

ปฏิบัติการทดลองที่ 5

การทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียว

(Uniaxial tensile testing)

วัตถุประสงค์ (Objectives)

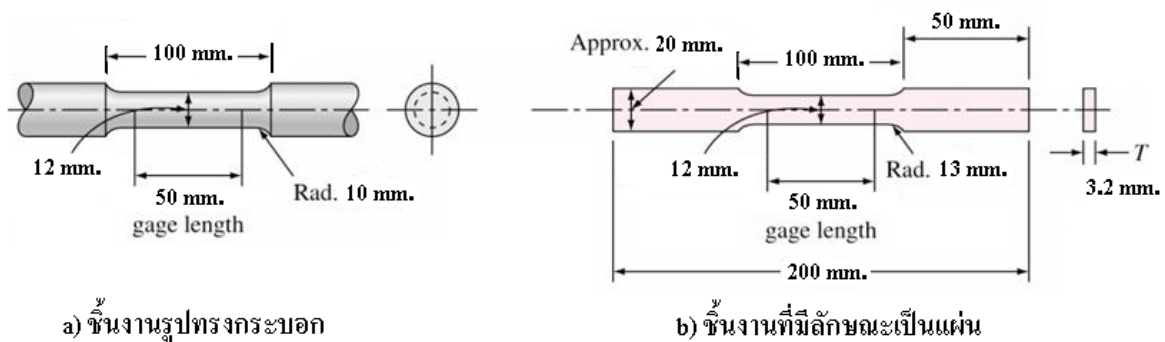
- เพื่อศึกษาหลักการและวิธีการทดสอบโลหะหรือวัสดุเมื่อได้รับแรงดึงทิศทางเดียว (Uniaxial tensile test)
- เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการยืดตัว (Load - extension relation), ความเค้นและความเครียด (Stress - strain relation) โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟ
- เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกล (Mechanical behavior) และคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ภายใต้แรงกระทำของแรงดึง ซึ่งประกอบด้วย
 - Young's modulus (Modulus of elasticity, E)
 - ความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก (Stress and strain at yield, σ_y and ϵ_y)
 - ค่าความแข็งแรงสูงสุดหรือความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, σ_{TS})
 - เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation, % El)
- เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนรูปและการแตกหักของโลหะต่างชนิดกัน เมื่อได้รับแรงดึงทิศทางเดียว

1. ทฤษฎีเบื้องต้น (Literature review)

1.1 การทดสอบแรงดึงทิศทางเดียว

การทดสอบแรงดึง เป็นการทดสอบพื้นฐานทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึงในทิศทางเดียว (Uniaxial tensile test) ซึ่งเป็นการทดสอบที่มีการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง โดยค่าสมบัติเชิงกลที่เราสนใจก็คือ Yield strength, Ultimate tensile strength (UTS) และ % Elongation จะถูกนำมาใช้สำหรับการออกแบบและเลือกสรรวัสดุเพื่อนำมาใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

ชิ้นงานมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง อาจเป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอกหรือเป็นชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 1 a) และ b) ตามลำดับ ปลายทั้งสองข้างของชิ้นงานที่ใช้สำหรับยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบจะต้องมีขนาดและพื้นผิวที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการหลุดออกระหว่างการดึงชิ้นงาน ส่วนขนาดความยาวของเกจ (Gauge length, L_0) จะถูกกำหนดให้เป็นค่ามาตรฐานซึ่งจะแปรผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_0) หรือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (A_0) ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากว่า ถ้าหากชิ้นงานมีขนาดของ Gauge length ที่มากเกินไปอาจทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้แล้วก่อนการกลึงขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงชิ้นงานโลหะควรผ่านการอบชุบหรือผ่านการทำ Treatment ขั้นสุดท้ายเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยาก่อนการทดสอบเป็นการป้องกันการรอยตำหนิ เช่น การเกิด Oxide scale ที่ผิวชิ้นงาน ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุของการแตกหักก่อนเวลาอันควร (Premature failure) อันเนื่องมาจาก Stress concentration ที่รอยตำหนินั้น อย่างไรก็ตามหากว่าชิ้นงานต้องมีการผ่านกระบวนการทางความร้อน เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน หรือที่เรียกว่าการทำ Surface hardening ตัวอย่างเช่น การทำ Nitriding, Carburizing หรือการเคลือบที่ผิว (Surface coating) ในกรณีนี้ เราควรนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ภายหลังการกลึงขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อให้ว่าผลการทดสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานที่เราสนใจนั้นจะรวมถึงสมบัติพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงเหล่านี้ด้วย



