



Theories of Failure for Static Loadings

6

ทฤษฎีความเสียหาย สำหรับความเค้นเนื่องจากการะสทิต

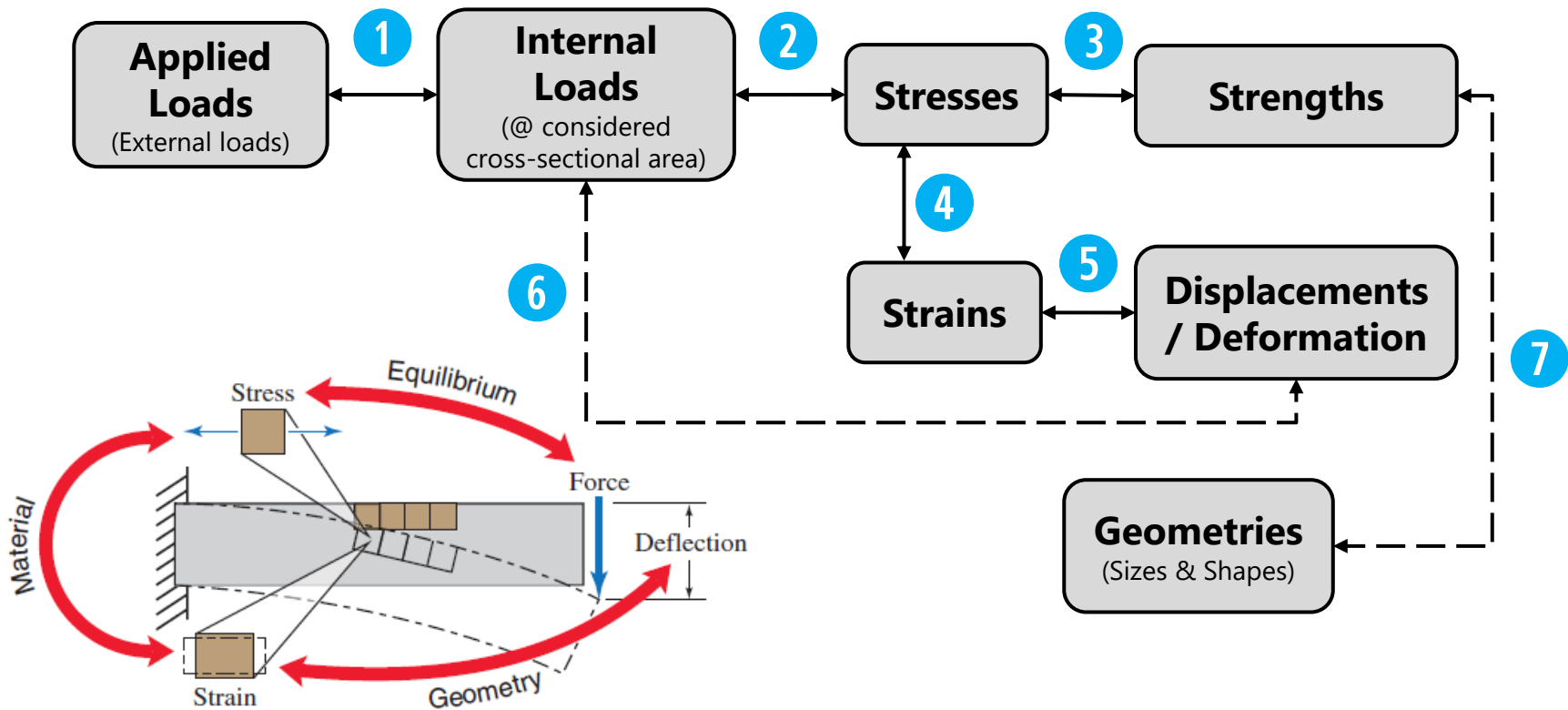
พีเชษฐ์ พิณีจ

ทบทวนความเข้าใจจาก

Reviewing for understanding

1 + 2

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในกลศาสตร์วัสดุ”



*เลขเหล่านี้มีได้หมายถึงลำดับ บอกเพียงตำแหน่งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคู่ปริมาณทางฟิสิกส์เท่านั้น

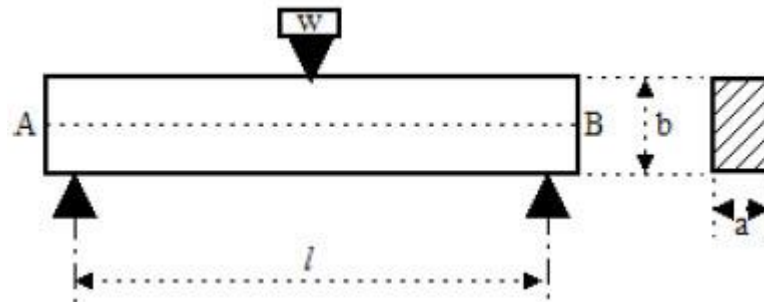
*เส้นประ หมายถึง ความสัมพันธ์คู่หนึ่งไม่สามารถแสดงได้ หากปราศจากความสัมพันธ์ที่แสดงด้วยเส้นทึบ

*ความสัมพันธ์เชิงตรรกะจะถูกใช้เป็นแนวทางในการพิสูจน์สูตรหรือสมการความเค้นพื้นฐาน

“การออกแบบชิ้นส่วนทางกล-การต้านแรง”

การออกแบบเพื่อต้านแรงสำหรับป้องกันความเสียหายแบบครากและแตกหัก

ความต้านแรงคราก / สูงสุด



อาศัยฟังก์ชันความเสียหายเพื่อเปรียบเทียบขนาดของ
ความเค้นประสิทธิผล σ_{eff} ที่ได้จากการคำนวณกับ
ความต้านแรง *Strength* ของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ

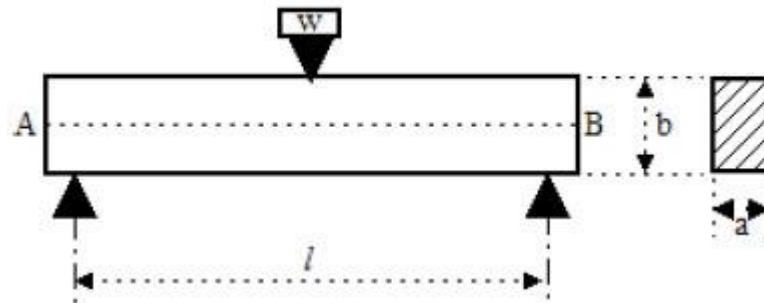
$$f(\sigma_{\text{eff}}, \text{Strength})$$

