Mechanics of Solids Concept Document

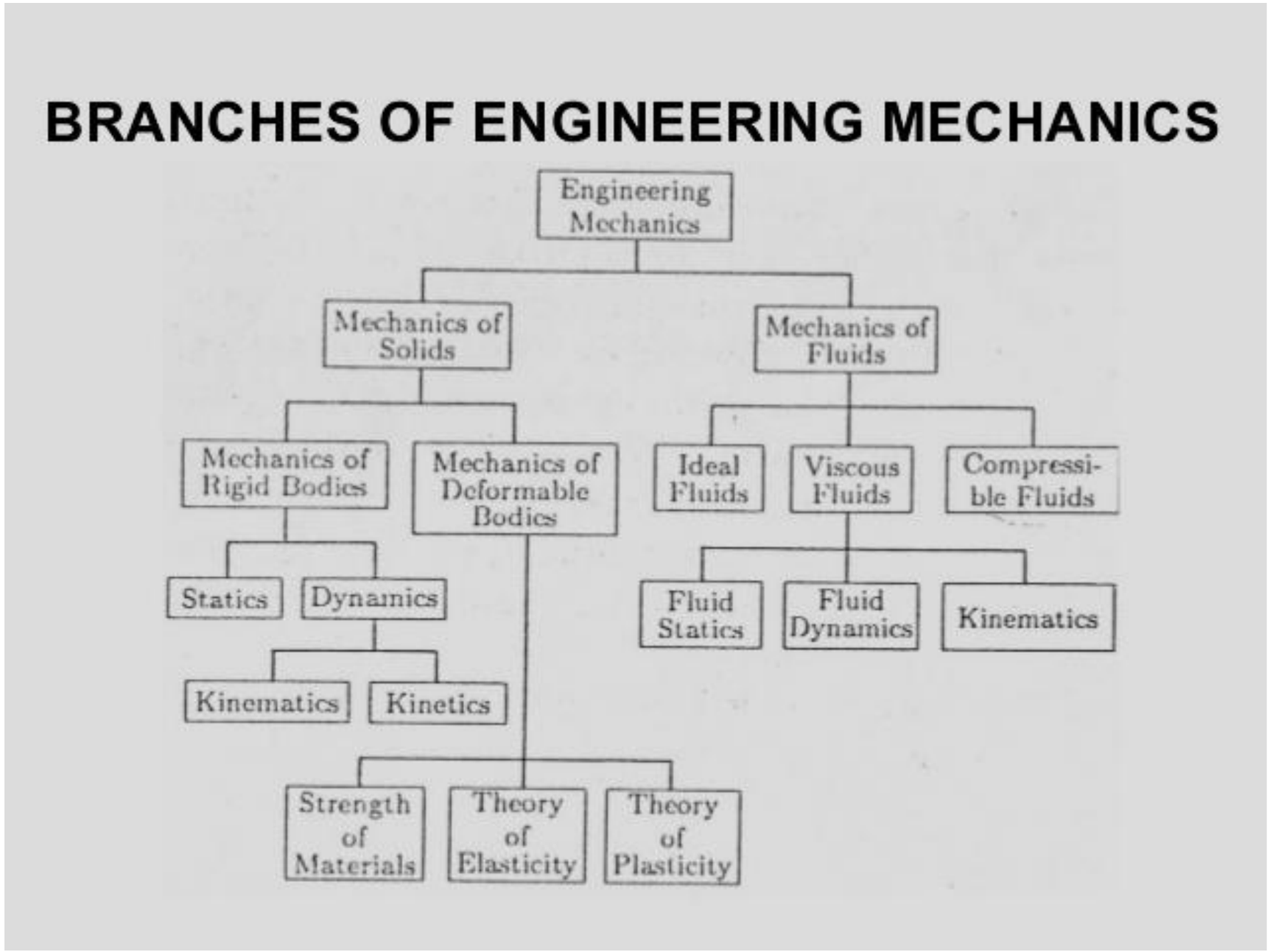
Pichet PINIT
FIET-KMUTT
2016

Concept

Discipline (วิทยาการ)
and
Subjects (รายวิชา)

แนวคิดรวบยอด

“เส้นทางกลศาสตร์วิศวกรรม”



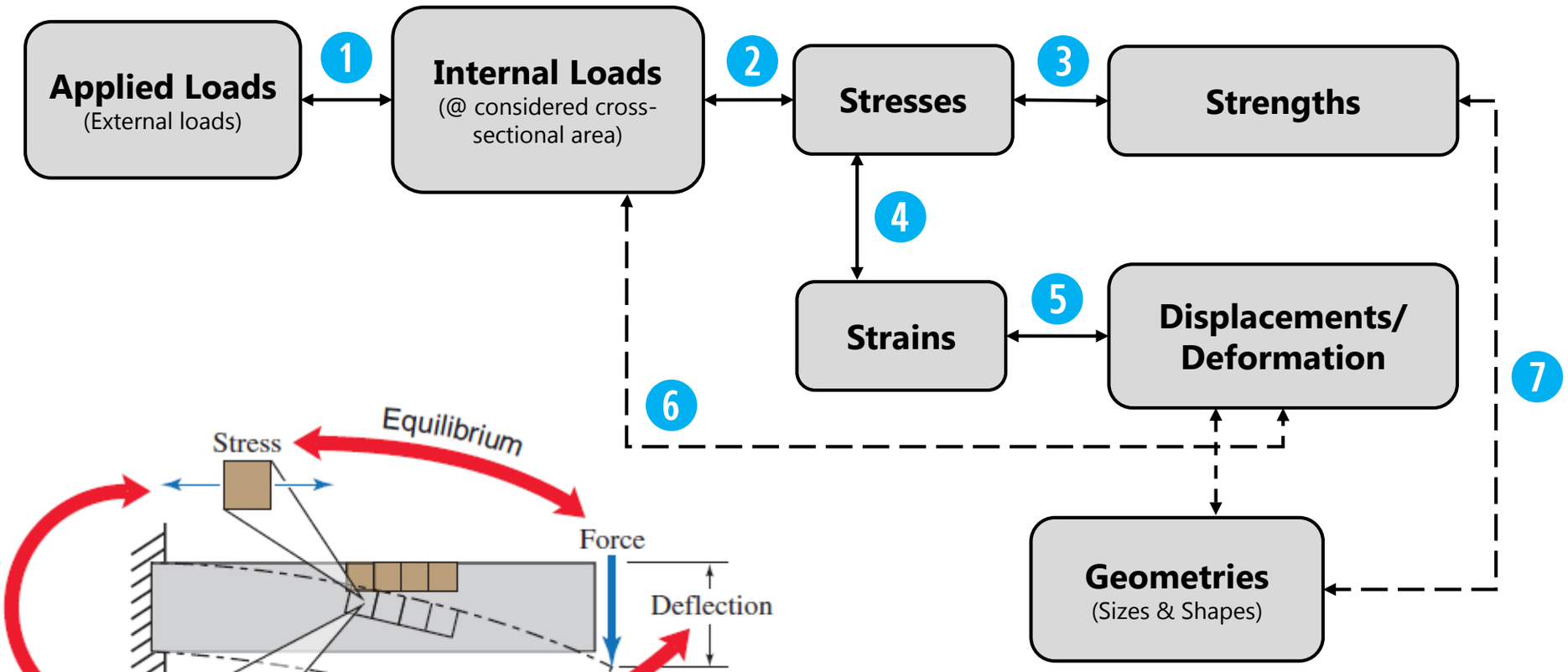
Source: in slide of Aamir Qaisrani, Working at University of Engineering & Technology (U.E.T) Taxila, Pakistan http://www.slideshare.net/aamirqaisrani/lecture-no1

Concept

Big Picture

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”



Adapted and Created from : Vable, M. (2010). Mechanics of Materials. 2nd ed. Michigan Technological University.

