

การศึกษาพฤติกรรมทาง Static ของ Thick Ring



ปีการศึกษา 2536

การศึกษาพฤติกรรมทาง Static ของ Thick Ring



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาพฤติกรรมทาง Static ของ Thick Ring

เกียรติพงษ์

เกียรตินฤยุทธ

เบญจพล

กัลต์เจริญ

อัจฉริยา

นิมิตรชัย

อ.ชาคริต

วรรณศิริ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2536

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของ thick ring ซึ่งมีรัศมีภายนอก 22.5 mm และรัศมีภายใน 12.5 mm หนา 6 mm ซึ่งได้ออกแบบจากการคำนวณทางทฤษฎีของคานโค้ง โดยรับแรงกดแบบ static โดยหาค่า strain เพื่อยืนยันทฤษฎีที่ได้คำนวณไว้ จากนั้นศึกษาถึงความแข็งแรงของผิวโค้งกับผิวเรียบ และลักษณะของ thick ring ที่มี notch เพื่อศึกษาดู crack ที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Static Analysis of Thick Ring Behavior

by

Kiatipong Kiatinaruyoot

Benjapon Kladcharoen

Achariya Nimitchai

Chakrit Wansiri (Advisor)

## abstract

This thesis analyzed the thick ring's behavior which has outer radius 22.5 mm, inner radius 12.5 mm, and thickness 6 mm. It designed by curve beam's theory and being compressed statically. We search for strain for supporting data that is calculated theoretically. Then, we study hardness of curve surface and smooth surface, and thick ring with notch's characteristic for investigating crack under compressive force.

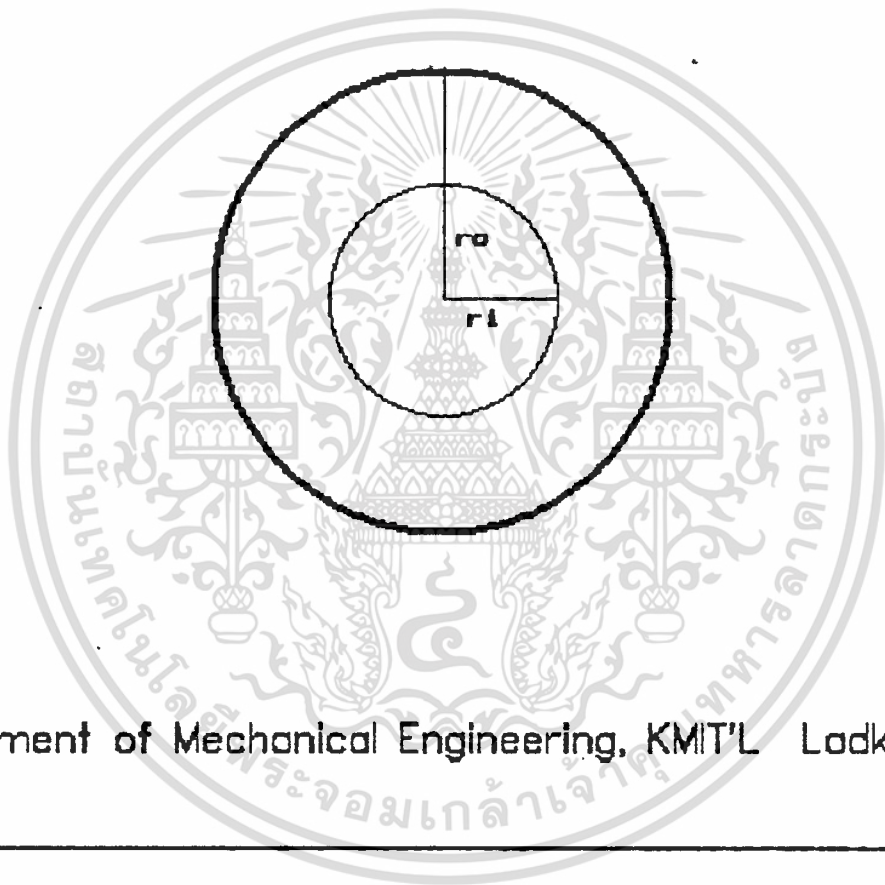
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
Specimen thick ring	1
ทฤษฎีและหลักการ	4
วิธีทดลอง	9
ผลการทดลอง	11
สรุปและวิเคราะห์	16
Hardness Test	18
ทฤษฎีและหลักการ	18
ผลการทดลอง	26
สรุปและวิเคราะห์	31
A crack in a structure	32
ทฤษฎีและหลักการ	32
ผลการทดลอง	41
สรุปและวิเคราะห์	44
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Theoretical Calculation For Ring Specimen



Department of Mechanical Engineering, KMITL Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**\*\*\* Study of Curved Beam Problems \*\*\***

**Input Value of Inner & Outer Radius in mm. : 12.5 22.5**

**Input Value of Modulus of Elasticity : 207000**

**Input Force that you want to test : 1000-3000**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Experimental Stress Analysis of Control Problems

By

Mr. Kiatipong Kiatinaruyoot 33100035

Mr. Benjapon Kladcharoen 33100194

Ms. Achariya Nimitchai 33100511

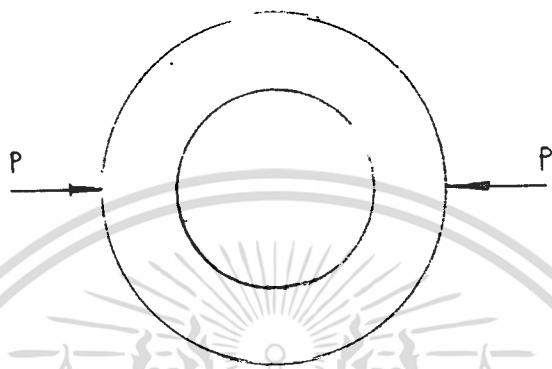
Advisor

Mr. Chakrit Wansiri

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ทฤษฎีและหลักการ

ในการศึกษาทดลองในวงแหวนที่ถูกแรงกระทำดกกระแทกเข้าที่วงแหวน ดังรูป  
ที่ 1



รูปที่ 1 แสดงวงแหวนถูกกดทั้งสองข้าง

ทฤษฎีที่ใช้พิจารณาคือการใช้หลักการของคานาคัดที่เป็นส่วนโค้งของวงกลม ที่มี  
แรงกดกระทำที่ปลายของคานา ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงส่วนสมมาตรของวงแหวนที่นำมาใช้พิจารณา

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าจะสามารถนำเอาส่วนหนึ่งของคานาที่สมมาตรนำมาพิจารณา  
ปัญหาที่ถูกกำหนดไว้ และเงื่อนไขที่ปลายด้านล่างของคานาเมื่อนำมาตัดพิจารณาแล้วจะเห็น  
ว่าถูกยึดแน่นเนื่องจากการสมมาตรของวงแหวนเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่บาง นำมาใช้พิจารณาค่า Bending Moment ที่หน้าตัด  $mn$  ดังรูปที่ 2 ซึ่งค่า Bending Moment ที่ได้จะอยู่ในรูปของฟังก์ชัน  $\sin \theta$  และเป็นไปตามทฤษฎีของความเค้นตามแกน

จาก Airy Stress Function จะได้

$$\phi = f(r)\sin\theta \quad (1)$$

ในการแก้ปัญหาสมการที่ (1) จะใช้วิธี Biharmonic  $\nabla^4 \phi = 0$  และหารด้วย  $\sin\theta$  จะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียลเริ่มต้น

$$\left[ \begin{array}{c} d^2 + 1d - 1 \\ \frac{1}{dr^2} \quad \frac{1}{rdr} \quad \frac{1}{r^2} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} d^2 f + 1df - f \\ \frac{1}{dr^2} \quad \frac{1}{rdr} \quad \frac{1}{r^2} \end{array} \right] = 0 \quad (2)$$

ผลลัพธ์โดยทั่วไปจะได้

$$f(r) = c_1 r^3 + c_2/r + c_3 r + c_4 r \ln r \quad (3)$$

ค่า  $c_1, c_2, c_3$  และ  $c_4$  เป็นค่าคงที่ แทนค่าสมการที่ (3) ลงในสมการที่ 1 จะได้

$$\phi = (c_1 r^3 + c_2/r + c_3 r + c_4 r \ln r)\sin\theta \quad (4)$$

จากสมการการหาฟังก์ชันของความเค้น  $\phi$  จะได้ค่าของส่วนประกอบของความเค้น

$$6rr = (2c_1 r - 2c_2/r^3 + c_4/r)\sin\theta \quad (5)$$

$$6\theta\theta = (6c_1 r + 2c_2/r^3 + c_4/r)\sin\theta \quad (6)$$

$$6r\theta = -(2c_1 r - 2c_2/r^3 + c_4/r)\cos\theta \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเงื่อนไขขอบเขต

$$1. \quad 6rr = 6r\theta = 0 \quad \text{สำหรับ } r = r_1 \text{ และ } r = r_0$$

$$2. \quad \int 6r\theta dr = P \quad \text{สำหรับ } \theta = 0$$

จากเงื่อนไขอันแรกจะได้

$$2c_1 r_1 - 2c_2 / r_1^3 + c_4 / r_1 = 0 \quad (8)$$

$$2c_1 r_0 - 2c_2 / r_0^3 + c_4 / r_0 = 0$$

จากเงื่อนไขอันที่สองจะได้

$$-c_1 (r_0^2 - r_1^2) + c_2 (r_0^2 - r_1^2) / r_0^2 r_1^2 - c_4 \ln r_0 / r_1 = P \quad (9)$$

จากสมการที่ (8) และ (9) จะได้

$$c_1 = P/2N$$

$$c_2 = -Pr_1^2 r_0^2 / 2N$$

$$c_4 = -P(r_0^2 + r_1^2) / N$$

เมื่อค่า  $N = r_1^2 - r_0^2 + (r_1^2 + r_0^2) \ln r_0 / r_1$

ดังนั้นจะได้ค่าความเค้นสุดท้ายเท่ากับ

$$6rr = P/N(r + r_1^2 r_0^2 / r^3 - (r_1^2 + r_0^2) / r) \sin \theta$$

$$6\theta\theta = P/N(3r - r_1^2 r_0^2 / r^3 - (r_1^2 + r_0^2) / r) \sin \theta$$

$$6r\theta = -P/N(r + r_1^2 r_0^2 / r^3 - (r_1^2 + r_0^2) / r) \cos \theta$$

จากเงื่อนไขขอบเขตที่คาน  $\theta = 0$  จะได้

$$6rr = 6\theta\theta = 0$$

$$6r\theta = -P/N(r + r_1^2 r_0^2 / r^3 - (r_1^2 + r_0^2) / r)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตที่คาน  $\theta = \pi/2$  จะได้

$$6rr = P/N(r + r_1^2 r_0^2 / r^3 - (r_1^2 + r_0^2) / r)$$

$$6\theta\theta = P/N(3r - r_1^2 r_0^2 / r^3 - (r_1^2 + r_0^2) / r)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคานจากการกระทำของแรง  $P$  จะสามารถอธิบายได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการยืดหยุ่นของความเค้น และความเครียดของความเค้นแผ่นและความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงความเครียดดั่งสมการ

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{\sin \theta}{E} [2c_1 r(1-3\nu) - 2c_2 / r^3(1+\nu) + c_4(1-\nu)] \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = r e_{\theta\theta} - u_r \quad (11)$$

$$2e_{r\theta} = \frac{\partial u_r}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \quad (12)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (10) จะได้

$$u_r = \frac{\sin \theta}{E} [c_1 r^2(1-3\nu) + c_2 / r^2(1+\nu) + c_4(1-\nu) \ln r] + f_1(\theta)$$

ค่าของ  $f_1(\theta)$  เป็นค่าของฟังก์ชัน  $\theta$  จากสมการความสัมพันธ์

$$e_{\theta\theta} = (1/r) \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) + \frac{u_r}{r} \quad (13)$$

จากสมการที่ (11) และสมการที่ (13) ทำการอินทิเกรตจะได้

$$u_\theta = -\frac{\cos \theta}{E} [(c_1 r^2(5+\nu) + c_2 / r^2(1+\nu) - c_4(1-\nu) \ln r + c_4(1-\nu)] - \int f_1(\theta) d\theta + f_2(r) \quad (14)$$

ค่าของ  $f_2(r)$  เป็นค่าของฟังก์ชัน  $r$  เมื่อแทนค่าของสมการที่ (13) และ (14) ลงในสมการที่ (12) จะได้ว่า

$$\int f_1(\theta) d\theta + f_1'(\theta) + r f_2'(r) - f_2(r) = -4c_4 \cos \theta / E \quad (15)$$

