

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

การศึกษาวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารนั้น กระทำได้หลายวิธี เช่นการวัดแบบสองจุด สามจุด และสี่จุด เป็นต้น และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องก็แตกต่างกันไป ดังนั้นในที่นี้จะได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ เหล่านี้พอสังเขป เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสร้างเครื่องมือที่ใช้วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยนี้

1. ทฤษฎีสภาพต้านทานไฟฟ้าของของแข็ง ^[1,4]

เมื่อทำให้ปลายทั้งสองของก้อนสารมีความต่างศักย์เกิดขึ้น จะเกิดสนามไฟฟ้าซึ่งออกแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนภายในของแข็งให้เคลื่อนที่ หรือทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านของแข็งนั่นเอง อิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่สม่ำเสมอ เพราะเกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนเนื่องจาก Lattice defects แบบต่าง ๆ เช่น Temperature vibration ซึ่งทำให้เกิด Phonon scattering หรือ Impurities ไม่ว่าจะเป็น Impurities ที่ติดมากับสารนั่นเอง หรือผู้ทดลองเพิ่มเข้าไปก็ตาม กล่าวคือการกระเจิงคือการต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า จากผลการทดลอง ^[1] บ่งชี้ว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าของของแข็งจะเป็นผลรวมของสภาพต้านทานไฟฟ้าย่อย ที่เกิดจาก Lattice defect ต่าง ๆ ดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้เป็น

$$\rho = \rho_T + \rho_i \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของแท่งสาร

ρ_T คือ Phonon resistivity ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นกับการสั่นของ Lattice

ρ_i คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าเนื่องจาก Impurities และ Mechanical

deformation ของสาร ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 300 K

สมการที่ 2.1 เรียกว่ากฎของ Matthiessen rule

2. การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของของแข็ง

การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถกระทำได้หลายวิธี แต่ปัญหาของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้านั้นคือ สภาพต้านทานไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของสารด้วย ดังนั้น

เพื่อให้เข้าใจถึงการหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ถูกต้อง และสอดคล้องกับความเป็นจริง จะพิจารณาถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องตามลำดับดังนี้คือ โดยทั่วไปจะหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ และกระแสไหลผ่านวัตถุตามสมการ

$$\rho = G \left[\frac{V}{I} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ G คือ Geometric factor

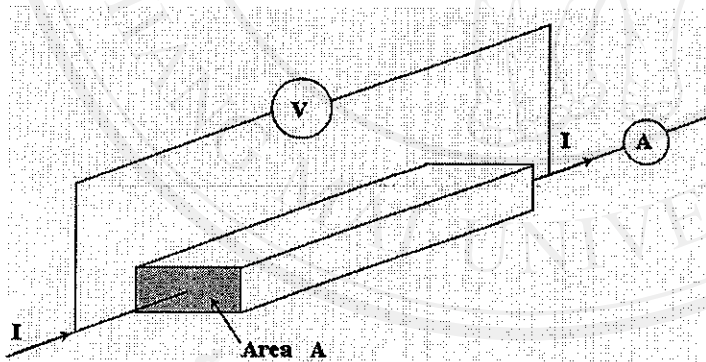
V คือ ความต่างศักย์ที่วัดได้

I คือ กระแสที่ไหลผ่านเข้า – ออก วัตถุ

จากสมการที่ 2.2 สามารถวัดค่า V และ I ได้ แต่ค่า G เป็นค่าที่ขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของสาร และวิธีการวัดแต่ละแบบ และเป็นค่าที่จะต้องศึกษาว่าจะสัมพันธ์กับรูปร่างของสารตัวนำอย่างไรบ้าง

2.1 Ohmmeter Measurements ^[1]

เป็นวิธีการวัดแบบง่าย ๆ วิธีหนึ่งของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสาร ทำโดยการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านแท่งสาร แล้ววัดค่าแรงดันตกคร่อมที่ปลายทั้งสองของแท่งสาร ซึ่งวิธีนี้นิยมใช้วัดสารที่มีลักษณะดังกล่าวดังแสดงในรูป



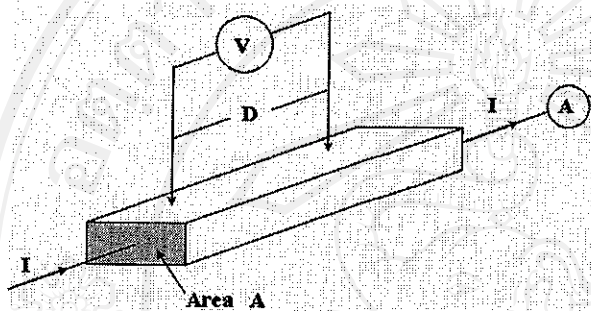
รูป 2.1 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี Ohmmeter

จากรูป 2.1 ให้ ρ คือค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า A คือพื้นที่หน้าตัดของแท่งสาร L คือความยาวของแท่งสาร V คือแรงดันตกคร่อมที่ปลายทั้งสองของแท่งสารเมื่อผ่านกระแส I ดังกล่าว จะได้

$$\rho = \left(\frac{A}{L} \right) \cdot \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.3)$$

2.2 Potential – Probe Measurements ^[1]

ในกรณีที่รอยต่อที่จุดปลายทั้งสองของ Sample มีความต้านทานค่อนข้างมาก ตัวอย่างเช่น รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำกับสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น การวัดแบบ Ohmmeter ทำให้เกิดความผิดพลาดมาก เพราะค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารที่ต่อกันอาจไม่เท่ากัน รูป 2.2 แสดงวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ Potential – Probe โดยวัดแรงดันตกคร่อมระหว่าง probe ซึ่งห่างกันเป็นระยะ D เรียงตามแนวทิศทางของความยาวของ Sample ผ่านกระแสเข้า – ออก ที่ปลายของ Sample นี้



รูป 2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี Potential – Probe Measurements

จากรูป 2.2 เราสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ได้จากสมการ

$$\rho = \left(\frac{A}{D} \right) \cdot \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.4)$$

2.3 การวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดแบบสี่จุด (Four – point Probe) ^[2,3,4,5]

วิธีวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าโดยอาศัยวิธีวัดแบบสี่จุดนั้นเหมาะสำหรับวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสารรูปทรงเรขาคณิตที่มีรูปร่างต่าง ๆ ได้ โดยประกอบไปด้วยขั้วสัมผัส 4 อัน ซึ่งสามารถวัดเรียงในลักษณะต่าง ๆ ได้หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ

2.3.1. Four – Point Square Array Probe

มีการจัดเรียงขั้วสัมผัสเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส วิธีนี้เหมาะกับสารที่มีขนาดเล็กมาก ทั้งนี้ เพราะการจัดเรียงขั้วสัมผัสในลักษณะนี้จะใช้เนื้อที่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

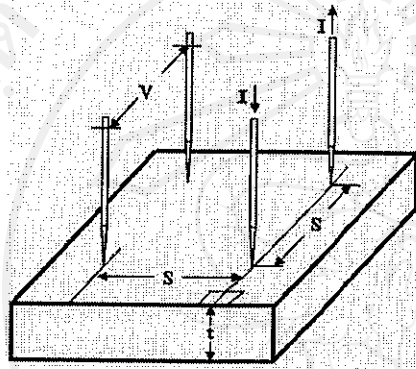
สำหรับสารที่มีขนาดใหญ่ทุกด้าน เมื่อเทียบกับระยะห่างของขั้วสัมผัส (S) จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็น ^[3]

$$\rho = \frac{2\pi S}{(2 - \sqrt{2})} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.5)$$

และในกรณีที่แผ่นสารมีขนาดใหญ่และมีความหนาน้อยกว่า 0.1 ของระยะระหว่างขั้วสัมผัสแล้ว ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าจะเป็น^[2]

$$\rho = \left(\frac{2\pi t}{\ln 2} \right) \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ t คือระยะความหนาของแผ่นสาร

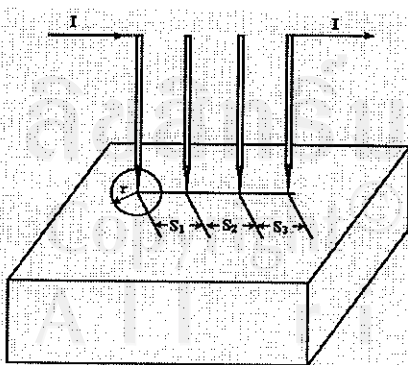


รูป 2.3 แสดง Square array probe

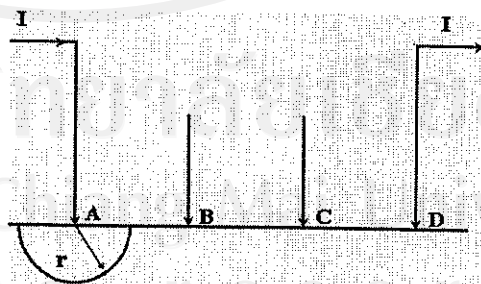
2.3.2. Four – Point In – line Array Probe

เป็นวิธีที่อาศัยขั้วสัมผัส 4 อัน วางเรียงตัวเป็นแถวระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสแต่ละอันจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้

ในการวัดค่า V และ I นั้น เราจะมีจุดสัมผัสผิวหน้าวัตถุ 4 จุด ดังแสดงในรูป โดยมีระยะระหว่างจุดสัมผัสเป็น S_1, S_2, S_3 ตามลำดับ



2.4 a



2.4 b

รูป 2.4 แสดง Four-point In-line array probe

จากรูป 2.4 b ค่ากระแสที่ถูกจ่ายที่จุดสัมผัสริมรอกสุดที่ A และ D จากนั้นจึงทำการวัดแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างจุดสัมผัสภายในคือ B และ C แต่การหาค่า ρ นั้นเราจะต้องคำนึงถึงขนาดของรูปร่างของสารว่ามีขนาดเล็กมาก ๆ หรือขนาดรูปร่างที่จำกัดหรือขนาดใหญ่มาก ๆ

ในกรณีแรกเราจะพิจารณาว่าขนาดของแท่งสารตัวนำมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระยะระหว่างจุดสัมผัสทั้งคู่ เราสามารถให้กระแสไหลเข้าที่จุดสัมผัส A ไปออกยังจุดสัมผัส D ได้ ดังนั้นความหนาแน่นของกระแส J_r ที่มีรัศมี r จากปลายจุดสัมผัส A เนื่องจากกระแส I ไหลเข้าที่จุดสัมผัส A จุดได้ว่า

