



บทที่ 1

คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ

1.1 คุณสมบัติของวัสดุและการทดสอบ

ในการพิจารณาเลือกวัสดุ เพื่อนำมาใช้ในงานในลักษณะต่างๆ จำเป็นจะต้องทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมกับสภาพงานนั้นๆ คุณสมบัติของวัสดุที่จะต้องพิจารณา ได้แก่

1.1.1 *คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)* เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ การเลือกวัสดุเพื่อนำไปใช้ในงานช่าง จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ ได้แก่ การกัดกร่อน, ส่วนผสม และลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของส่วนผสมในวัสดุ เป็นต้น

1.1.2 *คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Properties)* เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่เกี่ยวกับแรงที่มากระทำแต่เกี่ยวกับคุณภาพหรือคุณลักษณะของเนื้อวัสดุ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ, การนำความร้อน, สัมประสิทธิ์การขยายตัว, ความหนาแน่น และความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น

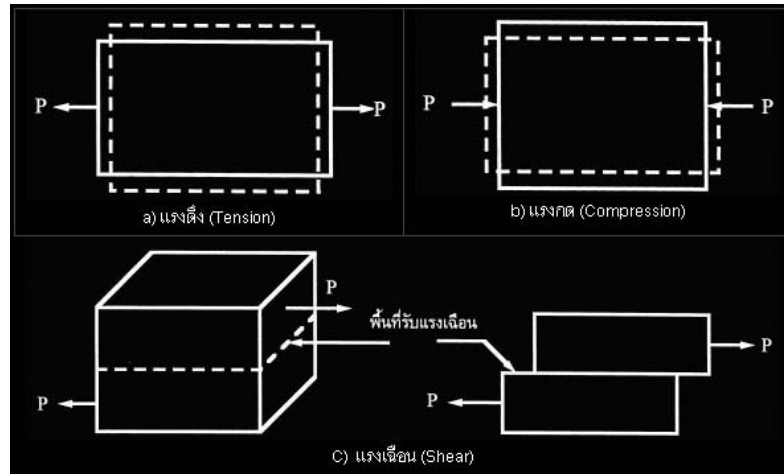
1.1.3 *คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)* เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุ เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ คุณสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรง, ความแข็ง, ความสามารถในการยืดตัว, ความยืดหยุ่น, ความเหนียว เป็นต้น

ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเราจะเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ คุณสมบัติเชิงกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ

ความเค้น (Stress)

ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายในโดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. **ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress)** เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 1.1a



รูปที่ 1.1 : แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ

2. **ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress)** เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 1.1b

3. **ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress)** ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 1.1c มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน

ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิมวัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินขีดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าขีดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งยืดหยุ่นจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ



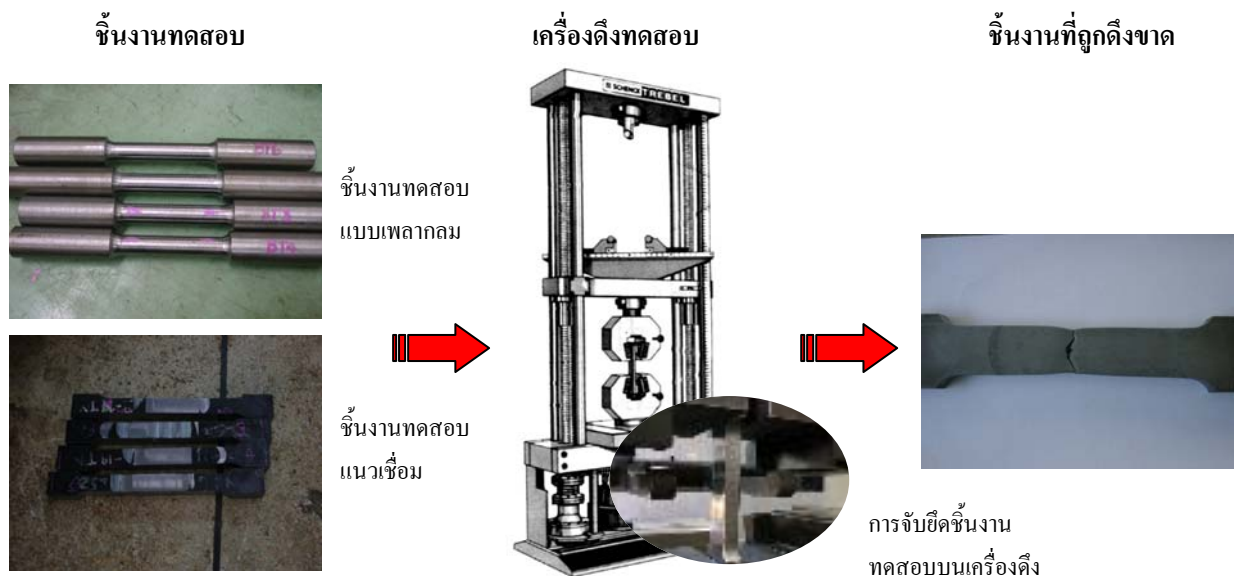
1. **แบบเส้นตรง** ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม
2. **แบบเลื่อน** เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

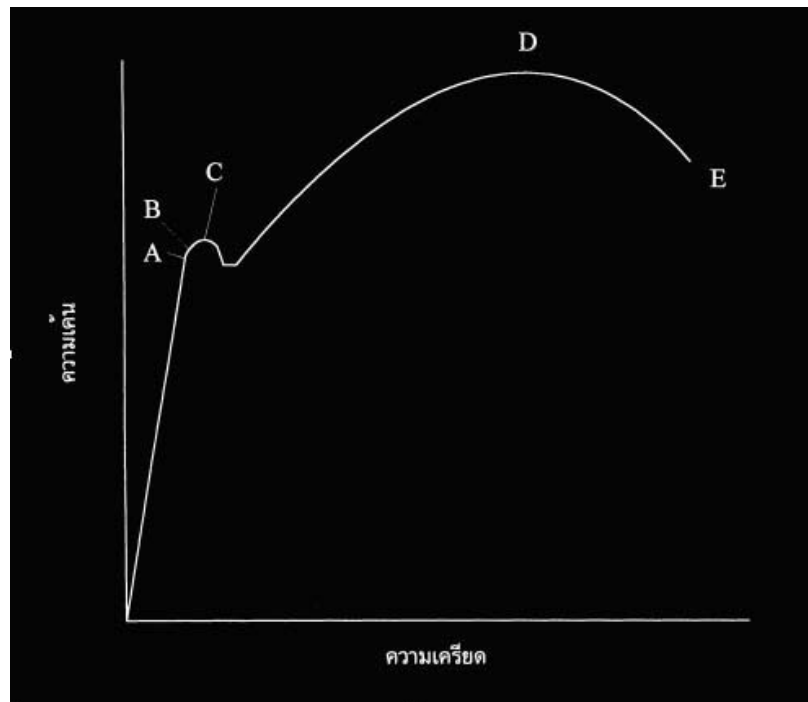
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 1.2 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้ อีกด้วย

การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาตั้งอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 1.3 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย



รูปที่ 1.2 : วิธีการทดสอบแรงดึง



รูปที่ 1.3 : เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)

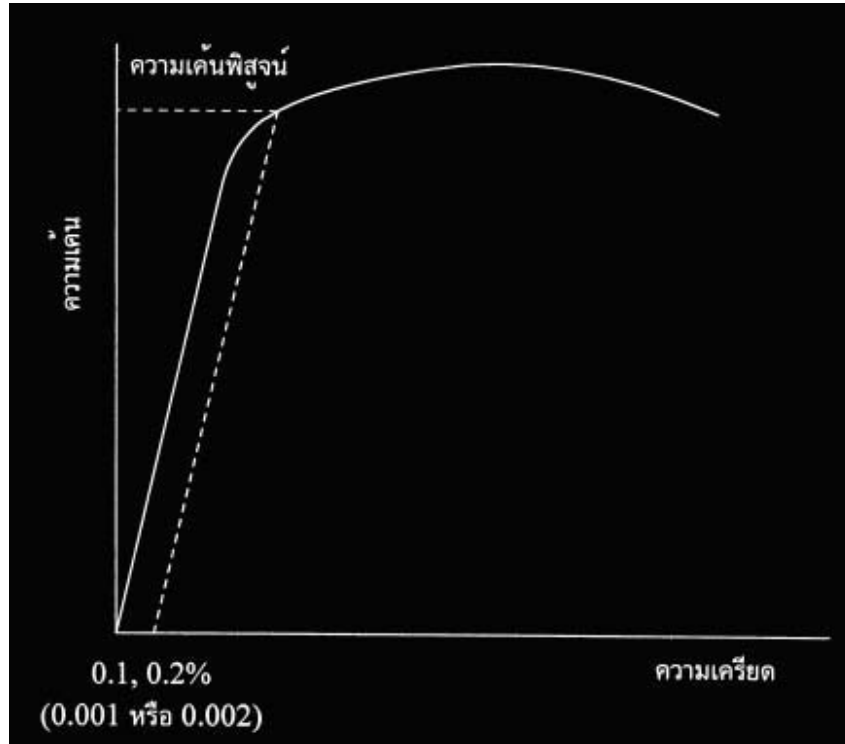
จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด เราพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิสัยสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิสัยสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิสัยสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุ โลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราจะใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับ



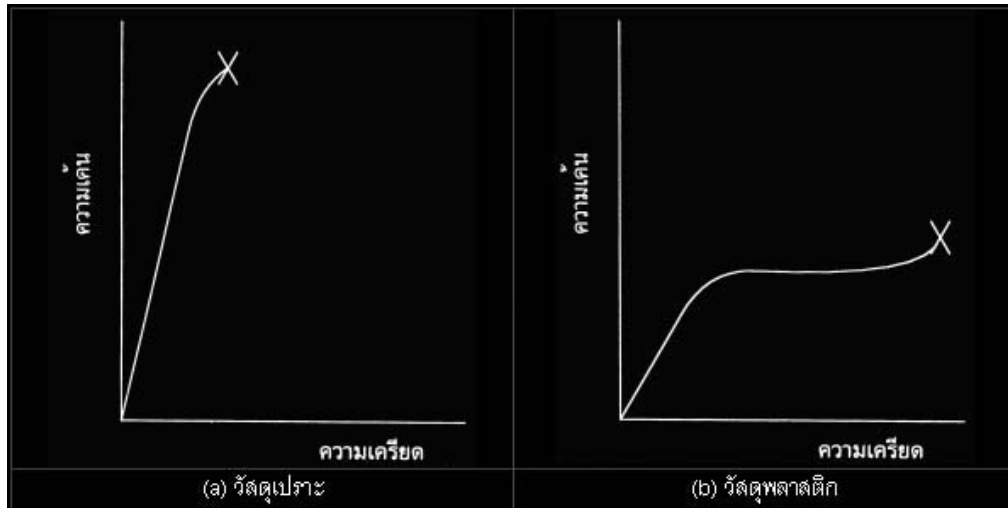
กราฟช่วงแรกไปจนถึงเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 1.4 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 : เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้อย่างใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยว่า ค่าความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูป 1.5 a ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 1.5 b



รูปที่ 1.5 : เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

1. **ความเหนียว (Ductility)** ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %EI มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เปราะ , Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

2. **Modulus of Elasticity or Stiffness** ภายใต้อิทธิพลของแรงที่กระทำวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa ถ้าแรงที่มากกระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างอีลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปอย่างอีลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ ตารางที่ 1.1 จะแสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุต่าง ๆ ไว้

