

บทที่ 6

การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

1. บทนำ (introduction)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานที่สุดอย่างหนึ่งที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุต่างๆ ปกติการทดสอบแรงดึงจะใช้ชิ้นทดสอบตามแบบมาตรฐาน แต่ขณะเดียวกันก็สามารถใช้ชิ้นทดสอบแบบอื่นที่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเริ่มต้น โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกน ข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปได้แก่ จีดจำกัดการยืดหยุ่น (elastic limit) ร้อยละการยืด (percent elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) จีดจำกัดแบบสัดส่วน (proportional limit) ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (percent reduction in area) ความแข็งแรงดึง (tensile strength) จุดจำนน (yield point) และความแข็งแรงจำนน (yield strength) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการทดสอบแรงดึงแบบพิเศษคือการทดสอบการคราก (creep test) ซึ่งจะได้กล่าวในบทถัดไป กระบวนการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM มีดังนี้ E8 สำหรับวัสดุโลหะ D638 สำหรับวัสดุพลาสติก D2343 สำหรับวัสดุไฟเบอร์ D897 สำหรับวัสดุทอ D987 สำหรับวัสดุกระดาษ และ D412 สำหรับวัสดุยาง

2. ทฤษฎี (principles)

การทดสอบแรงดึงเป็นการดึงชิ้นทดสอบซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบตกอยู่ได้สภาวะการยืดและเป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูป โดยการเสียรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นทดสอบจากแรงที่กระทำ การตรวจวัดการเสียรูปจะวัดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นทดสอบเทียบกับขนาดเริ่มต้น นั่นคือการเสียรูปจะวัดจากความยาวของระยะทดสอบ (gauge length) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดสอบเทียบกับระยะทดสอบเริ่มต้น ระยะทดสอบเป็นช่วงความยาวมาตรฐานที่ใช้ในการวัดระดับการยืดหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ โดยความยาวระยะทดสอบมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงปกติเท่ากับ 2 นิ้ว

2.1 การเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวร

เมื่อชิ้นทดสอบโลหะได้รับแรงดึงในแกนเดียวจะเกิดการเสียรูปขึ้น และถ้าชิ้นทดสอบโลหะสามารถคืนตัวกลับไปสู่ขนาดเริ่มต้นเมื่อนำแรงที่กระทำออกไป นั่นคือโลหะมีการเสียรูปแบบคืนตัว (elastic deformation) ขนาดของการเสียรูปแบบคืนตัวของโลหะจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในระหว่างที่เกิดการเสียรูปแบบคืนตัว อะตอมของโลหะจะเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมในปริมาณที่ไม่มาก ดังนั้นเมื่อเอาแรงที่กระทำออกไปโลหะที่เกิดการเสียรูปแบบคืนตัว อะตอมของโลหะจะเคลื่อนกลับไปสู่ตำแหน่งเดิม ทำให้โลหะกลับไปสู่รูปทรงเดิม ถ้าโลหะเกิดการเสียรูปเป็นจำนวนมากจนมันไม่สามารถกลับไปสู่รูปทรงเดิมได้อย่างสมบูรณ์ แสดงว่าโลหะเกิดการเสียรูปแบบถาวร (plastic deformation) ในระหว่างที่เกิดการเสียรูปแบบถาวรอะตอมของโลหะเกิดการเคลื่อนออกไปอย่างถาวรจากตำแหน่งเดิม และจะคงอยู่ที่ตำแหน่งใหม่นี้แม้ว่าจะนำแรงที่กระทำออกไปก็ตาม บางโลหะสามารถเกิดการเสียรูปแบบถาวรได้มากโดยปราศจากการแตกร้าว ซึ่งถือเป็นสมบัติหนึ่งทางวิศวกรรมของโลหะที่นำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด ยกตัวอย่าง ความสามารถในการเกิดการเสียรูปแบบถาวรอย่างมากของเหล็ก ทำให้สามารถนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ได้ เช่น หลังคา ฝากระโปรง และประตู ด้วยการขึ้นรูปแบบการอัดด้วยแม่พิมพ์ทางกลโดยไม่เกิดการแตกหัก

2.2 แรงเค้นและความเครียด

- **แรงเค้น (stress)** ในการทดสอบแรงดึง น้ำหนักดึงจะแทนด้วยสัญลักษณ์ F ในหน่วยของปอนด์ กิโลกรัม หรือ นิวตัน ความแข็งแรงดึงคิดเป็นน้ำหนักที่ชิ้นทดสอบสามารถทนได้ต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด น้ำหนักเทียบกับพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางหน่วยเรียกว่า แรงเค้น (stress, σ) โดยแรงเค้นจะมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in.^2) หรือพาสกาล (Pa) ในหน่วยเมตริกน้ำหนักจะบันทึกเป็นกิโลกรัมแล้วแปลงเป็นนิวตัน ส่วนพื้นที่หน้าตัดจะคิดเป็นตารางเมตรซึ่งจะได้หน่วยของแรงเค้นเป็นนิวตันต่อตารางเมตรหรือพาสกาล (Pa) โดย 1 MPa เท่ากับ 145 lb/in.^2 และ 1000 lb/in.^2 เท่ากับ 6.985 MPa เมื่อพิจารณาแท่งทรงกระบอกที่มีความยาวเป็น l_0 และมีพื้นที่หน้าตัดเป็น A_0 ได้รับแรงดึงในทางเดียว F ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.1 จะได้แรงเค้น σ ที่กระทำกับแท่งโลหะดังสมการ

$$\text{แรงเค้น } \sigma = \frac{F \text{ (แรงการดึงในทางเดียวเฉลี่ย)}}{A_0 \text{ (พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น)}}$$

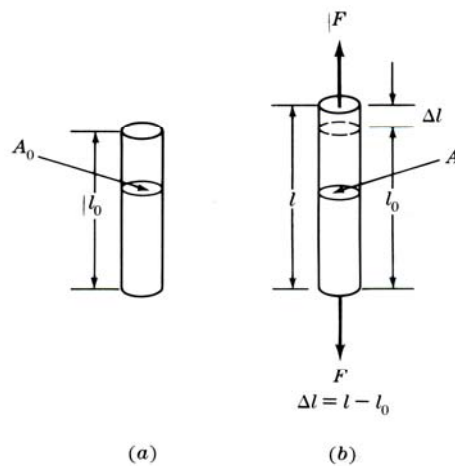
โดยแรงเค้นในหน่วยของ U.S เป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in² หรือ psi) และในหน่วยของ SI เป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m²) หรือ ปาสกาล (Pa) เมื่อ 1N/m² = 1 Pa

ส่วนการเปลี่ยนหน่วยจากปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นปาสกาลทำได้ดังนี้

$$1 \text{ psi} = 6.89 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ megapascal} = 1 \text{ MPa}$$

$$10^3 \text{ psi} = 1 \text{ ksi} = 6.89 \text{ Mpa}$$



รูปที่ 6.1 แสดงระยะยืดของแท่งโลหะทรงกระบอกที่รับแรงดึงทางเดียว F

(a) แท่งโลหะที่ไม่ได้รับแรง (b) แท่งโลหะรับแรงดึงทางเดียว F

ถ้าชิ้นทดสอบแรงดึงมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมสูตรคำนวณแรงเค้นจะได้เป็น

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

เมื่อ σ = แรงเค้น

F = แรงกระทำ

W = ความกว้างของหน้าตัดสี่เหลี่ยมของชิ้นทดสอบ

D = ความยาวของหน้าตัดสี่เหลี่ยมของชิ้นทดสอบ

และถ้าชิ้นทดสอบมีหน้าตัดเป็นวงกลมจะได้สูตรคำนวณเป็น

$$\sigma = \frac{F}{(\pi d^2 / 4)}$$

เมื่อ d = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ

ตัวอย่าง 6.1 หาค่าแรงเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นทดสอบหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 0.5 x 0.5 นิ้ว
รับแรงดึง 1000 ปอนด์

วิธีทำ
$$\sigma = \frac{1000 \text{ lb}}{0.5 \text{ in.} \times 0.5 \text{ in.}} = 4000 \text{ lb/in.}^2$$

ตัวอย่าง 6.2 หาค่าแรงเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นทดสอบหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
0.505 นิ้ว รับแรงดึง 1000 ปอนด์

วิธีทำ
$$\sigma = \frac{1000 \text{ lb}}{(\pi \times 0.505^2 / 4)} = 4993 \text{ lb/in.}^2$$

สำหรับชิ้นทดสอบทรงกระบอกมาตรฐานจะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.505 นิ้ว
ซึ่งจะได้พื้นที่หน้าตัด 0.200 ตารางนิ้ว และแรงกระทำสามารถแปลงเป็นแรงเค้นได้โดยการ
คูณแรงกระทำด้วย 5 จึงเป็นการสะดวกถ้าใช้ชิ้นทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.505 นิ้ว

ตัวอย่าง 6.3 แท่งทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 cm ใช้น้ำหนัก 2500 kg ให้คำนวณหา
ค่าแรงเค้นบนแท่งทดสอบในหน่วยเมกะพาสกาล (MPa)

วิธีทำ น้ำหนัก 2500 kg เมื่อคิดเป็นหน่วยของแรงกระทำจะต้องคูณด้วยแรงโน้มถ่วง
โลก 9.81 m/s² หรือ

$$F = ma = 2500 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 24500 \text{ N}$$

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 cm จะเท่ากับ 0.0125 m

ดังนั้นเมื่อคิดเป็นแรงเค้นบนชิ้นทดสอบจะได้เป็น

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{F}{A_0} = \frac{F}{(\pi/4) \times d^2} = \frac{24500 \text{ N}}{(\pi/4) \times 0.0125^2 \text{ m}^2} \\ &= 2.00 \times 10^8 \text{ Pa} = 200 \text{ MPa} \end{aligned}$$

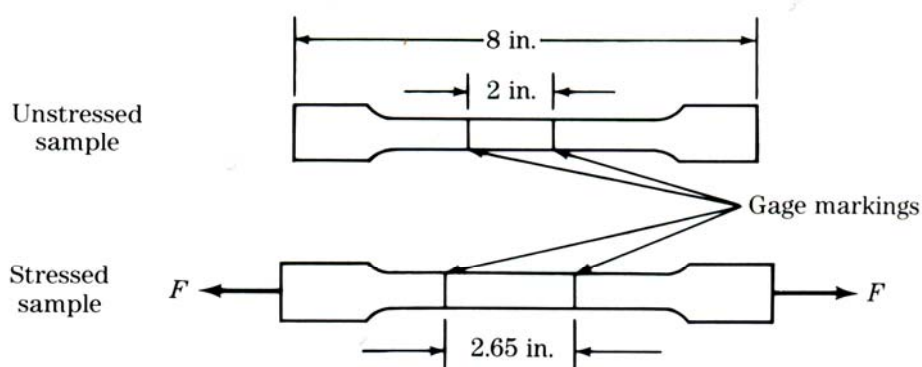
- ความเครียด (strain) เมื่อแท่งโลหะได้รับแรงดึงในทางเดียวดังแสดงในรูปที่ 6.1 เป็นเหตุให้แท่งโลหะเกิดการยืดออกในทิศทางของแรงนั้น การเคลื่อนนี้เรียกว่าความเครียด (strain) โดยนิยามความเครียดเป็นการยืดอันเนื่องมาจากแรงดึงทางเดียวที่กระทำกับชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบในทิศทางของแรงนั้นเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ดังนั้นก่อนทำการทดสอบต้องวัดพื้นที่หน้าตัดและระยะทดสอบเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ โดยระยะทดสอบเริ่มต้นจะทำการเป็นเครื่องหมายสองจุดบนชิ้นทดสอบ อุปกรณ์วัดการยืดหรือความเครียดจะใช้ในการวัดระยะยืดของชิ้นทดสอบในระหว่างการทดสอบ หรืออาจวัดจากผลต่างของระยะห่างของสองจุดข้างต้น ผลต่างระหว่างระยะทดสอบเริ่มต้นกับสุดท้ายเรียกว่าระยะยืด (elongation) หน่วยของระยะยืดใช้เป็นนิ้วหรือมิลลิเมตร และถ้านำค่าระยะยืดหารด้วยระยะทดสอบเริ่มต้นเรียกว่าความเครียด ดังนั้นความเครียดของแท่งโลหะดังแสดงในรูปที่ 6.1 สามารถหาได้ดังสมการ

$$\text{ความเครียด } \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l (\text{ผลต่างความยาวของชิ้นทดสอบ})}{l_0 (\text{ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ})}$$

