

## บทที่ 7

### การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

#### 1. บทนำ (introduction)

ความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว ในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุ ซึ่งในบทนี้ได้แสดงถึงกระบวนการทดสอบความแข็งแบบต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแบบรอยกด (indentation) แบบกระดอน (rebound) แบบขีดข่วน (scratch) แบบสึกหรอ (wear) และในแบบของความสามารถในการกลึงไส (machinability) โดยการทดสอบความแข็งส่วนใหญ่เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับการเกิดรอยที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อนหัวกดลงบนวัสดุ ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอยกด ส่วนการทดสอบในลักษณะการปล่อยลูกตุ้มที่ทราบน้ำหนักลงบนผิววัสดุ จากนั้นวัดการกระดอนของลูกตุ้มเรียกว่าความแข็งแบบกระดอน และการทดสอบความแข็งที่สะดวกที่สุดคือการทดสอบความแข็งแบบรอยขีดข่วน โดยการขีดข่วนพื้นผิววัสดุด้วยวัสดุต่างๆ ขนาดและคุณภาพของผลการทดสอบจะใช้เป็นตัวบ่งบอกค่าความแข็งของวัสดุ ส่วนปริมาณการสึกหรอของพื้นผิววัสดุภายใต้เงื่อนไขการทดสอบจะใช้ในการทดสอบความแข็ง การสึกหรอและความต้านทานการขัดสี และสุดท้ายความสามารถในการกลึงไสใช้เป็นตัวบ่งบอกความยากง่ายในการกลึงวัสดุ

#### 2. หลักการ

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอล แบบระนาบ หรือแบบกรวยปลายมนหรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชรและใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่ โดยการวัดน้ำหนักที่ทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น ส่วนความแข็งแบบกระดอน

การทดสอบความแข็งกับวัสดุโลหะส่วนใหญ่เป็นการทดสอบแบบ Brinell หรือ Rockwell ส่วนการทดสอบแบบอื่นคือการทดสอบแบบ Shore scleroscope, Vickers, Monotron, Rockwell superficial และเครื่องทดสอบ Herbert จะใช้ในการทดสอบโลหะที่มีความแข็งสูงหรือเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบผิวแข็ง นอกจากนี้ในการทดสอบความแข็งบางครั้งยังต้องการทดสอบกับวัสดุที่เล็กและบางมาก หรือวัสดุที่มีระดับความแข็งแตกต่างกันที่พื้นผิวเป็นบริเวณแคบๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (microhardness tester) เช่น นูพ (Knoop) เป็นต้น

### 3. เครื่องมือและกระบวนการทดสอบความแข็ง

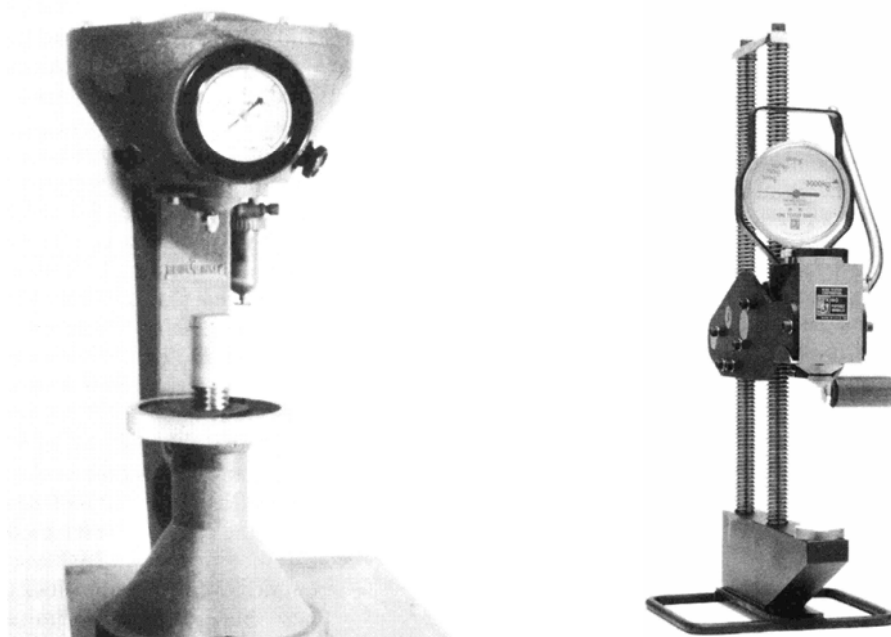
#### 3.1 การทดสอบแบบ Brinell

การทดสอบความแข็งหนึ่งที่ถูกใช้มาอย่างยาวนานที่สุดคือการทดสอบแบบ Brinell ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแบบน้ำหนักกดที่ใช้ในการกดหัวกดเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนพื้นผิวชิ้นทดสอบ โดยปกติจะใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งหรือทังสเตนคาร์ไบด์ขนาด 10 mm. กดลงบนผิวชิ้นทดสอบด้วยน้ำหนักกด 3000 kg สำหรับโลหะแข็ง 1500 kg สำหรับโลหะที่มีความแข็งปานกลาง และ 500 kg หรือต่ำกว่านั้นสำหรับวัสดุอ่อนนิ่ม

เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Brinell มีหลายแบบ ซึ่งแตกต่างกันในหัวข้อต่อไปนี้คือ

1. กรรมวิธีการใส่น้ำหนักกด เช่น ใช้แรงดันน้ำมัน ระบบเฟืองหรือระบบคาน เป็นต้น
2. กรรมวิธีการดำเนินการทดสอบ เช่น ใช้มือ หรือแรงขับเคลื่อน
3. กรรมวิธีวัดน้ำหนักกด เช่น piston กับน้ำหนัก มาตรวัด Bourdon , Dynamometer หรือระบบคาน
4. ขนาด คือเล็กแบบตั้งโต๊ะหรือใหญ่แบบประจำที่ ดังรูปที่ 7.1

การทดสอบความแข็งแบบ Brinell สามารถใช้เครื่องทดสอบแรงดึงได้โดยใช้อุปกรณ์ช่วยยึดหัวกดลูกบอล แล้วนำแผ่นโลหะที่ต้องการทดสอบยึดเข้าอุปกรณ์แขนจับยึดชิ้นงาน โดยใช้หัวกดบอลขนาด 3/64 นิ้ว และสปริง 22 ปอนด์



รูปที่ 7.1 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Brinell

การทำการทดสอบความแข็งแบบ Brinell ให้นำชิ้นทดสอบไปวางบนแท่นวางชิ้นทดสอบแล้วยกระดับแท่นวางชิ้นทดสอบสัมผัสหัวกด จากนั้นใส่น้ำหนักกดโดยการปั้มน้ำมันเข้าไปในทรงกระบอกหลัก ซึ่งเลื่อน piston หลักลงและกดหัวกดบอลเข้าไปในชิ้นทดสอบ ซึ่งเมื่อชิ้นทดสอบจะยึดพื้นผิวหัวกดไว้ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจากความเสียดทานเล็กน้อย โดยจะใช้มาตรวัด Bourdon ในการแสดงน้ำหนักกดอย่างหยาบ เมื่อใส่น้ำหนักตามที่ต้องการตาชั่งน้ำหนักค้ำบนของเครื่องจะยกตัวขึ้นโดยการกระทำของ small piston โดยต้องระวังอย่าให้มีน้ำหนักเกิดกับหัวกดมากเกินไป

