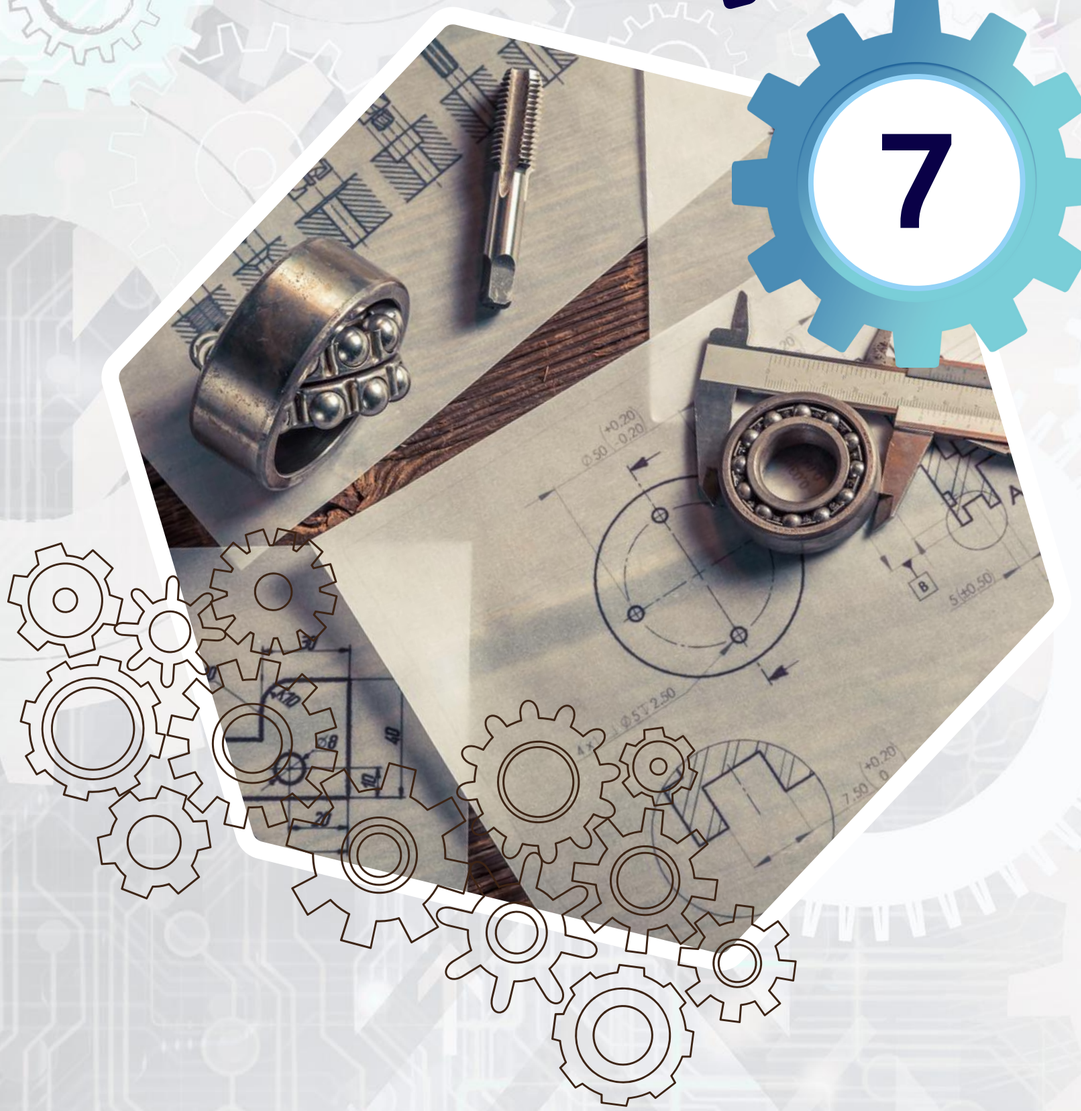
บทเรียนที่

7



ความเค้นและความเครียดของวัสดุ

วิชา กลศาสตร์เครื่องกล

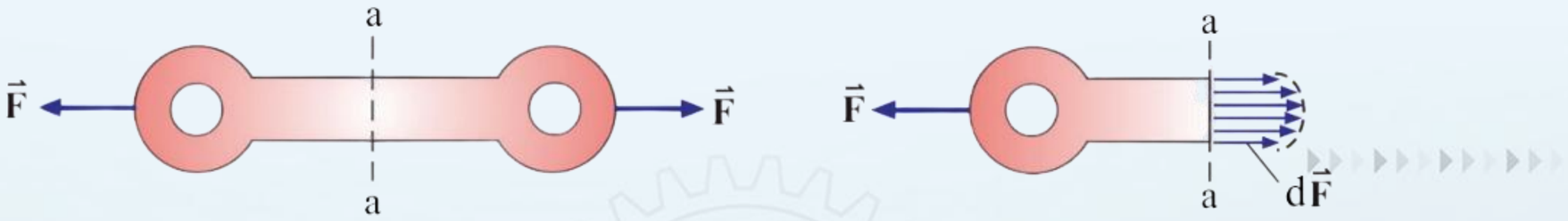
1 ความเค้น

การนำเอาวัสดุมาประกอบเป็นเครื่องจักรกลและโครงสร้างต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมนั้น
ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของมวลวัสดุหรือแรงภายใน
นอกจากนั้นวิศวกรและช่างเทคนิคจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุต่อไปนี้

ความยืดหยุ่น (Elasticity) คือ คุณสมบัติของวัสดุที่กลับคืนสู่สภาพเดิม
เมื่อมีแรงหรือระบบของแรงมากระทำหมดไปแล้ว
วัสดุที่นับได้ว่ามีความยืดหยุ่นสูงก็ต่อเมื่อไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างเหลืออยู่เลยเมื่อเอาแรงออก

