

การประมาณความไม่แน่นอนในการวัดความแข็ง (The estimation of uncertainty in hardness measurements)

วีระชัย ลามอ

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ

คำสำคัญ : ความไม่แน่นอน (Uncertainty) การวัดความแข็ง (Hardness measurement)

ในการวัดความแข็ง มีการใช้วิธีการและเครื่องวัดที่หลากหลาย ซึ่งอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุทดสอบ การวัดความแข็งใช้ได้เมื่อผลการวัดที่ได้จากแต่ละห้องปฏิบัติการอยู่ในช่วงความไม่แน่นอนที่ประมาณแนวทางต่อไปนี้แสดงการประมาณความไม่แน่นอนในการวัดความแข็งที่ใช้กันทั่วไป

การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Test) วิธีทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์กระทำโดยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปกรวยหรือหัวกดบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่แรงทดสอบต้น เมื่อถึงภาวะคงที่ กำหนดให้เป็นตำแหน่งศูนย์ หลังจากนั้น ให้แรงทดสอบเพิ่ม เมื่อถึงภาวะคงที่อีกครั้ง นำแรงทดสอบเพิ่มออก แต่ยังคงแรงทดสอบต้นไว้ ความลึกของรอยกดถาวรที่เกิดขึ้น ใช้คำนวณเป็นค่าความแข็งร็อคเวลล์ ความแข็งร็อคเวลล์ = $N - \frac{h}{S}$ โดยที่ N คือ จำนวน (จำเพาะกับแต่ละสเกล), h คือ ความลึกของรอยกดถาวร, s คือ หน่วยสเกล (จำเพาะกับแต่ละสเกล)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) วิธีทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์กระทำโดยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดบอลเหล็กกล้าชุบแข็งที่แรงทดสอบ ปกติคงแรงทดสอบไว้ 10 – 15 วินาที หลังจากนั้น นำแรงทดสอบออก วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เหลืออยู่บนวัสดุทดสอบ ค่าความแข็งบริเนลล์คำนวณได้จากผลหารของแรงทดสอบด้วยพื้นที่ตามผิวโค้งของรอยกด ความแข็งบริเนลล์ = $0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ โดยที่ F คือ แรงทดสอบ, D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดบอล, และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยกด

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) วิธีทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์กระทำโดยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่มีมุม 136 องศา ระหว่างผิวหน้าตรงกันข้ามที่แรงทดสอบ ปกติคงแรงทดสอบไว้ 10 – 15 วินาที หลังจากนั้น นำแรงทดสอบออก วัดเส้นทแยงของรอยกดที่เหลือบนวัสดุทดสอบ ค่าความแข็งวิกเกอร์คำนวณได้จากผลหารของแรงทดสอบต่อพื้นที่ผิวเฉียงของรอยกด ความแข็งวิกเกอร์ = $0.102 \times \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2}$ โดยที่ F คือ แรงทดสอบ และ d คือ เส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด

กระบวนการประมาณความไม่แน่นอนในการวัดความแข็ง

1. บ่งชี้พารามิเตอร์ความไม่แน่นอนที่ประเมิน ในการวัดความแข็ง การวัดและปริมาณที่วัดแสดงได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวัดและปริมาณที่วัดในการวัดความแข็ง

การวัด	หน่วย	สัญลักษณ์
ความลึกของรอยกดถาวรภายใต้แรงทดสอบ	0.002 mm (สเกล regular)	h
ดิน หลังจากนำแรงทดสอบเพิ่มออก	0.001 mm (สเกล superficial)	
เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด	mm	$d_{1(HB)}, d_{2(HB)}$
เส้นทแยงมุมของรอยกด	mm	$d_{1(HV)}, d_{2(HV)}$
ปริมาณที่วัด	หน่วยและสัญลักษณ์	
ความแข็งรอกเวลล์	HR (สเกล)	
ความแข็งบริเนลล์	HBW	
ความแข็งวิกเกอร์	HV	

2. บ่งชี้แหล่งความไม่แน่นอนในการวัด ในขั้นตอนที่สอง ทำการบ่งชี้แหล่งของความไม่แน่นอนที่เป็นไปได้ที่มีผลกระทบต่อ การวัดความแข็ง