สามารถแยกคิดเป็นสองสมการได้ดังนี้

$$\int f_1(\theta) d\theta + f_1'(\theta) = -4c_4 \cos \theta / E \quad (16)$$

$$r f_2'(r) - f_2(r) = 0 \quad (17)$$

จะแก้หาค่าได้ดังนี้

$$f_1(\theta) = -2c_4 \cos \theta / E + K \sin \theta + L \cos \theta$$

$$f_2(r) = H r$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ทางบริษัทได้จัดทำขึ้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้หรือเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางบริษัท และต้องแจ้งให้ทางบริษัททราบทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ  $K, L$  และ  $H$  เป็นค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของการเปลี่ยนแปลง สามารถเขียนค่าของ  $u_r$  และ  $u_\theta$  ได้ใหม่เป็น

$$u_r = \sin\theta/E [c_1 r^2(1-3\nu) + c_2/r^2(1+\nu) + c_4(1-\nu)\ln r] - 2c_4 \cos\theta/E + K \sin\theta + L \cos\theta \quad (18)$$

$$u_\theta = 2c_4 \sin\theta/E - \cos\theta/E [c_1(5+\nu)r^2 + c_2(1+\nu)/r^2 - c_4(1-\nu)\ln r] + c_4(1+\nu)\cos\theta/E + K \cos\theta - L \sin\theta + Hr \quad (19)$$

พิจารณาเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงของคานที่จุดกึ่งกลางของหน้าตัดที่  $\theta = \pi/2$  เป็นจุดยึดแน่นจะพิจารณาราวได้ว่า

$$u_r = u_\theta = 0$$

$$\partial u_\theta / \partial r = 0$$

$$\text{ที่ } \theta = \pi/2 \text{ และ } r = r_c = (r_i + r_o)/2$$

ดังนั้น จากเงื่อนไขแทนลงในสมการที่ (18) และ (19) จะได้

$$H = 0$$

$$L = c_4 \pi / E$$

$$K = -1/E [c_1 r_c^2(1-3\nu) + c_2/r_c^2(1+\nu) + c_4(1-\nu)\ln r_c]$$

จากทฤษฎีที่นำมาพิจารณาจะสามารถหาค่าของ

1. การเปลี่ยนแปลงของคาน (Deflection  $u_r, u_\theta$ ) ที่จุดต่างๆ ทุกมุมของวงแหวนที่ต้องการได้
2. ส่วนประกอบของความเค้น ( $\sigma_{\theta\theta}, \sigma_{rr}, \sigma_{r\theta}$ ) ที่จุดต่างๆ ทุกมุมของวงแหวนได้
3. สามารถนำมาหาค่าของความเครียดที่จุดที่ติดตั้ง strain gage (ซึ่งถูกกำหนดให้หิมค่าอยู่ในช่วงระหว่าง  $10^{-2}$  ถึง  $10^{-5}$  ซึ่งเป็นค่าที่ strain gage สามารถวัดได้)
4. สามารถนำค่าของความเครียดที่วัดได้มาหาค่าของแรงกระแทกที่มากกระทำได้

หลักการที่นำมาใช้พิจารณาในการหาขนาดของวงแหวนที่ใช้ในการศึกษา

1. กำหนดค่าของแรงที่ใช้วัดอยู่ในช่วง 100-200 kg ต่อความหนา 8 mm
2. ค่าของความเครียดอยู่ในช่วงระหว่าง  $10^{-2} - 10^{-5}$
3. กำหนดค่า  $r = r_o$ ,  $r_i = 1.5r_o$
4. ใช้สูตร  $\sigma_{\theta\theta} = (\partial u_\theta / \partial \theta + u_r) / r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารนำค่า  $E$  ใช้ค่า  $E$  มีค่า  $207000 \text{ N/mm}^2$  คือ  $\nu$  ที่มี  $0.292$  มาดูให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่าการณ์ใดๆ 6. ดังนั้นจะได้ขนาดของวงแหวน  $r_i$  คือ  $12.5 \text{ mm}$  ของ  $r_o$  คือ  $22.5 \text{ mm}$  นำไปใช้

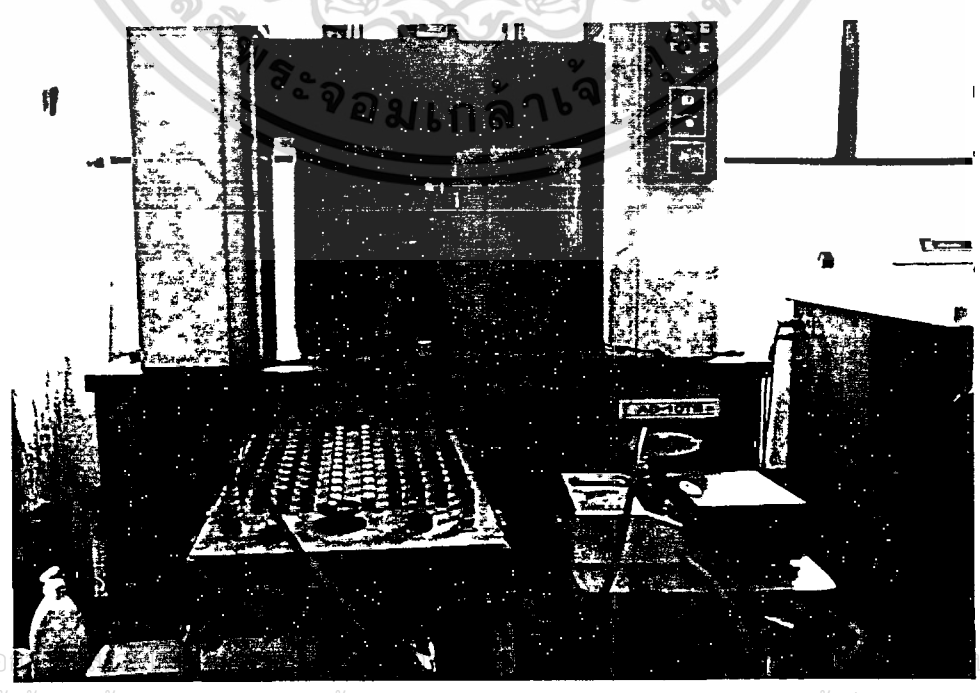
วิธีทดลอง



1. ติด strain gage บนส่วนโค้งของ ring ดังรูป



2. ติดตั้งชุดทดลอง ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารการดำเนินงานของกรมการช่างเครื่องกลและเครื่องกลไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อสายเคเบิล (สายโทรศัพท์) จากขา strain gage มาเข้า bridge box จาก bridge box ก็ต่อเข้ากับ digital static strain indicator แล้วอ่านค่า strain จากหน้าปัดของ digital static strain indicator ซึ่งจะมีค่า  $\times 10^{-6}$

3. นำ ring ไปทดลองรับแรงกดกับเครื่อง Universal Testing Machine โดยเพิ่มแรงจาก 1000-3000 N อย่างสม่ำเสมอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

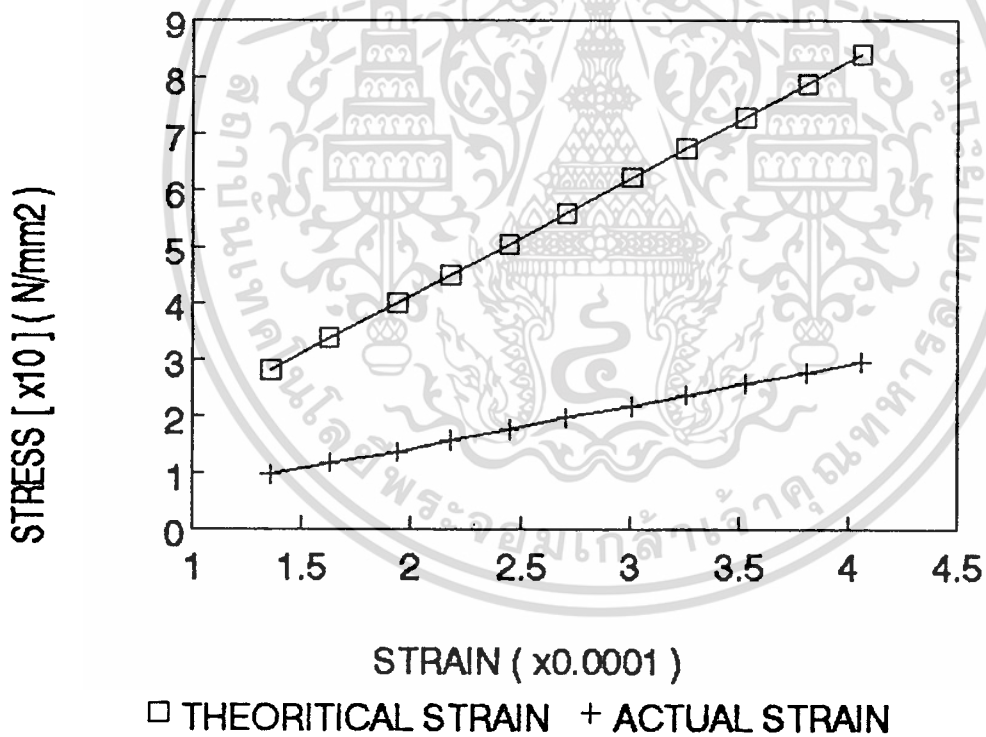
Report from Calculation at Force = 1000.00 (N)

Angle	Strain( $\epsilon_{\theta\theta}$ )	Strain( $\epsilon_{r\theta}$ )
0°	0.000e+00	7.146e-11
10°	7.259e-05	7.037e-11
20°	1.430e-04	6.715e-11
30°	2.090e-04	6.189e-11
40°	2.687e-04	5.474e-11
50°	3.203e-04	4.594e-11
60°	3.621e-04	3.574e-11
70°	3.929e-04	2.445e-11
80°	4.118e-04	1.243e-11
90°	4.181e-04	2.117e-14

ตารางที่ 1 ค่า strain ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

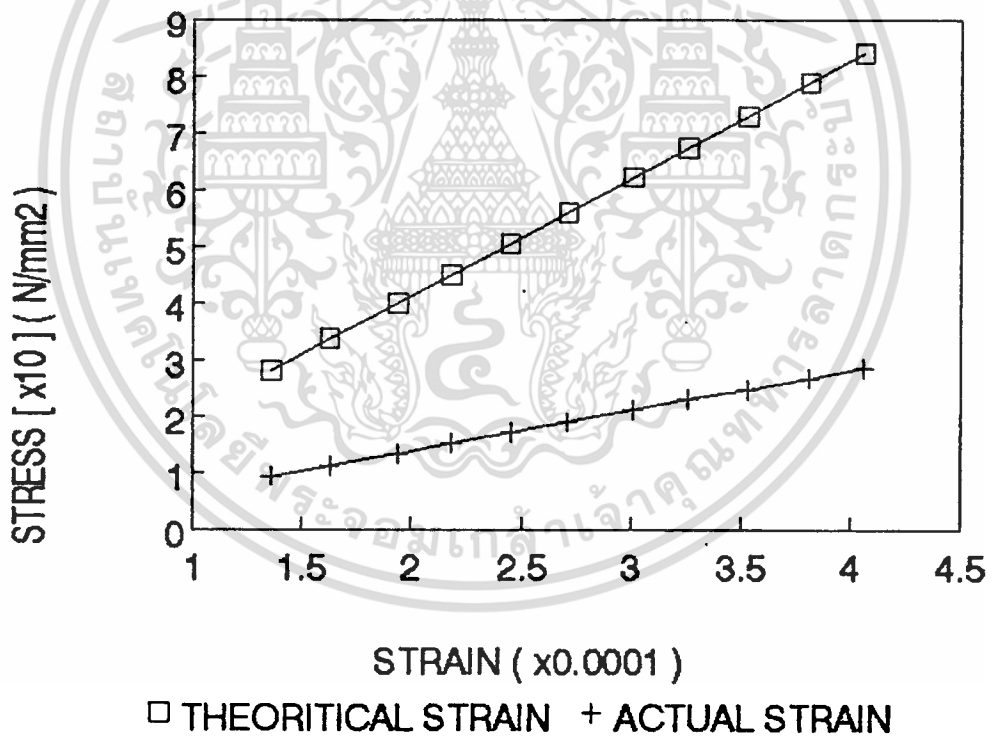
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRESS ( $\times 10^6$ N/mm <sup>2</sup> )	THEORITICAL STRAIN ( $\times 0.0001$ )	ACTUAL STRAIN ( $\times 0.0001$ )
2.81	1.36	0.97
3.38	1.63	1.18
4.01	1.94	1.37
4.51	2.18	1.58
5.06	2.45	1.76
5.61	2.71	1.97
6.23	3.01	2.18
6.75	3.26	2.37
7.29	3.53	2.57
7.89	3.81	2.77
8.41	4.06	2.95