(failure function)

“การออกแบบชิ้นส่วนทางกล-การต้านแรง”

การออกแบบเพื่อต้านแรงสำหรับป้องกันความเสียหายแบบครากและแตกหัก

ความต้านแรงคราก / สูงสุด



อาศัยฟังก์ชันความเสียหายเพื่อเปรียบเทียบขนาดของ
ความเค้นประสิทธิผล σ_{eff} ที่ได้จากการคำนวณกับ
ความต้านแรง *Strength* ของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ

$$f(\sigma_{eff}, \text{Strength})$$

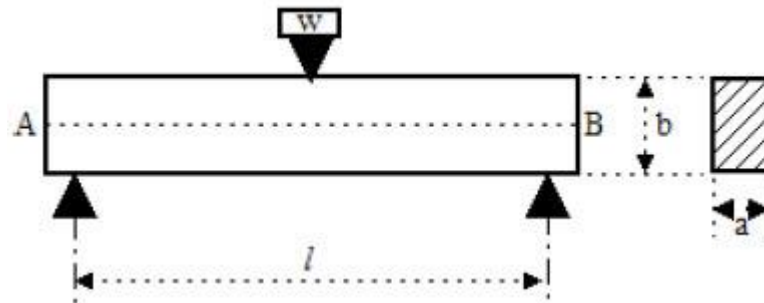
ความเค้นพื้นฐาน + ทฤษฎีความเสียหาย

- S_y เสียหายแบบคราก (yielding failure)
 สำหรับวัสดุเหนียว (ductile materials)
- S_u เสียหายแบบแตกร้าว (fracture failure)
 สำหรับวัสดุเปราะ (brittle materials)

“การออกแบบชิ้นส่วนทางกล-การต้านแรง”

การออกแบบเพื่อต้านแรงสำหรับป้องกันความเสียหายแบบครากและแตกหัก

ความต้านแรงคราก / สูงสุด



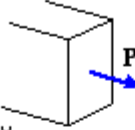
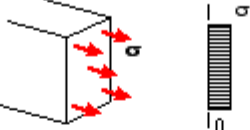
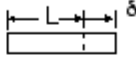
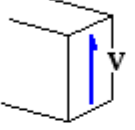
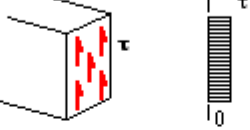
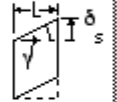

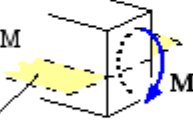



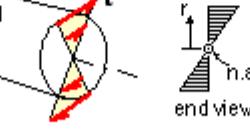
อาศัยฟังก์ชันความเสียหายเพื่อเปรียบเทียบขนาดของ
ความเค้นประสิทธิผล σ_{eff} ที่ได้จากการคำนวณกับ
ความต้านแรง *Strength* ของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ

$f(\sigma_{eff}, Strength)$

ความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma_{eff} > Strength$

“การภายในในชิ้นส่วนและความเค้น”

ELEMENTARY LOAD BUILDING BLOCKS

	STRESS RESULTANT	STRESS DISTRIBUTION	ELASTIC CONSTITUTION	ENERGY
FORCE RESULTANT UNIFORM STRESS	TENSILE OR COMPRESSIVE FORCE - P  Geometric instability (buckling) is often crucial in compression		$\sigma = \frac{P}{A} = E \frac{\delta}{L} = E \epsilon$ 	$u = \frac{1}{2} \sigma \epsilon$ u : specific strain energy (Nm/m ³)
	SHEAR FORCE - V  Shear stress is uniform to a first approximation... but more realistically		$\tau = \frac{V}{A} = G \frac{\delta_s}{L_s} = G \gamma$ Complementary shear usually requires a non-linear stress distribution eg. $\tau = VQ/bI$ 	$u = \frac{1}{2} \tau \gamma$ 
MOMENT RESULTANT LINEARLY VARYING STRESS	BENDING MOMENT - M  neutral plane	 side view Stress is uniform in transverse direction across the beam	$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I} = E \frac{1}{R}$ Note the analogy between bending and torsional deformations : $1/R = \theta/L$ 	$U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dL$ U : total strain energy (Nm)
	TORSIONAL MOMENT - T (TORQUE OF ROUND SHAFT)  neutral axis	 end view Stress is uniform in circumferential direction around the shaft	$\frac{\tau}{r} = \frac{T}{J} = G \frac{\theta}{L}$ Torsional deformation θ/L is usually constant along a member whereas bending deformation varies with bending moment and so requires integration for deflections	$U = \int_0^L \frac{T^2}{2GJ} dL$

The practical unit of stress is neither 10^6 N/m^2 nor 10^6 Pa , but **MPa** (equivalent to N/mm^2).
 Stress conversion factor : 6.895 kPa per lbf/in^2

$$\frac{\text{stress in member (at distance from neutral axis, if linear)}}{\text{stress resultant}} = \frac{\text{material property (elastic modulus)}}{\text{property of member's cross-sectional geometry}} \times \text{measure of deformation (strain)}$$

“การกระจายภายในชิ้นส่วนและความเค้น@หน้าตัดที่พิจารณา”

	แรงในแนวแกน (ดึง/อัด)	แรงในแนวขวาง (เฉือน)		โมเมนต์	
	แรงอัดบนพื้นที่ สัมผัส	ชิ้นส่วนทั่วไป (ภายใต้แรงเฉือนตรง)	คาน/แกน/เพลลา (เนื่องจากโมเมนต์ดัด)	โมเมนต์ดัด (bending moment)	โมเมนต์บิด/แรงบิด (twisting moment)
ความเค้นฉาก	$\sigma_{ave} = \frac{P}{A_{\perp}}$ $\sigma_{ave} = \frac{P}{A_{\perp}} = \frac{P}{td}$			$\sigma = \frac{M_z c}{I}$	
ความเค้นเฉือน		$\tau_{ave} = \frac{V}{A_{\parallel}}$	$\tau = \frac{V Q}{I b}$		$\tau = \frac{T r}{J}$

