การศึกษาแนวทางการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งในหน่วยร็อคเวลล์ สเกล ซี ตามมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005

นายสุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์
นายประสิทธิ์ แพงเพชร

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งบประมาณปี 2558

ชื่องานวิจัย	:	การศึกษาแนวทางการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งในหน่วยร็อคเวลล์ สเกล ซี ตามมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005
ผู้วิจัย	:	อาจารย์สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์
	:	อาจารย์ประสิทธิ์ แพงเพชร
ปีงบประมาณ	:	2558

บทคัดย่อ

การวัดค่าความแข็งเป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพและชิ้นส่วนโลหะที่เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะชิ้นส่วนของเหล็กกล้าที่ผ่าน**กรรมวิธี**การผลิต จำเป็นต้องตรวจวัดค่าความแข็งเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการผลิตการวัดค่าความแข็งมีหลายวิธีแต่ที่นิยมกันมากคือการวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ เครื่องวัดค่าความแข็งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ ดังนั้นจำเป็นต้องทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

วิธีการที่นิยมในการตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องวัดค่าความแข็งโดยการสอบเทียบกับแท่งอ้างอิงทางความแข็ง แต่แท่งอ้างอิงทางความแข็งนี้ไม่มีการผลิตในประเทศต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

งานวิจัยเล่มนี้มีการศึกษาวิธีการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็ง โดยทำการศึกษา และผลิตในหน่วยร็อคเวลล์สเกลซี วัสดุที่เลือกมาผลิต คือเหล็กเกรด K460 และ 2510 กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตร ความหนา 15 มิลลิเมตร ทำการชุบแข็งที่เตาควบคุมบรรยากาศที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที อุณหภูมิที่น้ำมันชุบแข็ง 60 องศาเซลเซียส และทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิน้อยกว่า -70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, และ700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงตามลำดับและนำมาตรวจสอบรูปร่างตามมาตรฐานข้างต้นทดสอบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ร็อคเวลล์สเกลซีเพื่อหาค่าความแข็งในแต่ละช่วง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ได้ความแข็งเฉลี่ยอยู่ในช่วงต่างๆตามลำดับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ตามมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005

คำสำคัญ : แท่งอ้างอิงความแข็ง, ร็อคเวลล์, สเกลซี

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญตาราง		ฉ
สารบัญภาพ		ช
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
	1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
	1.5 วิธีดำเนินงาน	2
บทที่ 2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	2.1 วัสดุ	3
	2.2 เครื่องมือตัด	5
	2.3 งานกลึง	8
	2.4 งานเจียระไน	10
	2.5 การชุบแข็ง	14
	2.6 ข้อกำหนดของการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งร็อคเวลล์	24
	2.7 เครื่องทดสอบความแข็ง	26
	2.8 การวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์	28
	2.9 วิธีการตรวจสอบเครื่องมือวัดความแข็งร็อคเวลล์	30
	2.10 ความหยาบผิว	33
	2.11 การวัดตำแหน่งพิกัด	35
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงาน	39
	3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทำโครงงาน	40
	3.2 ขั้นตอนและการดำเนินงาน	40
บทที่ 4	ผลการดำเนินงานและทดสอบ	49
	4.1 ผลการวัดแท่งอ้างอิงทางความแข็ง	49
	4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความแข็ง	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 59

5.1 สรุปผลการทดลอง 59

5.2 ข้อเสนอแนะ 60

5.3 อุปสรรคและปัญหาในการดำเนินงาน 60

บรรณานุกรม 61

ภาคผนวก ก 63

ตำแหน่งการวัดความราบผิวและความขนานของชิ้นงาน 64

ภาคผนวก ข 66

ISO 6508-3 : 2005 67

ภาคผนวก ค 70

ประวัติผู้จัดทำ 71

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กการงานเย็นที่นำมาใช้ในงานวิจัย	5
2-2	แสดงการเลือกใบเลื่อยให้เหมาะกับงาน	7
2-3	ความเร็วตัดของงานกลึง	10
2-4	แนวการเลือกหินเจียระไนที่ใช้กับเครื่องเจียระไน	11
2-5	รูปร่างและส่วนขนาดของแท่งอ้างอิงความแข็งร็อคเวลล์	24
2-6	แสดงค่าพิสัยที่ยอมรับได้ของแท่งอ้างอิงความแข็งร็อคเวลล์ตามมาตรฐาน	25
2-7	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าที่ยอมรับได้ของหัวบอล	31
2-8	แสดงค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ของเครื่องทดสอบความแข็ง	32
2-9	แสดงระดับค่าความแข็งของแท่งอ้างอิงความแข็งร็อคเวลล์	32
4-1	แสดงผลการวัดค่าความราบผิวบนแท่งอ้างอิงทางความแข็ง	49
4-2	แสดงผลการวัดค่าความขนานแท่งอ้างอิงทางความแข็ง	50
4-3	แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวบน (Ra) แท่งอ้างอิงทางความแข็งของเหล็ก K460	51
4-4	แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวบน (Ra) แท่งอ้างอิงทางความแข็งของเหล็ก 2510	52
4-5	แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวล่าง (Ra) แท่งอ้างอิงทางความแข็งของเหล็ก K460	53
4-6	แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวล่าง (Ra) แท่งอ้างอิงทางความแข็งของเหล็ก 2510	54
4-7	แสดงผลการวัดค่าความแข็งของเหล็กการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	55
4-8	แสดงผลการวัดค่าความแข็งของเหล็กการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	56
4-9	แสดงผลการวัดค่าความแข็งของเหล็กการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	57
4-10	แสดงผลการวัดค่าความแข็งของเหล็กการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส	58
ก-1	ตำแหน่งการวัดค่าความราบและความขนาน	65
ค-1	แสดงงบประมานในการดำเนินงาน	71

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	แสดงเครื่องกลึงยันศูนย์	8
2-2	แสดงตัวอย่างเจียระไนผิวราบ	12
2-3	แสดงเจียระไนผิวงานด้วยขอบหินบนโต๊ะยาว	13
2-4	แสดงแท่นจับแม่เหล็ก	13
2-5	แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์เป็นเฟอร์ไรท์ และซีเมนไตต์ที่จะได้โครงสร้างเพิร์ลไลท์หรือซอร์ไบท์	15
2-6	แสดงขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงของออสเตนไนท์ไปเป็นเบนไนท์	16
2-7	แสดงการเติมคาร์บอนด้วยสารของแข็ง (Packed Carburizing) และผงถ่านอัดเม็ดสำเร็จรูป	18
2-8	แสดงหลักการเติมคาร์บอนที่ผิวโดยสารเติมคาร์บอนของเหลว (เกลือเคมี)	19
2-9	แสดงเตาชุบแข็งแบบควบคุมบรรยากาศสำหรับชุบผิวแข็งแบบแก๊สคาร์บุไรซิ่งและแก๊สคาร์โบไนโตรดิ่ง	20
2-10	แสดงเครื่องทดสอบความแข็ง	26
2-11	แสดงการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซี	27
2-12	แสดงตัวอย่างการทดสอบ HRC	29
2-13	แสดงการวัดค่าความหยาบผิว (Rt)	34
2-14	แสดงการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)	35
2-15	แสดงขอบเขตการทำงานของมาตรวิทยาการวัดตำแหน่งพิกัด	35
2-16	แสดงส่วนประกอบของเครื่องวัดตำแหน่งพิกัดแบบ 3 มิติ	37
2-17	แสดงระบบพิกัดของเครื่องวัดกับระบบพิกัดของชิ้นงานไม่จำเป็นต้องตรงกัน	37
3-1	แสดงวิธีการและลำดับขั้นตอนการทำโครงงาน	39
3-2	แสดงการกลึงปอกชิ้นงาน	40
3-3	แสดงการตัดแบ่งชิ้นงาน	41
3-4	แสดงการตอกรหัสชิ้นงาน	41
3-5	แสดงการผลิตตัวจับยึดชิ้นงาน	42
3-6	แสดงการกลึงปาดหน้าชิ้นงาน	43
3-7	แสดงการตรวจสอบชิ้นงานเพื่อจะนำไปเจียระไน	43
3-8	แสดงการเจียระไนชิ้นงาน	44
3-9	แสดงขั้นตอนการชุบแข็งของเหล็ก	45
3-10	แสดงการเจียระไนชิ้นงานโดยมีปากกาจับชิ้นงาน	45
3-11	แสดงการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเครื่องขัดกระดาษทรายและผ้าสักหลาด	46
3-12	แสดงการตรวจสอบความราบผิวของชิ้นงาน	46
3-13	การตรวจสอบความขนานของชิ้นงาน	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-14	แสดงการวัดความหยาบผิวของแท่งอ้างอิงความแข็งและตำแหน่งและทิศทางการวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน	47
3-15	การทดสอบค่าความแข็งโดยใช้เครื่องวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลซี	48
5-1	กราฟแสดงค่าพิสัยของเหล็ก K460	59
5-2	กราฟแสดงค่าพิสัยของเหล็ก 2510	60
ก-1	แสดงตำแหน่งการวัดความราบผิวและความขนานของชิ้นงานจำนวน 190 จุด	64
ก-2	แสดงระดับความราบและความขนานของชิ้นงาน	64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการวัดความแข็งมีความสำคัญ ในงานอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุและชิ้นส่วนโลหะ ตัวอย่าง เช่น เฟือง เพลาข้อเหวี่ยง แกนล้อ สลักเกลียว แม่พิมพ์ของชิ้นส่วนรถยนต์ จำเป็นต้องตรวจวัดความแข็งเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการผลิตและอายุการใช้งาน การวัดความแข็งมีหลายวิธี แต่ที่นิยมกันมากคือการวัดแบบร็อคเวลล์ สเกล ซี เป็นเครื่องวัดความแข็งที่สำคัญมากในงานอุตสาหกรรม

การตรวจสอบถึงความแม่นยำของเครื่องวัดความแข็งอาจจำเป็นต้องตรวจสอบเป็นประจำ โดยเฉพาะถ้าเป็นการผลิตชิ้นงานแบบจำนวนมาก วิธีการตรวจสอบเครื่องวัดความแข็งที่นิยมและเป็นที่ยอมรับ คือการสอบเทียบกับแท่งอ้างอิงความแข็ง และเมื่อมีการทดสอบแล้วแท่งอ้างอิงทางความแข็งจะมีรอยตำหนิบนผิวหน้า เมื่อเต็มผิวหน้าแล้วจะนำกลับมาใช้ไม่ได้อีก ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีการผลิตใช้ในประเทศจึงจำเป็นที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมีราคาประมาณ 7,000 – 14,000 บาท

ดังนั้นทางกลุ่มผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาวิธีการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งและทำการทดลองผลิตจริง โดยเลือกผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกล ซี และจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานสากล ISO 6508-3 : 2005 ในการอ้างอิง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาแนวทางในการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็ง

1.2.2 เพื่อให้แท่งอ้างอิงทางความแข็ง ในหน่วยร็อคเวลล์สเกล ซี ให้มีคุณภาพตามมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ผลิตและทดสอบแท่งอ้างอิงทางความแข็งในหน่วยร็อคเวลล์ สเกลซี จำนวน 40 ชิ้น

1.3.2 ผลิตแท่งอ้างอิงความแข็งตรงตามมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005

1.3.3 ผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตร มีความหนาไม่น้อยกว่า 12 มิลลิเมตร

1.4 วิธีดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาและหาข้อมูล

1.4.2 เก็บรวบรวมข้อมูล

1.4.3 ออกแบบอุปกรณ์ช่วยจับยึดชิ้นงาน

1.4.4 ทำการผลิตชิ้นงาน

1.4.5 ทำการทดสอบ

1.4.6 วิเคราะห์ผล สรุปผล และจัดทำรูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำแท่งอ้างอิงทางความแข็งไปใช้งานได้ตรงตามมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005

1.5.2 สามารถเป็นแนวทางในการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งภายในประเทศ

1.5.3 สามารถทดแทนการนำเข้าแท่งสอบเทียบความแข็งจากต่างประเทศ

1.5.4 สามารถนำความรู้ทางด้านวิศวกรรมมา ประยุกต์ใช้ในโครงงาน

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาแนวทางการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งครั้งนี้ได้ศึกษาเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของแท่งอ้างอิงความแข็ง (Calibration Block) ตามมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005 ออกเป็นหัวข้อที่สำคัญดังนี้

2.1 วัสดุ (Materials)

2.1.1 เหล็กกล้างานเย็นชนิด K460 กับ 2510 เป็นเหล็กกล้าสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์งานเย็น และเป็นเหล็กกล้าทำเครื่องมือชนิด ไฮคาร์บอนไฮโครเมี่ยมที่คงรูปร่างเดิมได้ดีหลังจากการชุบแข็ง เป็นเหล็กที่เหมาะสำหรับการชุบด้วยอากาศและมีความเหนียวดีมากมีความทนต่อการสึกหรอดีและรักษาคมตัดได้ดีเยี่ยมรวมทั้งมีคมเหนียวแน่นสูง ความแข็งจะสูงมากเมื่อผ่านการชุบแข็งสามารถชุบแข็งได้ง่ายและยังชุบ (Nitriding) ได้ทนต่อการเสียดสีดีมากทนต่อแรงกดอัด ได้ดีเยี่ยมและมีความเหนียวแกร่งคุณภาพสูง ใช้ทำแม่พิมพ์ (Blanking) สำหรับโลหะที่มีความแข็งแรงสูงแม่พิมพ์ตัดโลหะ แม่พิมพ์กรรไกรมีดตัดเหล็ก ใบมีดตัดกระดาษ ใบมีดตัดเฉือนแบบวงกลม แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปทำลูกรีดเกลียว ลูกรีดแป๊บ ลูกรีดสำหรับม้วนท่อต่างๆ แม่พิมพ์ดัดงอโลหะ มีดตัดเชียร์แผ่นโลหะและพลาสติก แม่พิมพ์พลาสติก รางเลื่อนเสาแม่พิมพ์ ปลอกบูช เครื่องมือวัด เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญที่ต้องการสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้คือ ความสามารถในการกลึงไสดีเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยหลังการชุบแข็ง (เนื่องจากการชุบแข็งจะทำโดยการชุบน้ำมันหรือให้เย็นตัวในอากาศ) ต้านทานการสึกหรอสูงและมีความเหนียวทนแรงอัดกระแทกได้ดี

2.1.2 อิทธิพลของธาตุผสมต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือ

2.1.2.1 คาร์บอน (C) เป็นธาตุผสมสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือ จะมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลหลายประการโดยช่วยเพิ่มความแข็ง ความเค้นแรงดึง ความสามารถในการชุบแข็ง แต่จะลดคุณสมบัติความเหนียวและการยืดตัวของเหล็กนอกจากนี้คาร์บอนจะรวมตัวกับธาตุผสมตัวอื่น เช่น โครเมียม โมลิบดินั่ม ทังสเตนและฟอร์มตัวเป็นคาร์ไบด์ด้วย ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งานต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น เช่น ความสามารถในการชุบแข็ง ความทนต่อการเสียดสี การรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