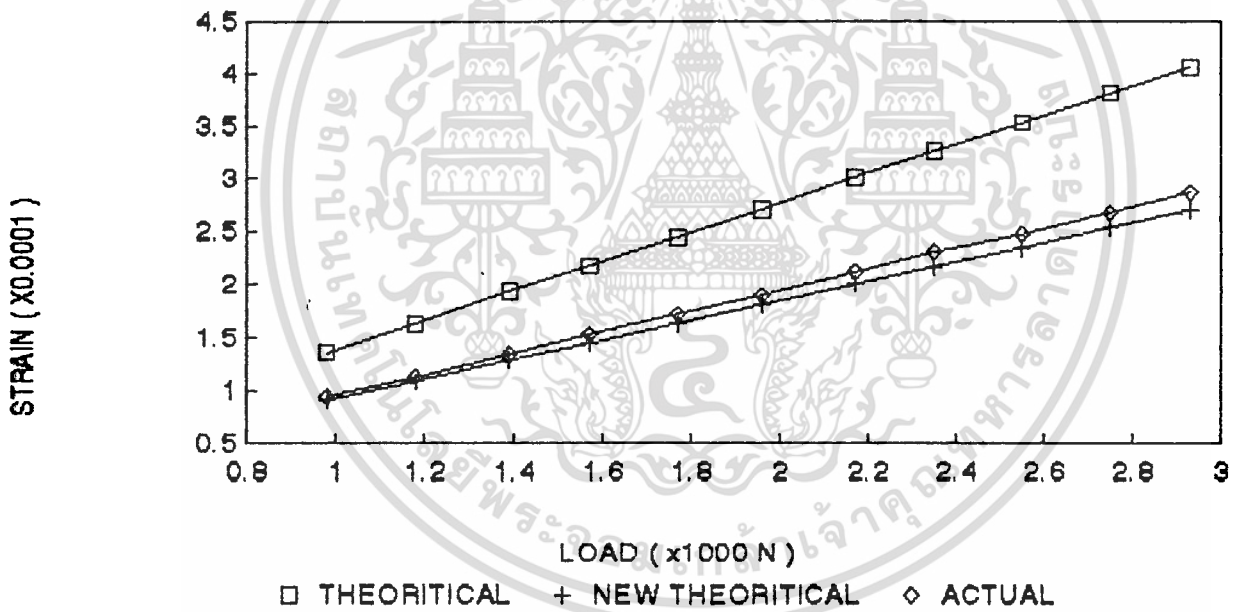
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STRESS ( $\times 10 \text{ N/mm}^2$ )	THEORITICAL STRAIN ( $\times 0.0001$ )	ACTUAL STRAIN ( $\times 0.0001$ )
2.81	1.36	0.94
3.38	1.63	1.13
4.01	1.94	1.34
4.51	2.18	1.53
5.06	2.45	1.72
5.61	2.71	1.9
6.23	3.01	2.12
6.75	3.26	2.31
7.29	3.53	2.48
7.89	3.81	2.68
8.41	4.06	2.87



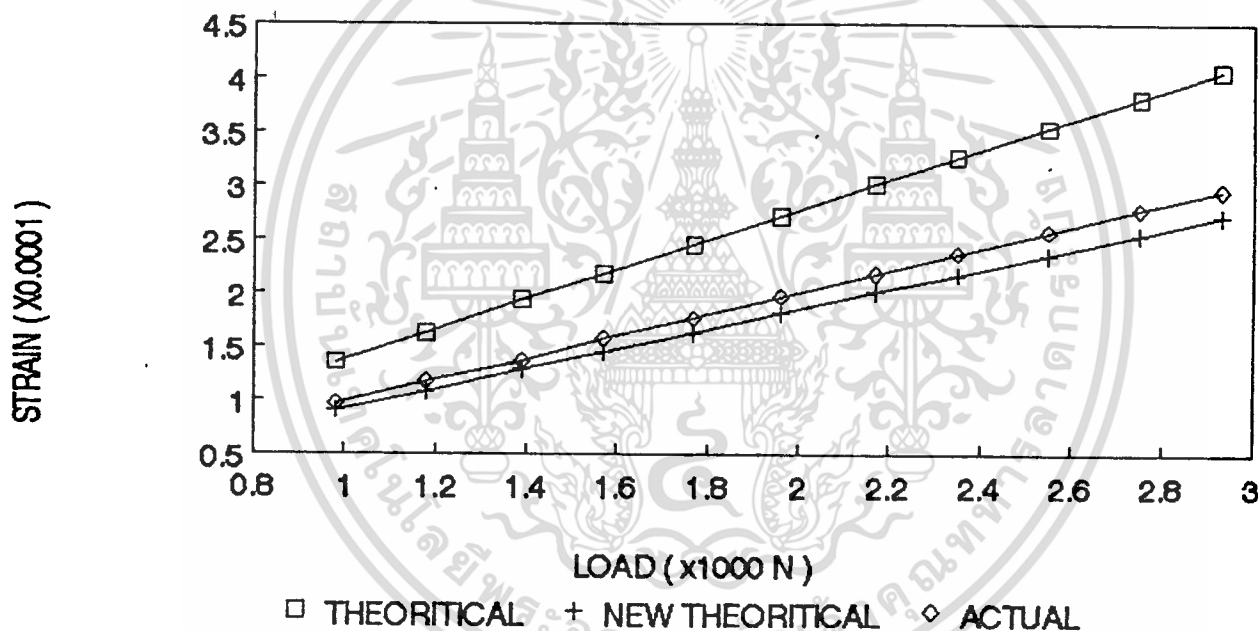
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOAD (x1000 N)	THEORITICAL STRAIN E=207000 (x0.0001)	NEW THEORITICAL STRAIN E=817000 (x0.0001)	ACTUAL STRAIN (x0.0001)
0.98	1.36	0.91	0.94
1.18	1.69	1.08	1.13
1.39	1.94	1.29	1.34
1.57	2.18	1.45	1.53
1.77	2.45	1.63	1.72
1.96	2.71	1.81	1.9
2.17	3.01	2.01	2.12
2.35	3.26	2.17	2.31
2.55	3.53	2.35	2.48
2.75	3.81	2.54	2.68
2.93	4.06	2.71	2.87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOAD (x1000 N)	THEORITICAL STRAIN E=207000 (x0.0001)	NEW THEORITICAL STRAIN E=311000 (x0.0001)	ACTUAL STRAIN (x0.0001)
0.98	1.36	0.91	0.97
1.18	1.63	1.08	1.18
1.39	1.94	1.29	1.37
1.57	2.18	1.45	1.58
1.77	2.45	1.63	1.76
1.96	2.71	1.81	1.97
2.17	3.01	2.01	2.18
2.35	3.26	2.17	2.37
2.55	3.53	2.35	2.57
2.75	3.81	2.54	2.77
2.93	4.06	2.71	2.95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปและวิเคราะห์

จากการศึกษาทฤษฎีที่ผ่านมา เราสามารถคำนวณหาค่าขนาดของ thick ring ที่ต้องใช้ได้ คือมีขนาดรัศมีในเท่ากับ 12.5 mm และรัศมีภายนอกเท่ากับ 22.5 mm ซึ่งจากการคำนวณจากสูตรของ Distortion Energy Theory

$$(6_1 - 6_2)^2 + (6_2 - 6_3)^2 + (6_1 - 6_3)^2 = 26 \nu \cdot \sigma^2$$

โดยจากการคำนวณ  $6_3$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จึงคิดว่า  $6_3$  มีค่าเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$6_1^2 - 6_1 6_2 + 6_2^2 = 6 \nu \cdot \sigma^2$$

ซึ่งค่า  $6 \nu \cdot \sigma^2$  นั้นสามารถหาได้จากการทดลองดึงขึ้นทดสอบโดยใช้วัสดุเดียวกับที่ใช้ทำวงแหวน ซึ่งจากการทดลองจะได้ค่าเท่ากับ 5000 kgf เมื่อนำไปแทนค่าในสูตรด้านบน จะได้ว่าวงแหวนนี้สามารถรับแรงได้สูงสุดประมาณ 5000 kgf โดยไม่บอบสลาย (อยู่ในช่วงยืดหยุ่น) เมื่อนำขนาดที่ได้นี้มาทำชิ้นงานจริง และนำไปทดสอบแรงกดโดยใช้แรงตามที่กำหนดไว้ปรากฏว่า thick ring ไม่เสียหาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ขนาดที่ได้ทำการคำนวณมานั้น สามารถนำมาทดสอบได้จริง

จากการคำนวณที่ได้ทำมาแล้วนั้น จะเห็นได้หาค่าของ strain จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมที่แรงกระทำเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสูงสุดที่ 90 องศา ดังนั้นจึงเลือกติด strain gage ที่มุม 90 องศา และทำการวัดค่า static strain โดยทำการเปลี่ยนค่าแรงที่กระทำกับ thick ring จาก 1000-3000 N ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากทางทฤษฎี จากตารางที่ 1 เราจะเห็นได้หาค่าของ strain ที่ได้ มีค่าแตกต่างกันมาก ทั้งนี้อาจวิเคราะห์ได้ว่าเกิดจากค่า E (Modulus of Elasticity) ของเหล็กมีช่วงที่กว้างมาก แต่ในทางทฤษฎีเราเลือกใช้ค่า E = 207000 N/mm<sup>2</sup> ดังนั้น จึงได้ทำการหาค่า E ของเหล็กที่ใช้ทำ specimen โดยหาจากกราฟระหว่าง stress และ strain ซึ่งจะได้ค่า E ใหม่ประมาณ 311000 N/mm<sup>2</sup>

เมื่อนำค่า  $E$  ที่ได้ใหม่นี้ไปคำนวณทางทฤษฎีใหม่อีกครั้งหนึ่ง จะได้ค่าดังตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากทางทฤษฎีใหม่นี้ มีผลใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า เราสามารถนำทฤษฎีของ curve beam ที่ถูกแรงกระทำที่ปลายด้านหนึ่งมาใช้กับ thick ring ในการทดลองนี้ได้



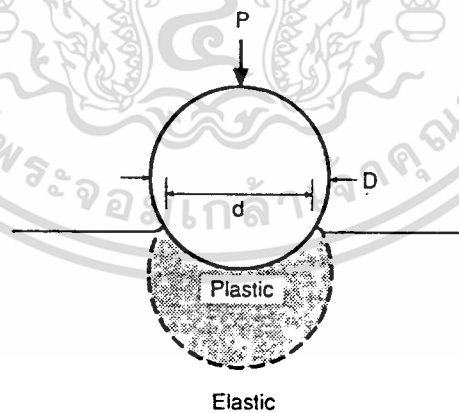
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น, อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## HARDNESS TEST

### ทฤษฎีและหลักการ

สำหรับเรื่องความแข็งของวัสดุนั้นสามารถอธิบายได้ในหลายๆ ความหมายขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของแต่ละคน โดยทั่วไป มักจะกล่าวว่าความแข็งแสดงถึงความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป และสำหรับโลหะความแข็งจะวัดได้จากคุณสมบัติของความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องกับทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ มักจะมองว่าความแข็งหมายถึงความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย (Indentation) และสำหรับวิศวกรออกแบบมักจะหมายถึงค่าที่วัดได้ง่ายและบ่งบอกถึงปริมาณซึ่งแสดงถึงบางสิ่งเกี่ยวกับความแข็งแรง และปฏิบัติการทางความร้อน (Heat treatment) ของวัสดุ

แต่โดยทั่วไปในทางวิศวกรรม ความแข็งมักจะใช้ในความหมายของความต้านทานของวัสดุต่อการกดให้เป็นรอย (Indentation) การกดให้เป็นรอยในที่นี้หมายถึง การกดของลูกกลมแข็งหรือจุด ที่กระทบเนื้อวัสดุด้วยแรงที่ทราบค่าและทำให้เกิดเป็นรอยขึ้น การกดให้เป็นรอยนี้เป็นผลจากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรข้างใต้หัวกดตั้งรูป