แนวคิดรวบยอดทฤษฎีความเสียหาย

สำหรับความเค้นในสภาวะสถิต

Concept of Failure Theories for Static Stresses

$f(\sigma_{\text{eff}}, \text{Strength})$ ความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma_{\text{eff}} > \text{Strength}$

ความเค้นพื้นฐาน + ทฤษฎีความเสียหาย

“เส้นทางการออกแบบสำหรับความเค้นในสภาวะสถิต”

Load building blocks and Stress components @ critical section/point

Principal stresses @ critical section/point

Failure Theories

Materials / Shape / Safety factor

Simple stress components for *prismatic members*

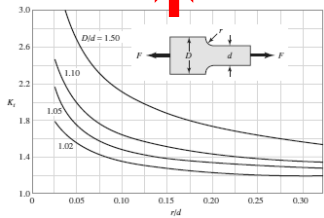
ELEMENTARY LOAD-BUILDING BLOCKS			
STRESS RESULTANT	STRESS DISTRIBUTION	ELASTIC CONSTITUTION	SHIBBOY
TENSION OR COMPRESSION Stress is constant across the cross-section.		$\sigma = E \epsilon$	$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$
BEND Stress varies with a 1st degree variation.		Complementary shear stresses are present. $\tau = G \gamma$	$\gamma = \frac{\Delta \theta}{L}$
RESISTANCE MOMENT Stress varies with a 2nd degree variation.		Complementary shear stresses are present. $\tau = G \gamma$	$\gamma = \frac{\Delta \theta}{L}$
TORSION Stress varies with a 2nd degree variation.		Complementary normal stresses are present. $\sigma = E \epsilon$	$\epsilon = \frac{\Delta \theta}{L}$

$$\sigma = \frac{P}{A_{\perp}} \quad \sigma = \frac{Mc}{I}$$

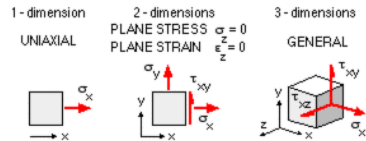
$$\tau_{ave} = \frac{P}{A_{\parallel}} \quad \tau = \frac{Tr}{J} \quad \tau = \frac{VQ}{Ib}$$

$$\sigma_{max} = k_t \sigma$$

$$\tau_{max} = k_{ts} \tau$$



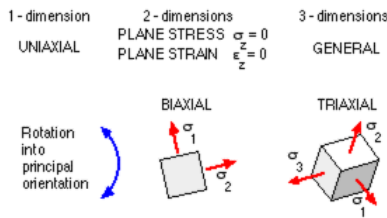
Stress concentrations due to stress raisers in *actual members*



$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$$

โดยที่

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$



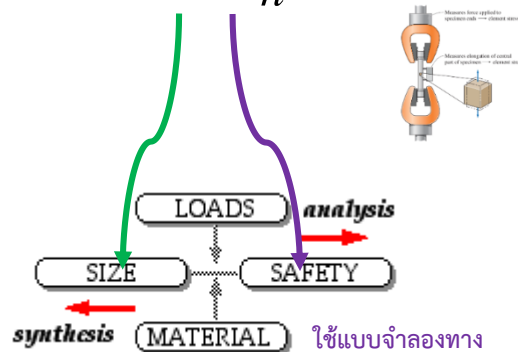
Stress Function:

$$f(\sigma_{eff}, Strength)$$

โดยที่ความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma_{eff} > Strength$

Design Equation:

$$\sigma_{eff} = \frac{Strength}{n}$$



เลือกวัสดุและขนาดที่เหมาะสมที่สุดเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย

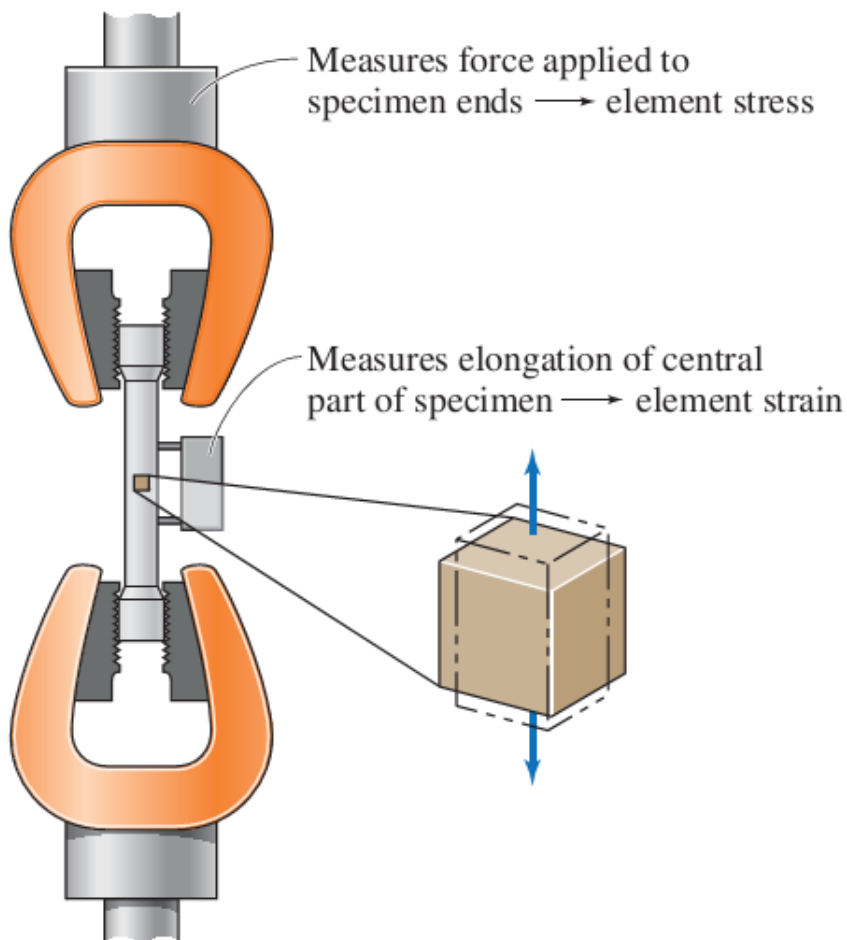
ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อตรวจสอบค่าความปลอดภัย n ของชิ้นส่วนที่ทราบสมบัติของวัสดุ ขนาด และภาระที่กระทำอยู่แล้ว