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.7)$$

ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในเนื้อสารตัวนำ จึงเกิดเฉพาะพื้นที่ครึ่งระนาบล่าง จากกฎของโอห์มค่าสนามไฟฟ้า E_r ที่จุด r คือ^[4,5]

$$E_r = \rho J_r = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (2.8)$$

โดย ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้าของแท่งสารตัวนำนี้ และจากนิยามของศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใด ๆ ในรัศมี a ก็คือ

$$V_a = - \int_{-\infty}^a E_r dr = - \left(\frac{\rho I}{2\pi} \right) \int_{-\infty}^a \left(\frac{1}{r^2} \right) dr \quad ; a > 0$$

$$V_a = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (2.9)$$

เพราะฉะนั้นศักย์ไฟฟ้าที่จุดสัมผัส B ก็คือ

$$V_B = \left(\frac{\rho I}{2\pi} \right) \left\{ \left(\frac{1}{S_1} \right) - \left[\frac{1}{(S_2 + S_3)} \right] \right\} \quad (2.10)$$

ศักย์ไฟฟ้าที่จุด C คือ

$$V_C = \left(\frac{\rho I}{2\pi} \right) \left\{ \left[\frac{1}{(S_1 + S_2)} \right] - \left(\frac{1}{S_3} \right) \right\} \quad (2.11)$$

ดังนั้น จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสัมผัส B และ C คือ

$$V = \left(\frac{\rho I}{2\pi} \right) \left\{ \left(\frac{1}{S_1} \right) - \left[\frac{1}{(S_1 + S_2)} \right] - \left[\frac{1}{(S_2 + S_3)} \right] + \left(\frac{1}{S_3} \right) \right\} \quad (2.12)$$

เพราะฉะนั้น จะได้ค่าความต้านทานไฟฟ้า

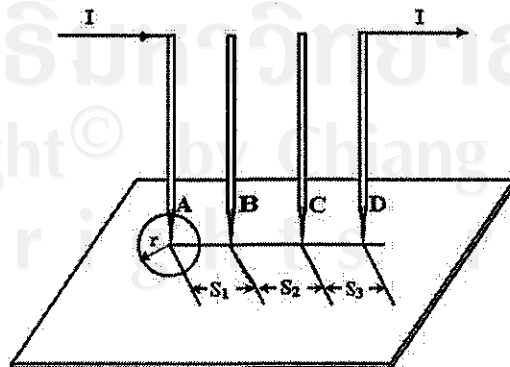
$$\rho = \left(\frac{\rho I}{2\pi} \right) \left\{ \left(\frac{1}{S_1} \right) - \left[\frac{1}{(S_1 + S_2)} \right] - \left[\frac{1}{(S_2 + S_3)} \right] + \left(\frac{1}{S_3} \right) \right\}^{-1} \quad (2.13)$$

ถ้าเรากำหนดให้ $S_1 = S_2 = S_3 = S$ จะได้ว่า

$$\rho = 2\pi S \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.14)$$

สมการนี้ จะใช้ได้ ในกรณีเฉพาะแท่งสารที่มีขนาดใหญ่กว่าระยะ S มาก ๆ เท่านั้น ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขแล้วค่าที่วัดได้จะผิดพลาดจากความเป็นจริง

ในกรณีของแผ่นสารขนาดใหญ่ มีความหนา t โดยระยะความหนา t มีค่าน้อยกว่าช่วงระยะ S มาก ๆ



รูป 2.5 แสดงการใช้ Four probe วัดแท่งสารบาง ๆ

จากรูป 2.5 ความหนาแน่นของกระแส J_r ที่มีรัศมี r จากปลายจุดสัมผัส A เนื่องจากกระแส I ไหลเข้าที่จุดสัมผัส A จะได้ว่า

$$J_r = \frac{I}{2\pi r t} \quad (2.15)$$

จากกฎของโอห์ม ค่าสนามไฟฟ้า E_r ที่จุด r คือ

$$E_r = \rho J_r = \frac{\rho I}{2\pi r t} \quad (2.16)$$

เพราะฉะนั้น ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด B และ C จากกระแสไหลเข้าที่จุดสัมผัส A คือ

$$\begin{aligned} V_{BC} &= -\int E_r dr \\ &= - \int_{S_1+S_2}^{S_1} \left(\frac{\rho I}{2\pi t} \right) \left(\frac{dr}{r} \right) \\ V_{BC} &= \left(\frac{\rho I}{2\pi t} \right) \ln \left\{ \frac{(S_1 + S_2)}{S_1} \right\} \end{aligned} \quad (2.17)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด B และ C จากกระแสที่ไหลออกจากจุดสัมผัส D คือ

$$V_{BC} = \left(\frac{\rho I}{2\pi t} \right) \left\{ \ln \frac{(S_2 + S_3)}{S_3} \right\} \quad (2.18)$$

เพราะฉะนั้น V_{BC} เนื่องจากกระแสไหลเข้าที่จุดสัมผัส A และออกจากจุดสัมผัส D จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{BC} = \left(\frac{\rho I}{2\pi t} \right) \left\{ \ln \left[\frac{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \right] \right\} \quad (2.19)$$

กำหนดให้ $V = V_{BC}$ และจากสมการ 2.19 จะได้

$$\rho = 2\pi t \left(\frac{V}{I} \right) \left\{ \ln \left[\frac{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)}{S_1 S_3} \right] \right\}^{-1} \quad (2.20)$$

ถ้า $S_1 = S_2 = S_3 = S$ จะได้

$$\rho = \left(\frac{\pi t}{\ln 2} \right) \left(\frac{V}{I} \right)$$

$$\rho = 4.532t \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 จะใช้ได้ถูกต้องเมื่อแผ่นสารมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับระยะ S

2.3. สภาพนำความร้อนของของแข็ง [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]

การถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดได้ 3 ทางด้วยกันคือ

- (1) การพาความร้อน (heat convection)
- (2) การแผ่รังสีความร้อน (heat radiation)
- (3) การนำความร้อน (heat conduction)

สภาพการนำความร้อนของของแข็งทั่วไป กำหนดนิยามอย่างง่ายได้ว่า เมื่ออัตราการไหลของความร้อนอยู่ในสถานะคงตัว (steady state flow) ผ่านตัวกลางที่มีความแตกต่างที่แน่นอนของอุณหภูมิ ณ บริเวณหนึ่งกับอีกบริเวณหนึ่งในตัวกลางนั้น (exists temperature gradient)

$$Q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.22)$$

เมื่อ K : thermal conductivity

$\frac{dT}{dx}$: temperature gradient

Q : heat flow rate across unit area

ค่า k (สภาพนำความร้อน) มีหน่วยเป็น แคลอรี/เมตร-วินาที-องศา หรือ วัตต์/เมตร-องศา เครื่องหมายลบแสดงถึงอัตราการส่งถ่ายพลังงานความร้อนกับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมิติสตรงกันข้าม

จากสมการ 2.22 สภาพนำความร้อน คือกระบวนการถ่ายเทพลังงานซึ่งเกิดขึ้นได้ทุกขณะ และไม่ได้ถ่ายเทในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแบบเส้นตรง แต่เกิดจากการแพร่ของพลังงานผ่านตัวกลางจากที่อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ โดยการชนกันแบบสุ่ม ถ้าเราสมมติให้พลังงานถ่ายเทในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแบบเส้นตรงในกรณีเช่นนี้ไม่จำเป็นต้องมี temperature gradient เพียงแต่ที่ปลายทั้งสองมีอุณหภูมิไม่เท่ากันเป็นพอ และไม่ต้องคำนึงถึงความยาวของตัวกลาง

ถ้า $S_1 = S_2 = S_3 = S$ จะได้

$$\rho = \left(\frac{\pi t}{\ln 2} \right) \left(\frac{V}{I} \right)$$

$$\rho = 4.532t \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 จะใช้ได้ถูกต้องเมื่อแผ่นสารมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับระยะ S

2.3. สภาพนำความร้อนของของแข็ง ^[6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]

การถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดได้ 3 ทางด้วยกันคือ

- (1) การพาความร้อน (heat convection)
- (2) การแผ่รังสีความร้อน (heat radiation)
- (3) การนำความร้อน (heat conduction)

สภาพการนำความร้อนของของแข็งทั่วไป กำหนดนิยามอย่างง่ายได้ว่า เมื่ออัตราการไหลของความร้อนอยู่ในสถานะคงตัว (steady state flow) ผ่านตัวกลางที่มีความแตกต่างที่แน่นอนของอุณหภูมิ ณ บริเวณหนึ่งกับอีกบริเวณหนึ่งในตัวกลางนั้น (exists temperature gradient)

$$Q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.22)$$

เมื่อ K : thermal conductivity

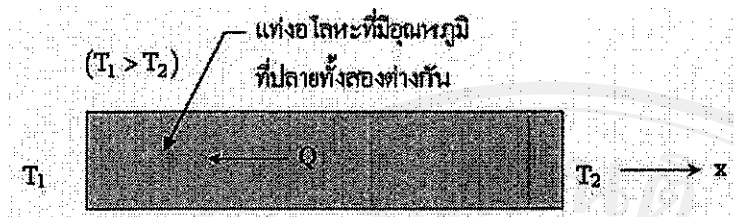
$\frac{dT}{dx}$: temperature gradient

Q : heat flow rate across unit area

ค่า k (สภาพนำความร้อน) มีหน่วยเป็น แคลอรี/เมตร-วินาที-องศา หรือ วัตต์/เมตร-องศา เครื่องหมายลบแสดงถึงอัตราการส่งถ่ายพลังงานความร้อนกับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิมิติดังกันข้าม

จากสมการ 2.22 สภาพนำความร้อน คือกระบวนการถ่ายเทพลังงานซึ่งเกิดขึ้นได้ทุกขณะ และไม่ได้ถ่ายเทในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแบบเส้นตรง แต่เกิดจากการแพร่ของพลังงานผ่านตัวกลางจากที่อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ โดยการชนกันแบบสุ่ม ถ้าเราสมมติให้พลังงานถ่ายเทในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแบบเส้นตรงในกรณีเช่นนี้ไม่จำเป็นต้องมี temperature gradient เพียงแต่ที่ปลายทั้งสองมีอุณหภูมิไม่เท่ากันเป็นพอ และไม่ต้องคำนึงถึงความยาวของตัวกลาง