รูปที่ 1 Plastic deformation under a Brinell hardness indenter

คุณสมบัติพิเศษบางประการของการกดให้เป็นรอย เช่น ขนาดและความลึกจะถูกนำไปใช้ในการวัดความแข็งใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีหลายวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบความแข็งของวัสดุ ค่าจากการทดสอบเหล่านี้จะสัมพันธ์กับค่า Tensile และ Yield strength ของวัสดุ วิธีที่นิยมใช้ได้แก่ การวัดความต้านทานต่อการทะลุเข้าไปในเนื้อของวัสดุ ขั้นตอนการวัดโดยทั่วไปเริ่มจากการกดหัวกดลงไปที่ผิวหน้าของชิ้นงานและคำนวณค่าจากการทะลุลงไปที่ของหัวกด ส่วนแบบอื่นๆของการทดสอบความแข็งขึ้นอยู่กับค่า Elasticity ของวัสดุ เช่นวิธี scratching, abrasion, or cutting of materials

แต่โดยทั่วไป เราสามารถจะแบ่งวิธีวัดค่าความแข็งออกเป็น 3 วิธีใหญ่ๆ ได้แก่

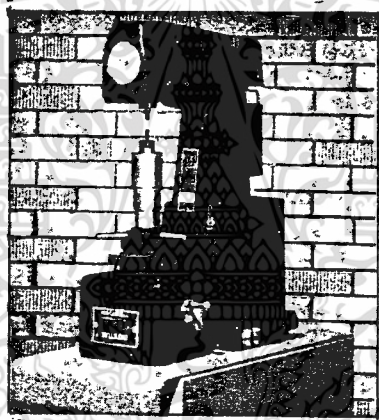
- (1) Scratch Hardness Test
- (2) Indentation Hardness Test
- (3) Rebound , or Dynamic Hardness Test

แต่แบบที่เป็นที่สนใจด้านโลหะทางวิศวกรรมมากที่สุดคือ แบบ Indentation Hardness Test สำหรับแบบอื่นๆ คือ Scratch Hardness Test มักจะใช้ในการหาความแข็งของแร่ต่างๆ โดยวัดในหน่วยของ Mohs' scale และสำหรับแบบ Rebound or Dynamic Hardness Test จะวัดความแข็งโดยให้หัวกดตกลงบนผิวหน้าของชิ้นงาน และความแข็งจะแสดงออกมาในรูปของพลังงานจากการกระแทก ตัวอย่างเช่นการใช้ Shore scleroscope วัดค่าความแข็งในเทอมของความสูงของการสะท้อนกลับของหัวกด

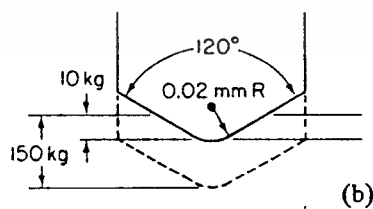
สำหรับแบบ Indentation Hardness Test นี้ ยังแบ่งออกไปได้อีกหลายวิธีด้วยกัน เช่น แบบ Brinell Hardness test, Meyer Hardness Test, Rockwell Hardness Test, Vicker Hardness Test ฯลฯ ซึ่งแบบที่เราเลือกใช้ในการทดลองนี้คือแบบ Rockwell Hardness Test

### Rockwell Hardness Test

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในสหรัฐอเมริกา โดยทั่วไปการยอมรับจะขึ้นอยู่กับความเร็ว และความเป็นอิสระจากความผิดพลาดของบุคคล การทดสอบแบบนี้สามารถแยกความแตกต่างแม้เพียงเล็กน้อยของค่าความแข็งในเหล็กชุบแข็ง (Hardened steel) และขนาดของรอยที่เกิดจากการกดมีขนาดเล็ก ดังนั้น ชิ้นงานที่ผ่านปฏิบัติการทางความร้อนมาแล้ว (finished heat-treated part) สามารถนำมาทำการทดสอบได้โดยไม่เกิดการบวมสลาย การทดสอบโดยวิธีนี้ใช้ประโยชน์จากความลึกของรอยกดภายใต้แรงคงที่ (constant load) ดังรูป



การทดสอบนี้ทำโดยการวัดขนาดความลึกของการกดให้เป็นรอยของหัวกด ดังรูป

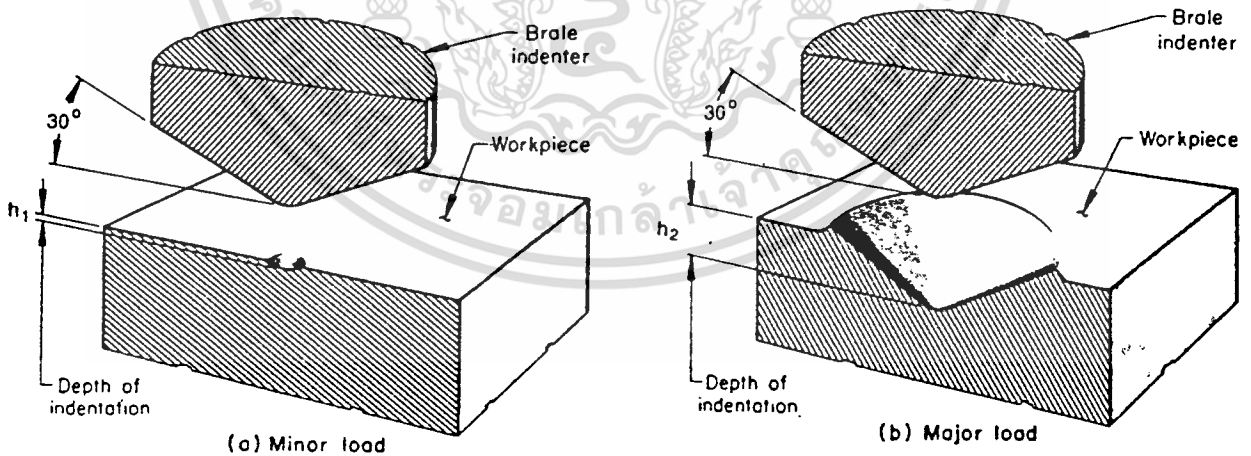


หัวกด (Indenter) ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นหัวเพชร หรือลูกกลมโลหะที่ทำจากเหล็กกล้า (diamond point or a steel ball) หัวเพชรที่ใช้กดเรียกว่า Brale Indenter มีลักษณะเป็นรูปกรวย (cone) ทำมุม 120° ให้ และตรงปลายมน ส่วนแบบลูกกลมจะมีขนาดอยู่ระหว่าง 1.6 mm ถึง 12.7 mm ชิ้นงานจะถูกยกขึ้นจนสัมผัส

กับหัวกด แรงที่กดจะเริ่มต้นจาก 10 kg เมื่อแรงเริ่มกระทำกับชิ้นงาน เข็มชี้ (indicator needle) จะบันทึกค่าศูนย์เอาไว้ แรงจะถูกปล่อยออก แรง 10 kg ที่กระทำตอนแรกนี้เป็นค่าที่น้อยที่สุดในการเตรียมการกดลงไปของหัวกด จากนั้นแรงหลักจะเริ่มกระทำและค่าความลึกของการกดนี้จะถูกบันทึกไว้โดยอัลติโนมิตบนหน้าปัด (dial gage) ในเทอมของ Rockwell Hardness Number และ Rockwell Hardness Number จะมีผลต่อการกดของแรงหลักเท่านั้น



รูปที่ 2 รอยที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังจากถูกกด



(a) Minor load

(b) Major load

รูปที่ 3 การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell  
(a) the minor load , (b) the major load  
ภายใต้หัวกดแบบ Diamond Brale Indicator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการกดและค่าความแข็ง กล่าวคือ ถ้านำวัสดุอ่อนมาทดสอบ ความลึกจากการกดจะมีค่ามากกว่าวัสดุแข็ง และถ้าอ่านค่า Rockwell Number ได้สูง แสดงว่าวัสดุที่นำมาทดสอบมีค่าความแข็งสูง เนื่องจากวัสดุที่นำมาทดสอบอยู่ในช่วงที่กว้าง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมี Rockwell scales หลายๆ ขนาด และมีสัญลักษณ์ต่างๆ กันไป ขนาด, ชนิดของหัวกด, และแรงที่ใช้ จะถูกกำหนดดังในตาราง

ตารางที่ 1 COMMONLY USED ROCKWELL HARDNESS SCALES

Symbol, <i>H R X</i> X =	Penetrator Diameter if Ball, mm (in)	Load kg	Typical Application
A	Diamond point	60	Tool materials
D	Diamond point	100	Cast irons, sheet steels
C	Diamond point	150	Steels, hard cast irons, Ti alloys
B	1.588 (0.0625)	100	Soft steels, Cu and Al alloys
E	3.175 (0.125)	100	Al and Mg alloys, other soft metals; reinforced polymers
M	6.35 (0.250)	100	Very soft metals; high modulus polymers
R	12.70 (0.500)	60	Very soft metals; low modulus polymer

Rockwell Hardness scale แต่ละอันจะมีค่าใช้งานสูงสุดแบ่งได้เป็น 100 ส่วน ค่าที่เพิ่มขึ้นแต่ละค่าจะหมายถึง การลดลงของการทะลุเข้าไปในเนื้อของชิ้นงาน 0.002 mm (0.000080 in) ดังนั้น Hardness Number เท่ากับ รังที่มีการนำไปใช้

$$H R X = M - (\Delta h / 0.002)$$

เมื่อ  $\Delta h = h_2 - h_1$  ในหน่วยของมิลลิเมตร และ  $M$  เป็นขีดจำกัดสูงสุดของสเกล สำหรับ Rockwell Hardness ,  $M = 100$  สำหรับทุกๆ สเกลที่ใช้ Diamond point (A, C, และ D scales) และ  $M = 130$  สำหรับสเกลที่ใช้ Ball indener (B, E, M, R, etc., scale)

ค่าความแข็ง (Hardness Number) ใช้สัญลักษณ์ HRX โดย X เป็นตัวชี้ขนาดตัวอย่างเช่น 60 HRC สำหรับ 60 จุด บน C สเกล แต่มีข้อสังเกตคือ Rockwell Hardness Number จะไม่มีความหมายเลยถ้าไม่มีตัวบอกขนาดสเกลกำกับมาด้วย

ในทางปฏิบัติ ค่าความแข็งจะสามารถอ่านได้โดยตรงจากหน้าปัดบนเครื่องทดสอบ ไม่จำเป็นต้องนำไปคำนวณอีก

ข้อปฏิบัติในการทดสอบความแข็ง

1. หัวกดและที่วางชิ้นงานควรจะสะอาดและอยู่ในสภาพดี
2. ผิวหน้าของชิ้นงานควรจะสะอาด, แห้ง, เรียบ และไม่เป็นสนิม แต่สำหรับผิวหยาบก็พอจะทดสอบด้วยวิธีนี้ได้เช่นกัน
3. ผิวหน้าของชิ้นงานควรแบนและตั้งฉากกับหัวกด
4. การทดสอบบนผิวทรงกระบอกจะให้ค่าที่ต่ำกว่า ค่าผิดพลาดขึ้นอยู่กับความโค้งของผิว, โหลด, หัวกด, และความแข็งของวัสดุ
5. ความหนาของชิ้นทดสอบต้องไม่บางจนเกินไป ค่าที่แนะนำคือไม่ต่ำกว่า 10 เท่าของความลึกของหัวกด เพราะถ้าชิ้นทดสอบบางจนเกินไปจะทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่ใช่ค่าที่แท้จริงของชิ้นทดสอบแต่กลายเป็นค่าความแข็งของที่วางชิ้นงานแทน และการทดสอบควรจะทำกับชิ้นงานที่มีความหนาเพียงค่าเดียวเท่านั้น
6. ช่องว่างระหว่างการกดควรจะเป็น 3-5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของการกด
7. ความเร็วของการใส่แรงควรจะเป็นตามมาตรฐาน ซึ่งทำได้โดยการปรับ deshpot บนเครื่องทดสอบแบบ Rockwell เนื่องจากเครื่องทดสอบใช้วัดความแข็งได้หลายค่าตั้งแต่วัสดุที่อ่อนไปจนถึงแข็ง ดังนั้นในการปรับจะต้องทำอย่างระมัดระวัง และระหว่างการทดสอบเมื่อแรงหลักกระทำกับชิ้นทดสอบ และอ่านค่าความแข็งแล้วควรเอาชิ้นทดสอบลงทันที (ในกรณีเป็นการทำงานด้วยมือ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ความสัมพันธ์ที่ได้จากการวัดความแข็งกับค่า Tensile stress