เมื่อ l_0 คือความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

l คือความยาวชิ้นทดสอบหลังการดึง

โดยการกำหนดความยาวช่วงของการทดสอบเรียกว่าระยะทดสอบ (gauge length) ปกติยาว 2 นิ้ว และความยาวของชิ้นทดสอบทั้งหมดประมาณ 8 นิ้ว ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงชิ้นทดสอบแรงดึงแบบแผ่นก่อนและหลังการทดสอบ

หน่วยของความเครียดในระบบ U.S. เป็นนิ้วต่อนิ้ว (in/in) และในระบบ SI เป็นเมตรต่อเมตร (m/m) ดังนั้นความเครียดจึงเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ในทางอุตสาหกรรมจะเปลี่ยนหน่วยไปอยู่ในรูปของร้อยละความเครียด (percent strain) หรือ ร้อยละการยืด (percent elongation)

$$\text{strain} \times 100\% = \% \text{ elongation}$$

ตัวอย่าง 6.4 ชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กว้าง 0.5 นิ้ว หนา 0.04 นิ้ว และยาว 8 นิ้ว โดยมีระยะการทดสอบ 2 นิ้ว และหลังทดสอบ 2.65 นิ้ว ดังรูปที่ 6.2 ให้คำนวณหาความเครียดและร้อยละการยืดของชิ้นทดสอบ

วิธีทำ ความเครียด $\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{2.65 \text{ in.} - 2.00 \text{ in.}}{2.00 \text{ in.}} = \frac{0.65 \text{ in.}}{2.00 \text{ in.}} = 0.325$

$$\text{ดังนั้นร้อยละการยืด} = 0.325 \times 100\% = 32.5\%$$

ตัวอย่าง 6.5 ถ้าระยะทดสอบสุดท้ายของชิ้นทดสอบเท่ากับ 1.005 นิ้ว (25.53 มิลลิเมตร) โดยมีระยะทดสอบเริ่มต้นเท่ากับ 1.000 นิ้ว (25.4 มิลลิเมตร) จงหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้น

วิธีทำ $\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{1.005 \text{ in.} - 1.000 \text{ in.}}{1.000 \text{ in.}} = 0.005 \text{ (in./in.)}$

หรือ $= \frac{25.53 \text{ mm.} - 25.40 \text{ mm.}}{25.40 \text{ mm.}} = 0.005 \text{ (mm/mm)}$

การเสีรูปร่างในการทดสอบแรงดึงจะเกิดขึ้นในสองทิศทางสัมพันธ์กันคือด้านข้าง (แนวตั้งฉากกับแรงดึง) และตามแนวแกน (ตามแนวแรงดึง) อัตราส่วนการเสีรูปร่างด้านข้างต่อการเสีรูปร่างตามแนวแกนเรียกว่า อัตราส่วนพัวซอง (Poisson's ratio)

ตัวอย่าง 6.6 ถ้าความเครียดด้านข้างของชิ้นทดสอบเท่า 0.005 และตามแนวแกนเท่ากับ 0.010 ถามว่าอัตราส่วนพัวซองของชิ้นทดสอบมีค่าเท่าไร

วิธีทำ $P.R. = \frac{\text{ความเครียดด้านข้าง}}{\text{ความเครียดตามแนวแกน}} = \frac{0.005}{0.010} = 0.5$

*สำหรับวัสดุวิศวกรรมค่าพัวซองจะอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.7 *

- แรงเค้นและความเครียดเฉือน

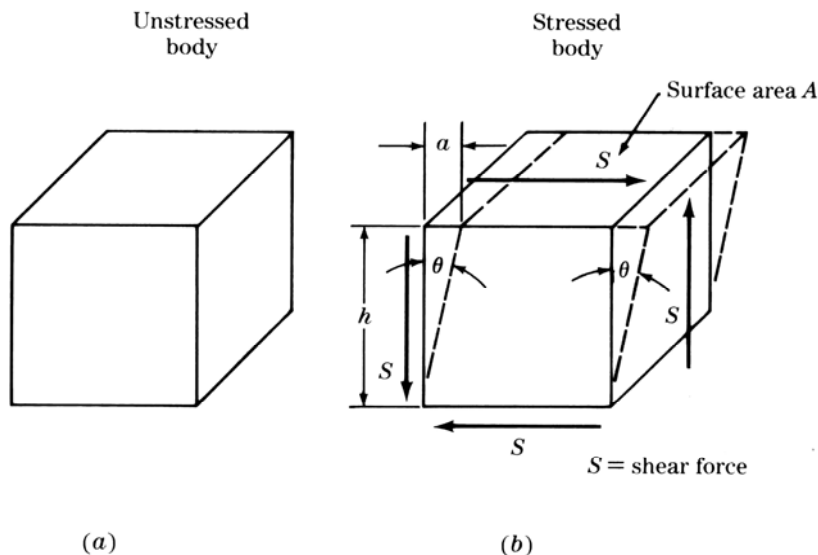
การเสีกรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรของโลหะและโลหะผสมเป็นการเสีกรูปภายใต้แรงเค้นดึงทางเดียว นอกจากนั้นยังมีวิธีการอื่นที่สำคัญในการทำให้โลหะเกิดการเสีกรูปได้แก่การกระทำภายใต้แรงเค้นเฉือน (shear stress) ซึ่งเป็นการกระทำของกลุ่มแรงเค้นเฉือนปกติต่อรูปทรงลูกบาศก์ดังแสดงในรูปที่ 6.3 คือแรงเฉือน S จะกระทำเหนือพื้นที่ผิว A โดยแรงเค้นเฉือน τ มีความสัมพันธ์กับแรงเฉือน S ดังสมการ

$$\tau \text{ (แรงเค้นเฉือน)} = \frac{S \text{ (แรงเฉือน)}}{A \text{ (พื้นที่ด้านบนที่ถูกแรงเฉือนกระทำ)}}$$

หน่วยที่ใช้สำหรับแรงเค้นเฉือนจะเป็นแบบเดียวกันกับแรงเค้นดึงทางเดียวคือในหน่วยของ U.S เป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in^2 หรือ psi) และในหน่วยของ SI เป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pa)

ความเครียดเฉือน γ นิยามในรูปของจำนวนของการเคลื่อนในทางเฉือน a ในรูปที่ 1.3 หารด้วยระยะที่สูงขึ้นไป h จากการกระทำในแนวเฉือน หรือ

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan \theta$$



รูปที่ 6.3 แสดงการรับแรงเฉือน S ของทรงลูกบาศก์บนพื้นที่ผิว A

สำหรับการเค้นคืบตัวเพียงอย่างเดียว สัดส่วนระหว่างการเค้นกับแรงจะเป็น

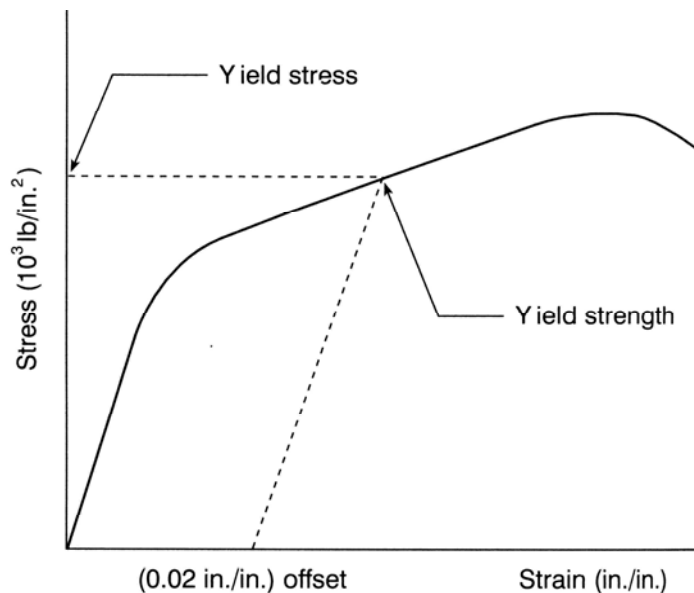
$$\tau = G\gamma$$

เมื่อ G คือแรงต่อการยืดแบบคืบตัว (elastic modulus)

แรงเค้นเค้นจะได้พิจารณาอีกครั้งในการเสีรูปถาวรของโลหะ

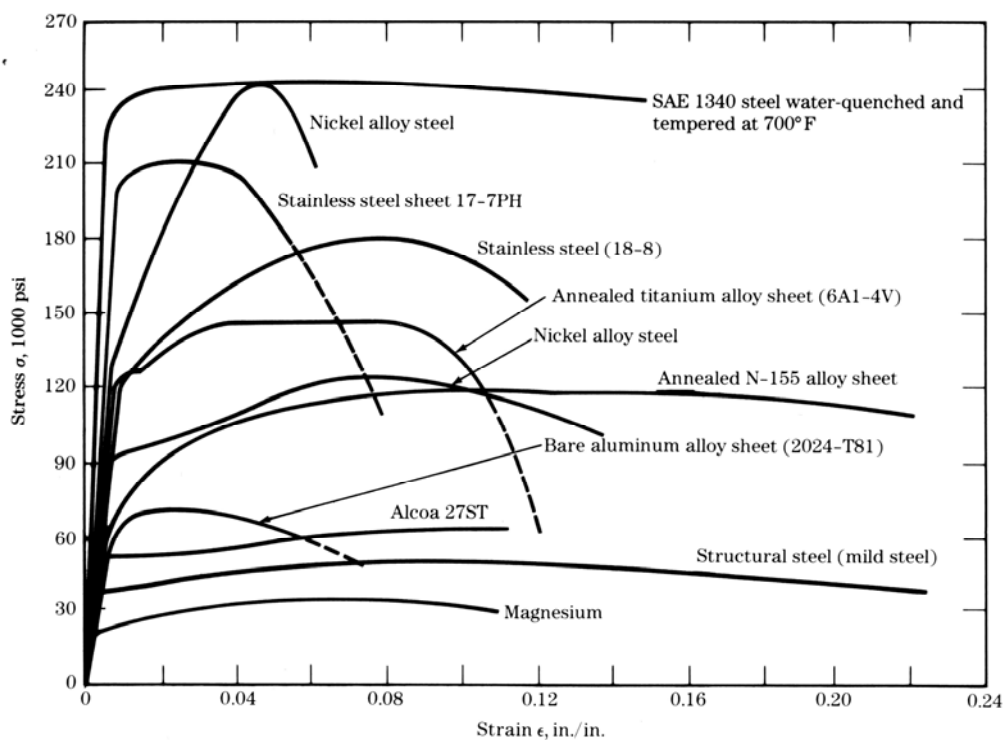
- กราฟแรงเค้นความเครียด (stress strain curve)

แรงเค้นเป็นความเข้มของแรงที่เกิดขึ้นกระจายอยู่ภายในวัสดุในระหว่างการทดสอบ ค่าแรงเค้นคำนวณได้จากแรงกระทำหรือน้ำหนักค้ำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น วัสดุที่กลับคืนรูปทรงเดิมโดยปราศจากการเสีรูปถาวรหลังจากที่นำแรงเค้นออกเรียกว่าวัสดุยืดหยุ่น และวัสดุเหล่านี้จะแสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุจะใช้กฎของฮุกส์ (Hook's law) ในการอธิบายพฤติกรรมและความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะมีลักษณะเป็นสัดส่วนกับแรงเค้นที่กระทำ ในกราฟแรงเค้นความเครียดช่วงยืดหยุ่นคือช่วงเริ่มแรกของกราฟจนถึงช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่น ช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่นคือตำแหน่งซึ่งแรงเค้นเพิ่มขึ้นและเริ่มเข้าสู่ช่วงของการเสีรูปถาวร ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 กราฟแรงเค้นความเครียด