“ที่มากฤษฎีความเสียหาย”

การทดสอบวัสดุเป็นสิ่งที่ต้องใช้งบประมาณและเวลาเป็นอย่างมากเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและถูกต้อง

ในทางปฏิบัติผู้ผลิตวัสดุจึงไม่สามารถทดสอบได้ตามที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงมีการทดสอบเท่าที่จำเป็นและใช้วิธีการที่ง่ายพอควร

วิธีการที่ง่ายในการทดสอบสมบัติของวัสดุก็คือ การทำสอบดึง/อัด (uniaxial stress test) ซึ่งทำให้สถานะความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบเป็นสถานะความเค้นอย่างง่ายหรือความเค้นแนวแกนเดียว

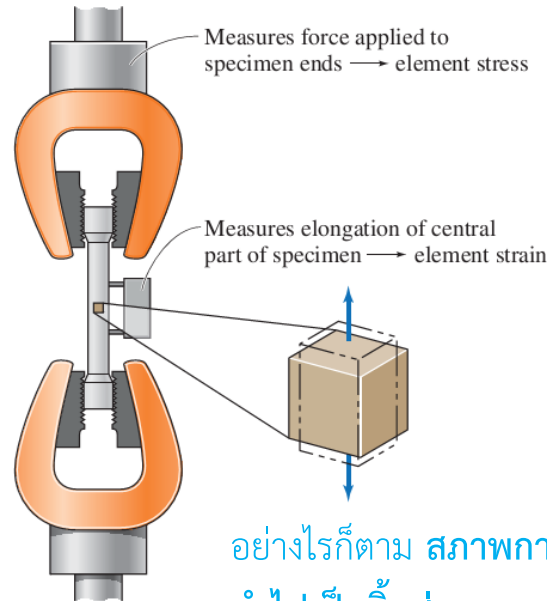


“ที่มาทฤษฎีความเสียหาย”

การทดสอบวัสดุเป็นสิ่งที่ต้องใช้งบประมาณและเวลาเป็นอย่างมากเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและถูกต้อง

ในทางปฏิบัติผู้ผลิตวัสดุจึงไม่สามารถทดสอบได้ตามที่ต้องการ ด้วยเหตุนี้จึงมีการทดสอบเท่าที่จำเป็นและใช้วิธีการที่ง่ายพอควร

วิธีการที่ง่ายในการทดสอบสมบัติของวัสดุก็คือ การทำสอบถึง/อัด ซึ่งทำให้สถานะความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบเป็นสถานะความเค้นอย่างง่ายหรือความเค้นแนวแกนเดียว



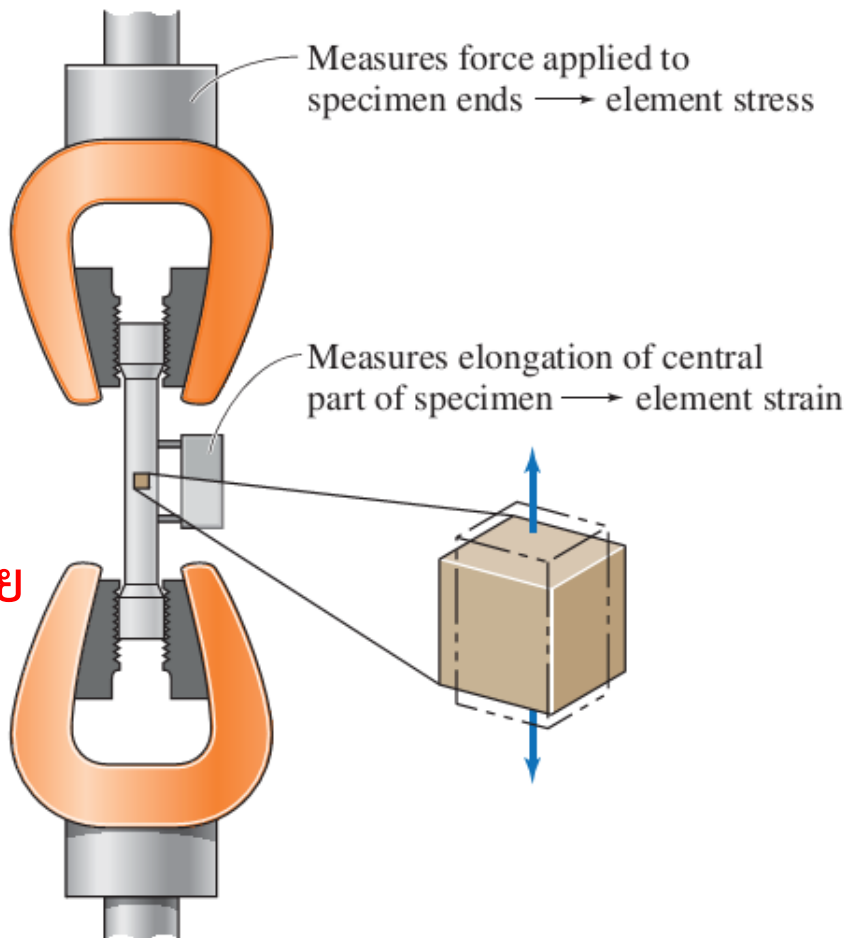
อย่างไรก็ตาม สภาพการใช้งานจริงของวัสดุที่นำไปเป็นชิ้นส่วนทางกลและรับภาระต่าง ๆ นั้น ก่อให้เกิดสถานะความเค้นผสม (combined stresses) หรือมีความซับซ้อน จึงส่งผลให้ผู้ออกแบบไม่สามารถใช้ค่าสมบัติของวัสดุได้โดยตรง

คำถามจึงมีอยู่ว่า **เราจะทำอย่างไร?**

“ที่มากฤชฎีความเสียหาย”

