เอกสารปฏิบัติการประกอบรายวิชา
02206381 ปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ I

การทดสอบความแข็ง
(Hardness Testing)

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รายวิชา 02206381 ปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ I

ปฏิบัติการทดลองที่ 1-2 **การทดสอบความแข็ง**

(Hardness Testing)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทดสอบความแข็งของโลหะเมื่อได้รับแรงกดจากหัวกดที่มีมาตรฐานที่แตกต่างกัน เช่น Rockwell, Brinell และ Vicker เป็นต้น
2. เพื่อเปรียบเทียบเทียบค่าความแข็งของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่แตกต่างกัน
3. เพื่อสามารถบอกปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งของโลหะได้
4. เพื่อให้สามารถนำค่าความแข็งที่ได้นำมาวิเคราะห์ รวมถึงทั้งสรุปผลที่ได้จากการทดลองมาเลือกใช้วัสดุสำหรับประเภทงานต่างๆทางวิศวกรรมได้อย่างเหมาะสม

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1. ความหมายและประโยชน์ของความแข็ง

ความแข็ง หมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านการเปลี่ยนแปลง รูปร่าง จากการถูกกระทำโดยวัสดุอื่นที่มีความแข็งกว่า โดยวิธีการกด, การกระแทก หรือขีดข่วน หมายเหตุ การกระทำดังกล่าวไม่รวมถึงการกระทำโดยวิธีทางความร้อน, ความเย็น, เคมี, ทางไฟฟ้า ฯลฯ

จากที่ทราบมาแล้วว่าการทดสอบความแข็งนั้นมีหลายวิธีแต่ละวิธีนั้นมีจุดประสงค์ของการทดสอบที่แตกต่างกันดังนั้นความหมายคำจำกัดความของความแข็งจึงให้ไว้หลายอย่างดังนี้

1) ความต้านทานต่อการตัดหรือเจาะ (Resistance to cutting or drillting)

2) ความต้านทานต่อการเสียดสี (Resistance to abasior)

3) ความต้านทานต่อการขีดข่วน (Resistance to scratching)

4) การสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทก (Energy absorbtion under impactloads)

5) ความต้านทานต่อการกดทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Resistance to permamentindentation)

สำหรับการทดสอบความแข็งนั้น ถูกนำไปใช้หลายๆสาขา และนิยมทดสอบกับวัสดุที่เป็นโลหะมากกว่าวัสดุอื่นเพราะผลของการทดสอบความแข็งนั้นมีประโยชน์ ดังนี้

1) ใช้ความแข็งเป็นมาตรฐานในการแบ่งเกรดของวัสดุที่มีความคล้ายคลึงกันซึ่งบางครั้งการใช้วัสดุต้องกำหนดความแข็งไว้เป็นค่าเฉพาะด้วยและค่าของความแข็งนั้นไม่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบคำนวณ หรือวิเคราะห์โดยตรงเหมือนค่าความแข็งดึงสูงสุดของวัสดุ

2) ใช้ความแข็งเป็นมาตรฐานในกรดตรวจสอบ หรือควบคุมวัสดุและชิ้นงานที่ผ่านขบวนการผลิต เช่น การอบชุบการทำผิวแข็ง การเปลี่ยนส่วนผสม

3) ใช้ความแข็งเป็นการกำหนดค่าแรงดึงสูงสุดโดยประมาณได้อย่างรวดเร็วเพราะค่าความแข็งแบบบริเนลล์ มีความสัมพันธ์กับค่าแรงดึงสูงสุดของวัสดุดังนี้

U.T.S	=	0.35 HB (เหล็กกล้ารีด)
U.T.S	=	0.21 HB (เหล็กกล้า)
U.T.S	=	0.22 HB (เหล็กกล้าผสมคาร์บอนปานกลาง
U.T.S	=	0.23 HB (เหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำ)
U.T.S	=	HB/4 - 1 HB (โลหะ duralumin)
U.T.S	=	ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด
HB	=	ค่าความแข็งแบบบริเนลล์

1.2 วิธีการทดสอบความแข็ง

1.2.1 ความสามารถในการนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักร

เป็นการทดสอบความแข็ง โดยการพิจารณาจากความยากง่ายของการนำไปตัด หรือเจาะด้วยเครื่องจักรซึ่งเป็นวิธีที่ต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติและเครื่องจักรแล้วสรุปว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่าไรแต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งเป็นตัวเลขได้ จึงไม่เป็นวิธีที่ทดสอบความแข็งที่มาตรฐานการทดสอบ

1.2.2 การทดสอบโดยการเสียดสี

เป็นการทดสอบโดยการเสียดสี ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งโดยการพิจารณาจากการสึกหรอของผิววัสดุเมื่อใช้งานที่ต้องเสียดสีกันถ้าวัสดุใดอ่อนกว่ากันก็จะถูกเสียดสี ทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่าการทดสอบโดยการเสียดสีนี้ อาจใช้ตะไบทดสอบ (File test) ได้ คือการตะไบผิวงานทดสอบ ถ้าผิวงานนั้นแข็งก็จะตะไบได้ลึกน้อยกว่า ผิวงานสึกหรอน้อย แต่ถ้าผิวงานอ่อนก็จะตะไบได้ลึกกว่าผิวงานสึกหรอมาก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีทดสอบที่ง่ายสะดวกรวดเร็วแต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งของผิวงานทดสอบได้และผลการทดสอบก็ไม่แน่นอนซึ่งต้องขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ทดสอบด้วย การทดโดยการเสียดสีนี้สามารถระบุได้เพียงว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่านั้นจึงไม่เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่มาตรฐานเช่นเดียวกัน