ตัวอย่างกราฟแรงเค้นกับความเครียดของโลหะและโลหะผสมชนิดต่างๆ พบว่าการทำโลหะผสมโดยการผสมโลหะกับโลหะอื่นหรือกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะและการบำบัดทางความร้อน ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงและความเหนียวของโลหะ กราฟแรงเค้นกับความเครียดในรูปที่ 6.5 แสดงความแข็งแรงดึงสูงสุด (UTS) ที่แตกต่างกันมาก เช่น ธาตุโลหะแมกนีเซียมมีค่า UTS เท่ากับ 35 ksi (1 ksi เท่ากับ 1000 psi) ในขณะที่เหล็ก SAE 1340 ที่ผ่านการชุบแข็ง (quench) ในน้ำ และอบคืนตัวที่ 700°F (370°C) จะมีค่า UTS เท่ากับ 240 ksi



รูปที่ 6.5 กราฟแรงเค้นความเครียดของโลหะและโลหะผสมต่างๆ

ค่าสตีเฟนสของวัสดุหาได้จากการคำนวณค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นคืออัตราส่วนระหว่างค่าแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นต่อค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นจากแรงเค้นที่กระทำ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นหาได้จากค่าความชันของกราฟแรงเค้นความเครียดในช่วงที่เป็นเส้นตรง ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นรู้จักโดยทั่วไปในรูปของค่ายังโมดูลัส หลังจากนั้นฟิสิกส์ชาวอังกฤษคนแรกใช้ค่ายังโมดูลัสนี้ในวิทยาศาสตร์วัสดุ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเป็นการวัดค่าสตีเฟนส ของวัสดุ วัสดุที่มีสตีเฟนสจะเกิดการเสียรูปเพียงเล็กน้อยภายใต้แรงกระทำ

ตัวอย่าง 6.7 จงคำนวณค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่มีค่าความเครียด 0.0025 ภายใต้แรงเค้น 30000 ปอนด์/ตารางนิ้ว

วิธีทำ

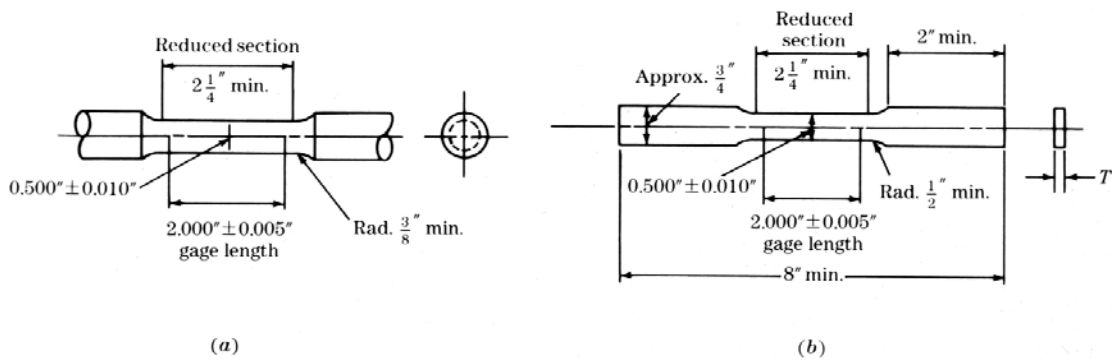
$$E = \text{แรงเค้น/ความเครียด}$$

$$= (30000 \text{ ปอนด์/ตารางนิ้ว}) / 0.0025$$

$$= 12 \times 10^6 \text{ ปอนด์/ตารางนิ้ว}$$

3. ชิ้นทดสอบแรงดึง (specimens)

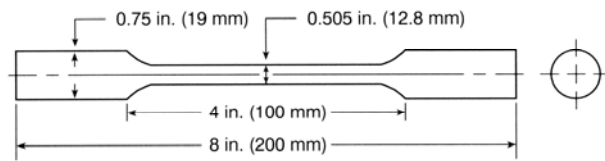
ชิ้นทดสอบที่ใช้สำหรับทดสอบแรงดึงมีอยู่หลายประเภทที่สำคัญ สำหรับโลหะที่มีหน้าตัดที่หนาเช่น โลหะอ่อนกลมปกติจะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอบชิ้นทดสอบ 0.5 นิ้ว (รูปที่ 6.6a) และสำหรับโลหะที่มีหน้าตัดบางกว่าเช่น โลหะแผ่น จะเตรียมชิ้นทดสอบให้มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (รูปที่ 6.6b) ในการทดสอบแรงดึงระยะทดสอบที่ใช้มากที่สุดคือ 2 นิ้ว



รูปที่ 6.6 ตัวอย่างชิ้นทดสอบมาตรฐานทั่วไปที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง

- (a) ชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบแท่งทรงกระบอก
- (b) ชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า

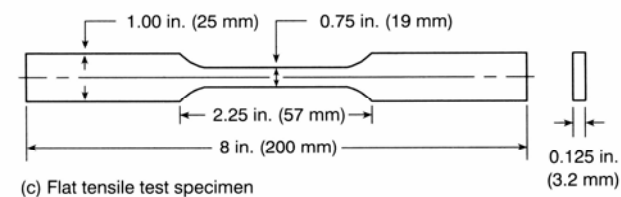
นอกจากนี้ยังมีชิ้นทดสอบอีกหลายแบบโดยมีรูปทรงของหน้าตัดชิ้นทดสอบที่แตกต่างกัน ได้แก่ หน้าตัดรูปวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้า อย่างไรก็ตามชิ้นทดสอบทั้งหมดควรมีรูปแบบของระยะทดสอบแบบเดียวกันตามมาตรฐาน โดยส่วนปลายของชิ้นทดสอบควรมีรูปแบบที่เหมาะสมกับหัวจับมาตรฐาน คือชิ้นทดสอบที่เป็นรูปทรงกระบอกควรทำเป็นแบบเรียบ รูปบ่า สลัก หรือรูยึด และส่วนปลายของชิ้นทดสอบควรยาวพอที่จะยึดด้วยหัวจับได้พอดี ดังตัวอย่างชิ้นทดสอบแรงดึงมาตรฐานที่นิยมใช้ในรูปที่ 6.7



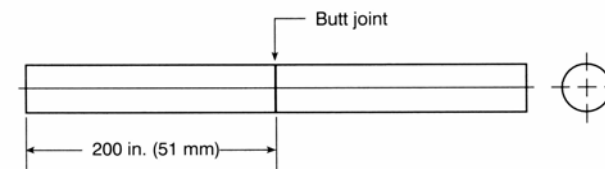
(a) Smooth-end round tensile test specimen



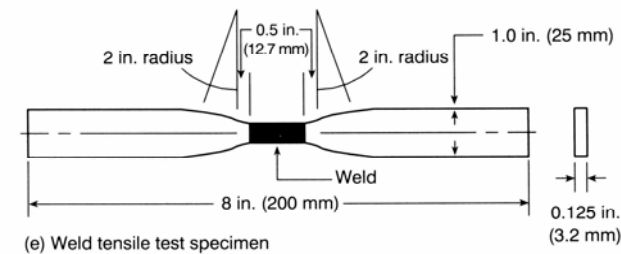
(b) Threaded-end tensile test specimen



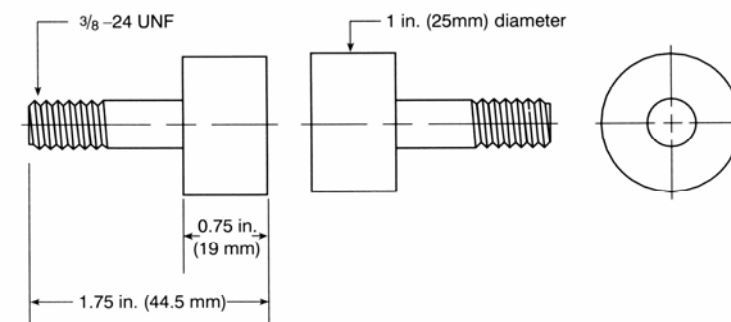
(c) Flat tensile test specimen



(d) Brazed or silver-soldered tensile test specimen



(e) Weld tensile test specimen

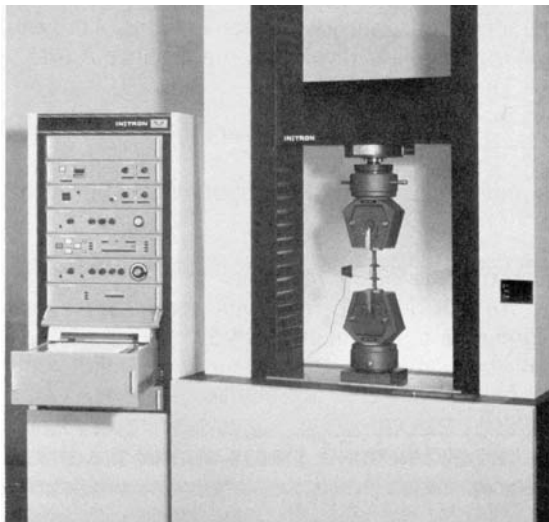


(f) Fixture tensile test of adhesives

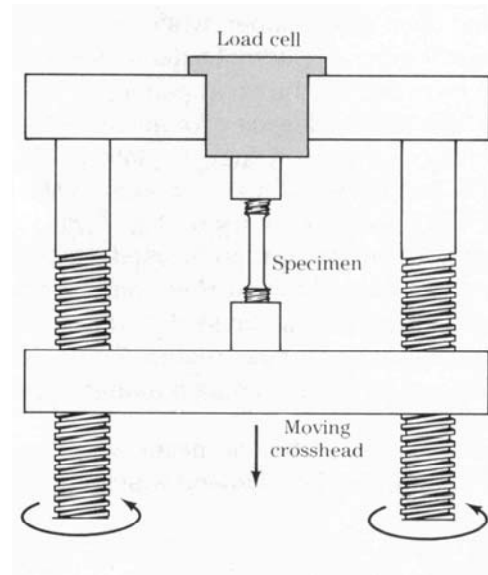
รูปที่ 6.7 ตัวอย่างชิ้นทดสอบแรงดึงมาตรฐานแบบต่างๆ

4. เครื่องมือทดสอบ (equipment)

การทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่าความแข็งแรงของโลหะและโลหะผสมจะใช้เครื่องทดสอบที่เรียกว่า เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal tester) ดังแสดงในรูปที่ 6.8 เป็นภาพเครื่องมือทดสอบแรงดึง และรูปที่ 6.9 เป็นภาพตัวอย่างแสดงโครงสร้างการทดสอบแรงดึงกับชิ้นทดสอบโลหะ