2.1.2.2 ซิลิกอน (Si) โดยปกติจะพบในเหล็กกล้าเครื่องมือปริมาณ 0.2-0.3% เพราะในการหลอมเหล็กกล้าจะใช้ซิลิกอนเพื่อไล่แก๊สออกซิเจนสำหรับซิลิกอนที่เป็นธาตุผสมจะมีบทบาทช่วยให้คาร์บอนรวมตัวเป็นกราไฟต์ดังนั้นในเหล็กกล้าเครื่องมือบางประเภทที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและผสมซิลิกอนประมาณ 1% จะมีโครงสร้างหลังการชุบแข็งที่ประกอบด้วยกราไฟต์กระจัดกระจาย ซึ่งช่วยให้เกิดความลื่นเมื่อใช้ทำแม่พิมพ์ ลดปัญหาการติดของโลหะในขณะทำการขึ้นรูปธาตุนี้จะไม่ใช้ตามลำพัง แต่จะผสมร่วมกับโมลิบดินั่ม หรือ วานาเดียม โดยให้ผลดีทั้งด้านการลดการเกิดออกซิเดชั่นที่อุณหภูมิสูง ช่วยให้ชุบแข็งง่ายขึ้นและช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะอบคืนตัว

2.1.2.3 แมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่มีอยู่ทั่วไปในเหล็กกล้า เนื่องจากในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าจะใส่แมงกานีสเป็นตัวกำจัดแก๊ส และรวมตัวกับกำมะถัน (S) การจัดว่าแมงกานีสเป็นธาตุผสมในเหล็กกล้าก็ต่อเมื่อมีปริมาณสูงกว่า 0.6% ขึ้นไปแมงกานีสมีบทบาทในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ สำหรับเหล็กที่ผสมแมงกานีสเพียงลำพังจะมีข้อเสียคือ จะเปราะหลังจากอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 400-600 °C จึงมักผสมแมงกานีสจะผสมร่วมกับโครเมียม (Cr) และโมลิบดินั่ม (Mo) ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งได้มากขึ้นกว่าการผสมแมงกานีสเพียงธาตุเดียว

2.1.2.4 โครเมียม (Cr) เป็นธาตุผสมที่ใส่ลงไปเพื่อคุณสมบัติหลายประการ เช่น เพิ่มความสามารถในการชุบแข็งเพิ่มคุณสมบัติทนต่อการเสียดสี เพิ่มความเหนียว เป็นต้นโครเมียมสามารถรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ได้หลายรูปแบบ ซึ่งหากมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและคาร์ไบด์เหล่านี้ละลายหมด เกรนจะขยายตัวมาก ดังนั้นการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผสมโครเมียมตามลำพัง ต้องเลี่ยงการใช้งานที่อุณหภูมิสูงและทิ้งแช่ไว้ระยะเวลานานหรืออาจแก้ไขได้โดยผสมวานาเดียมเพื่อชะลอการขยายตัวของเกรน

2.1.2.5 โมลิบดินั่ม (Mo) ส่วนใหญ่เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน และเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงจะผสมโมลิบดินั่มเพื่อผลในการชุบแข็งนอกจากนี้ยังทำให้สามารถคงความแข็งของมาร์เทนไซต์ได้จนถึงอุณหภูมิ 500 °C แต่ข้อเสียของโมลิบดินั่ม คือ เหล็กจะเป็นออกไซด์มากที่อุณหภูมิ 1,000-1,100 °C และมีแนวโน้มทำให้สูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่ายจึงมักเติมซิลิกอนเพื่อปรับปรุงข้อบกพร่องนี้

2.1.2.6 ทังสเตน (W) ที่ผสมลงไปในเหล็กกล้าเครื่องมือทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง สลายตัวได้ช้าที่อุณหภูมิสูง จึงมีบทบาทต้านทานต่อการสึกหรอสำหรับการใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติทนต่อการเสียดสี และทนความร้อน โดยเฉพาะหากผสมทังสเตนสูงถึง 18% จะช่วยคงความแข็งไว้ที่อุณหภูมิสูง และรักษาคมตัดได้ดี

2.1.2.7 โคบอลท์ (Co) เป็นธาตุเดียวที่ลดความสามารถในการชุบแข็ง แต่จะมีบทบาทอย่างมากที่จะช่วยให้เหล็กมีความคม ตัดโลหะได้ดี (High Cutting Ability) และสามารถ

รักษาความแข็งได้จนถึงอุณหภูมิสูง จึงพบว่าเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High Speed Tool Steel) จะผสมโคบอลท์อยู่ด้วย

2.1.2.8 วานาเดียม (V) มีผลอย่างมากที่ทำให้ได้คาร์ไบด์ที่แข็ง เสถียร ขนาดละเอียด และกระจัดกระจาย ซึ่งมีผลทำให้ได้โครงสร้างที่มีเกรนละเอียด สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความเหนียวให้กับชิ้นงานได้

ตารางที่ 2-1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กการงานเย็นที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ชนิดเหล็ก	**ส่วนผสม(%)**							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	V
K460	0.95	0.26	1.07	0.43	0.02	0.43	0.03	0.07
2510	0.94	0.26	1.10	0.44	0.03	0.38	0.03	0.07

2.2 เครื่องมือตัด (Cutting Tool)

2.2.1 เครื่องเลื่อยชัก (Power Hack Saw) เครื่องเลื่อยแบบชักเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการเลื่อยตัดวัสดุงานให้ได้ขนาดและความยาวตามความต้องการ ระบบการขับเคลื่อนใบเลื่อย ใช้ส่งกำลังด้วยมอเตอร์แล้วใช้เฟืองเป็นตัวกลับทิศทางและใช้หลักการของข้อเหวี่ยงเป็นตัวขับเคลื่อนให้ใบเลื่อยเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในแนวเส้นตรงอย่างต่อเนื่องทำให้ใบเลื่อยสามารถตัดงานได้และมีส่วนประกอบของเครื่องเลื่อยชัก ดังนี้

2.2.1.1 โครงเลื่อย (Saw Frame) มีลักษณะเหมือนตัวยูคว่ำ โครงเลื่อยส่วนใหญ่ทำจากเหล็กหล่ออย่างดีใช้สำหรับใส่ใบเลื่อย โครงเลื่อยจะเคลื่อนที่ไปมาอยู่ในร่องหางเหยี่ยวโดยการส่งกำลังจากล้อเฟือง

2.2.1.2 ปากกาจับงาน (Vise) ใช้จับชิ้นงานเพื่อทำการเลื่อย สามารถปรับปรุงเอียงขวา-ซ้ายได้ข้างละ 45 องศาและสามารถเลื่อนปากเข้า-ออกได้ด้วยเกลียวแขนหมุนล็อคแน่น

2.2.1.3 แขนตั้งระยะงาน (Cut Off Gage) มีหน้าที่ในการตั้งระยะของชิ้นงานที่ต้องการตัดจำนวนมาก ๆ เพื่อให้ชิ้นงานที่ตัดออกมามีความยาวเท่ากันทุกชิ้น

2.2.1.4 ระบบป้อนตัด เครื่องเลื่อยชักมีระบบป้อนตัด 2 ชนิด คือชนิดใช้ลูกถ่วงน้ำหนัก และชนิดใช้น้ำมันไฮโดรลิคทั้ง 2 ชนิด ทำหน้าที่เหมือนกันคือการป้อนตัด แต่หลักการทำงานต่างกันตรงที่ชนิดลูกถ่วงน้ำหนักอาศัยแรงดึงดูดของโลกส่วนชนิดไฮโดรลิคอาศัยแรงดันจากน้ำมันไฮโดรลิค

2.2.1.5 ระบบหล่อเย็น เครื่องเลื่อยชักมีความจำเป็นต้องใช้น้ำหล่อเย็น เพื่อช่วยระบายความร้อนเนื่องจากการเสียดสีระหว่างใบเลื่อยกับชิ้นงาน และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของใบเลื่อยให้ยาวนาน

2.2.1.6 ฐานเครื่องเลื่อยชัก (Base) ทำหน้าที่รองรับส่วนต่างๆ ของเครื่องเลื่อยชักทั้งหมด ฐานเครื่องเลื่อยชักบางชนิดจะทำเป็นโพรงภายใน เพื่อเป็นที่เก็บถังน้ำหล่อเย็นและมอเตอร์

2.2.1.7 มอเตอร์ (Motor) เครื่องเลื่อยชักมีมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังขับมอเตอร์จะใช้กับกระแสไฟฟ้า 220 โวลต์หรือ 380 โวลต์ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต

2.2.1.8 สวิตซ์เปิด-ปิด เครื่องเลื่อยชักมีสวิตซ์เปิด-ปิด แบบกึ่งอัตโนมัติคือ สวิตซ์เครื่องจะปิดโดยอัตโนมัติเมื่อใบเลื่อยตัดชิ้นงานขาด

2.2.1.9 ชุดเฟืองทด (Gear) ทำหน้าที่ในการทดส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังโครงเลื่อยเฟืองทดที่ใช้กับเครื่องเลื่อยชักมี 2 ชนิด คือ เฟืองเฉียง และเฟืองตรง

2.2.1.10 พู่เลย์ (Pulley) ทำหน้าที่ส่งกำลังผ่านสายพานไปยังชุดเฟืองทด ใช้กับสายพานตัววี กลไกการทำงานของเครื่องเลื่อยชัก เป็นกลไกส่งกำลังด้วยมอเตอร์ ส่งกำลังผ่านเฟืองขับซึ่งเป็นเฟืองทด เพื่อทดความเร็วรอบมอเตอร์ และเพื่อทดแรงขับของมอเตอร์ ที่ข้างเฟืองขับมีจุดหมุนก้านต่ออยู่คนละศูนย์กับศูนย์กลางเฟือง เพื่อต่อก้านต่อไปขับโครงเลื่อย ให้ชักโครงเลื่อยเดินหน้าและถอยหลังได้น้ำหนักกดโครงเลื่อย สำหรับน้ำหนักกดโครงเลื่อย ยิ่งเลื่อนห่างออกจากหัวเครื่องมากเท่าใด จะกดให้ใบเลื่อยตัดเฉือนมากเท่านั้น ดังนั้น การเลื่อนปรับระยะน้ำหนักกดให้สังเกตการตัดเฉือนของฟังเลื่อยด้วย

น้ำหนักกดใกล้หัวเครื่อง = น้ำหนักกดโครงเลื่อยน้อย

น้ำหนักกดห่างหัวเครื่อง = น้ำหนักกดโครงเลื่อยมาก

2.2.1.11 ใบเลื่อย (Saw Blade) เป็นอุปกรณ์ของเครื่องเลื่อยที่มีความสำคัญทำหน้าที่ตัดเฉือนชิ้นงาน ใบเลื่อยเครื่องทำจากเหล็กรอบสูง มีความเข็งแต่เปราะ ดังนั้นการประกอบใบเลื่อยเข้ากับโครงเลื่อย จะต้องประกอบให้ถูกวิธีและขันสกรูให้ใบเลื่อยตึงพอประมาณเพื่อป้องกันไม่ให้ใบเลื่อยหัก ส่วนต่างๆ ของใบเลื่อยประกอบด้วยความกว้าง ความยาว ความหนา ความโตของรูใบเลื่อย และจำนวนฟันใบเลื่อย ซึ่งมีทั้งฟันหยาบและฟันละเอียดจำนวนฟันใยเลื่อยบอกเป็นจำนวนฟันต่อนิ้ว เช่น 10 ฟันต่อนิ้ว 14 ฟันต่อนิ้ว แต่ที่นิยมใช้งานทั่วๆ ไป คือ 10 ฟันต่อนิ้ว

ตารางที่ 2-2 แสดงการเลือกใบเลื่อยให้เหมาะกับงาน

จำนวนฟันต่อนิ้ว	ตัวอย่างวัสดุที่ใช้	ช่วงยาวของแนวตัด
14, 16, 18	วัสดุอ่อน เช่น ดีบุก ทองแดง ตะกั่ว อะลูมเนียม พลาสติก เหล็กเหนียว	มากกว่า 40 มม. ขึ้นไป
22, 24	วัสดุแข็งปานกลาง เช่น เหล็กหล่อ เหล็ก โครงสร้าง ทองเหลือง	น้อยกว่า 40 มม. ลงมา
32	วัสดุแข็งมาก เช่น เหล็กทำเครื่องมือ เหล็กกล้าเจือ	แผ่นโลหะ, ท่อบางๆ

2.2.1.12 มุมฟันเลื่อย ฟันเลื่อยแต่ละฟันมีลักษณะคล้ายกับลิ่ม ทำหน้าที่จิกเข้าไปในเนื้อวัสดุ ฟันแต่ละฟันประกอบด้วยมุมที่สำคัญ 3 มุม ได้แก่

ก) มุมคมตัด

ข) มุมคายเศษ

ค) มุมหลบ

2.2.1.13 คลองเลื่อย (Free Cutting Action) คือ ความกว้างของร่องบนวัสดุงาน หลังจากที่มีการตัดเฉือน ปกติคลองเลื่อยจะมีขนาดความหนามากกว่าใบเลื่อย ทั้งนี้ถ้าไม่มีคลองเลื่อย ขณะทำการเลื่อยใบเลื่อยก็จะติด ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ใบเลื่อยหัก

2.2.2 ทิศทางการตัดเฉือน การทำงานของคมเลื่อยประกอบด้วยทิศทางที่สำคัญ 2 ทิศ ได้แก่ทิศทางการกดลงและทิศทางการดันไป ดูตามลูกศร ทิศทางทั้ง 2 เป็นตัวทำให้เกิดการตัดเฉือนขึ้น แรงที่กระทำการกดและการดันจะต้องสัมพันธ์กัน ถ้าแรงใดมากเกินไปหรือฝืนอาจจะทำให้ใบเลื่อยหักได้

2.2.3 การประกอบใบเลื่อยเข้าโครงเลื่อย ต้องระวังทิศทางของฟันเลื่อย จะต้องใส่ให้ถูกทิศทางเนื่องจากจังหวะถอยกลับของโครงเลื่อย จะเป็นจังหวะที่ทำการตัดเฉือน เพื่อตัดเฉือนชิ้นงานการประกอบใบเลื่อยต้องผ่อนตัวดึงใบเลื่อยให้ยื่นออกแล้วใส่ใบเลื่อยเข้าไปให้รูของใบเลื่อยตรงกับสลักร้อยทั้ง 2 ข้าง ของโครงเลื่อย จากนั้นปรับตัวดึงใบเลื่อยให้พอตึงๆ แล้วปรับขยับใบเลื่อยให้ตั้งฉากโดยการใช้ค้อนเคาะเบาๆ ให้ใบเลื่อยแนบสนิทกับตัวดึงใบเลื่อย จึงขันให้ตึงอีกครั้งด้วยแรงมือ

2.2.4 การจับยึดชิ้นงานสำหรับงานเลื่อย การจับงานที่ผิดวิธีในกรณีชิ้นงานสั้น ปากของปากกาไม่สามารถจะจับชิ้นงานให้แน่นได้ แรงกดของเกลียวจะดันชิ้นงานหลุด ถ้าฝืนเลื่อย ใบเลื่อยจะหัก การจับงานที่ถูกวิธี ปากของปากกาจะต้องกดขนานกันทั้ง 2 ปาก การจับชิ้นงานสั้นใช้เหล็กหนุนช่วยในการจับดันปากของปากกาให้ขนานกดชิ้นงานแน่นเมื่อขันเกลียวจะทำให้ชิ้นงานไม่หลุด

2.2.5 การวัดตัดชิ้นงาน คือ การเลื่อยชิ้นงานขนาดเดียวกันจำนวนมาก ๆ ถ้าตั้งวัดงานทุกครั้งที่ทำการตัด จะใช้เวลามากและขนาดของชิ้นงานจะไม่เท่ากัน มีโอกาสคลาดเคลื่อนได้