ความเป็นพลาสติก (Plasticity) คือ คุณสมบัติของวัสดุที่ยอมเปลี่ยนรูปร่าง แม้จะถูกแรงภายนอกมากระทำเล็กน้อย เมื่อเอาแรงภายนอกออกแล้วก็คงอยู่ในสภาพที่เปลี่ยนรูปร่าง

ความเค้น (Stress) คือ แรงต้านทานภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของวัสดุนั้น ๆ โดยแรงต้านทานนี้จะมีขนาดเท่ากับแรงภายนอก แต่มีทิศทางตรงกันข้าม เพื่อรักษาสมดุลของวัสดุไม่ให้ขาดออกจากกัน ดังนั้น กล่าวได้ว่าแรงนี้จะต้องแบ่งออกเป็นแรงเล็ก ๆ นับไม่ถ้วนกระจายอยู่เต็มเนื้อที่ ดังรูป



แรงภายในต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด เรียกว่า ความเค้น
สามารถหาขนาดของความเค้นได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

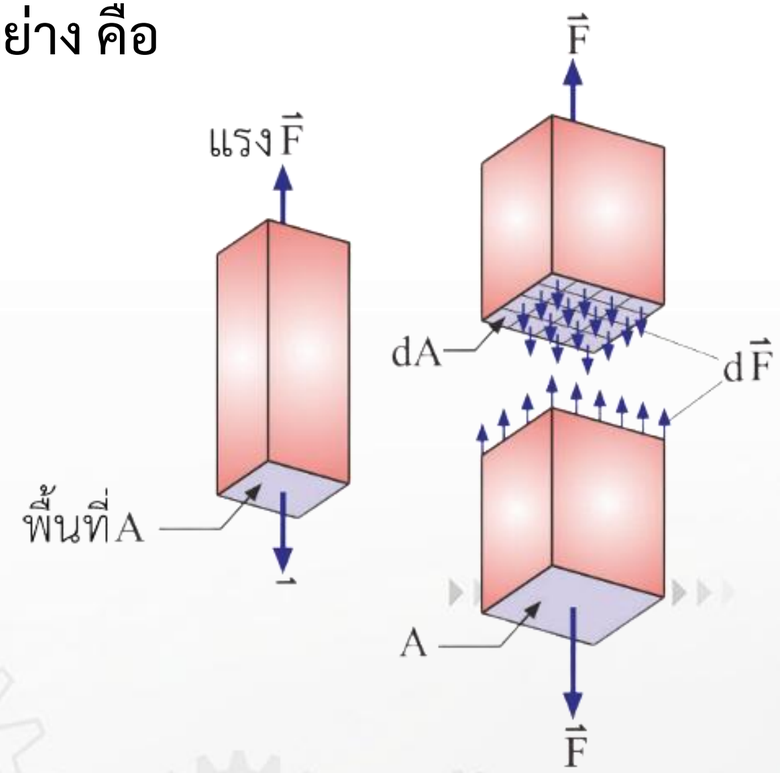
โดย σ คือ ความเค้นของวัสดุ
F คือ แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ (N, kN, MN, หรือ GN)
A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (mm^2, m^2)