การนำความร้อนจะเกิดการถ่ายเทพลังงาน เป็นผลรวมของเทอมที่เกิดจากการสั่นของโครงผลึกเนื่องจาก โฟนอน และเทอมที่เกิดจากพาหะอิสระ



รูป 2.6 ความนำความร้อนโดยโฟนอนตามทิศทางของลูกศร^[13]

2.3.1 การนำความร้อนโดยอิเล็กตรอน

ในโลหะวาเลนซ์อิเล็กตรอน เราถือว่าเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่มีพฤติกรรมคล้ายกับโมเลกุลของก๊าซ ถ้าเราสมมติให้อุณหภูมิเกรเดียนต์ $\left(\frac{dT}{dx}\right)$ ในแนวแกน x ค่าพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันของ x ดังนั้น $E(0)$ เป็นพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน 1 ตัว ที่อยู่ที่ระนาบ $x = 0$ พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน 1 ตัวจะเท่ากับ

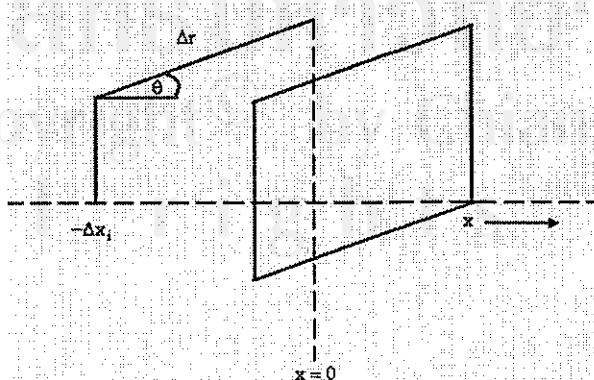
$$E(\Delta x) = E(0) + \frac{\Delta E \cdot \Delta x}{\Delta x} \quad (2.23)$$

เนื่องจากพลังงานที่เปลี่ยนไปเป็นผลมาจากการเปลี่ยนไปของอุณหภูมิหรือ E แปรผันตรงกับ T

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{dE}{dx} = \frac{dE}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.24)$$

ดังนั้น

$$E(\Delta x) = E(0) + \frac{dE}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \Delta x \quad (2.25)$$



รูป 2.7 แบบจำลองการถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านระนาบ

จากรูป พิจารณาระนาบพื้นที่ 1 หน่วยที่ตำแหน่ง $x=0$ เราสามารถหาค่าพลังงานที่ถ่ายเทผ่านระนาบนี้จาก จาก $x > 0$ ถึง $x < 0$ โดยอิเล็กตรอน

สมมติให้พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอน 1 ตัว ที่ผ่านระนาบ $x=0$ คือ พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ถูกชนจากระยะ Δx พิจารณาความเร็วของอิเล็กตรอนในแนวแกน x เป็น v_x และ $-\Delta x$ คือระยะห่างของระนาบถัดไปที่มีอิเล็กตรอนจะชนกับโครงผลึก ถ้าอิเล็กตรอน n_i ตัวต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ในกลุ่มเดียวกัน แต่ละตัวจะชนกับอิเล็กตรอนถัดไปที่ระยะ $-\Delta x$ โดยมีพลังงานเมื่อผ่านระนาบ $x=0$ เท่ากับ

$$E(-\Delta x_i) = \left[E(0) - \frac{dE}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \Delta x_i \right] \quad (2.26)$$

พลังงานเฉลี่ยทั้งหมดที่ถ่ายเทผ่านระนาบพื้นที่ 1 หน่วย ที่ $x=0$ ต่อเวลาของอิเล็กตรอน n_i ตัว คือ

$$Q_i = \left[E(0) - \frac{dE}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \Delta x_i \right] v_{x_i} n_i \quad (2.27)$$

พลังงานเฉลี่ยทั้งหมดของอิเล็กตรอนทุกตัวที่ถ่ายเทผ่านระนาบดังกล่าวเท่ากับ

$$Q = \sum_i Q_i = \sum_i \left[E(0) - \frac{dE}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \Delta x_i \right] v_{x_i} n_i \quad (2.28)$$

จากที่กำหนดให้พลังงานที่ $x=0$ มีค่าเป็น 0 ($E(0)=0$) ดังนั้น

$$Q = - \sum_i \frac{dE}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \Delta x_i v_{x_i} n_i \quad (2.29)$$

ให้ $n \langle v_x \Delta x \rangle = \sum_i n_i \Delta x_i v_{x_i}$

n : จำนวนอิเล็กตรอนใน 1 หน่วยปริมาตร
จะได้ว่า

$$Q = -n \langle v_x \Delta x \rangle \frac{dE}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.30)$$

ให้ $n \frac{dE}{dT} = C_v$

ดังนั้น $Q = -C_v \langle v_x \Delta x \rangle \frac{dT}{dx}$ (2.31)

เมื่อเทียบกับสมการ $Q = -k \frac{dT}{dx}$

จะได้ว่า $k = C_v \langle v_x \Delta x \rangle$ (2.32)

จากรูป 2.7 จะได้ว่า $v_x = v \cos \theta$

$$\Delta r = \frac{\Delta x}{\cos \theta}$$

ดังนั้น $\langle v_x \Delta x \rangle = \langle v \Delta r \cos^2 \theta \rangle$ (2.33)

กำหนดให้ $N(\theta)d\theta$ คือโอกาสที่นาจะพบอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง θ ถึง $\theta + \Delta\theta$ มีค่าเท่ากับ $A2\pi \sin \theta d\theta$ และเงื่อนไขของ normalization จะได้

$$\int_0^\pi N(\theta)d\theta = 1 = \int_0^\pi A2\pi \sin \theta d\theta$$
 (2.34)

$$\langle \cos^2 \theta \rangle = \frac{\int_0^\pi \cos^2 \theta \cdot 2\pi \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi 2\pi \sin \theta d\theta}$$

$$\langle \cos^2 \theta \rangle = \frac{1}{3}$$

เพราะฉะนั้น $\langle v_x \Delta x \rangle = \frac{1}{3} \langle v \Delta r \rangle$

และจากสมการ 2.32 จะได้ว่า

$$k = \frac{1}{3} C_v \langle v \Delta r \rangle$$
 (2.35)

อิเล็กตรอนในอุณหภูมิปกติ จะมีพลังงานในระดับเฟอร์มิ [12, 13]

$$E_f = \frac{1}{2} m v_f^2$$
 (2.36)

$$= K T_f$$

$$k = \frac{\pi^2 R K \tau T}{3m}$$
 (2.37)

จากสมการ 2.37 จะเห็นว่าสภาพนำความร้อนที่มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะนั้นแปรตรงกับอุณหภูมิของวัสดุและเวลาในการเย็นตัว (relaxation time); τ

2.3.2 การนำความร้อนโดยการสั่นของโครงผลึก

ทั้งในโลหะและสารกึ่งตัวนำหรือฉนวน การถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการที่อุณหภูมิสูงไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำโดยอาศัยการสั่นของโครงผลึก (Lattice vibration) แต่ในโลหะการนำความร้อนที่เกิดจากการสั่นของโครงผลึกมีส่วนน้อยกว่าการนำความร้อนที่เกิดจากอิเล็กตรอน แต่ในฉนวนนั้นตรงกันข้ามกับของโลหะ

ในปี ค.ศ. 1914 เดอบายได้ศึกษาและพัฒนาทฤษฎีการสั่นของโครงผลึกเพื่อใช้อธิบายสภาพการนำความร้อน โดยเสนอว่า ถ้าแรงระหว่างอะตอมเป็นแรงที่สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ก็จะไม่เกิดผลเนื่องจากการสั่นนี้และไม่เกิดการชนกับโฟนอนด้วย แต่โดยธรรมชาติการกระเจิงของการสั่นในลักษณะสอดคล้องเป็นไปได้อย่าง

เนื่องจากการขยายตัวของของแข็งเมื่อได้รับความร้อนไม่เท่ากันทำให้เกิดการสั่นที่ไม่สอดคล้องเป็นผลต่อการเคลื่อนที่ของโฟนอน ทั้งระยะทางและทิศทาง เพราะเกิดการชนกันแบบสุ่มระหว่างโฟนอนกับโฟนอน

สภาพการนำความร้อนในลักษณะเช่นนี้สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$k_p = \frac{1}{3} C_v v \ell \quad (2.38)$$

โดยที่ ℓ คือโอกาสการเคลื่อนที่ของโฟนอนโดยไม่ชนกับโฟนอนตัวอื่น ๆ

v คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของโฟนอน

C_v คือค่าความจุความร้อน

ในปี ค.ศ. 1929 ทั้ง Debye และ Peierls ได้ศึกษาและพบว่า ℓ แปรตรงกับ $\frac{1}{T}$ เมื่ออุณหภูมิสูง ๆ แล้ว คำนพบว่า จำนวนโฟนอนที่อุณหภูมิสูง ๆ ดังกล่าวมีจำนวนตามสมการต่อไปนี้

$$\langle n \rangle = \frac{1}{\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1} \quad (2.39)$$