*เลขเหล่านี้**มิได้**หมายถึงลำดับ บอกเพียงตำแหน่งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคู่ปริมาณทางฟิสิกส์เท่านั้น

*เส้นประ หมายถึง ความสัมพันธ์คู่นั้นไม่สามารถแสดงได้ หากปราศจากความสัมพันธ์ที่แสดงด้วยเส้นทึบ

*ความสัมพันธ์เชิงตรรกะจะถูกใช้เป็นแนวทางในการพิสูจน์สูตรหรือสมการความเค้นพื้นฐาน และการวิเคราะห์ปัญหา

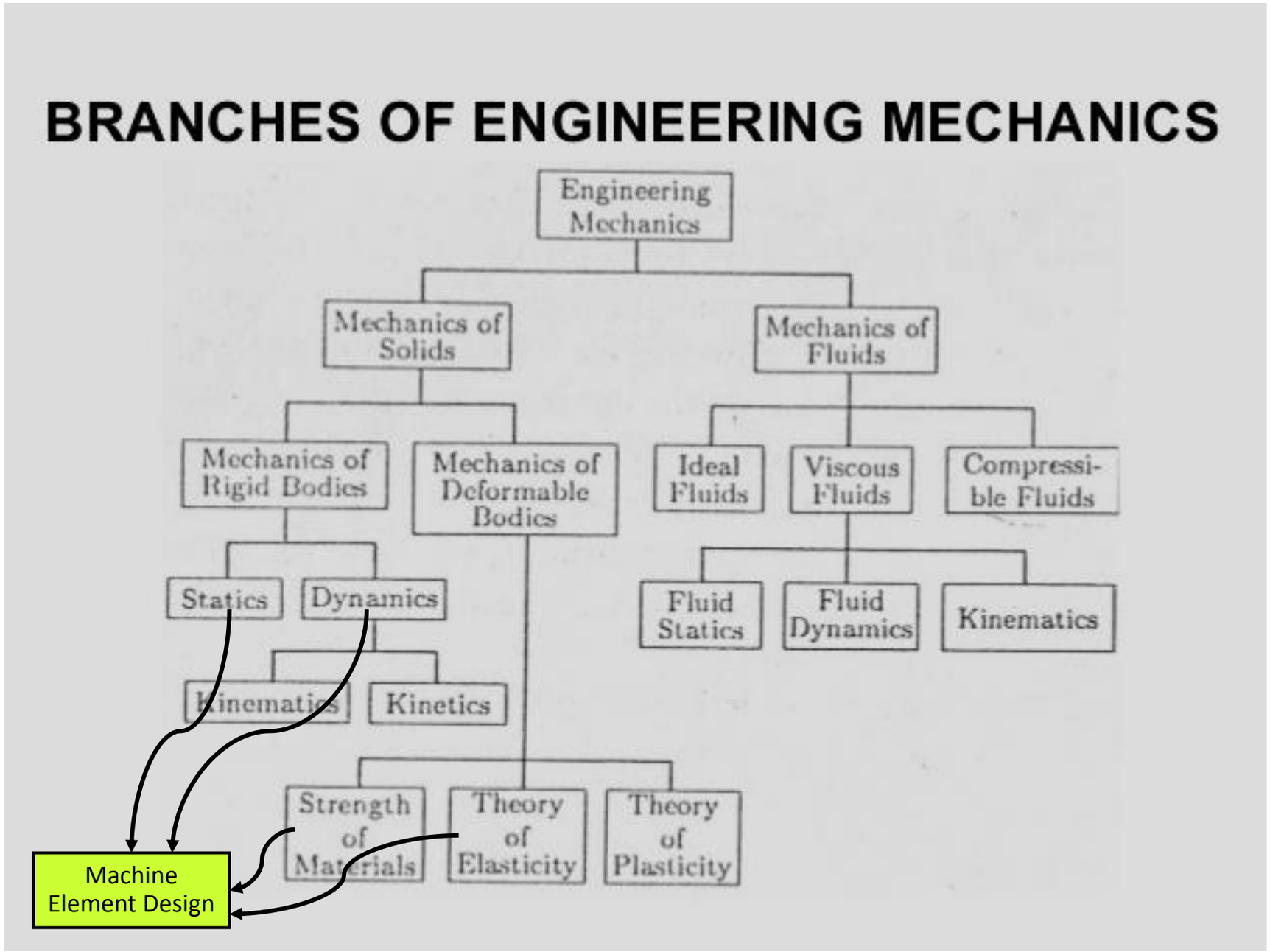
1. การสมดุล (equilibrium)
2. การสมดุลสถิตสมมูล (static equivalency)
3. การทดสอบทางกล และทฤษฎีความเสียหาย (mechanical tests and failure theories)
4. การทดสอบทางกล และแบบจำลองวัสดุ (mechanical tests and material models)
5. จลนศาสตร์หรือความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนรูป (kinematics or strain-displacement relations)
6. ความสอดคล้อง (compatibility) และความแกร่งเชิงเส้นและเชิงมุม (stiffness and rigidity)
7. ความหนาแน่นของความเค้น (stress concentration) และทฤษฎีความเสียหาย

Concept

Subjects

แนวคิดรวบยอด

“ว่าด้วย การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล”

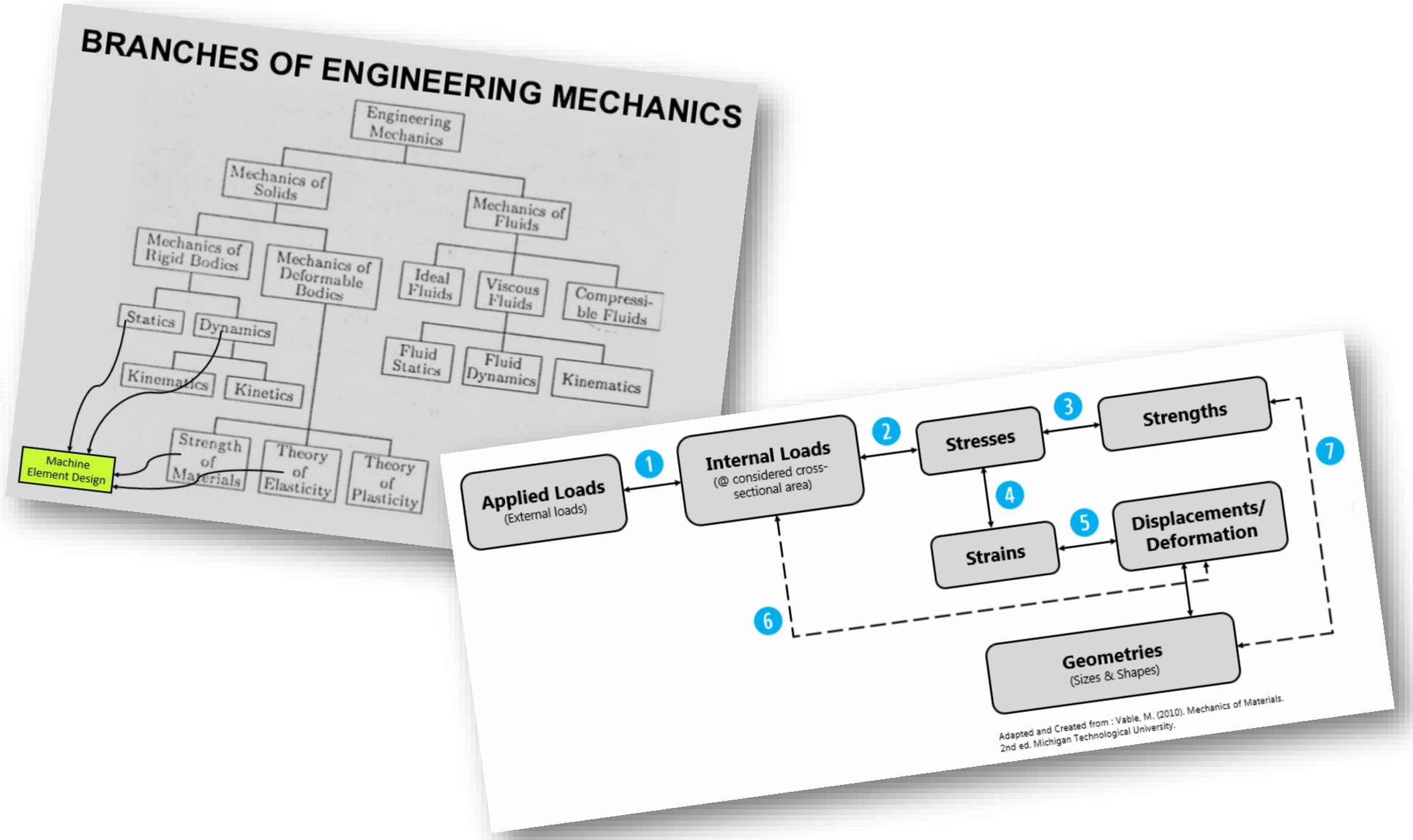


Concept

Relation

แนวคิดรวบยอด

“ว่าด้วย การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล”