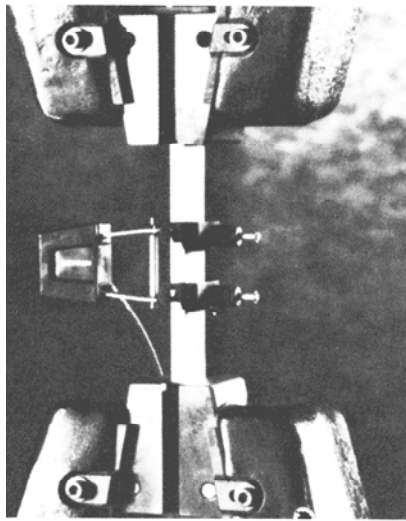


รูปที่ 6.8 เครื่องทดสอบแรงดึง และอุปกรณ์วัดระยะยืด



รูปที่ 6.9 ภาพการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง

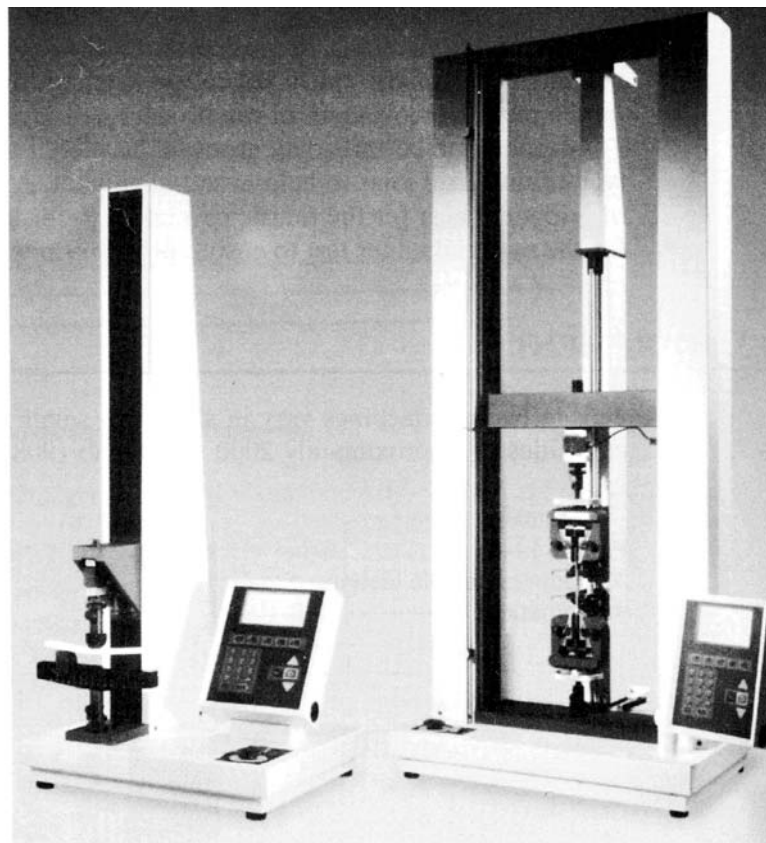
การทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่างๆ ประกอบด้วยหัวจับชิ้นทดสอบซึ่งมีหน้าที่หลักในการจับยึดชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยต้องสามารถรับและถ่ายแรงจากเครื่องสู่ชิ้นทดสอบได้เป็นอย่างดี และประเด็นสำคัญคือหัวจับต้องสามารถให้แรงผ่านชิ้นทดสอบตามแนวแกน ซึ่งต้องตั้งค่าการทดสอบและเลือกหัวจับที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อชิ้นทดสอบอยู่ในแนวที่ถูกต้องทั้งก่อนและระหว่างดำเนินการทดสอบ สำหรับวัสดุเหนียวให้ใช้หัวจับปากกว้างเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสแต่ไม่จำเป็นสำหรับวัสดุเปราะ ทั้งนี้เนื่องจากหัวจับจะบีบวัสดุแล้วทำให้เกิดการแตกหักที่ปลายชิ้นทดสอบแทนที่จะเกิดการแตกหักในช่วงของระยะทดสอบ หัวจับส่วนใหญ่จะมีช่วงของการเคลื่อนเพื่อจัดระเบียบหัวจับและชิ้นทดสอบให้อยู่ในแนวเดียวกัน หัวจับอาจเป็นแบบรู แบบช่อง



รูปที่ 1.6 อุปกรณ์วัดระยะยืด (extensometer) ในการทดสอบแรงดึง

การเลือกอุปกรณ์วัดความเครียดที่เหมาะสมจำเป็นต้องเลือกน้ำหนักหรือแรงกระทำที่เหมาะสม และจำนวนการอ่านข้อมูลของอุปกรณ์วัดความเครียดที่จะใช้อ่านค่าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจำนวนการอ่านนี้อาจขึ้นอยู่กับเวลา การเปลี่ยนแปลงแรงกระทำ การเปลี่ยนแปลงของความเครียด หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับสถานะการทดสอบ การอ่านค่าหลายครั้งจะทำให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เพราะถ้าจุดของข้อมูลห่างกันมากนักสำคัญการทดสอบอาจผิดพลาดได้ แต่อาจไม่สะดวกหรือไม่เหมาะสมในการบันทึกข้อมูลจากการทดสอบที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการบันทึกจุดข้อมูลมากขึ้นทำให้ได้กราฟแรงเค้นความเครียดที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

เครื่องทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปมีตั้งแต่ขนาดเล็ก ปานกลาง และแบบพกพา ซึ่งมีขนาด 2000- 5000 ปอนด์ (908 - 2270 กิโลกรัม) หรือใหญ่กว่านั้น เช่นเครื่องที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ หรือในอุตสาหกรรมซึ่งมีขนาด 300000 ปอนด์ (136200 กิโลกรัม) หรือมากกว่านั้น เครื่องทดสอบแรงดึงที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับแต่ละวัตถุประสงค์ของการทดสอบ ควรเลือกตามชนิดของวัสดุที่จะทำการทดสอบ รูปที่ 6.11 แสดงภาพเครื่องมือทดสอบแรงดึงโดยทั่วไป

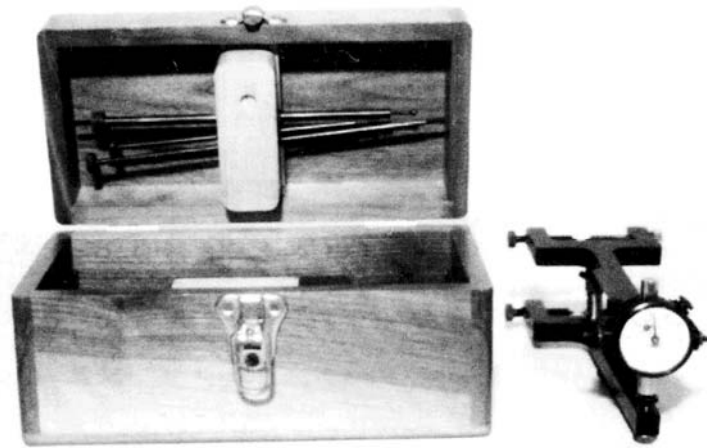


รูปที่ 6.11 เครื่องทดสอบแรงดึงและแรงอัด

5. กระบวนการทดสอบ (procedure)

การทดสอบแรงดึงใช้ในการวัดสมบัติการทนแรงดึงรวมถึงไปถึงความแข็งแรงดึงของวัสดุ โดยความแข็งแรงดึงหมายถึงค่าแรงเค้นดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุ ในการทดสอบแรงดึงต้องเตรียมชิ้นทดสอบให้ได้ขนาดและรูปทรงที่เหมาะสม และต้องทราบค่าพื้นที่หน้าตัดกับ

ปริมาณการเสียรูปและระยะทดสอบเริ่มต้นสามารถใช้หาค่าความเครียดได้ เมื่อขึ้นทดสอบเริ่มจำนวน ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเกิดความเสียหายให้นำอุปกรณ์วัดระยะยืด (Extensometer) ออก จากนั้นให้แรงกับวัสดุต่อเนื่องจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก ความแข็งแรงสูงสุดและความแข็งแรงการแตกหักสามารถหาได้ในช่วงบริเวณเหนือแรงเค้นจำนวน (yield stress) รูปที่ 6.12 ภาพอุปกรณ์วัดระยะยืดพร้อมอุปกรณ์เสริม



รูปที่ 6.12 อุปกรณ์วัดระยะยืดและอุปกรณ์เสริมในการทดสอบแรงดึง

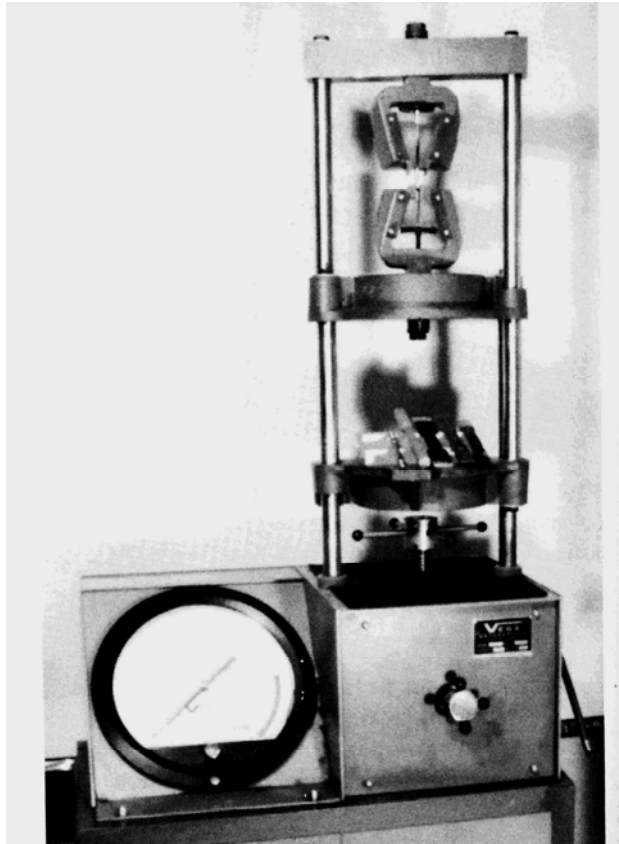
เพื่อให้ได้ผลลัพธ์การงานที่ถูกต้องจำเป็นต้องกลึงขึ้นทดสอบอย่างเที่ยงตรงและถูกต้องตามที่กำหนด รวมทั้งในช่วงของระยะทดสอบจะต้องมีความสม่ำเสมอโดยตลอด หน้าตัดที่สม่ำเสมอจะทำให้แรงเค้นที่เกิดขึ้นกระจายอย่างสม่ำเสมอและช่วยขจัดบริเวณที่ทำให้เกิดความเข้มข้นแรงเค้น (concentrated stress) ซึ่งอาจทำให้ผลการทดสอบผิดพลาด

ก่อนจะได้ผลลัพธ์ที่แท้จริงต้องทำการวัดขนาดของชิ้นทดสอบและเงื่อนไขต่างๆ ของการทดสอบ โดยการวัดระยะจะใช้คาลิเปอร์ ไม้บรรทัด หรือไมโครมิเตอร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นทดสอบและความแม่นยำที่ต้องการ เช่นการวัดขนาดที่มีความละเอียด 0.001 นิ้ว (0.01 มิลลิเมตร) จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงเช่นคาลิเปอร์ เป็นต้น และถ้า

การใช้เครื่องทดสอบแรงดึงผู้ดำเนินการทดสอบควรมีประสบการณ์และความรู้เกี่ยวกับประสิทธิภาพ การควบคุมและฟังก์ชันต่างๆ ของหน้าปัด รวมทั้งระบบคานและปุ่มต่างๆ ของเครื่องทดสอบ โดยก่อนทำการทดสอบผู้ทดสอบต้องรู้ว่างานใดใช้กับเครื่องทดสอบแบบใดและต้องรู้ว่าเครื่องทำงานอย่างไร จากนั้นทำการปรับอัตราเร็วของเครื่องมือให้เหมาะสมกับการทดสอบและตรวจดูว่าได้นำแรงที่ตกค้างออกจากเครื่องหรือยัง ทั้งนี้เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงานที่ตำแหน่งศูนย์ ก่อนใส่แรงกระทำต้องตรวจอุปกรณ์วัดระยะยืดว่าเป็นอิสระและได้ตั้งระยะการเคลื่อนที่เหมาะสม การทดสอบเครื่องเปล่าก่อนการทดสอบจริงจะทำให้ทราบถึงลำดับขั้นตอนการทดสอบที่จะทำให้สามารถดำเนินการทดสอบได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งสามารถประเมินระยะเวลาในการทดสอบตลอดจนวิธีการบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

อุปกรณ์วัดระยะยืดจะเลือกตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการ ซึ่งปกติจะใช้ strainometer ในการวัดปริมาณการยืดหรือการเสียรูปจากการรับแรง เมื่อทำการทดสอบแรงดึงต้องเลือก strainometer ที่เหมาะสม และต้องสามารถวัดอัตราการเพิ่มแบบทวีคูณ ก่อนการทดสอบให้นำอุปกรณ์วัดระยะยืดไปติดไว้บนชิ้นทดสอบเหนือเครื่องหมายระยะทดสอบที่ได้กำหนด จากนั้นตั้งค่ามาตรวัดของอุปกรณ์ไว้ที่ตำแหน่งศูนย์