ซึ่งมีหลักการเดียวกับ Moh's hardness scale แต่แทนที่จะใช้แร่เป็นตัวแทนในการจัดอันดับต่างๆ ซึ่งได้จัดทำเป็นตะไบขึ้นให้มีความแข็งที่อันดับต่างๆ ขึ้นมาแทน ข้อดีของการใช้ File testing อีกข้อหนึ่งคือสามารถจัดทำตะไบที่ความแข็งใดๆ ก็ได้ในหน่วยความแข็งอื่นๆ ที่นิยมใช้กัน เช่น ชุดตะไบที่จัดทำขึ้นนี้ ดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 ชุดตะไบ

ที่มา : สถาบันมาตรวัดวิทยา, 2554

ถูกทำไว้ 6 อันดับความแข็งที่ 65, 60, 55, 50, 45 และ 40 HRC เป็นต้น

1.2.3 การทดสอบโดยการขีดข่วน

การวัดความแข็งแบบ Moh นี้ เป็นการเรียงลำดับ และบอกถึงลำดับของความแข็ง ตามความสามารถในการต้านแรงขูดขีดของแร่ โดยเปรียบเทียบกับความแข็งของแร่ที่ถูกจัดทำไว้เป็นความแข็งอ้างอิง การวัดแบบนี้ถูกคิดค้นโดยนักแร่ชาวเยอรมัน Friedrich Moh ในปี 1812 โดยจัดกลุ่มความแข็ง

มาตรฐานอ้างอิงของแร่ไว้ 10 ชนิด ทำให้หน่วยวัดความแข็งแบบนี้มี 10 อันดับความแข็งด้วยกัน คือ 1 ถึง 10 เรียงจากแข็งน้อยไปแข็งมากกว่า

วิธีการทดสอบความแข็งนี้ได้รับความสนใจ และนิยมใช้ของนักธรณีวิทยาในงานทดสอบความแข็ง ของหินแร่การทดสอบในการขีดข่วนเป็นวิธีการทดสอบที่สะดวกรวดเร็วเพราะอาศัยหลักการที่ว่าวัสดุที่แข็งกว่าจะสามารถขีดข่วนเป็นรอยบนผิววัสดุที่อ่อนกว่าได้ แต่วัสดุที่อ่อนกว่าจะไม่สามารถขีดข่วนเป็นรอยบนผิววัสดุที่แข็งกว่าได้จากหลักการนี้เองที่ทำให้มีสเกลความแข็งของหินแร่ที่นิยมใช้ของนักธรณีวิทยาเรียกว่า" สเกลความแข็งของโมห์" (Moh's scale of hardness)ซึ่งจะได้ค่าความแข็งของหินแร่เป็นตัวเลขลำดับจากแข็งน้อยไปยังแข็งมากที่สุดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สเกลความแข็งของโมห์

Mohs'scale	Extention of Mohs'scale*	Metal equivalent
Reference mineral	Reference mineral	
1. Talc	1. Talc	Stellite
2. Gypsum	2. Gypsum	Tantalum carbide
3. Calcite	3. Calcite	Tungsten carbide
4. Fluorite	4. Fluorite	
5. Apatitc	5. Apatitc	
6. Feldspar(Orthoclase)	6. Orthoclase	
7. Quartz	7. Vitreous pure silica	
8. Topaz	8. Quartz	
9. Sapphire or corundum	9. Topaz	
10. Diamond	10. Garnet	
	11. Fused zirconia	
	12. Fusedalumina	
	13. Silicon carbide	
	14. Borron carbide	
	15. Diamond	

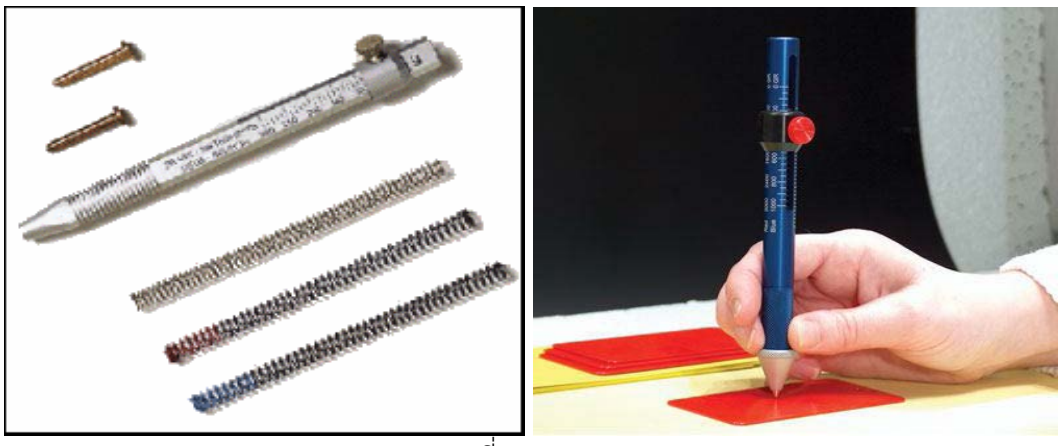
จากตารางที่ 2 จะสังเกตเห็นว่ามีอยู่ 2 สเกล คือ ทางด้านซ้ายจะเป็นสเกลความแข็งโมห์ที่จัดลำดับความแข็งไว้10 หมายเลข และเพชรแข็งที่สุด เป็นหมายเลข 10 ส่วนทางด้านขวาจะเป็นสเกลความแข็งของโมห์ที่ขยายโดยจัดลำดับความแข็งไว้ 15 หมายเลขเพชรแข็งที่สุดเป็นหมายเลข 15 สำหรับการทดสอบโดยการขีดข่วนนี้ ทำได้โดยนำหินแร่หรือวัสดุที่ต้องการทราบค่าตามสเกลความแข็งของโมห์นั้นมาขีดข่วนด้วยหินแร่จากหมายเลขที่มีค่าความแข็งน้อยมาก เช่น การทดสอบค่าความแข็งของแก้วผลปรากฏว่า แก้วจะถูกขีดข่วนเป็นด้วย Feldspar (หมายเลข 6) แต่ Apatite (หมายเลข 5) จะไม่สามารขีดข่วนแก้วเป็นรอยได้ ดังนั้นแก้วจะมีค่าความแข็งเป็น 5.5 ตามสเกลความแข็งของโมห์ จากการทดสอบความแข็งวิธีนี้จะสังเกตเห็นว่าเหมือนกับการจัดลำดับของความแข็ง และให้ผลการทดสอบที่ไม่แน่นอนดังนั้นจึงไม่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม

1) Scratch hardness test or Turner's Sclerometer hardness test

Sclerometer ถูกคิดค้นโดย Turner ในปี ค.ศ.1896 โดยใช้หลักการที่วัสดุที่ถูกวัดความแข็ง จะถูกขีดข่วนด้วยหัวเพชรบนพื้นผิวที่เรียบ ค่าความแข็งจะถูกจัดแบบเรียบลำดับตามน้ำหนักของหัวกดในหน่วยกรัม และเป็นน้ำหนักที่ถูกเพิ่มจนกระทั่งทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนวัสดุที่ถูกทดสอบ ซึ่งจะต้องสังเกตได้โดยตาเปล่า

Sclerometer ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขจุดอ่อนของ Moh's hardness scale ในเรื่องของความไม่ละเอียดของอันดับความแข็ง ซึ่งมีเพียง 10 อันดับ ถึงแม้ปัจจุบันจะถูกพัฒนาให้มีอันดับเพิ่มเติมแล้วก็ตาม

Sclerometer เป็นเครื่องมือวัดความแข็งของแร่ โดยเฉพาะจะเห็นได้จากหน่วยวัดความแข็งของ Moh's hardness scale ถูกเปรียบเทียบกับค่าความแข็งโดย sclerometer เช่น เพชร มีความแข็งอันดับ 10 ตาม scale ของ Moh แต่มีความแข็งเป็น 1500 ตามหน่วยของ Sclerometer

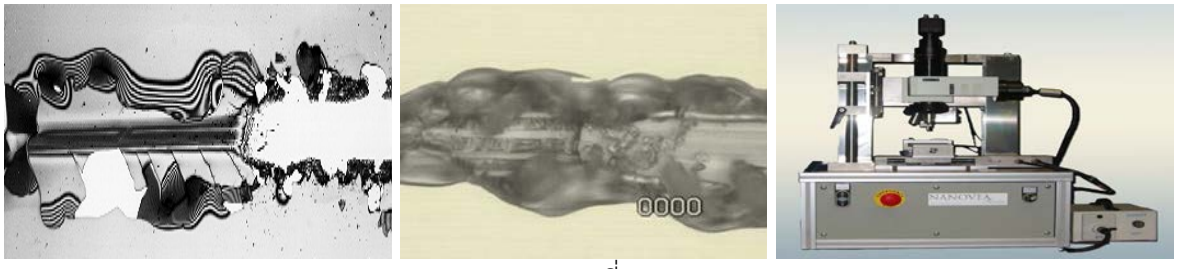


รูปที่ 2

ที่มา : สถาบันมาตรวัดวิทยา, 2554

2) Scratch testing for material

มีความคล้ายคลึงกับ sclerometer มาก เพียงแต่ค่าความแข็งจะถูกวัดแบบเรียงลำพับตามแรงเสียดทาน (Friction force) ที่หัวกดซึ่งทำจากเพชรใช้ขูดขีด นิยมใช้วัดความแข็งของ ceramic งาน coating ที่ความลึกไม่เกิน 20 um ในปัจจุบันนี้มีมาตรฐานของ scratch testing for material อยู่มากมาย เช่น ASTM, G171, ASTM C1624, ISO 20502 และ ISO 1518 เป็นต้น



รูปที่ 3

ที่มา : สถาบันมาตรวัดวิทยา, 2554

1.2.4 การทดสอบโดยการใช้ลูกตุ้มกระทบผิววัสดุแล้วสะท้อนกลับ

เป็นวิธีการทดสอบความแข็งโดยการปล่อยลูกตุ้มให้กระทบวัสดุชิ้นทดสอบแล้วพิจารณาค่าความสูงของการสะท้อนกลับของลูกตุ้มภายหลังกระทบซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีทดที่ใช้แรงเคลื่อนที่ของผิววัสดุ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกวิธีการทดสอบความแข็งแบบนี้ว่า Dynamic hardness test และเป็นวิธีที่นิยมใช้ทดสอบความแข็งของโลหะที่อุณหภูมิสูงเพราะลูกตุ้มจะไม่ได้รับผลกระทบของความร้อน เนื่องจากระยะเวลาที่ตกกระทบและผิวสัมผัสชิ้นทดสอบนั้นน้อยมากหลังจากการทดสอบดังกล่าวนี้เองที่นำไปสร้างอุปกรณ์ทดสอบความแข็งที่นิยมใช้เรียกว่า Shore sclerocope เหตุนี้เองจึงเรียกการทดสอบนี้ว่าการทดสอบความแข็งด้วย Shore scleroscope ซึ่งจะได้กล่าวรายระเอียดต่อไป