การทดสอบตามมาตรฐานการวัดขนาดของรอยกดจะใช้เครื่องวัดไมโครมิเตอร์ผ่านกล้องจุลภาค หรือกล้องจุลภาค Brinell ซึ่งจะมีมาตรวัดโปร่งแสงปรากฏอยู่บนภาพรอยกด Brinell เป็นการทดสอบความแข็งที่ดี แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุที่แข็งมาก เนื่องจากหัวกดลูกบอลจะเกิดการเสีรูปร่างมากเกินไป รวมทั้งการทดสอบกับชิ้นงานที่บางมาก เนื่องจากรอยกดที่เกิดขึ้นอาจเกินความหนาชิ้นทดสอบ และไม่เหมาะกับการทดสอบวัสดุที่ผ่านการชุบผิวแข็ง เนื่องจากรอยกดจะลึกเกินความหนาของชั้นชุบแข็ง ทำให้ได้ค่าความแข็งของแกนกลางชิ้นทดสอบซึ่งอ่อนนุ่มร่วมด้วย ส่งผลให้ค่าความแข็งผิวชุบผิดพลาด และตาม

ค่าความแข็ง Brinell ปกติวัดเป็นแรงดันต่อหน่วยพื้นที่ ในหน่วยกิโลกรัมต่อตาราง มิลลิเมตรของรอยกดที่เกิดขึ้นหลังนำน้ำหนักกดออก โดยการหารแรงที่กระทำด้วยพื้นที่รอยกด ในรูปของพื้นที่ทรงกลมดังรูปที่ 7.2 โดยนำค่าแรงที่กระทำและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด แทนลงในสูตร

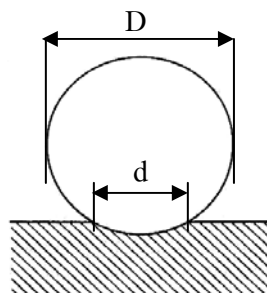
$$BHN = \frac{2L}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

เมื่อ BHN คือค่าความแข็ง Brinell ( $\text{kg/mm}^2$ )

L คือน้ำหนักกดที่กระทำ (kg)

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด (mm)



รูปที่ 7.2 แสดงภาพหัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็ง Brinell

ตัวอย่างที่ 7.1

จงหาค่าความแข็ง Brinell ของชิ้นทดสอบที่มีรอยกดหลังการทดสอบกว้าง 5 mm ซึ่ง กดด้วยน้ำหนักกด 3000 kg

วิธีทำ

$$\begin{aligned} BHN &= \frac{2L}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \\ &= \frac{2(3000 \text{ kg})}{\pi(10 \text{ mm})[10 \text{ mm} - \sqrt{(10 \text{ mm})^2 - (5 \text{ mm})^2}]} \\ &= 142.6 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

ค่าความแข็ง Brinell ปกติอยู่ในช่วง 90 ถึง 630 ค่าที่สูงขึ้นหมายถึงความแข็งที่มากขึ้น รอยกดที่ลึกจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดมากแต่มีค่าความแข็งน้อย ในกรณีที่ใช้หัวกดลูกบอลขนาด 10 mm ถ้าวรอยกดที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า 6 mm ควรปรับลดน้ำหนักกดลง ขณะที่หัวกดเคลื่อนสู่พื้นผิวของวัสดุ เนื้อวัสดุรอบหัวกดจะแข็งขึ้นและเนื้อวัสดุส่วนนี้จะทำให้การอ่านค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดผิดพลาด

ค่าความแข็งที่วัดได้ในช่วงปลายของมาตราวัด เช่นความแข็งเกิน 650 BHN ไม่ควรเชื่อถือมากนัก เนื่องด้วยสองเหตุผล ประการแรกเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดน้อยเกินไปทำให้การอ่านค่าไม่แม่นยำ ประการที่สองถ้าวรอยกดแข็งมากหัวกดบอลจะยุบตัวทำให้แบนเรียบและให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดที่ใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าความแข็งที่คำนวณได้เชื่อถือไม่ได้ และปกติมีวัสดุไม่มากนักที่มีค่าความแข็งเกิน 650 BHN

โดยทั่วไปวัสดุที่มีความแข็งประมาณ 150 BHN หรือมากกว่านั้นจะใช้น้ำหนักกด 3000 kg ส่วนน้ำหนักกด 1500 kg จะใช้กับวัสดุที่มีความแข็ง 75 ถึง 300 BHN และ 500 kg ใช้กับวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่า 100 BHN ในบริเวณที่คาบเกี่ยวกันให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม และขึ้นทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด ถ้าทำการทดสอบกับชิ้นงานที่บางกว่านี้ความแข็งของแท่นวางอาจส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งของวัสดุได้

การทดสอบความแข็งแบบ Brinell มีข้อจำกัดและข้อเสีย คือเป็นการทดสอบแบบทำลายซึ่งจะมีรอยกดปรากฏอยู่บนพื้นผิววัสดุหลังการทดสอบ ดังนั้นวัสดุที่ผ่านการทดสอบ จะไม่สามารถนำกลับไปใช้ได้ อีก นอกจากนั้นเครื่องทดสอบความแข็ง Brinell มีน้ำหนักมาก ประมาณ 200 ปอนด์ จึงไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานภาคสนาม รวมทั้งราคาค่อนข้างแพง เมื่อเทียบกับเครื่องทดสอบความแข็งแบบอื่น นอกจากนี้ผลการทดสอบยังขึ้นอยู่กับ การฝึกสอน ประสบการณ์ และทัศนคติของผู้ทดสอบในการวัดรอยกด ซึ่งอาจทำให้การอ่านค่า รอยกดได้แตกต่างกัน แต่ปกติแล้วความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะมีน้อย คือคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ประมาณร้อยละ 10 ข้อดีของการทดสอบความแข็งแบบ Brinell คือเป็นวิธีการทดสอบที่ เก่าแก่จนเป็นที่ยอมรับและเป็นที่ยอมรับของคนส่วนใหญ่ ตลอดจนผลการทดสอบความแข็ง ที่ได้รับยังเป็นที่ยอมรับในวงการอุตสาหกรรม รวมทั้งการทดสอบสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว คือประมาณ 2 นาที ในการดำเนินการทดสอบนอกจากต้นทุนค่าเครื่องมือแล้วต้นทุนอื่น