1 เรียนในรายวิชา Physics ในส่วน Mechanics หรือ Statics และ Dynamics

2 6 7 เรียนในรายวิชา Mechanics of Materials/Strength of Materials และ Machine Element Design

3 4 5 เรียนในรายวิชา Machine Element Design และ Material Properties and Testing, และ Mechanics of Materials หรือบางส่วนใน Metallurgy และ Theory of Elasticity

Concept

1

Equilibrium

Applied Loads
(External loads)

Internal Loads
(@ considered cross-sectional area)

@ http://pichet-pinit.in.th/

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Statics

การสมดุล (equilibrium)

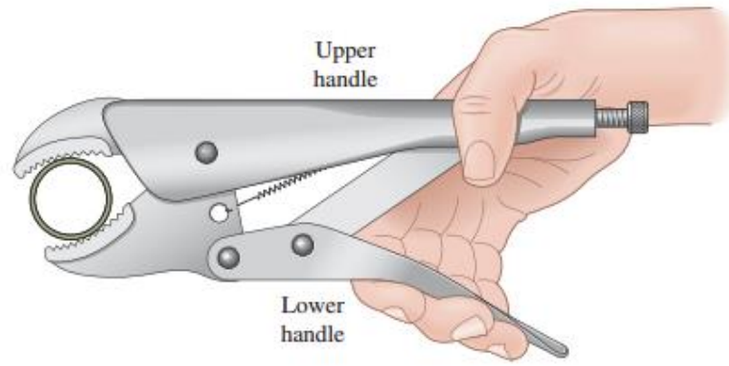
กลศาสตร์เป็นสาขาหนึ่งภายใต้ฟิสิกส์ที่เน้นการศึกษาวัตถุที่หยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ภายใต้การกระทำของภาระภายนอก สาขานี้แบ่งขอบเขตการศึกษาออกได้ 2 ด้าน คือ กลศาสตร์ของแข็งและกลศาสตร์ของไหล (ซึ่งไม่กล่าวในที่นี้) กลศาสตร์ของแข็งยังแบบขอบเขตการศึกษาออกได้อีก 2 ด้าน คือ กลสาสตร์วัตถุแข็งเกร็ง (Mechanics of rigid bodies) และกลศาสตร์ของวัสดุเปลี่ยนรูป (Mechanics of deformable bodies) ส่วนแรกมุ่งเน้นการศึกษาสภาพของวัตถุโดยสมมติให้วัตถุมีความแข็งเกร็ง กล่าว คือไม่เปลี่ยนรูปร่างทั้งก่อนและหลังการกระทำของภาระภายนอก ส่วนหลังมุ่งเน้นพฤติกรรมการตอบสนองของวัตถุต่อภาระภายนอก กล่าวคือ วัตถุจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างไร เมื่อมีภาระภายนอกมากระทำ ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปออกแบบวัตถุนั้น

กลสาสตร์วัตถุแข็งเกร็งยังถูกแบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ สถิตศาสตร์ (Statics) และพลศาสตร์ (Dynamics) ส่วนแรกจะมุ่งเน้นสภาพสมดุลของวัตถุ ขณะที่ส่วนที่สองเน้นการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยความเร่ง

สถิตศาสตร์เป็นรากฐานสำคัญของการศึกษากลศาสตร์ของวัสดุเปลี่ยนรูป ด้วยเหตุนี้ **แนวคิดสำคัญของสถิตศาสตร์จึงเป็นวิเคราะห์หาภาระภายใน ณ ส่วนใดส่วนหนึ่งในวัตถุ โดยอาศัยสมการสมดุล**

$$\sum \mathbf{F} = 0$$
$$\sum \mathbf{M}_O = 0$$

การสมดุลในสองมิติ (2D Equilibrium)



ภาระภายใน : N คือ แรงตั้งฉาก (Normal force) V คือ แรงเฉือน (Shearing force) และ M คือ โมเมนต์ดัด (Bending moment) รอบจุด O

Source : Steif, P. S., (2012). Mechanics of Materials. Pearson Higher Education: New Jersey.

Concept

1

Equilibrium

Applied Loads
(External loads)

Internal Loads
(@ considered cross-sectional area)

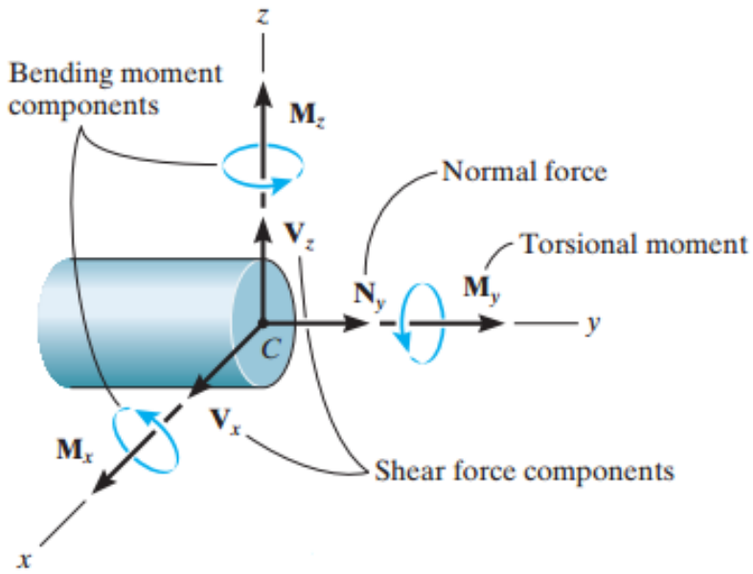
แนวคิดรวบยอด

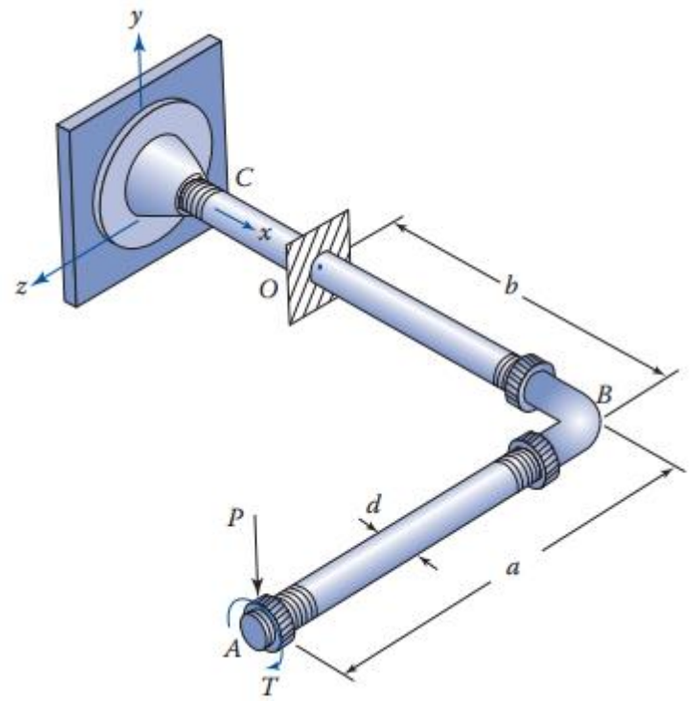
“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