รูปที่ 1: ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึง [1]

Type specimen	United State (ASTM)	Great Britain	Germany
Sheet ($L_0 / \sqrt{A_0}$)	4.5	5.65	11.3
Rod ($L_0 / \sqrt{D_0}$)	4.0	5.0	10.0

ตารางที่ 1 ขนาดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่ใช้เป็นมาตรฐานในประเทศต่างๆ [2]

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain

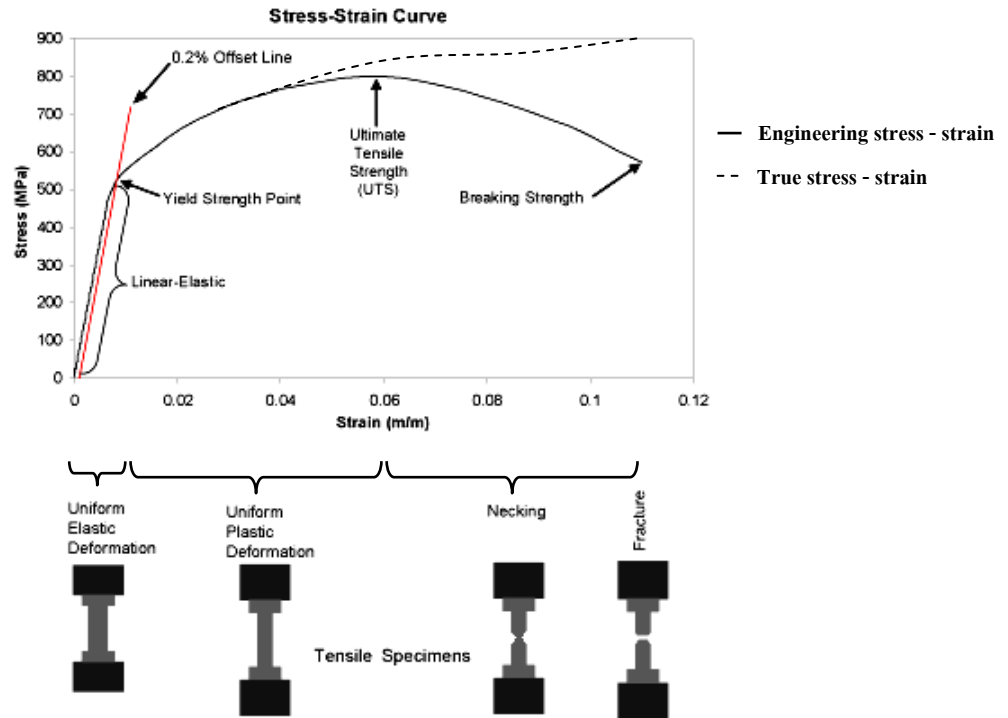
โดยปกติแล้ว เมื่อโลหะหรือวัสดุได้รับแรงดึง (Tensile loading) จะมีการเปลี่ยนรูปทั้งแบบอิลาสติกและแบบพลาสติก (Elastic and plastic deformation) โดยในตอนแรกโลหะจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบ Elastic ก่อน โดยมีความสัมพันธ์ของค่าแรงที่กระทำกับชิ้นงาน (Applied load) และการยืดตัว (Extension) ที่เป็นเส้นตรง (Linear relationship) ค่า Load และ Extension ดังกล่าวนี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) ที่จุดใดๆ รวมถึงความเค้นจริง (True stress) และความเครียดจริง (True strain) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งในการทดสอบจะใช้เพียงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมเท่านั้น โดยมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad \dots (1)$$