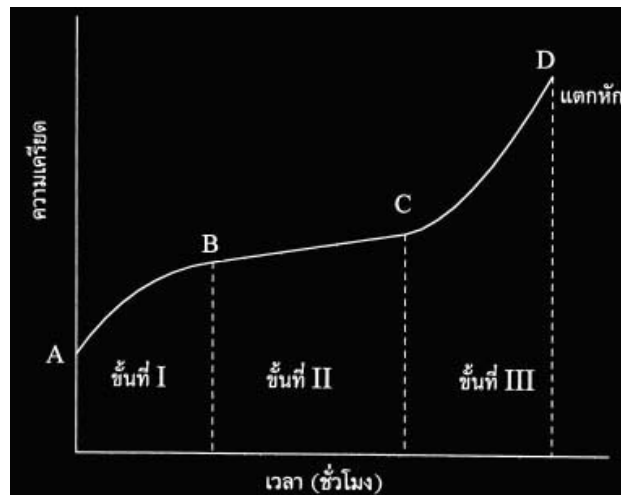
ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	Modulus of elasticity 10 ⁶ psi	Shear Modulus 10 ⁶ psi
Aluminium alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (plain carbon and low alloys)	29.0	11.0
Stainless Steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5



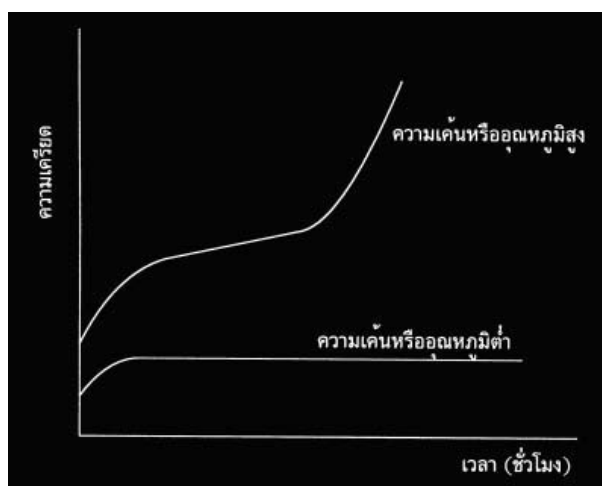
ความคืบ (Creep)

วัสดุส่วนใหญ่เมื่ออยู่ภายใต้แรงที่มากระทำ แม้ว่าจะต่ำกว่าพิคชัลดหยุ่น หากทิ้งไว้นาน ๆ แล้ว ก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหรือแบบพลาสติกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ด้วยปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า ความคืบ ปริมาณของความคืบที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ปริมาณของความเค้น อุณหภูมิและเวลา หากเรา ให้สภาวะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอ ความคืบจะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน ดังที่แสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 : เส้นโค้งความคืบ

เมื่อเราใช้แรงกระทำคงที่จะเกิดความเครียด (OA) ขึ้นทันที ซึ่งค่าความเครียด OA นี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและสภาวะที่ให้ (ปริมาณของแรงกระทำ ความเค้นและอุณหภูมิ) และจะมีความสัมพันธ์กับค่า Modulus of elasticity (E) ของวัสดุนั้น หลังจากนั้นวัสดุก็จะเริ่มเกิดความคืบในขั้นที่ I ซึ่งอัตราการเกิดความเครียดจะค่อย ๆ ลดลง (AB) ในขั้นที่ II (BC) อัตราการเกิดความเครียดจะคงที่และเป็นอัตราการเกิดความเครียดต่ำสุดในขณะที่วัสดุเกิด Creep ขึ้น อัตราการเกิดความเครียดนี้เรียกว่า Minimum Creep Rate จากนั้นเมื่อถึงขั้นที่ III (CD) อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนวัสดุขาดหรือแตกออกจากกัน ที่จุด D การเกิดความคืบไม่จำเป็นจะต้องครบทั้ง 3 ขั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะและเวลาที่ใช้ ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 : Creep Curve ที่ Condition ต่างกัน

เส้นบน ถ้าเราให้แรงกระทำที่ทำให้เกิดความเค้นหรืออุณหภูมิสูงพอจะเกิดความคืบจนครบ 3 ขั้น แต่เส้นล่างนั้นความเค้นหรืออุณหภูมิต่ำจะมีแค่ 2 ขั้น นั่นคือจะไม่เกิดการแตกหักขึ้น

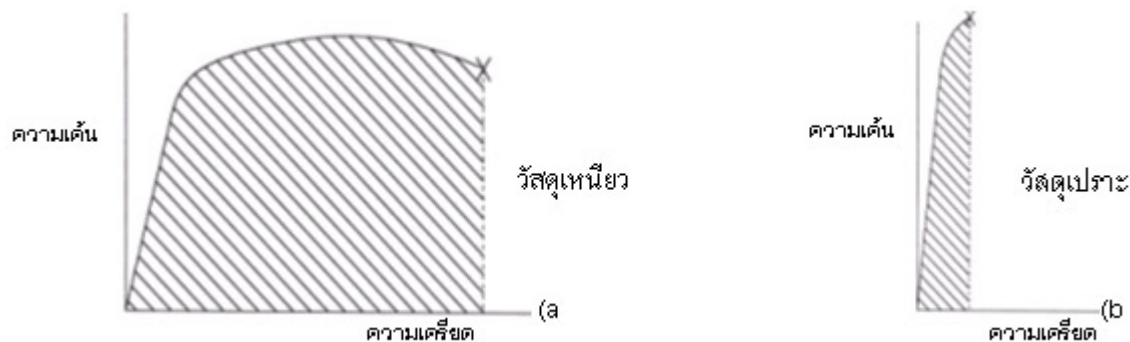
ในกรณีของพวกโพลีเมอร์ อาจเกิดความคืบขึ้นได้ แม้ที่อุณหภูมิห้อง แต่โลหะส่วนใหญ่และพวกเซรามิกจะไม่เกิดความคืบที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงก็อาจเกิดได้ ดังนั้น การใช้พวกโลหะหรือเซรามิกที่อุณหภูมิสูงจะต้องนำคุณสมบัติในการเกิดความคืบมาพิจารณาด้วย



ความแกร่งหรือความเหนียว (Toughness)

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานบางประเภท วิศวกรจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ เพื่อประเมินโอกาสการแตกหักเสียหาย และความปลอดภัยในขณะที่ใช้งานในสภาวะต่างๆ เช่น การใช้งานเหล็กกล้าทนสึกของรถคัมพ์ที่ต้องรับแรงกระแทกจากการบรรทุกหิน เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน หรือเหล็กสำหรับงานท่อความดันที่ใช้ในอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น