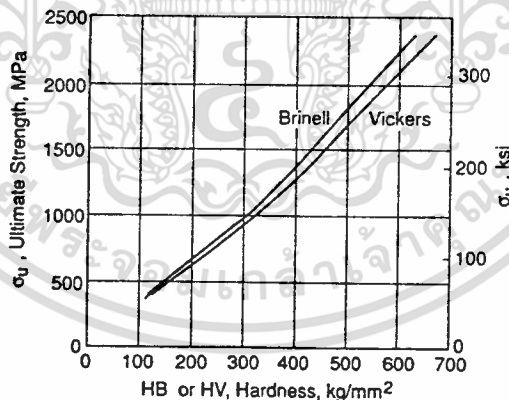
การเปลี่ยนรูป (Deformation) ในผิววัสดุที่เกิดจากห้วงตในการวัดความแข็ง อาจเทียบได้กับขนาดของ Tensile strength ในการทดสอบแรงดึง แต่อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างที่สำคัญได้แก่การที่วัสดุไม่สามารถหมุนได้อย่างอิสระ ดังนั้น จะเกิดความเค้นในแนวแกนทั้ง 3 แกน ภายใต้การกด และจากการสังเกตสามารถตั้งความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและคุณสมบัติด้านแรงดึงพื้นฐานคือ Ultimate tensile strength  $\sigma_u$

ตัวอย่างเช่น สำหรับโลหะผสมคาร์บอนที่มีค่าความแข็งต่ำและปานกลาง ค่า  $\sigma_u$  สามารถประมาณได้จากการทดสอบแบบ Brinell hardness ดังนี้คือ

$$\sigma_u = 3.45(\text{HB}) \text{ MPa}$$

$$\sigma_u = 0.50(\text{HB}) \text{ ksi}$$

จะเห็นได้ว่าจากสมการข้างต้นสามารถนำไปเขียนเป็นกราฟได้ดังรูป



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\sigma_u$  ของโลหะผสมคาร์บอน กับ Brinell และ Vicker hardness

อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้จากการปฏิบัตินี้พิจารณาอย่างกว้างๆ ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้จึงเป็นการประมาณอย่างหยาบๆ เท่านั้น สำหรับวัสดุอื่นๆ สัมประสิทธิ์หน้าสมการจะต้องเปลี่ยนไปและความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรง ในทำนองเดียวกัน ความสัมพันธ์เหล่านี้จะเปลี่ยนไปเมื่อวิธีการวัดค่าความแข็งเปลี่ยนไป

ตัวอย่างการประมาณค่า EQUIVALENT HARDNESS NUMBER และ ULTIMATE  
TENSILE STRENGTHS สำหรับ CARBON AND ALLOY STEEL

Brinell HB	Vickers HV	Rockwell		Ultimate, $\sigma_u$	
		HRB	HRC	MPa	ksi
627	667	-	58.7	2393	347
578	615	-	56.0	2158	313
534	569	-	53.5	1986	288
495	528	-	51.0	1813	263
461	491	-	48.5	1669	242
429	455	-	45.7	1517	220
401	425	-	43.1	1393	202
375	396	-	40.4	1267	184
341	360	-	36.6	1131	164
311	328	-	33.1	1027	149
277	292	-	28.8	924	134
241	253	100	22.8	800	116
217	228	96.4	-	724	105
197	207	92.8	-	655	95
179	188	89.0	-	600	87
159	167	83.9	-	538	78
143	150	78.6	-	490	71
131	137	74.2	-	448	65
116	122	67.6	-	400	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 จากการวัดค่าความแข็งครั้งที่ 1

รัศมี (mm)	ค่าความแข็ง (HRC)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
ผิวเรียบ	41.2	34.4	37.1	43.7	34.8
50	35.1	33.0	35.3	36.4	35.0
48	32.9	34.5	34.3	29.6	29.6
46	32.3	36.0	34.1	31.4	31.3
44	34.9	33.4	32.7	31.8	30.8
42	31.5	32.6	28.3	33.4	29.5
40	30.4	30.9	32.7	31.9	28.2
38	29.1	31.4	31.6	29.7	30.9
36	28.6	30.8	27.8	29.7	27.6
34	29.8	28.1	30.1	27.0	28.3
30	30.8	26.1	24.1	27.1	28.4
20	29.8	28.5	22.0	27.2	26.2
10	21.5	23.0	21.7	23.5	26.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 จากการวัดค่าความแข็งครั้งที่ 2

รัศมี (mm)	ค่าความแข็ง (HRC)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
ผิวเรียบ	39.4	37.9	37.2	37.5	36.4
50	33.9	37.1	35.1	31.8	34.0
48	31.5	33.3	29.3	32.1	27.7
46	30.3	30.6	28.2	31.1	33.8
44	31.9	30.5	32.0	30.9	30.8
42	30.5	30.5	27.8	28.2	27.2
40	30.5	29.8	29.4	27.8	27.2
38	28.5	28.9	27.0	28.2	28.7
36	25.9	33.7	27.8	28.3	27.8
34	26.9	25.0	27.2	29.6	30.1
30	28.5	22.4	24.5	32.0	30.5
20	30.5	24.5	28.1	27.2	24.2
10	22.1	26.5	26.5	25.2	28.2

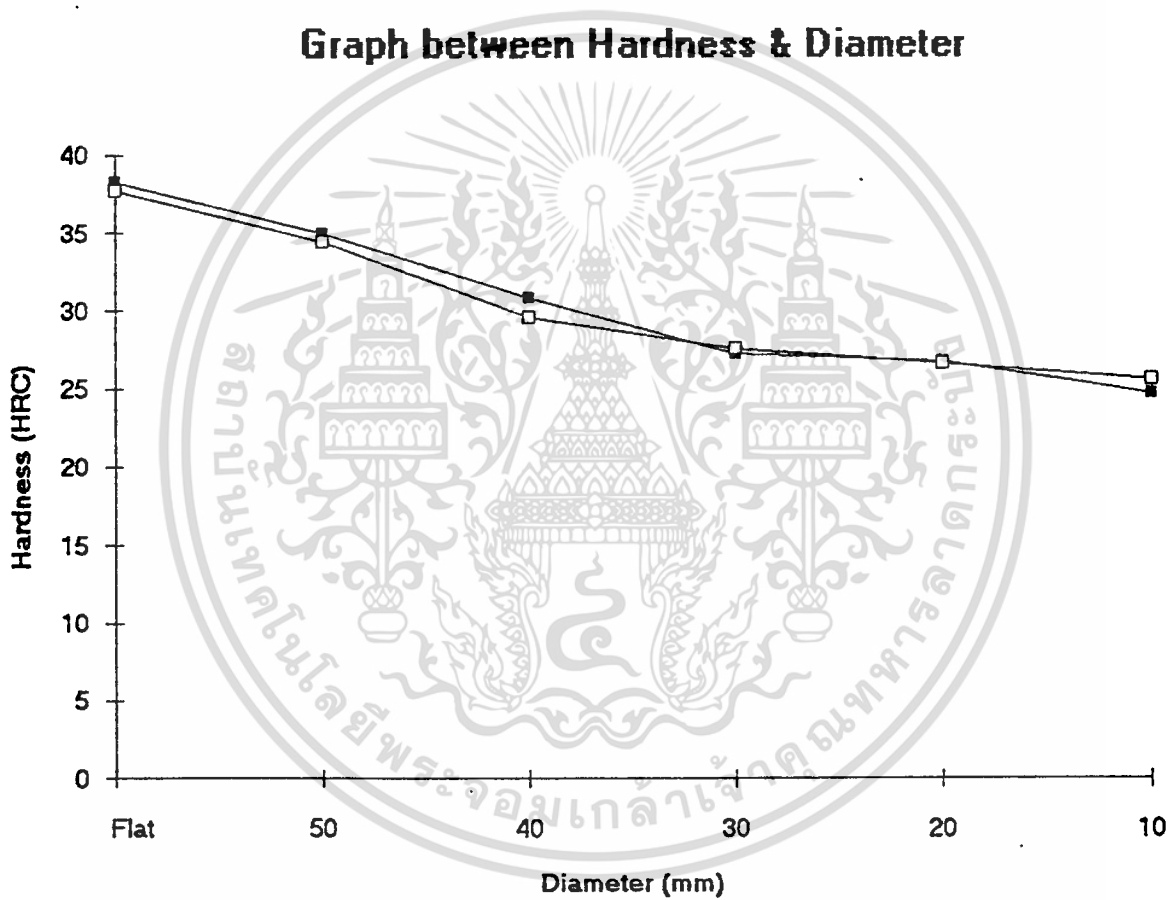
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ทั้งสองครั้งมาหาค่าเฉลี่ย

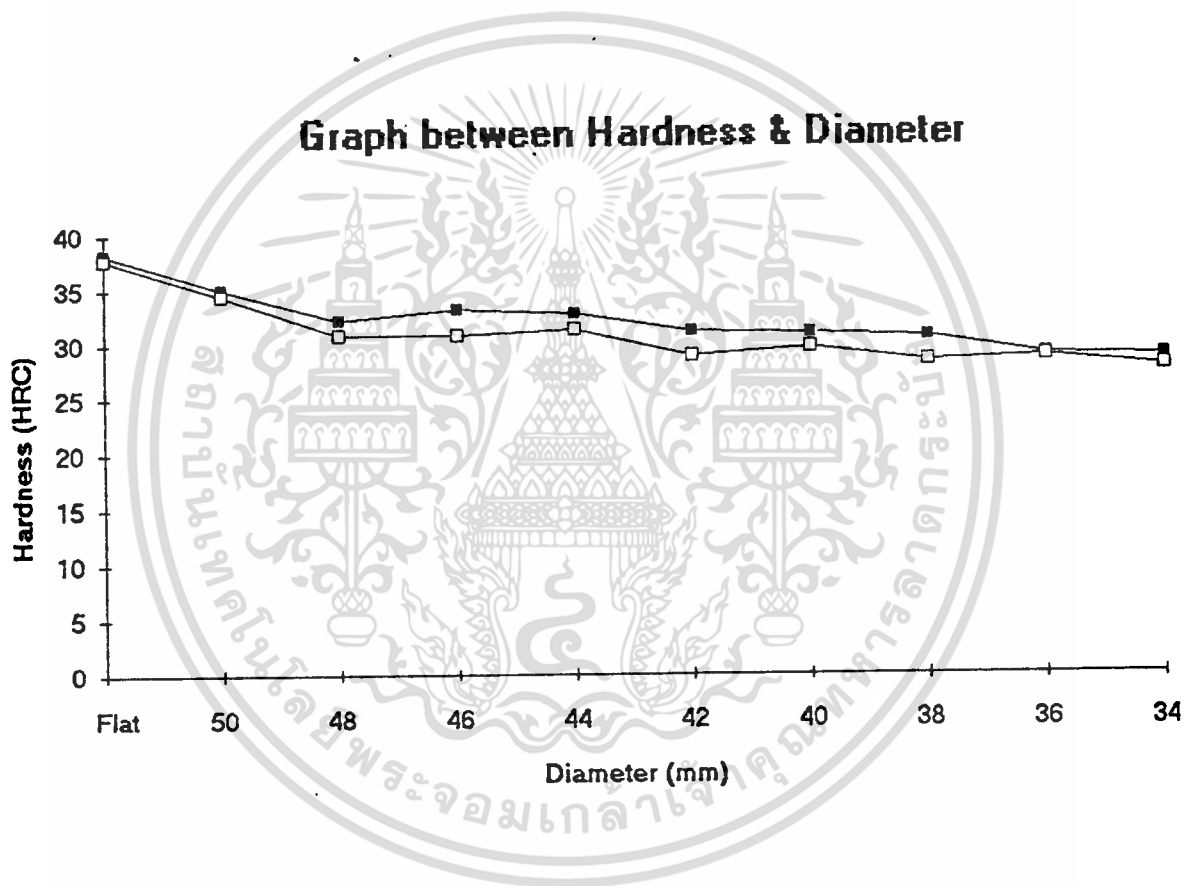
รัศมี (mm)	ค่าเฉลี่ยความแข็ง (HRC)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
ผิวเรียบ	38.24	37.68
50	34.95	34.38
48	32.18	30.78
46	33.08	30.80
44	32.74	31.22
42	31.06	28.84
40	30.82	29.54
38	30.54	28.26
36	28.90	28.70
34	28.66	27.76
30	27.22	27.52
20	26.74	26.60
10	24.64	25.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Graph between Hardness & Diameter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปและวิเคราะห์