และ

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \dots (2)$$

- โดยที่
- σ = ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering stress)
 - ε = ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain)
 - P = แรงดึงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (External tensile load)
 - A_0 = พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงาน (Original cross-sectional area)
 - L_0 = ความยาวเดิมของชิ้นงาน (Original length)
 - L_f = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (Final length)



รูปที่ 2: Stress-strain relationship under uniaxial tensile loading

1.2.1 ค่าโมดูลัสของยังส์ (Young's modulus, E)

หากเราพิจารณารูปความสัมพันธ์ Engineering stress-strain ในช่วงที่โลหะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบยืดหยุ่น ถ้าเรานำแรงที่กระทำต่อชิ้นงานออกไปจะทำให้รูปทรงของชิ้นงานโลหะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Hooks (Hooks' Law) โดยที่ค่าความชันของความสัมพันธ์ Engineering stress - Engineering strain นี้คือค่า Young's modulus (E)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \dots (3)$$

ค่า Young's modulus นั้นมีความสำคัญในเชิงวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deflection of material) ตัวอย่างเช่นในเรื่องของการ โกงตัว การงอของแท่งคานเหล็กเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกในสิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น สะพาน อาคาร เรือ เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว ในการใช้งานของอุปกรณ์กีฬา เช่น เทนนิส แบดมินตัน กอล์ฟ ก็ยังต้องการสมบัติเฉพาะของวัสดุดังกล่าวเพื่อให้สัมพันธ์กับการใช้งานที่ต้องการ

1.2.2 จุดคราก (Yield point, σ_y)

หากชิ้นงานได้รับแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอต่อไป จะเกิดปรากฏการณ์ Yielding ซึ่งเป็นจุดแรกที่ชิ้นงานโลหะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) โดยค่าความแข็งแรงที่จุดนี้เรียกว่า Yield strength (σ_y) และสามารถหาค่าได้จากค่าแรงที่กระทำตรงตำแหน่งการเกิด Yielding (P_y)หารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานดังสมการ

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0} \quad \dots (4)$$

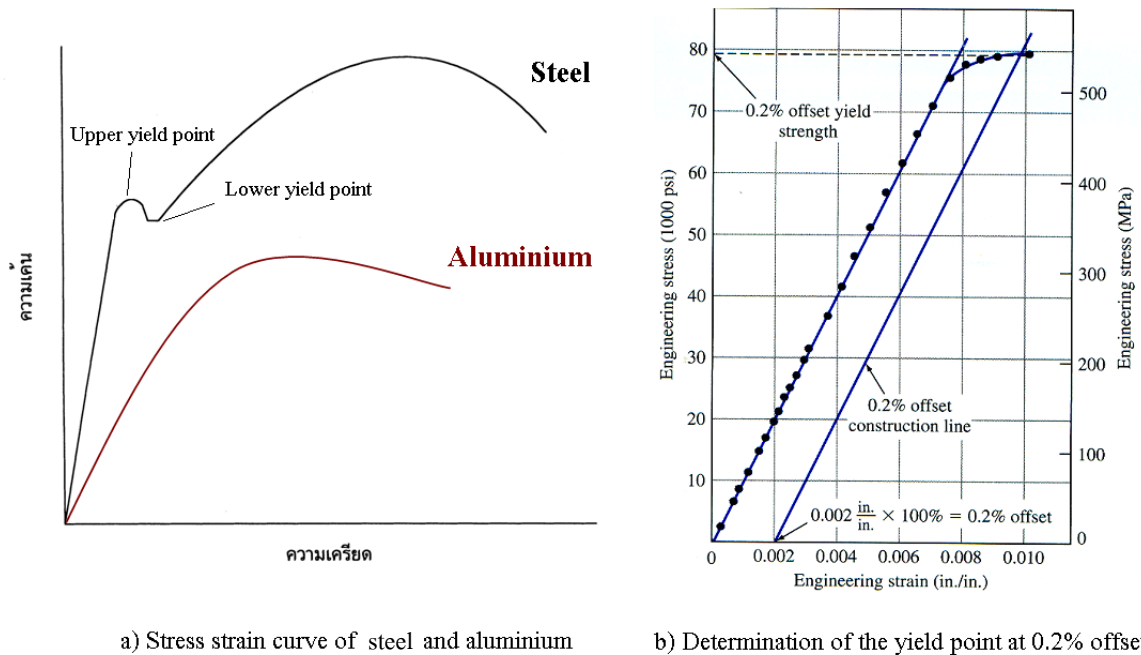
การเกิด Yielding สามารถพบในโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เช่น เหล็กและเหล็กกล้าหรือในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steels) จะสามารถสังเกตจุด Yield ได้อย่างชัดเจนจากกราฟความสัมพันธ์ของ Engineering stress-strain ดังแสดงในรูปที่ 3 a) การเกิดปรากฏการณ์ Yield point elongation จะเริ่มจากการเกิด Yielding ของชิ้นงาน โลหะครั้งแรกที่จุด Upper yield point ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าแรงดึงจะลดลงอย่างกะทันหันจนมาถึงจุด Lower yield point ต่อมาโลหะจะเกิดการยืดตัวโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงในช่วงนี้แค่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งในช่วงนี้จะเรียกว่า Yield point elongation นั่นเอง หลังจากนั้นเราจะต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นในการทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูป