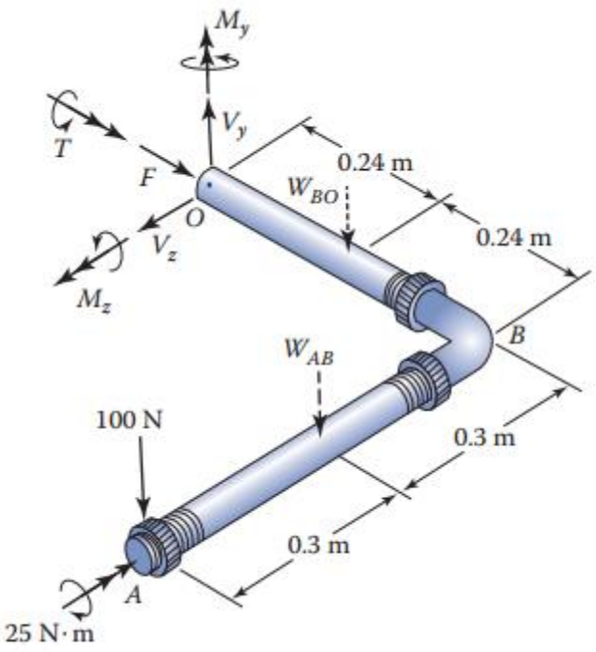
Statics

การสมดุลในสามมิติ (3D Equilibrium)

การสมดุลในสามมิติจะมีองค์ประกอบของภาระภายในเพิ่มเติมอีกซึ่งแสดงดังรูป พึงสังเกตว่า แรงตั้งฉากจะมีเพียงแรงเดียวเท่านั้น ส่วนแรงเฉือนนั้นจะมีด้วยกันสองแรง ตามแกนอ้างอิงที่กำหนด ทำนองเดียวกัน โมเมนต์ดัดจะมีสององค์ประกอบ ขณะที่โมเมนต์บิด (Torsional moment หรือ twisting moment) จะมีองค์ประกอบเดียวเท่านั้น







Source : Ugural, A. C., (2015). *Mechanical Design of Machine Components*. 2nd ed. CRC Press: Florida.

Concept

1

Equilibrium

Applied Loads
(External loads)

Internal Loads
(@ considered cross-sectional area)

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Statics

สมบัติเชิงเรขาคณิตของหน้าตัดของวัตถุ (Geometric Property of cross sectional area)

นอกจากการสมดุลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระภายนอกกับภาระภายในแล้ว สมบัติเชิงเรขาคณิตของหน้าตัดของวัตถุก็เป็นส่วนสำคัญเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องด้วยจะเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ความเค้นต่อไป

ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาเรื่องดังกล่าวในรายวิชาสถิตศาสตร์กล่าวคือ การศึกษาเรื่องการหาจุดศูนย์ถ่วง (center of gravity) จุดศูนย์กลางมวล (center of mass) จุดศูนย์กลางรูปทรงเราขาคณิต (centroid) พื้นที่ (area) โมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับพื้นที่ (moment of inertia for area) และโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมวล (moment of inertia for mass)

โมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับพื้นที่เป็นตัวแปรที่สำคัญมากในการหาความเค้นที่เกิดจากโมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด การคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับพื้นที่ต้องสอดคล้องกับแกนอ้างอิงที่ใช้

Geometric Properties of Line and Area Elements

Centroid Location	Centroid Location	Area Moment of Inertia
Circular arc segment	Circular sector area	$I_x=\frac{1}{4}r^4(\theta-\frac{1}{2}\sin 2\theta)$ $I_y=\frac{1}{4}r^4(\theta+\frac{1}{2}\sin 2\theta)$
Quarter and semicircle arcs	Quarter circle area	$I_x=\frac{1}{16}\pi r^4$ $I_y=\frac{1}{16}\pi r^4$
Trapezoidal area	Semicircular area	$I_x=\frac{1}{8}\pi r^4$ $I_y=\frac{1}{8}\pi r^4$
Semiparabolic area	Circular area	$I_x=\frac{1}{4}\pi r^4$ $I_y=\frac{1}{4}\pi r^4$
Exparabolic area	Rectangular area	$I_x=\frac{1}{12}bh^3$ $I_y=\frac{1}{12}hb^3$
Parabolic area	Triangular area	$I_x=\frac{1}{36}bh^3$

Concept

2

Static Equivalency

Internal Loads
(@ considered cross-sectional area)

Stresses

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Mechanics of Materials / Mechanics of Deformable Bodies

การวิเคราะห์ภาระในระดับต่าง ๆ ทางกลศาสตร์

การวิเคราะห์ภาระที่กระทำกับวัตถุมีอยู่ 3 ระดับ คือ

▶ ระดับระบบทางกล (SYSTEM level)

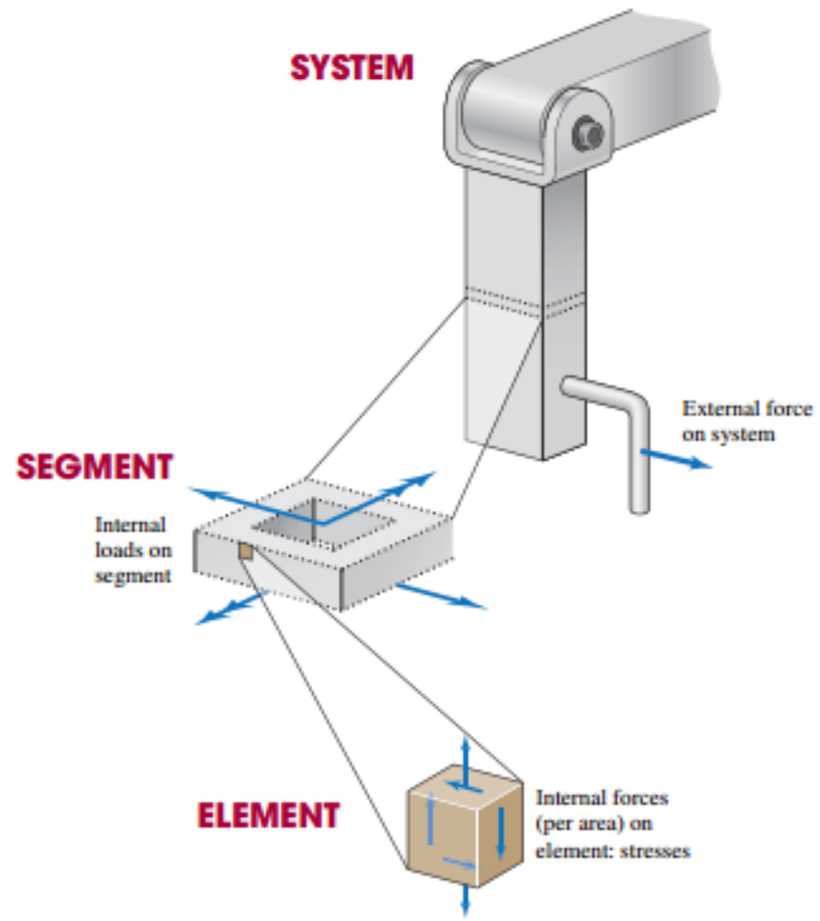
การวิเคราะห์ในระดับนี้ส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรายวิชาสถิตศาสตร์หรือพลศาสตร์โดยอาศัยสมการสมดุลเป็นสำคัญ การวิเคราะห์มุ่งเน้นการหาภาระที่กระทำต่อระบบ และต่อชิ้นส่วนแต่ละชิ้นในระบบนั้น ภาระภายในระบบจะถือว่าเป็นภาระภายนอกเมื่อพิจารณาชิ้นส่วนแต่ละชิ้นในระบบนั้น

▶ ระดับภาคส่วน (SEGMENT level)

การวิเคราะห์ในระดับนี้มุ่งเน้นการหาภาระภายในชิ้นส่วน ณ ส่วนตัดที่สนใจ (segment in question) เพื่อหาภาระภายในสูงสุด (maximum internal loads) เพื่อที่จะนำไปหาความเค้นและการออกแบบชิ้นส่วนนั้นต่อไป การวิเคราะห์ระดับนี้เราจะพบในรายวิชาสถิตศาสตร์เช่นเดียวกัน

▶ ระดับเอลิเมนต์หรือระดับหน่วยย่อย (ELEMENT level)

การวิเคราะห์ในระดับนี้จะพบในกลศาสตร์ของวัสดุ ซึ่งมุ่งเน้นการหาความเค้นสูงสุด (maximum stresses) ที่กระทำบนหน้าตัดที่พิจาณา (cross section in question) ที่สอดคล้องกับภาระภายในสูงสุด **ความเค้นสูงสุดจะถูกนำไปใช้ในทฤษฎีความเสียหายและหลักการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบชิ้นส่วนนั้นตามหลักการการออกแบบเพื่อความต้านแรง (design for strength)**



Source : Steif, P. S., (2012). Mechanics of Materials. Pearson Higher Education: New Jersey.