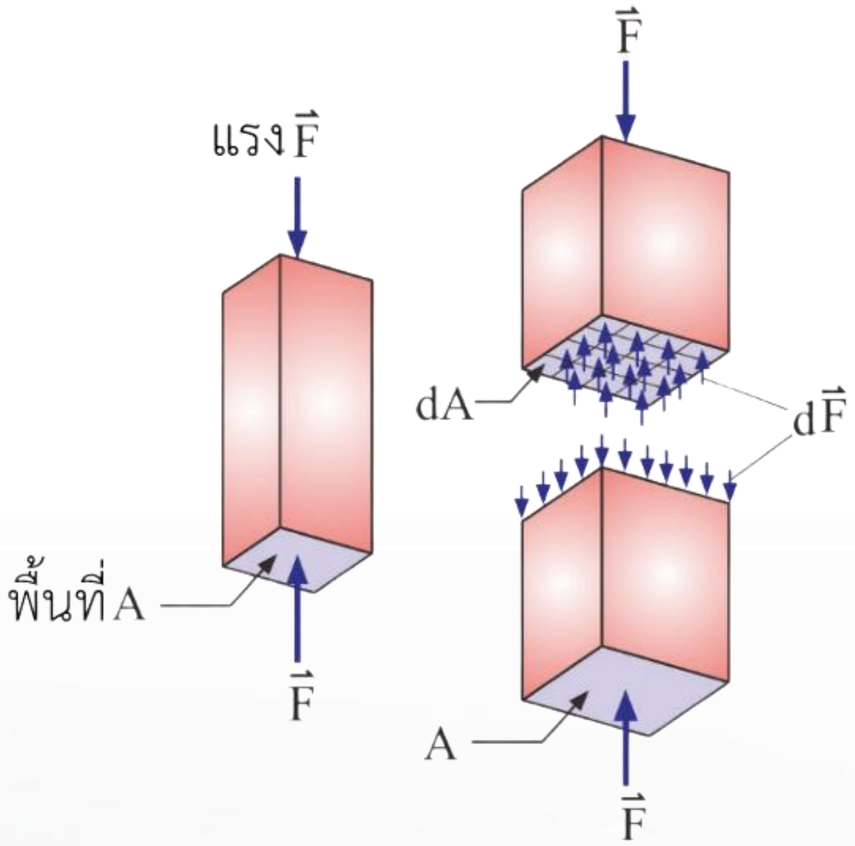
2 ชนิดของความเค้น

ความเค้นแบ่งออกตามลักษณะที่แรงภายนอกมากระทำได้ 3 อย่าง คือ

2.1 ความเค้นดึง (Tensile Stress : σ_t)

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำวัสดุในลักษณะที่พยายามดึงวัสดุให้ขาดจากกัน วัสดุนั้นจะมีแรงภายในต่อต้านเอาไว้ แรงภายในที่ต่อต้านเอาไว้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เรียกว่า ความเค้นดึง ดังรูป



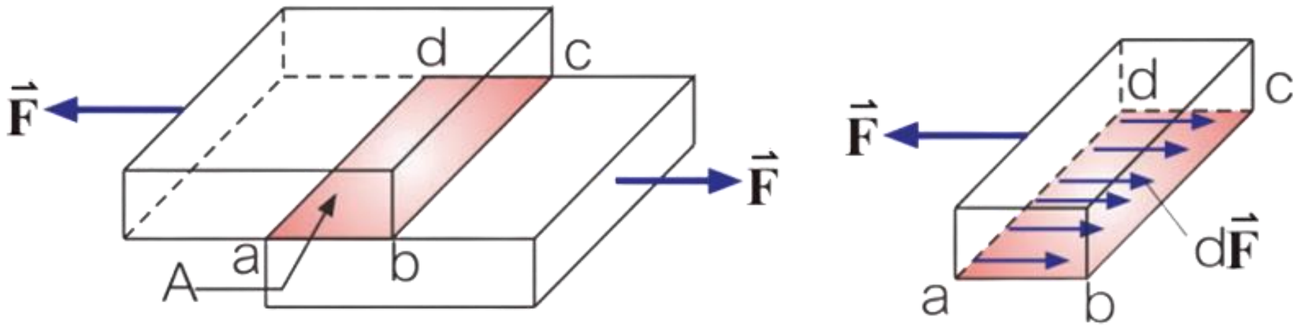


2.2 ความเค้นอัด (Compressive Stress : σ_c)

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุ
ในลักษณะที่อัดวัสดุนั้นให้แตกหักออกจากกัน
ก็จะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่อต้านเอาไว้
แรงภายในที่ต่อต้านไว้นี้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
เรียกว่า ความเค้นอัด

2.3 ความเค้นเฉือน (Shear Stress : τ)

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุ ในลักษณะที่เฉือนวัสดุให้ขาดจากกัน ก็มีแรงภายในต่อต้านเอาไว้ แรงภายในที่ต่อตานไว้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เรียกว่า ความเค้นเฉือน ดังรูป