ส่วนโลหะที่ไม่ปรากฏ Yield point ที่ชัดเจน ยกตัวอย่าง เช่น อะลูมิเนียม ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC นั้น จะแสดงเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering stress-strain ที่ค่อนข้างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3 a) ในกรณีนี้วัสดุไม่แสดง Yield point อย่างชัดเจนนั้น อาจกำหนดให้ใช้ 0.2% ของ Plastic strain ที่เกิดขึ้นในแผนภาพความเค้นและความเครียด เป็นค่ากำหนดในการหา Yield point อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า offset yield โดยเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma_{0.2\% y} = \frac{P_{0.2\%}}{A_0} \quad \dots (5)$$

การหาค่า Yield strength ของชิ้นงานที่ไม่แสดง Yield point ที่ชัดเจนนี้สามารถทำได้โดยลากเส้นตรงขนานกับเส้นความชันของ Stress-strain curve โดยมีจุดตัดแกน x ที่ 0.2% offset หรือคิดเป็น Strain = 0.002 ดังแสดงในรูปที่ 3 b) จุดตัดของเส้นตรงที่ 0.2% offset นี้กับ Stress-strain curve จะแสดงค่า Stress ที่ 0.2% strain หรือค่า Yield strength ที่ 0.2% offset นั่นเอง อย่างไรก็ตามวิธีการหาค่า Yield ด้วยวิธีนี้สามารถกำหนดค่า % offset ที่ 0.1% หรือ 0.5% ได้เช่นเดียวกัน ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานให้เหมาะสม ค่า Yield strength ของวัสดุที่มีความอ่อนมาก เช่น ทองแดงหรือเหล็กหล่อเทา ซึ่งจะไม่แสดงความสัมพันธ์

ระหว่าง Stress และ Strain ที่เป็นเส้นตรง ค่า Yield stress นั้นสามารถคำนวณได้จากค่า Strain ทั้งหมด ตัวอย่างเช่น $\epsilon = 0.005$



รูปที่ 3: ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด a) ของ Low carbon steel กับ Aluminium alloy และ b) การหาค่า Yield strength ที่ 0.2% offset

ค่า Yield strength ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงจุดเริ่มต้นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกนั้นมีความสำคัญอย่างมากทางวิศวกรรมด้านการก่อสร้าง โครงสร้าง การออกแบบ โดยมีการใช้ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย (Safety factor) เข้ามาคำนวณดังแสดงในสมการที่ 6 ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งเพื่อใช้ในการประมาณหรือทำนายค่าความแข็งแรงของวัสดุ ให้สามารถนำมาใช้งานทางวิศวกรรมได้อย่างปลอดภัยหรือที่เรียกว่า “Working stress, σ_w ” ตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่า Working strength $\sigma_w = 500$ MPa ถูกกำหนดในการใช้งาน โดยมี Safety factor = 1.8 นั้นหมายถึง เราควรเลือกวัสดุที่มีค่า Yield strength = 900 MPa เพื่อนำมาใช้งานในกรณีดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ในสมการที่ 6 นั้นเราสามารถใช้อ้างอิงค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด Ultimate tensile strength แทนค่า Yield strength ได้เช่นเดียวกัน