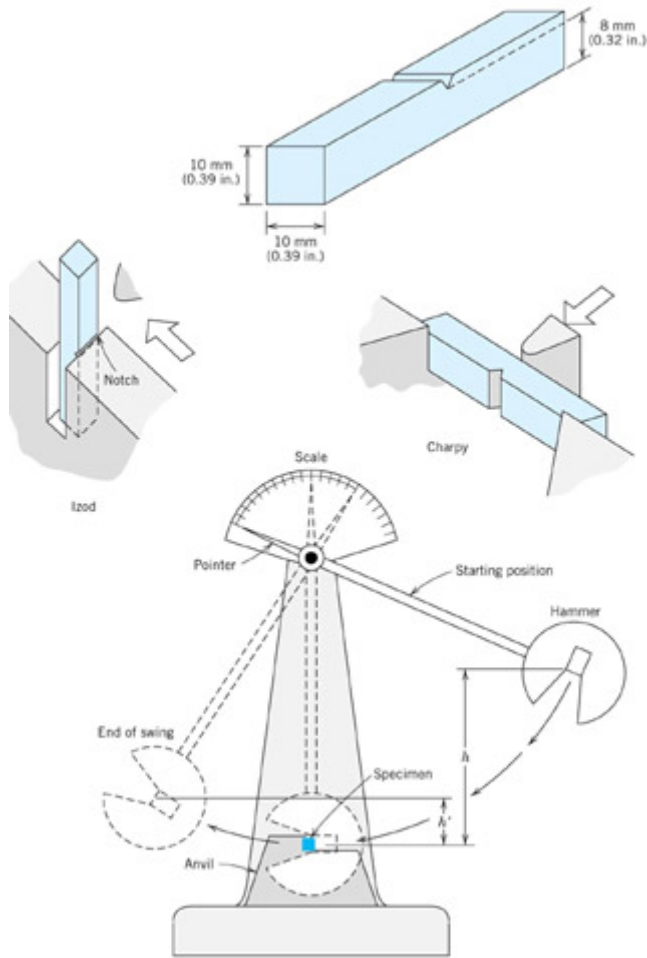
ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก ความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรามักจะประเมินค่าความเหนียวจาก Modulus of Toughness ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น (σ) ความเครียด (ϵ) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ซึ่งค่า Modulus of Toughness นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย



รูปที่ 1.8 : Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b)

วิธีการทดสอบความเหนียวที่นิยมใช้ คือ การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อทำการวัดค่า Impact Energy, Impact Transition Temperature (ITT) และศึกษาผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของวัสดุ โดยการตีขึ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน จนเกิดการแตกหัก จุดประสงค์ในการทำการทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรับแรงกระแทก (Dynamic Load) ของวัสดุ

สำหรับค่าที่นิยมวัดมากที่สุดในการทดสอบแรงกระแทก คือ ค่า Impact Energy ซึ่งเป็นพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงกระแทก (Dynamic Impact Force) จนเกิดการแตกหัก โดยมีวิธีการทดสอบมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test เครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 : การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod

วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกัน คือ จะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของค้อนน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้) พลังงานที่กระแทกขึ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบชิ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy นั่นเอง มีหน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ หรือ จูล

ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod ก็คือ การวางชิ้นงานทดสอบ โดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ และให้ลูกตุ้มตกกระแทกที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod Test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มกระแทกกับด้านที่มีรอยบาก

ชิ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปรูปกุญแจ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้



รูปที่ 1.10 : ลักษณะของชิ้นงานทดสอบและรอยบากร่อง



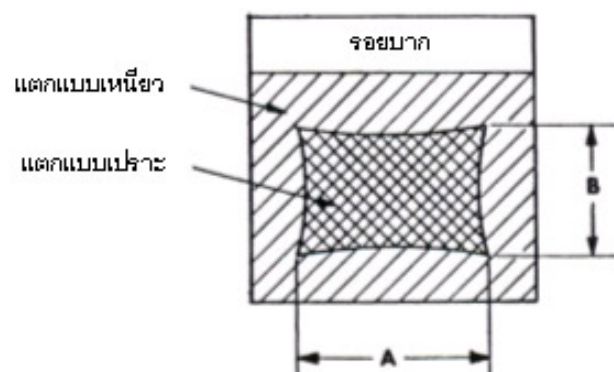
อุณหภูมิมีผลต่อความเหนียวอย่างมาก วัสดุเหนียวอาจจะเปลี่ยนเป็นวัสดุเปราะได้เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ถ้าเรานำค่า Impact Energy มาพล็อตกับอุณหภูมิ เราจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าของ Impact Energy ลดลงอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 1.11 ค่าอุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า Impact Transition Temperature (ITT) โดยค่า ITT นี้เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะ คือ เปลี่ยนจากวัสดุเหนียวที่มีค่าพลังงานสูงมาเป็นวัสดุเปราะซึ่งมีพลังงานต่ำ



รูปที่ 1.11 : การแช่ชิ้นงานทดสอบในน้ำแข็งเพื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 0 องศา

ค่า Impact energy จะไม่นำมาใช้โดยตรงในการออกแบบ แต่มันมีประโยชน์ที่จะใช้เป็นแนวทางในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะพวกเหล็กที่มีค่า ITT อยู่ใกล้กับอุณหภูมิห้อง เราจะต้องระมัดระวังไม่ใช้งานวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่า ITT ของมัน

โดยทั่วไปเราจะกำหนดค่า ITT เป็นค่าเดียว (ไม่ใช่ช่วงอุณหภูมิดังที่แสดงในรูปที่ 1.12) โดยวิธีในการกำหนดค่า ITT มีอยู่หลายวิธี เช่น การตรวจสอบผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบแรงกระแทก หรือการกำหนดค่า ITT โดยใช้อุณหภูมิที่ผิวรอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีสัดส่วนของพื้นที่ที่เกิดการแตกแบบเปราะ (Brittle Fracture) กับพื้นที่ที่แสดงการแตกแบบเหนียว (Ductile Fracture) เป็น 50:50 พอดี (ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Fracture Appearance Transition Temperature - FATT)