พิจารณาแท่งวัสดุในรูปด้านบน แรง $\vec{F}$ เป็นแรงในแนวแกนพยายามเฉือนพื้นที่ของวัสดุบริเวณ abcd ให้ขาดออกจากกันในแนวระนาบ โดยที่วัสดุสร้างแรงปฏิกิริยาต้านทานแรงขึ้นภายในเนื้อวัสดุ บริเวณ abcd เรียกว่า “แรงเฉือนภายใน” ขนาดของแรงเฉือนลัพธ์ภายในจะมีค่าเท่ากับแรง $\vec{F}$ ที่กระทำกับวัสดุ ในความเป็นจริงแรงกระจายไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด

ในทางวิศวกรรมถือว่าแรงกระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่รับแรงเฉือน มีนิยามความเค้นเฉือน คือ

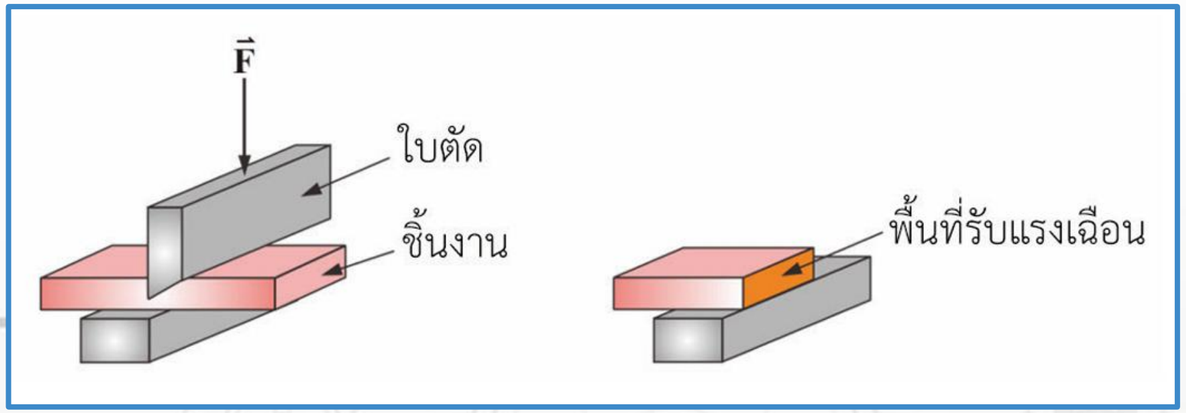
$$\tau = \frac{F}{A}$$

τ คือ ความเค้นเฉือน (N/mm^2, kN/m^2, MN/m^2 หรือ GN/m^2)

$\vec{F}$ คือ แรงดึงที่กระทำต่อวัสดุ (N, kN, MN หรือ GN)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงเฉือน (mm^2 หรือ m^2)

กรณีงานตัดโลหะ เมื่อนำวัสดุมาตัดเฉือน ส่วนที่ถูกตัดเฉือนขาดออกจากกันเป็นพื้นที่รับแรง ดังรูป



3 ความเครียด

วัสดุที่นำมาออกแบบเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรหรือโครงสร้างจะเสียรูปร่าง
จากการรับแรงภายนอกที่มากระทำการเสียรูปร่างเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเค้นที่กระทำ
และคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้งาน โดยการเสียรูปร่างของวัสดุมีลักษณะดังนี้
การเปลี่ยนรูปร่างตามแนวแกนเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของการยืดตัว
จากแรงดึงและการหดตัวจากแรงอัด
ส่วนการเปลี่ยนรูปร่างจากแรงเฉือนเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
ที่เกิดจากการบิดตัวเชิงมุมของวัสดุ

3.1 การเปลี่ยนรูปร่างตามแนวแกน

ความเครียด (Strain : ε) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 1 หน่วย (Unit Deformation) หรือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่อความยาวเดิม จะได้สมการดังนี้

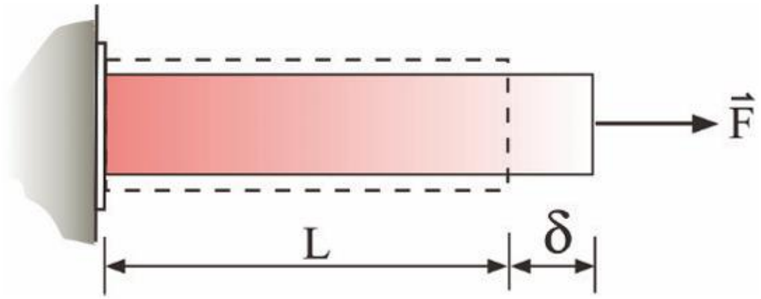
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

ε คือ ความเครียด

L คือ ความยาวเดิมของวัสดุ

δ คือ ขนาดของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากความยาวเดิม

1 ความเครียดดึง (Tensile Strain : ε_t)