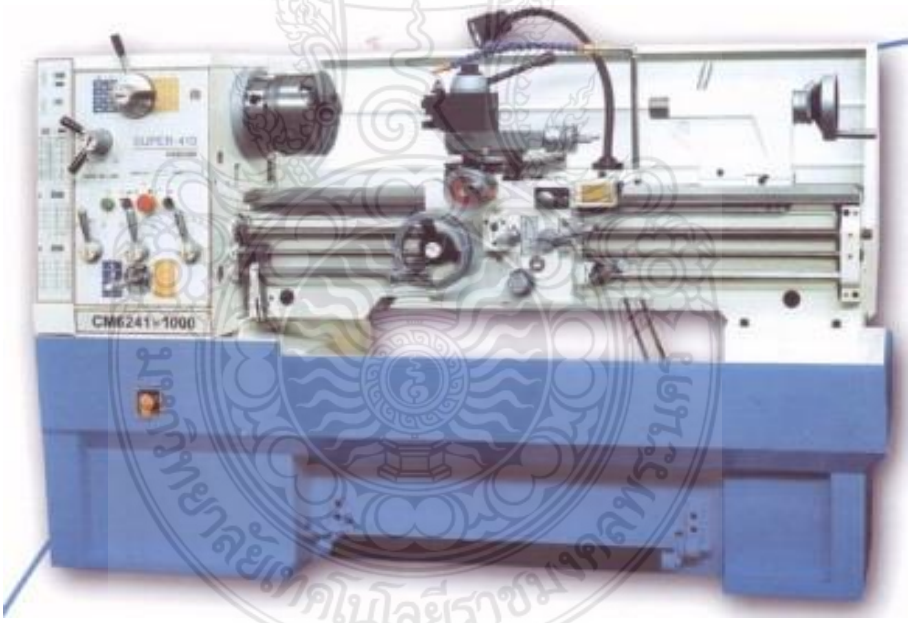
วิธีการแก้ไขในการตัดชิ้นงานขนาดเดียวกันจำนวนมากๆ โดยการตั้งวัดระยะงานชิ้นแรก แล้วใช้แขนตั้งระยะช่วยในการเลื่อยชิ้นงานชิ้นต่อไป

2.2.6 การใช้แขนตั้งระยะ แขนตั้งระยะ ช่วยในการวัดชิ้นงานที่ต้องการตัดจำนวนมากๆ ให้ได้ขนาดเดียวกันทุกชิ้นแขนตั้งระยะสามารถปรับระยะได้ โดยการขันสกรูยึดให้แน่น และมือหมุนขันแน่น เมื่อปรับได้ที่แล้วต้องขันแน่นทั้ง 2 จุด เพราะเมื่อดันชิ้นงานเข้ามาตัดใหม่จะเกิดการกระแทก อาจทำให้ขนาดเปลี่ยนแปลงไปได้

ข้อควรจำ ไม่ดันชิ้นงานกระแทกเขนตั้งระยะแรงจนเกินไป จะทำให้ขนาดความยาวชิ้นงานที่ตัดมีขนาดความยาวเคลื่อนไปจากที่ตั้งระยะไว้

2.3 งานกลึง (Turning Operation)

เครื่องกลึงยันศูนย์ (Engine Lathe) เป็นเครื่องกลึงความเร็วรอบสูง ใช้กลึงงานได้หลายขนาดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ใหญ่เกินไป และกลึงงานได้หลากหลาย นิยมใช้ในโรงงานทั่วไป



ภาพที่ 2-1 แสดงเครื่องกลึงยันศูนย์

2.3.1 ขั้นตอนการทำงานกลึง

2.3.1.1 การเลือกใช้ความเร็วตัดในงานกลึงในการปฏิบัติงานกลึงขึ้นรูปนั้น ชิ้นงานมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ต่างกันไปซึ่งอยู่กับชนิดของงาน เพราะฉะนั้นในการปฏิบัติงานผู้ปฏิบัติจึงต้องมีความรู้ในเรื่องของความเร็วตัดในการทำงาน เนื่องจากหากผู้ปฏิบัติงานเลือกใช้ความเร็วตัด

ที่ไม่เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงาน อาจจะส่งผลเสียต่อชิ้นงานและต่อการทำงานได้ องค์ประกอบของการเลือกความเร็วตัดในงานกลึงนั้นมีส่วนประกอบดังนี้

ก) ความเร็วรอบ (Speed) หมายถึง ความเร็วรอบของเครื่องมือตัดหรือความเร็วรอบของชิ้นงานที่สามารถหมุนได้ใน 1 นาที ซึ่งจะมีหน่วยวัดเป็น รอบต่อนาที

ข) ความเร็วตัด (Cutting Speed) หมายถึง ความเร็วของเครื่องมือตัดหรือคมมีด ที่ตัดชิ้นงานออกเมื่อชิ้นงานหมุนได้ 1 รอบ เศษของชิ้นงานที่ออกมาจะมีค่าเท่ากับเส้นรอบวงของชิ้นงาน ซึ่งหน่วยวัดความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตรต่อนาที

2.3.1.2 การพิจารณาในการเลือกความเร็วตัด

ก) วัสดุเนื้ออ่อนจะใช้ค่าความเร็วตัดสูง

ข) วัสดุเนื้อแข็งจะใช้ค่าความเร็วตัดที่มีค่าน้อยกว่าวัสดุเนื้ออ่อน

ค) วัสดุของมีดตัดที่ทำมาจากโลหะแข็งจะใช้ค่าความเร็วรอบสูงกว่ามีดตัดจำพวก (HSS) เช่น มีดกลึง ดอกสว่าน

ง) ในกรณีที่มีการหล่อเย็น จะสามารถใช้ความเร็วรอบได้สูงกว่าการที่ไม่ใช้น้ำหล่อเย็น

2.3.1.3 การหาความเร็วตัดในงานกลึง หมายถึง ความเร็วในการตัดเฉือนชิ้นงานเมื่อชิ้นงานหมุนครบ 1 รอบแสดงหน่วยเป็น เมตรต่อนาที ซึ่งมีสูตรมนการคำนวณดังนี้

กำหนดให้ V คือ ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)

กำหนดให้ D คือ ขนาดความโตของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

กำหนดให้ N คือ ค่าความเร็วรอบของเพลาใน 1 นาที (รอบต่อนาที)

ความเร็วตัด $v = \frac{\pi d \times n}{1000}$ เมตรต่อนาที (2-1)

ความเร็วรอบ $n = \frac{1000 \times v}{\pi d}$ รอบต่อนาที (2-2)

เวลากลึงปอก $th = \frac{l \times i \times \pi \times d}{s \times v \times 1000}$ นาที (2-3)

กำหนดให้ th คือเวลากลึงปอกหน่วยคือนาที

l คือความยาวของชิ้นงานที่กลึงรวมช่วงหน้าและหลัง หน่วยคือนาทีต่อมิลลิเมตร

i คือจำนวนครั้งที่กลึงออก

d คือขนาดของชิ้นงานหน่วยคือมิลลิเมตร

s คือความกว้างของรอยกลึง

v คือความเร็วตัดหน่วยคือเมตรต่อนาที

n คือความเร็วรอบหน่วยคือรอบต่อนาที

ตารางที่ 2-3 แสดงความเร็วตัดของงานกลึง

วัสดุงาน	มีดกลึง HSS		มีดกลึงโลหะแข็ง		การหล่อเย็น
	กลึงหยาบ	กลึงละเอียด	กลึงหยาบ	กลึงละเอียด	
เหล็ก St.40	25	35	140	160	น้ำมันสบู่
เหล็ก St.70	17	22	100	125	น้ำมันสบู่
เหล็ก St.100	12	17	80	105	น้ำมันสบู่
เหล็กหล่อ	23	30	90	125	แห้ง
ทองเหลือง	65	90	275	380	แห้ง
อะลูมิเนียม	300	600	800	1,200	แห้ง
พลาสติก	-	1,200	-	1,600	แห้ง

2.3.1.3 อัตราป้อน (Feed) หมายถึง การเคลื่อนที่ของมีดตัด หรืองาน ซึ่งเทียบกับการหมุนของชิ้นงานหรือมีดตัด 1 รอบ มีหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร ซึ่งเป็น มิลลิเมตร ต่อรอบ ในกรณีที่ต้องการป้อน กินงานครั้งละน้อยๆ จะสามารถใช้อัตราป้อนกินงานได้ครั้งละมากๆ แต่ถ้าต้องการป้อนกินงานมากจะไม่สามารถใช้อัตราป้อนมากได้เนื่องจาก

2.4 งานเจียระไน (Grinding)

งานเจียระไนได้แก่งานเจียระไนลับคมมีด และเจียระไนผิวงานทั้งที่ชุบแข็ง และไม่ชุบแข็ง ให้เป็นผิวที่ราบเรียบไม่ขรุขระ ผิวงานเป็นได้ทั้งผิวกลมและผิวแบน งานเจียระไนทำให้ชิ้นงานนั้นๆทั้งเที่ยงขนาด และมีลักษณะผิวงานได้คุณภาพ

2.4.1 ความเร็วขอบของหินเจียระไน มีลักษณะการคำนวณเช่นเดียวกับความเร็วตัด ความเร็วรอบมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที เช่น 25 เมตรต่อวินาที เป็นต้น หินเจียระไนยิ่งหมุนด้วยความเร็วขอบมากขึ้นเท่าใดจะยิ่งใกล้จุดอันตราย เพราะจะเกิดแรงเหวี่ยงออกจากศูนย์กลางขึ้นภายในเนื้อหินมากขึ้น หากความเร็วขอบสูงเกินไปหินจะหลุดออกจากกันเป็นชิ้นๆ กระเด็นออกมาทำให้เป็นอันตราย เพื่อเป็นการป้องกันอุบัติเหตุจะใช้ตัวประสานชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อกำหนดความเร็วขอบสูงสุดที่ใช้งาน เช่น หินเจียระไนที่ใช้ตัวประสานเป็นเซรามิคและสารเชิงพืชเมื่อเริ่ม

เจียระไนด้วยมือจะหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุดเพียง 30 เมตรต่อวินาที หินเจียระไนทุกอันเมื่อเริ่มจะใช้งานหนแรกควรทดลองหมุนเปล่าๆ เสียก่อนประมาณสัก 5 นาที

ตารางที่ 2-4 แนวการเลือกหินเจียระไนที่ใช้กับเครื่องเจียระไน

งานเจียระไนนอกวัสดุงาน	**ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางหิน (มม.)**		
	ถึง 350 มม.	**ระหว่าง 350 - 450 มม.**	**ระหว่าง 450 - 600 มม.**
เหล็กชุบแข็ง	EK 60 L	EK 50 L	EK 46 L
เหล็กไม่ชุบแข็ง	NK 60 M	NK 50 M	NK 46 M
เหล็กหล่อ	SC , EK 60 I	SC , EK 50 Jot	SC , EK 46 Jot
งานเจียระไนในวัสดุงาน	**ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางหิน (มม.)**		
	ถึง 16 มม.	**ระหว่าง 16 - 36 มม.**	**ระหว่าง 36 - 80 มม.**
เหล็กชุบแข็ง	EK 80 L	EK 60 K	EK 46 Jot
เหล็กไม่ชุบแข็ง	NK 80 M	NK 60 L	NK 46 Jot
เหล็กหล่อ	SC 80 K	SC 60 Jot	SC 46 I
งานเจียระไนผิวราบวัสดุงาน	**ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางหิน (มม.)**		
	หินจานแบนขนาดไม่เกิน 200 มม.	**หินทรงกระบอกขนาดไม่เกิน 200 มม.**	**หินซี่**
เหล็กชุบแข็ง	EK 46 Jot	EK 36 Jot	EK 30 Jot
เหล็กไม่ชุบแข็ง	EK , NK 46 K	EK , NK 46 K	EK , NK 24 K
เหล็กหล่อ	EK , SC 46 I	EK , Sc 46 I	EK , SC 30 Jot

วิธีคำนวณความเร็วขอบ

V_S = ความเร็วขอบของหินเจียระไนมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

D = ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางของหินมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

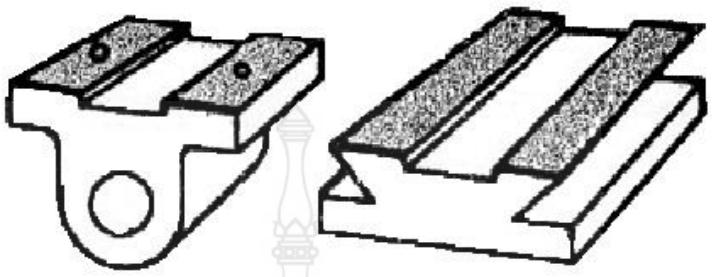
n = ความเร็วรอบของหินมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที

ตัวอย่าง หินเจียระไนขนาด ϕ 275 ขณะหมุนด้วยความเร็วรอบ η = 1700 รอบต่อนาที จะมีความเร็วขอบ υ_s เท่าใด

วิธีคำนวณ $V_S = \dfrac{\pi \times D \times n}{1{,}000 \times 60} = \dfrac{3.14 \times 275 \times 1{,}700}{1{,}000 \times 60} = 24.46 \approx 25$

วิธีคำนวณความเร็วรอบ ความเร็วรอบของหิน $n = \dfrac{V_S \times 1{,}000 \times 60}{\pi \times D}$

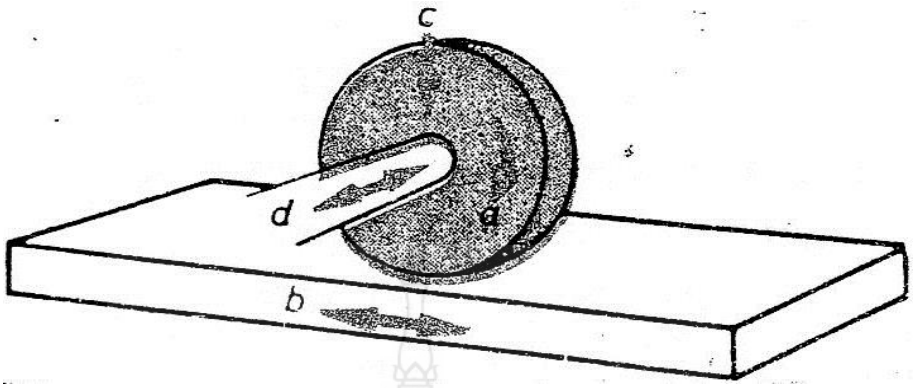
2.4.2 งานเจียระไนราบ งานเจียระไนผิวงานในแนวราบ เจียระไนได้ทั้งงานเจียระไนหยาบหรือละเอียดที่สุด



a b

ภาพที่ 2-2 แสดงตัวอย่างเจียระไนผิวราบดังต่อไปนี้
(a) ผิวใต้กระปุกแบริ่ง
(b) ผิวร่องเลื่อนซึ่งต้องเจียระไนละเอียด