ที่อุณหภูมิสูง ๆ $(\hbar\omega/k_B T) < 1$

$$\langle n \rangle \approx \frac{kT}{\hbar\omega} \quad (2.40)$$

หรือ

$$\langle n \rangle \propto T$$

2.3.3 การนำความร้อนของโลหะ

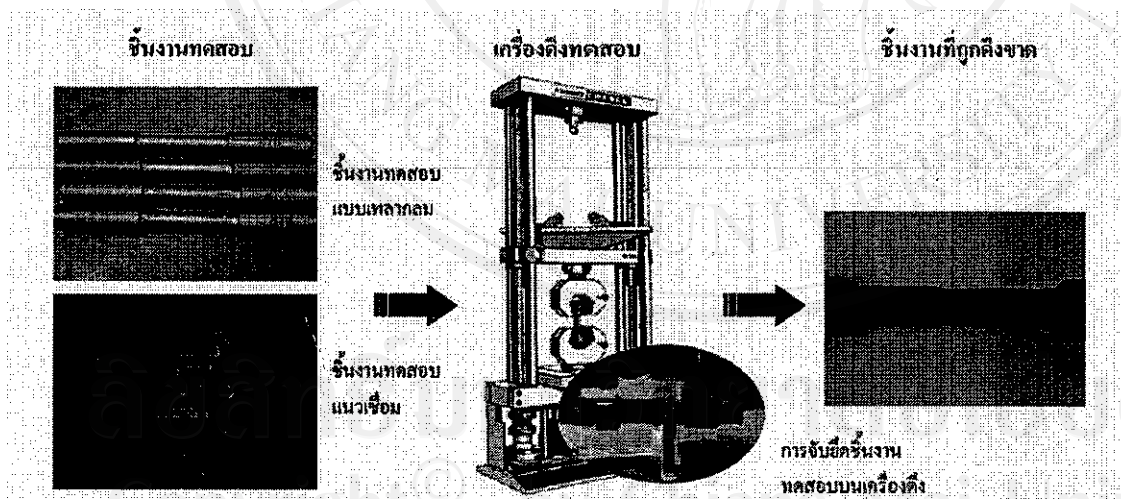
การนำความร้อนในวัสดุที่เป็นฉนวนเกิดจากการนำพาด้วยคลื่นการสั่นของโครงผลึก ส่วนในกรณีวัสดุที่เป็น โลหะนั้นผู้ที่เป็น ตัวนำพาความร้อนจากที่อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำคือ อิเล็กตรอน ถ้าเราเพิ่มความร้อนให้กับขอบด้านใดด้านหนึ่งของผลึกให้สูงกว่าอีกด้านหนึ่ง อิเล็กตรอนที่อยู่ด้านที่มีอุณหภูมิสูงจะมีพลังงานความร้อนสูง และจะเคลื่อนที่ไหลไปทางด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ เป็นผลให้เกิดการนำความร้อนขึ้น

ถ้าเรายกเว้นในกรณีการมีสารเจือปนมาก ๆ หรือ ณ ที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ หรือภายใต้สนามแม่เหล็กสูงเราอาจกล่าวได้ว่าโดยทั่วไปแล้วการนำความร้อนในโลหะเกิดจาก อิเล็กตรอนอิสระ

2.4. การทดสอบแรงดึงของโลหะ (Tensile test of metal)^[14, 15, 16, 17, 18]

2.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

การทดสอบแรงดึงใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสม ด้วยการใช้วิธีดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราคงที่ ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ จะมีลักษณะแตกต่างกันไปสำหรับโลหะอาจทำเป็นแผ่นหรืออาจทำเป็นแท่ง



รูป 2.8 วิธีทดสอบแรงดึง

ข้อมูลสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและแผนภาพความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมมีดังนี้

1. โมดูลัสของความเป็นอีลาสติก (Modulus of elasticity)
2. ความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก (Stress and strain at yield)
3. ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress)
4. เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation)

2.4.1.1. โมดูลัสของความเป็นอีลาสติก (Modulus of elasticity)

โมดูลัสของความเป็นอีลาสติก : เป็นค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เมื่อได้ รับแรงกระทำสามารถหา ได้จากความชันของกราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุ ในระยะแรก ที่ยังแสดงสมบัติยืดหยุ่นอยู่ สำหรับโลหะจะมีค่าน้อยกว่า 0.5 % ของความเครียด โดยที่โมดูลัส ของความเป็นอีลาสติกนี้เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะ (bond strength) ระหว่างอะตอม ของโลหะหรือของโลหะผสม (ตาราง 2.1) โลหะที่มีค่า โมดูลัสของความเป็นอีลาสติกสูงจะ แกร่ง ไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างง่าย เช่น เหล็กกล้ามีค่าโมดูลัสของการยืดตัว 30×10^6 psi. (207 GPa) ในขณะที่โลหะอูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าประมาณ $10 - 11 \times 10^6$ psi (69 - 76 GPa) ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ในช่วงความยืดตัวของแผนภาพความเค้นและความเครียดค่าโมดูลัสจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น

ตาราง 2.1 ค่าคงที่ของการยืดตัวของ Isotropic Materials ที่อุณหภูมิห้อง

Materials	Modulus of elasticity 10^{-6} psi (GPa)	Shear Modulus 10^{-6} psi (GPa)	Poisson's ratio
Aluminium alloys	10.5 (72.4)	4.0 (27.5)	0.31
Copper	16.0 (110)	6.0 (41.4)	0.33
Steel	29.0 (200)	11.0 (75.8)	0.33
Stainless steel	28.0 (193)	9.5 (65.6)	0.28
Titanium	17.0 (117)	6.5 (44.8)	0.31
Tungsten	58.0 (400)	22.8 (157)	0.27

ที่มา : G.Dieter "Mechanical Metallurgy". 3d.ed. McGraw-Hill, 1986 ^[15]

2.4.1.2. ความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก (Stress and strain at yield)

ความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก : เป็นค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ ณ จุดที่เปลี่ยนสมบัติจากอิลาสติกไปเป็นพลาสติก หรืออีกนัยหนึ่งหมายความว่าวัสดุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง อย่างถาวรเมื่อความเค้นหรือความเครียดมีค่ามากกว่านี้ สำหรับวัสดุที่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนเราจะ สังเกตได้จากที่กราฟมีค่าความชันเท่ากับศูนย์ ส่วนในกรณีที่วัสดุไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนนั้น อาจกำหนดให้ใช้ 0.2% หรือ 0.1% ของ plastic strain ที่เกิดขึ้นในแผนภาพความเค้นและความเครียด เป็นค่ากำหนดในการหาจุดคราก อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า offset yield

2.4.1.3. ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)

ความต้านทานแรงดึงสูงสุด : คือความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ พิจารณาจากความเค้นทางวิศวกรรม สูงสุดในแผนภาพความเค้นและความเครียดค่านี้ไม่ค่อยใช้มากในงานออกแบบทางวิศวกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพวกโลหะอ่อน (ductile alloy) เนื่องจากมีการการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรขึ้น อย่างมากก่อนถึงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดนี้ ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่า โลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ถ้า โลหะนั้นไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุน (Porosity) จะทำให้ค่า strength ลดลง

2.4.1.4. เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation (%Strain))

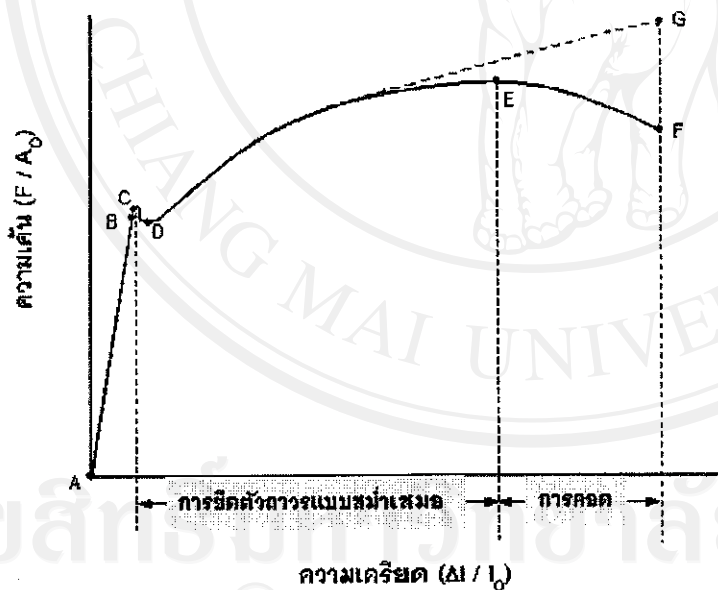
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว : ปริมาณ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานตัวอย่าง ภายใต้แรงดึง เมื่อเทียบ กับระยะการวัด (gage length) ของชิ้นงานทดสอบ และยังเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความอ่อน (ductile) ของวัสดุ โดยทั่วไปโลหะยิ่งอ่อนยิ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดมากแสดงว่า โลหะนั้นเปลี่ยนรูปมาก สำหรับโลหะอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เป็นแผ่นหนา 0.062 นิ้ว (1.6 mm) จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว สูง ถึง 35 % แต่ถ้าเป็นโลหะอลูมิเนียมผสม (ความแข็งแรงสูงกว่า) 7075-T6 ที่หนาเท่ากัน จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว เพียง 11 % เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดที่ขาดมีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมมาก เพราะนอกจากจะทำให้เราทราบว่า โลหะนั้นอ่อนเพียงใดแล้วยังจะเป็นดัชนีที่ชี้ให้เห็นว่า โลหะนั้นมีคุณภาพอย่างไรอีกด้วย

ที่มา : วัสดุวิศวกรรม รศ. แม้น อมรสิทธิ์, โลหะวิทยาในงานอุตสาหกรรม ขจรศักดิ์ ศิริมัย^[16, 17]

2.4.2 วิธีการทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบแรงดึง เป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อวัดคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุต่อแรงที่มากระทำ โดยเริ่มจาก

- การกัด (Milling) ชิ้นงานสำหรับทดสอบให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่ต้องการทดสอบ เช่น สมอ., JIS
- เช็ดสารหล่อลื่นที่ติดมากับชิ้นงานที่กัดเสร็จแล้วให้สะอาด และอาจใช้กระดาษทรายลูบชิ้นงานทดสอบ ถ้าผิวเหล็กมีสนิม (Scale, เช่น ในกรณีของเหล็กแผ่นรีดร้อน) เพื่อป้องกันการเลื่อน (slip) ของชิ้นงานจากหัวจับขณะทำการดึง
- ตรวจสอบความเรียบของชิ้นงาน โดยจะต้องไม่โก่งงอ เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องจากการทดสอบ
- ทำการวัดและบันทึกค่าขนาดของชิ้นทดสอบที่ได้จากการเตรียม และตรวจสอบให้แน่ใจว่าขนาด (Dimension) ของชิ้นทดสอบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐานทดสอบนั้นๆ
- ทำการดึงด้วยเครื่องดึง (Tensile machine) ซึ่งเมื่อดึงเสร็จสิ้น (ชิ้นงานขาดจากกันเป็นสองส่วน) โปรแกรมของเครื่องส่วนใหญ่จะทำการวาดกราฟและคำนวณค่าต่างๆ ที่เราต้องการ