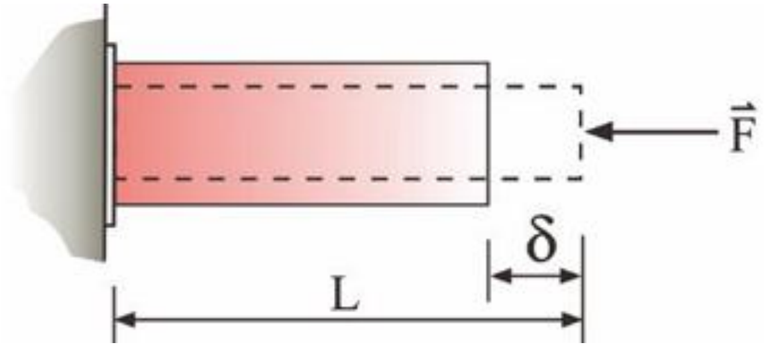
$$\varepsilon_t = \frac{\delta}{L}$$

โดย ε_t คือ ความเครียดดึง

δ คือ ความยาวของวัสดุที่ยืดออกจากความยาวเดิม (mm)

L คือ ความยาวเดิมของวัสดุ (mm)

2 ความเครียดอัด (CompressiveStrain : ε_c)



$$\varepsilon_c = \frac{\delta}{L}$$

โดย ε_c คือ ความเครียดอัด

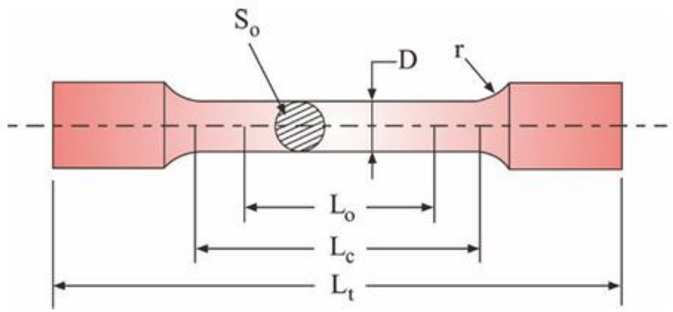
δ คือ ความยาวของวัสดุที่หดจากความยาวเดิม (mm)

L คือ ความยาวเดิมของวัสดุ (mm)

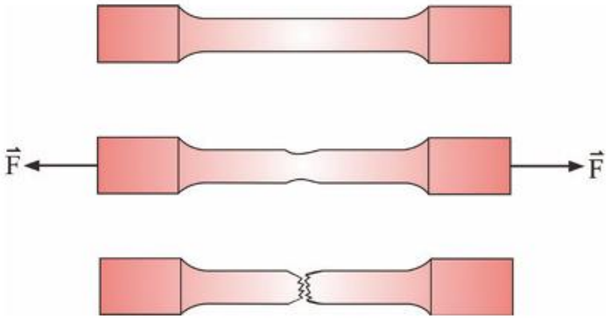
4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับส่วนที่ยืดออก

การหาความแข็งแรง
และคุณสมบัติของวัสดุ
จะต้องนำวัสดุมาทดสอบแรงดึง
ในห้องปฏิบัติการ
โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์
ดังรูป

ชิ้นงานทดสอบที่จัดทำขึ้นรูปเป็นแท่งกลมตามมาตรฐาน ของ มอก.2172 หรือ ISO6892–1 : 2009 ดังรูป