1.2.5 การทดสอบโดยการกดให้เกิดรอยบุ๋ม

เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่นิยมใช้มากในงานวิศวกรรมเพราะเป็นวิธีการทดสอบมาตรฐานให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแน่นอนและสามารถระบุค่าความแข็งได้เนื่องจากใช้เครื่องทดสอบที่เป็นมาตรฐานทดสอบสำหรับหลักการของการทดสอบความแข็งโดยใช้วิธี คือกดบนผิววัสดุชิ้นทดสอบทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (permanent indentation) แล้ววัดขนานความโตหรือความลึกของรอยบุ๋ม ถ้าทดสอบกับวัสดุอ่อนก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนานใหญ่ หรือลึกมาก แต่ถ้าทดสอบกับวัสดุแข็งก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนานเล็กหรือลึกน้อย จากหลักการดังกล่าว ได้ถูกนำไปสร้างเครื่องทดสอบความมาตรฐานและวิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐานดังนี้

1) เครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์

ลักษณะเครื่องทดสอบแบบนี้ ส่วนมากจะกดด้วยระบบ ไฮโดรลิค แล้วปั๊มอัดด้วยมือโยก มีลักษณะดังรูปที่ 4

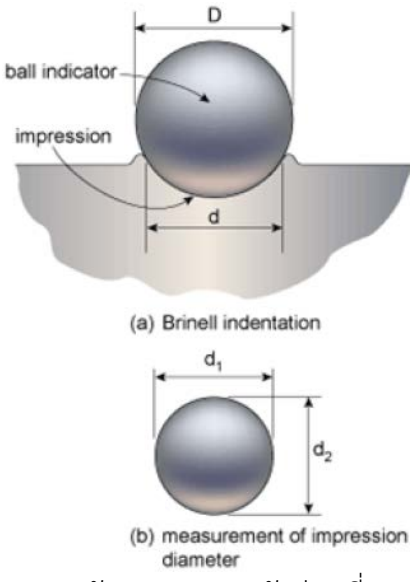
รูปที่ 4 เครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์

ที่มา : www.testinginstrument.com

แต่ลักษณะเครื่องทดสอบความแข็งบริเนลล์ ที่มีอยู่ด้วยกันหลายแบบนั้น อาจต่างกันอยู่บ้างดังนี้คือ

- ส่วนที่เป็นแรงกดทดสอบ อาจเป็นระบบไฮโดรลิค หรือระบบสกรู หรือเฟืองส่งกำลังและระบบคานรับน้ำหนัก
- วิธีการทำงานเป็นระบบมือปั๊มหรือมอเตอร์ปั๊ม
- วิธีวัดแรงกดทดสอบ จะเป็นลูกสูบกับน้ำหนัก เกจวัดความดัน หรือ คานกับน้ำหนัก
- ขนาดความโตของเครื่องทดสอบ

การวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test) ใช้หลักการออกแรงกดผ่านหัวกดรูปทรงกลม (Ball Indenter) ด้วยแรงที่กำหนดไว้ ผลการวัดความแข็งแบบบริเนลล์ได้จากผลหารของแรงกดในหน่วยกิโลกรัม (kgf) ด้วยพื้นที่ผิวที่ถูกกดด้วย Ball Indenter ในหน่วยของตารางมิลลิเมตร ($mm.^2$) ซึ่งถูกวัดทางอ้อมโดยคำนวณจากเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมที่ถูกกดหลังถอนแรงกดออกแล้ว ใช้สัญลักษณ์ HBN หรือ HB หัวกดที่ใช้จะเป็นเหล็กกล้าชุบแข็งทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. และมีความแข็ง 850 HV10-1500 HV10 จะสามารถวัดความแข็งของโลหะที่มีความแข็งไม่เกิน 300-650 HB แรงที่ใช้สามารถเลือกได้จาก 500, 1500 และ 3000 kgf



รูปที่ 5 (a) รอยกด (Impression) จากหัวบอล (b) การวัดค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด

ในการวัดค่าความแข็งหัวบอลจะถูกกดลงบนผิวชิ้นงานเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที หลังจากนำน้ำหนักกดออกแล้วจะทำให้การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด Impression จำนวน 2 ค่าโดยใช้กล้องที่มีกำลังขยายต่ำ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จะถูกนำมาคำนวณค่าความแข็ง จากค่าน้ำหนักกดหารด้วยพื้นที่ผิวของรอยกดที่เกิดขึ้นจากสมการ

$$Bhn = \frac{P}{(\pi D/2)\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$ มีหน่วยเป็น kg/mm^2

เมื่อ P = น้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดทรงกลม (Indenter) ในหน่วยมิลลิเมตร

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดบนผิวชิ้นทดสอบในหน่วยมิลิเมตร

t = ขนาดระยะลึกของรอยกดจากผิวหน้าลงไปในหน่วยมิลิเมตร

2) เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์

ลักษณะของเครื่องทดสอบแบบนี้ จะเป็นระบบคานกับน้ำหนัก ซึ่งเป็นแรงกดทดสอบและมีกลไกต่อออกมา ให้ใช้เท้ากดเวลากดทดสอบความแข็ง เพื่อทำให้เกิดรอยบุ๋มถาวร เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ แสดงดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์