จากทฤษฎีที่ได้ศึกษามาแล้วนั้น เราเลือกใช้หัวกดแบบ Diamond Point Scale C ที่ใช้ load 150 kg กดลงบนผิวของชิ้นทดสอบ จะได้ค่าความแข็งซึ่งอ่านได้จากเครื่องทดสอบทั้งที่เป็นผิวเรียบและที่เป็นทรงกระบอกรัศมีค่าต่างๆ ดังในตารางที่ 1 และ 2 เมื่อนำค่าที่วัดได้ทั้งสองครั้งมาหาค่าเฉลี่ยของความแข็งจะได้ค่าดังตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อรัศมีเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งที่ได้จะลดลง และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบบผิวเรียบจะเห็นว่า ผิวเรียบจะวัดค่าได้มากกว่าแบบผิวโค้งกว่าโดยใช้เหล็กชนิดเดียวกัน ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เนื่องจากการวัดความแข็งนี้ เราใช้หัวกดกดลงบนผิวของชิ้นทดสอบให้เป็นรอย ทำให้เกิด Plastic zone ขึ้น ภายในผิวของชิ้นทดสอบและเครื่องทดสอบจะวัดค่าความแข็ง โดยการแปลงจากค่าความลึกที่หัวกดกดลงไปบนผิวของชิ้นทดสอบ หรืออาจกล่าวได้ว่าความแข็งของชิ้นทดสอบ ก็คือค่าความต้านทานแรงกดนั่นเอง ซึ่งชิ้นทดสอบผิวเรียบเมื่อมีแรงกระทำกับผิวของชิ้นทดสอบ จะมีแรงเฉือนเกิดขึ้นที่รอบๆ หัวกด และมีแรงต้านเกิดขึ้นภายใต้หัวกด ดังรูป

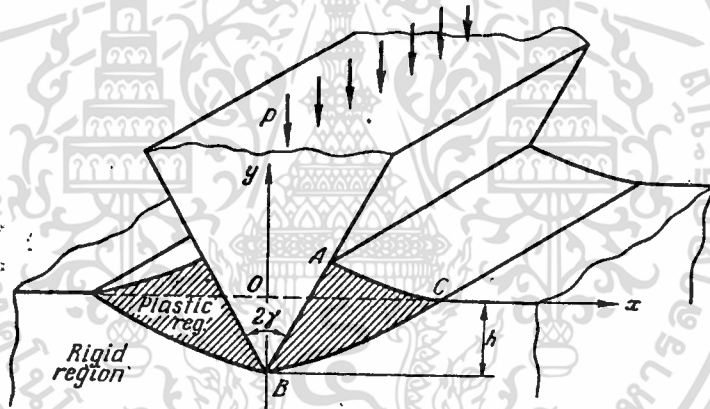


Fig. 147

แต่สำหรับชิ้นทดสอบผิวโค้งเมื่อมีแรงกดจะมีแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จากค่า stress ที่วัดได้จากผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ มีค่าเป็นบวก แสดงว่าที่ผิวนอกของชิ้นทดสอบมีค่า Tensile Stress อยู่ด้วย ซึ่งแรงดึงนี้จะเข้าไปช่วยเสริมแรงกดที่กระทำกับชิ้นทดสอบทำให้รอยกดลึกมากขึ้น เป็นผลให้ค่าความแข็งที่อ่านได้มีค่าน้อยลง

A CRACK IN A STRUCTURE

ทฤษฎีและหลักการ

พิจารณาโครงสร้างของวัสดุที่มี crack เมื่อมีแรงกระทำ เมื่อความยาวของ crack เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิด stress concentration มากขึ้น และจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การกระจายของ crack จะมากขึ้นด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่า crack เป็นฟังก์ชันของเวลา และ crack จะทำให้ความแข็งแรงต่ำลงเมื่อเทียบโครงสร้างที่ไม่มี crack และเมื่อขนาดของ crack เพิ่มขึ้น จะยิ่งทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลงตามลำดับ ดังรูป

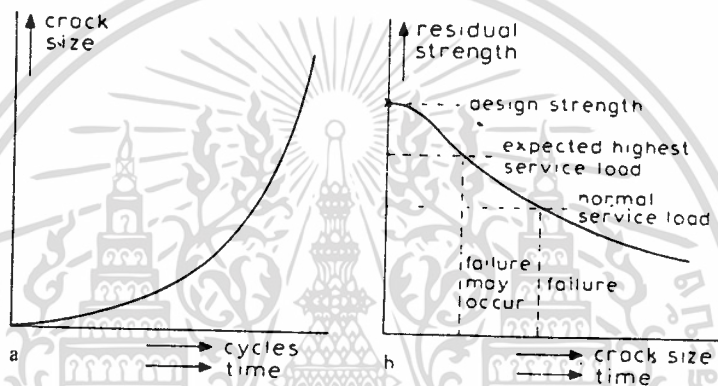


Figure 1.1. The engineering problem  
a. Crack growth curve; b. Residual strength curve

รอยแตก (crack) ในของแข็ง (solid) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังรูป

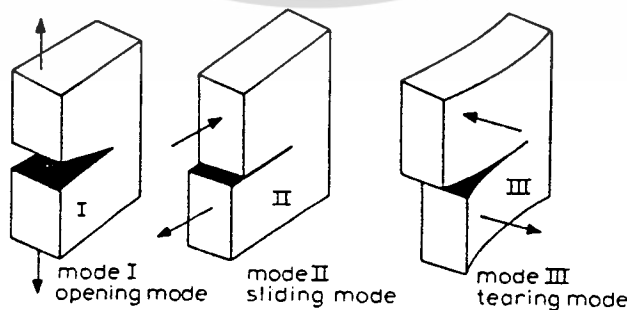


Figure 1.3. The three modes of loading

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ Opening mode หรือ Mode I ระยะทางของพื้นผิวที่เกิดรอยแตกจะตั้งฉากกับระนาบของรอยแตก Mode II จะเกิด Plain strain หรือที่เรียกว่า Sliding mode ระยะทางของพื้นผิวรอยแตกจะอยู่ในระนาบเดียวกับรอยแตกและตั้งฉากกับขอบของรอยแตก Mode III หรือ tearing mode เกิดจากแรงเฉือนที่มีทิศทางที่ไม่อยู่ในระนาบ ระยะทางของพื้นผิวที่เกิดรอยแตกจะอยู่ในระนาบของรอยแตกและตั้งฉากกับขอบของรอยแตก Mode I คือแบบที่มีความสำคัญทางเทคนิคมากที่สุด และการอธิบายต่างๆ ต่อไปนี้เป็นเรื่องของ Mode I

ช่วงของความเค้นที่อยู่ในช่วงยืดหยุ่นของ Mode I สามารถคำนวณได้หลายวิธี พิจารณาความหนาของรอยแตกที่รูปร่างใดๆ มีความหนา  $a$  มีแรงกระทำในพิภด ดังรูป

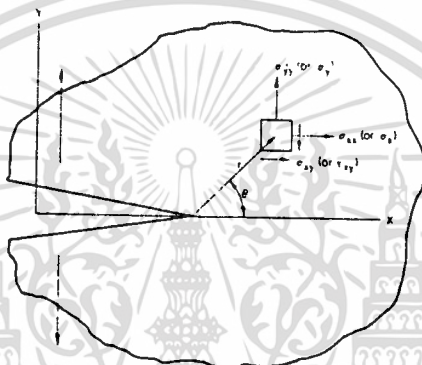


Figure 1.4. Crack in arbitrary body

จะได้ว่า

$$\sigma_{1,1} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{1,1}(\theta) \tag{1}$$

เมื่อ  $\sigma_{1,1}$  เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเล็กๆ  $dx dy$  ที่ระยะทาง  $r$  จากรอยแยก และที่มุม  $\theta$  จากระยะทางรอยแตก  
 $f_{1,1}(\theta)$  เป็นฟังก์ชันของ  $\theta$   
 $K_I$  ไม่สามารถกำหนดแน่นอนได้เนื่องจากรูปร่างและแรงที่มากระทำทำมีทิศทางที่ไม่แน่นอน  
 ค่า  $K_I$  นี้เรียกว่า Stress intensity factor  
 ตัวห้อย I หมายถึง Mode I ในทำนองเดียวกัน เราใช้ค่า  $K_{II}$  และ  $K_{III}$  ที่ต่างออกไปเมื่อใช้ใน Mode อื่นๆ ในฟังก์ชันของ  $\theta$  ที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (1) ใช้สำหรับชั้นทดสอบที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งสามารถประยุกต์ให้เข้ากับรูปร่างแบบอื่นๆ ได้ พิจารณาระนาบแผ่นยาวไม่จำกัด ซึ่งรับแรงดึงสม่ำเสมอ โดยมีรอยแตกเท่ากับ  $2a$  ดังรูป

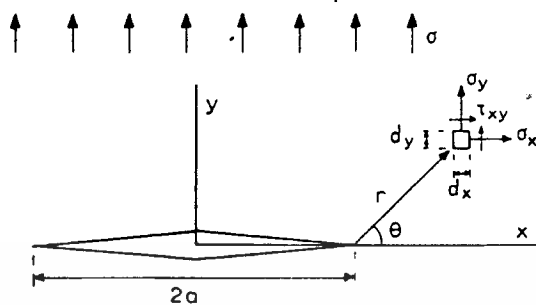


Figure 1.5. Crack in an infinite plate

รูปแบบพื้นฐานก็ยังใช้เหมือนกับรอยแตกที่เท่ากับ  $a$  และสมการพื้นฐานทั้งหมดก็ยัง มีรูปแบบเหมือนสมการที่ (1)

สำหรับการนำสมการที่ (1) มาประยุกต์ใช้กับรูปด้านบนนั้น ต้องจำไว้ว่า เงามันต่างๆ ในสมการมีมิติของความเค้นและฟังก์ชัน  $f(\theta)$  ไม่มีหน่วย ดังนั้น  $K/\sqrt{2\pi r}$  ต้องมีมิติเดียวกับความเค้นหรือค่า  $K_I$  จะมีมิติของความเค้นคูณกับ square root ของความยาว ค่าความเค้นที่นิยามในปัญหานี้คือ ค่า stress  $\sigma$  และความยาวคือ  $a$  ดังนั้น stress intensity factor มีค่าดังนี้

$$K_I = \sigma\sqrt{2\pi a} \tag{2}$$

โดย  $\beta = \sqrt{2\pi}$  จะได้

$$K_I = \beta\sigma\sqrt{a} \tag{3}$$

และสำหรับการพิจารณาอื่นๆ ก็ทำในทำนองเดียวกันขึ้นอยู่กับ factor ต่างๆ ที่กำหนด โดยมีสมการพื้นฐานคือ สมการที่ (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบรอยแตก (crack) สองอัน ซึ่งมีขนาดและรูปร่างต่างกัน แต่ใช้วัสดุชนิดเดียวกัน ความเค้นและรอยแตกในทั้งสองแบบจะเท่ากับ

$$K_{I,1} = \frac{K_{I,2}}{\sqrt{2\pi r}} f_{1,2}(\theta) \quad (4)$$

ถ้าความเข้มของความเค้น สำหรับทั้งสองกรณีเท่ากันแสดงว่า คุณสมบัติของทั้งสองมีความเหมือนกัน ดังนั้นอาจคาดหวังได้ว่า รอยแตกทั้งสองจะให้การตอบสนองที่เหมือนกัน เช่น ถ้ารอยแตกอันใดอันหนึ่งเริ่มแตก อีกอันหนึ่งก็จะเริ่มแตกด้วย เนื่องจากทั้งสองอยู่ภายใต้ crack tip stress อันเดียวกัน แต่เราไม่ทราบการตอบสนองที่เกิดขึ้นของรอยแตกเมื่อมีแรงมากกระทำ แต่สามารถหาได้จากคุณสมบัติของวัสดุ เช่น จากการทดสอบโดยกระทำบนวัสดุแผ่นเรียบ โดยให้มี crack ที่รูขนาดเท่ากับ  $2a$  แผ่นเรียบจะถูกดึงด้วยแรงที่สม่ำเสมอจนถึงจุดแตกหัก (break) ความเค้นของรอยแตกจะเป็นดังสมการ

$$K_{I,1} = \beta(a/L) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

ซึ่งให้ค่าของความเข้มของความเค้นที่เวลาที่เริ่มแตก ค่านี้จะเรียกว่า ค่าความเหนียวของวัสดุ (toughness) และเนื่องจากเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ดังนั้น รอยแตกต่างๆ ก็จะทำให้ค่าความเข้มของความเค้น (stress intensity) เหมือนกันด้วย ความเค้นของรอยแตกสามารถคำนวณได้ เนื่องจากรอยแตกจะเกิดเมื่อ stress intensity มีค่าเท่ากับค่าความเหนียวของวัสดุ

$$\text{toughness} = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

สำหรับค่า  $a$  และ  $\beta$  ที่ให้มา จะสามารถทำนายค่าความเค้นของรอยแตก (Fracture stress) ได้