### 3.2 การทดสอบความแข็ง Rockwell

การทดสอบนี้เป็นแบบเดียวกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งหาได้จากขนาดความลึกรอยกดบนชิ้นทดสอบที่เกิดจากการกดด้วยหัวกดภายใต้น้ำหนักคงที่ แต่ที่ต่างกันคือในทางทฤษฎีการทดสอบ Rockwell จะทดสอบด้วยน้ำหนักต่างกันสามชุดกับหัวกดสามขนาด ส่วนการทดสอบ Brinell จะมีขนาดหัวกดที่ต่างไปและใช้น้ำหนักกดที่มากกว่า รวมทั้งการทดสอบแบบ Rockwell จะมีรอยกดที่ได้มีขนาดเล็กและตื้นกว่า ส่วนวัสดุที่นำมาทดสอบสามารถใช้กับวัสดุกลุ่มเดียวกันกับการทดสอบ Brinell แต่สามารถทำการทดสอบได้เร็วกว่า เนื่องการทดสอบแบบ Rockwell สามารถอ่านค่าความแข็งได้ทันทีจากหน้าปัดเครื่องตามมาตรฐาน ASTM E 18 ดังแสดงในรูปที่ 7.3



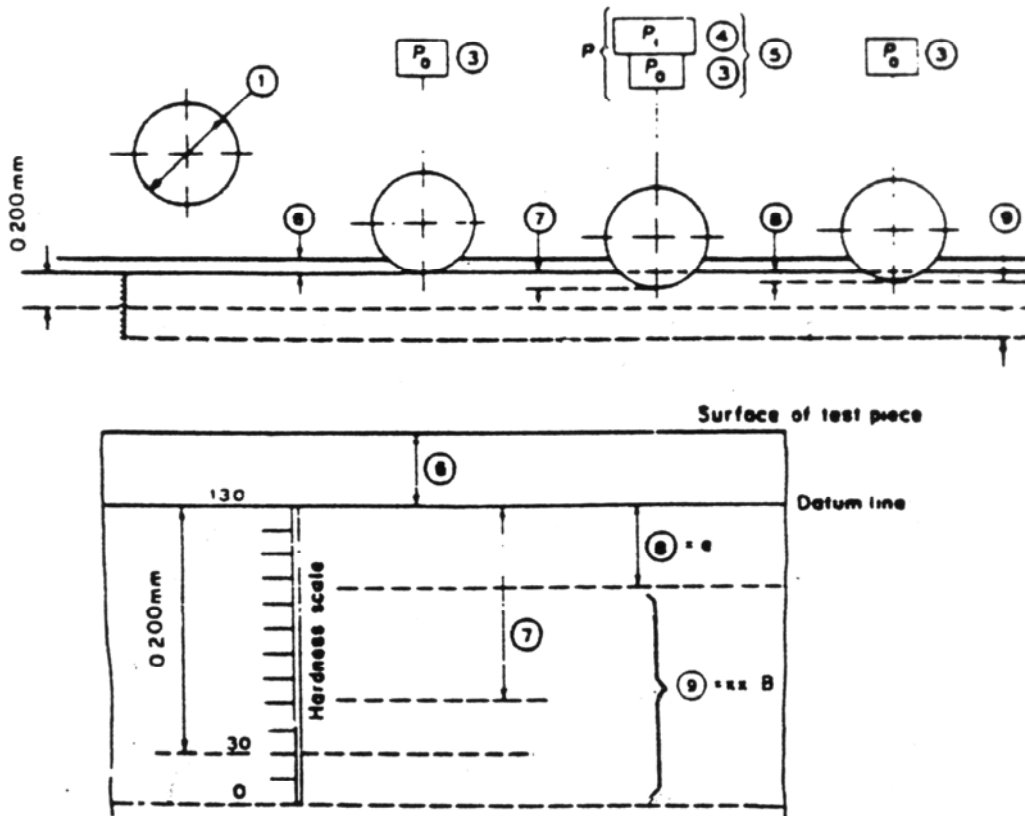
รูปที่ 7.3 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell พร้อมหัวกด

การทดสอบแบบ Rockwell จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยการใส่น้ำหนักที่กระทำผ่านระบบค้ำน้ำหนักกับระบบคาน หัวกดอาจเป็นลูกบอล เหล็กกล้าแข็ง 1/16 นิ้ว 1/8 นิ้ว ดังรูปที่ 7.4 หรือหัวกดเพชรรูปกรวยมุม 120° เรียกว่า Brale ดังรูปที่ 7.5 ค่าความแข็งที่แสดงบนหน้าปัดเครื่องเป็นส่วนกลับของค่าความลึกรอยกด ส่วนการ แสดงหน่วยค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับค้ำน้ำหนัก ชนิดและขนาดของหัวกดที่ใช้ในการทดสอบ ยกตัวอย่างเช่นถ้าเลือกใช้น้ำหนักกด 100 kg และใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าแข็งขนาด 1/16 in. ต้องอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดเครื่องในสเกล B และถ้าใช้หัวกดเพชรกับน้ำหนักกด 150 kg ต้องอ่านค่าความแข็งในสเกล C เป็นต้น

ในการทดสอบเริ่มแรกจะใช้น้ำหนักกดเบื้องต้น 10 kg ค้ำไว้ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกด เบื้องต้นบนชิ้นทดสอบ โดยสังเกตเข็มบนหน้าปัดเครื่องที่แสดงน้ำหนักกดเบื้องต้นจะเข้าสู่ บริเวณที่กำหนด จากนั้นให้ใส่น้ำหนักกดแท้จริง โดยปกติถ้าใช้หัวกดบอลน้ำหนักกดแท้จริง จะอยู่ในช่วงประมาณ 60 ถึง 100 kg และถ้าใช้หัวกดเพชรจะใช้น้ำหนักกดแท้จริงได้ถึง 150 kg ส่วนหัวกดบอลจะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว และหัวกดบอลขนาด 1/8 1/4 และ 1/2 นิ้ว จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่า หลังจากใส่น้ำหนักกดแท้จริงและนำน้ำหนักกดออก ให้อ่าน ค่าความแข็งจากหน้าปัดเครื่องโดยที่น้ำหนักกดเบื้องต้นยังค้างอยู่ ตารางที่ 7.1 แสดงตัวอย่าง สเกล ชนิดหัวกดและน้ำหนักกดของการทดสอบความแข็ง Rockwell

สเกล	หัวกด	น้ำหนักกด (kg)
A	เพชร	60
B	บอล 1/16 นิ้ว	100
C	เพชร	150
D	เพชร	100
E	บอล 1/8 นิ้ว	100
F	บอล 1/16 นิ้ว	60
G	บอล 1/16 นิ้ว	150