รูป 2.9 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสภาพอบอ่อน^[14, 25]

กราฟข้างบนแสดงค่าความเค้น (Stress) เทียบกับความเครียด (Strain) จากการทดสอบแรงดึงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยค่าต่างๆ ในกราฟคำนวณจาก

$$\text{ความเค้น (Stress)} = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงนั้น}} \quad (2.41)$$

(หน่วยของความเค้นอาจเป็น N/mm² หรือ MPa หรือ kgf/mm² หรือ psi หรือ ksi ก็ได้)

โดยพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณค่าความเค้นมักจะใช้พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นก่อนที่จะทำการทดสอบ (A_0) เราเรียกค่าความเค้นนี้ว่า Engineering stress ซึ่งแสดงดังเส้นโค้ง ABCDEF ในกราฟรูปที่ 1 ซึ่งค่าความเค้นจะลดลงในช่วงปลายของการยืดตัวเนื่องจากเกิดการคอด (Necking) ทำให้ชิ้นงานรับแรงได้น้อยลงอย่างมาก (แต่ถ้าคำนวณความเค้นจากพื้นที่หน้าตัด ณ. ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งที่หน้าตัดเล็กลง เราจะเรียกค่าความเค้นจากการคำนวณนี้ว่า True Stress ซึ่งแสดงดังเส้นโค้ง ABCDG ซึ่งความเค้นในช่วงปลายของการยืดตัวยังคงสูงขึ้นเนื่องจากใช้พื้นที่จริงๆ ขณะนั้นเป็นตัวหาร)

$$\text{ความเครียด (Strain)} = \frac{\text{ความยาวที่ยืดออก}}{\text{ความยาวเริ่มต้น}} \quad (2.42)$$

ในทำนองเดียวกัน เราเรียกค่าความเครียดที่คำนวณโดยการใช้อ้างอิงความยาวเริ่มต้น (l_0) เป็นตัวเทียบนี้ว่า Engineering strain

ช่วงต่างๆ ของกราฟความเค้น-ความเครียดที่น่าสนใจได้แก่

ช่วง AB เป็นช่วงที่วัสดุเริ่มยืดตัว โดยที่ระยะยืดตัวจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่มาดึงเป็นแนวเส้นตรง เราเรียกช่วงนี้ของกราฟว่า Proportional limit หรือ Limit of Proportionality โดยความชันของเส้นตรงดังกล่าวจะเรียกว่า Young's Modulus of Elasticity

เมื่อวัสดุยืดตัวอีกเล็กน้อยจะถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มที่จะมีการแปรรูปแบบถาวร (Plastic deformation) โดยวัสดุที่ได้รับแรงดึงในช่วง AC เมื่อทำการหยุดดึงชิ้นงานจะหดกลับไปยังความยาวเริ่มแรกของวัสดุนั้น เราเรียกการแปรรูปในช่วง AC ว่า Elastic deformation ในทางปฏิบัติ จุด B และ C จะอยู่ใกล้กันมากจนสามารถถือได้ว่าเป็นจุดเดียวกัน

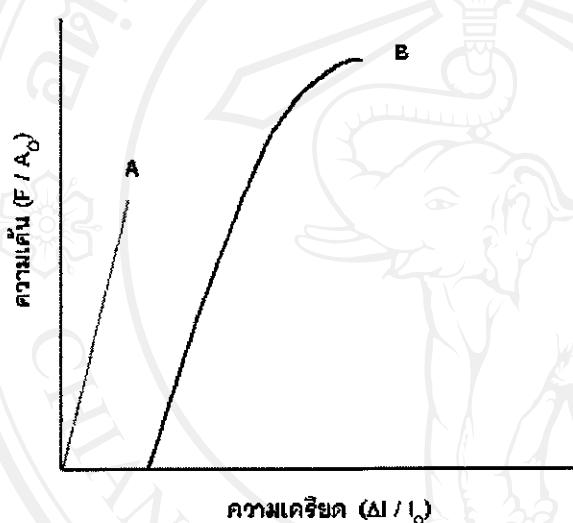
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อทำการแปรรูปต่อจากจุด C ความเค้นจะลดลงและคงที่โดยวัสดุสามารถยืดตัวออกไปได้เองโดยไม่ต้องเพิ่มความเค้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เราเรียกค่าความเค้นที่จุด D ว่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคด (Yield strength)

เมื่อดึงวัสดุต่อจากจุด D ไปเรื่อย ค่าความเค้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะยืดเพิ่มขึ้นจนถึงจุด E ซึ่งเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดของกราฟที่เป็นเส้นเต็ม เราเรียกค่าความเค้นสูงสุดนี้ว่า ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งถ้าวัสดุถูกดึงออกจากจุด D พื้นที่หน้าตัดบางส่วน of ชิ้นงานจะเริ่มเกิดการคอด (Non-uniform deformation) และทำให้รับแรงได้น้อยลงอย่างมาก

เมื่อดึงวัสดุต่อเนื่องจนถึงจุด F วัสดุจะขาดในที่สุด ซึ่งเราสามารถหาค่าความยาวที่วัสดุยืดตัวออกโดยการนำเอาชิ้นงานที่ขาดมาต่อกัน แล้วหาความยาวของวัสดุหลังการดึง (Initial gauge length) ลบด้วยความยาวของวัสดุก่อนดึง (Initial gauge length) และทำการคำนวณหาค่าความยืดตัวร้อยละ (Percentage elongation) ได้โดย

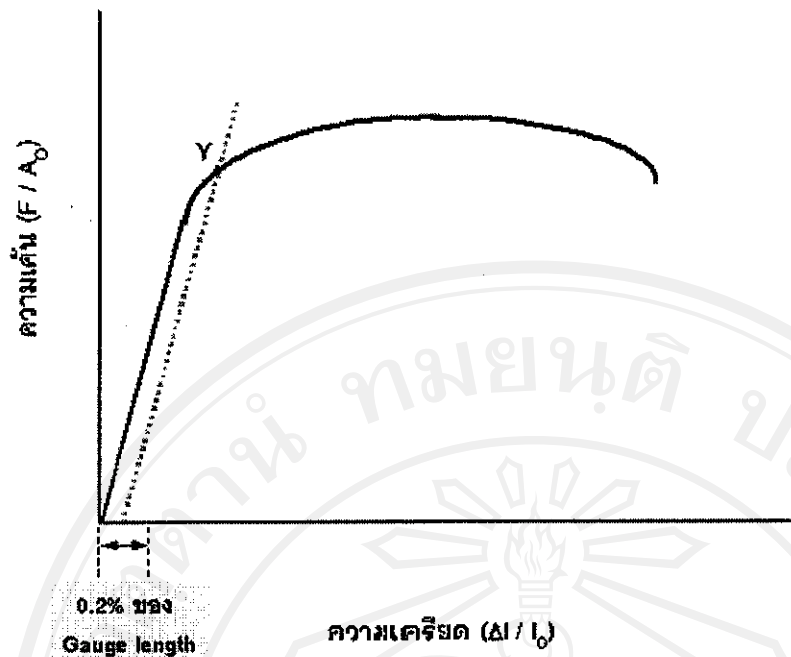
$$\text{ความยืดร้อยละ (\% Elogation)} = \frac{(\text{Gauge length หลังดึง} - \text{Gauge length ก่อนดึง}) \times 100}{\text{ความยาว Gauge length ก่อนดึง}} \quad (2.43)$$

สำหรับตัวอย่างกราฟเหล็กกล้าคาร์บอนแบบอื่นๆ แสดงดังรูป 2.10



รูป 2.10 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็ง (A) และที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัว (B) ^[14, 25]

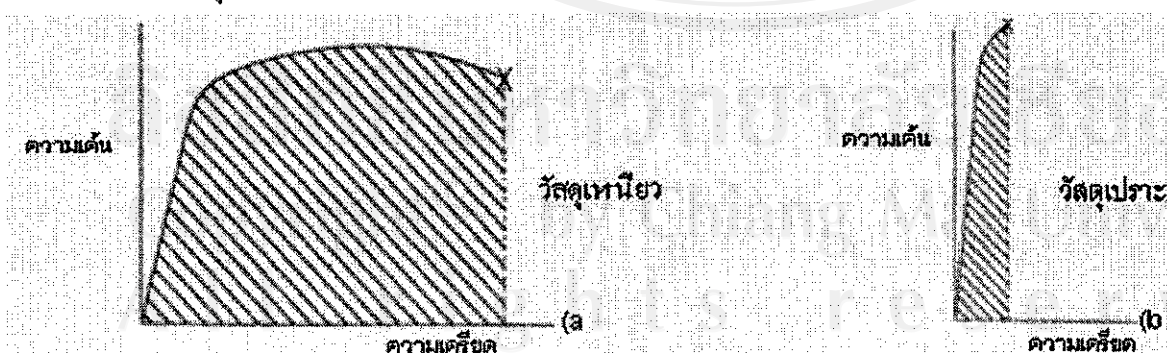
สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อเหล็กผ่านการรีดปรับผิว (Skin pass rolling) จะไม่ปรากฏจุดตกที่แท้จริงให้เห็น ดังนั้นการคำนวณค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดตกจะใช้วิธีการลากเส้นขนานกับเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง (Proportional limit) หรือเรียกว่า Offset method เช่น วัดที่ระยะห่าง 0.2% ของ Gauge length ไปตัดกับเส้นกราฟที่ได้จากการดึง เราเรียกค่าความเค้นตรงจุดที่ทั้งสองตัดกันเรียกว่า ค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) ที่ 0.2% เป็นต้น



รูป 2.11 กราฟความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านอบอ่อน และรีดปรับผิว (as annealed & skin pass rolled) ^[14, 25]

2.4.3 ความเหนียว (Toughness)

ความเหนียว คือความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้โดยไม่เกิดการแตกหัก ความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเราประเมินค่าความเหนียวจาก Modulus of Toughness ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น กับ ความเครียด ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ดังรูป 2.12 ค่า Modulus of Toughness นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่มีความเหนียวสูงจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุสูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย



รูป 2.12 Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b) ^[25]