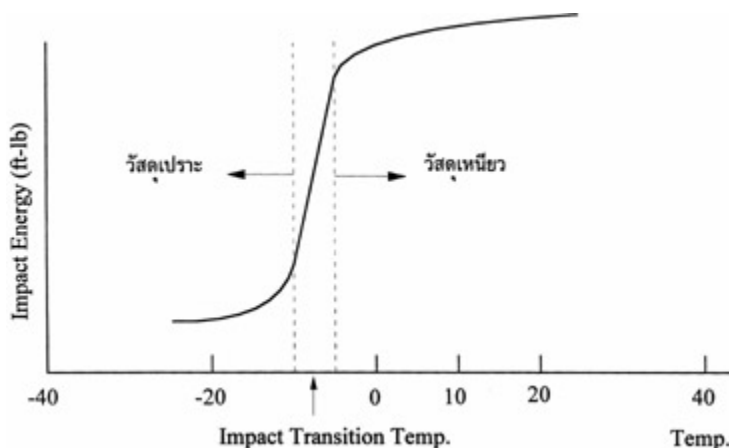
รูปที่ 1.12 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะ และแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก



การวัด % การแตกแบบเหนียว

เส้นผ่าศูนย์กลาง B, มม.	เส้นผ่าศูนย์กลาง A, มม.																		
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	94	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ กำหนดค่า Impact Energy ค่าหนึ่งขึ้นมาเป็นเกณฑ์ โดยควรจะมีค่ามากกว่าพลังงานที่วัสดุจะได้รับในระหว่างการใช้งาน ถ้าวัสดุทดสอบแล้วมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ก็ถือว่าเป็นวัสดุเปราะซึ่งอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย จึงไม่ควรจะนำมาใช้งาน และกำหนดค่า ITT โดยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบได้ค่า Impact Energy เท่ากับเกณฑ์ที่กำหนดพอดี (ITT ที่กำหนดโดยวิธีนี้เรียกว่า Ductility Transition Temperature) ค่าพลังงานแรงกระแทกที่ใช้เป็นเกณฑ์ คือ 20 J สำหรับการทดสอบ Charpy V-Notch (ชิ้นงานมีรอยบากรูปตัว V) ดังนั้นวัสดุที่จะนำไปใช้งานจึงควรมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด หรืออาจใช้ค่า Ductility Transition Temperature ในการกำหนดสภาวะการใช้งาน คือ ควรจะใช้งานวัสดุในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า Ductility Transition Temperature



รูปที่ 1.13 : แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของ อุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ

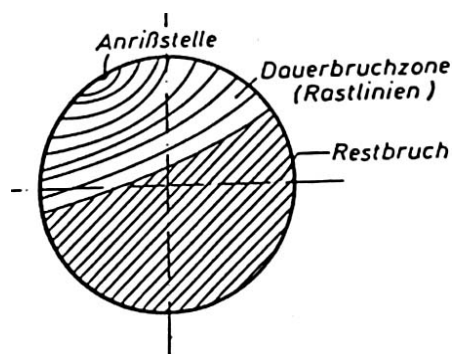


เนื่องจากแต่ละมาตรฐานการทดสอบ จะใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดและลักษณะรอยบากที่ต่างกัน ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบก็ต่างกัน สำหรับมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย เลือกใช้ชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นตัวคูณ 5 มิลลิเมตร ขนาดชิ้นทดสอบเท่ากับ 10x10x50 มิลลิเมตร แต่สามารถใช้ในการทดสอบที่แตกต่างไปจากนี้ได้ และเขียนสัญลักษณ์แทนไว้ดังนี้

KU 30/3 คือทำ การทดสอบ โดยใช้พลังงานในการกระแทก 30 kg m และใช้ชิ้นทดสอบที่มีรอยบากลึก 3 มิลลิเมตร

ความล้า (Fatigue)

เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength) มากกระทำกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ กัน ก็อาจจะเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้าหรือ Fatigue ขึ้น ความล้าที่เกิดในวัสดุนี้ เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่าง ๆ เพราะตลอดอายุงานของเครื่องจักร เช่น เครื่องยนต์ สวิตช์รีเลย์ ฯลฯ จะต้องเกิดความเค้นสลับไปสลับมาเป็นล้าน ๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมันได้ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่จากการศึกษาพบว่าความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นรวมศูนย์ (Stress Concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นซ้ำไปซ้ำมารอยแตกนี้จะโตขึ้นเรื่อยๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด วัสดุก็จะแตกหักจากกัน



รูปที่ 1.14 : ลักษณะรอยขาดเนื่องจากการล้าตัว

ถ้าเรากำหนดจำนวนรอบของความเค้นที่ทำซ้ำไปซ้ำมาแล้ว (โดยปกติจะใช้ที่ค่า 10^6 รอบ) ค่าความเค้นที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของความเค้นรอบนั้น ๆ เราเรียกว่า Fatigue Strength สำหรับโลหะ โดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าความเค้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้ความเค้นต่ำกว่านี้แล้ว ไม่ว่าจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าความเค้นนี้เรียกว่า Endurance Limit



ความแข็ง (Hardness)

ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสีและการกลึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งาน ดังนี้

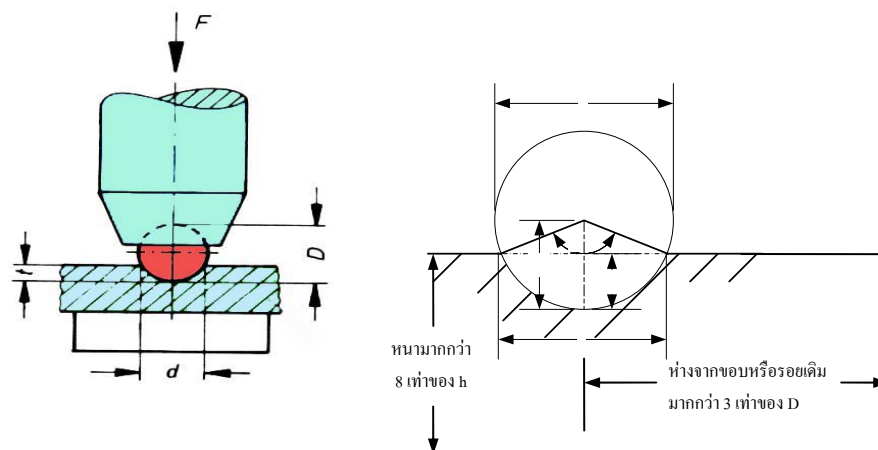
1. Brinell Hardness Test (H_B)

เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสูตร ดังนี้

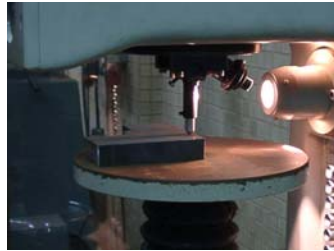
$$H_B = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

โดยที่

H_B	คือ	ค่าความแข็งแบบ Brinell (kgf/mm^2)
P	คือ	แรงกด (kgf)
D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า (mm.)
d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm.)