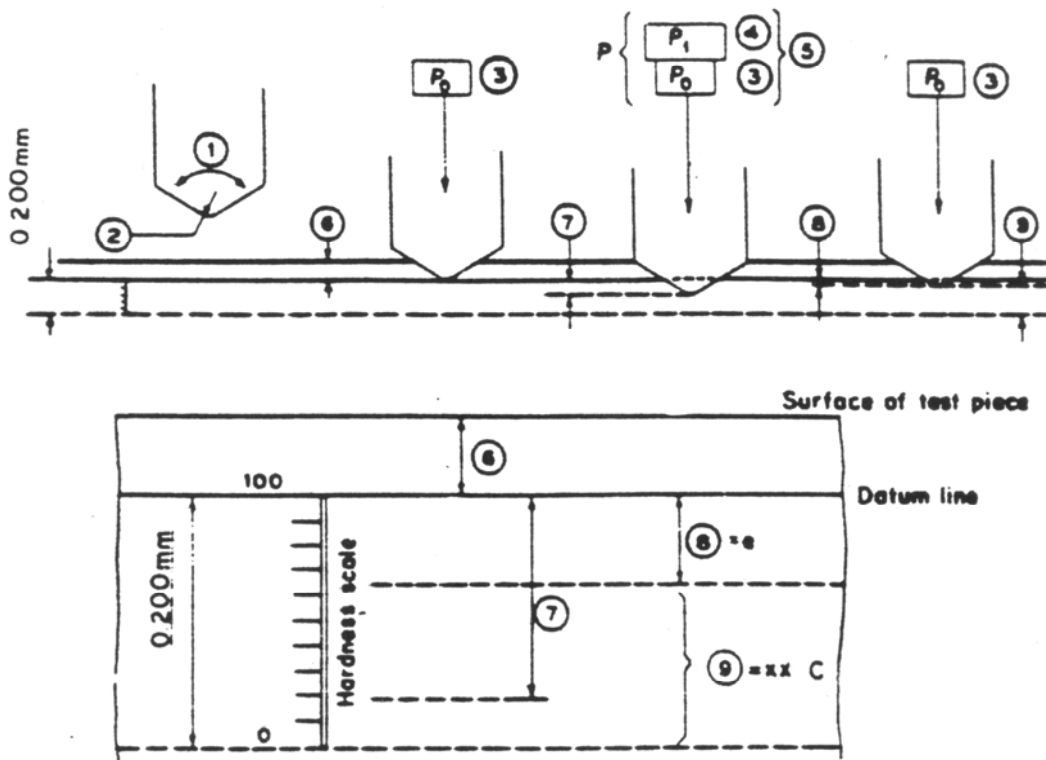
ตารางที่ 7.1 สเกลการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell



หมายเลข	สัญลักษณ์	ความหมาย
1	D	เส้นผ่านศูนย์กลางหัวบอล 1/16 นิ้ว (1.588 mm.)
3	$P_0$	น้ำหนักกดเบื้องต้น 10 kgf (98 N)
4	$P_1$	น้ำหนักกดหลัก 50 90 หรือ 140 kgf
5	P	น้ำหนักกดแท้จริง $P_0 + P_1 = 60$ 100 หรือ 150 kgf (589 981 หรือ 1472 N)
6	---	ความลึกรอยกดที่เกิดจากน้ำหนักกดเบื้องต้น
7	---	ความลึกรอยกดที่เกิดจากน้ำหนักกดแท้จริง
8	e	ความลึกรอยกดถาวรภายใต้ น้ำหนักกดเบื้องต้น หลังนำน้ำหนักกดหลักออก ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.002 mm.
9	xx HRx	ความแข็ง Rockwell สเกล F B และ G = 130 - e

รูปที่ 7.4 แสดงภาพการทดสอบความแข็ง Rockwell ด้วยหัวกดบอล (สเกล B F และ G)





หมายเลข	สัญลักษณ์	ความหมาย
1	...	มุมของกรวยหัวกดเพชร 120 องศา
2	...	รัศมีส่วน โค้งปลายตัดของกรวย 0.002 mm.
3	$P_0$	น้ำหนักกดเบื้องต้น 10 kgf (98 N)
4	$P_1$	น้ำหนักกดหลัก 50 90 หรือ 140 kgf
5	$P$	น้ำหนักกดแท้จริง $P_0 + P_1 = 60$ 100 หรือ 150 kgf (589 981 หรือ 1472 N)
6	---	ความลึกรอยกดที่เกิดจากน้ำหนักกดเบื้องต้น
7	---	ความลึกรอยกดที่เกิดจากน้ำหนักกดแท้จริง
8	$e$	ความลึกรอยกดถาวรภายใต้ น้ำหนักกดเบื้องต้น หลัง นำ น้ำหนักกดหลักออก ซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.002 mm.
9	xx HRx	ความแข็ง Rockwell สเตล A C และ D = $100 - e$

รูปที่ 7.5 แสดงภาพการทดสอบความแข็ง Rockwell ด้วยหัวกดบอล (สเตล A C และ D)

ในการทดสอบความแข็ง Rockwell ค่าความแข็งที่ได้สามารถมีได้หลายค่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดหัวกดและน้ำหนักกดที่ใช้ นอกจากนี้หน้าปัดเครื่องยังมีสองชุดคือสีแดงกับสีดำ ซึ่งรวมกันแล้วทำให้การทดสอบแบบ Rockwell มีหน่วยต่างกันประมาณ 30 หน่วย บนหน้าปัดจะออกแบบเป็นสเกล B และ C โดยสองสเกลนี้เป็นสเกลชุดแรกที่ผ่านรับรองมาตรฐานและนิยมใช้มากที่สุด ส่วนหน้าปัดสีแดงใช้อ่านค่าความแข็งสำหรับสเกลที่ใช้หัวกดเป็นหัวบอล และหน้าปัดสีดำใช้อ่านค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบด้วยหัวกดเพชร

สเกล Rockwell อยู่ในรูปของเศษส่วน 100 และแต่ละส่วนหรือแต่ละค่าความแข็งมีค่าความลึกรอยกดเท่ากับ 0.002 mm ดังรูปที่ 4 ถ้าอ่านค่าความแข็งได้เป็น 53 HR<sub>B</sub> กับ 56 HR<sub>B</sub> หมายถึงทั้งสองมีรอยกดต่างกันเท่ากับ 3 x 0.002 mm นั่นคือ 0.006 mm แต่เนื่องจากสเกลเป็นแบบกลับส่วน ดังนั้นวัสดุที่อ่านค่าความแข็งได้สูงกว่าจึงเป็นวัสดุที่แข็งกว่า