ที่มา : www.tpa.or.th

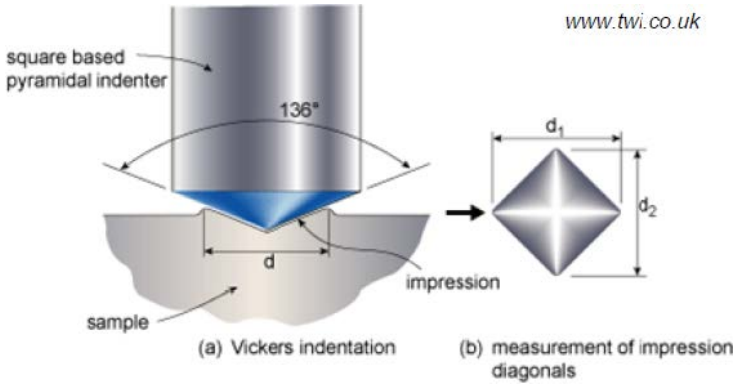
การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test) มีช่วงการวัดที่กว้างที่สุด ครอบคลุมความต้องการในการวัดความแข็งทั้งหมดและสามารถประยุกต์ใช้งานได้กับวัสดุเกือบทุกชนิดได้ด้วย scale เดียว ข้อดีที่เหนือกว่าการวัดแบบ Brinell hardness อีกประการหนึ่ง คือ ผลการวัดค่าความแข็งคงที่ไม่เปลี่ยนไปตามแรงกด ซึ่ง Brinell hardness จะให้ผลการวัดความแข็งเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนแรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางหัวกด (force-diameter ratio) Vickers hardness test มีหลักการคล้ายคลึงกับ Brinell hardness test กล่าวคือ เป็นการวัดค่าความแข็งโดยออกแรงกดไปยังชิ้นงานผ่านหัวกดซึ่งทำจากเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม มุมยอด 136 องศา (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) 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 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสองเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์หาได้จาก

$$HV = \frac{2P\sin(136^\circ / 2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2}$$ มีหน่วยเป็น kg/mm^2

เมื่อ P = น้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม

d = ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสในหน่วยมิลลิเมตร

โดย $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$



รูปที่ 7 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ และการหาขนาดของเส้นทแยงมุมเฉลี่ยจากเส้นทแยงมุมในสองแนวซึ่งทำมุมกัน 90°

3) เครื่องทดสอบความแข็งร็อคเวลล์

Rockwell hardness test ถูกประดิษฐ์คิดค้นขึ้นโดย Stanly P.Rockwell นักโลหะวิทยาชาวอเมริกันในปี ค.ศ. 1919 เมื่อเทียบกับการวัดความแข็งแบบกดวิธีอื่นๆ แล้ว Rockwell Hardness test เป็นการวัดความแข็งที่รวดเร็วมีความถูกต้อง (Accuracy) สูง ต้องการการเตรียมชิ้นงานทดสอบน้อย และขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติการวัดต่ำ โดยหลักการแล้วผู้ประดิษฐ์ต้องการเรียงลำดับความแข็งจากระยะไม่คืนตัวของชิ้นงาน หลังถูกกดด้วยแรงกดผ่านหัวกดที่ถูกกำหนดไว้ โดยมีเงื่อนไขว่า วัสดุที่ให้ระยะไม่คืนตัวหลังถูกกดมากมีความแข็งในหน่วย Rockwell น้อย และวัสดุใดที่ให้ระยะไม่คืนตัวน้อยก็จะถือว่ามีความแข็งมากเป็นอัตราส่วนเชิงเส้นไป

รูปที่ 8 เครื่องทดสอบความแข็งร็อคเวลล์

ที่มา : สถาบันมาตรวัดวิทยา, 2554

การวัดค่าความแข็งแบบร็อกเวลล์จะวัดจากความลึกระยะกดที่ถูกหัวกดกดด้วยแรงคงที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด

ในการปฏิบัติการทางวัสดุศาสตร์นี้เราจะใช้การวัดความแข็งแบบ Rockwell หัวกดที่ใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ

1. Diamond Cone 120° (เพชรทรงกรวย) ใช้กับโลหะแข็ง
2. Steel Ball (เหล็กกล้าทรงกลม) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/16, 1/8, 1/4 หรือ 1/2 นิ้ว ใช้กับโลหะทั่วไป

แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ minor load และ major load คือ

1. Minor load เป็นแรงที่ยึดหัวกดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหัวกดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง
2. Major load เป็นแรงที่มากกว่า minor load และกดลงภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงาน

สำหรับมาตรฐานความแข็งแบบ Rockwell มีอยู่ 15 สเกล (ไม่รวม superficial hardness scale) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major laod, 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 (3.175มม.)	100	เหล็กหล่อ, โลหะผสมของอะลูมิเนียม โลหะผสมของแมกนีเซียม และโลหะสำหรับผลิตแบริ่ง
F	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	60	โลหะผสมของทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน และโลหะแผ่นบางที่ไม่แข็ง
G	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/16 นิ้ว (1.588 มม.)	150	บรอนซ์ผสมฟอสฟอรัส (Phosphor bronze), โลหะผสมทองแดง-เบอริเลียม (beryllium copper), เหล็กหล่ออบเหนียว. โดยความแข็งสูงสุดที่วัดได้จะต้องไม่เกิน 92 HRG เพื่อป้องกันหัวกดเสียหาย
H	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	60	อะลูมิเนียม, สังกะสี และตะกั่ว