รูปที่ 1.15 : การทดสอบแบบ Brinell



รูปที่ 1.16 : วิธีการทดสอบแบบ Brinell

แรงกดสำหรับการทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3000 kgf และลูกบอลเหล็กกล้าจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 - 10 มม. โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็กหรือเหล็กกล้า และ 30 วินาทีสำหรับโลหะนิ่ม (เช่น ตะกั่ว ดีบุก เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโลหะมีความแข็งที่แตกต่างกัน หากโลหะที่ทดสอบนิ่มและใช้แรงกดมาก จะมีผลทำให้ระยะที่หัวกดจมลงไปลึกมาก จนอาจเกินกว่าครึ่งลูก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็งผิดพลาดได้ หรือหากเลือกแรงกดน้อยไปเมื่อเทียบกับขนาดของลูกบอลเหล็กกล้าก็จะทำให้



รูปที่ 1.17 : ลักษณะการทดสอบแบบ Brinell ที่ไม่ถูกต้อง

การแปลผลทำได้ไม่แม่นยำเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้แรงกด และขนาดลูกบอลจะแตกต่างกันไปด้วย เพื่อป้องกันข้อบกพร่องที่จะพบได้ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ เราสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วน P/D^2 ดังต่อไปนี้

โลหะ	ค่าความแข็งโดยประมาณ (HB)	อัตราส่วน P/D^2
เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ	มากกว่า 100	30
ทองแดง, ทองแดงผสม, อะลูมิเนียมผสม	30-200	10
อะลูมิเนียม	15-100	5
ดีบุก, ดีบุกผสม, ตะกั่ว, ตะกั่วผสม	3-20	1

สำหรับการทดสอบเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือโลหะที่มีความแข็งสูงมากๆ จะไม่สามารถทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งได้ จะต้องใช้ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 2.45 มม. แทนซึ่งจะใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่แข็งตั้งแต่ 444 ถึง 627 H_B



ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบ เพื่อให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่แน่นอน และที่ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม นอกจากนี้การเตรียมผิวต้องระวังอย่างมาก โดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) และกรรมวิธีเย็น (cold working)
- ต้องระวังตำแหน่งการทดสอบโดยให้ระยะหัวกดอยู่ห่างจากขอบแต่ละด้านของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล ระยะห่างของแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล และชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของการกด
- ควรวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาความแข็งต่อไป

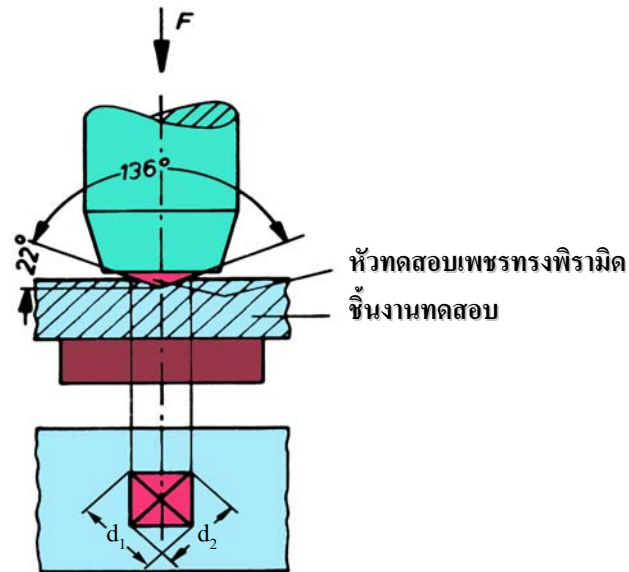
การวัดความแข็งแบบ Brinell มีข้อดี คือ ในการกด 1 ครั้งจะครอบคลุมหลายๆ เฟสของชิ้นงาน ทำให้ได้ค่าความแข็งที่สม่ำเสมอ ซึ่งหากวัดด้วยวิธีที่ใช้หัวกดขนาดเล็กมาก อาจทำให้วัดได้เพียงเฟสเดียว ทำให้ค่าความแข็งที่ได้ ไม่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของทั้งวัสดุชิ้นนั้น แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ชิ้นงานต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะวัดกับหัวกดได้ และไม่ควรวัดกับชิ้นงานที่มีรัศมีผิวโค้งน้อยกว่า 1 นิ้ว

2. Vickers Hardness Test

เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136° (เป็นมุมที่มองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมากๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D^2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

$$HV = \frac{1.854P}{d^2}$$

โดยที่	HV	คือ	ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm ²)
	P	คือ	แรงกด (kgf)
	d	คือ	ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm.)