สเกล B ใช้ในการทดสอบวัสดุความแข็งปานกลางในช่วง 0 – 100 HR<sub>B</sub> ถ้าใช้หัวกดบอลวัดค่าความแข็งของวัสดุเกิน 100 HR<sub>B</sub> อาจทำให้หัวบอลเกิดการยุบตัวทำให้ได้ค่าความแข็งที่คลาดเคลื่อนได้ ส่วนสเกล C มักใช้ทดสอบกับวัสดุที่มีความแข็งมากกว่า 100 HR<sub>B</sub> ซึ่งปกติแล้วเหล็กกล้าจะมีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 70 HR<sub>C</sub> และการวัดความแข็งด้วยสเกล C จะอยู่ที่ประมาณ 20 HR<sub>C</sub> ขึ้นไป เนื่องจากการทดสอบความแข็งต่ำกว่า 20 HR<sub>C</sub> ได้รอยกดที่เล็กมากทำให้ค่าความแข็งที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ ในการทดสอบให้เลือกใช้สเกลที่ใช้หัวกดบอลที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้เพราะความว่องไวในการตรวจวัดจะลดลงตามขนาดรอยกดที่เพิ่มขึ้น

หินทดสอบควรมีลักษณะแบนเรียบและปราศจากสนิม ออกไซด์ รู และควรเป็นวัสดุที่ไม่ผ่านการขึ้นรูปทั้งด้านบนและล่าง ส่วนความหนาของหินทดสอบควรจะหนาพอที่จะไม่เกิดการบิดงอหรือเกิดการเสียรูปของแท่นรองหินทดสอบภายใต้การทดสอบ เนื่องจากการเสียรูปดังกล่าวอาจทำให้การวัดค่าความแข็งคลาดเคลื่อนได้ ในการทดสอบควรวัดกับวัสดุความหนาเดียวเสมอ และเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากสิ่งเจือปน รูอากาศเล็กๆ และความบกพร่องที่ผิวอื่นๆ ควรทำการทดสอบอย่างน้อยสามจุดแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

การทดสอบสามารถแปลงค่าความแข็ง Rockwell เป็น Brinell ได้ โดยความแข็ง Rockwell C ในช่วง -20 ถึง 40 สามารถแปลงเป็นค่าความแข็ง Brinell ได้ดังสมการ

$$\text{BHN} = \frac{1.42 \times 10^6}{(100 - \text{HR}_C)^2}$$

สำหรับค่าความแข็ง  $\text{HR}_C$  มากกว่า 40 ให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$\text{BHN} = \frac{2.5 \times 10^4}{100 - \text{HR}_C}$$

สำหรับค่าความแข็ง  $\text{HR}_B$  ในช่วง 35 ถึง 100 ให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$\text{BHN} = \frac{7.3 \times 10^3}{130 - \text{HR}_B}$$

ตัวอย่างที่ 7.2

จงแปลงค่าความแข็ง Rockwell 60  $\text{HR}_C$  เป็นค่าความแข็ง Brinell, BHN

$$\begin{aligned} \text{BHN} &= \frac{2.5 \times 10^4}{100 - \text{HR}_C} \\ &= \frac{2.5 \times 10^4}{100 - 60} = 625 \end{aligned}$$

### 3.3 การทดสอบแบบ Rockwell superficial

บางการทดสอบเจาะจงการทดสอบความแข็งเป็นแบบ Rockwell superficial โดยการทดสอบนี้เป็นการทดสอบความแข็งที่บริเวณพื้นผิวซึ่งจะเกิดเป็นรอยกดตื้นๆ การทดสอบแบบนี้จะมีหลักการทำงานแบบเดียวกันกับแบบ Rockwell เพียงแต่ใช้น้ำหนักกดเบื้องต้นและน้ำหนักกดแท้จริงน้อยกว่า กล่าวคือใช้น้ำหนักกดเบื้องต้น 3 kg และน้ำหนักกดแท้จริง 15 30 หรือ 45 kg โดยแต่ละค่าความแข็งที่วัดได้ความลึกเท่ากับ 0.001 mm และใช้หัวกดชุดเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบ Rockwell

ในการทดสอบความแข็งแบบนี้จะใช้สเกล N และ T ส่วนสเกล W X และ Y จะใช้กับวัสดุที่อ่อนมากๆ ได้แก่ 15T 30T 45T หรือ 15N 30N และ 45N ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหัวกดและน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ กล่าวคือสเกล T จะใช้น้ำหนักตามตัวเลขในสเกลกับหัวกดบอลขนาด 1/16 นิ้ว ในขณะที่สเกล N จะใช้น้ำหนักตามตัวเลขในสเกลเช่นกันแต่จะใช้หัวกดเป็นหัวกดเพชรรูปกรวย

การทดสอบแบบ Rockwell มีข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดในการทดสอบเช่นเดียวกันกับการทดสอบ Brinell กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell ผลที่ได้ค่อนข้างถูกต้องและแม่นยำ รวมทั้งการทดสอบทำได้รวดเร็วและได้ค่าความแข็งทันทีหลังการทดสอบโดยอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าปัดเครื่อง โดยไม่ต้องทำการคำนวณใดๆ การทดสอบ Rockwell นี้เป็นการทดสอบความแข็งที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปเช่นเดียวกับ Brinell กล่าวคือการทดสอบแบบนี้ผลการทดสอบที่ได้จากวัสดุเดียวกันสามารถให้ค่าซ้ำๆ กันแม้ว่าจะทดสอบด้วยผู้ใดก็ตาม และการทดสอบแบบนี้สามารถทำการทดสอบความแข็งกับวัสดุได้อย่างกว้างขวาง

ข้อเสียของการทดสอบ Rockwell เป็นแบบเดียวกันกับการทดสอบ Brinell คือเครื่องทดสอบราคาค่อนข้างสูงจึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม รวมทั้งเป็นการทดสอบแบบทำลาย

### 3.4 การทดสอบแบบ Vickers

การทดสอบความแข็ง Vickers เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีมุมของปลายแหลม  $136^\circ$  ดังรูปที่ 7.6 และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัม โดยจะเพิ่มครั้งละ 5 กิโลกรัม การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Brinell คือค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด และจากรูปที่ 7.6 สามารถหาค่าพื้นที่รอยกดได้ดังสมการ

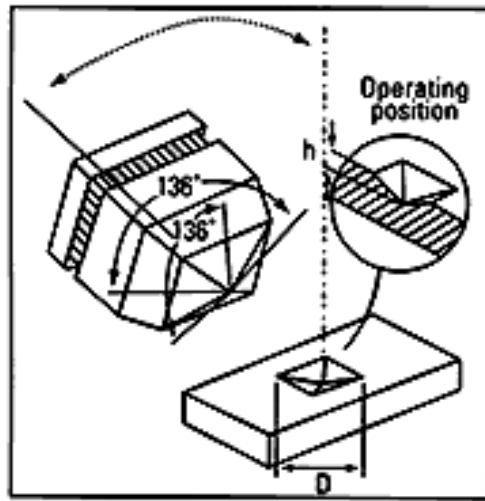
$$\text{พื้นที่รอยกด} = \frac{d^2}{2 \sin(136^\circ / 2)} \quad \text{ซึ่งจะมีค่าโดยประมาณ} = \frac{d^2}{1.8544}$$