เพื่อตอบคำถามข้างต้น จึงมีผู้คิดค้นการสร้าง
ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะความเค้นที่
เกิดขึ้นในการทดสอบหาสมบัติของวัสดุจน
วัสดุเสียหาย (uniaxial stress test) กับ
สถานะความเค้นที่ก่อให้เกิดความเสียหายจริง
ในชิ้นส่วนทางกลเมื่อนำไปใช้งานภายใต้ภาระ
ที่หลากหลาย

ความสัมพันธ์ดังกล่าวก็คือ **ทฤษฎีความเสียหาย**



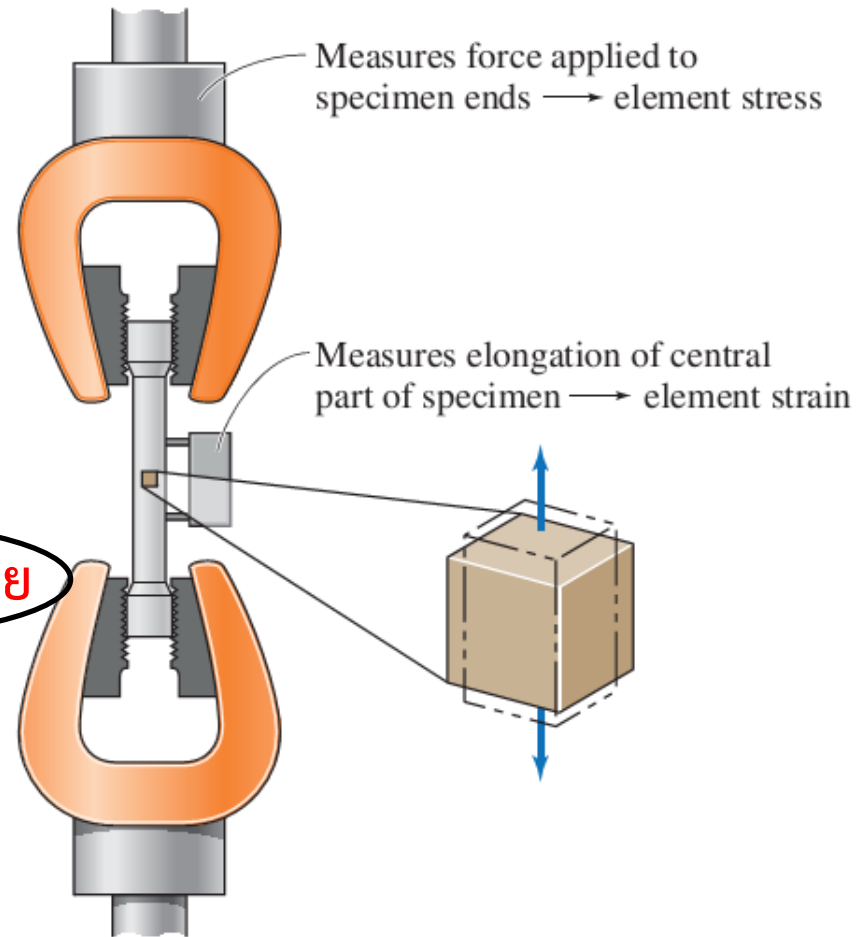
“ที่มาทฤษฎีความเสียหาย”

เพื่อตอบคำถามข้างต้น จึงมีผู้คิดค้นการสร้าง
ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะความเค้นที่
เกิดขึ้นในการทดสอบหาสมบัติของวัสดุจน
วัสดุเสียหาย (uniaxial stress test) กับ
สถานะความเค้นที่ก่อให้เกิดความเสียหายจริง
ในชิ้นส่วนทางกลเมื่อนำไปใช้งานภายใต้ภาวะ
ที่หลากหลาย

ความสัมพันธ์ดังกล่าวก็คือ **ทฤษฎีความเสียหาย**

ภาวะสถิต

ภาวะแปรเปลี่ยน



“ที่มาทฤษฎีความเสียหาย”

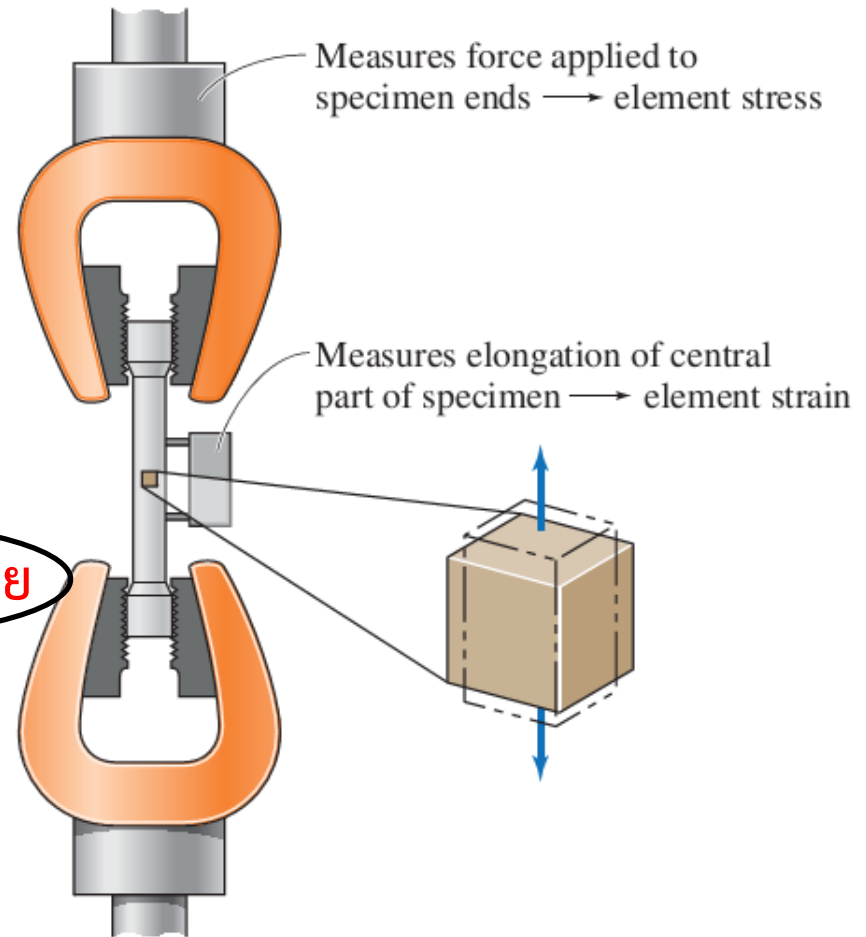
เพื่อตอบคำถามข้างต้น จึงมีผู้คิดค้นการสร้าง
ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะความเค้นที่
เกิดขึ้นในการทดสอบหาสมบัติของวัสดุจน
วัสดุเสียหาย (uniaxial stress test) กับ
สถานะความเค้นที่ก่อให้เกิดความเสียหายจริง
ในชิ้นส่วนทางกลเมื่อนำไปใช้งานภายใต้ภาวะ
ที่หลากหลาย