รูปที่ 1.18 : ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ได้แก่

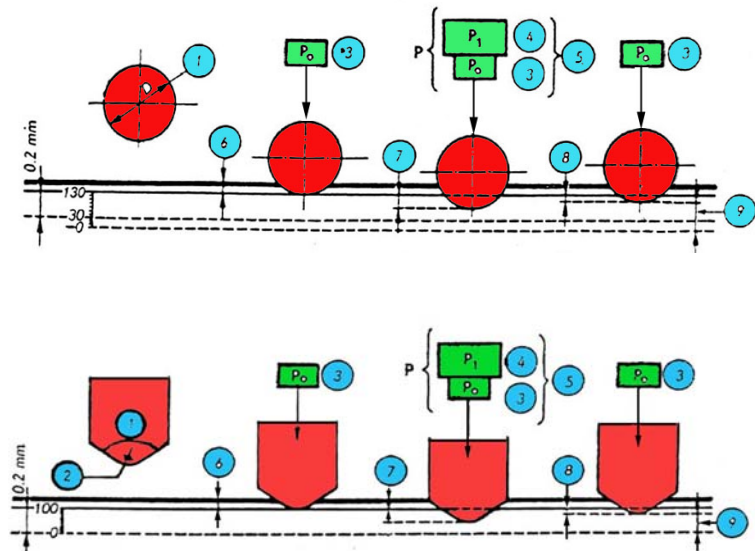
- การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าชิ้นงานนิ่มและใช้น้ำหนักกดมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหัวกดเพชรตอนคลายหัวกดได้
- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) หรือกรรมวิธีเย็น (cold working)
- ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y
- ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ
- การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่านค่า

วิธีทดสอบนี้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางได้



3. Rockwell Hardness Test

เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจาก "ความลึก" ระยะกคที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด แรงที่ใช้กคมี 2 ส่วน คือ minor load และ major load



รูปที่ 1.19 : วิธีการทดสอบแบบ Rockwell Hardness Test

Minor load เป็นแรงที่ยึดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง

Major load เป็นแรงที่มากกว่า minor load และกคลงภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงาน

สำหรับมาตรฐานความแข็งแบบ Rockwell มีอยู่ 15 สเกล (ไม่รวม superficial hardness scale) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
A	หัวกดเพชร (two scales-carbide and steel)	60	ซีเมนต์คาร์ไบด์, เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งผิวไม่ลึก (shallow case-hardening steel)
B	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	100	โลหะผสมของทองแดง (Copper alloys), เหล็กกล้าที่ไม่แข็งมาก (soft steels), โลหะผสมของอะลูมิเนียม (aluminum alloys) และเหล็กหล่ออ่อนเหนียว (malleable iron)



สเกล	ประเภทหัวกด	Major load, kgf	การใช้งานทั่วไป
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า, เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง (hard cast irons), เหล็กหล่ออบเหนียว ชนิดเพอร์ริติก, ไทเทเนียม, เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB
D	หัวกดเพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออบเหนียว ชนิดเพอร์ริติก
E	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	100	เหล็กหล่อ, โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตเบร้ง
F	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	60	โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน และโลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง
G	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	150	บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส (Phosphor bronze), โลหะผสมทองแดง-เบริลเลียม (beryllium copper), เหล็กหล่ออบเหนียว. โดยความแข็งสูงสุดที่วัดได้จะต้องไม่เกิน 92 HRG เพื่อป้องกันหัวกดเสียหาย
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	60	อะลูมิเนียม, สังกะสี และตะกั่ว
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
R	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
S	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
V	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนุ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ค่าความแข็งจะแสดงเป็น 2 ส่วน คือ ตัวเลขค่าความแข็งที่วัดได้ และสัญลักษณ์ของสเกลที่ใช้วัด (แสดงถึงลักษณะหัวกดที่ใช้วัด ค่า และmajor load) ตัวอย่าง เช่น 64.0 HRC หมายความว่า ค่าตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 64.0 ด้วยการวัดแบบ Rockwell สเกล C ที่ใช้หัวกดเพชร และมีค่า major load เท่ากับ 100 kgf



ส่วนใหญ่การทดสอบเหล็กกล้า และวัสดุอื่นๆ จะใช้เป็น Rockwell สเกล C และ B อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่ได้มีการกำหนดสเกลที่ชัดเจน ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ ด้วย เพื่อให้เลือกใช้สเกลได้เหมาะสมที่สุด ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่

> ชนิดของวัสดุ โดยทั่วไปผลการทดสอบที่ดีที่สุด ได้จากการใช้แรงกดสูงที่สุดเท่าที่ชิ้นงานทดสอบจะสามารถรับได้ และจากตารางที่ 1 จะบอกได้ว่าวัสดุที่ทดสอบควรใช้สเกลแบบไหน เช่น วัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้า หรือทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ จะต้องใช้สเกล A, C, D เท่านั้น

> ความหนาของชิ้นงานทดสอบ ควรมากกว่าความลึกของรอยกดอย่างน้อย 10 เท่า เพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ซึ่งการวัดความลึกรอยกด แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

$$\text{- ความลึกรอยกด} = (100 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002 \quad \text{สำหรับหัวกดเพชร}$$

$$\text{- ความลึกรอยกด} = (130 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002 \quad \text{สำหรับหัวกดบอลนอกจากนี้}$$

ภายหลังการทดสอบจะต้องไม่มีรอยนูนเกิดขึ้นทางด้านหลังของชิ้นงานทดสอบด้วย

> รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ และตำแหน่งในการวัด

- ชิ้นงานรูปทรงยาว จะต้องติดตั้งแท่นรองรับเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ผิวทดสอบที่ทำการวัดความแข็งตั้งฉากกับแนวกดของหัวกด

- ชิ้นงานทรงกระบอก การวัดค่าความแข็งให้ถูกต้องจะต้องใช้ค่า correction factor ช่วยปรับค่าความแข็งที่อ่านได้ เนื่องจากในการวัดความแข็งของผิวนูน (convex) หัวกดจะกดลงไปลึกมากกว่าปกติ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นค่า correction factor (ตารางที่ 2) จะถูกบวกเข้าไปเมื่อวัดความแข็งกับผิวชิ้นงานทรงกระบอก นอกจากนี้ในการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอกจะต้องใช้แท่นตัววี (V anvil) เพื่อช่วยรองรับชิ้นงานทดสอบให้อยู่นิ่งกับที่