ดังนั้นค่าความแข็ง Vickers หัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส DPH (Vickers Diamond Pyramid Hardness) หรือ HV (Vickers Hardness) จะมีค่าดังสมการ

$$\text{จากความแข็ง Vickers} = \frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่รอยกด}}$$

$$\text{จะได้} \quad \text{DPH} = \frac{1.8544 F}{d^2}$$

เมื่อ DPH คือความแข็ง Vickers ( $\text{kg/mm}^2$ ) F คือน้ำหนักกด (kg) และ d คือความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ย (mm)



รูปที่ 7.6 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง Vickers

ในการทดสอบนำชิ้นทดสอบวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นยกแท่นวางขึ้นจนชิ้นงานเข้าใกล้หัวกด จากนั้นให้ปลดลิ้อระบบคานน้ำหนักจะถูกส่งไปยังหัวกดในอัตรา 20:1 อย่างต่อเนื่อง จากนั้นน้ำหนักกดออก ลดระดับแท่นวางลง นำชิ้นงานไปส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อทำการวัดเส้นทแยงมุมของรูปรอยกดสี่เหลี่ยมที่ปรากฏ

การทดสอบความแข็งแบบ Vickers ขั้นต้นจะใช้ในงานวิจัย ข้อดีของการทดสอบนี้คือการวัดขนาดของเส้นทแยงมุมจะมีความแม่นยำกว่าการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และสามารถทดสอบกับชิ้นงานที่บางได้ คือหนาประมาณ 0.006 นิ้ว นอกจากนั้นยังให้ค่าความแข็งที่ถูกต้องเมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งมากประมาณ 1300 HV หรือประมาณ 850 BHN เนื่องจากหัวกดไม่เกิดการยุบตัวขณะทดสอบ และค่าความแข็งที่ได้เป็นที่ยอมรับมากกว่า

ข้อเสียคือเป็นการทดสอบแบบทำลาย ขั้นตอนการทดสอบใช้เวลามากกว่าการทดสอบแบบ Brinell และ Rockwell ชิ้นทดสอบต้องทำการขัดเงาซึ่งใช้เวลามาก นอกจากนั้นเครื่องทดสอบมีราคาแพง

ตัวอย่าง 7.3 หาค่าความแข็ง Vicker ของชิ้นทดสอบที่มีเส้นทแยงมุมของรอยกดเฉลี่ย 0.75 mm จากน้ำหนักกด 100 kg

$$DPH = \frac{1.8544 \times 100 \text{ kg}}{(0.75 \text{ mm})^2} = 330 \text{ kg/mm}^2$$

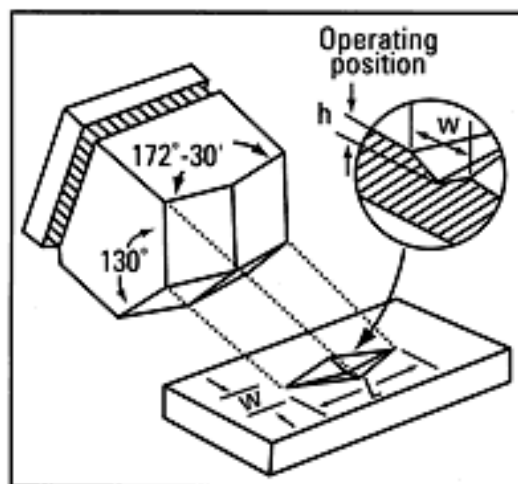
### 3.5 การทดสอบความแข็งแบบ Knoop

การทดสอบความแข็งแบบ Knoop เป็นการวัดความต้านทานของพื้นที่วัสดุต่อการเกิดรอยกดหรือต่อการเสียดรูปถาวรที่พื้นผิวของวัสดุแบบเดียวกันกับการทดสอบความแข็ง Vickers ต่างกันที่หัวกดแบบ Knoop จะเป็นหัวกดเพชรปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยมีเส้นทแยงมุมด้านยาวกับด้านสั้นต่างกันเป็นอัตราส่วน 7 : 1 ดังรูปที่ 7.7 และใช้น้ำหนักกดในช่วง 25-3600 กรัม การทดสอบความแข็ง Knoop ใช้ประโยชน์ในการทดสอบความแข็งกับชิ้นงานขนาดเล็กหรือทดสอบในบริเวณพื้นที่เล็กๆ บนชิ้นทดสอบ โดยมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 60-1000

ในการทดสอบให้นำชิ้นทดสอบวางบนแท่นทดสอบ จากนั้นปรับให้ได้ระยะโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์ แล้วเลื่อนแท่นทดสอบเพื่อหาตำแหน่งที่จะทดสอบบนชิ้นงาน จากนั้นปล่อยน้ำหนักกดแบบเดียวกับเครื่อง Vickers เสร็จแล้วทำการวัดระยะเส้นทแยงมุมของรอยกดด้านยาวนำไปคำนวณหาความแข็งดังสมการ

$$KHN = \frac{1.43 \times P}{L^2}$$

เมื่อ KHN คือค่าความแข็ง Knoop ( $\text{kg/mm}^2$ ) P คือน้ำหนักกด (kg) และ L คือความยาวเส้นทแยงมุมด้านยาวของรอยกด (mm)



รูปที่ 7.7 แสดงลักษณะหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง knoop

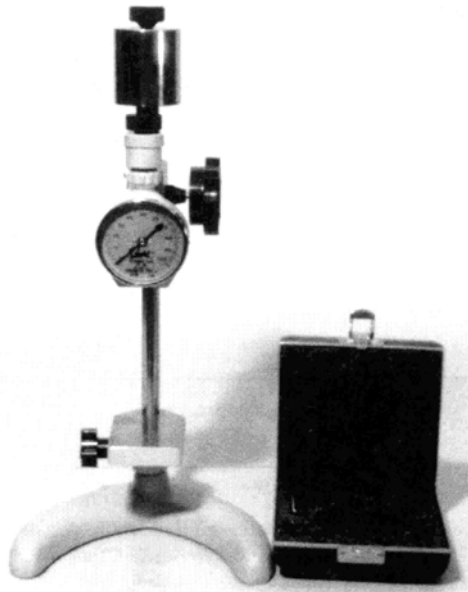
ตัวอย่าง 7.4 จงหาค่าความแข็ง KHN ของวัสดุที่ทำการทดสอบด้วยน้ำหนักกด 1000 กรัม และได้เส้นทแยงมุมด้านยาวเท่ากับ 0.123 mm.

$$\text{KHN} = \frac{1.43 \times 100 \text{ kg}}{(0.123)^2} = 95 \text{ kg/mm}^2$$