ตารางที่ 3 (ต่อ) การวัดความแข็งแบบ Rockwell สเกลต่างๆ

สเกล	ประเภทหัวกด	Major laod, kgf	การใช้งานทั่วไป
K	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/8 นิ้ว (3.175 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตแบริ่ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
L	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตแบริ่ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
M	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตแบริ่ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
P	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/4 นิ้ว (6.350 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตแบริ่ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
R	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	60	โลหะสำหรับผลิตแบริ่ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
S	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	100	โลหะสำหรับผลิตแบริ่ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect
V	ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง 1/2 นิ้ว (12.70 มม.)	150	โลหะสำหรับผลิตแบริ่ง และวัสดุอื่นๆ ที่บางและนิ่ม โดยเลือกใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาดเล็กและใช้แรงกดสูงเพื่อป้องกันผลของ anvil effect

ค่าความแข็งจะแสดงเป็น 2 ส่วน คือ ตัวเลขค่าความแข็งที่วัดได้ และสัญลักษณ์ของสเกลที่ใช้วัด (แสดงถึงลักษณะหัวกดที่ใช้วัดค่า และ major load) ตัวอย่าง เช่น 64.0 HRC หมายความค่า ตัวเลขความแข็งที่อ่านได้เท่ากับ 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

1. ชนิดของวัสดุ โดยทั่วไปผลการทดสอบที่ดีที่สุด ได้จากการใช้แรงกดสูงที่สุดเท่าที่ชิ้นงานทดสอบจะสามารถรับได้ และจากตารางที่ 1 จะบอกได้ว่าวัสดุที่ทดสอบควรใช้สเกลแบบไหน เช่น วัสดุแข็ง เช่น เหล็กกล้า หรือทังสเตนคาร์ไบด์ จะต้องใช้สเกล A, C, D เท่านั้น
2. ความหนาของชิ้นงานทดสอบ ควรมากกว่าความลึกของรอยกดอย่างน้อย 10 เท่า เพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง ซึ่งการวัดความลึกรอยกด แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้
   2.1 ความลึกรอยกด = (100 - ค่าความแข็งที่วัดได้) x 0.002 สำหรับหัวกดเพชร
   2.2 ความลึกรอยกด = (130 - ค่าความแข็งที่วัดได้) x 0.002 สำหรับหัวกดบอล
   2.3 นอกจากนี้ภายหลังการทดสอบจะต้องไม่มีรอยนูนเกิดขึ้นทางด้านหลังของชิ้นงานทดสอบด้วย
3. รูปร่างของชิ้นงานทดสอบ และตำแหน่งในการวัด
   3.1 ชิ้นงานรูปทรงยาว จะต้องติดตั้งแท่นรองรับเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ผิวทดสอบที่ทำการวัดความแข็งตั้งฉากกับแนวกดของหัวกด
   3.2 ชิ้นงานทรงกระบอก การวัดค่าความแข็งให้ถูกต้องจะต้องใช้ค่า correction factor ช่วยปรับค่าความแข็งที่อ่านได้ เนื่องจากในการวัดความแข็งของผิวนูน (convex) หัวกดจะกดลงไปลึกมากกว่าปกติ ดังนั้นค่าที่อ่านได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นค่า correction factor (ตารางที่ 4) จะถูกบวกเข้าไปเมื่อวัดความแข็งกับผิวชิ้นงานทรงกระบอก นอกจากนี้ในการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอกจะต้องใช้แท่นตัววี (V anvil) เพื่อช่วยรองรับชิ้นงานทดสอบให้อยู่นิ่งกับที่

ตารางที่ 4 ค่า Correction factors สำหรับการวัดความแข็งชิ้นงานทรงกระบอก

ค่าความแข็งที่อ่านได้	Correction factors สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ						
	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

4) การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิคเกอร์ส (Micro-Vickers Hardness Testing)

การทดสอบความแข็งแบบ Micro-Vickers Hardness มีความแตกต่างจากการวัดความแข็งแบบ (Macro) Vickers Hardness คือหัวกด Indenter นั้นมีขนาดเล็กมากเป็นไมครอน (Micron) ทำให้สามารถวัดความแข็งในพื้นที่แคบๆ หรือในชิ้นงานขนาดเล็กได้ เช่น ในแผ่นโลหะบาง หรือพื้นผิวของเส้นลวดขนาดเล็ก เป็นต้น นอกจากนี้แล้วการทดสอบความแข็งแบบ Micro-Vickers Hardness นี้ยังสามารถใช้วัดค่าความแข็งของเฟสต่างๆ ในวัสดุที่ต้องการวัดได้ เช่น ใช้วัดความแข็งของ Ferrite และ Pearlite ของเหล็กกล้าได้ นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนทางโลหวิทยาเมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น การชุบแข็ง (Hardening) การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) การเคลือบผิว (Plating) การเชื่อม