หลังจากได้ตรวจเช็คเครื่องมือและเข้าใจถึงวิธีการทำงานของเครื่อง ให้ยึดชิ้นทดสอบเข้ากับเครื่องมือและตรวจดูอีกครั้งว่าได้เลือกหัวจับชิ้นทดสอบที่เหมาะสม จากนั้นจัดให้ชิ้นทดสอบอยู่ในแนวตั้งตรงและคงไว้เช่นนั้นตลอดการทดสอบ ก่อนการทดสอบต้องตรวจสอบชุดป้องกันความปลอดภัยให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง และอุปกรณ์วัดระยะยืดสามารถทำงานได้สะดวก จากนั้นตั้งให้ตั้ง โดยการใส่แรงกระทำเล็กน้อยและตั้งค่ามาตรวัดให้เป็นศูนย์พร้อมทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.13



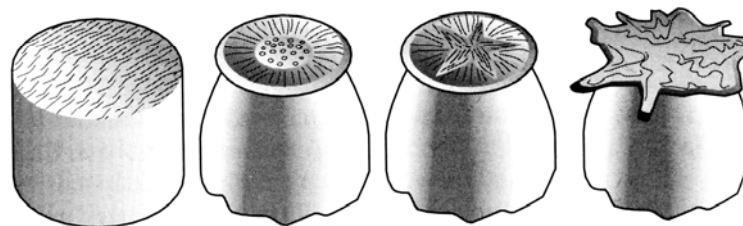
รูปที่ 6.13 แสดงหัวจับขึ้นทดสอบแบบต่างๆ พร้อมขึ้นทดสอบสำหรับวัสดุแบบต่างๆ

เนื่องจากการทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบแบบสถิต (static test) ดังนั้นความเร็วหรืออัตราการเพิ่มแรงกระทำในการทดสอบควรเป็นแบบช้าๆ ถึงปานกลาง โดยขึ้นทดสอบต้องไม่ได้รับผลกระทบจากความเร็วนั้น ซึ่งปกติจะใช้ความเร็วที่ประมาณ 0.01 ถึง 0.05 นิ้วต่อนาที ความเร็วในการทดสอบไม่ควรเกินความสามารถของเครื่องที่จะอ่านค่าได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ อย่างไรก็ตามสามารถรับแรงกระทำกับวัสดุได้ในช่วงกว้างที่แรงกระทำไม่ส่งผลกระทบต่อระบบการเลื่อนภายในวัสดุ ถ้ามีปัญหาเกี่ยวกับอัตราเร็วในการใส่แรงกระทำสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากมาตรฐาน ASTM

อัตราการใส่แรงกระทำส่งผลกระทบมากที่สุดต่อการเกิดจุดจั่นของวัสดุ สำหรับวัสดุเหนียวเหนือจุดจั่นอัตราการเพิ่มของแรงกระทำอาจเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการใส่

ในการทดสอบให้เพิ่มแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอและอ่านค่าทุกระยะขณะทำการทดสอบ เมื่ออ่านค่าผ่านช่วงของจุดจำนนให้นำอุปกรณ์วัดระยะยืดออกเพื่อป้องกันไม่ให้เสียหาย โดยหลังจากขึ้นทดสอบเลยจุดจำนนให้ใช้ไม้บรรทัด คาลิเปอร์ หรือไมโครมิเตอร์ในการวัดระยะยืด จากนั้นเพิ่มแรงกระทำให้ขึ้นทดสอบต่อเนื่องจนกระทั่งแตกหักหรือถึงจุดที่ได้ข้อมูลที่ต้องการ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และข้อมูลที่ต้องการในการทดสอบ

หลังขึ้นทดสอบเสียหายหรือแตกหักให้นำชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบและทำการตรวจสอบหาระยะยืด โดยให้นำชิ้นทดสอบทั้งสองส่วนมาประกบกัน จากนั้นทำการวัดระยะทดสอบสุดท้าย รวมทั้งพื้นที่หน้าตัดสุดท้ายของชิ้นทดสอบเพื่อใช้ในการหาค่าร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด จากนั้นแยกชิ้นทดสอบออกจากกันแล้วทำการตรวจสอบลักษณะของรอยแตกที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปรอยแตกจากการดึงจะทำการตรวจในเรื่องของรูปแบบการแตก พื้นผิวการแตกและสีของผิวรอยแตก โดยประเภทของการแตกหักสามารถแบ่งออกได้เป็นการแตกแบบผิวเรียบ (flat) แบบถ้วยกับกรวย (cup-cone) แบบไม่แน่นอน (irregular) และแบบขรุขระ (ragged) และคำอธิบายประกอบลักษณะของรอยแตกได้แก่ ลักษณะผิวรอยแตกเป็นมันวาว ด้าน เป็นเส้น ความหยาบความละเอียดของเกรน ลักษณะโครงผลึก หรือแตกออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ เป็นต้น วัสดุบางอย่างสามารถระบุชนิดได้จากลักษณะของรอยแตก เช่น เหล็กกล้ามักมีผิวรอยแตกในลักษณะเป็นเส้นและแตกแบบถ้วยกับกรวย ส่วนเหล็กปกติจะแตกแบบไม่แน่นอนและมีลักษณะรอยแตกเป็นเส้น ส่วนเหล็กหล่อรอยแตกเป็นแบบเรียบสีเทาและมีลักษณะเป็นเกรนหยาบ เป็นต้น การประเมินรอยแตกอาจใช้เป็นเหตุผลประกอบในการอธิบายสาเหตุของการแตกหัก โดยการร่างและแยกประเภทของรอยแตกให้สอดคล้องกับลักษณะรอยแตกในแบบทั่วไปดังที่ได้แสดงในรูปที่ 6.14



Flat

Cup-cone

Star

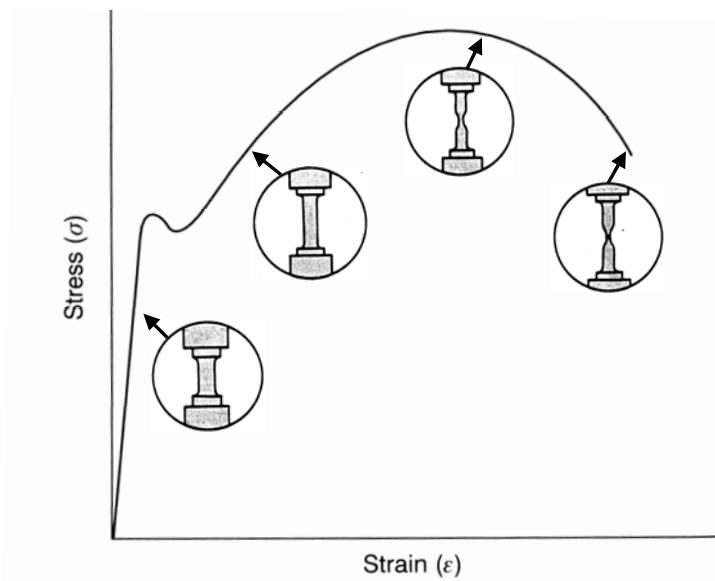
Irregular

รูปที่ 6.14 รูปแบบพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึง

6. ผลการทดสอบ

6.1 กราฟแรงเค้นความเครียด

ผลการทดสอบแรงดึงสามารถบันทึกเป็นกราฟแรงเค้นความเครียดได้ โดยการบันทึกแรงเค้นเป็นแกนตั้งและความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นแกนนอน กราฟแรงเค้นความเครียดของเหล็กกล้าอ่อนจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6.15 การทดสอบในช่วงแรกเมื่อให้แรงเค้นเพิ่มขึ้นวัสดุจะเกิดความเครียดน้อยมาก และในช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรงความเครียดจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับแรงเค้นที่กระทำ ช่วงนี้ถือว่าเป็นช่วงยืดหยุ่น (elastic region) ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมเมื่อนำแรงเค้นที่กระทำออก ภายใต้สภาวะยืดหยุ่น พฤติกรรมของวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฮุก (Hook's law)



รูปที่ 6.15 กราฟแรงเค้นความเครียดของเหล็กกล้าไร้สนิม

จุดแรกที่กราฟแรงเค้นความเครียดเริ่มเบนออกจากบริเวณที่เป็นสัดส่วนหรือออกจากแนวเส้นตรงจะเรียกว่าขีดจำกัดแบบสัดส่วน (proportional limit) ซึ่งวัสดุยังคงมีพฤติกรรมของความยืดหยุ่นแต่แรงเค้นที่กระทำกับความเครียดที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นสัดส่วนกันอีก และเมื่อเข้า

หลังจากวัดความแข็งแรงสูงสุด บ่อยครั้งจะใช้ค่าความปลอดภัย (safety factor) เพื่อหาแรงเค้นที่ปลอดภัยสูงสุดในการใช้งาน โดยหารค่าความแข็งแรงสูงสุดด้วยค่าความปลอดภัยปกติประมาณ 2 ถึง 10 แรงเค้นหรือความแข็งแรงในการใช้งานนี้จะใช้คำนวณในการออกแบบ ทั้งนี้เพื่อความมั่นใจว่าวัสดุจะไม่เกิดความเสียหายภายใต้สภาวะการทำงานปกติ

ตัวอย่างที่ 6.8

ก. สมมติต้องการใช้เคเบิลในการดึงรถเคเบิลหนัก 1200 ปอนด์ กับผู้โดยสารจำนวน 6 คน แต่ละคนมีน้ำหนัก 175 ปอนด์ ถามว่าต้องใช้เคเบิลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าไร ถ้าเคเบิลมีความแข็งแรงจำนวน 32000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \text{พื้นที่หน้าตัด} &= \text{แรง} / \text{แรงเค้น} \\ &= \frac{1200 \text{ lb} + (6 \times 175 \text{ lb})}{32000 \text{ lb/in.}^2} = 0.07 \text{ in.}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลาง} &= \sqrt{(4/\pi) \times 0.07} \\ &= 0.30 \text{ in.} \end{aligned}$$

ข. ถ้าเคเบิลมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว รถเคเบิลจะสามารถบรรทุกทุกคน 8 คนได้หรือไม่

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \text{แรงเค้น} &= \frac{1200 \text{ lb} + (8 \times 175 \text{ lb})}{\pi (0.25 \text{ in.})^2} \\ &= 13242 \text{ lb/in.}^2 \end{aligned}$$

เนื่องจากแรงเค้นที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความแข็งแรงจำนวน ดังนั้นจึงสามารถบรรทุกได้

ค. จงหาว่ารถเคเบิลในข้อ ข. จะสามารถบรรทุกทุกคนได้มากที่สุดกี่คน

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \text{แรง} &= \text{พื้นที่หน้าตัด} \times \text{แรงเค้น} \\ &= \pi (0.25 \text{ in.})^2 \times 32000 \text{ lb/in.}^2 \\ &= 6283 \text{ lb} \end{aligned}$$

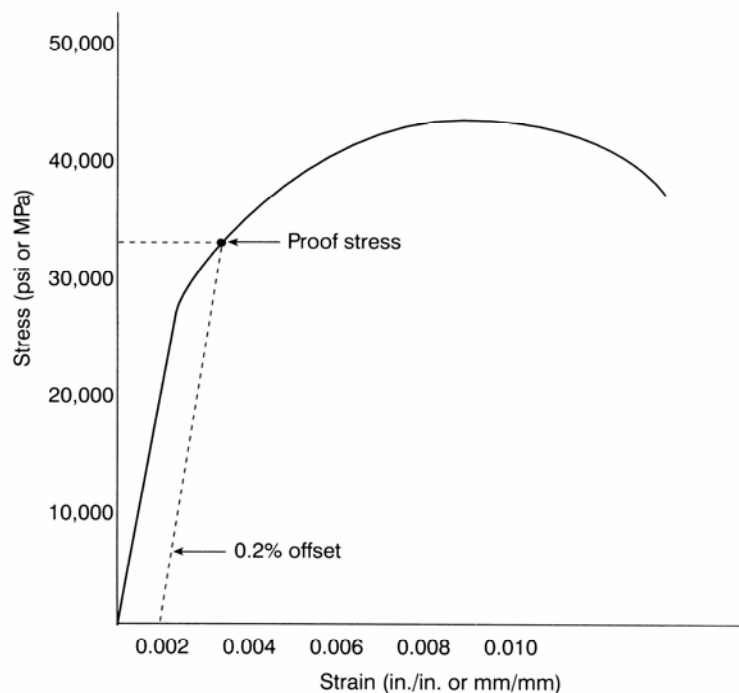
นั่นคือรถเคเบิลสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดเท่ากับ 6283 ปอนด์