2.5. ความแข็งแรง และความแข็ง (Strength and Hardness)^[19 , 20 , 21 , 22 , 23 , 24 , 25]

2.5.1 ความแข็งแรง (Strength) หมายถึง ความสามารถในการรับแรง ในขณะที่ เกิดความเค้น (Stress) ขึ้นภายในวัสดุ การศึกษาเกี่ยวกับ ความแข็งแรงของวัสดุ ศึกษาเกี่ยวกับ แรงภายใน วัสดุกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และขนาดของวัสดุนั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าความแข็งแรง คือ ความสามารถ ที่จะต้านทานแรง ที่มากระทำโดย ไม่เกิดการแตกหัก นั้นเอง

แรงที่เกิดขึ้นภายในของวัสดุ ที่พยายาม ด้านทานแรงภายนอก ที่มากระทำ เพื่อ ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่าง เรียกว่าแรงเค้น (Stress) วัดเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนอัตราส่วนระหว่าง ความยาวของวัสดุ ที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อความยาวเดิมก่อน ถูกแรงมากระทำ เรียกว่า ความเครียด (Strain) ทั้งความเค้น และความเครียดนี้มีผลต่อ ความแข็งแรง ทั้งนี้เพราะ การวัดความแข็งแรงจะ ได้จากการ หาค่าความเค้นสูงสุด ที่ทำให้เกิดการแตกหัก เสียรูปทรง หรือจะออกมาในรูปของค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus) หน่วยที่ใช้คือ ปอนด์ต่อตารางฟุต (lb/ft^2) หรือ psf ในระบบอังกฤษ และใช้ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pascal (Pa)) ในระบบสากล โดยที่ 1 psf มีค่าเท่ากับ 47.88 ปาสคาล นอกจากนี้ หน่วยของความแข็งแรง อาจเป็น ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว (lb/in^2) หรือ psi โดยที่ 1 psi มีค่าเท่ากับ 6.895 กิโลนิวตัน ต่อตารางเมตร (kN/m^2)

1 นิวตัน ต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2)

= 1 เมกะนิวตันต่อตารางเมตร (MN/m^2)

= 1,000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (kN/m^2)

2.5.2 ความแข็ง (Hardness) เป็นสมบัติ ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ของวัสดุที่ สามารถใช้เป็น ข้อมูลแสดงถึง ความต้านทาน ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด และ รูปร่าง และการเกิด ความเสียหาย ที่ผิวของวัสดุ ซึ่งความหมายของความแข็ง มีหลายลักษณะคือ ความต้านทาน การขัดถู (Abrasion Resistance) ความต้านทาน การขีดขีด (Scratching) และความต้านทานการกด (Indentation) สำหรับความแข็ง ของวัสดุที่มีการเคลือบผิว เช่น ผลิตภัณฑ์เซรามิก โลหะเคลือบ หรือวัสดุฉนวนผิวอื่น ๆ นั้น ความแข็งจะหมายถึง ความสามารถของ สารเคลือบผิวที่ฉาบ หรือเคลือบอยู่บนผิววัสดุ ที่ทนต่อการเกิดรอย จากการกด หรือขีดขีดด้วยของแข็ง

การทดสอบความแข็ง ของสารเคลือบผิว มีหลายวิธี ตามลักษณะของความแข็ง ของสารนั้น ๆ เช่น การทดสอบ การขีดขีด ของสารเคลือบผิว จำพวกสี จะใช้เครื่องมือ ทดสอบการขีดขีด ที่ปลายเป็นเข็มทำด้วยเหล็ก ใช้น้ำหนัก ถ่วงเข็มให้เกิด การขีดบนผิวเคลือบ เพิ่มน้ำหนัก จนกระทั่ง เข็มสามารถแทงทะลุ ถึงชั้นทดสอบ รายงาน ค่าความแข็งของฟิล์ม เป็นน้ำหนัก น้อยที่สุดที่ ทำให้เข็ม

แท่ง ทะลุผิวเคลือบ ส่วนการทดสอบวิธีอื่น ๆ เช่น ใช้ดินสอที่มีความแข็งต่าง ๆ กัน (6H - 4B) กดลงบนฟิล์ม โดยฟิล์ม จะมีความแข็ง เท่ากับปลายดินสอ เบอร์ที่ทำให้ผิวฟิล์ม ทะลุได้

2.5.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

ความแข็ง (Hardness) เป็นสมบัติหนึ่ง ของผิววัสดุ หมายถึงค่าความต้านทาน ในการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง หรือการเกิดรอยขีดข่วนเสียหายบริเวณ พื้นผิววัสดุ การทดสอบความแข็งของวัสดุมีหลายวิธี และการทดสอบ ความแข็ง เพียงวิธีเดียวไม่สามารถ ตอบเกี่ยวกับ สมบัติที่แท้จริง ของวัสดุได้ อย่างสมบูรณ์ บางครั้ง อาจจะต้องนำ ผลการทดสอบ ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผล การทดสอบ ความแข็งวิธีอื่น ๆ โดยใช้ชิ้นทดสอบ เดียวกัน การทดสอบความแข็ง แต่ละวิธี จะมีจุดประสงค์ ของการทดสอบความแข็ง แตกต่างกันไป เช่น การทดสอบบาง วิธีผลการทดสอบ บอกถึงความยาก - ย่ายในการแปรรูป วัสดุนั้น ๆ หรืออาจบอกถึง ความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานต่อการนำไปตกแต่ง ด้วยเครื่องจักร หรือสมบัติ ในการที่ จะนำไปทำ ขดลวดสปริง ซึ่งจะเห็นว่า การทดสอบ ความแข็ง ให้ความหมาย ได้กว้างหลายประการ และยังไม่มีการเปรียบเทียบ ข้อดี ข้อเสีย ของการทดสอบ ความแข็งแต่ละ วิธีไว้ เพียงแต่มี ข้อกำหนดเกี่ยวกับ ขีดจำกัด ของการทดสอบ แต่ละวิธีไว้เท่านั้น

การทดสอบความแข็ง หากแบ่งประเภท ของการทดสอบความแข็ง ตามลักษณะการทดสอบ อาจแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ การทดสอบความแข็ง โดยการขีดข่วน ขีดสี (Scratching) และการทดสอบ ความแข็ง จากการใช้แรงกด ให้เกิดรอยที่ผิว (Indentation) ซึ่งลักษณะการทดสอบ ทั้งสองแบบนี้ สามารถจำแนก ออกเป็น 5 วิธีที่แตกต่างกัน ตามจุดประสงค์ ของการใช้งาน หรือปัจจัยที่จะมีผลกระทบต่อ วัสดุนั้น ๆ เมื่อใช้งาน ซึ่งมีวิธีการทดสอบ ดังนี้คือ (มณฑล ฉายอรุณ, 2531, หน้า 98 - 101)^[18]

2.5.3.1. วัดความต้านทานต่อการตัดหรือเจาะ (Resistance to Cutting or Drilling)

โดยการทดสอบความสามารถ ในการนำไปตกแต่ง ด้วยเครื่องจักร (Machinability) เป็นการทดสอบ ความแข็งโดยพิจารณา จากความยากง่าย ของการนำไปตัด หรือเจาะด้วยเครื่องจักร ซึ่งเป็นวิธีที่ อาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน กับเครื่องจักร แล้วสรุปว่า วัสดุใดแข็งหรือ อ่อนกว่ากันเท่านั้น แต่จะไม่สามารถ ระบุค่าความแข็ง เป็นตัวเลขได้ จึงไม่เป็น วิธีการทดสอบ ความแข็งที่ได้มาตรฐาน

2.5.3.2. วัดความต้านทานต่อการเสียดสี (Resistance to Abrasion) โดยการทดสอบการเสียดสี (Wear Hardness Test) เป็นวิธีการทดสอบ ความแข็ง ที่พิจารณา จากการสึกหรอ ของผิววัสดุเมื่อใช้งานที่ต้องเสียดสีกัน ถ้าวัสดุได้อ่อนกว่า ก็จะถูกละเอียด ทำให้เกิดการสึกหรอ มากกว่า

การทดสอบ โดยการเสียดสีนี้อาจจะใช้ตะไบ ทดสอบได้ (File Test) คือทำการตะไบที่ผิวงานทดสอบ ถ้าผิวงานแข็ง ก็จะตะไบไม่เข้า ผิวงานสึกหรอน้อย แต่ถ้าผิวงาน อ่อนก็จะสามารถตะไบ ได้ลึก ผิวงานสึกหรอมาก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า เป็นวิธีทดสอบที่ง่าย สะดวกรวดเร็ว แต่ไม่สามารถ ระบุค่าความแข็ง ของผิวงานทดสอบได้ และผลการทดสอบ ก็ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ของผู้ทดสอบด้วย การทดสอบ โดยการเสียดสี นี้สามารถระบุได้ เพียงว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่านั้น จึงไม่เป็น วิธีการทดสอบ ความแข็ง ที่ได้มาตรฐานเช่นเดียวกัน (มณฑล ฉายอรุณ, 2531, หน้า 99)

2.5.3.3. วัดความต้านทานต่อการขีดข่วน (Resistance to Scratching) โดยการทดสอบการขีดข่วน (Scratch Hardness Test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็ง ที่ได้รับความนิยม ใช้ของนักธรณีวิทยา ที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง ของหินแร่ การทดสอบโดยการขีดข่วน เป็นวิธีการทดสอบ ที่สะดวกรวดเร็ว เพราะอาศัยหลักการที่ว่า วัสดุที่แข็งกว่า จะสามารถขีดข่วนเป็นรอย บนผิววัสดุที่อ่อนกว่าได้ แต่วัสดุที่อ่อนกว่า จะไม่สามารถขีดข่วน เป็นรอยบนผิววัสดุที่แข็งกว่าได้