Concept

2

Static Equivalency

Internal Loads
(@ considered cross-sectional area)

↕

Stresses

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Mechanics of Materials / Mechanics of Deformable Bodies

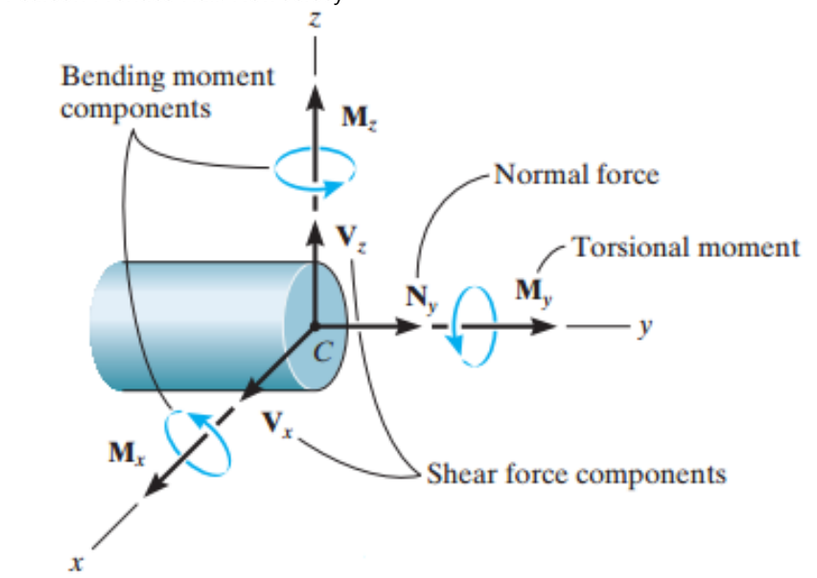
ประเภทภาระภายใน (Type of Internal loads)

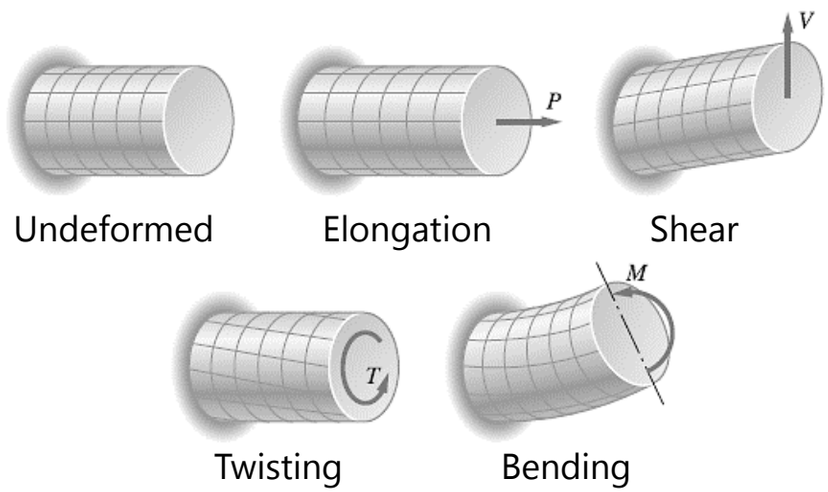
เมื่อมีภาระภายนอกมากระทำต่อระบบทางกลหรือชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งในระบบ ก็จะทำให้ระบบตอบสนองต่อภาระภายนอกนั้นในทุก ๆ ชิ้นส่วน เพื่อให้ระบบนั้นสามารถทำงานได้ตามหน้าที่ (function)

ชิ้นส่วนหนึ่ง ๆ จะตอบสนองต่อภาระภายนอก โดยอาศัยภาระภายในที่หาได้จากการสมดุล โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในกับการเปลี่ยนรูปดังนี้

ภาระภายใน	การเปลี่ยนรูป
แรงดึง/กด	**การยืดตัว** (elongation) หรือ**การหดตัว** (contraction)
แรงเฉือน	**การโย้ตัว**/เอนตัว
โมเมนต์บิด	**การบิดตัว**/หมุนตัว
โมเมนต์ดัด	**การดัดตัว**/โก่งตัว

Source : Hibbeler, R. C., (2016). Engineering Mechanics: Statics. 14th ed. Pearson Prentice Hall: New Jersey





Source : Ugural, A. C., (2015). *Mechanical Design of Machine Components*. 2nd ed. CRC Press: Florida.

Concept

2

Static Equivalency

Internal Loads
(@ considered cross-sectional area)

↕

Stresses

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Mechanics of Materials / Mechanics of Deformable Bodies

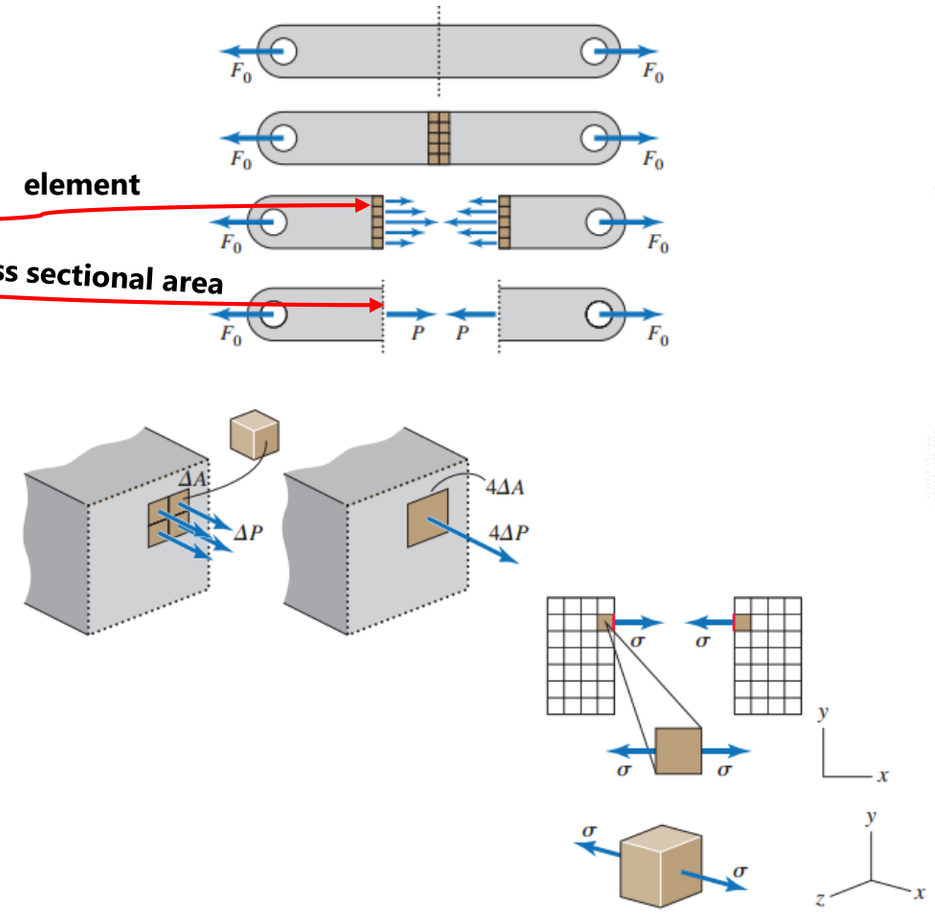
ความเค้น (Stresses)