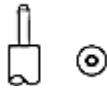

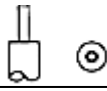




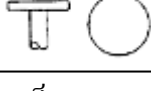
### 3.6 การทดสอบความแข็งแบบ Durometer

Durometer มีหลายชนิด การเลือกใช้ใช้งานขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ โดยหลักการทำงานของเครื่องแต่ละแบบจะเหมือนกัน ต่างกันเฉพาะความคมของปลายแหลมของหัวกดและขนาดของน้ำหนักกดที่ได้จากแรงส่งของสปริงขนาดต่างๆ การวัดค่าความแข็งจะได้จากค่าความลึกของรอยกด โดยค่าความแข็งจะเริ่มจาก 100 ที่ความลึกรอยกดเท่ากับศูนย์ จนถึงค่าความแข็งเท่ากับศูนย์ที่ความลึกรอยกด 0.1 นิ้ว โดยน้ำหนักกดที่กระทำกับหัวกดจะแปรผกผันกับความลึกรอยกด กล่าวคือวัสดุแข็งที่ให้ความลึกรอยกดน้อยให้เลือกใช้ Durometer ที่มีน้ำหนักกดสูงๆ ส่วนวัสดุอ่อนที่ให้ความลึกรอยกดมากให้ใช้ชนิดที่มีน้ำหนักกดต่ำๆ ซึ่งทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 1/4 นิ้ว และในการทดสอบให้เว้นระยะจากขอบซึ่งทดสอบอย่างน้อย 1/2 นิ้ว ผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบด้วย Durometer ชนิดหนึ่งไม่สามารถใช้เปรียบเทียบหรือแปลงค่าไปเป็นค่าความแข็งของ Durometer อีกชนิดหนึ่งได้

Durometer แบบ Shore เป็นเครื่องทดสอบด้วยมือซึ่งออกแบบให้ใช้ในการทดสอบความแข็งกับวัสดุอ่อน เช่น ยาง พลาสติก และวัสดุประกอบต่างๆ (composites) รูปที่ 7.8 แสดงเครื่องทดสอบ Durometer แบบ Shore ซึ่งมีสองชนิดพื้นฐานได้แก่ Shore A กับ D ทั้งสองชนิดนี้มีขั้นตอนการทดสอบเหมือนกัน คือสปริงจะส่งน้ำหนักไปยังหัวกดซึ่งจะกดลงบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ความต้านทานต่อการเกิดรอยกดของพื้นผิวชิ้นทดสอบสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าปัด Durometer โดยแบบ A จะมีสปริงที่ให้น้ำหนักกดระหว่าง 56-822 กรัม ส่วนแบบ D น้ำหนักกดอยู่ในช่วง 0-10 ปอนด์ ทั้งสองแบบนี้อ่านค่าความแข็งได้จาก 0-100 กล่าวคือวัสดุที่อ่านค่าได้สูงแสดงว่ามีความแข็งมากหรือมีความต้านทานต่อการเกิดรอยกดได้สูง ส่วนการแสดงผลหน่วยจะขึ้นอยู่กับชนิดที่ใช้เช่น 50A หรือ A50 เป็นต้น รายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะของหัวกด น้ำหนักกดที่ได้จากสปริง ลักษณะการใช้งานของสเกลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7.2 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2240



รูปที่ 7.8 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore

สเกล	น้ำหนัก จากสปริง	รายละเอียด หัวกด	รูปหัวกด	ประเภทชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดสอบ
A	821 gf 1.81 lbs	กรวยมุม 35° ปลายตัด		ยาง หนังสั้เทียม wax หรือวัสดุ กลุ่ม elastomer ที่อ่อนนุ่ม
B	821 gf 1.81 lbs	กรวยมุม 30° ปลายแหลม		ยางหรือ elastomer ที่มีความ แข็งไม่มากนัก
C	4.5 kgf 10 lbs	กรวยมุม 35° ปลายตัด		ยางหรือพลาสติกที่มีความแข็ง ปานกลาง
D	4.5 kgf 10 lbs	กรวยมุม 30° ปลายแหลม		ยางหรือพลาสติกที่มีความแข็ง มาก
DO	4.5 kgf 10 lbs	ครึ่งทรงกลม ขนาด 3/32"		ลูกกลิ้งการพิมพ์หรือตัวกรอง เส้นใยชนิดหนาแน่น
O	821 gf 1.81 lbs	ครึ่งทรงกลม ขนาด 3/32"		ลูกกลิ้งการพิมพ์หรือตัวกรอง เส้นใยชนิดนุ่ม
OOO	113 gf 4.0 oz	ครึ่งทรงกลม ขนาด 1/2"		ยางหรือวัสดุที่อ่อนนุ่ม เช่น open cell foam
SL	142 gf 50 oz	วงกลม ขนาด Ø 0.5"		โฟมพลาสติก หรือโฟมยาง

ตารางที่ 7.2 รายละเอียดการทดสอบความแข็งแบบ Durometer



### 3.7 การทดสอบความแข็งแบบพลวัต (Dynamic)

เครื่องทดสอบความแข็งแบบพลวัตส่วนใหญ่เป็นการทดสอบรอยกด โดยค่าความแข็งขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานที่ขึ้นทดสอบดูดซับไว้ขณะทดสอบ การทดสอบความแข็งแบบนี้เริ่มแรกโดย Rodman ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้หัวกดพีรามิด ในปี 1861 และในช่วงหลังได้ใช้ก้อนปลายกลม โดยงานที่ได้จากปล่อยก้อนให้กระทบกับชิ้นทดสอบจะแปรผันตรงกับปริมาตรของรอยกดที่เกิดขึ้น กล่าวคือค่าความแข็งเท่ากับค่างานที่จำเป็นในการทำให้เกิดหนึ่งหน่วยปริมาตรของรอยกด กระบวนการทดสอบนี้สามารถใช้ประโยชน์ได้ดีในการทดสอบความแข็งวัสดุที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการทดสอบแบบนี้ก้อนหัวกดใช้เวลาค่อนข้างน้อยในการสัมผัสกับชิ้นทดสอบทำให้ก้อนหัวกดได้รับผลกระทบจากความร้อนไม่มาก

เครื่องทดสอบตีกระทบหลายชนิดที่ใช้หน้าหนักแบบพลวัต เช่นเดียวกับการทดสอบความแข็งแบบพลวัต โดยค่าความแข็งจะคำนวณจากพลังงานสุทธิหารด้วยปริมาตรของรอยกด เครื่องทดสอบความแข็งแบบนี้ที่สำคัญอันหนึ่งคือเครื่อง Pellin ซึ่งจะทดสอบด้วยการปล่อยแท่งหัวกดที่ทราบค่าน้ำหนักแน่นอนและมีปลายแท่งด้านล่างเป็นลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm. นอกจากนั้นยังมีเครื่องทดสอบความแข็งแบบนี้อีกหลายแบบได้แก่ Whitworth autopunch ซึ่งเครื่องทดสอบจะเป็นแบบเดียวกับการทดสอบ Brinell โดยการทดสอบเป็นการปล่อยสปริงซึ่งจะให้พลังงานตามมาตรฐานการหดตัวกับหัวกดรูปบอลที่ติดอยู่ปลายด้านล่างของแท่งหัวกด จากนั้นหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกดไปคำนวณหาค่าความแข็งแบบเดียวกันกับ Brinell