ในปี ค.ศ. 1824 (พ.ศ. 2367) นักแร่วิทยา ชาวออสเตรีย ชื่อ เอฟ โมห์ส (F. Mohs) ได้ลำดับความแข็ง ของแร่ออกเป็น 10 ระดับด้วยกัน เรียกว่า ระดับความแข็ง ของโมห์ส (Mohs' Scale of Hardness) โดยเริ่มจากระดับหนึ่ง เป็นแร่ที่อ่อนที่สุด ไปหาแร่ที่มีความแข็ง มากที่สุด คือระดับสิบ (ตาราง 2.2) แต่ลำดับ ความแข็งของแร่ 10 ระดับนี้ เป็นลำดับ ความแข็งสัมพัทธ์ (Relative Hardness) ไม่ใช่ระดับความแข็ง ที่แท้จริง นอกจากนี้ โมห์ส ยังจัดลำดับ ความแข็งไว้อีก 15 ระดับตามตารางที่ 2.2 เช่นเดียวกัน แต่โดยทั่วไป นิยมใช้การเปรียบเทียบ ความแข็ง 10 ระดับ (มณฑล ฉายอรุณ, 2531, หน้า 100) และในปัจจุบัน ได้มีเครื่องมือวัด ระดับความแข็ง ตามระดับของโมห์ส โดยการวัดความต้านทาน ต่อการขีดข่วน ซึ่งมีเครื่องมือ 2 ลักษณะคือ มีลักษณะ เป็นก้อนของแร่หรือวัสดุ นั้น ๆ ส่วนอีก ลักษณะหนึ่ง จะนำวัสดุ ที่เป็นตัววัดทั้งสิบชนิด มาประกอบกับด้ามจับ โดยให้วัสดุ อยู่บริเวณหัวของเครื่องมือที่มีลักษณะ เหมือนปากกา เพื่อความสะดวก ในการทำงาน และเก็บรักษา

ตาราง 2.2 ความแข็งของแร่จากการทดสอบ โดยการขีดข่วนตามระดับความแข็งของโมห์ส

ระดับความแข็ง 10 ระดับ		ระดับความแข็ง 15 ระดับ	
ระดับความแข็ง	ชื่อแร่	ระดับความแข็ง	ชื่อแร่
1	ทัลค์ (Mg3Si4O10(OH)2)	1	ทัลค์ (Talc)
2	ยิปซัม (CaSO4 . 2H2O)	2	ยิปซัม (Gypsum)
3	แคลไซต์ (CaCO3)	3	แคลไซต์ (Calcite)
4	ฟลูออไรต์ (CaF2)	4	ฟลูออไรต์ (Fluorite)
5	อะพาไทต์ (Apatite ; CaSP2O12F)	5	อะพาไทต์ (Apatite)
		6	ออโรไคลส (Orthoclase)
6	หินฟันม้า ; ออโรไคลส (Feldspar ; Orthoclase ;KAlSi3O8)	7	ควอตซ์ (Quartz)
		8	ซิลิกาบริสุทธิ์หลอม (Vitreous Pure Silica)
7	ควอตซ์ (SiO2)	9	โทแพซ (Topaz)
8	โทแพซ (Topaz ; SiAl2F2O4)	10	การ์เนต (Garnet)
9	แซฟไฟร์ หรือ คอรัันดัม (Sapphire or Corundum ; Al2O3)	11	เซอร์โคเนียหลอม (Fused Zirconia)
		12	อลูมินาหลอม (Fused Alumina)
10	เพชร (Diamond)		
		13	ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide)
		14	โบรอนคาร์ไบด์ (Boron Carbide)
		15	เพชร (Diamond)

2.5.3.4. วัดการสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทก (Energy Absorption Under Impact Loads) ทดสอบ โดยใช้ลูกตุ้ม กระแทกผิวแล้วสะท้อนกลับ (Rebound Hardness Test) เป็นวิธีการทดสอบ ความแข็งโดยการปล่อย ลูกตุ้มให้กระทบผิวขึ้นทดสอบ แล้วพิจารณา ค่าความสูงของ การสะท้อนกลับของลูกตุ้ม ภายหลังกระทบ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า เป็นวิธีการทดสอบความแข็ง ที่ใช้แรงเคลื่อนที่กระทบผิววัสดุ ดังนั้นบางครั้ง จึงเรียกววิธีการทดสอบความแข็ง แบบนี้ว่า การทดสอบความแข็ง ทางพลวัต (Dynamic Hardness Test) และเป็นวิธีที่นิยม ใช้ทดสอบความแข็ง ของโลหะที่อุณหภูมิสูง เพราะลูกตุ้มจะไม่ได้รับผลกระทบ ของความร้อน เนื่องจากระยะเวลา ที่ตกกระทบ และสัมผัสผิวขึ้นทดสอบนั้นน้อยมาก จากหลักการทดสอบ ดังกล่าวนีเองที่ถูกนำไป สร้าง อุปกรณ์-ทดสอบความแข็งที่นิยมใช้ เรียกว่าชอร์ สเคลโรสโคป (Shore Scleroscope) เหตุนี้เองจึง เรียกการ ทดสอบนี้ว่า การทดสอบ ความแข็งด้วย ชอร์ สเคลโรสโคป

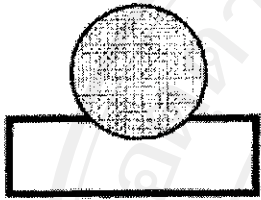
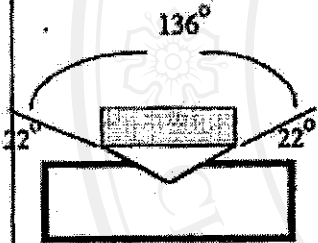
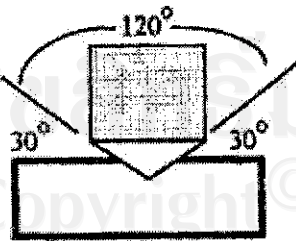
2.2.3.5. วัดความต้านทานต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Resistance to Permanent Indentation)

การทดสอบโดยการกดให้เกิดรอยบุ๋ม (Indentation Hardness Test) เป็นวิธีการ ทดสอบ ความแข็ง ที่นิยมใช้ใน งานวิศวกรรม เพราะเป็นวิธีการทดสอบ ที่ได้มาตรฐาน ให้ผลการทดสอบ ที่ถูกต้องแน่นอน และสามารถระบุ ค่าความแข็งได้ เนื่องจากใช้เครื่องทดสอบที่เป็นมาตรฐาน ในการทดสอบ

สำหรับหลักการ ของการทดสอบความแข็ง โดยวิธีนี้คือใช้เครื่องทดสอบ กดบนผิวขึ้นทดสอบ ทำให้ เกิดรอยบุ๋มถาวร (Permanent Indentation) แล้ววัดขนาด ความโตหรือความลึก ของรอยบุ๋ม ถ้าทดสอบ กับวัสดุอ่อน ก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋ม ขนาดใหญ่ หรือลึกมาก แต่ถ้าทดสอบ กับวัสดุแข็งก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดเล็ก หรือลึกลึกน้อย จากหลักการดังกล่าว ได้ถูกนำไปสร้าง เครื่องทดสอบ มาตรฐานและวิธีการทดสอบ ที่เป็นมาตรฐานดังนี้ (มณฑล ฉายอรุณ, 2531, หน้า 9 – 101)

- 1) การทดสอบความแข็งบริเนลล์ (Brinell Hardness Test)
- 2) การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)
- 3) การทดสอบความแข็งน็อพ (Knoop Hardness Test)
- 4) การทดสอบความแข็งร็อกเวลล์ (Rockwell Hardness Test)

ความแตกต่าง ของการทดสอบทั้ง 4 ประเภทที่เห็นได้ชัดเจน คือความแตกต่าง ของลักษณะ หัวเข็มทดสอบ หรือรูปร่าง ของเข็มทดสอบ (Shape of Indentation) ตามรูป 2.13 สำหรับหน่วยของการวัดความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบ เพื่อหาความต้านทาน ต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร จะมีหน่วยการวัดเป็นกิโลกรัม ต่อตารางมิลลิเมตร

ภาพด้านข้าง	ภาพด้านบน	วิธีการทดสอบ
		บริเวลล์
		วิกเกอร์ส
		บรินล
 	 	ร็อกเวลล์

รูป 2.13 หัวเข็มทดสอบของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่าง ๆ

ตาราง 2.3 การเปรียบเทียบระดับความแข็งของโลหะกับค่าความแข็งจากเครื่องทดสอบ

วัสดุ	ค่าความแข็ง		วัสดุ
	วัดด้วยวิธี พินเพนด์	โพล์ส	
	3000	10	เพชร
Tungsten Carbide	2000	9	ทองวันดัม
Alumina Ceramics	1000	8	ไทเทเนียม
Zircon Ceramics	500	7	คาร์บอน
Polycrystalline Glass	300	6	นิกเกิล
Manganese Steels	200	5	อะลูมิเนียม
Titanium	100	4	ฟอสไฟต์
Carbon Steels	50	3	เหล็ก
Aluminum	30	2	นิโครม
Magnesium	20	1	ดีบุก
Hard Lead Alloys	10		
Soft Lead	5		
	3		
	2		

2.6. การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสีและการกลึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งาน ดังนี้

2.6.1. Brinell Hardness Test (H_B)

เป็นการวัดความแข็ง โดยอาศัยแรงกดคงที่กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสูตร ดังนี้

$$H_B = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.44)$$

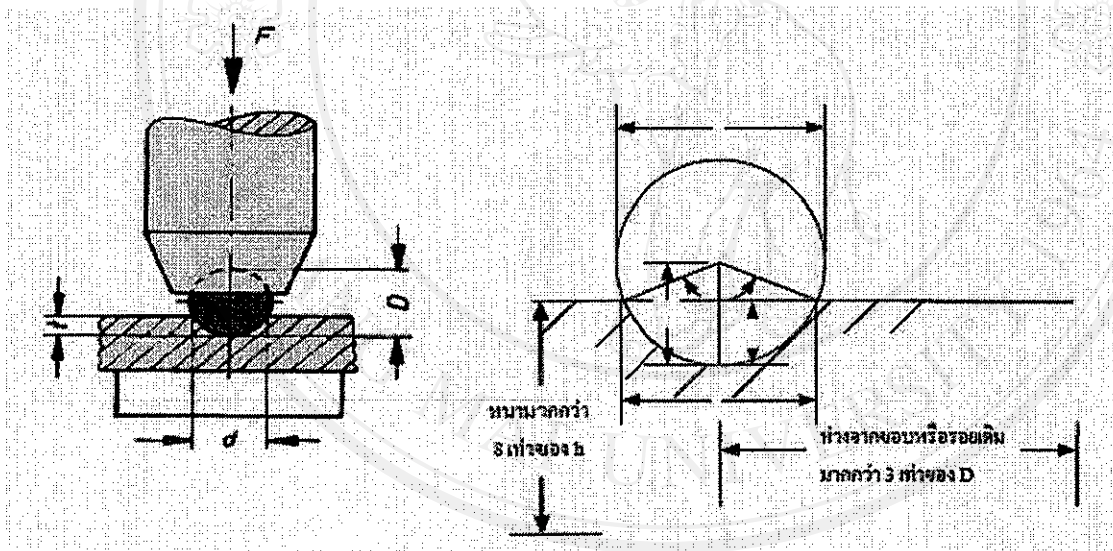
โดยที่

H_B คือ ค่าความแข็งแบบ Brinell (kgf/mm^2)

P คือ แรงกด (kgf)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเหล็กกล้า (mm.)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm.)