สถิตศาสตร์และพลศาสตร์เน้นการหาแรงที่กระทำต่อวัตถุหลายชิ้นในโครงสร้างหรือกลไก ส่วนกลศาสตร์ของวัสดุเน้นการหาหรือตอบคำถามว่า **“แรงที่เกิดขึ้นในแต่ละวัตถุนั้นจะทำให้เกิดความเสียหายหรือเปลี่ยนรูปมากเกินไปหรือไม่และอย่างไร?”** คำถามนี้นำมาซึ่งการพิจารณาแรงที่กระทำต่อและการเปลี่ยนรูปของส่วนย่อยหรือเอลิเมนต์เล็ก ๆ ในเนื้อวัตถุ ที่รวมหรือประกอบเข้าด้วยกันเป็นหน้าตัดของวัตถุ ณ ตำแหน่งใด ๆ

พิจารณาเอลิเมนต์หนึ่ง พบว่า แรง ΔP จะกระทำบน ΔA หากรวมพื้นที่เอลิเมนต์ย่อย 4 เอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นหนึ่งพื้นที่ $\Delta 4A$ แรงที่กระทำต่อเอลิเมนต์รวมก็คือ $\Delta 4P$ อย่างไรก็ตามเมื่อเราพิจาณาอัตราส่วน $(\Delta 4P)/(\Delta 4A) = \Delta P/\Delta A$ จะเห็นได้ว่าเมื่อเรารวมทั้งหมดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดอัตราส่วนก็จะยังคงเดิม

เรานิยามความเค้น (stress) ว่า เป็นความเข้มของแรงภายในต่อพื้นที่หน้าตัดที่พิจารณาของวัตถุ ซึ่งก็คือ $\sigma = \Delta P/\Delta A$ เนื่องด้วยเมื่อเรารวมแรงย่อยเข้าด้วยกันทั่วทั้งพื้นที่ความเค้นที่ได้จึงเป็นความเค้นเฉลี่ย กล่าวคือ $\sigma_{\text{avg}} = P/A$

ในการวิเคราะห์ปัญหา เรามักแสดงเอลิเมนต์ในสองและสามมิติ ซึ่งกำหนดด้วยแกนอ้างอิง *x-y* หรือ *x-y-z* **เนื่องด้วยเอลิเมนต์ดังกล่าวอยู่ในสภาวะสมดุล จึงต้องวาดลูกศรแสดงความเค้นทั้งสองตามกฎของนิวตัน**



Source : Steif, P. S., (2012). Mechanics of Materials. Pearson Higher Education: New Jersey.

Concept

2

Static Equivalency

Internal Loads
(@ considered cross-sectional area)

Stresses

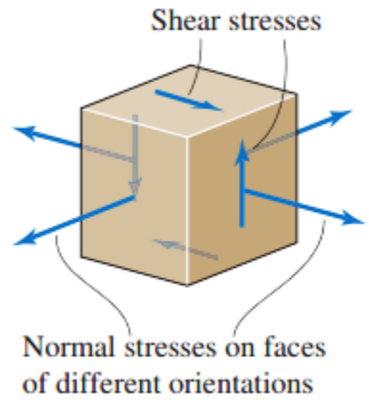
แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Mechanics of Materials / Mechanics of Deformable Bodies

ประเภทความเค้น (Type of Stresses)

เราสามารถแบ่งความเค้นออกได้เป็นสองประเภท คือ ความเค้นฉาก (Normal stress) และความเค้นเฉือน (Shearing stress) ความเค้นฉากมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ขณะที่ความเค้นเฉือนจะมีทิศทางขนานกับพื้นที่หน้าตัดที่พิจารณาเดียวกัน

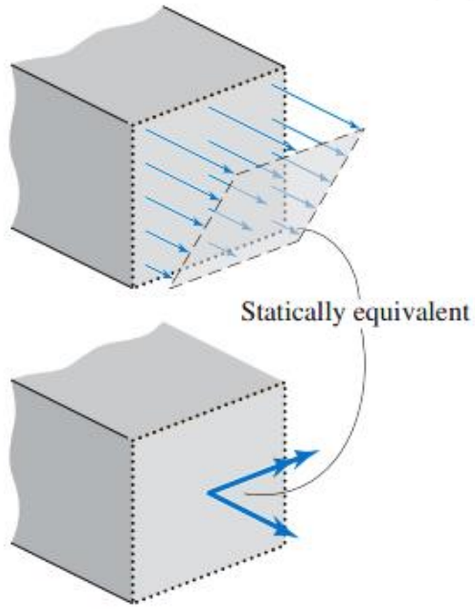


การสมดุลสถิตสมมูล (Static Equivalency)

ในสภาพจริงแล้ว ความเค้นบนเอลิเมนต์หนึ่ง ๆ จะมีค่าไม่เท่ากันและแปรเปลี่ยนไปตลอดทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด อย่างไรก็ตาม เมื่อรวมแรงบนเอลิเมนต์หนึ่ง ๆ เข้าด้วยกันทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดแล้ว ผลลัพธ์ก็จะมีค่าเท่ากับแรงหรือภาระภายใน ณ หน้าตัดนั้น ด้วยเหตุนี้บางครั้งเราอาจเรียก ภาระภายในว่า เป็น ผลลัพธ์ของความเค้น (stress resultant) หากกล่าวให้เข้าใจได้โดยง่ายก็คือ เราสามารถเปลี่ยนกลับไปมาระหว่างแรงภายในกับความเค้น ณ หน้าตัดที่พิจารณา โดยผลลัพธ์ยังคงเหมือนเดิม ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่า การสมดุลสถิตสมมูล ตัวอย่าง เช่น

$$P = \sum \Delta P = \int_A dP = \int_A \sigma \, dA$$

อย่างไรก็ตาม พึงระลึกไว้ว่า ผลลัพธ์ของความเค้นอาจไม่ได้เป็นเพียงแค่แรงภายในอย่างเดียว อาจเป็นโมเมนต์ภายในเพิ่มเติมอีกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของความเค้นบนเอลิเมนต์ในภาพรวม ซึ่งก็จะสอดคล้องกับภาระภายในที่วิเคราะห์ในเรื่องการสมดุล



Source : Steif, P. S., (2012). Mechanics of Materials. Pearson Higher Education: New Jersey.

Concept

2

Static Equivalency

Internal Loads
(@ considered cross-sectional area)

↕

Stresses

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Mechanics of Materials / Mechanics of Deformable Bodies

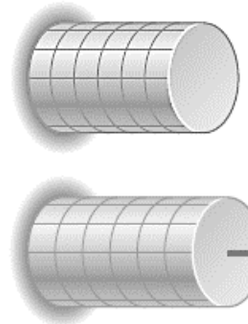
ประเภทความเค้นตามภาระภายใน (Type of stress due to internal loads)

เมื่อพิจารณาหลักการที่ได้เรียนมาแล้วเกี่ยวกับความเค้น เราจึงสรุปได้ว่า **ภาระภายในต่าง ๆ จะก่อนให้เกิดความเค้นดังตารางและรูป เช่นเดียวกัน ความเค้นก็จะแปลงกลับไปเป็นภาระภายนอกได้โดยอาศัยหลักการสมดุลสถิตสมมูล**

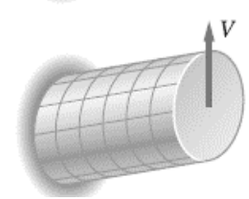
ชิ้นส่วนหนึ่ง ๆ จะตอบสนองต่อภาระภายนอก โดยอาศัยภาระภายในที่หาได้จากการสมดุล โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในกับการเปลี่ยนรูปดังนี้

ภาระภายใน	การเปลี่ยนรูป	ความเค้น
แรงดึง/กด	**การยืดตัว หรือการหดตัว**	ความเค้นฉาก
แรงเฉือน	**การโย้ตัว**/เอนตัว	ความเค้นเฉือน
โมเมนต์บิด	**การบิดตัว**/หมุนตัว	ความเค้นเฉือน
โมเมนต์ดัด	**การดัดตัว**/โก่งตัว	ความเค้นฉาก

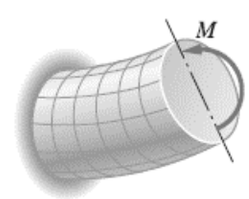
เราจะเห็นได้ว่า **ความเค้นประเภทเดียวกันสามารถรวมกันได้ (combined stresses) ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล** เนื่องจากชิ้นส่วนหรือระบบทางกลรับภาระภายนอกที่ซับซ้อน