2.4.3 งานเจียระไนละเอียด มีวัตถุประสงค์เพื่อจะทำให้ผิวงานซึ่งผ่านงานเครื่องมือกลอื่นๆ มาแล้วให้ราบเรียบเที่ยงตรงและได้คุณภาพผิว ผิวงานนั้นอาจจะเพิ่งผ่านงานกัดหรืองานไสก็ได้ แต่จะต้องมาเจียระไนละเอียดอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้ขนาดตามพิกัดได้เป็นผิวร่องเลื่อน และเป็นผิวที่ยาวกว้างตามขนาดโดยแท้อีกหนหนึ่ง ตามปกติเมื่อชิ้นงานใดผ่านงานเจียระไนละเอียดแล้วก็ไม่จำเป็นต้องกระทำงานขูดต่อ มีหลายกรณีเหมือนกันที่งานเจียระไนละเอียดนี้เริ่มต้นจากชิ้นงานเริ่มต้นเลยทีเดียว โดยเจียระไนจนเที่ยงขนาดและจนได้คุณภาพผิวชั้นดียิ่ง งานเจียระไนหน้าแผ่นหินและเส้นขอบหินผิวงานอาจเจียระไนหน้าแผ่นหินหรือเส้นขอบหิน ก็อาจกระทำได้ดังนี้เครื่องเจียระไนด้วยหน้าแผ่นหินเครื่องเจียระไนชนิดนี้ เพลาหินเป็นได้ทั้งเพลาตั้งและเพลานอนโต๊ะงานเจียระไนอาจเป็นได้ทั้งโต๊ะยาวหรือโต๊ะกลมเครื่องเจียระไนด้วยเส้นขอบหินเครื่องเจียระไนชนิดนี้เจียระไนได้ทั้งกลมและยาว ภาพที่ 2-3 โต๊ะยาวเลื่อนไปมาได้อยู่บนแคร่ด้วยระบบไฮโดรลิค วิธีป้อนเจียระไนในแนวขวางทำได้โดยทวนเข็มนาฬิกาหรือจะป้อนหินที่หมุนตั้งฉากไปตามแนวยาว



ภาพที่ 2-3 แสดงเจียระไนผิวงานด้วยขอบหินบนโต๊ะยาวดังต่อไปนี้

(a) ทิศทางหมุนตัด

(b) ทิศทางป้อน

(c) ทิศทางป้อนเจียระไนในแนวลึก

(d) ทิศทางป้อนทางด้านข้าง

ภาพที่ 2-4 แสดงแท่นจับแม่เหล็ก

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านขั้นต่างๆ มาก่อนแล้วให้จับด้วยแท่นจับแม่เหล็กดังภาพที่ 2-4 การจับด้วยแท่นจับแม่เหล็กกินเวลาจับงานน้อยมาก เพราะแรงแม่เหล็กเป็นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงแต่เปิดสวิตซ์แม่เหล็กก็จะทำงานทันที แท่นจับที่ทำด้วยแม่เหล็กถาวรก็มีที่ใช้เหมือนกัน ซึ่งไม่จำเป็นต้องผ่านกระแสเข้าไปแต่อย่างใด ชิ้นงานที่จับด้วยแท่นจับแม่เหล็กถาวรนี้ ถ้าเป็นเหล็กกล้าหรือเหล็กหล่อ เมื่อเสร็จงานแล้วจะต้องกำจัดสารแม่เหล็กอีกครั้งหนึ่งด้วย

วิธีคำนวณเวลางานเจียระไนด้วยหน้าแผ่นหิน

l = ความยาวชิ้นงาน

L = ความยาวงานเจียระไน

i = จำนวนขั้นที่เจียระไนออก

V = ความเร็วเลื่อนของโต๊ะมีหน่วยเป็นเมตรต่อนาที

วิธีคิดให้คิดเป็นคู่จังหวะชัก

$$\text{เวลา} \quad th = \frac{2 \times L \times i}{V \times 1{,}000} \tag{2-4}$$

งานเจียระไนด้วยเส้นขอบหิน

b = ความกว้างชิ้นงาน

B = ความกว้างงานเจียระไน

S = ช่วงป้อนในแนวข้าง มิลลิเมตรหนึ่งจังหวะชัก

$$\text{เวลางานชนิดไม่มีช่วงป้อน ในแนวข้าง} \quad th = \frac{2 \times L \times i}{V \times 1{,}000}$$

$$\text{เวลางานชนิดมีช่วงป้อน ในแนวข้าง} \quad th = \frac{2 \times L \times B \times i}{V \times 1{,}000 \times s} \tag{2-5}$$

2.5 การชุบแข็ง (Hardening)

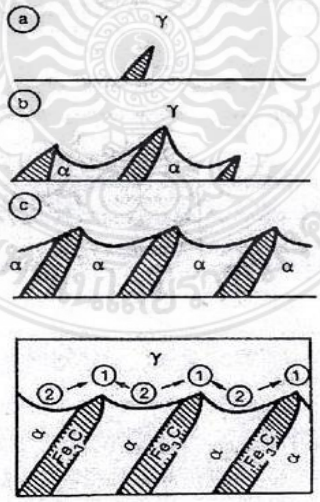
การชุบแข็งคือ การอบชุบด้วยความร้อนเพื่อต้องการให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อต้านทานต่อการเสียดสีในขณะที่ใช้งาน การชุบแข็งเป็นวิธีที่จะได้โครงสร้างของเหล็ก มาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ขึ้นอยู่กับความแข็งขั้นสุดท้ายที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเตนไนท์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้น จะได้เหล็กที่มีความแข็งสูง และการเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวจะต้องมีองค์ประกอบสำคัญอย่างน้อย 3 ประการคือ

ปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสำคัญ ที่ทำให้ออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ความแข็งของมาร์เทนไซต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนของเหล็กกล้า เช่น เหล็กคาร์บอน 1.55% 12% Cr (เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น) สามารถชุบแข็งได้ความแข็งประมาณ 60 HRC ซึ่งขณะที่เหล็กคาร์บอน 0.21% 0.52% Cr ได้ความแข็งภายหลังการชุบแข็งประมาณ 35 HRC

อุณหภูมิก่อนการชุบแข็ง คืออุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์ ก่อนการชุบน้ำ น้ำมัน หรืออากาศ ซึ่งถ้าอุณหภูมิของเหล็กสูงไม่เพียงพอที่ทำให้เปลี่ยนไปเป็นออสเตนไนท์ทั้งหมด ความแข็งจะไม่สูงเท่าที่ควรเนื่องจากว่ามาร์เทนไซต์ที่ได้จะต้องมาจากออสเดนไนต์เท่านั้น

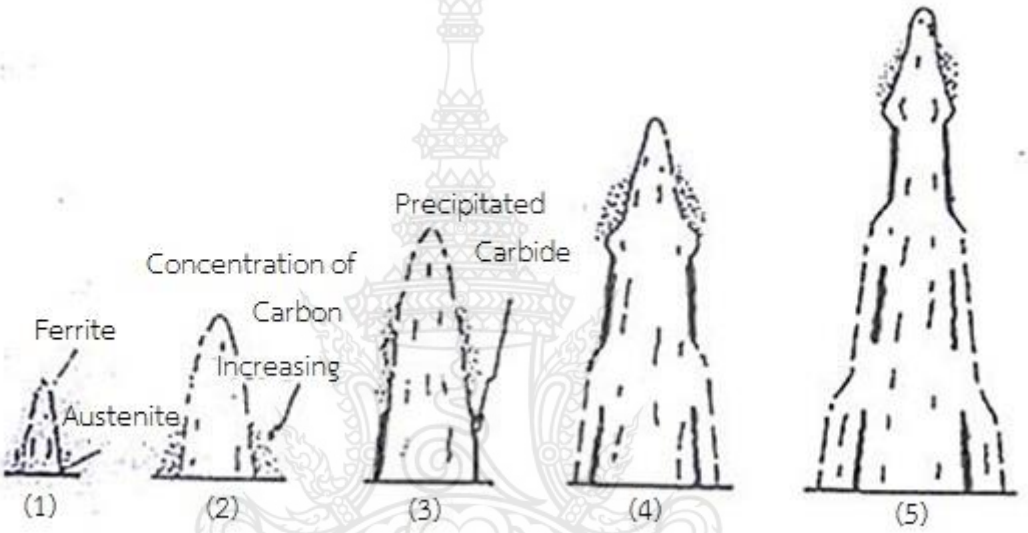
อัตราการเย็นตัวที่ออสเตนไนท์ จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนต์ จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพียงพอ หรือที่เรียกว่าอัตรากรเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ออสเตนไนท์จะไม่มีโอกาสเปลี่ยนแปลงเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์แต่จะได้เพิร์ลไลต์ หรือ ซอร์ไบท์แทน

2.5.1 ซอร์ไบท์ (Sorbite) ผู้ที่ทำการศึกษาและใช้ชื่อโครงการนี้คือ Clifton Sorby ได้พบว่าซอร์ไบท์ก็คือโครงสร้างที่เกิดจากออสเตนไนท์แตกตัวให้เฟอร์ไรท์และซีเมนต์ไตต์เช่นเดียวกับเพิรไลท์ โดยการให้กำเนิดนิวเคลียส์ ของซีเมนต์ไตต์ขึ้นมาก่อนตามบริเวณรอบ ๆ เกรน เมื่อขยายตัวก็ดึงเอาอะตอมของคาร์บอน บริเวณรอบ ๆ เข้ามารวมตัวทำให้บริเวณข้างเคียงกลายเป็นบริเวณที่มีอะตอมคาร์บอนตกกลายเป็นจุดที่เกิดเฟอร์ไรท์ขึ้นมาทั้งสองด้านและเมื่อเกิดเฟอร์ไรท์แล้ว จะเกิดมีการขยายตัวทำให้มีปริมาณคาร์บอนถูกผลักออกไปทำให้เกิดสภาพพร้อมที่จะเกิดซีเมนต์ไตต์ขึ้นได้ทั้งในบริเวณข้างเคียงจะสลับกันไปดังนี้ แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงการเคลื่อนไหวของอะตอมคาร์บอนเป็นไปได้ยาก แถบของเฟอร์ไรท์กับซีเมนต์ไตต์จะเกิดได้เล็กมาก จนไม่สามารถจะดูได้จากกล้องไมโครสโคปธรรมดาจะศึกษาโครงสร้างได้จะต้องอาศัยกล้องไมโครสโคปอิเล็กตรอน ซึ่งมีกำลังขยายได้สูงมาก คุณสมบัติของ Sorbite จะมีความแข็งประมาณ 350 HB เมื่อเทียบกับเพิร์ลไลท์มีความแข็งประมาณ 180 HB



ภาพที่ 2-5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์เป็นเฟอร์ไรท์และซีเมนไตต์ที่จะได้โครงสร้างเพิร์ลไลท์หรือซอร์ไบท์

2.5.2 เบนไนท์หรือทรูสไตต์ (Bainite Or Troosite) เป็นโครงสร้างที่ได้จากออสเตนไนท์แตกตัวภายใต้อัตราการเย็นตัวที่สูงกว่า Sorbite การเกิดยังคงมีกลไกคล้ายคลึงกัน คือมีการให้กำเนิดนิวเคลียสและมีการขยายตัวแต่เบนไนท์จะทำให้กำเนิดเฟอร์ไลท์ก่อนโดยมีลักษณะคล้ายเข็มยื่นเข้าสู่ใจกลางของเกรนออสเตนไนท์เมื่อเฟอร์ไรท์ขยายตัวก็จะผลักอะตอมของคาร์บอนออกไปทางด้านข้างทำให้เกิดบริเวณที่มีคาร์บอนหนาแน่นตามบริเวณข้างของเฟอร์ไรท์และเมื่อบริเวณคาร์บอนสูงขึ้นจนถึงประมาณ 6.67% ก็จะเกิดเป็นแถบบางๆ ของซีเมนต์ไปเป็นระยะๆ



ภาพที่ 2-6 แสดงขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงของออสเตนไนท์ไปเป็นเบนไนท์

2.5.3 แผนภาพทีทีที (TTT - Diagram) ย่อมาจาก (Time - Temperature - Transformation) เป็นแผนภาพที่แสดงจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดของการเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็กกล้าขึ้นกับเวลา การใช้แผนภาพสมดุลเหล็ก - เหล็กคาร์ไบต์ เพื่อดูชนิดเกรนของเหล็กกล้านั้น ไม่สามารถใช้กับกรณีที่ การเย็นตัวของเหล็กเป็นไปอย่างรวดเร็ว จากบริเวณออสเตนไนท์ เช่นในกรณีของการชุบแข็ง ดังนั้นจึงได้มีความคิดแผนภาพทีทีทีขึ้น เพื่อให้ทราบถึงชนิดของเกรนของเหล็ก ในกรณีที่มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว แผนภาพทีทีที มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

2.5.3.1 ชนิดการแปลงที่อุณหภูมิแบบต่อนเนื่อง (Continuous Transformation) แผนภาพชนิดนี้จะมีประโยชน์ในทางปฏิบัติต่อการชุบแข็งอย่างมาก เช่น การหาค่าความแข็งของเหล็กกล้าหลังจากการชุบแข็ง มุมซ้ายบน คืออุณหภูมิชุบแข็ง ซึ่งเป็นจุดเริ่มการเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง เส้นการเย็นตัวซ้ายสุด เป็นเส้นที่เย็นตัวเร็วสุด และเส้นขวาสุดเป็นเส้นที่มีการเย็นตัวช้าสุด จำนวนเปอร์เซ็นต์ของเกรนแต่ละชนิด แสดงให้เห็นบริเวณจุดตัดของเส้นโค้งกับเส้นเย็นตัว เส้นเย็นตัวซ้ายสุดจะเกิดแต่เกรนมาร์เทนไซต์ แต่มีบางส่วนเป็นรีเทนออสเตนไนท์

2.5.3.2 ชนิดการแปลงที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Transformation) แผนภาพชนิดนี้ใช้กรณีที่การเย็นตัวของออสเตนไนท์เป็นไปด้วยความเร็ว แต่อุณหภูมิที่ลดลงนี้ ยังไม่ถึงเส้นเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นเกรนมาเตนไซต์ Ms จึงทำให้เกรนออสเตนไนท์คงสภาพอยู่ในช่วงแรกหลังจากที่เวลาผ่านไปจนพบกับเส้นโค้งเส้นแรก ซึ่งเป็นเส้นเริ่มเปลี่ยนโครงสร้างก็จะเริ่มเกิดโครงสร้างชนิดใหม่ขึ้น ซึ่งจะเป็นชนิดใดนั้นขึ้นกับระดับของอุณหภูมิที่หยุดไว้ โครงสร้างนี้จะเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาที่คงอุณหภูมินั้น และจะสิ้นสุดการเปลี่ยนโครงสร้างเมื่อเวลาผ่านไปจนตัดกับเส้นโค้งเส้นที่สอง ซึ่งเป็นเส้นสิ้นสุด ในกรณีการเย็นตัวผ่านเส้น Ms ลง โครงสร้างจะเปลี่ยนจากออสเตนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ทันที ซึ่งหมายถึงการหยุดของอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการควบคุมโครงสร้างในกรณีนี้ จึงไม่ใช่การเย็นตัวชนิดการแปลงที่อุณหภูมิคงที่ จำนวนมาร์เทนไซต์จะเพิ่มขึ้นได้ก็ต่อเมื่อให้มีการเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือในทางปฏิบัติจะไม่สามารถทำให้ได้มาร์เดนไซต์ 100% เพราะจะเกิดรีเทนออสเตนไนท์จำนวนหนึ่ง ซึ่งแม้อุณหภูมิจะลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วก็ตาม ก็ยังคงสภาพเป็นออสเตนไนท์อยู่ ออสเตนไนท์ประเภทนี้จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้ โครงสร้างมาร์เทนไซต์ในเหล็กเป็นสิ่งสำคัญ ที่ต้องพิจารณาโครงสร้างการอบมาร์เทนไซต์ เหล็กจะต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการอบเหล็กที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และที่พบการปฏิบัติจะใช้อุณหภูมิต่ำมากๆ ถึง –73 องศาเซลเซียสก็ต่อเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไปอีกจนถึงเส้นสิ้นสุดการเปลี่ยนเป็นเกรนมาร์เทนไซต์ Mf เกรนของเหล็ก เมื่อการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กกล้าเป็นแบบให้อุณหภูมิคงที่เหนือเส้น Ms เช่น การชุบแข็งแบบมาร์เทมเปอริง การชุบแข็งแบบออสเทมเปอริง และยังสามารถช่วยกำหนดอุณหภูมิอุ่นชิ้นงาน (Preheat) สำหรับงานเชื่อมได้ด้วย