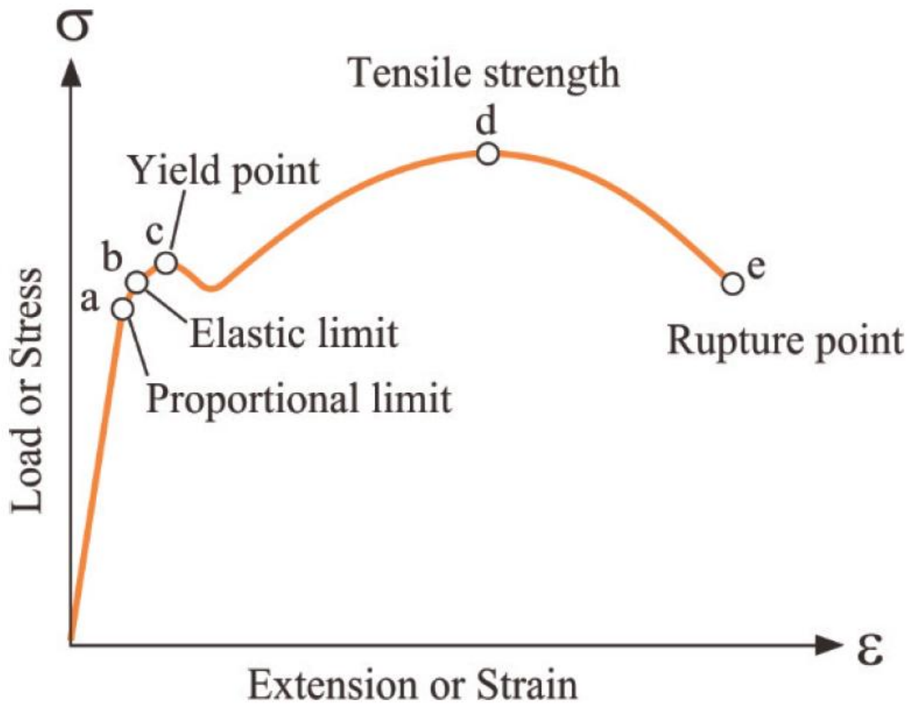
ชิ้นงานทดสอบแรงดึง



ตัวอย่างผลของการดึงชิ้นงานทดสอบวัสดุเหนียว

ชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดปลายทั้งสองข้างด้วยหัวจับ และใส่แรงดึงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบ จนชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกัน

ทำให้เกิดกราฟดังรูป



จุดสำคัญต่าง ๆ ของแผนภาพความเค้น–ความเครียด

จุด a หมายถึง จุด Proportional Limit หรือ Limit of Proportionality เป็นจุดสุดท้ายที่กราฟเป็นเส้นตรง

จุด b หมายถึง จุด Elastic Limit เป็นจุดสุดท้ายของความยาววัสดุที่ยืดออกและสามารถหดกลับสู่ความยาวเดิมเมื่อปล่อยแรง

จุด c หมายถึง จุด Yield Point เป็นจุดที่วัสดุสามารถยืดออก โดยไม่ต้องเพิ่มแรงดึง ค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Yield strength ใช้สัญลักษณ์ σ_y

จุด d หมายถึง จุด Tensile Strength หรือ Ultimate Tensile Strength เป็นจุดที่สามารถรับแรงได้สูงสุด ใช้สัญลักษณ์ σ_u

จุด e หมายถึง จุด Rupture Point หรือ Breaking Point เป็นจุดที่วัสดุขาดออกจากกัน

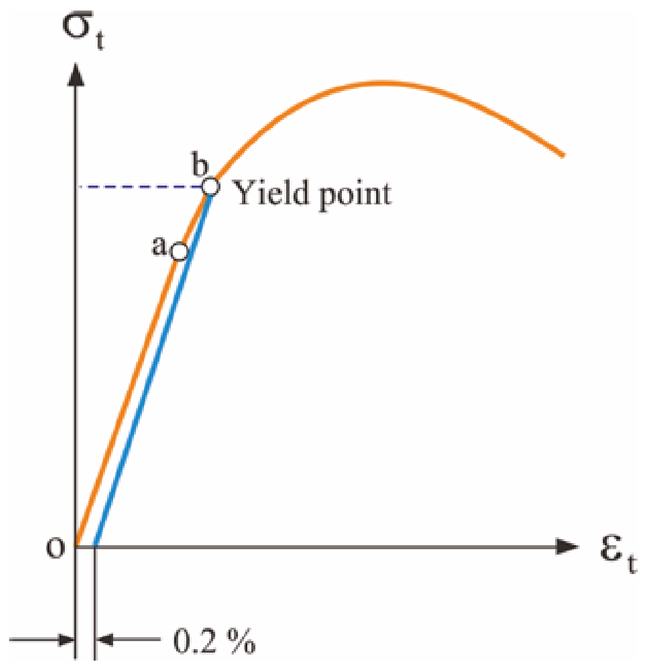
ช่วง O–a เป็นกราฟเส้นตรง ค่าของแรงเป็นปฏิภาคโดยตรงกับส่วนที่ยืดออก หรือ Stress α Strain

ช่วง c–e เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Plastic โดยที่วัสดุจะยืดออกอย่างถาวรเมื่อปล่อยแรง โดยที่วัสดุไม่สามารถหดกลับสู่ความยาวเดิมได้

ช่วง d–e เป็นช่วงที่วัสดุจะยืดอย่างรวดเร็วโดยบริเวณที่มีลักษณะคอคอด (Neck)

กราฟของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะได้กราฟครบทุกจุด และกราฟช่วง Plastic ยาวก่อนที่วัสดุจะขาดจากกัน วัสดุที่มีกราฟแบบนี้เรียกว่า วัสดุเหนียว (Ductile Material)