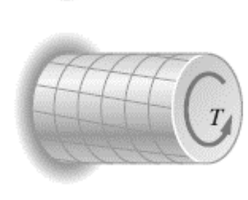
แรงดึง/กด $\sigma_{\text{avg}} = \dfrac{P}{A_{\perp}}$



แรงเฉือน $\tau_{\text{avg}} = \dfrac{P}{A_{\parallel}},\ \tau = \dfrac{VQ}{Ib}$



โมเมนต์ดัด $\sigma = \dfrac{My}{I}$



โมเมนต์บิด $\sigma = \dfrac{Tr}{J}$

ความเค้นเฉือน $\tau = VQ/Ib$ นั้นเป็นความเค้นที่ขึ้นพร้อม ๆ กับความเค้นดัด **โดยเฉพาะปัญหาเรื่องคานหรือเพลา** และเป็นความเค้นที่มีการกระจายตัวที่ไม่เท่ากันทั้งพื้นที่หน้าตัด

Concept

4

Material Model

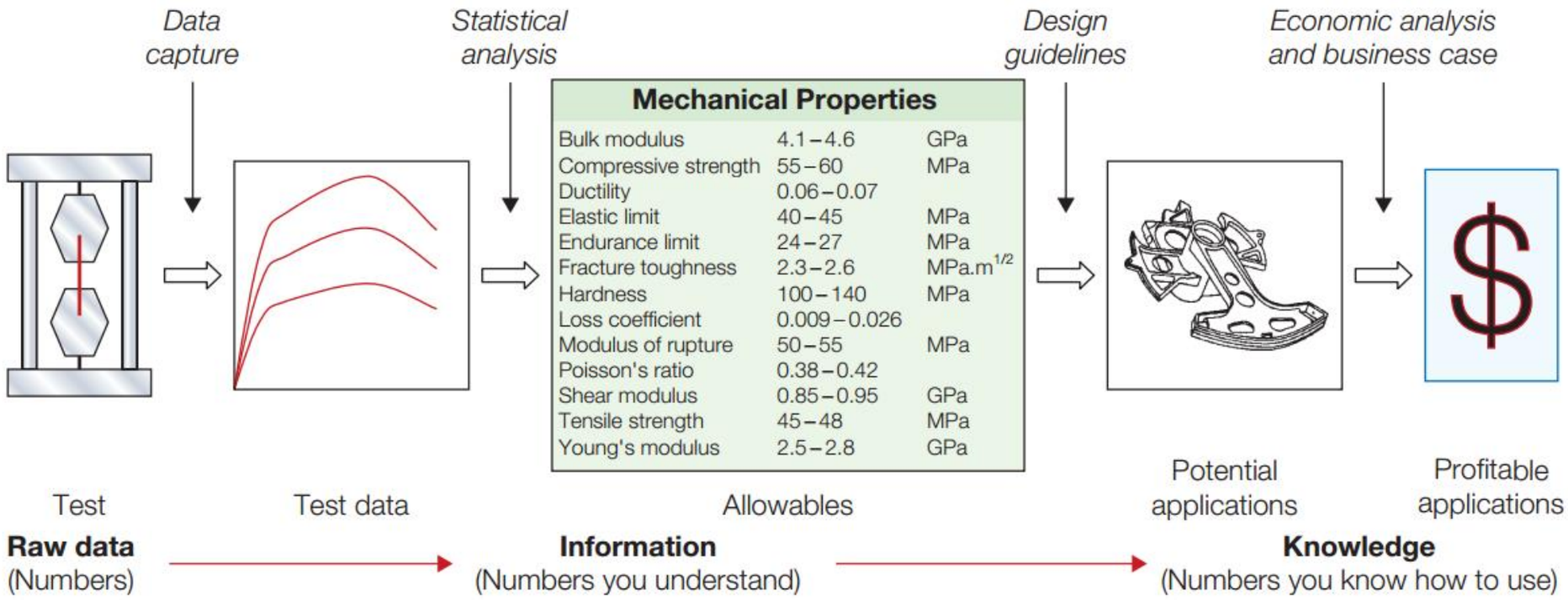
Stresses

Strains

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Material Models/ Constitutive Relation



Why we need them?

Source : Steif, P. S., (2012). Mechanics of Materials. Pearson Higher Education: New Jersey.

Concept

4

Material Model

Stresses

Strains

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

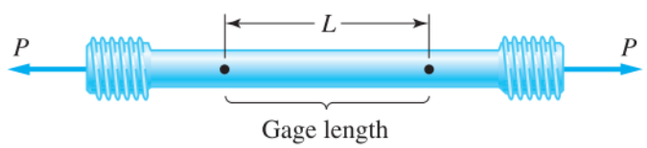
Material Models/ Constitutive Relation

การทดสอบวัสดุ Material Testing)

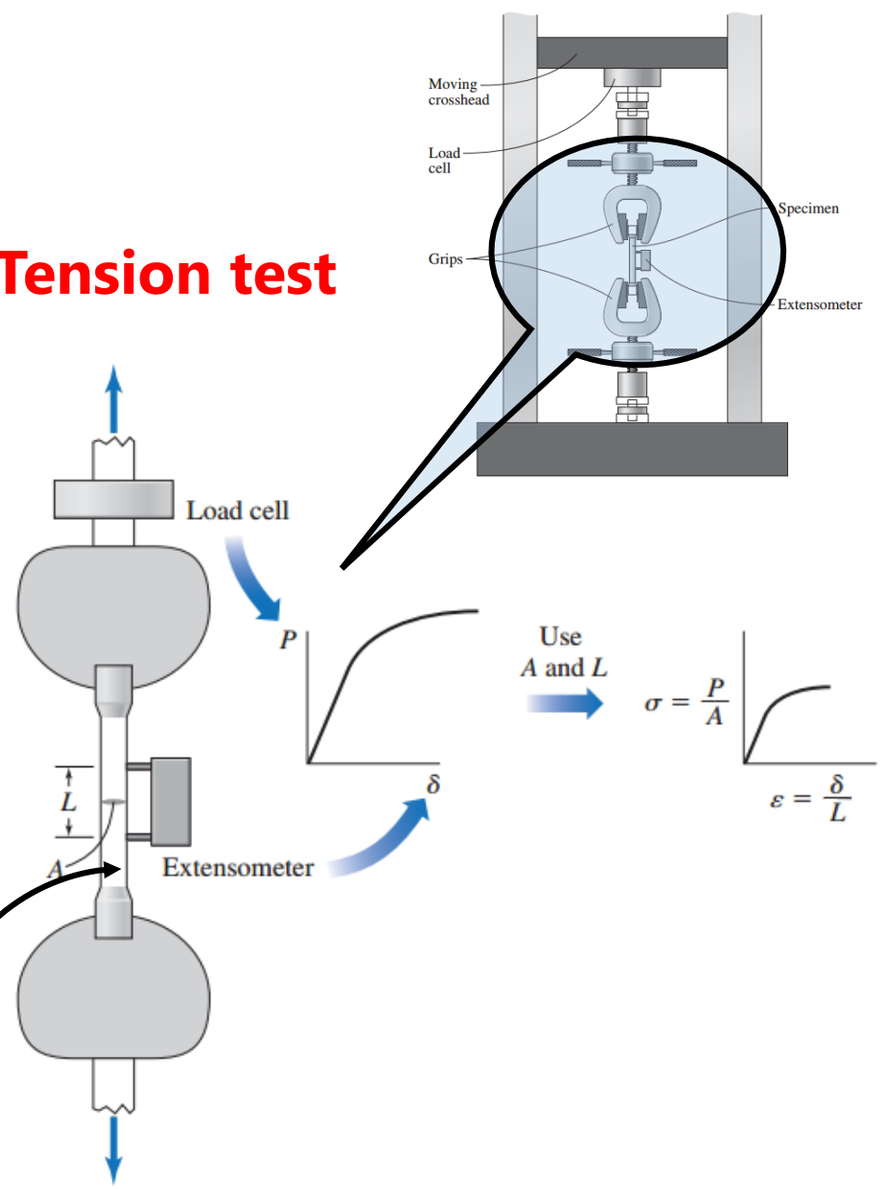
ความสามารถในการต้านทานแรงภายนอกโดยไม่ให้เกิดความเสียหายทั้งในลักษณะของการแตกหักเสียหาย (failure) หรือการเปลี่ยนรูปเกินพิกัดขึ้นอยู่กับความต้านแรง (strength) และการยืดหรือหดตัว (deformation) ทั้งในแนวแกนและแนวขวาง

กรณีของความต้านแรงสามารถหาได้โดยอาศัยวิธีการทดลอง วิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือการทดสอบดึงหรือกด (tension or compression test) การทดลองดังกล่าวจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ย (average normal stress) กับความเครียดเฉลี่ย (average normal strain) สำหรับวัสดุทางวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุประกอบ (composite materials)

ในการทดสอบ ชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุที่ต้องการทำสอบจะถูกสร้างให้มีขนาดมาตรฐานตามข้อกำหนดของ American Society of Testing and Materials (ASTM) DIN หรือ JIS และนำไปทดสอบในเครื่องทดสอบดึง



Tension test



Source : Steif, P. S., (2012). Mechanics of Materials. Pearson Higher Education: New Jersey.