2.5.3.3 แผนภาพทีทีทีทั้งสองชนิดนี้จะใช้ได้กับอุณหภูมิชุบแข็งตามที่กำหนดในแผนภาพเท่านั้น ถ้าอุณหภูมิชุบแข็งสูงกว่าในแผนภาพเส้นโค้งจะเลื่อนไปทางซ้าย นอกจากนั้นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อตำแหน่งของเส้นโค้งต่างๆ คือส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแต่ละชนิด เช่น ถ้ามีคาร์บอนหรือสารเจือเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นโค้งหรือปลายจมูกของเบไนท์เลื่อนไปทางขวาของแผนภาพ ฉะนั้นเหล็กกล้าทุกชนิดจึงต้องมีแผนภาพทีทีทีเฉพาะของเหล็กกล้าแต่ละชนิดนั้น

2.5.4 เวลาของการชุบแข็ง ช่วงเวลาของการชุบแข็งเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งของการชุบแข็งชิ้นงาน เป็นช่วงอุณหภูมิของชิ้นงานค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามหลังอุณหภูมิเตาชุบแข็ง จึงต้องใช้เวลาคงอุณหภูมิช่วงเวลาหนึ่งที่ทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับอุณหภูมิของเตาชุบแข็ง ปกติการกำหนดเวลาคงอุณหภูมิของการชุบแข็งนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญคือ ขนาดของชิ้นงานขนาดของเตาอบชุบแข็ง ความสามารถของการเพิ่มอุณหภูมิของเตาชุบแข็ง เหล็กสามารถถ่ายเทความร้อนจากเตาชุบแข็งและอุณหภูมิภายในเตาจากผิวงานสู่แกนกลางชิ้นงาน ซึ่งอัตราความร้อนที่เพิ่มขึ้นนั้นชิ้นงานจะต้องมีการนำความร้อนได้ดีด้วย การกำหนดเวลาในการคงอุณหภูมิของชิ้นงานนั้น

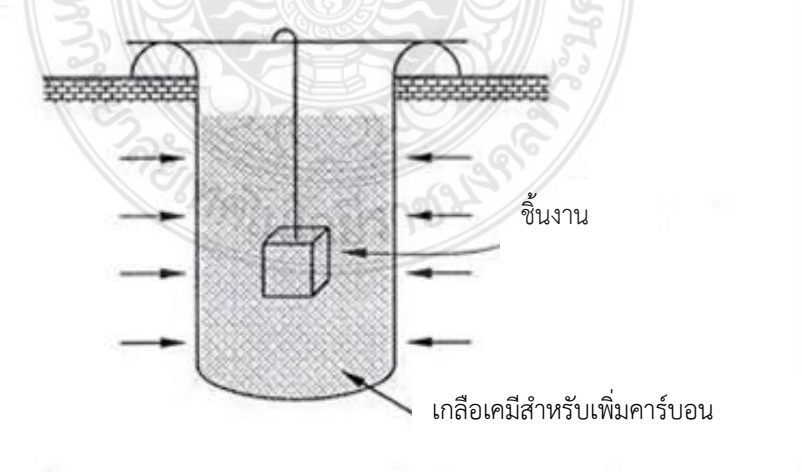
เพื่อให้เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวงานและแกนกลางชิ้นงานน้อยที่สุดหรือให้มีอุณหภูมิใกล้เคียง

2.5.5 การชุบแข็งแบบคาร์บุไรซิง การชุบแข็งวิธีนี้จะใช้เมื่อต้องการชุบผิวแข็งชิ้นงาน ซึ่งทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งปกติจะไม่สามารถทำการชุบแข็งได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องการเพิ่มปริมาณคาร์บอนบริเวณผิวชิ้นงานเพื่อให้มีคาร์บอนมากพอ คาร์บอนนี้อาจได้มาจากสารของแข็งของเหลวหรือก๊าซ โดยจะต้องทำให้อะตอมคาร์บอนแพร่ (Diffuse) เข้าไปในผิวเหล็กกล้าซึ่งชิ้นงานจำเป็นต้องทำให้ร้อน จนมีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac3 เพราะที่อุณหภูมินี้ความสามารถและความเร็วในการแพร่ของคาร์บอนเข้าไปในเหล็กกล้าเป็นไปได้อย่างมาก บริเวณผิวซึ่งต้องการชุบแข็งจะต้องให้คาร์บอนแพร่เข้าไปประมาณ 0.8% และไม่ควรให้คาร์บอนมากกว่านี้ เพราะถ้ามีคาร์บอนมากเกินไปหลังจากการชุบจะมีซีเมนไทต์หลงเหลืออยู่มากเกินไป ซึ่งมีผลเสีย คือมีความเปราะสูง โอกาสที่ผิวแตกร้าวจะมีมาก หรืออาจมีออสเตนไนท์ตกค้างมาก การควบคุมคาร์บอนทำได้โดยหลายวิธี เช่น โดยการเลือกชนิดของสารเติมคาร์บอนซึ่งมีหลายชนิด นอกจากนั้นยังสามารถเลือกเวลาและอุณหภูมิเติมคาร์บอน เพื่อความเหมาะสมตามความต้องการใช้อุณหภูมิเติมคาร์บอนสูงจะทำให้คาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปได้อีกและรวดเร็ว สำหรับเวลาที่เลือกใช้

ภาพที่ 2-7 แสดงการเติมคาร์บอนด้วยสารของแข็ง (Packed Carburizing) และผงถ่านอัดเม็ดสำเร็จรูป

สารเติมคาร์บอนที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วย ถ่านไม้ ถ่านหิน เช่น ถ่านไม้ 60% ถ่านหินสีน้ำตาล 40% ผสมกับสารเร่งปฏิกิริยาแบเรียมคาร์บอเนตจำนวนหนึ่ง ถ้าบริเวณใดไม่ต้องการชุบผิวแข็ง ก็สามารถทำได้โดยการพอกด้วยดินเหนียว หรือชุบผิวด้วยทองแดง อุณหภูมิที่ใช้

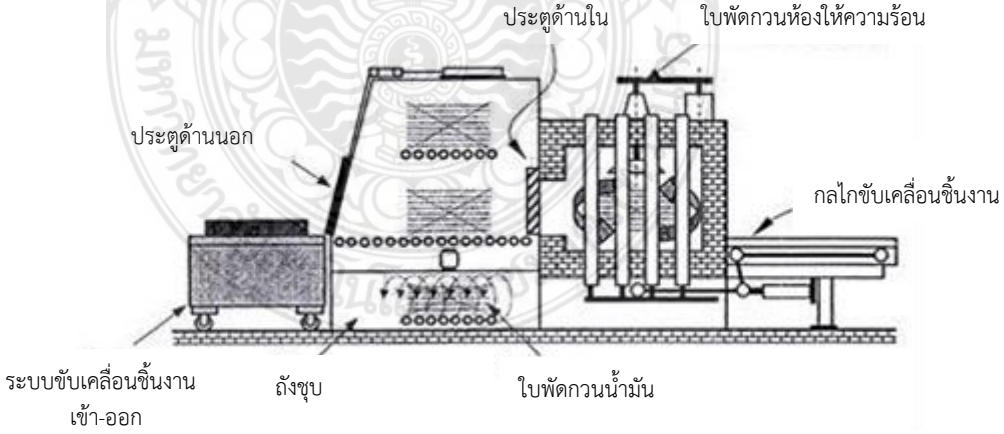
ในการเติมคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 900-950 องศาเซลเซียส ถ้าใช้เวลาเติม 4 ชั่วโมง คาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปในผิวประมาณ 1 มิลลิเมตร หลังจากชิ้นงานถูกเติมคาร์บอนเพียงพอแล้ว จำเป็นต้องทำการจุ่มชุบชิ้นงานในตัวกลาง เช่น น้ำหรือน้ำมันชุบแข็ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กกล้า ถ้าชิ้นงานทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไม่มีสารเจือ จำเป็นต้องจุ่มชุบลงในน้ำ แต่ถ้าชิ้นงานมีสารเจือ เช่น โครเมียม 1% ก็สามารถจุ่มชุบลงในน้ำมันชุบแข็งได้ เนื่องจากโครเมียมทำให้อัตราเย็นตัววิกฤตของเหล็กกล้าลดลงในทางปฏิบัติการนำชิ้นงานออกจากภาชนะที่บรรจุรวมกับผงถ่าน ขณะอุณหภูมิสูงมักยุ่งยาก เนื่องจากผงถ่านจะลุกไหม้เมื่อสัมผัสกับอากาศ ดังนั้นบ่อยครั้งต้องยอมให้ชิ้นงานที่บรรจุในกล่องถ่านเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงแยกชิ้นงานออกจากผงถ่าน และนำไปให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้อุณหภูมิชุบแข็งต่ำลงอยู่ระหว่าง 820-860 องศาเซลเซียสได้ เพื่อให้การเสียรูปของชิ้นงานไม่สูงมากสำหรับสารเติมคาร์บอนที่เป็นของเหลวเช่น โปตัสเซียมไซยาไนต์ (KCN) หรือโซเดียมไซยาไนต์ (NaCN) ผสมกับคลอรีน สารนี้เมื่อได้รับความร้อนสูง เกลือไซยาไนต์จะแตกตัว และคาร์บอนจะแพร่เข้าไปในผิวเหล็ก โดยจะรวมกับเหล็กเป็นเหล็กคาร์ไบต์ การเติมคาร์บอนวิธีนี้แม้ว่าจะมีราคาสูง แต่เวลาที่ใช้เติมจะสั้นกว่า การแพร่ของคาร์บอนจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ แต่ข้อเสียคือการปกปิดบริเวณที่ไม่ต้องการชุบแข็งจะทำได้ยากกว่า และยังมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไอระเหยของเกลือนำไปสู่การกัดกร่อนและไซยาไนต์เป็นสารพิษ การปฏิบัติงานต้องระมัดระวังเรื่องความสะอาด รวมถึงอาจมีการปนเปื้อนเข้าไปในชิ้นงานและตกค้าง ซึ่งต้องคำนึงถึงชิ้นงานที่นำไปใช้งานว่าเกี่ยวข้องกับการบริโภคหรือไม่ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวปัจจุบันจึงมีการใช้น้อยลง



ภาพที่ 2-8 แสดงหลักการเติมคาร์บอนที่ผิว โดยสารเติมคาร์บอนของเหลว (เกลือเคมี)

สารเติมคาร์บอนที่อยู่ในรูปก๊าซที่ใช้ ได้แก่ ก๊าซเชื้อเพลง เช่น โพเพน แก๊สปิโตรเลี่ยมเหลว (LPG) ผสมกับแก๊สพาหะ (Carrier Gas) เอ็นโดเทอร์มิกแก๊ส (Endothermic Gas) ข้อดีของวิธีนี้ คือ การควบคุมจำนวนคาร์บอน ทำได้ง่ายกว่า ใช้พลังงานน้อย และเวลาสั้นกว่า ชิ้นงานที่ได้ผิวจะสะอาด แต่ข้อเสีย คือ เครื่องจักรมีราคาแพง

2.5.6 หลักการทำงานของเตาชุบแข็งแบบควบคุมบรรยากาศ สำหรับชุบผิวแข็งแบบแก๊สคาร์บุไรซิ่ง ซึ่งเป็นเตาชุบแข็งที่มีราคาค่อนข้างสูง โดยเตาถูกแบ่งเป็นสองส่วนด้านในเป็นส่วนชิ้นงานถูกให้ความร้อน 900-950 องศาเซลเซียส ก๊าซพาหะและก๊าซเติมคาร์บอนจะถูกฉีดเข้าไปในห้องให้ความร้อนนี้ คาร์บอนจากก๊าซจะแพร่เข้าสู่ผิวชิ้นงาน ความลึกที่คาร์บอนสามารถเข้าไปได้ขึ้นกับอุณหภูมิ เวลา ค่า CP (Carbon Poteential) ของก๊าซในห้องให้ความร้อน และชนิดเหล็กกล้าของชิ้นงานตรวจสอบ เมื่อได้ความลึกของคาร์บอนที่ต้องการแล้ว ความร้อน และชนิดเหล็กกล้าของชิ้นงานตรวจสอบ เมื่อได้ความลึกของคาร์บอนที่ต้องการแล้วชิ้นงาน มักถูกลดอุณหภูมิลงเหลือ 820-860 องศาเซลเซียส ก่อนทำการจุ่มชุบเพื่อลดการเสียรูปของชิ้นงานหลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกขับเคลื่อนออกจากห้องให้ความร้อนมาอยู่เหนือถังน้ำมันชุบแข็ง และถูกจุ่มชุบโดยชิ้นงานจะไม่สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศเลย ทำให้ผิวชิ้นงานที่ได้สะอาดไม่มีออกไซด์ที่ผิว ปัจจุบันเตาชุบแข็งแบบควบคุมบรรยากาศสามารถควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถควบคุมคุณภาพ เช่นค่าความแข็ง ชั้นแข็งลึก (Case Depth) ได้อย่างแม่นยำ และสม่ำเสมอมากขึ้น



ภาพที่ 2-9 แสดงเตาชุบแข็งแบบควบคุมบรรยากาศ สำหรับชุบผิวแข็งแบบแก๊สคาร์บุไรซิ่งและแก๊สคาร์โบไนโตรดิ่ง

2.5.7 การจุ่มชุบ (Quenching) เป็นการทำให้เหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ขณะที่เหล็กเป็นโครงสร้างออสเตนไนท์ที่อุณหภูมิสูง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของสารชุบ ขนาดของชิ้นงานและชนิดของเหล็ก ซึ่งขั้นตอนของการเย็นตัวในการจุ่มชุบนั้นจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

2.5.7.1 เป็นช่วงเกิดหมอกควันของไอ

2.5.7.2 เป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากไอมาเป็นเดือด

2.5.7.3 เป็นการระบายความร้อนของเหล็กหรือเป็นการถ่ายเทความร้อนสู่สารชุบ

จากขั้นตอนทั้ง 3 เป็นการแสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของการจุ่มชุบเหล็กตั้งแต่เกิดเป็นหมอกควันของไอปกคลุมชิ้นงานในขณะจุ่มชุบ ช่วงแรกเป็นการถ่ายเทความร้อนไปสู่รอบชิ้นงาน หรือถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานไปสู่สารชุบในลักษณะที่เป็นหมอกควันของไอต่อมาหมอกควันค่อยๆ หมดไปแต่จะเกิดความเดือดของสารชุบรอบๆ บริเวณชิ้นงานและจะแผ่ออกไป ซึ่งความร้อนจะไม่แผ่ขยายออกไปที่สารชุบ เนื่องจากฟองของไอความร้อน จะเป็นตัวกันความร้อนไม่ให้ขยายออกไปอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องทำให้ฟองไอเดือดกระจายออกไปจากผิวงานโดยการเคลื่อนที่ชิ้นงานไปมา และขั้นตอนสุดท้ายเป็นช่วงของการระบายความร้อนไปสู่ตัวกลางที่เป็นสารชุบอย่างช้าๆ ชิ้นงานจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด

2.5.8 การอบคืนตัว (Tempering) เหล็กเครื่องมืองานเย็นหลังผ่านการชุบแข็ง ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีเนื่องจากภายในเหล็กมีความเครียดมีออสเตนไนท์ตกค้างอยู่ (Retain Austenite) มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์มีคาร์ไบต์และมีซีเมนต์ไตต์กระจัดกระจายอยู่ทั่วไป ขณะที่เหล็กมีคุณสมบัติทางด้านความแข็งสูง แต่ขาดคุณสมบัติทางด้านความเหนียวไม่ทนทานต่อการกระแทกและความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการบิดงอ หรืออาจเกิดการแตกร้าว ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน จึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมอีกครั้งเพื่อคลายเครียดภายในเหล็กให้หมดไป หรือให้เหลือน้อยที่สุด และในขณะเดียวกันทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์แตกตัวเป็นโครงสร้างกึ่งสมดุล (Tempered Martensite) และออสเตนไนต์ตกค้างเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ใหม่ การปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กก่อนนำไปใช้งานคือ การอบคืนตัวปกติทั่วๆ ไป จะทำให้ความเครียดลดลงก็จริง แต่ก็มีผลอย่างกว้างขวางต่อคุณสมบัติของเหล็ก เช่น ความแข็งจะลดลงแต่ความเหนียวจะสูงขึ้น สำหรับการอบคืนตัวเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นต้องมีการอบคืนตัวอย่างน้อย 2 ครั้ง ทั้งที่ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กเครื่องมืองานเย็นซึ่งการอบคืนตัวในครั้งแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดในเหล็ก เนื่องจากการชุบแข็งที่มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูงและเพื่อเป็นการเปลี่ยนแปลงออสเตนไนท์ตกค้างให้เป็นโครงสร้างมาเทนไซต์ใหม่ที่มีความแข็ง การอบคืนตัวครั้งแรกนี้ถ้าเป็นการอบคืนตัวเพื่อนำไปใช้งาน (Work Tempering) จะต้องมีอุณหภูมิอบคืนตัวสูงกว่าอุณหภูมิคืนตัวในครั้งที่ 2 แต่ถ้าเป็นการอบตัวเพื่อคลายเครียดที่เกิดจากการชุบแข็งอย่างเดียวเท่านั้น (Maximum Secondary Hardness) อุณหภูมิอบคืนตัวครั้งแรกจะต้องต่ำกว่า

อุณหภูมิอบคืนตัวเพื่อนำไปใช้งานเสมอของการอบคืนตัว จึงเป็นอุณหภูมิสูงสุดของการอบคืนตัว และการอบคืนตัวครั้งสุดท้ายเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดความเค้น (Stress Reriel) จาก เปลี่ยนแปลงของออสเตนไนท์ตกค้างและคลายความเครียดภายในเหล็ก การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง จุลภาคระหว่างการอบตัวของเหล็กเครื่องมือเย็น ขึ้นอยู่กับเวลาในการอบตัวของเหล็ก โดยปกติ จะไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมงในแต่ละครั้งของการอบคืนตัว โดยส่วนใหญ่บริษัทผู้ผลิตเหล็กจะแนะนำ ให้เวลาในการอบคืนของแต่ละครั้งไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง เพื่อทำให้มีเวลาเพียงพอต่อการปรับปรุง คุณสมบัติของเหล็กและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กได้อย่างเหมาะสม และต้องมีการอบคืนตัว ไม่น้อยกว่า 2 ครั้ง การอบคืนตัวควรให้มีการอัตราการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ เพื่อให้อุณหภูมิที่ เพิ่มขึ้นกระจายสู่ชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง และทำให้แผ่ความร้อนอย่างช้าๆ สู่แกนซึ่งทำให้เหล็ก คลายความเครียดลงได้ และไม่ทำให้เกิดการเสียรูปหรือเกิดความแตกร้าว ผลของการอบคืนตัว เพื่อปรับสภาพคุณสมบัติภายในเหล็กให้เหมาะสมกับการใช้งาน และความแข็งของการนำไปใช้งาน จึงเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิการอบคืนตัวอย่างหนึ่งด้วย

2.5.9 การชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา (Sub Zero การบำบัดเย็น) ถือว่าเป็น สิ่งจำเป็นในการปรับปรุงคุณภาพเหล็กซึ่งการอบชุบที่อุณหภูมิออสเตไนต์สามารถทำให้เย็นตัวลงด้วย สารชุบ เพื่อให้เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่ Retrained Austentie ยังเป็นอุปสรรคในการ ชุบแข็ง จึงต้องเพิ่มกรรมวิธี (Sub Zero Treatment) เพื่อช่วยลดปัญหานี้ การเกิดออสเทนไนท์ ตกค้างถือว่าเป็นปัญหาสำคัญในการชุบแข็งของอุตสาหกรรมด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็ก ด้วยการชุบแข็งดังนั้นการศึกษา ถึงแนวทางในการลดปัญหา ออสเทนไนท์ตกค้างจึงเป็นสิ่งจำเป็น ต่อการศึกษาด้านวิศวกรรมขั้นพื้นฐานในประเทศซึ่งมีผู้ให้ความสำคัญและสนใจน้อยมาก เมื่อเทียบ กับอุตสาหกรรมอื่นๆ และในส่วนของอุตสาหกรรมและเอกชนนั้น มีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมา ประกอบการใช้งานในการชุบแข็ง ดังนั้นจึงมีการศึกษาทดลองการชุบแข็งเหล็กกล้า เพื่อหาแนว ทางลดเปอร์เซ็นต์การตกค้างของโครงสร้างออสเตนไนท์ โดยกรรมวิธีการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า ศูนย์องศา (Sub Zero Treatment) เพื่อเป็นการลดปริมาณออสเตนไนท์เหลือค้าง จะทำโดย การจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวหรือสารรีฟริจจิแรนด์ ที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง -79 ถึง -196 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นกรรมวิธีของ British Oxyen Company ใช้ชื่อกรรมวิธีนี้ว่า Ellentie Processโดยการ ใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นตัวดึงความร้อนจากสารชุบ ซึ่งเป็นสารละลายออร์แกนนิก (Organic Liquid) ในอุตสาหกรรมใช้ Methytaed Spirits ก่อนการชุบต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ต้องทำการอบคลายตัว ที่ 120-150 องศาเซลเซียส เพื่อลดความเครียดที่เกิดจากการชุบในครั้งแรก การอบโครงสร้าง มาร์เทนไซต์ในเหล็กจะต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการอบเหล็กที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์และที่พบจะต้อง ใช้อุณหภูมิต่ำมากๆ ถึง -73 องศาเซลเซียส เพื่อที่ให้ได้โครงสร้างที่มาร์เทนไซต์สมบูรณ์

ขั้นตอนของการชุบที่ต่ำกว่าศูนย์องศา หรือบางที่จะใช้คำว่า Stabilization ซึ่งมีควาหมายถึงการทำให้เหล็กคงรูป และขนาดที่แน่นอนมีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยมาก โดยการทำให้ออสเตนไนท์เหลือค้าง (Retrained Austentie) เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ให้ได้มากที่สุด ทั้งนี้เพราะเหล็กมีส่วนผสมธาตุต่างๆ ในปริมาณสูง ซึ่งมีผลในการลดอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์ในสารชุบที่อุณหภูมิห้อง จึงทำให้ยังคงมีออสเตนไนท์เหลือค้างอยู่จำนวนหนึ่ง โดยหลักการทั่วไปแล้วไม่ต้องการให้มีออสเทนไนต์เหลืออ้างภายหลังการชุบแข็งโดยเหตุผลสองประการที่สำคัญคือออสเตนไนท์ เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งต่ำภายหลังการชุบแข็งมีออสเตนไนท์เหลือค้างปริมาณสูงความแข็งของเหล็กก็จะยิ่งน้อยกว่าที่ควรเป็นออสเตนไนท์เหลือค้างมีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ได้เมื่อถูกแรงกดหรือดึงในขณะใช้งาน ซึ่งโดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของออสเตนไนท์จะมีปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)ต่ำกว่ามาร์เทนไซต์ ดังนั้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงย่อมมีผลโดยตรงกับขนาดของชิ้นงานกล่าวคือ มีการขยายตัว ซึ่งแน่นอนว่าในสภาพของแข็งและที่อุณหภูมิห้องจะก่อให้เกิดความเครียดขึ้นกับเหล็กอันเป็นผลให้เกิดการแตกร้าวเกิดความเสียหายเพราะอายุของการใช้งานของเครื่องมือจะสั้นลง

กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) เป็นการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนซึ่งให้ได้มาซึ่งความแข็ง ที่เหมาะสมเป็นคุณสมบัติที่ต้องการทางงานด้านโลหะวิทยา การชุบแข็งเป็นกระบวนการที่สำคัญ สำหรับปรับปรุงสมบัติวัสดุ ที่สำคัญการชุบแข็งต้องควบคุมอุณหภูมิ การอุ่นชิ้นงาน การชุบแข็ง การคงอุณหภูมิ อัตราการเย็นตัว การอบคืนตัวที่เหมาะสมเพื่อให้วัสดุมีโครงสร้างเป็นออสเตนไนท์อย่างสมบูรณ์ หลังจากการเย็นตัวจะเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์และควบคุมให้เกิดออสเตนไนท์ตกค้างน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ในการผลิตแท่งมาตรฐานสอบเทียบการวัดความแข็งร็อคเวลล์ควรที่จะเลือกเหล็กที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำกระบวนการผลิต โดยแบ่งออกเป็นการชุบแข็งและกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ต้องมีการเลือกกรรมวิธีที่เหมาะสมกับเหล็กที่จะนำมาผลิตโดยกรรมวิธีใดกรรมวิธีหนึ่งที่กล่าวมาตามคุณสมบัติของเหล็ก ในกรรมวิธีการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศา (Sub Zero Treatment) เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางโลหะวิทยาที่จะให้ ออสเทนไนท์เหลือค้าง (Retrained Austentie) เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ให้ได้มากที่สุด ในขั้นตอนนี้ทางผู้วิจัยไม่ทราบว่าผลการทดลอง จะส่งผลต่อชิ้นงานด้านโลหะวิทยา และค่าความแข็งเป็นแบบใด ดังนั้นทางผู้วิจัยจะทำการศึกษากระบวนการทั้งหมดเพื่อปรับปรุงโครงสร้างและเก็บผลการทดลองต่อไป

2.6 ข้อกำหนดของการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งร็อคเวลล์ตามมาตรฐานISO6308-3:2005

2.6.1 กรรมวิธีการผลิตและวิธีการของแท่งอ้างอิงทางความแข็ง

2.6.1.1 แท่งอ้างอิงทางความแข็งจะต้องทำมาจากวัตถุดิบ ซึ่งประกอบเป็นเนื้อวัสดุเดียวกัน และต้องผลิตเพื่อใช้เป็นแท่งอ้างอิงความแข็งเท่านั้น

2.6.1.2 ต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และควรมีความหนาระหว่าง 6-16 มิลลิเมตรถ้าผลิตจากเหล็กความหนาต้องไม่ต่ำกว่า 12 มิลลิเมตร

2.6.1.3 แท่งอ้างอิงความแข็งต้องไม่มีอำนาจแม่เหล็กตกค้าง

2.6.1.4 ความราบ (Flatness) ของผิวหน้าแท่งอ้างอิงทางความแข็งต้องไม่มากกว่า 0.01 มิลลิเมตร และพื้นผิวด้านล่างต้องไม่โค้งนูน ความขนานของพื้นผิวทั้งสองด้านต้องไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตรต่อ 50 มิลลิเมตร

2.6.1.5 พื้นผิวด้านหน้าแท่งอ้างอิงความแข็ง ต้องไม่มีตำหนิ และรอยขูดขีดปราศจากออกไซด์ ส่งผลกระทบต่อการวัดค่าความแข็ง ความหยาบผิว (Surface - roughness Ra) ด้านหน้าไม่เกินกว่า 0.0003 มิลลิเมตร และด้านล่าง 0.0008 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2-5 รูปร่างและส่วนขนาดของแท่งอ้างอิงความแข็ง ร็อคเวลล์

ความหนา (ผลิตจากเหล็ก)	ไม่น้อยกว่า 12 มม. และไม่เกิน 16 มม.
ความราบของผิวบน (Flatness)	ไม่เกินกว่า 0.01 มม.
ความขนาน (เทียบกับพื้นผิวด้านล่าง)	ไม่เกินกว่า 0.02 / 50 มม.
ความหยาบผิว Ra (ผิวด้านบน)	ไม่เกินกว่า 0.0003 มม.
ความหยาบผิว Ra (ผิวด้านล่าง)	ไม่เกินกว่า 0.0008 มม.

2.6.2 การบ่งชี้ค่าความแข็ง มีการกำหนดทางตัวเลขโดยการใช้ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของรอยกด 5 รอย ซึ่งเกิดจากการใช้เครื่องทดสอบวัดค่าของร็อคเวลล์ รอยกดต้องมีการกระจายตัวตลอดบนพื้นทดสอบ

2.6.3 การทำซ้ำการกดของความแข็ง

2.6.3.1 การทำซ้ำการกดของความแข็ง เป็นการกำหนดและการแสดงค่าที่แสดงในร็อคเวลล์ โดยการหาค่าผลต่างระหว่างค่าที่มากที่สุดกับค่าที่น้อยที่สุด จากการวัดโดยการเก็บผลจากรอยกด 5 ครั้ง

ตารางที่ 2-6 แสดงค่าพิสัยที่ยอมรับได้ของแท่งอ้างอิงความแข็งร็อคเวลล์ตามมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005

สเกลของความแข็งร็อคเวลล์	ค่าพิสัยยอมรับได้
A	1.5 or 0.4 HRA
B	2.0 or 1.0 HRB
C	1.0 or 0.4 HRC
D	1.0 or 0.4 HRD
E	2.0 or 1.0 HRE
F	2.0 or 1.0 HRF
G	2.0 or 1.0 HRG
H	2.0 or 1.0 HRH
K	2.0 or 1.0 HRK
N	2.0 or 0.6 HRN
T	3.0 or 1.2 HRT

2.6.3.2 ความเกี่ยวเนื่องกับการทำซ้ำการกดของความแข็ง ต้องกำหนดเป็นอัตราส่วน แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับการทำซ้ำการกดของความแข็งเพื่อแสดงค่าในร็อคเวลล์โดยการหาค่าเฉลี่ย ตัวเลขที่ถูกกำหนดขึ้นจากคุณลักษณะของการออกแบบและมีความสำคัญในการบ่งชี้ถึงชนิดของหัวกดและแรงที่ใช้ของรอยกด 5 รอย การทำเครื่องหมายแท่งอ้างอิงความแข็งประกอบด้วย

ก) ด้านใดด้านหนึ่งของผิวหน้าแท่งอ้างอิงทางความแข็งจะต้องมีการทำเครื่องหมาย

ข) ชื่อของแท่งอ้างอิงทางความแข็ง (ค่าความแข็งที่ระบุ)