วัสดุบางชนิดที่กราฟช่วง Yield Point ไม่มี หรือมีเพียงเล็กน้อย แต่มีค่า Tensile Strength วัสดุแบบนี้เรียกว่า วัสดุเปราะ (Brittle Material) เช่น เหล็กหล่อ คอนกรีต ในเมื่อวัสดุจำพวกนี้ ไม่มีค่าของ Yield Point ดังนั้นจึงต้องสร้างค่าเปรียบเทียบดังรูปที่แสดงการสร้างเส้นตรง 0.2% ของความเครียดโดยการลากเส้นขนานกับเส้น O–a ตัดกับกราฟที่ จุด b ลักษณะนี้จะได้เส้น ที่เรียกว่า ***0.2 Percent Proof Stress***



ภายหลังจากการทดสอบแรงดึง เมื่อวัสดุถูกดึงจนขาด นำชิ้นงาน 2 ชิ้นที่ขาดมาประกบเข้าด้วยกันจะเห็นว่าความยาวของชิ้นงานจะมีความยาวเพิ่มขึ้น (L′) มากกว่าความยาวเดิม (L)

จึงสามารถหาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{L' - L}{L} \times 100$$

วัสดุใดมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง คือ มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากกว่า 5% เรียกว่า วัสดุเหนียว เช่น ทองแดง ทองเหลือง เงิน และเหล็กคาร์บอนต่ำ แต่วัสดุที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ต่ำกว่า 5% เรียกว่า วัสดุเปราะ เมื่อชิ้นงานทดสอบแรงดึงขาด นอกจากความยาวที่เพิ่มขึ้น พื้นที่หน้าตัดส่วน ที่ขาด (A′) จะมีขนาดเล็กลงกว่าพื้นที่หน้าตัดเดิม (A) ซึ่งสามารถหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่หน้าตัดลดลงได้ ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์พื้นที่หน้าตัดลดลง} = \frac{A - A'}{A} \times 100$$

ค่าความปลอดภัย

ค่าความเค้นสูงสุดที่หาได้จากชิ้นงานทดสอบของวัสดุนั้น
เราไม่สามารถที่จะนำค่าเหล่านั้นมาใช้ในการออกแบบหรือคำนวณได้
เพราะแรงหรือน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างนั้นอาจจะสูงกว่า
ค่าที่ได้จากชิ้นทดสอบ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริง
เกินค่าสูงสุดในวัสดุที่จะรับได้จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าความปลอดภัย
(Safety Factor) หรือค่าเผื่อในการออกแบบชิ้นงานเอาไว้
การคำนวณค่าความปลอดภัยมีดังนี้

5.1 ค่าความปลอดภัยใช้ค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ

$$\text{ค่าความปลอดภัย} = \frac{\text{ค่าความเค้นสูงสุด}}{\text{ค่าความเค้นใช้งาน}}$$

$$N = \frac{\sigma_U}{\sigma_w}$$

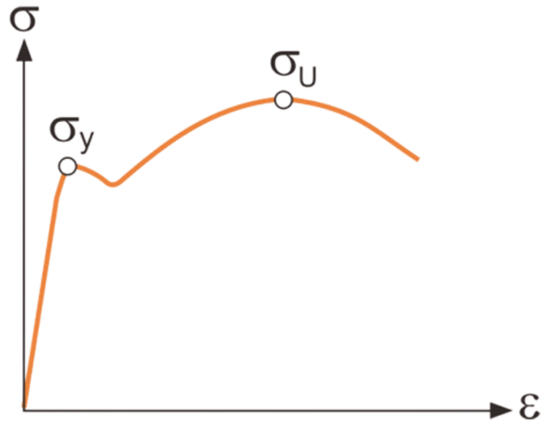
5.2 ค่าความปลอดภัยใช้ค่าความเค้นที่ Yield Point ของวัสดุ

$$\text{ค่าความปลอดภัย} = \frac{\text{ค่าความเค้นที่ Yield Point}}{\text{ค่าความเค้นใช้งาน}}$$

$$N = \frac{\sigma_y}{\sigma_w}$$

5.3 ความเค้นที่ยอมให้ (Allowable Stress : σ_{allow})

ความเค้นที่ยอมให้เป็นความเค้นที่เผื่อไว้
สำหรับการออกแบบเพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้กับงานจริง
ซึ่งบางครั้งเรียกว่า Design Stress (σ_d) หรือ Working Stress (σ_w)



จากรูป จะเห็นค่าคุณสมบัติที่สำคัญของความเค้นสองจุด คือ Yield Stress (σ_y) และ Tensile Strength หรือ Ultimate Strength (σ_U) แต่ในการออกแบบ ชิ้นส่วนเครื่องกลเพื่อนำไปใช้งาน ไม่สามารถนำค่า σ_y และ σ_U มาใช้ในการคำนวณได้ เพราะความเค้นช่วงนี้ ชิ้นส่วนของวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบ Plastic หมายถึง ชิ้นส่วนยืดหรือหดตัว แบบถาวรโดยไม่สามารถกลับสู่ความยาวเดิมได้เมื่อนำแรงที่กระทำออก เป็นผลทำให้ชิ้นส่วนวัสดุ เสียหายจากแรงที่กระทำ