ความสัมพันธ์ดังกล่าวก็คือ **ทฤษฎีความเสียหาย**

ภาวะสถิต

ในสไลด์นี้จะนำเสนอในส่วนนี้

ภาวะแปรเปลี่ยน



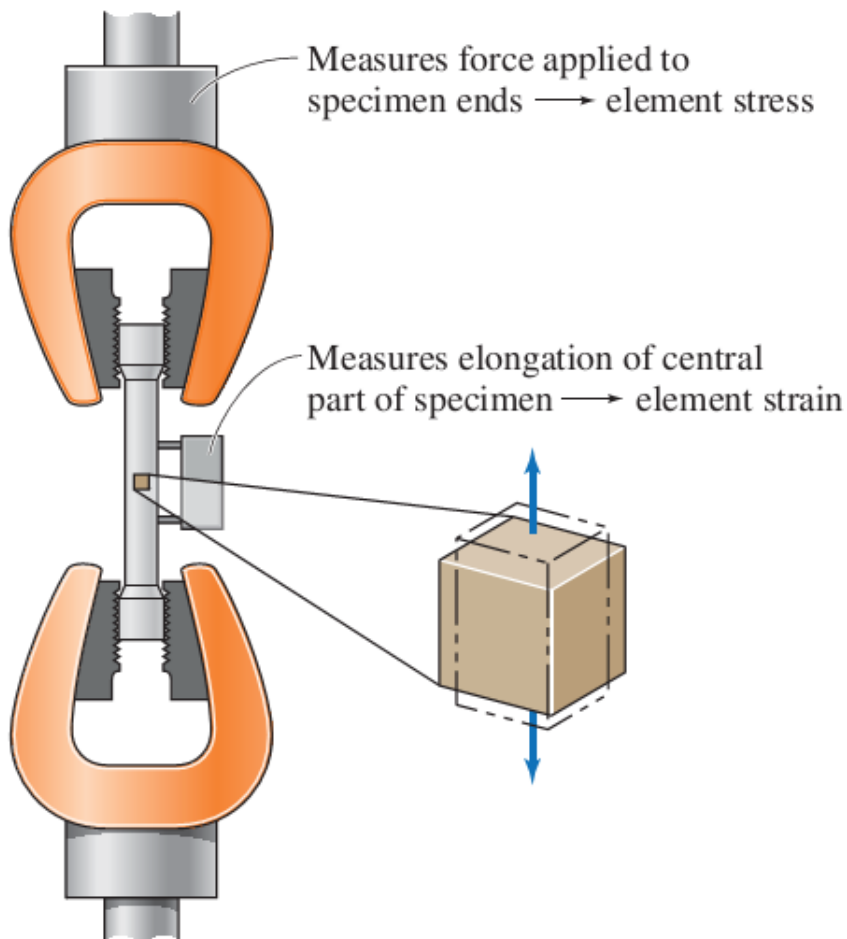
“ทฤษฎีความเสียหาย”

ทฤษฎีความเสียหายที่นิยมใช้ในการออกแบบประกอบด้วย

- ทฤษฎีความเค้นฉากสูงสุด (Maximum Normal Stress Theory – MNST)
- ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress Theory – MSST)
- ทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Energy Theory – DET)
- ทฤษฎีของคูลอมป์-มอร์ (Coulomb-Mohr Theory - CMT)

↓

$$\sigma_{eff}$$



“ทฤษฎีความเสียหาย - MNST”

ทฤษฎีความเค้นฉากสูงสุด – ใช้กับวัสดุเปราะ

(Maximum Normal Stress Theory – MNST)

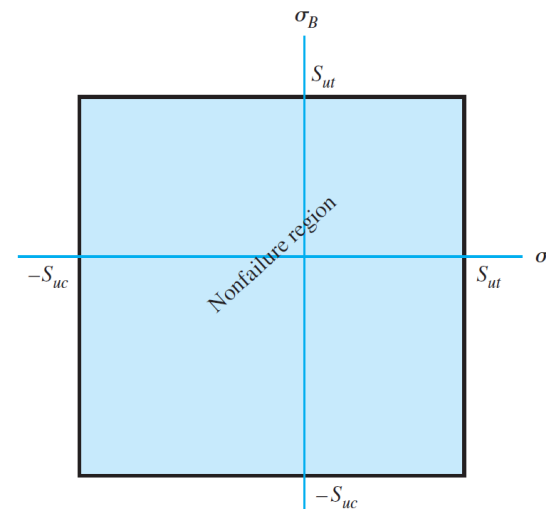
ระบุว่า “ความเสียหายของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นหลักตัวใดตัวหนึ่งที่มีค่าหรือขนาดสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่ามากกว่าค่าความต้านแรงที่ได้จากทดสอบดึงอย่างง่าย (uniaxial stress test)”

กล่าวคือ

$$\sigma_{\text{eff}} \geq \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

หรือ (โดยคิดเครื่องหมายทางพีชคณิต)

$$-S_{uc} < \sigma_{\text{eff}} < S_{ut}$$



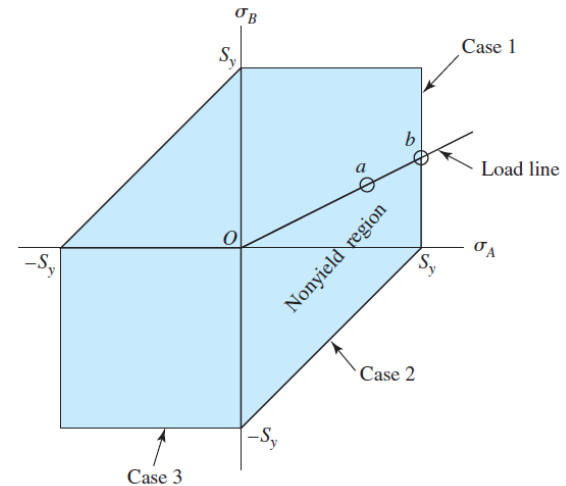
“ทฤษฎีความเสียหาย - MSST”