Concept

4

Material Model

Stresses

Strains

แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

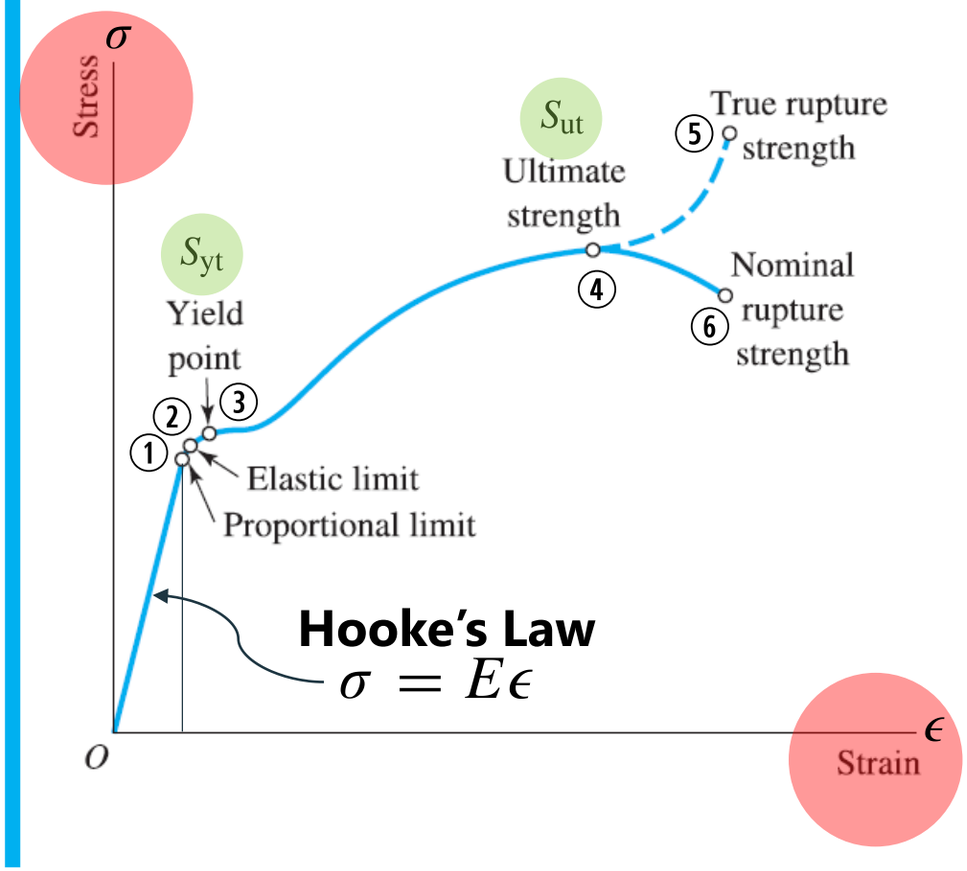
Material Models/ Constitutive Relation

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (Relation between stress and strain)

เมื่อทดสอบดึงแล้วก็จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นฉากเฉลี่ยกับความเครียดฉากเฉลี่ย

ตำแหน่ง	ความหมาย
①	จุดสุดท้ายที่กราฟเป็นเส้นตรง
②	จุดสุดท้ายของช่วงยืดหยุ่น หากนำแรงออกชิ้นทดสอบยังคงคืนกลับสู่สภาพเดิม
③	จุดที่เกิดการคราก หรือชิ้นทดสอบเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร ค่าความเค้นที่จุดนี้คือ ความต้านแรงคราก
④	จุดที่เริ่มเกิดคอคอด ค่าความเค้นที่จุดนี้คือความต้านแรงสูงสุด
⑤	จุดที่เกิดการแตกหักจริง (หาได้โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างแรงดึงกับพื้นที่หน้าตัดจริงในช่วงหนึ่ง ๆ ของการดึง)
⑥	จุดที่เกิดการแตกหักปรากฏหรือจุดแตกหักทางวิศวกรรมง (หาได้โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างแรงดึงกับพื้นที่หน้าตัดเดิมก่อนการดึง)

Stress-Strain curve



Source : Steif, P. S., (2012). Mechanics of Materials. Pearson Higher Education: New Jersey.

Concept

4

Material Model

Stresses

Strains

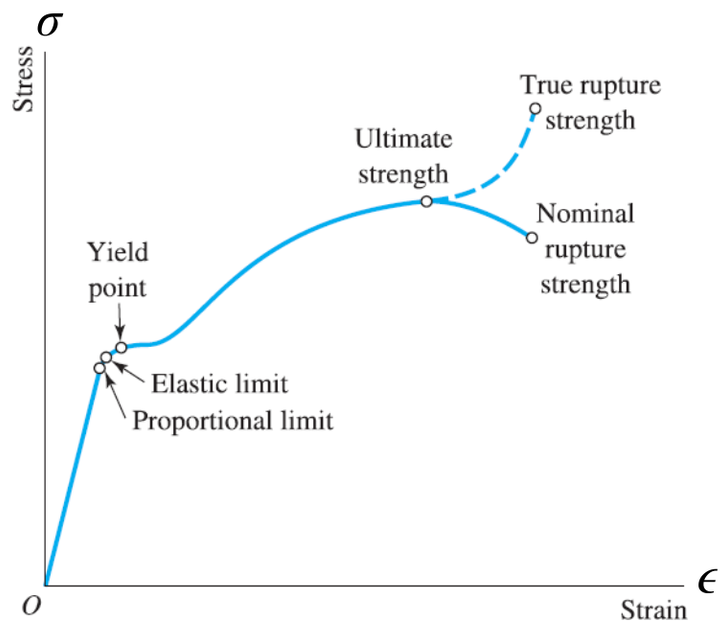
แนวคิดรวบยอด

“ความสัมพันธ์เชิงตรรกะในการวิเคราะห์โครงสร้าง/ชิ้นส่วน”

Material Models/ Constitutive Relation

สมบัติทางกลของวัสดุ (Mechanical Properties of Materials)

ด้วยการทดสอบดึงกับวัสดุหลากหลายประเภท เราสามารถกำหนดสมบัติทางกลของวัสดุได้ และ**สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล**



Tensile strength คือ Ultimate strength

Material Properties

Deterministic ASTM Minimum Tensile and Yield Strengths for Some Hot-Rolled (HR) and Cold-Drawn (CD) Steels [The strengths listed are estimated ASTM minimum values in the size range 18 to 32 mm ($\frac{3}{4}$ to $1\frac{1}{4}$ in). These strengths are suitable for use with the design factor defined in Sec. 1–10, provided the materials conform to ASTM A6 or A568 requirements or are required in the purchase specifications. Remember that a numbering system is not a specification.] *Source:* 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS No.	SAE and/or AISI No.	Process-ing	Tensile Strength, MPa (kpsi)	Yield Strength, MPa (kpsi)	Elongation in 2 in, %	Reduction in Area, %	Brinell Hardness
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

Source : Budynas, R. G. and Nisbett, J. K., (2015). Shigley’s mechanical engineering design. 10th ed. McGraw-Hill: New York.