โดยทั่วไปแล้วในการสร้างอาคารต่างๆจะใช้ Safety factor เท่ากับ 2 ซึ่งค่อนข้างต่ำกว่าการใช้งานประเภทอื่น เนื่องจากเราถือว่า การคำนวณเรื่องการรับแรงต่างๆในกรณีนี้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง และมีความแม่นยำมากขึ้นในปัจจุบัน ในขณะเดียวกันทางด้านยานยนต์จะใช้ค่า Safety factor เท่ากับ 2 ส่วนต่อความดันสูงจะใช้ค่า Safety factor ประมาณ 3-4 เป็นต้น

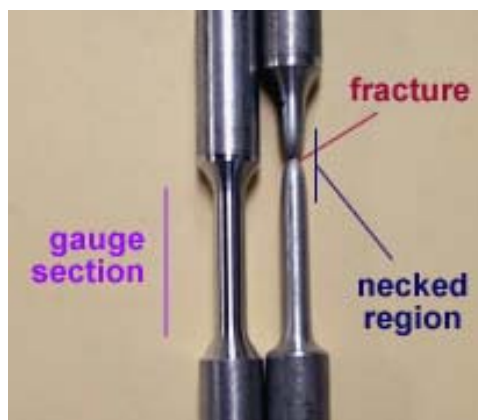
$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{\text{Safety Factor}}, \frac{\sigma_{TS}}{\text{Safety Factor}} \quad \dots (6)$$

1.2.3 ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength, σ_{TS})

เมื่อชิ้นงานโลหะได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องเลยจากจุดที่เกิดการ Yield ไปแล้ว จะสังเกตเห็นได้ว่า เราจะต้องใช้แรงเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้ชิ้นงานโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังแสดงจากกราฟ Stress-strain curve ที่เพิ่มขึ้น ในช่วงนี้โลหะจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เรียกว่า การเกิด Work hardening หรือ Strain hardening โลหะแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการเกิด Strain hardening ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึก (Crystal structure) และส่วนผสมทางเคมี (Chemical composition)

เมื่อเรายังคงให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่อง กราฟ Stress-strain จะเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่เรียกว่า Ultimate tensile strength (UTS, σ_{TS}) ที่จุดนี้แสดงถึงค่าความแข็งแรงสูงสุดที่โลหะหรือวัสดุสามารถรับแรงกระทำได้ จากนั้นพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานโลหะจะเริ่มเกิดการคอดลงและโดยทั่วไปมักจะเกิดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงาน เรียกว่าการเกิด Necking ดังแสดงในรูปที่ 4 ภายหลังจากการเกิด Necking ชิ้นงานโลหะจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform plastic deformation) เนื่องจากพื้นที่ในการรับแรงมีขนาดลดลงตามลำดับ กราฟ Engineering stress-strain จะลดต่ำลงจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะการแตกหัก (Fracture) ในที่สุด โดยค่าความแข็งแรงของวัสดุที่จุดแตกหัก ($\sigma_{fracture}$) สามารถหาได้จากค่าแรงกระทำสุดท้ายที่เกิดการแตกหักหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงานดังสมการที่ 7 อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดนี้ ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ถ้าโลหะนั้นไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุน (Porosity) จะทำให้ค่า Strength ลดลง

$$\sigma_{fracture} = \frac{P_{fracture}}{A_0} \quad \dots (7)$$



รูปที่ 4: การเกิด Necking ก่อนการแตกหักในชิ้นงานทดสอบแรงดึง

1.2.4 ความแข็งแรง ณ จุดแตกหัก (Fracture strength, σ_f)