ทฤษฎีความเค้นฉากสูงสุด - ใช้กับวัสดุเหนียวยืด

(Maximum Shear Stress Theory - MSST)

ระบุว่า “ความเสียหายของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่ามากกว่าค่าเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากทดสอบดึงอย่างง่าย (uniaxial stress test)” กล่าวคือ

$$\sigma_{\text{eff}} = \tau_{\text{max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2}$$



หากกำหนดให้ $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ และ $\sigma_A \geq \sigma_B$

เราสามารถพิจารณาได้ 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 $\sigma_A \geq \sigma_B \geq 0$ โดย $\sigma_1 \geq \sigma_A$ และ $\sigma_3 = 0$

$$\sigma_A \geq S_y$$

กรณีที่ 2 $\sigma_A \geq 0 \geq \sigma_B$ โดย $\sigma_1 \geq \sigma_A$ และ $\sigma_3 = \sigma_B$

$$\sigma_A - \sigma_B \geq S_y$$

กรณีที่ 3 $0 \geq \sigma_A \geq \sigma_B$ โดย $\sigma_1 = 0$ และ $\sigma_3 = \sigma_B$

$$\sigma_B \leq -S_y$$

“ทฤษฎีความเสียหาย - DET”

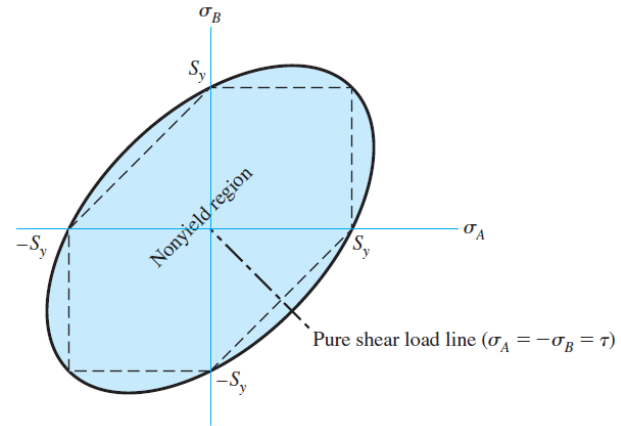
ทฤษฎีพลังงานแปรรูป - ใช้กับวัสดุเหนียวยืด

(Distortion-Energy Theory - DET)

ระบุว่า “ความเสียหายของวัสดุจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานความเครียดแปรรูปต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่เกิดขึ้นในวัสดุมีค่ามากกว่าพลังงานความเครียดแปรรูปต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ได้จากทดสอบดึงอย่างง่าย (uniaxial stress test)” กล่าวคือ

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma' \geq S_y$$

von Mises Stress



สำหรับความเค้นทั่วไป

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

และสำหรับความเค้นระนาบ

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B + \sigma_B^2)^{1/2}$$

หรือในรูปแบบพิกัด xyz

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2}$$

และสำหรับความเค้นระนาบ

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2}$$

“ทฤษฎีความเสียหาย - CMT”

ทฤษฎีพลังงานแปรรูป - ใช้กับวัสดุเปราะ

(Coulomb-Mohr Theory - CMT)

ทฤษฎีนี้ปรับปรุงจากทฤษฎี MNST

หากกำหนดให้ $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ และ $\sigma_A \geq \sigma_B$

เราสามารถพิจารณาได้ 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 $\sigma_A \geq \sigma_B \geq 0$ โดย $\sigma_1 \geq \sigma_A$ และ $\sigma_3 = 0$

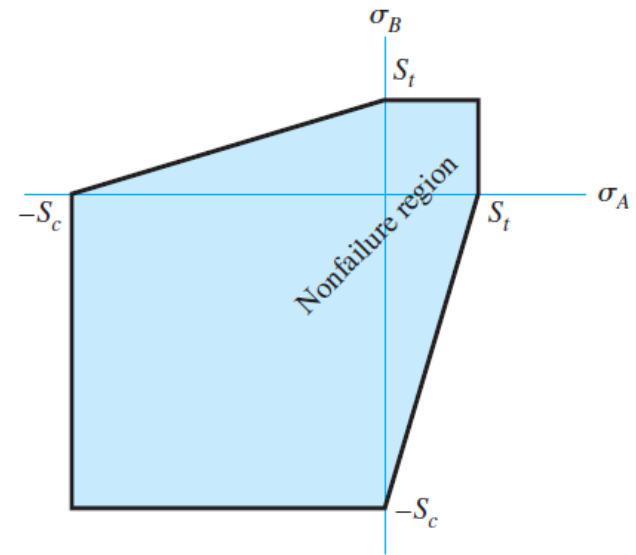
$$\sigma_A \geq S_t$$

กรณีที่ 2 $\sigma_A \geq 0 \geq \sigma_B$ โดย $\sigma_1 \geq \sigma_A$ และ $\sigma_3 = \sigma_B$

$$\frac{\sigma_A}{S_t} - \frac{\sigma_B}{S_c} \geq 1$$

กรณีที่ 3 $0 \geq \sigma_A \geq \sigma_B$ โดย $\sigma_1 = 0$ และ $\sigma_3 = \sigma_B$

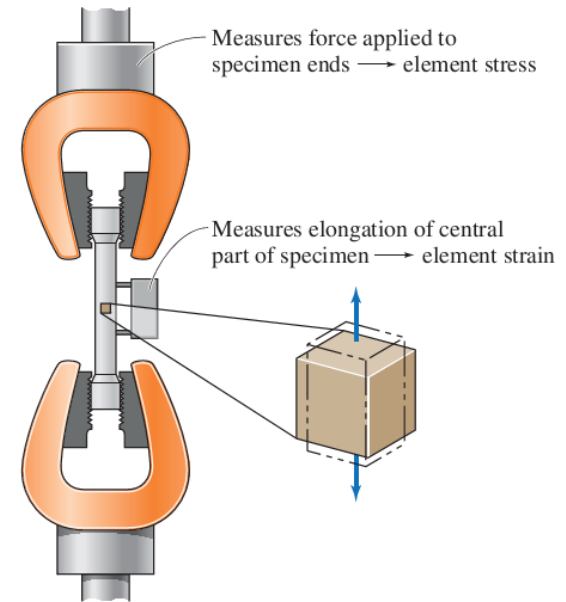
$$\sigma_B \leq -S_c$$



สรุปความสัมพันธ์

“ทฤษฎีความเสียหายสำหรับความเค้นเนื่องจากภาระสถิต”