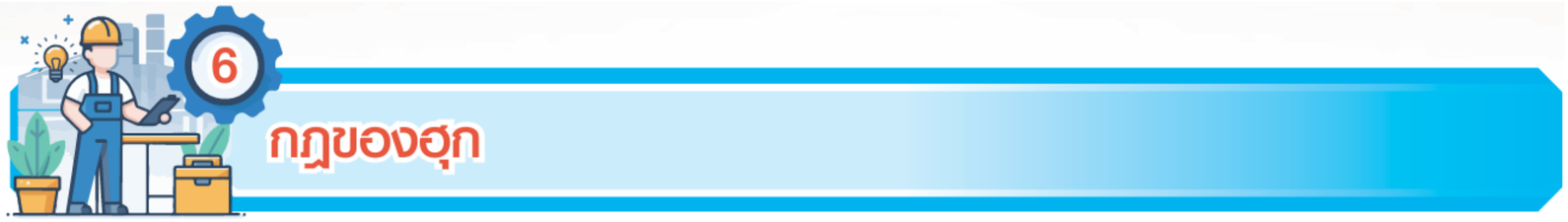
โดยทั่วไปการออกแบบเพื่อใช้งานจะต้องใช้ค่าความเค้นไม่เกินจุด Yield
เนื่องจากค่าความเค้นที่นำมาใช้งานยิ่งต่ำ โอกาสที่ชิ้นงานเสียหายก็น้อยตามไปด้วย
ดังนั้นต้องมีค่าความปลอดภัย โดยเรียกคำนี้ว่า Design Factor (N) หรือ Factor of Safety (F·S)
ความเค้นแรงดึงหรือความเค้นอัดที่ใช้ในการออกแบบ (Design Stress : σ_d) มีดังนี้

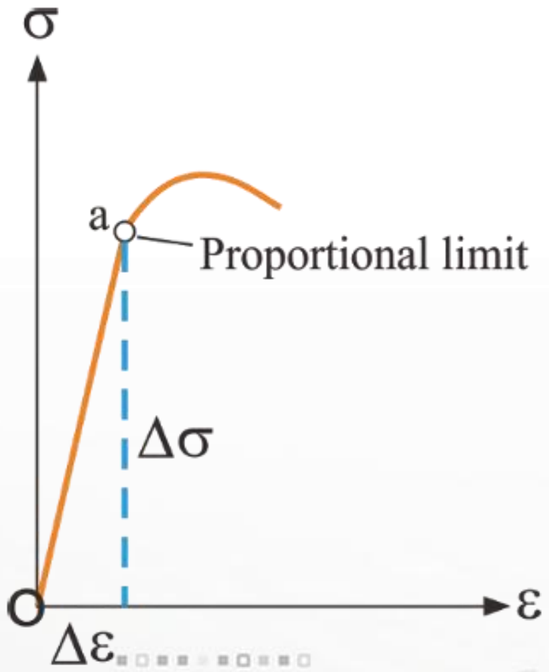
$$\text{Design Stress } (\sigma_d) = \frac{\text{Yield Stress } (\sigma_y)}{\text{Design Factor (N)}}$$

$$\text{Design Stress } (\sigma_d) = \frac{\text{Ultimate Strength } (\sigma_U)}{\text{Design Factor (N)}}$$

ความเค้นแรงเฉือน

$$\text{Design Stress } (\tau_d) = \frac{\text{Yield Stress } (\tau_y)}{\text{Design Factor (N)}}$$





จากรูป ค่าความเค้น–ความเครียด พิจารณากราฟช่วงที่เป็นเส้นตรง คือจากจุด O ถึงจุด a (Proportional Limit) ซึ่งเป็นช่วงที่ความเค้นแปรผันโดยตรงกับความเครียด ใน ค.ศ. 1676 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ Robert Hooke ได้แสดงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงนี้ และสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เรียกว่า กฎของฮุก (Hooke's Law)

6.1 ค่าคงที่ของการผิดรูปในแนวแกน

เรียกว่า Young's Modulus

หรือ Modulus of Elasticity (E)

จากกฎของฮุกจะได้

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$E = \frac{F/A}{\delta/L}$$

$$E = \frac{FL}{\delta A}$$

$$\delta = \frac{FL}{AE}$$

F = แรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดงาน

6.2 ค่าคงที่ของการผิดรูปในแรงเฉือน

เรียกว่า Modulus of Rigidity (G)

$$G = \frac{\text{Shear Stress}}{\text{Shear Strain}}$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$