การกระจายของความเค้น  $\sigma_y$  ในฟังก์ชันของ  $r$  ที่  $\theta = 0$  แสดงดังรูป

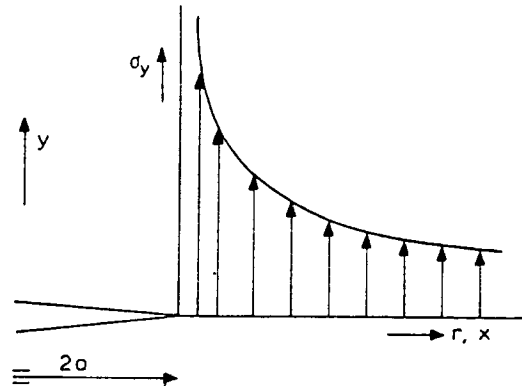


Figure 1.6. Elastic stress  $\sigma_r$  at the crack tip

สำหรับ  $r$  ที่มีค่าใหญ่ๆ  $\sigma_r$  จะเข้าใกล้ศูนย์

ถ้าเราใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นแถบ (bar) ที่อยู่ภายใต้ tensile stress สูงๆ วัสดุจะเกิดการยืดในทิศทางตามความยาว เนื่องจาก strain ตามยาว และ strain ในแนวทแยงจะเกิดขึ้น แถบชิ้นงานจะบางลง strain ในแนวทแยงคือ

$$e_T = \nu \epsilon / E = \nu e_L$$

ซึ่งหมายถึงมีขนาดประมาณ 1/3 ของ strain ตามยาว ( $\nu$  ประมาณเท่ากับ 0.33)

ที่ยอดของรอยแตก ความเค้นจะมีค่าสูง ดังรูป

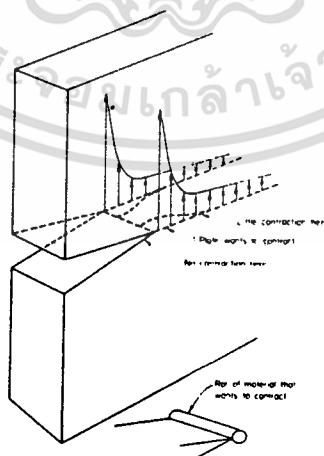


Figure 1.8. Contraction at crack tip

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

strain ในแนวแยง (z-direction) จะเกิดขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งใน Plastic zone อย่างไรก็ตาม ด้านหลังของรอยแตกที่พื้นผิวรอยแตก ความเค้นจะเป็นอิสระ ดังนั้น จะไม่มี strain ในแนวแยงด้วย สำหรับส่วนที่อยู่ห่างจากรอยแตก ความเค้นจะน้อยลงมากและชิ้นงานจะบางน้อยลง

พิจารณาชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง (thin plate) ในทำนองเดียวกับ thick plate ดังรูป

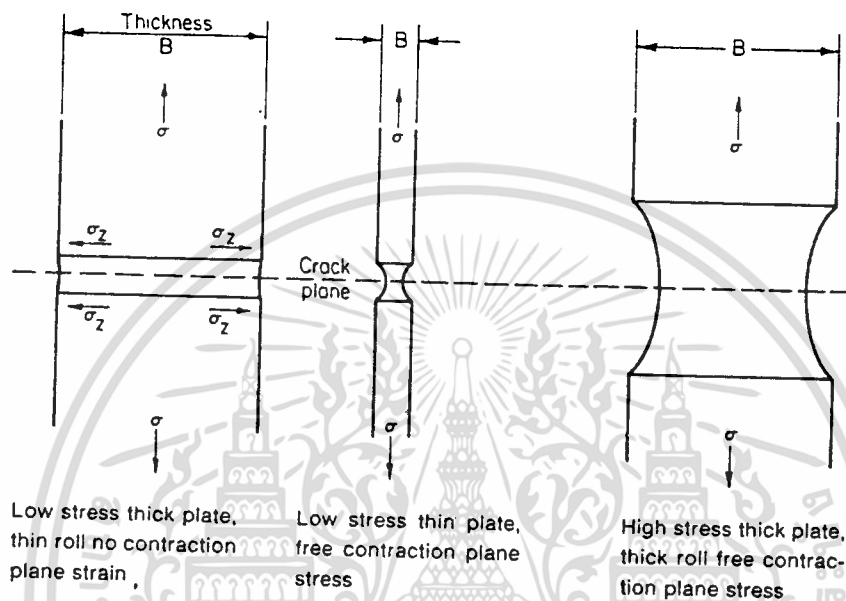


Figure 1.9. Plane strain (left), plane stress (center, and right)

แผ่นบางมีขนาดรอยแตกเหมือนกันและอยู่ภายใต้ความเค้นเดียวกัน stress intensity จะคล้ายกับแบบ thick plate ที่ได้กล่าวมาแล้วด้วย

ดังนั้น

ต่อไปนี้เป็นตารางแสดงตัวอย่างของวัสดุต่างๆ ที่รอยแตกอยู่

	tensile strength			yield strength			fracture toughness $K_{Ic}$
	$\sigma_u$			$\sigma_{ys}$			
	MN/m <sup>2</sup>	kg/mm <sup>2</sup>	ksi	MN/m <sup>2</sup>	kg/mm <sup>2</sup>	ksi	
4340 steel	1820	185	264	1470	150	214	46 MN/m <sup>3/2</sup> = 150 kg/mm <sup>3/2</sup> = 42 ksi/in
Maraging 300 steel	1850	188	268	1730	177	250	90 MN/m <sup>3/2</sup> = 290 kg/mm <sup>3/2</sup> = 82 ksi/in
7075-T6 Al.alloy	560	57	81	500	51	73	32 MN/m <sup>3/2</sup> = 104 kg/mm <sup>3/2</sup> = 30 ksi/in

และนำค่าจากตารางมาเขียนกราฟได้ดังนี้

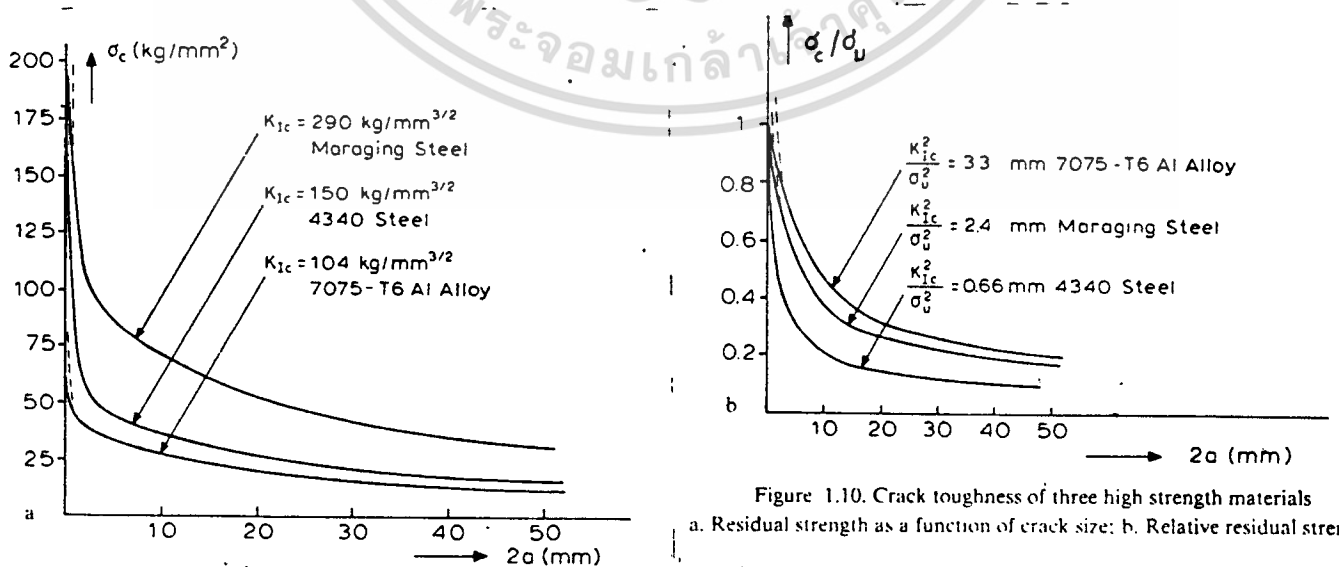


Figure 1.10. Crack toughness of three high strength materials  
a. Residual strength as a function of crack size; b. Relative residual strength

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ ความแข็งแรงที่เหลืออยู่ของวัสดุทั้ง 3 ถูกวาดในฟังก์ชันของความยาวของรอยแตก (crack length) กราฟนี้เป็นไปตาม  $\sigma_c = K_{Ic} / \sqrt{\pi a}$  จะเห็นได้ว่า  $\sigma_c$  มีค่าไม่สิ้นสุดเมื่อ  $a$  เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแท้ที่จริงแล้ว กราฟควรจะเป็นแบบ  $\sigma_c = \sigma_u$  ที่  $a = 0$  และจะเห็นได้ว่า วัสดุที่มีค่าความเหนียวสูงจะมีค่าความแข็งแรงที่เหลืออยู่สูงด้วย ถ้าความแข็งแรงของรอยแตกถูกวาดในรูปของรอยแตกที่เริ่มต้น (crack free), ความแข็งแรง,  $\sigma_c / \sigma_u$ . รูปที่ได้จะเปลี่ยนไปดังรูป

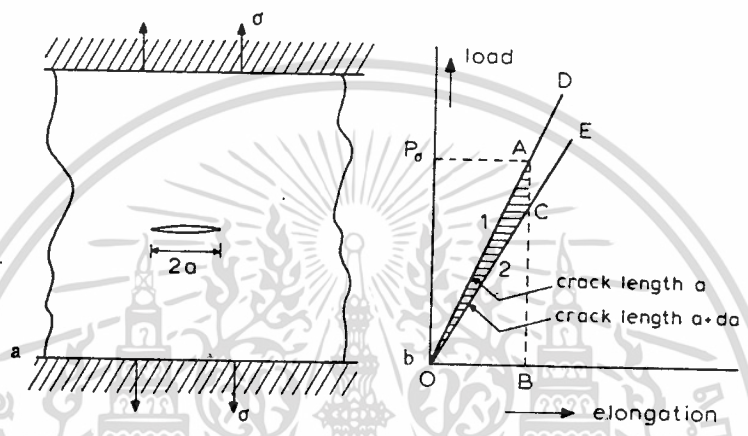
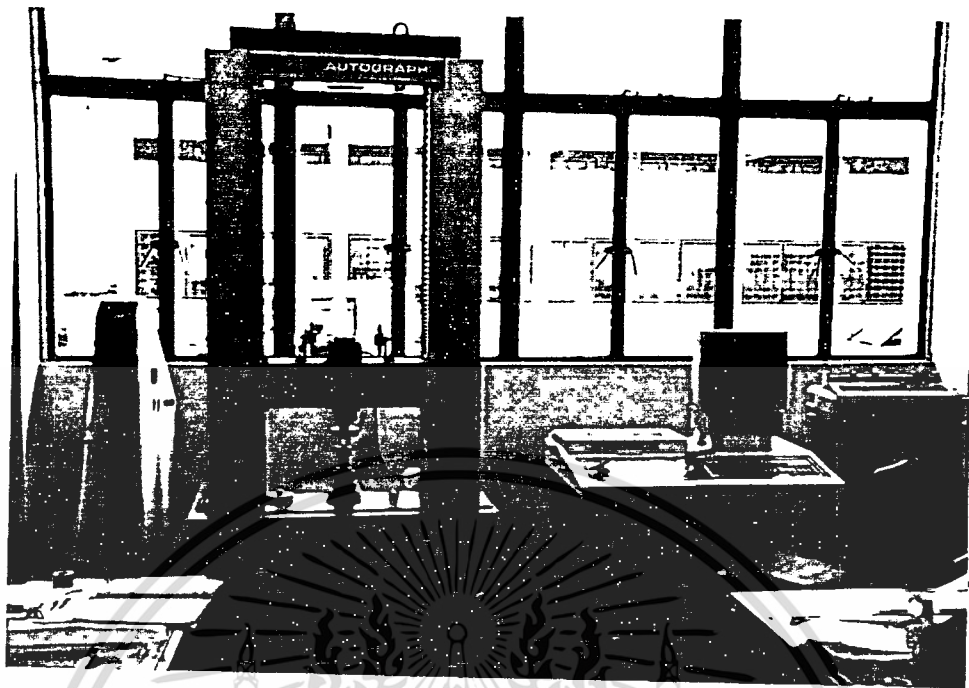