ตารางที่ 2 แหล่งความไม่แน่นอนและผลต่อความไม่แน่นอนของปริมาณที่วัด (1=มาก, 2=น้อย, 0=ไม่มี)

ความแข็งรอกเวลล์ : แหล่งความไม่แน่นอน	สัญลักษณ์	ประเภท	h
1. วิธีการทดสอบ			
แรงทดสอบต้น	F_o	B	2
แรงทดสอบเพิ่ม	F_1	B	1
ความแตกต่างการวัดความลึกของรอยกดถาวร	h_M	B	1
มุม (HV, HRC, HRD, HRN)	α	B	1
รัศมี (HRA, HRC, HRD, HRN)	R	B	1
เส้นผ่านศูนย์กลาง	D	B	1
ความเร็วการกด	c	B	2
ช่วงระยะเวลาของแรงทดสอบต้น	T_{F_o}	B	1-2
ช่วงระยะเวลาของการให้แรงทดสอบรวม	T_{F_t}	B	1
2. วิธีทดสอบ			
การปรับศูนย์		B	1
การสอบเทียบ		B	1

ต่อ

ระบบการได้มาข้อมูล		B	2
ซอฟต์แวร์		B	2
แท่นรองรับ		B	1
3. สภาวะแวดล้อม			
อุณหภูมิ		B	2
ฝุ่น สิ่งสกปรก จาระบี และสะเก็ด		B	1-2
4. ผู้ปฏิบัติ			
ความรู้และประสบการณ์		B	1-2
5. ซินทดสอบ			
การเตรียม		B	1
รูปร่าง ขนาด และความหนา		B	1-2
ความขนาน		B	1-2
พื้นผิวหน้า		B	1-2
ความแข็งบริเนลล์และความแข็งวิกเกอร์ : แหล่งความไม่แน่นอน	สัญลักษณ์	ประเภท	h
1. วิธีการทดสอบ			
แรงทดสอบ	F	B	1
การวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง/เส้นทแยงมุม	d_M	B	1
มุม (HV)	α	B	2
รัศมี (HBW)	D	B	1-2
ความเร็วการกด	c	B	1-2
ช่วงระยะเวลาของการให้แรงทดสอบรวม	T	B	1-2
2. วิธีทดสอบ			
การปรับศูนย์		B	1
การสอบเทียบ		B	1
ระบบการได้มาข้อมูล		B	2
ซอฟต์แวร์		B	1-2
แท่นรองรับ		B	1-2
3. สภาวะแวดล้อม			
อุณหภูมิ		B	2
ฝุ่น สิ่งสกปรก จาระบี และสะเก็ด		B	1-2
4. ผู้ปฏิบัติ			
ความรู้และประสบการณ์		B	1-2

5. ชั้นทดสอบ			
การเตรียม		B	1
รูปร่าง ขนาด และความหนา		B	1-2
ความขนาน		B	1-2
พื้นผิวหน้า		B	1-2
คุณภาพของรอยกด		B	1

3. แบ่งประเภทความไม่แน่นอนตามประเภท A หรือ B ในขั้นตอนที่สาม แบ่งประเภทแหล่งความไม่แน่นอนเป็นประเภท A หรือ B ขึ้นอยู่กับวิธีประมาณอิทธิพลของแหล่งความไม่แน่นอน ถ้าประเมินความไม่แน่นอนจากค่าเฉลี่ยเลขคณิต (จำนวนการทำซ้ำ) แบ่งประเภทได้เป็นประเภท A : $u_A(\bar{x}) = \frac{u(x)}{\sqrt{n}}$ โดยที่

s หรือ $u(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ ซึ่งเรียกว่าความไม่แน่นอนมาตรฐานการทดลอง จำนวนการทำซ้ำควรมากพอที่สามารถเชื่อมั่นในค่าเฉลี่ยเลขคณิตที่ประมาณได้ ($n > 30$) ในการวัดความแข็ง ความไม่แน่นอนมาตรฐานที่คำนวณจากการทำซ้ำ 30 ครั้ง ดีกว่าที่คำนวณจากการทำซ้ำ 5 ครั้ง อย่างไรก็ตาม การทำซ้ำจำนวนหลายครั้งอาจมีค่าใช้จ่ายสูงหรือเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงต้องใช้แฟกเตอร์แก้ไข $\frac{1}{\sqrt{n}}$ สำหรับความไม่แน่นอนมาตรฐานการทดลอง