ภายหลังที่ชิ้นงานทดสอบลดลงเมื่อความสัมพันธ์ของ Stress-strain เลยจุดสูงสุด พฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุเป็นแบบพลาสติกที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform plastic deformation) และค่า Stress จะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งถึงจุดที่วัสดุเกิดการแตกหัก จุดนี้เรียกว่า ความแข็งแรง ณ จุดแตกหักหรือ Fracture strength ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก ค่าแรงกระทำ ณ จุดที่วัสดุเกิดการแตกหักหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน ดังแสดงในสมการที่ 8

$$\sigma_{fracture} = \frac{P_{fracture}}{A_0} \quad \dots (8)$$

1.2.5 ความเครียด ณ จุดแตกหัก (Fracture strain, ϵ_f)

ค่า Fracture strain สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ Stress-strain โดยการลากเส้นขนานกับเส้นความชันของกราฟตรงจุดสุดท้ายที่เกิดการแตกหักตามลำดับลงมาตัดกับแกน x ระยะห่างระหว่างเส้นขนานทั้งสองเส้นตามแกนอนนี้แสดงค่า Fracture strain

1.2.6 ความยืดหยุ่นตัว (Tensile ductility)

ค่าความยืดหยุ่นตัวของชิ้นงาน (Tensile ductility) สามารถหาได้จากเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation) หรือเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน (%RA) ดังสมการ

$$\%Elongation = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad \dots (9)$$

และ

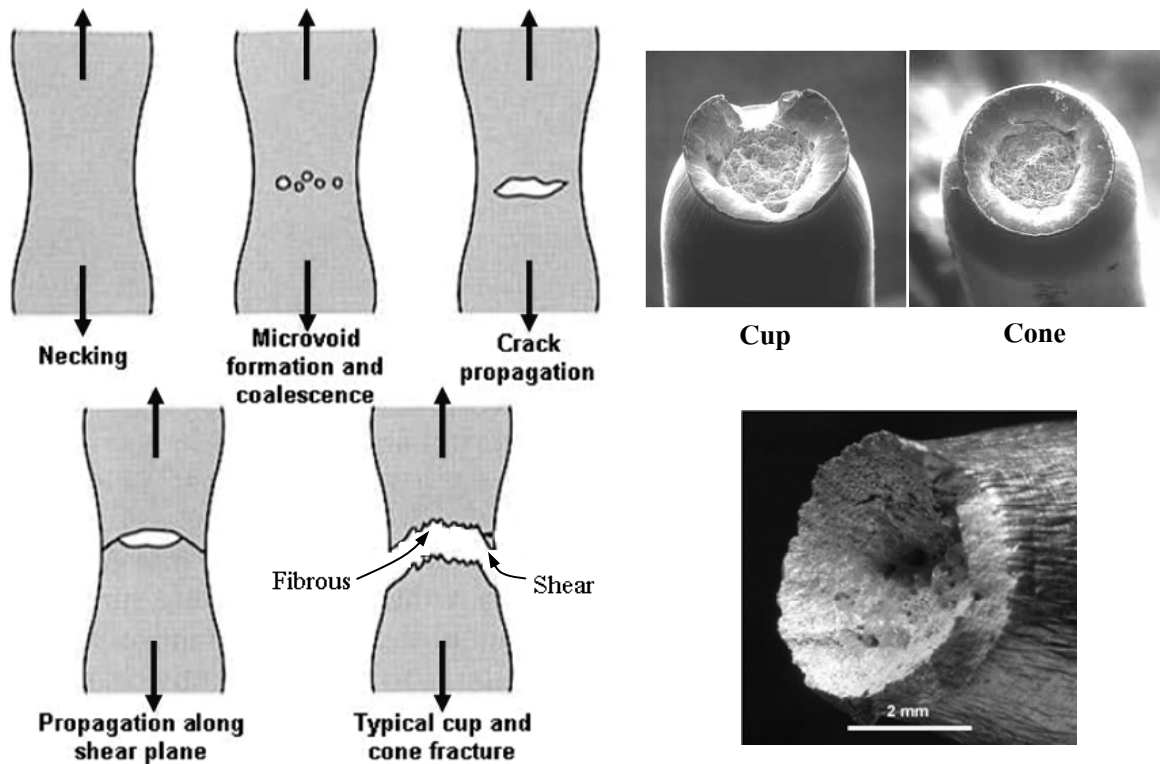
$$\%RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100 \quad \dots (10)$$