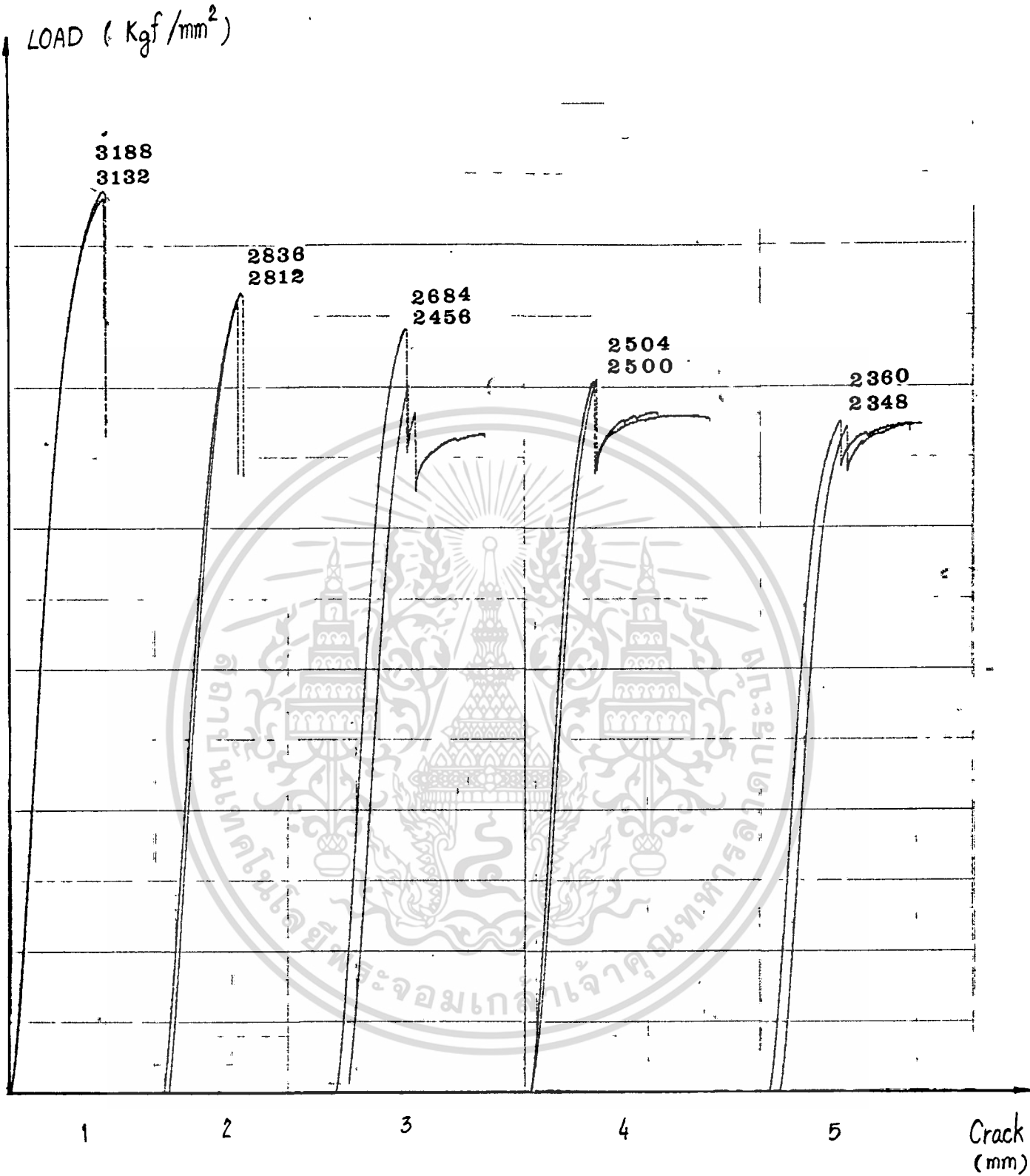
Figure 1.11. The Griffith criterion for fixed grips  
 a. Cracked plate with fixed ends; b. Elastic energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงชิ้นงานและวิธีทดลองเรื่อง crack

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

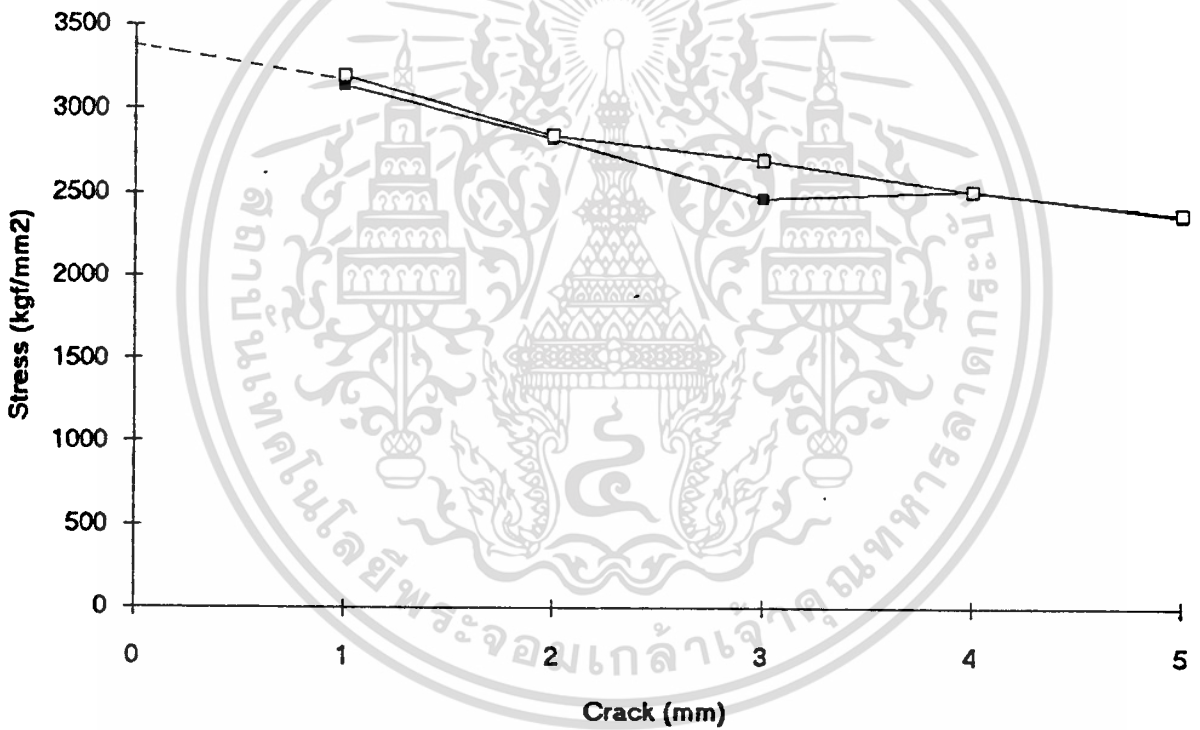
## ผลการทดลอง

จากการวัดค่า Stress เมื่อใช้แรงกดลงบนวงแหวนที่มี crack

crack (mm)	Stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	3132	3188
2	2812	2836
3	2456	2684
4	2504	2500
5	2348	2360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Graph between Crack & Stress



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปและวิเคราะห์ผล

จากกราฟที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่าเมื่อความลึกของรอยบากเพิ่มมากขึ้น ชิ้นงานจะรับแรงได้น้อยลงนั้นก็หมายถึง stress น้อยลง ซึ่งสรุปได้ว่า รอยบากมีผลต่อแรงกด หรือ stress ที่เกิดขึ้น ซึ่งค่า stress ที่ได้จากการทดลอง เป็นจุดที่ stress สูงสุดที่ทำให้เกิด crack ในรอยบาก เมื่อนำมาเขียนกราฟ (ดังกราฟระหว่างรอยบากและความเค้น) แล้วลากเส้นไปตัดกราฟที่แกน stress ที่จุดศูนย์ ซึ่งหมายความว่า ที่จุดศูนย์นี้เป็นจุดที่ thick ring ไม่มีรอยบาก จะได้ค่า stress ประมาณเท่ากับ 3300 kgf/mm<sup>2</sup> ซึ่งจะเห็นว่า ค่า stress ที่ได้มีต่ำกว่าค่า yield stress ที่เป็น ทั้งนี้เพราะว่า thick ring เกิด stress ขึ้นสองแกน คือ ในแนวแกน  $\sigma$  และ  $r$  ส่งผลให้ thick ring เกิดการแตกหักก่อนที่จะถึง yield point จุดที่เราลากเส้นต่อกราฟมาตัดกับแกน stress เป็นค่า  $\sigma_c$  ซึ่งจะนำค่านี้ไปคำนวณหาค่า stress intensity,  $K_I$  จากสูตร

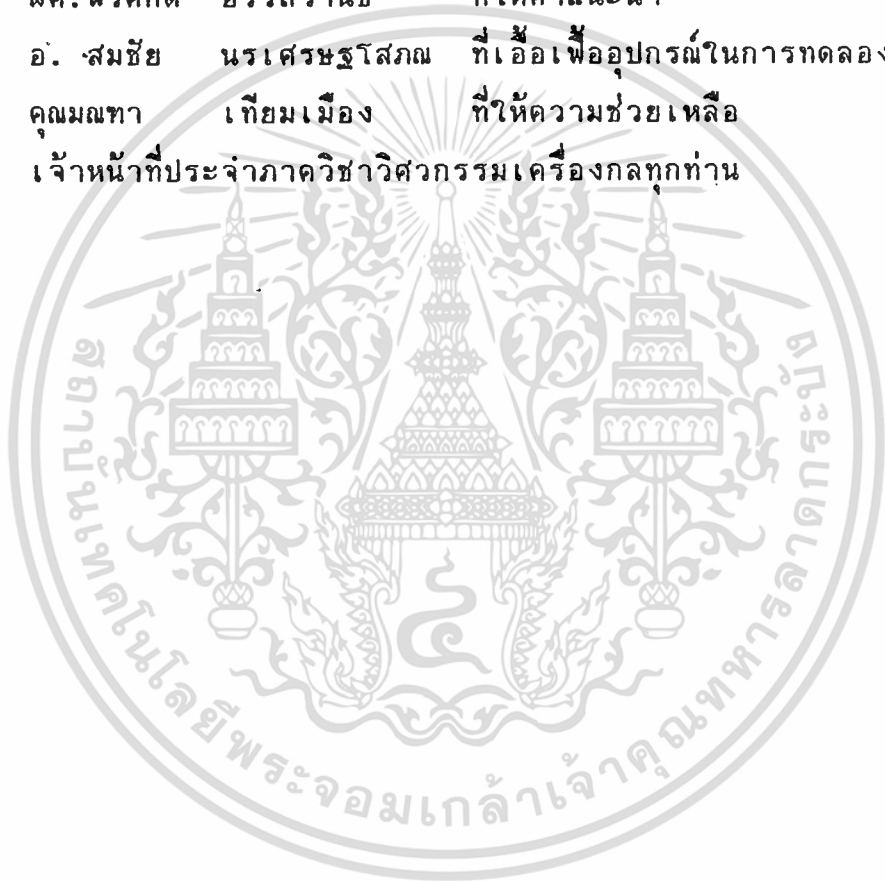
$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}}$$

ซึ่งจะทำให้เราสามารถทราบถึงคุณสมบัติด้านความเหนียวของวัสดุได้

## กิตติกรรมประกาศ

### ขอขอบคุณ

อ. ชาควิต วรณศิริ ที่ให้คำปรึกษา  
ผศ. พรศักดิ์ อรรณวานิช ที่ให้คำแนะนำ  
อ. สมชัย นรเศรษฐโสภณ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทดลองและให้คำปรึกษา  
คุณมณฑา เทียมเมือง ที่ให้ความช่วยเหลือ  
เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. Mechanical Metallurgy, George E. Dieter, SI Metric edition, McGraw-Hill
2. Elements of Strength of Materials, Timoshenko & Young, 5th edition, D.Van Nostrand Company
3. Elementary Engineering Fracture Mechanics, David Broek, 4th revised edition, Martinus Nijhoff Publishers, 1986
4. Mechanical Behavior of Materials, Norman E. Dowling, prentice Hall
5. Mechanical Behavior of Materials, Thomas H. Courtney, International edition, McGraw-Hill
6. Mathematical Principle of Plastic, R.Hill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้