เครื่องทดสอบแบบ Waldo จะใช้หัวกดเหล็กกล้าหนัก 0.1 ปอนด์ แล้วปล่อยลงมาที่ความสูง 12 นิ้ว และค่าความแข็งหาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด ส่วนเครื่อง Duroskop จะวัดความแข็งจากการกระดอนของหัวกดลูกตุ้ม สุดท้ายเครื่องแบบ Avery เป็นการพัฒนาจากการทดสอบการกระทบแบบ Izod ในการหาค่าความแข็งแบบพลวัต

ปัจจุบันการทดสอบแบบพลวัตนี้ เครื่อง Shore scleroscope ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยในการทดสอบจะใช้ scleroscope ซึ่งเป็นแบบเดียวกับการทดสอบการกระดอน กล่าวคือ การทดสอบจะวัดจากความสูงการกระดอนของลูกตุ้มขนาดเล็กที่ถูกปล่อยในกระบอกแก้วที่ความสูง 10 นิ้ว โดยลูกตุ้มมาตรฐานจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว ยาว 3/4 นิ้ว หนัก

### 3.8 การทดสอบความแข็งแบบ Scratch Hardness

การทดสอบความแข็งลักษณะนี้ความแข็งที่ได้จะเป็นค่าความแข็งโดยประมาณ ซึ่งได้จากการวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งในการขีดข่วนอีกวัสดุหนึ่งซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าให้เป็นรอย ดังนั้นความแข็งที่ได้จึงอยู่ในรูปของการเปรียบเทียบความแข็งระหว่างวัสดุต่างๆ การทดสอบความแข็งในลักษณะนี้เป็นที่รู้จักในชื่อของสเกลมอร์ (Mohs' scale) ซึ่งจะใช้แร่ธาตุต่างๆ เป็นเครื่องมือวัดค่าความแข็ง โดยแร่ธาตุแต่ละชนิดจะถูกกำหนดค่าความแข็งต่างๆ กันดังแสดงในตารางที่ 7.3 การหาค่าความแข็งของวัสดุต่างๆ ด้วยสเกลมอร์สามารถทำได้ด้วยการนำวัสดุนั้นมาทำการขีดข่วนด้วยแร่ธาตุต่างๆ ในตารางที่ 7.3 และค่าความแข็งที่ได้จะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของแร่ธาตุในตารางที่ 7.3 ที่วัสดุสามารถขีดข่วนและไม่สามารถขีดข่วนให้เป็นรอย

Mineral	Hardness Number
Talc	1
Gypsum	2
Calcite	3
Fluorite	4
Apatite	5
Feldspar	6
Quartz	7
Topaz	8
Corundum	9
Diamond	10

ตารางที่ 7.3 สเกลความแข็งของมอร์ (Mohs' Scale)

#### ตัวอย่าง 7.5

วัสดุหนึ่งสามารถขีดข่วนควอทซ์ (7) ให้เป็นรอย แต่ไม่สามารถขีดข่วนโทแพซ (8) ให้เป็นรอย ดังนั้นวัสดุนี้มีค่าความแข็งสเกลมอร์เท่ากับ 7.5 เป็นต้น

#### 4. สรุป

ในการทดสอบความแข็งของวัสดุมีกรรมวิธีหลายแบบและเครื่องมือหลายชนิดในการทำการทดสอบ ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงกรรมวิธีต่างๆ ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ การทดสอบแบบ Brinell Rockwell Vickers และ Durometer ซึ่งเหล่านี้ล้วนเป็นการทดสอบวัดความต้านทานการเกิดรอยกดที่พื้นผิวของวัสดุ และการทดสอบแบบขีดข่วนเป็นกระบวนการทดสอบความแข็งเบื้องต้นหนึ่งที่อาศัยหลักการการเกิดรอยขีดข่วนบนวัสดุหนึ่งจากการขีดข่วนของอีกวัสดุหนึ่งที่มีความแข็งมากกว่า ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานหนึ่งของวัสดุที่นำมาใช้เป็นเครื่องมือในการทำความเข้าใจสภาวะและการใช้งานวัสดุ ตารางที่ 7.4 แสดงเปรียบเทียบค่าความแข็งในแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวถึงในบทนี้

HR <sub>c</sub>	HR <sub>B</sub>	BHN 3000 kg	Vickers 10 kg	Knoop 500 g
65	—	700	820	850
60	—	627	765	732
55	120	555	632	630
50	117	495	540	542
45	115	430	455	465
40	112	372	390	402
35	108	340	351	365
30	105	283	286	312
25	103	260	263	284
20	97	222	223	250
15	94	206	207	225
10	90	185	186	200
5	87	167	167	183
—	80	146	146	164
—	75	133	133	150
—	70	121	121	140
—	65	111	111	130
—	60	108	108	120
—	55	100	—	112
—	50	—	—	107

ตารางที่ 7.4 เปรียบเทียบค่าความแข็งจากกรรมวิธีการทดสอบแบบต่างๆ

## 5. คำถามท้ายบท

1. จงคำนวณหาค่าความแข็งของวัสดุที่ผ่านทดสอบความแข็ง Brinell ซึ่งใช้หัวกดบอลขนาด 10 mm. และน้ำหนักกด 3000 kg แล้วกดเป็นรอยกดกว้าง 4 mm.
2. ถ้าใช้น้ำหนักกด 500 kg และหัวกดบอลขนาด 10 mm. ถามว่าวัสดุนี้มีค่าความแข็งที่ BHN ถ้ารอยกดที่เกิดขึ้นมีขนาด 2.5 mm.
3. ถามว่าวัสดุมีความแข็งที่ HV (DPH) ถ้ารอยกดที่ได้มีขนาดเส้นทแยงมุม 0.2 mm. จากกดด้วยหัวกดเพชรรูปปิรามิดที่น้ำหนักกด 10 kg
4. ถ้าใช้น้ำหนักกด 10 kg แล้วทำให้เกิดรอยกดขนาดเส้นทแยงมุม 0.33 mm. ถามว่าวัสดุมีความแข็งที่ DPH
5. จงคำนวณความแข็งนูนฟ HK ของวัสดุที่เกิดเป็นรอยกดขนาดเส้นทแยงมุมด้านยาว 0.05 mm. หลังจากที่ถูกกดด้วยน้ำหนักกด 500 g
6. ถ้ากดด้วยน้ำหนักกด 10 kg แล้วทำให้วัสดุมีรอยกดขนาดเส้นทแยงมุมด้านยาว 0.075 mm. ถามว่าวัสดุมีความแข็งที่ HK
7. ถ้าต้องการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell ซึ่งพิจารณาแล้วว่าควรใช้หัวกดบอลขนาด 1/16 นิ้ว และน้ำหนักกด 100 kg ถามว่าควรเลือกใช้สเกลใดในการทดสอบ