นอกจากนั้น หากประเมินความไม่แน่นอนโดยวิธีการอื่น แบ่งประเภทได้เป็นประเภท B ความไม่แน่นอนประเภท B สามารถรวบรวมได้จากแหล่งต่าง ๆ เช่น ใบบรรองการสอบเทียบ ข้อมูลผู้ผลิต หรือการประมาณของผู้เชี่ยวชาญ และอื่น ๆ ในการประมาณความไม่แน่นอน ให้พิจารณาแหล่งความไม่แน่นอนว่าเหมาะสมกับรูปแบบการกระจายความน่าจะเป็นใด : การกระจายแบบสี่เหลี่ยม ใช้กับความคลาดเคลื่อนข้อมูลผู้ผลิต ค่าอ้างอิงจากหนังสือ และอื่น ๆ นอกจากนั้น ยังใช้สำหรับกรณีไม่รูปร่างว่าเป็นรูปแบบการกระจายความน่าจะเป็นใด ความไม่แน่นอนมาตรฐาน คือ $u_R = \frac{a}{\sqrt{3}}$, การกระจายแบบสามเหลี่ยม ใช้ในกรณีที่ทราบค่าของผลต่อความไม่แน่นอนมีแนวโน้มอยู่ใกล้กับตรงกลางของช่วงการกระจาย ความไม่แน่นอนมาตรฐาน คือ $u_T = \frac{a}{\sqrt{6}}$ การกระจายแบบสี่เหลี่ยมสามารถใช้แทนได้ แต่ความไม่แน่นอนที่ประมาณได้จะมีค่าสูง, และการกระจายแบบยู ใช้ในกรณีที่ค่าของปริมาณที่วัดอยู่ที่หรือใกล้กับขอบเขตการกระจาย ความไม่แน่นอนมาตรฐาน คือ $u_V = \frac{a}{\sqrt{2}}$

4. ประมาณความไม่แน่นอนมาตรฐานสำหรับแต่ละแหล่งความไม่แน่นอน ในขั้นตอนนี้ ประมาณความไม่แน่นอนมาตรฐาน u สำหรับแหล่งหลักแต่ละแหล่งของความไม่แน่นอน ความไม่แน่นอนมาตรฐาน

กำหนดเป็นหนึ่งความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้มาจากความไม่แน่นอนปริมาณนำเข้าหารด้วยพารามิเตอร์ d_v ซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายความน่าจะเป็นที่สันนิษฐาน นอกจากนั้น ในหลายกรณีปริมาณนำเข้าอาจไม่มีหน่วยเดียวกันกับปริมาณผลลัพธ์ สัมประสิทธิ์ความไว c ที่เกี่ยวข้องจึงเป็นที่ต้องการทราบ ปกติประมาณได้จากการทำอนุพันธ์บางส่วนฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลลัพธ์และปริมาณนำเข้า

5. คำนวณความไม่แน่นอนรวม u_c ความไม่แน่นอนรวมสามารถคำนวณโดยผลรวมกำลังสอง :

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2}$$
 โดยที่ c_i คือ สัมประสิทธิ์ความไวที่เกี่ยวข้องกับ x_i ความไม่แน่นอนรวมที่ได้มีระดับความเชื่อมั่น 68.27%

ความแข็งรอกเวลล์ (HR) ความไม่แน่นอนรวม : $u_R = \sqrt{u_E^2 + u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + u_{ms}^2}$ โดยที่ u_E คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความผิดพลาดที่ยอมให้สูงสุด (1σ), u_{CRM} คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานของ CRM, $u_H = \left(\frac{t \cdot s_H}{\sqrt{n}}\right)$ คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานของเครื่องวัดความแข็งเมื่อทำการวัด CRM, $u_x = \left(\frac{t \cdot s_x}{\sqrt{n}}\right)$ คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานจากวัดความแข็งวัสดุทดสอบ, และ u_{ms} คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานจากความละเอียดของระบบการวัด

ความแข็งบริเนลล์ (HBW) :
$$B = \frac{0.204F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

สัมประสิทธิ์ความไว : $c_F = \frac{\partial B}{\partial F} = \frac{0.204}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$, $c_D = \frac{\partial B}{\partial D} = \frac{0.204F \left(\frac{D^2}{\sqrt{D^2 - d^2}} + \sqrt{D^2 - d^2} - 2D \right)}{\pi D^2 (D - \sqrt{D^2 - d^2})^2}$,

และ $c_d = \frac{\partial B}{\partial d} = \frac{-0.204Fd}{\pi D \sqrt{D^2 - d^2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})^2}$

ความไม่แน่นอนรวม : $u^2(B) = \left(\frac{\partial B}{\partial F}\right)^2 u^2(F) + \left(\frac{\partial B}{\partial D}\right)^2 u^2(D) + \left(\frac{\partial B}{\partial d}\right)^2 u^2(d)$

ความแข็งวิกเกอร์ (HV) :
$$V = \frac{0.204F \sin(\alpha/2)}{d^2}$$

สัมประสิทธิ์ความไว : $c_F = \frac{\partial V}{\partial F} = \frac{0.204 \sin(\alpha/2)}{d^2}$, $c_d = \frac{\partial V}{\partial d} = 0.204F \sin(\alpha/2) \times -2d^{-3}$, และ

$c_\alpha = \frac{\partial V}{\partial \alpha} = \frac{0.204F \cos(\alpha/2) \times (1/2)}{d^2}$

$$\text{ความไม่แน่นอนรวม} : u^2(V) = \left(\frac{\partial V}{\partial F}\right)^2 u^2(F) + \left(\frac{\partial V}{\partial d}\right)^2 u^2(d) + \left(\frac{\partial V}{\partial \alpha}\right)^2 u^2(\alpha)$$

6. คำนวณความไม่แน่นอนขยาย U ความไม่แน่นอนขยายเป็นช่วงผลการวัดที่คาดหมายว่าส่วนการกระจายของค่าอยู่ในช่วงนั้น หาได้โดยการคูณความไม่แน่นอนรวม u_c ด้วยตัวประกอบครอบคลุม k ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ สำหรับการกระจายแบบปกติ ตัวประกอบครอบคลุมมีค่าเท่ากับ 2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 94.5% แต่ทว่า ในกรณีที่การกระจายความน่าจะเป็นไม่ปกติ (หรือจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประเภท A น้อย) ตัวประกอบครอบคลุมควรคำนวณจากองศาอิสระโดยวิธี Welch-

$$\text{Satterthwaite} : v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{v_i}}$$

7. รายงานผล เมื่อได้ความไม่แน่นอนขยายแล้ว ควรรายงานผลการทดสอบในรูปแบบต่อไปนี้ $\bar{X} = \bar{x} \pm U$ โดยที่ \bar{X} คือ ค่าที่ประมาณของปริมาณที่วัด, \bar{x} คือ ค่ากลางของผลการทดสอบ, และ U คือ ความไม่แน่นอนขยายที่เกี่ยวข้องกับ \bar{x}

เอกสารอ้างอิง

- Adams, T. M. A2LA Guide for the estimation of measurement uncertainty in testing. 2002. p.18.
- European association of national metrology institutes. Guidelines on the estimation of uncertainty in hardness measurements. EUROMAT/cg-16/v.01 (previously EA-10/16). 2007. p.7-9.
- European federation of national associations of measurement, testing and analytical laboratories. Measurement uncertainty revisited : alternative approaches to uncertainty evaluation. Technical report no. 1/2007. 2007. p.47-50.
- Ferrero, C. Brinell and vickers uncertainty estimation [online]. 2002. [viewed 10 september 2018]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/323019367>.
- Gabauer, W. The estimation of uncertainties in hardness measurements. Standards measurement & testing project no. SMT4-CT97-2165. 2000. p.2-7.

กองวัสดุวิศวกรรม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

โทร 0 2201 7358

E-mail : werachai@dss.go.th

ตุลาคม 2561