เมื่อหักลบน้ำหนักของรถเคเบิลออกจะได้ $6283 - 1200 = 5083$ ปอนด์

ดังนั้นรถเคเบิลสามารถบรรทุกทุกคนที่มีน้ำหนัก 175 ปอนด์ ได้สูงสุด $\frac{5083}{175} = 29$ คน

เนื่องจากแรงเค้นเป็นผลของแรงที่กระทำหารด้วยพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นแรงเค้นแท้จริง (true stress) ที่เกิดขึ้นในวัสดุต้องคำนวณด้วยข้อมูลแรงเค้นและความเครียดที่ได้ในขณะทำการทดสอบ กล่าวคือแรงเค้นต้องคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดที่สัมพันธ์กับแรงเค้นที่กระทำขณะทดสอบ โดยทั่วไปกราฟแรงเค้นความเครียดแท้จริงจะมีลักษณะเหมือนกับกราฟทางทฤษฎี ยกเว้นหลังจากที่เกิดคอคอดค่าแรงเค้นแท้จริงจะยังคงเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดแท้จริงมีค่าลดลง ในขณะที่แรงเค้นปกติมีค่าลดลงเพราะคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น ปกติการเก็บข้อมูลในการคำนวณแรงเค้นความเครียดแท้จริงไม่สะดวกและไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ยากและเสียเวลาอย่างมากในการทดสอบ ดังนั้นในการคำนวณจึงใช้พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นเป็นฐานการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เรียกว่าแรงเค้นปกติ (nominal stress) หรือแรงเค้นทางวิศวกรรม สำหรับสภาวะและการใช้งานที่แรงเค้นเกิดได้ดีภายใต้แรงเค้นดึง

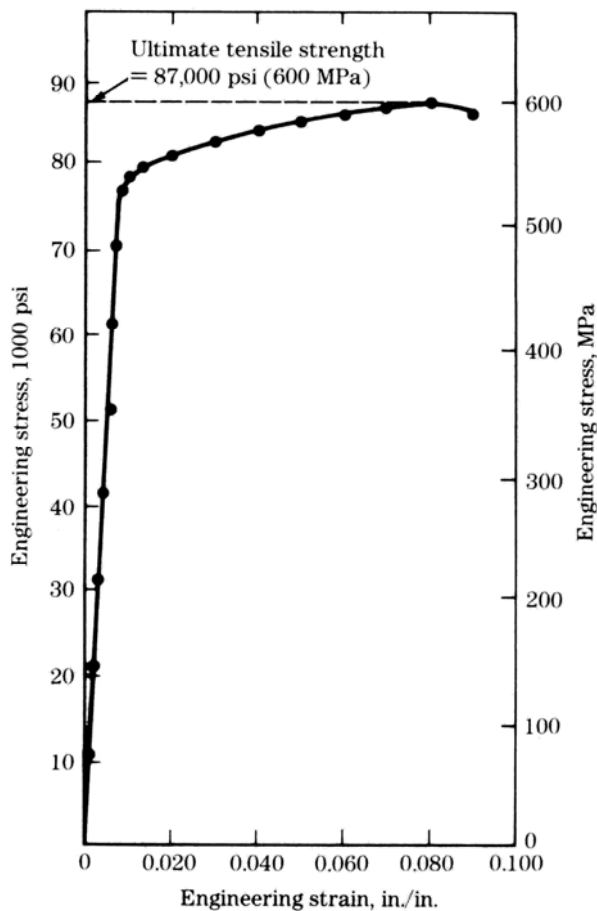
ภายใต้สภาวะที่วัสดุมีการเสียรูปถาวรเป็นช่วงกว้าง แรงเค้นปกติสามารถเบนออก จากค่าแรงเค้นแท้จริงโดยไม่ปรากฏจุดจํานน ดังนั้นจึงต้องกำหนดจุดจํานนตามท่เห็นสมควร เรียกว่าออฟเซต (offset) ปกติค่าออฟเซตนี้จะกำหนดที่ร้อยละการยืด 0.2 เรียกว่าร้อยละ 0.2 ความแข็งแรงจํานนออฟเซต (0.2% offset yield strength) หรือแรงเค้นพรูฟ (proof stress) แรงเค้นพรูฟนี้เป็นแรงเค้นปกติท่ทำให้เกิดความเครียดแบบไม่เป็นสัดส่วน ณ จุดออฟเซตท่ กำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับร้อยละของระยะทดสอบเริ่มต้น กระบวนการออฟเซตจะใช้กับวัสดุท่ไม่ ปรากฏจุดจํานนท่ชัดเจน การวัดค่าแรงเค้นพรูฟด้วยกรรมวิธีออฟเซตได้แสดงในรูปท่ 6.16



รูปท่ 6.16 การหาค่าความแข็งแรงจํานนออฟเซต

6.2 ข้อมูลสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงและกราฟแรงเค้นความเครียด

เมื่อทำการทดสอบแรงที่กระทำกับชิ้นทดสอบขณะทดสอบจะบันทึกลงบนกระดาษกราฟโดยเครื่องทดสอบ ขณะเดียวกันสัญญาณความเครียดของชิ้นทดสอบที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์วัดระยะยืดที่ยึดอยู่กับชิ้นทดสอบจะถูกนำมาบันทึกลงบนกระดาษกราฟเช่นกัน โดยข้อมูลของแรงที่ได้จากกราฟในการทดสอบแรงดึงสามารถเปลี่ยนเป็นแรงเค้น และสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟแรงเค้นความเครียดได้ ดังตัวอย่างกราฟแรงเค้นความเครียดของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูงในรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 กราฟแรงเค้นความเครียดของโลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูง (7075-T5)

สมบัติเบื้องต้นที่ตรวจวัดด้วยการทดสอบแรงดึงได้แก่ ความแข็งแรงจำนน (yield strength) หรือจุดจำนน (yield point) ความแข็งแรงดึง (tensile strength) ความเหนียว (ductility) ซึ่งแสดงด้วยร้อยละการยืด (percent elongation) กับร้อยละการลดลงของหน้าตัด (percent reduction in area) และการอธิบายชนิดของการแตกหักที่เกิดขึ้น ในกรณีของวัสดุแข็งเปราะ

1. โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity)
2. ความแข็งแรงจํานนร้อยละ 0.2 ของการเสียรูป (percent offset)
3. ความแข็งแรงคิงสูงสุด (ultimate tensile strength)
4. ร้อยละการยืค (percent elongation)
5. ร้อยละการลดลงของพื้นที่ ณ จุดแตกหัก (reduction in area)

- โมดูลัสความยืดหยุ่น ในช่วงแรกของการทดสอบการคิงโลหะจะเกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ถ้านําแรงที่กระทำออกจันทดสอบจะกลับคืนสู่ความยาวเริ่มต้น โดยปกติการเสียรูปแบบยืดหยุ่นของโลหะสูงสุดปกติจะต่ำกว่าร้อยละ 0.5 โดยทั่วไปโลหะและโลหะผสมจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงคั่นกับความเครียคในกราฟแรงคั่นความเครียคเป็นเส้นตรงในช่วงที่เกิดการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Hooke

$$\sigma \text{ (แรงคั่น)} = E\varepsilon \text{ (ความเครียค)}$$

หรือ

$$E = \frac{\sigma \text{ (แรงคั่น)}}{\varepsilon \text{ (ความเครียค)}}$$

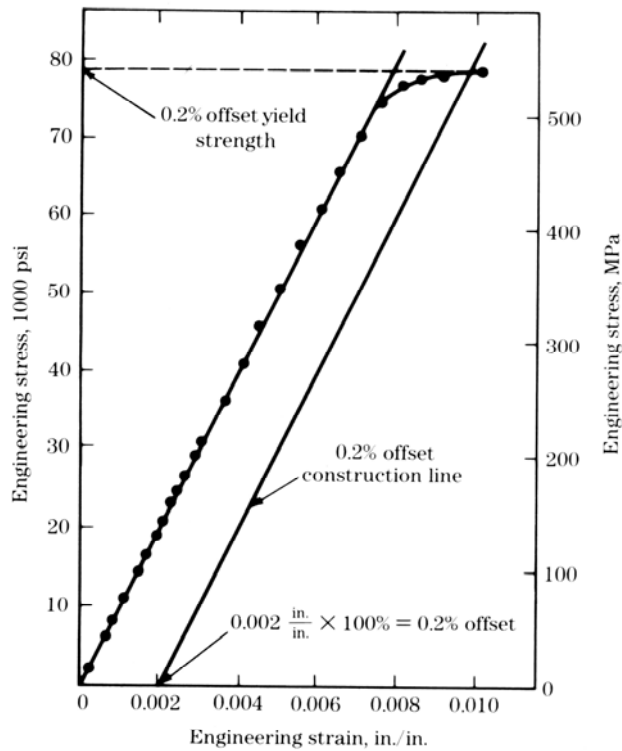
เมื่อ E คือโมดูลัสการคั่นตัว หรือ Young modulus

โมดูลัสความยืดหยุ่นจะสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะระหว่างอะตอมในโลหะหรือ โลหะผสม ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของโลหะพื้นฐานบางชนิดได้แสดงในตารางที่ 6.1 โดยโลหะที่มีโมดูลัส ความยืดหยุ่นสูงจะมีความแข็งแรงสูงและหักงอ ได้ยาก ยกตัวอย่างเช่นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กกล้าซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงคือ 30×10^6 psi (207 GPa) ในขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมมีค่าโมดูลัสค่อนข้างต่ำคือในช่วง $10 - 11 \times 10^6$ psi (69 - 76 GPa)

โลหะและ โลหะผสม*ต่างๆ	โมดูลัสการคืนตัว (Elastic modulus)		
	x 10 ⁶ psi	GPa	
เหล็กกล้า	30	207	
นิกเกิล	30	207	
ทองแดง	18	124	หมายเหตุ *
ไทเทเนียม	16	110	วัสดุหลายผลึก
อะลูมิเนียม	10	69	ที่อุณหภูมิห้อง
แมกนีเซียม	6.5	45	

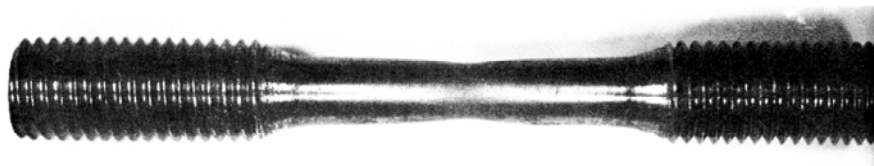
ตารางที่ 6.1 โมดูลัสความยืดหยุ่นของโลหะและโลหะผสมต่างๆ