โดยที่ A_f คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานหลังการแตกหัก

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %Elongation มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%Elongation สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวดได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำหรือเปราะ (Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยากหรือทำไม่ได้ เป็นต้น

1.3 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน (Fracture characteristic of the tested specimens)

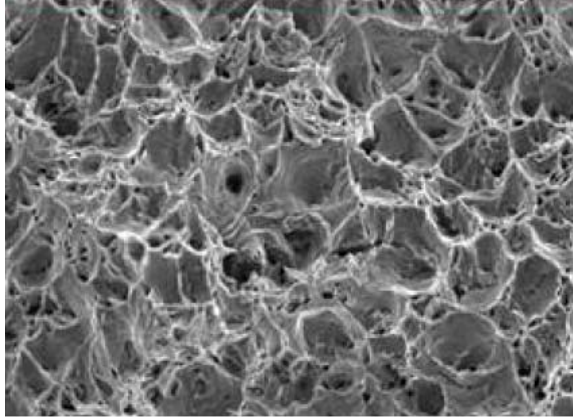
สำหรับโลหะที่มีความยืดหยุ่นสูง (Ductile metals) โดยทั่วไปจะแสดงการแตกหักแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone) ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเกิดการคอดลง (Necking) ภายหลังจากกราฟ Stress-strain ผ่านจุดสูงสุด ภายในบริเวณพื้นที่หน้าตัดดังกล่าวจะเกิดช่องว่างเล็กๆที่เรียกว่า Microvoid จำนวนมาก และ Microvoid ต่างๆเหล่านี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นจนมาเชื่อมกันเกิดเป็นรอยแตกขนาดใหญ่บริเวณตรงกลางโดยมีระนาบของรอยแตกตั้งฉากกับทิศทางแรงดึง ก่อนชิ้นงานเกิดการแตกหักจะมีการฟอร์มตัวของรอยแตกตามระนาบแรงเฉือน (Shear plane) ขึ้นที่ขอบของชิ้นงานและเกิดการเชื่อมโยงของรอยแตกทั้งสองเกิดเป็นลักษณะการแตกหักแบบ Cup and cone ดังกล่าว เมื่อเราสังเกตพื้นผิวการแตกหักด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นสีเทาเนื่องจากเป็นพื้นผิวที่ขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 6 การแตกหักแบบ Ductile fracture นี้จะมีการดูดซับพลังงานระหว่างการแตกหักค่อนข้างมากเพราะระหว่างการแตกหักจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างเห็นได้ชัด ชิ้นงานจึงมักมีค่า Tensile ductility ที่ค่อนข้างดี



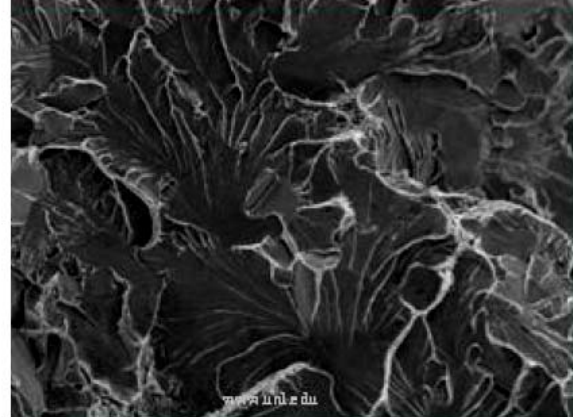
รูปที่ 5: ลักษณะการแตกหักแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone fracture) [3]

สำหรับโลหะที่มีความเปราะ (Brittle metals) จะมีลักษณะพื้นผิวการแตกหักที่เรียบและแวววาว ในบางกรณีอาจมองเห็นเป็นกลุ่มของ Brittle facets ได้หากชิ้นงานมีขนาดของเกรน (Grain) ที่หยาบมาก หรือหากเกรนของโลหะมีขนาดเล็ก เราสามารถตรวจสอบ Brittle facets ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope :SEM) ดังแสดงในรูปที่ 7 การแตกหักแบบ