ค) กระบวนการทางตัวเลข สำหรับการผลิต (มีรหัสเพื่อการเก็บผล)

ง) การเขียนชื่อย่อ HRC เป็นการบ่งบอกชนิดของความแข็งนั้นๆ ของแผ่นทดสอบความแข็งช่องว่างและตัวอักษร จะต้องมีช่องว่างสำหรับการใส่ค่าความแข็งของแท่งอ้างอิง ทางความแข็งคือตัวเลข 4 ตัว

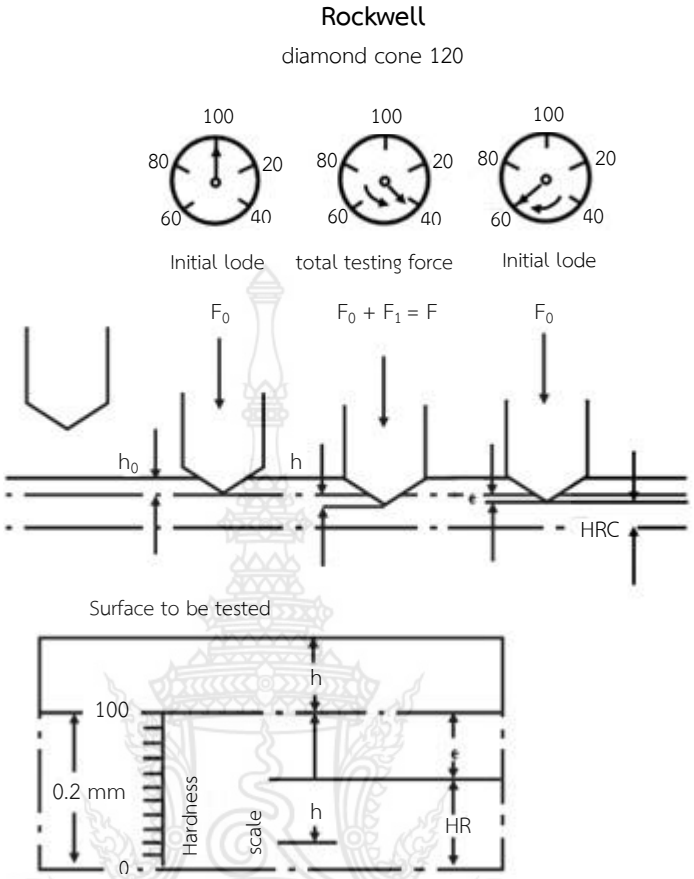
จ) การทำเครื่องหมายแท่งอ้างอิงทางความแข็งที่เกิดขึ้น จะทำลงบนด้านที่ใช้ทดสอบความแข็งในตำแหน่งที่ตั้งฉากกับพื้นผิวแต่สามารถอ่านได้ง่าย

2.7 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester)

การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซี การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซี นี้เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลอื่นๆ เพราะสามารถใช้ทดสอบกับวัสดุหรือโลหะที่แข็งมากได้โดยเฉพาะโลหะที่มีค่าความแข็งเกิน 100 HRB หรือโลหะจำพวกเหล็กเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็งเป็นต้น เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบนี้ ใช้หัวกดทดสอบทำด้วยเพชรรูปกรวย (Diamond Cone) มุมปลาย 120 องศา รัศมีความโค้งที่ปลายกรวย 0.20 มิลลิเมตร หรือบางทีเรียกหัวกดทดสอบนี้ว่า เบรล (Brale)

ภาพที่ 2-10 แสดงเครื่องทดสอบความแข็ง

2.7.1 หลักการทดสอบ สำหรับการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซีเหมือนกับสเกลบีหรือสเกลอื่นๆ คือกดหัวกดทดสอบด้วยแรงคงที่ลงไปบนผิวโลหะชิ้นทดสอบ ปล่อยให้อยู่ใต้แรงกดรวมชั่วระยะเวลาหนึ่งซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดถาวรบนผิวโลหะชิ้นทดสอบ แล้ววัดความลึกของรอยกดซึ่งถ้าใช้เครื่องทดสอบก็สามารถอ่านออกมาเป็นค่าความแข็งจากสเกลสีดำบนนาฬิกาวัดความแข็งได้โดยตรงทันที เพื่อง่ายต่อการเข้าใจสามารถอธิบายหลักการทดสอบด้วยแผนดังนี้



ภาพที่ 2-11 แสดงการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซี

หลักการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซี จากรูปอธิบายสัญญาลักษณ์ต่างๆ ดังนี้

$F = F_0 + F1$

F_0 = แรงกดนำขนาด 10 กิโลกรัม

$F_0 + F1$ = แรงกดรวม 150 กิโลกรัม ซึ่งจะเป็นผลรวมของแรงกดนำ 10 กิโลกรัม และแรงกดเพิ่ม 140 กิโลกรัม

$h + h_0$ = ความลึกของรอยกด ภายใต้แรงกดรวม

$e + h_0$ = ความลึกรอยกดถาวร ภายใต้แรงกดนำ

หลังจากเอาแรงกดเพิ่มออกแล้วสำหรับค่าความแข็งร็อคเวลล์สเกลซี จะไม่มีหน่วยใดๆ ทั้งสิ้น การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบส่วนมากจะอ่านค่าความแข็งเป็นตัวเลขได้โดยตรง จากนาฬิกาวัดความแข็งบนสเกลสีดำ ซึ่งถูกแบ่งออกใน 100 ช่อง โดยเริ่มต้นจากขีดเลข 0-100 แต่ละช่องจะเท่ากับค่าความแข็งใน 0.002 มิลลิเมตร ดังนั้นจะไม่อ่านค่าความแข็งจากนาฬิกาวัดความแข็ง ก็สามารถวัดค่าความแข็งได้จากสูตร

2.7.2 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการกดทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซี โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง นิเวอร์แซลตามมาตรฐานเยอรมัน (DIN 50351) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่กล่าวมาแล้วนั้นและวิธีการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซีเหมือนกับการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลบีหรือสเกลอื่นๆ ซึ่งพอสรุปวิธีการทดสอบเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

2.7.2.1 ประกอบหัวกดทดสอบ ทำด้วยเพชรรูปกรวย มุมที่ปลาย 120 องศา และปรับเครื่องทดสอบเพื่อทดสอบความแข็งร็อคเวลล์

2.7.2.2 กดปุ่มเลือกน้ำหนักหรือแรงกดรวม 150 กิโลกรัม โดยกดคันโยกยาวลงในตำแหน่งล่าง

2.7.2.3 นำชิ้นทดสอบวางบนแท่นรองรับซึ่งตั้งได้ฉากกับหัวกดทดสอบ

2.7.2.4 กดทดสอบด้วยแรงกดนำ 10 กิโลกรัม ซึ่งทำได้โดยหมุนยกชิ้นทดสอบให้สัมผัสกับหัวกดและหมุนต่อไปอีก $^{1}/_{2}$ รอบ ทำให้เข็มหน้าปัดของนาฬิกาวัดความแข็งชี้ที่ศูนย์พอดี

2.7.2.5 กดทดสอบด้วยแรงกดรวม โดยจะถูกกดเพิ่มด้วยแรง 140 กิโลกลัม ซึ่งทำได้โดยยกคันโยกยาวขึ้น หัวกดก็จะกดลึกเพิ่มลงไปในเนื้อโลหะชิ้นทดสอบ จะสังเกตได้จากเข็มเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกา

2.7.2.6 ปล่อยให้กดอยู่บนผิวโลหะประมาณ 30 วินาที แล้วกดคันโยกยาวลง แรงกดเพิ่มก็จะถูกยกออกจะเหลือเฉพาะแรงกดนำไว้ ขณะนี้เนื้อโลหะบางส่วนจะมีการคืนรูปและดันให้หัวกดยกสูงขึ้นขณะนั้นเข็มจะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา

2.7.2.7 เมื่อเข็มหยุดนิ่งก็อ่านค่าความแข็งจากตัวเลขบนสเกลสีดำบนนาฬิกาวัด

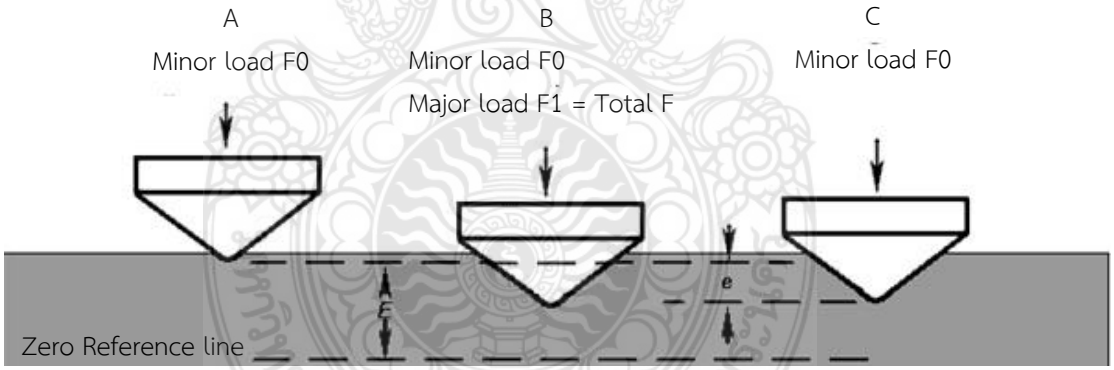
2.8 การวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ (Rockwell Hardness Testing)

ข้อดี ของการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ เมื่อเทียบกับแบบบริเนลล์และวิกเกอร์ อยู่ที่ความรวดเร็วของการวัด ขณะที่ผู้ปฏิบัติการดำเนินการให้หัวกดกดลงบนชิ้นงานทดสอบ สามารถติดตามดูการเคลื่อนที่ของเข็มนาฬิกาวัดความลึกจนกระทั้งเข็มชี้หยุดนิ่ง จึงค่อยนำแรงกดออกโดยไม่ต้องรอเวลากดคงแรงกด นอกจากนั้นยังประหยัดเวลาทดสอบอย่างมาก เพราะไม่จำเป็นต้องวัดขนาดรอยกดและไม่ต้องใช้ตารางคำนวณค่าความแข็ง เนื่องจากความสามารถอ่านค่าความแข็งจากนาฬิกาวัดความลึก (Dial Gauge) ซึ่งแปลงเป็นค่าความแข็งได้โดยตรง

ข้อเสีย ของการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ คือความหนาของชิ้นงานทดสอบจะต้องไม่น้อยกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกด ซึ่งเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ แต่วิกเกอร์สามารถวัดรอยกดขนาดเล็กได้แม่นยำ ในขณะที่แบบร็อคเวลล์ไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากความลึกรอยกดมีขนาดน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด หรือเส้นทแยงมุมรอยกดมาก ซึ่งแบบวิกเกอร์สามารถเลือกใช้แรงกดที่น้อยกว่าได้ ถ้าต้องการทดสอบความแข็งชิ้นงานบางๆ

หรือชิ้นงานที่ชุบผิวแข็งที่ชั้นลึกไม่มาก ในอเมริกาได้แก้ไขข้อเสียเหล่านี้โดยการกำหนดการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์หลายแบบโดยใช้แรงกดและหน่วยวัดที่แตกต่างกัน ในขณะที่ยุโรปและประเทศไทยกำหนดให้เป็นมาตรฐานเพียง 2 วิธี แบบร็อคเวลล์ซีและร็อคเวลล์บี

การวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง เพราะเป็นวิธีที่วัดได้รวดเร็ว โดยใช้หลักการวัดความลึกของตัวกด ซึ่งมักจะอ่านค่าความแข็งจากความลึกได้โดยตรงไม่ต้องนำไปคำนวณค่าใดๆ การวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์มีหลายสเกล เช่น ร็อคเวลล์ซี (HRC) ร็อคเวลล์บี (HRB) และร็อคเวลล์เอ (HRA) เป็นต้น ข้อแตกต่างของร็อคเวลล์แต่ละวิธีอยู่ที่หัวกดและแรงที่ใช้ในการกด ร็อคเวลล์บีไม่เหมาะสมกับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบแข็ง แต่เหมาะกับการทดสอบความแข็งโลหะที่อ่อนหรือเหล็กกล้าแข็งขนาด $^{1}/_{16}$ (1.59 มิลลิเมตร) สำหรับ HRC และ HRA ใช้หัวกดเป็นเพชรทรงกรวยมุม 120 องศา ข้อแตกต่างอยู่ที่แรงที่ใช้กด HRC ใช้แรงกด 150 กิโลกรัมแรง (kgf) ในขณะที่ HRA ใช้แรงกด 60 กิโลกรัมแรง (kgf) HRC เหมาะกับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบแข็งทั้งชิ้นและผิวแข็ง ความแข็งที่วัดได้อยู่ระหว่าง 20-68 HRC สำหรับ HRA เหมาะกับชิ้นงานเหล็กกล้าชุบแข็งเช่นกัน โดยเฉพาะกับชิ้นงานบางหรือชิ้นงานชุบผิวแข็งที่มีค่าความแข็งลึกต่ำ ความแข็งที่วัดได้อยู่ในช่วง 20 ถึง 88 HRA



ภาพที่ 2-12 แสดงตัวอย่างการทดสอบ HRC

2.8.1 การวัดความลึกรอยกด ความลึกรอยกดถาวร, e = ระยะที่กดลงทั้งหมดลบด้วยระยะที่ Minor Load กดผิวชิ้นงาน

หัวกดเพชร : ความลึกรอยกดถาวร, e = (100 – ค่าความแข็ง , HRC) x 0.002

ดังนั้น

$$HRC = 100 - \frac{e}{0.002} \qquad (2\text{-}6)$$

2.8.1.1 ข้อควรระวัง

ก) ชนิดของวัสดุ โดยทั่วไปผลการทดสอบที่ดีที่สุด ได้จากการใช้แรงกดสูงที่สุดเท่าที่ชิ้นงานทดสอบจะสามารถรับได้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด (Elastic Recovery)

ข) ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าความลึกของรอยกดอย่างน้อย 10 เท่า เพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง

2.9 วิธีการตรวจสอบเครื่องมือวัดความแข็งร็อคเวลล์ (Verification of Machines For Rockwell)

2.9.1 ข้อกำหนดพื้นฐานก่อนการตรวจสอบดังนี้

2.9.1.1 ติดตั้งเครื่องในส่วนที่มีการป้องกันการสั่นสะเทือน

2.9.1.2 ติดตั้งเครื่องในส่วนที่มีการจัดตำแหน่ง เช่น แนวดิ่ง และแนวระดับโดยเครื่องระดับ

2.9.1.3 ส่วนต่างๆ ของเครื่องซึ่งรวมไปถึงอุปกรณ์ ควรอยู่ในที่เหมาะสมปราศจากฝุ่นละออง และสามารถทำความสะอาดได้ง่าย

2.9.2 การตรวจสอบโดยตรง (Direct Verification) จะใช้เครื่องที่สร้างใหม่หรือเครื่องที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีข้อกำหนดการตรวจสอบดังนี้คือ

2.9.2.1 การตรวจสอบโดยแรง (Verification of the Force) เป็นการตรวจสอบถึงแรงเบื้องต้น และแรงรวมในแต่ละแรงโดยการทำการวัดไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง ที่ค่าเดียวกันโดยวิธีใดวิธีหนึ่งคือ

ก) เครื่องสอบเทียบทางด้านแรง (Use of Elastic Calibration Devices) โดยค่าความถูกต้อง ± 25%