- ความแข็งแรงจำนวน เป็นค่าที่มีความสำคัญมากที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม เนื่องจากเป็นความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมก่อนเกิดการเสียรูปถาวร ซึ่งบ่อยครั้งจุดสิ้นสุดของการเสียรูปยืดหยุ่นกับจุดเริ่มต้นของการเสียรูปถาวรบนกราฟแรงเค้นความเครียดไม่ปรากฏชัดเจน ดังนั้นในการหาค่าความแข็งแรงจำนวนจึงจำเป็นต้องกำหนดขนาดของการเสียรูปถาวรหรือระยะยืดถาวรค่าหนึ่ง แล้วหาค่าแรงเค้นที่สัมพันธ์กับระยะยืดถาวรนั้นเป็นค่าความแข็งแรงจำนวน สำหรับการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมในอเมริกา ความแข็งแรงจำนวนจะมีค่าเท่ากับแรงเค้น ณ จุดที่มีการยืดถาวรร้อยละ 0.2 ดังแสดงในกราฟแรงเค้นความเครียดรูปที่ 6.18 โดยความแข็งแรงจำนวนที่ร้อยละ 0.2 ของความเครียดนี้เรียกว่า **ความแข็งแรงจำนวนออฟเซตร้อยละ 0.2 (0.2 percent offset yield strength)** ซึ่งหาได้จากการลากเส้นขนานกับเส้นกราฟที่เป็นเส้นตรงในบริเวณของการเสียรูปยืดหยุ่นที่ระยะยืด 0.002 in/in (หรือ m/m) จนตัดกับเส้นกราฟด้านบน จากนั้นให้ลากเส้นตรง ณ จุดตัดในแนวระดับไปตัดกับแกนของแรงเค้น และแรงเค้น ณ จุดตัดนี้เป็นค่าความแข็งแรงจำนวนออฟเซตร้อยละ 0.2



รูปที่ 6.18 การหาค่าความแข็งแรงจํานนออฟเซตร้อยละ 0.2

- ความแข็งแรงดิ่งสูงสุด เป็นความแข็งแรงสูงสุด ณ จุดสูงสุดของเส้นกราฟแรงเค้น ความเครียด และเมื่อขึ้นทดสอบเกิดการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเฉพาะบริเวณ ซึ่งปกติเรียกว่า การเกิดคอคอด (รูปที่ 6.19) แรงเค้นจะลดลงในขณะที่ความเครียดยังคงเกิดขึ้นจนกระทั่งแตกหัก ทั้งนี้เนื่องจากแรงเค้นถูกกำหนดให้ใช้พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของขึ้นทดสอบตลอดการทดสอบ ซึ่งมีความมากกว่าพื้นที่หน้าตัดที่แท้จริงในส่วนที่เป็นคอคอดทำให้แรงเค้นที่ได้ต่ำกว่าค่าที่แท้จริง ส่งผลให้ค่าแรงเค้นบนกราฟแรงเค้นความเครียดลดลงในช่วงท้ายของการทดสอบ ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญว่าเหตุใดความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมในกราฟแรงเค้นความเครียดจึงมีค่าไม่สูงต่อเนื่องจนกระทั่งขึ้นงานแตกหัก โดยโลหะที่มีความเหนียวมาก



รูปที่ 6.19 การเกิดคอคอดของเหล็กกล้าหลังการทดสอบแรงดึงเกินค่าแรงดึงสูงสุด

ความแข็งแรงสูงสุดของโลหะหาได้โดยการลากเส้นในแนวระดับจากจุดสูงสุดบนกราฟแรงเค้นความเครียดไปที่แกนของแรงเค้นและค่าแรงเค้นที่ได้ ณ จุดตัดนี้เรียกว่าความแข็งแรงดึงสูงสุดหรือบางครั้งเรียกว่าความแข็งแรงดึง สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียมในรูปที่ 6.17 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 87000 psi สำหรับโลหะผสมที่มีความเหนียวจะไม่นำค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมาใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม เนื่องจากโลหะเกิดความเสียหายแบบถาวรอย่างมากก่อนถึงจุดสูงสุด อย่างไรก็ตามความแข็งแรงดึงสูงสุดสามารถบ่งบอกถึงการมีอยู่ของความบกพร่องต่างๆ กล่าวคือถ้าโลหะมีความพรุนตัวและสิ่งเจือปน ความบกพร่องเหล่านี้อาจเป็นเหตุทำให้ความแข็งแรงดึงสูงสุดของโลหะมีค่าต่ำกว่าปกติ

- ร้อยละการยืด ปริมาณการยืดของชิ้นทดสอบที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบแรงดึง จะใช้แสดงสมบัติความเหนียวของโลหะ โดยปกติจะอยู่ในรูปของร้อยละการยืดที่เทียบกัน ระยะทดสอบเริ่มต้นซึ่งมีค่า 2 นิ้ว (5.1 เซนติเมตร) (รูปที่ 6.2) โดยโลหะที่มีความเหนียวมากกว่าคือเกิดการเสียรูปได้มากจะมีร้อยละการยืดสูง เช่นแผ่นอะลูมิเนียมผสม 1100 - 0 หนา 0.062 นิ้ว (1.6 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความแข็งต่ำจะมีร้อยละการยืดสูงคือร้อยละ 35 ในขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูง 7075 - T6 ที่ความหนาเดียวกันจะมีร้อยละการยืดเพียงร้อยละ 11 ในการวัดระยะยืดที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องของชิ้นทดสอบระหว่างการทดสอบแรงดึงสามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดการยืด ส่วนร้อยละการยืดหลังการแตกหักหาได้โดย

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการยืด} &= \frac{\text{ } - \text{ } }{\text{ } } \times 100\% \\ &= \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \end{aligned}$$

ร้อยละการยืด ณ จุดแตกหักมีความสำคัญทางวิศวกรรมไม่เพียงแต่เป็นการวัดสมบัติความเหนียวเท่านั้นแต่ยังใช้เป็นค่าดัชนีบ่งบอกคุณภาพของโลหะ กล่าวคือถ้าโลหะมีความพรุนตัวและสิ่งเจือปนอยู่หรือเกิดความเสียหายอันเนื่องจากการได้รับความร้อนสูง ชี้นทดสอบจะมีค่าร้อยละการยืดต่ำกว่าปกติ

- ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ความเหนียวของโลหะหรือโลหะผสมสามารถแสดงในรูปของร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ซึ่งหาค่าได้จากการทดสอบแรงดึงกับชี้นทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว (12.7 มิลลิเมตร) หลังการทดสอบให้ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลง ณ จุดแตกหัก จากนั้นให้นำค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นกับสุดท้ายของชี้นทดสอบที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการลดลงของพื้นที่} &= \frac{\text{พื้นที่เริ่มต้น} - \text{พื้นที่สุดท้าย}}{\text{พื้นที่เริ่มต้น}} \times 100\% \\ &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \end{aligned}$$

ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดจะเหมือนกับร้อยละการยืด คือเป็นการวัดความเหนียวและเป็นดัชนีบ่งบอกคุณภาพของโลหะ ร้อยละการลดลงของพื้นที่ที่อาจลดลงถ้ามีความบกพร่อง เช่น สิ่งเจือปนและหรือช่องอากาศอยู่ในชี้นโลหะทดสอบ

ตัวอย่าง 6.9 ชี้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ผ่านการทดสอบแรงดึงจนขาด โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยแตกวัดได้ 0.343 นิ้ว ให้คำนวณหาร้อยละการลดลงของพื้นที่ของชี้นทดสอบ

$$\frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad A_f$$

$$\begin{aligned}
\text{วิธีทำ} \quad \text{ร้อยละการลดลงของพื้นที่} &= \frac{\quad}{\quad} \times 100\% = (1 - \frac{\quad}{\quad}) \times 100\% \\
&= \left[1 - \frac{(\pi/4) (0.343 \text{ in.})^2}{(\pi/4) (0.50 \text{ in.})^2} \right] \times 100\% \\
&= (1 - 0.47) \times 100\% \\
&= 53\%
\end{aligned}$$

ความแข็งแรงดึงรวมทั้งร้อยละการยืดและร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเป็นการบ่งบอกถึงสมบัติความเหนียวของวัสดุ โดยร้อยละการยืดจะเท่ากับร้อยละของผลต่างระหว่างระยะทดสอบสุดท้ายกับระยะทดสอบเริ่มต้นหารด้วยระยะทดสอบเริ่มต้น ส่วนร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดเป็นการยากที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากเป็นเรื่องยากที่จะวัดพื้นที่หน้าตัดสุดท้ายจากรอยแตกที่บิดเบี้ยวให้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และยังยากมากขึ้นถ้าหน้าตัดของรอยแตกจากการทดสอบมีลักษณะที่ซับซ้อนหรือไม่มีรูปทรงที่แน่นอน

ตัวอย่าง 6.10

ก. จงคำนวณร้อยละการยืดของวัสดุที่มีระยะทดสอบเริ่มต้น 2 นิ้ว และสุดท้าย 2.012 นิ้ว

$$\text{วิธีทำ} \quad \text{ร้อยละการยืด} = \frac{2.012 \text{ in.} - 2 \text{ in.}}{2 \text{ in.}} \times 100 = 0.6\%$$

ข. จงคำนวณร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นเท่ากับ 0.505 นิ้ว และเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้ายเท่ากับ 0.487 นิ้ว

$$\begin{aligned}
\text{วิธีทำ} \quad \text{พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น} &= \pi (0.253 \text{ in.})^2 = 0.2 \text{ in.}^2 \\
\text{พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย} &= \pi (0.244 \text{ in.})^2 = 0.187 \text{ in.}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{จากร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด} &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \\
&= \frac{0.2 \text{ in.}^2 - 0.187 \text{ in.}^2}{0.2 \text{ in.}^2} \times 100 = 6.5\%
\end{aligned}$$

ตัวอย่าง 6.11 จากกราฟแรงเค้นความเครียดที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานทองเหลืองดังรูปที่

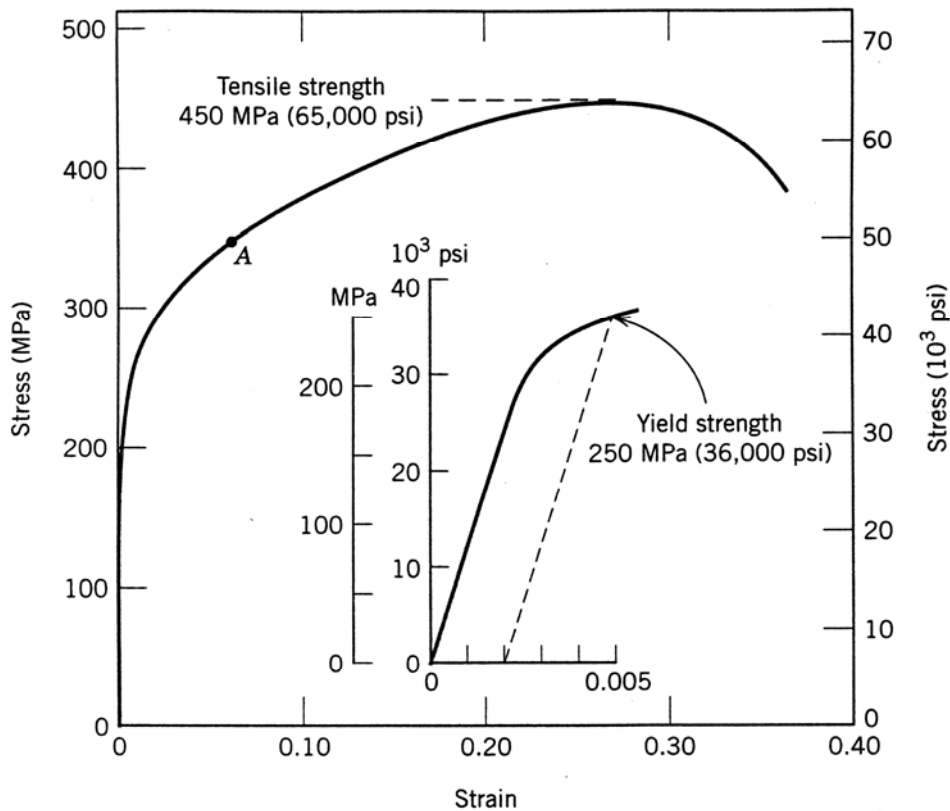
6.20 จงหาค่าตัวแปรต่างๆ ต่อไปนี้

ก. ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น

ข. ความแข็งแรงจำนวนที่ความเครียดร้อยละ 0.2 ออฟเซต

ค. แรงสูงสุดที่ขึ้นทดสอบทองเหลืองทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 12.8 mm. (0.505 in.) จะสามารถรับได้

ง. ความยาวชิ้นทดสอบที่เปลี่ยนไปเมื่อรับแรงเค้นถึง 345 MPa (50,000 psi) โดยกำหนดให้ชิ้นทดสอบมีความยาวเริ่มต้นเท่ากับ 250 mm. (10 in.)