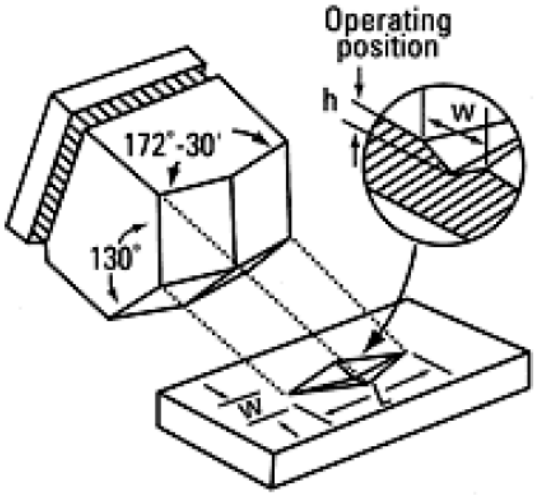
(Welding) การยึด (Bonding) เป็นต้น ในขณะที่การวัดความแข็งแบบ Macro Vickers นั้นหัวกด Indenter จะมีขนาดใหญ่กว่าเฟสทั้งสองมาก จึงทำให้ค่าความแข็งในแบบดังกล่าวเป็นค่าความแข็งรวมของทั้งสองเฟสและขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของเฟสทั้งสอง เป็นต้น หลักการและวิธีการทดสอบความแข็งแบบ Micro Vickers Hardness นั้นเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบ Macro Vickers Hardness ซึ่งควรมีการเตรียมชิ้นงานโดยผ่านการขัดละเอียด (Polishing) และปราศจากรอยขีดข่วน (Scratches) เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้จากการกดหัวกด Indenter ลงบนรอยขีดขวน ซึ่งทำให้ค่าที่วัดได้คาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

การคำนวณค่าความแข็งจากการทดสอบจะทำเหมือนกับการทดสอบความแข็งแบบ Macro Vickers Hardness กล่าวคือ ผู้ปฏิบัติงานจะวัดความยาวขิงเส้นทแยงมุมทั้งสองแนวเพื่อหาค่าความยาวเส้นทแยงมุมเฉลี่ยและนำไปคำนวณความแข็งตามสูตรการคำนวณความแข็งแบบ Macro Vickers Hardness สำหรับหัวกดแบบนูบ (Knoop) ซึ่งเป็นการวัดค่า Micro Hardness อีกแบบหนึ่ง นั้นเส้นทแยงมุมในสองแนวจะไม่เท่ากัน (โดยประมาณจะมีอัตราส่วนเป็น 7 ต่อ 1) ค่าความแข็งในการทดสอบโดยใช้หัวกดแบบนูบจะคำนวณจากสูตร

$$HK = \frac{14.288P}{d^2}$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม

d คือ ความยาวของเส้นทแยงมุมด้านยาวของรอยกดในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 9 หัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบนูบ (Knoop)

2. อุปกรณ์และวิธีการ

การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

2.1วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

2.1.1 Universal Hardness Tester

2.1.2 ชิ้นงานโลหะ.....ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน.....ที่ผ่านการขัดผิวหน้าเรียบ และกัดกรดแล้ว

2.2 ขั้นตอนการทำงานของการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

2.2.1. .....

2.2.2. .....

2.2.3. .....

2.2.4. .....

2.2.5. .....

2.3 ขั้นตอนการทำงานของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

2.3.1. .....

2.3.2. .....

2.3.3. .....

2.3.4. .....

2.3.5. .....

2.4 ขั้นตอนการทำงานของการทดสอบความแข็งแบบรอคเวลล์

2.4.1. .....

2.4.2. .....

2.4.3. .....

2.4.4. .....

2.4.5. .....

รายงานการทดสอบความแข็ง

ชื่อ.....รหัส.....สาขา.....

ทดสอบโดย : ห้องปฏิบัติการทดสอบทางกล สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน

วันที่รับตัวอย่างทดสอบ : วันที่...../...../.....

วันที่วิเคราะห์ผลทดสอบ : วันที่...../...../.....

ชนิดของตัวอย่างทดสอบ : ☐ Carbon ☐ Steel Alloy ☐ Steel Cast Iron ☐ Brass ☐ Aluminum ☐ Other

ลักษณะของชิ้นทดสอบ : ☐Round ☐ Tube ☐ Plate ☐ Sheet ☐ Shape ☐ Bar ☐ Powder ☐Other

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ : .....

เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ : Hardness Testing ☐ Brinell ☐Rockwell ☐Vicker

สภาวะการวิเคราะห์ : รอบการทดสอบ ☐Auto Cycle ☐Manual Cycle

: การแสดงค่า ☐Digital ☐ Dial scale ☐ Profile

: อุณหภูมิห้องทดสอบ.....ความชื้นสัมพันธ์.....

การเตรียมชิ้นทดสอบ : .....

รูปของชิ้นงานทดสอบ

3. ใบบันทึกผลการทดลอง
การทดสอบความแข็งแบบรอคเวลล์

<table>
<tr><td colspan="3">ใบบันทึกผลการทดลอง ปฏิบัติการที่ 1-2
การทดสอบความแข็งแบบรอคเวลล์</td><td>วัน/เดือน/ปี .....</td></tr>
<tr><td>Section .....
Group .....</td><td colspan="2">ภาควิชา .....</td><td>ผู้บันทึก .....
รหัส .....</td></tr>
<tr><td>เครื่องวัดความแข็ง</td><td colspan="2">แบบเครื่อง/ประเภท</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="5">ข้อมูลชิ้นทดสอบ</td><td colspan="2">หมายเลขชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">ชื่อชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">สภาพชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">สภาพผิวชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">ความหนา / เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)</td><td>mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">การทดสอบ</td><td colspan="2">ชนิดหัวกด และ สัญลักษณ์ความแข็ง</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">แรงกดรวม (kg)</td><td>. kg</td></tr>
<tr><td colspan="2">เวลากดแช่ (s)</td><td>. s</td></tr>
<tr><td rowspan="5">ผลการทดลอง</td><td>ครั้งที่</td><td>ขนาด ∅ รอยกด (mm)</td><td>ค่าความแข็ง HRC</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>เฉลี่ย</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">เปรียบเทียบผลการทดลองจากตาราง</td><td colspan="2">ค่าความแข็งแบบ HBN เทียบเท่า</td><td>HBN</td></tr>
<tr><td colspan="2">ค่าความแข็งแบบ HV เทียบเท่า</td><td>HV</td></tr>
<tr><td colspan="2">ค่า Tensile Strength เทียบเท่า (N/mm^2)</td><td>N/mm^2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">การตรวจสอบ</td><td colspan="2">ระยะห่างระหว่างรอยกดต่ำสุด</td><td>mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">ความหนาต่ำสุด (mm)</td><td>mm</td></tr>
<tr><td>หมายเหตุ</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

