5713	5587
8461	5748	5622
8481	5785	5654
8501	5816	5685
8521	5847	5718
8541	5884	5754
8561	5918	5787
8581	5953	5825
8601	5990	5859
8621	6024	5893
8641	6058	5926
8661	6094	5961
8681	6131	5998
8701	6162	6030
8721	6202	6066
8741	6235	6100
8761	6270	6134
8781	6305	6167
8801	6340	6204
8821	6375	6238
8841	6411	6273
8861	6448	6308
8881	6483	6343
8901	6520	6379
8921	6555	6413
8941	6583	6431
8961	6621	6464
8981	6658	6501
9001	6695	6536
9021	6732	6573

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\varepsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
9041	6771	6610
9061	6808	6645
9081	6845	6682
9101	6883	6718
9121	6922	6756
9141	6959	6792
9161	6995	6828
9181	7036	6864
9201	7070	6902
9221	7109	6937
9241	7147	6974
9261	7187	7013
9281	7224	7048
9301	7263	7088
9321	7300	7124
9341	7337	7162
9361	7376	7198
9381	7412	7232
9401	7449	7270
9421	7489	7307
9441	7527	7346
9461	7566	7383
9481	7604	7419
9501	7641	7456
9521	7728	7539
9541	7766	7585
9561	7803	7622
9581	7841	7662
9601	7880	7702
9641	7954	7773
9661	7986	7807
9681	8032	7849
9701	8069	7887
9721	8106	7929
9741	8142	7964
9761	8179	8002
9781	8237	8057
9801	8277	8101
9821	8316	8137
9841	8354	8174

เวลา (นาทีก)	ความเครียด ($\mu\epsilon$)	
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2
9861	8391	8212
9881	8429	8250
9901	8467	8289
9921	8505	8328
9941	8548	8368
9961	8582	8403
9981	8617	8441
10001	8664	8487
10021	8704	8524
10041	8738	8559
10061	8785	8601
10081	8824	8641
10101	8865	8680
10121	8904	8720
10141	8941	8757
10161	8981	8795
10181	9020	8832
10201	9057	8871
10221	9093	8906
10241	9135	8949
10261	9165	8975
10281	9175	8998
10301	9177	9010
10321	9181	9022

ภาคผนวก ญ

การแบ่งเกรดตามมาตรฐาน BS 3846

ตารางที่ ญ.1 การแบ่งเกรดจากความละเอียด

เกรด	ความละเอียด ($\mu\epsilon$)
A	3×10^{-6}
B	6×10^{-6}
C	12×10^{-6}
D	30×10^{-6}
E	60×10^{-6}
F	120×10^{-6}

ตารางที่ ญ.2 การแบ่งเกรดจากขอบเขตความผิดพลาด

ขอบเขตความผิดพลาดแยกตามเกรด ($\mu\epsilon$) ^(๓)
$Y_A = 0.002 \epsilon + 10 \times 10^{-6}$
$Y_B = 0.004 \epsilon + 10 \times 10^{-6}$
$Y_C = 0.008 \epsilon + 40 \times 10^{-6}$
$Y_D = 0.020 \epsilon + 100 \times 10^{-6}$
$Y_E = 0.040 \epsilon + 200 \times 10^{-6}$
$Y_F = 0.080 \epsilon + 400 \times 10^{-6}$

^(๓) ϵ คือ ความเครียดที่วัดหน่วยเป็น มม/มม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัฐสิทธิ์ จันทร์วิเศษ เกิดเมื่อวันที่ 23 มีนาคม 2519 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุดรพิทยานุกูล เมื่อปีการศึกษา 2538 สำเร็จการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2545