รูป 2.14 การทดสอบแบบ Brinell

แรงกดสำหรับการทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3,000 kgf และลูกบอลเหล็กกล้าจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 - 10 มม. โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็กหรือเหล็กกล้า และ 30 วินาทีสำหรับโลหะนิ่ม (เช่น ตะกั่ว ดีบุก เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโลหะมีความแข็งที่แตกต่างกัน หากโลหะที่ทดสอบนิ่มและใช้แรงกดมาก จะมีผลทำให้ระยะที่หัวกดจมลงไปลึกมาก จนอาจเกินกว่าครึ่งลูก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็งผิดพลาดได้ หรือหากเลือกแรงกดน้อยไปเมื่อเทียบกับขนาดของลูกบอลเหล็กกล้าก็จะทำให้การแปลผลทำได้ไม่แม่นยำเช่นกัน

ดังนั้นการเลือกใช้แรงกด และขนาดลูกบอลจะแตกต่างกันไปด้วย เพื่อป้องกันข้อบกพร่องที่จะพบได้ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ เราสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วน P/D^2 ดังต่อไปนี้

ตาราง 2.4 อัตราส่วนของ P/D^2

โลหะ	ค่าความแข็งโดยประมาณ (H_B)	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



รูป 2.15 ลักษณะการทดสอบแบบ Brinell ที่ไม่ถูกต้อง

สำหรับการทดสอบเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือ โลหะที่มีความแข็งสูงมากๆ จะไม่สามารถทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งได้ จะต้องใช้ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 2.45 มม. แทนซึ่งจะใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่แข็งตั้งแต่ 444 ถึง 627 H_B

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ได้แก่

1. ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบเพื่อให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่แน่นอน และที่ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม นอกจากนี้การเตรียมผิวต้องระวังอย่างมาก โดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) และกรรมวิธีเย็น (cold working)
2. ต้องระวังตำแหน่งการทดสอบโดยให้ระยะหัวกดอยู่ห่างจากขอบแต่ละด้านของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล ระยะห่างของแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล และชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของการกด
3. ควรวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกัน แล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาความแข็งต่อไป

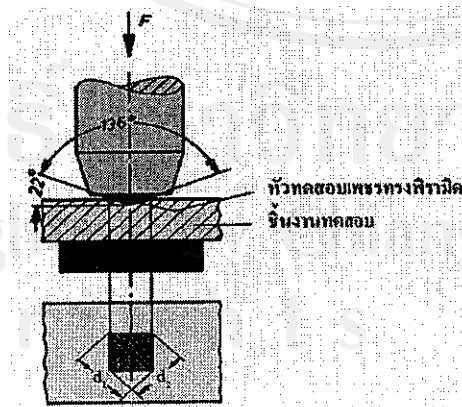
การวัดความแข็งแบบ Brinell มีข้อดี คือ ในการกด 1 ครั้งจะครอบคลุมหลายๆ เฟสของชิ้นงาน ทำให้ได้ค่าความแข็งที่สม่ำเสมอ ซึ่งหากวัดด้วยวิธีที่ใช้หัวกดขนาดเล็กมาก อาจทำให้วัดได้เพียงเฟสเดียว ทำให้ค่าความแข็งที่ได้ ไม่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของทั้งวัสดุชิ้นนั้น แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ชิ้นงานต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะวัดกับหัวกดได้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

2.6.2. Vickers Hardness Test

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

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \quad (2.45)$$

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



รูป 2.16 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

1. การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าใช้น้ำหนักมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหากับหัวกดเพชร ตอนคลายหัวกดได้
2. ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) หรือกรรมวิธีเย็น (cold working)
3. ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y
4. ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ
5. การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่านค่า

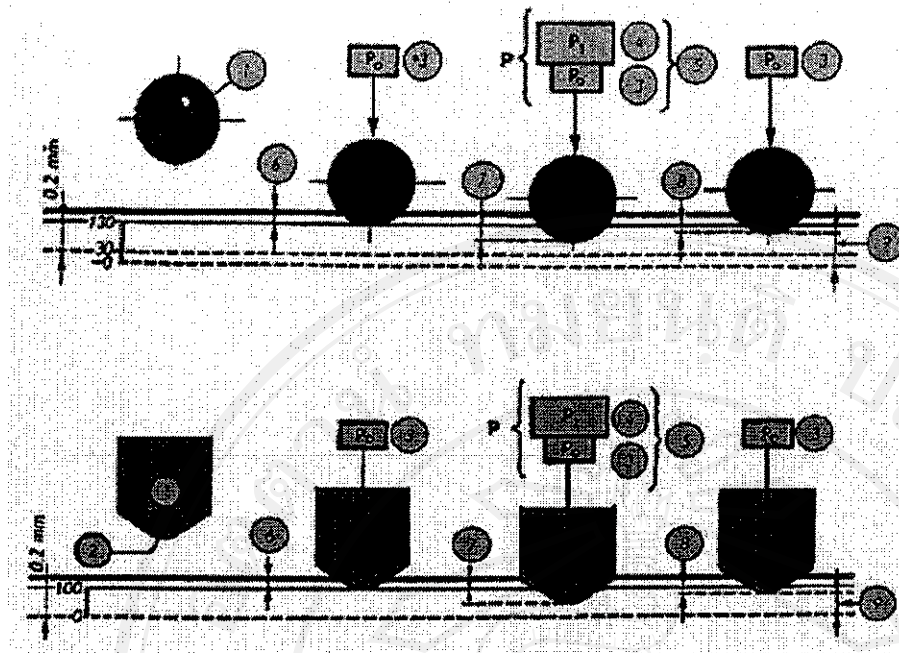
วิธีทดสอบนี้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางได้

2.6. 3. Rockwell Hardness Test

เป็นวิธีวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากความลึกกระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงกดที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ minor load และ major load

minor load เป็นแรงที่ยัดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง

major load เป็นแรงที่มากกว่า minor load และกดลงภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงาน



รูป 2.17 วิธีการทดสอบแบบ Rockwell Hardness Test

สำหรับมาตรฐานความแข็งแบบ Rockwell มีอยู่ 15 สเกล (ไม่รวม superficial hardness scale) ดังแสดงในตาราง 2.5

ตาราง 2.5 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) และเหล็กหล่ออบเหนียว (malleable iron)
C	หัวกดเพชร	150	เหล็กกล้า, เหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง (hard cast irons), เหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก, ไทเทเนียม, เหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิวลึก และวัสดุอื่นๆ ที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB
D	หัวกดเพชร	100	เหล็กกล้าที่มีขนาดบาง และเหล็กกล้าชุบแข็งที่ผิว และเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ริติก
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 เพื่อป้องกันหวัคเสียหาย
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	60	อะลูมิเนียม, สังกะสี และตะกั่ว
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
R	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
S	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
V	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตเบร้ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ค่าความแข็งจะแสดงเป็น 2 ส่วน คือ ตัวเลขค่าความแข็งที่วัดได้ และสัญลักษณ์ของสเกลที่ใช้วัด (แสดงถึงลักษณะหวัคที่ใช้วัด ค่า และ major load) ตัวอย่าง เช่น 64.0 HRC หมายความว่า ตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 64.0 ด้วยการวัดแบบ Rockwell สเกล C ที่ใช้หวัคดเพชร และมีค่า major load เท่ากับ 100 kgf

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

1. ชนิดของวัสดุ โดยทั่วไปผลการทดสอบที่ดีที่สุด ได้จากการใช้แรงกดสูงที่สุดเท่าที่ ชิ้นงานทดสอบจะสามารถรับได้ และจากตาราง 2.5 จะบอกได้ว่าวัสดุที่ทดสอบควรใช้สเกลแบบ ไหน เช่น วัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้า หรือทังสเตนคาร์ไบด์ จะต้องใช้สเกล A, C, D เท่านั้น

2. ความหนาของชิ้นงานทดสอบ ควรมากกว่าความลึกของรอยกดอย่างน้อย 10 เท่า เพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ซึ่งการวัดความลึกรอยกด แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

$$2.1 \text{ ความลึกรอยกด} = (100 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002 \quad \text{สำหรับหัวกดเพชร}$$

$$2.2 \text{ ความลึกรอยกด} = (130 - \text{ค่าความแข็งที่วัดได้}) \times 0.002 \quad \text{สำหรับหัวกดบอล}$$

นอกจากนี้ภายหลังการทดสอบจะต้องไม่มีรอยนูนเกิดขึ้นทางด้านหลังของชิ้นงานทดสอบด้วย

3. รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ และตำแหน่งในการวัด

3.1 ชิ้นงานรูปทรงยาว จะต้องติดตั้งแท่นรองรับเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ผิวทดสอบที่ทำการวัด ความแข็งตั้งฉากกับแนวกดของหัวกด

3.2 ชิ้นงานทรงกระบอก การวัดค่าความแข็งให้ถูกต้องจะต้องใช้ค่า correction factor ช่วยปรับค่าความแข็งที่อ่านได้ เนื่องจากในการวัดความแข็งของผิวนูน (convex) หัวกดจะกดลงไปลึกมากกว่าปกติ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นค่า correction factor จะถูกบวกเข้าไปเมื่อวัดความแข็งกับผิวชิ้นงานทรงกระบอก นอกจากนี้ในการวัดความแข็งชิ้นงาน ทรงกระบอกจะต้องใช้แท่นตัววี (V anvil) เพื่อช่วยรองรับชิ้นงานทดสอบให้อยู่นิ่งกับที่