ผู้ตรวจ

4. ใบบันทึกผลการทดลอง
การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

<table>
<tr><td colspan="3">ใบบันทึกผลการทดลอง ปฏิบัติการที่ 1-2
การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์</td><td>วัน/เดือน/ปี .....</td></tr>
<tr><td>Section .....
Group .....</td><td colspan="2">ภาควิชา .....</td><td>ผู้บันทึก .....
รหัส .....</td></tr>
<tr><td>เครื่องวัดความแข็ง</td><td colspan="2">แบบเครื่อง/ประเภท</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="5">ข้อมูลชิ้นทดสอบ</td><td colspan="2">หมายเลขชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">ชื่อชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">สภาพชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">สภาพผิวชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">ความหนา / เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)</td><td>mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">การทดสอบ</td><td colspan="2">ชนิดหัวกด และ สัญญลักษณ์ความแข็ง</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">แรงกดรวม (kg)</td><td>. kg</td></tr>
<tr><td colspan="2">เวลากดแช่ (s)</td><td>. s</td></tr>
<tr><td rowspan="5">ผลการทดลอง</td><td>ครั้งที่</td><td>ขนาด ∅ รอยกด (mm)</td><td>ค่าความแข็ง HV</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>เฉลี่ย</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">เปรียบเทียบผลการทดลองจากตาราง</td><td colspan="2">ค่าความแข็งแบบ HBN เทียบเท่า</td><td>HB</td></tr>
<tr><td colspan="2">ค่าความแข็งแบบ HRC เทียบเท่า</td><td>HRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">ค่า Tensile Strength เทียบเท่า (N/mm^2)</td><td>N/mm^2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">การตรวจสอบ</td><td colspan="2">ระยะห่างระหว่างรอยกดต่ำสุด</td><td>mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">ความหนาต่ำสุด (mm)</td><td>mm</td></tr>
<tr><td>หมายเหตุ</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

ผู้ตรวจ

5. ใบบันทึกผลการทดลอง
การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

<table>
<tr><td colspan="2">ใบบันทึกผลการทดลอง ปฏิบัติการที่ 1-2
การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์</td><td colspan="2">วัน/เดือน/ปี .....</td></tr>
<tr><td>Section .....
Group .....</td><td colspan="2">ภาควิชา .....</td><td>ผู้บันทึก .....
รหัส .....</td></tr>
<tr><td>เครื่องวัดความแข็ง</td><td colspan="2">แบบเครื่อง/ประเภท</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="5">ข้อมูลชิ้นทดสอบ</td><td colspan="2">หมายเลขชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">ชื่อชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">สภาพชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">สภาพผิวชิ้นงาน</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">ความหนา / เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)</td><td>mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">การทดสอบ</td><td colspan="2">ชนิดหัวกด และ สัญญลักษณ์ความแข็ง</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">แรงกดรวม (kg)</td><td>. kg</td></tr>
<tr><td colspan="2">เวลากดแช่ (s)</td><td>. s</td></tr>
<tr><td rowspan="5">ผลการทดลอง</td><td>ครั้งที่</td><td>ขนาด ∅ รอยกด (mm)</td><td>ค่าความแข็ง HBN</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>เฉลี่ย</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">เปรียบเทียบผลการทดลองจากตาราง</td><td colspan="2">ค่าความแข็งแบบ HV เทียบเท่า</td><td>HV</td></tr>
<tr><td colspan="2">ค่าความแข็งแบบ HRC เทียบเท่า</td><td>HRC</td></tr>
<tr><td colspan="2">ค่า Tensile Strength เทียบเท่า (N/mm^2)</td><td>N/mm^2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">การตรวจสอบ</td><td colspan="2">ระยะห่างระหว่างรอยกดต่ำสุด</td><td>mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">ความหนาต่ำสุด (mm)</td><td>mm</td></tr>
<tr><td>หมายเหตุ</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

ผู้ตรวจ

เอกสารอ้างอิง :

1. อิทธิพล เดี่ยววณิชย์. **การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก.** สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. วรพจน์ ศิริลักษณ์. **เอกสารประกอบการสอนวิชาการทดสอบวัสดุ**. สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย
3. รศ.แม้น อมรสิทธิ์ และ ดร.สมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม, สำนักพิมพ์ท้อป, กรุงเทพฯ.
4. เอกสารประกอบการบรรยายวิชาวัสดุวิศวกรรม
5. Smith, W.F. and J. Hashemi. 2006. Foundations of Materials Science and Engineering. 4th ed., McGraw Hill, Inc., New York.