Brittle fracture นี้จะมีการดูดซับพลังงานระหว่างการแตกหักค่อนข้างน้อย โดยส่วนใหญ่วัสดุนั้นจะมีค่า Yield strength ที่ค่อนข้างสูง และมีค่า Tensile ductility ที่ต่ำ ซึ่งสังเกตได้จากการที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกน้อยนั่นเอง



รูปที่ 6 : Ductile fracture surface



รูปที่ 7 : Brittle fracture surface

ASTM A514 Steel, grade P, plate thickness <= 19 mm

Physical Properties	Metric	English
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³

Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	264	264
Hardness, Knoop	289	289
Hardness, Rockwell B	98	98
Hardness, Rockwell C	26.0	26.0
Hardness, Vickers	278	278
Tensile Strength, Ultimate	828 MPa	120000 psi
Tensile Strength, Yield	690 MPa	100000 psi
Elongation at Break	18.0 %	18.0 %
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi
Poissons Ratio	0.290	0.290
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi

Thermal Properties	Metric	English
Specific Heat Capacity	0.452 J/g-°C	0.108 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	46.6 W/m-K	323 BTU-in/hr-ft ² -°F

Component Elements Properties	Metric	English
Boron, B	0.0010 - 0.0050 %	0.0010 - 0.0050 %
Carbon, C	0.12 - 0.210 %	0.12 - 0.210 %
Chromium, Cr	0.85 - 1.20 %	0.85 - 1.20 %
Iron, Fe	95.36 - 96.73 %	95.36 - 96.73 %
Manganese, Mn	0.45 - 0.70 %	0.45 - 0.70 %
Molybdenum, Mo	0.45 - 0.60 %	0.45 - 0.60 %
Nickel, Ni	1.20 - 1.50 %	1.20 - 1.50 %
Phosphorous, P	<= 0.035 %	<= 0.035 %
Silicon, Si	0.20 - 0.35 %	0.20 - 0.35 %
Sulfur, S	<= 0.040 %	<= 0.040 %

ตารางที่ 2 Material property of steel (ASTM A514) [4]

2. วัสดุและอุปกรณ์ (Materials and equipment)

- 2.1 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง
- 2.2 ไมโครมิเตอร์หรือเวอร์เนียคาลิปเปอร์
- 2.3 เครื่องมือทดสอบ Universal testing machine

3. วิธีการทดลอง (Experimental procedure)

- 3.1 วัดขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียม เหล็กกล้าและทองเหลือง บันทึกลงในตารางบันทึกผล พร้อมทำเครื่องหมายแสดงระยะของ Gauge length ของแต่ละชิ้นงานเพื่อใช้คำนวณหาค่า Stress และ Strain
- 3.2 นำชิ้นงานโลหะมาทดสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องมือทดสอบ Universal testing machine (UTM) ให้บันทึกข้อมูล Load และ Extension เพื่อแสดงผลในรูปของ Stress-strain curve
- 3.3 คำนวณหาค่า Young's modulus, Yield strength, Ultimate tensile strength, Fracture strain, % Elongation ของแต่ละชิ้นงานแล้วบันทึกลงในตารางบันทึกผล เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง
- 3.4 ศึกษาพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงาน โดยใช้ตาเปล่าและวาดรูปประกอบการอธิบาย
- 3.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

4. ผลการทดลอง (Results)

Details	Speciment 1		Speciment 2	
	Formulation	Result	Formulation	Result
Gauge length (mm)				
Width (mm)				
Thickness (mm)				
Cross-sectional area (mm ²)				
Speed (mm/min)				
Young's modulus (GPa)				
Load at yield point (N)				
Yield strength (MPa)				
Maximum load (N)				
Ultimate tensile strength (MPa)				
% Elongation at Fracture				
Fracture strain				

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุทางวิศวกรรม

- Engineering stress-strain curve of Speciment 1

อธิบายลักษณะของกราฟ Engineering stress-strain

- Engineering stress-strain curve of Speciment 2

อธิบายลักษณะของกราฟ Engineering stress-strain