ตารางที่ 2 : ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอก

Correction factors สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ							
ค่าความแข็งที่อ่านได้	6.350 มม. (0.250 นิ้ว)	9.525 มม. (0.375 นิ้ว)	12.700 มม. (0.500 นิ้ว)	15.875 มม. (0.625 นิ้ว)	19.050 มม. (0.750 นิ้ว)	22.225 มม. (0.875 นิ้ว)	25.400 มม. (1.000 นิ้ว)
การทดสอบความแข็ง ด้วยลูกบอล 1/16 นิ้ว (1.588 มม.) (Rockwell สเกล B, F และ G)							
0	*	*	*	*	4.5	3.5	3.0
10	*	*	*	5.0	4.0	3.5	3.0
20	*	*	*	4.5	4.0	3.5	3.0
30	*	*	5.0	4.5	3.5	3.0	2.5
40	*	*	4.5	4.0	3.0	2.5	2.5
50	*	*	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
60	*	5.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0
70	*	4.0	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
80	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.5
90	4.0	3.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.0
100	3.5	2.5	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5
การทดสอบความแข็ง ด้วยหัวกดเพชร (Rockwell สเกล C, D และ A)							
20	*	*	*	2.5	2.0	1.5	1.5
30	*	*	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0
40	*	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0
50	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5
60	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
70	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	-	-
80	0.5	0.5	0.5	-	-	-	-

หมายเหตุ : * เป็น correction factor ที่เกิน 5.0 (สำหรับ Rockwell สเกล B, F และ G) และ 3.0 (สำหรับ Rockwell สเกล C, D และ A) ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับ จึงไม่รวมอยู่ในตาราง



- การวัดความแข็งผิวด้านใน (เช่น ด้านในของวงแหวน) ส่วนใหญ่จะใช้หัวกดแบบ

gooseneck adapter

- ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรอยกด กับขอบของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่า 2.5 เท่า

ของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด และไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรวัดระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด

ตารางที่ 3 : เปรียบเทียบค่าความแข็งตามวิธีต่างๆ

ROCKWELL			SUPERFICIAL ROCKWELL				BRINELL		VICKERS OR FIRTH DIAMOND HARDNESS NUMBER	TENSILE STRENGTH
Diamond Brale			1/16" Ball	"N" Brale Penetrator			10 m/m Ball	3000 kgm Load		Equivalent 1000 lb. Sq. In.
150 kgf C Scale	60 kgf A Scale	100 kgf D Scale	100 kgf B Scale	15 kg Load 15N	30 kg Load 30N	45 kg Load 45N	Dia. Of Ball Impression in m/m	Hardness Number		
80	92	87		97	92	87			1865	
79	92	86			92	87			1787	
78	91	85		96	91	86			1710	
77	91	84			91	85			1633	
76	90	83		96	90	84			1556	
75	90	83			89	83			1478	
74	89	82		95	89	82			1400	
73	89	81			88	81			1323	
72	88	80		95	87	80			1245	
71	87	80			87	79			1160	
70	87	79		94	86	78			1076	
69	86	78		94	85	77			1004	
68	86	77			85	79			942	
67	85	76		93	84	75			894	
66	85	76		93	83	73			854	
65	84	75		92	82	72	2.25	745	820	
64	84	74			81	74	2.30	710	789	
63	83	73		92	80	70	2.30	710	763	
62	83	73		91	79	69	2.35	682	746	
61	82	72		91	79	68	2.35	682	720	
60	81	71		90	78	67	2.40	653	697	
59	81	70		90	77	66	2.45	627	674	326
58	80	69		89	76	65	2.55	578	653	315
57	80	69		89	75	63	2.55	578	633	304



56	79	68		88	74	62	2.60	555	613	294
55	79	67		88	73	61	2.60	555	595	287
54	78	66		87	72	60	2.65	534	577	279
53	77	65		87	71	59	2.70	514	560	269
52	77	65		86	70	57	2.75	495	544	261
51	76	64		86	69	56	2.75	495	528	254
50	76	63		86	69	55	2.80	477	513	245
49	75	62		85	68	54	2.85	461	498	238
48	75	61		85	67	53	2.90	444	484	232
47	74	61		84	66	51	2.90	444	471	225
46	73	60		84	65	50	2.95	432	458	219
45	73	59		83	64	49	3.00	415	446	211
44	73	59		83	63	48	3.00	415	434	206
43	72	58		82	62	47	3.05	401	423	202
42	72	57		82	61	46	3.10	388	412	198
41	71	56		81	60	44	3.10	388	402	191
40	70	55		80	60	43	3.15	375	392	185
39	70	55		80	59	42	3.20	363	382	181
38	69	54		79	58	41	3.25	352	372	176
37	69	53	109	79	57	40	3.30	341	363	171
36	68	52	109	78	56	39	3.35	331	354	168
35	68	52	108	78	55	37	3.35	331	345	163
34	67	51	108	77	54	36	3.40	321	336	159
33	67	50	107	77	53	38	3.45	311	327	154
32	66	49	106	76	52	34	3.50	302	318	150
31	66	48	106	76	51	33	3.55	293	310	146
30	65	48	105	75	50	32	3.60	285	302	142
29	65	47	104	75	50	30	3.65	277	294	138
28	64	46	103	74	49	29	3.70	269	286	134
27	64	45	103	73	48	28	3.75	262	279	131
26	63	45	102	73	47	27	3.80	255	272	126
25	63	44	101	72	46	26	3.80	255	266	124
24	62	43	100	72	45	24	3.85	248	260	122
23	62	42	99	71	44	23	3.90	241	254	118
22	62	42	99	71	43	22	3.95	235	248	116
21	61	41	98	70	42	21	4.00	229	243	113
20	61	40	97	69	42	20	4.05	23	238	111
18			95				4.10	217	230	107
16			94				4.15	212	222	102
14			92				4.25	203	213	98
12			90				4.35	192	204	92
10			89				4.40	187	195	90
8			87				4.50	179	187	87
6			85				4.60	170	180	83
4			84				4.65	166	173	79






2			82				4.80	156	166	77
0			81				4.80	156	160	74
			79				4.90	149	156	73
			77				5.00	143	150	70
			74				5.10	137	143	67
			72				5.20	131	137	65
			70				5.30	126	132	62
			68				5.40	121	127	60
			65				5.50	116	122	58
							5.60	112	117	56

แหล่งค้นคว้าเพิ่มเติม :

- สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย <http://www.isit.or.th/>
- มณฑล นายอรุณ “การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ”

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