Failure theory	Tension	Shear	Relationship
Max. normal stress	σ_y	$\sigma_y = \tau_y$	$\tau_y = \sigma_y$
Max. shear stress	$\tau = \frac{1}{2}\sigma_y$	τ_y	$\tau_y = 0.5\sigma_y$
Max. strain $\left(\nu = \frac{1}{4}\right)$	$\varepsilon = \frac{1}{E}\sigma_y$	$\varepsilon = \frac{5}{4}\frac{\tau_y}{E}$	$\tau_y = 0.8\sigma_y$
Octahedral shear	$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sigma_y$	$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}}\tau_y$	$\tau_y = 0.577\sigma_y$
Max. energy $\left(\nu = \frac{1}{4}\right)$	$U = \frac{1}{2E}\sigma_y^2$	$U = \frac{5}{4}\frac{1}{E}\tau_y^2$	$\tau_y = 0.632\sigma_y$
Distortion energy	$U^* = \frac{1+\nu}{3}\frac{\sigma_y^2}{E}$	$U^* = (1+\nu)\frac{\tau_y^2}{E}$	$\tau_y = 0.577\sigma_y$



เมื่อต้องการออกแบบและใช้ฟังก์ชันความเสียหาย

$$f(\sigma_{\text{eff}}, \text{Strength})$$

ให้ใส่ค่าอัตราคูณเพื่อความปลอดภัยเป็นส่วนของความต้านแรงในสมการตามแต่ละทฤษฎี กล่าวคือ

$$f(\sigma_{\text{eff}}, \text{Strength}/n)$$

สมการการออกแบบ-ปัจจัยที่สอดคล้องกับทฤษฎีความเสียหาย

Design equation

Design Equation:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{\textit{Strength}}{n}$$

การใช้ค่าอัตราคูณเพื่อความปลอดภัย

How to use factor of safety n

“ค่าอัตราคูณเพื่อความปลอดภัย”

Table 1.2: Safety factor characteristics D and E.

Table 1.1: Safety factor characteristics A, B, and C

Characteristic ^a		B			
A	C	vg	g	f	p
vg	vg	1.1	1.3	1.5	1.7
	g	1.2	1.45	1.7	1.95
	f	1.3	1.6	1.9	2.2
g	p	1.4	1.75	2.1	2.45
	vg	1.3	1.55	1.8	2.05
	g	1.45	1.75	2.05	2.35
	f	1.6	1.95	2.3	2.65
f	p	1.75	2.15	2.55	2.95
	vg	1.5	1.8	2.1	2.4
	g	1.7	2.05	2.4	2.75
	f	1.9	2.3	2.7	3.1
p	p	2.1	2.55	3.0	3.45
	vg	1.7	2.15	2.4	2.75
	g	1.95	2.35	2.75	3.15
	f	2.2	2.65	3.1	3.55
p	p	2.45	2.95	3.45	3.95

^a vg = very good, g = good, f = fair, and p = poor.
 A = quality of materials, workmanship, maintenance, and inspection.
 B = control over load applied to part.
 C = accuracy of stress analysis, experimental data or experience with similar parts.

Characteristic E ^a	D		
	ns	s	vs
ns	1.0	1.2	1.4
s	1.0	1.3	1.5
vs	1.2	1.4	1.6

^a vs = very serious, s = serious and ns = not serious
 D = danger to personnel
 E = economic impact

$$n_s = n_{sx}n_{sy} \tag{1.2}$$

where
 n_{sx} = safety factor involving characteristics A, B, and C
 A = quality of materials, workmanship, maintenance, and inspection
 B = control over load applied to part
 C = accuracy of stress analysis, experimental data, or experience with similar devices
 n_{sy} = safety factor involving characteristics D and E
 D = danger to personnel
 E = economic impact

“ค่าอัตราคูณเพื่อความปลอดภัย - **ข้อควรระวัง**”

Table 1.2: Safety factor characteristics D and E.

Table 1.1: Safety factor characteristics A, B, and

Characteristic ^a		B			
A	C	vg	g	f	p
vg	vg	1.1	1.3	1.5	1.7
	g	1.2	1.45	1.7	1.95
	f	1.3	1.6	1.9	2.2
g	p	1.4	1.75	2.1	2.45
	vg	1.3	1.55	1.8	2.05
	g	1.45	1.75	2.05	2.35
	f	1.6	1.95	2.3	2.65
f	p	1.75	2.15	2.55	2.95
	vg	1.5	1.8	2.1	2.4
	g	1.7	2.05	2.4	2.75
	f	1.9	2.3	2.7	3.1
p	p	2.1	2.55	3.0	3.45
	vg	1.7	2.15	2.4	2.75
	g	1.95	2.35	2.75	3.15
	f	2.2	2.65	3.1	3.55
p	p	2.45	2.95	3.45	3.95

^a vg = very good, g = good, f = fair, and p = poor.

A = quality of materials, workmanship, maintenance, and inspection.

B = control over load applied to part.

C = accuracy of stress analysis, experimental data or experience with similar parts.

Characteristic E ^a	D		
	ns	s	vs
ns	1.0	1.2	1.4
s	1.0	1.3	1.5
vs	1.2	1.4	1.6

^a vs = very serious, s = serious and

ns = not serious

D = danger to personnel

E = economic impact

$$n_s = n_{sx}n_{sy} \tag{1.2}$$

where

n_{sx} = safety factor involving characteristics A, B, and C

A = quality of materials, workmanship, maintenance, and inspection

B = control over load applied to part

C = accuracy of stress analysis, experimental data, or experience with similar devices

n_{sy} = safety factor involving characteristics D and E

D = danger to personnel

E = economic impact

DU