รูปที่ 6.20 กราฟแรงเค้นความเครียดจากการทดสอบแรงดึงชิ้นทดสอบทองเหลือง

วิธีทำ ก. โมดูลัสความยืดหยุ่นสามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟในช่วงของการเสียรูปแบบยืดหยุ่นหรือช่วงขีดจำกัดแบบสัดส่วน โดยการหาค่าแรงเค้นที่เปลี่ยนไปหารด้วยความเครียดที่เปลี่ยนไปจากแรงเค้นนั้น ดังสมการ

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \text{_____}$$

จากกราฟรูปเล็กซึ่งเป็นกราฟขยายในช่วงของการเสียรูปแบบยืดหยุ่นจะกำหนดให้ σ_1 และ ε_1 มีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดเริ่มต้นของกราฟ และกำหนด σ_2 ที่ 150 MPa ซึ่งหาค่า ε_2 ได้เป็น 0.0016 ดังนั้นค่าโมดูลัสของขึ้นทดสอบของเหล็กชนิดนี้หาค่าได้เป็น

$$E = \frac{150 - 0 \text{ MPa}}{0.0016 - 0} \\ = 93.8 \text{ GPa} (13.6 \times 10^6 \text{ psi})$$

ข. ความแข็งแรงจํานนออฟเซตที่ร้อยละการยืด 0.2 เมื่อลากเส้นประขนานกับเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นที่ความเครียด 0.002 จนตัดกับเส้นกราฟด้านบนจะได้ค่าแรงเค้นเท่ากับ 250 MPa (65,000 psi) เป็นค่าความแข็งแรงจํานนออฟเซตของขึ้นทดสอบของเหล็ก

ค. แรงสูงสุดที่ขึ้นทดสอบสามารถรับได้คำนวณได้จากค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดซึ่งคือแรงเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบ จากกราฟขึ้นทดสอบมีแรงเค้นสูงสุดเท่ากับ 450 MPa (65,000 psi) และจากสมการการหาค่าแรงเค้นสามารถคำนวณหาค่าแรงที่กระทำกับขึ้นทดสอบได้ดังนี้

$$F = \sigma A_0 = \sigma \pi (d_0/2)^2 \\ = 450 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \times 3.14 \times \left(\frac{12.8 \times 10^{-3} \text{ m}}{2} \right)^2 \\ = 57,900 \text{ N} (13,000 \text{ lb})$$

ง. การหาระยะยืดของขึ้นทดสอบที่เกิดขึ้นจากแรงเค้นที่ 345 MPa ลำดับแรกต้องหาค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งบนกราฟที่แรงเค้น 345 MPa จะอยู่ที่จุด A จากนั้นลากเส้นขนานกับแกนแรงเค้นลงมาที่แกนของความเครียดจะได้ค่าความเครียด ประมาณ 0.06 และจากความยาวเริ่มต้นของขึ้นทดสอบสามารถหาค่าระยะยืดที่เปลี่ยนไปได้ดังนี้

$$\Delta l = \varepsilon l_0 = 0.06 \times 250 \text{ mm} = 15 \text{ mm} (0.6 \text{ in.})$$

ความเหนียวของวัสดุสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ในระดับหนึ่งด้วยการออกแบบ โดยวัสดุที่มีความเหนียวจะเกิดการโค้งงอก่อนการแตกหักหรือเกิดการเสียรูปก่อนแตกร้าว และความเหนียวยังทำให้วัสดุมีความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น

พื้นที่ใต้กราฟแรงเค้นความเครียดทั้งหมดเป็นค่าพลังงานที่จำเป็นในการทำให้วัสดุแตกหักและเป็นค่าที่แสดงถึงความแกร่งของวัสดุ หรือค่าโมดูลัสความแกร่งซึ่งเป็นการวัดการดูดซับพลังงานของวัสดุ ทั้งในส่วนของกาเสียรูปถาวรและยืดหยุ่น ความแกร่งจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงต่อการแตกหักของวัสดุหรือความสามารถที่จะทนต่อแรงกระทำฉับพลัน โดยผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่เท่ากับผลของการทดสอบแรงกระแทกซึ่งแสดงถึงความแกร่งเช่นกัน อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ทั้งสองจะใกล้เคียงกันในกรณีที่เป็นผลของแรงเค้นความเครียดแท้จริง

ผลการทดสอบแรงดึงจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความแข็งแรงจํานน ความแข็งแรงดึงและ โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุจะลดลง แต่ความเหนียวเพิ่มขึ้น บ่อยครั้งที่ปรากฏการณ์นี้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุขณะร้อน ซึ่งเป็นการขึ้นรูปวัสดุด้วยแรงเค้นต่ำและต้องการความเหนียวของวัสดุค่อนข้างสูง สมบัติความแข็งแรงดึงของวัสดุวิศวกรรมต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 6.2

วัสดุ	ความแข็งแรงดึง (lb/in ²)	วัสดุ	ความแข็งแรงดึง (lb/in ²)
Metals		Thermoplastic	
Aluminum alloys	13,000-24,000	Polyamide	9,000-9,500
Brasses	40,000-120,000	Polycarbonate	8,000-9,500
Bronzes	40,000-130,000	Polyethylene	1,000-5,500
Cast iron	18,000-60,000	Polymethyl methacrylate	7,000-11,000
Cold-rolled steel	84,000	Polypropylene	4,300-5,500
Magnesium alloys	20,000-45,000	Polystyrene	5,000-10,000
Monel	100,000	Polytetrafluoroethylene	2,000-4,500
Stainless steel	85,000-95,000	Polyurethane	5,000-5,500
Titanium	95,000	Polyvinyl chloride	1,500-9,000
Thermosettings		Elastomers	

Epoxy	4,000	ABS	7,000
Melamine-formaldehyde	5,500-13,000	Butadiene	3,500
Phenol-formaldehyde	6,000-9,000	Butadiene-styrene	600-3,500
Urea-formaldehyde	5,500-13,000	Silicone	3,000-4,000
Fibers for composites		Woods (perpendicular to grain)	
Glass	500,000	Softwoods	200-500
Graphite	300,000-410,000	Hardwoods	300-1,000
Polyaramid (Kevlar)	410,000		

ตารางที่ 6.2 สมบัติความแข็งแรงดึงของวัสดุวิศวกรรมต่างๆ

7. สรุป (summary)

การทดสอบแรงดึงบ่อยครั้งให้ข้อมูลที่สำคัญในการระบุสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุ การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบเบื้องต้นที่ใช้ทดสอบวัสดุซึ่งสามารถให้ข้อมูลความแข็งแรงดึงของวัสดุ และบ่อยครั้งที่ข้อมูลนี้มีความสำคัญในการออกแบบและการสร้างผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม

ข้อมูลการทดสอบแรงดึงสามารถสร้างเป็นกราฟแรงเค้นความเครียดของชิ้นทดสอบ ผลลัพธ์ในการทดสอบจะแสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุในการใช้งาน โดยมีสองจุดที่สำคัญเกิดขึ้นบนกราฟคือจุดจำแนกและแรงเค้นดึงสูงสุดหรือความแข็งแรงดึงของวัสดุ ซึ่งเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงสมรรถภาพการรับแรงของวัสดุ

ข้อมูลที่สำคัญอื่นๆที่ได้จากการทดสอบแรงดึงได้แก่ ร้อยละการยืด ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัดและความเครียดที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะเหล่านี้จะใช้ในการบ่งชี้การเสีรูปของวัสดุในระหว่างการทดสอบ ปริมาณการเสีรูปของวัสดุที่ปรากฏก่อนแตกหักบ่อยครั้งใช้เป็นตัวแบ่งวัสดุว่าเป็นวัสดุเหนียวหรือเปราะ

ในระหว่างการทดสอบแรงดึงวัสดุจะเกิดการเสีรูปทั้งแบบยืดหยุ่นและถาวร ในช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่น วัสดุสามารถคืนสภาพอย่างเต็มที่จากแรงเค้นที่กระทำและสามารถกลับคืนสู่รูปทรงเดิม ส่วนพฤติกรรมการเสีรูปถาวรเป็นความสามารถของวัสดุในการเกิดการเสีรูปโดยปราศจากการแตกหัก คือการยืดออกที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบแรงดึง

ยังโมดูลัสหรือโมดูลัสความยืดหยุ่นแสดงถึงความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิม (resilience) หรือสติฟเนสความยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการหารแรงเค้นในช่วงขีดจำกัดการยืดหยุ่นด้วยความเครียดที่เกิดขึ้น ณ แรงเค้นนั้น โมดูลัสความยืดหยุ่นเป็นสมบัติที่ใช้ในการเปรียบเทียบวัสดุที่ชัดเจน

8. คำถามท้ายบท (Questions)

1. จงอธิบายว่าขึ้นทดสอบแรงดึงเกิดคอคอดได้อย่างไร
2. จงอธิบายความแตกต่างของแรงเค้นแท้จริง (true stress) กับแรงเค้นปกติ (nominal stress)
3. ถ้าแรงกระทำไม่อยู่ในแนวเดียวกับแกนขึ้นทดสอบจะมีผลต่อผลการทดสอบอย่างไร
4. จงอธิบายเทอมของขีดจำกัดสัดส่วน (proportional limit) ขีดจำกัดยืดหยุ่น (elastic limit) จุดจำนน (yield point) ความแข็งแรงสูงสุด (ultimate strength) ความแข็งแรงแตกหัก (breaking strength) โมดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elastic) ความแกร่ง (toughness) สติฟเนส (stiffness) และความเหนียว (ductility)
5. จงอธิบายความแตกต่างของจุดจำนนกับความแข็งแรงจำนนพร้อมวาดกราฟประกอบ
6. ถ้าขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.505 in. รับแรง 2500 lb ถ้าวัดเกิดแรงเค้นขึ้นภายในชิ้นงานเท่าไร
7. จงหาแรงเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 in. ที่รับแรง 5000 lb
8. จงหาความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ยาวเริ่มต้น 4.5 in. แล้วยืดออก 0.05 in. หลังทดสอบ พร้อมทั้งค่าร้อยละการยืด (% elongation)
9. จงหาร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (% reduction in area) ของชิ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 0.505 in. และเส้นผ่านศูนย์กลางหลังทดสอบ 0.502 in.

10. จงหาความเครียดที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบหน้าตัด 3 in. x 5 in. เมื่อรับน้ำหนัก 8000 lb และแปลงค่าผลลัพธ์ที่ได้ อยู่ในหน่วยเมกะพาสคาล (1 MPa เท่ากับ 145 lb/in.²)
11. ท่อนเหล็กขนาด 2 x 3 in. ถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงสูงสุด 100000 lb/in.² ถามว่าท่อนเหล็กนี้สามารถรับน้ำหนัก 50 ton ได้หรือไม่ และรับน้ำหนักสูงสุดได้เท่าไร
12. ถามว่าแท่งเหล็กขนาด 10 x 10 cm. ที่สามารถรับแรงเค้นได้ 100 MPa จะสามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้กี่กิโลกรัม และสามารถรับแรงเค้น 10000 lb/in.² ได้หรือไม่
13. เส้นลวดเหล็กกล้ายาว 18 in. และมีความเครียดไม่เกิน 0.01 in./in. ถามว่าเส้นลวดนี้ยืดได้สูงสุดเท่าไร
14. ถ้าท่อนเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 in. ถูกออกแบบให้รับแรงเค้นสูงสุด 100000 lb/in.² ถามว่าเหล็กกล้าจะสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดได้กี่ปอนด์