ข) เครื่องสอบเทียบน้ำหนักมาตรฐาน (Use of Equal - Arm Balances and Standard Weight) โดยใช้การสอบเทียบที่ถูกต้อง ± 25%

2.9.2.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของหัวกด (Verification of Indenter) ซึ่งมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ

ก) ชนิดหัวเพชร (Diamond Indenter) จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

1. ปราศจากการแตกหัก,บิ่นหรือเป็นหลุมสามารถเจาะผ่านชิ้นงานได้ลึกถึง 0.3 มิลลิเมตร สำหรับเครื่องวัดความแข็งสเกลร็อคเวลล์

2. การตรวจสอบคุณลักษณะของหัวกดโดยการวัดโดยตรง หรือการวัดด้วยเครื่องขยายภาพโดยการวัดไม่น้อยกว่า 4 จุดในระยะที่เท่ากันซึ่งจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในหัวข้อต่อไปนี้

3. มุมที่จุดยอดรวมของหัวเพชรจะต้องอยู่ในช่วง $120^{\circ} \pm 0.35^{\circ}$

4. จุดยึดติดระหว่างโลหะจะต้องทำมุมไม่แตกต่างกันเกินกว่า $\pm 0.5^{\circ}$

5. การที่รัศมีมีจุดยอดรวมของเพชรจะต้องอยู่ในช่วง 0.200 ± 0.001 มิลลิเมตร โดยการวัดแต่ละครั้งจะไม่มีค่าไม่เกินช่วง 0.200 ± 0.015 มิลลิเมตร และ มีค่าเบี่ยงเบนจากการวัดไม่เกิน ± 0.002 มิลลิเมตร

ข) ชนิดหัวบอล (Steel Balls)

1. ลักษณะทั่วไปต้องมีพื้นผิวเรียบเป็นมันเงา

2. การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของบอลจะต้องวัดไม่น้อยกว่า 3 ตำแหน่ง จะต้องไม่แตกต่างไปจากตัวเลขที่กำหนด

3. การกำหนดค่าตรวจสอบของหัวบอล

ตารางที่ 2-7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าที่ยอมรับได้ของหัวบอล

เส้นผ่านศูนย์กลางของบอล		ค่าที่ยอมรับได้	
นิ้ว (in)	มิลลิเมตร (mm)	นิ้ว (in)	มิลลิเมตร (mm)
1/16	1.588	± 0.0001	± 0.0025
1/8	3.175	± 0.0001	± 0.0025
1/4	6.350	± 0.0001	± 0.0025
1/2	12.70	± 0.0001	± 0.0025

2.9.2.3 การตรวจสอบเครื่องวัดความลึกของรอย (Verification of the Measuring-Device) ซึ่งมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ

ก) การตรวจสอบเครื่องมือวัดความลึกของรอย โดยการวัดไม่น้อยกว่า 3 ช่วงของค่าความแข็ง ซึ่งรวมไปถึงเป็นการวัดความลึกต่ำสุดและค่าความลึกสูงสุด หรืออย่างน้อยหนึ่งช่วงการใช้งาน

ข) เครื่องมือที่ใช้การตรวจสอบเครื่องวัดความลึกจะต้องมีค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้ $\pm$ 0.0002 มิลลิเมตร

ค) ค่าเบี่ยงเบนจากการวัดของเครื่องการวัดความลึกควรแสดงอยู่ในช่วง ± 0.5 มิลลิเมตร ของร็อคเวลล์หรือค่าผิดพลาดไม่เกิน ± 0.001 มิลลิเมตร ในสเกล ซีและสเกลบีผิดพลาดไม่เกิน ± 0.0005 มิลลิเมตร

2.9.3 การตรวจสอบโดยอ้อม (Indirect Verification / Standard Hardness TestBlocks) เป็นการตรวจสอบเครื่องวัดความแข็ง จะใช้แท่งอ้างอิงทางความแข็งสอบเทียบความแข็งในลักษณะของการประยุกต์ใช้งานเพื่อการบริการ ซึ่งจะทำการตรวจสอบโดยใช้ความแข็งอ้างอิงอย่างน้อย 3 ค่าของความแข็ง และทำการเปรียบเทียบกับค่าของแท่งอ้างอิงทางความแข็งสอบเทียบความแข็ง

การตรวจสอบเครื่องวัดความแข็ง ไม่ว่าจะตรวจสอบทางตรงหรือการตรวจสอบโดยอ้อมจะแสดงค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ของเครื่องทดสอบ

ตารางที่ 2-8 แสดงค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ของเครื่องทดสอบความแข็งมาตรฐาน

Rockwell Hardness Scale	Hardness Range Of Reference block	Permissible Error Rockwell Units	Permissible Repeatability Of The Testing Machine
A	20 HRA to ≤ 75 HRA >75 HRA to ≤ 88 HRA	±2 HRA ±1.5 HRA	≤ 0.02 (100-H) or 0.8 Rockwell unit
B	20 HRB to ≤ 45 HRB >45 HRB to ≤ 80 HRB >80 HRB to ≤ 100 HRB	±HRB ±3 HRB ±2 HRB	≤ 0.04 (130-H) or 1.2 Rockwell unit
C	20 HRC to ≤ 75 HRC	±1.5 HRC	≤ 0.02 (100-H) or 0.8 Rockwell unit

จากตารางที่ 2-8 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของเครื่องทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ในหน่วยสเกลซี ช่วงความแข็ง 20-70 HRC มีค่า ± 1.5 HRC และมีค่าการกดซ้ำของเครื่องทดสอบความแข็ง ≤ 0.8 Rockwell unit และการแบ่งระดับค่าความแข็งของแท่งมาตรฐานทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ แสดงได้ตามตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 แสดงระดับค่าความแข็งของแท่งอ้างอิงความแข็งร็อคเวลล์ตามมาตรฐาน

Rockwell Hardness Scale	Hardness Range of Reference Block
A	20 HRA to 40 HRA 45 HRA to 75 HRA 80 HRA to 88 HRA
B	20 HRB to 50 HRB 60 HRB to 80 HRB 85 HRB to 100 HRB
C	20 HRC to 30 HRC 35 HRC to 55 HRC 60 HRC to 70 HRC

2.10 ความหยาบผิว (Roughness)

ความหยาบผิวประกอบด้วยความไม่สม่ำเสมอของผิวชิ้นงาน ซึ่งส่วนใหญ่รูปแบบของรอยที่เกิดจะเกิดจากอัตราการป้อนของเครื่องมือตัด มีความสูงหรือความลึกของร่องชิ้นงานไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวัด

2.10.1 คุณภาพผิวงาน (Quality Of Machine Surfaces) การขึ้นรูปโดยการตัดเฉือนเพื่อให้ได้รูปแบบชิ้นงานที่ต้องการจะต้องคำนึงถึงปัจจัยและผลที่จะเกิดขึ้นกับงานที่ทำสำเร็จซึ่งผลที่เกิดขึ้นหลังการตัดเฉือนอย่างหนึ่งคือคุณภาพผิวงาน โดยปกติของการผลิตทั่วๆ ไปมักจะต้องการงานที่มีคุณภาพผิวที่ดี เนื่องจากชิ้นงานที่มีคุณภาพผิวที่ดีจะมีผลต่อความสวยงามเมื่อมีการประกอบชิ้นส่วนและมีความเสียดทานต่อการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน ลักษณะทั่วไปของผิวงานที่ผ่านการแปรรูปและผ่านการตัดเฉือนรวมทั้งองค์ประกอบหลักๆ ของสภาพผิวงาน

2.10.1.1 ผิวงาน (Surface) หมายถึงขอบเขตหรือบริเวณที่แยกออกจากส่วนเนื้อวัสดุงาน รูปร่างและลักษณะผิวงานระบุได้ด้วยรูปภาพ (Drawing) หรือคำอธิบายคำจำกัดความ (Descriptive Specifications)

2.10.1.2 รูปทรงผิว (Profile) หมายถึงเส้นที่แสดงลักษณะพื้นผิวงานตลอดภาคหน้าตัดที่ถูกนำมาพิจารณา

2.10.1.3 ความหยาบผิว (Roughness) หมายถึงความผิดปกติของผิวงานที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือนอันเนื่องมาจากคมตัดของมีดและอัตราป้อน

2.10.1.4 คลื่นของผิวงาน (Waviness) หมายถึงความผิดปกติของผิวงานที่มีระยะในการพิจารณากว้างกว่าช่วงความหยาบผิว เกิดขึ้นจากการโก่งตัวของชิ้นงานและการหลวมคลอนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รวมทั้งการสั่นสะเทือนขณะทำการตัดเฉือน

2.10.1.5 ฟลอ (Flow) หมายถึงความผิดปกติของผิวงานที่เกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวงาน เช่น รอยขีดข่วน รอยแตก รูพรุน เป็นต้น

2.10.1.6 เลย์ (Lay) หมายถึงแนวทิศทางของรอยสันส่วนยอด ความหยาบของผิวที่ตรวจสอบ

2.10.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อความเรียบผิวงาน คุณภาพผิวงานที่จะทำการตัดเฉือนกำหนดไว้ว่าต้องการให้ผิวงานที่ได้มีลักษณะอย่างไรจึงจะเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้

2.10.2.1 ความแข็งแรงของเครื่องจักรและความเที่ยงตรงของวัสดุรองลื่น (Bearing)

2.10.2.2 คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการตัดเฉือนเป็นผิวสำเร็จของวัสดุงาน

2.10.2.3 ชนิด ประเภทและลักษณะของวัสดุมีด

2.10.2.4 การเลือกใช้น้ำมันช่วยในการตัดเฉือน

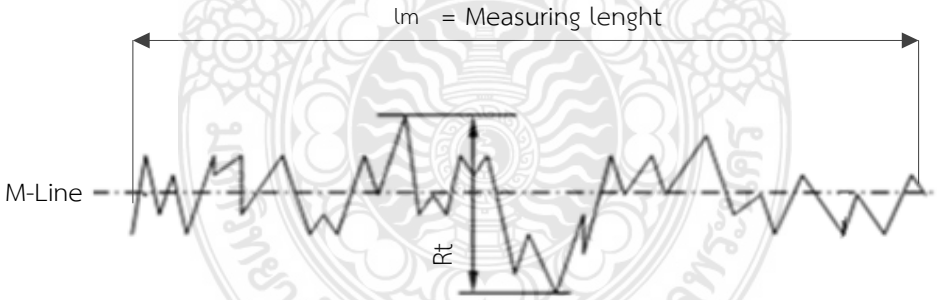
2.10.2.5 ตัวแปรที่ใช้ในการตัดเฉือน

2.10.2.6 ลักษณะของการเกิดเศษ

2.10.2.7 มุมมีดที่ใช้

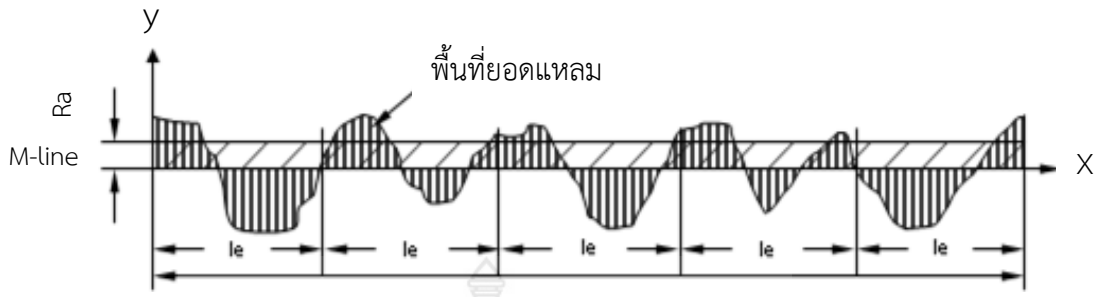
2.10.3 วิธีการของการวัดความเรียบของผิว วิธีการที่สามารถใช้ได้ผลสำหรับการวัดความเรียบของผิวชิ้นงานที่ผ่านการตกแต่งมาอาจจะใช้วิธีการเปรียบเทียบหรือใช้วิธีวัดโดยตรง วิธีการเปรียบเทียบนี้เป็นวิธีการที่จะตรวจสอบความหยาบ ความละเอียดของผิว โดยการสังเกตหรือ ใช้ความรู้สึกบนผิวหน้าที่จะทำการตรวจสอบการเปรียบเทียบนี้อาจจะทำให้เกิดการอ่านผิดขึ้นได้ถ้าการเปรียบเทียบไม่ได้ใช้ชิ้นงานที่ทำหรือผลิตด้วยเทคนิคเดียวกัน รอยที่ปรากฏขึ้นบนพื้นผิวหน้า จะขึ้นอยู่กับแบบของเครื่องมือที่ใช้ในทิศทางของการขีดข่วนหรือตกแต่งผิวหน้า และขึ้นกับความลึกของรอยที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งรอยที่ปรากฏเหล่านี้สามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการใช้กล้องส่องขยายดูการแตะสัมผัสเป็นวิธีที่ให้ผลดีในการกำหนดความหยาบความละเอียดของผิวมากกว่าการสังเกตด้วยตา ซึ่งอาจทำให้อ่านค่าผิดพลาดได้การเปรียบเทียบควรจะใช้กับผิวหน้าที่มีการผลิตเหมือนกันเท่านั้นซึ่งมีหลายบริษัทที่ได้สร้างชิ้นส่วนมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบความเรียบของผิวในแต่ละวิธีการผลิตหลายๆ อย่างซึ่งสามารถที่จะเลือกใช้ทำการตรวจสอบได้อย่างสะดวกการ วัดค่าความหยาบผิวสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.10.3.1 ค่าความหยาบผิว Rt ได้จากการวัดระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดของผิวงานกับจุดต่ำสุดของผิวงาน มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)ดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 แสดงการวัดค่าความหยาบผิว (Rt)

2.10.3.2 ค่าความหยาบผิว Ra หรือเรียกว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมเหนือเส้นกึ่งกลางกับพื้นที่หลุมได้เส้นกึ่งกลางแล้วหารด้วยความยาว (lm) มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) ดังภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 แสดงการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)

2.11 การวัดตำแหน่งพิกัด

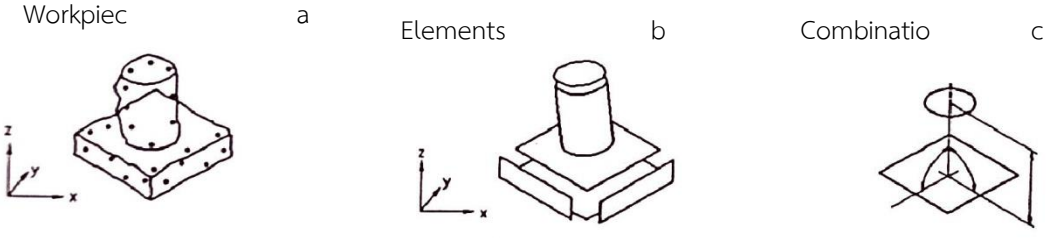
ในบรรดาเครื่องมือวัดความขนานและมิติทั้งหลายคงไม่มีตำเครื่องมือใดที่มีสามารถวัดค่าพิกัดความเผื่อในเชิงเรขาคณิตได้หลากหลายมากไปกว่าเครื่องวัดตำแหน่งพิกัดแบบ 3 มิติ (Coordinate Mesasuring Machine, CMM) แนวคิดเบื่องหลังการทำงานของเครื่องวัดตำแหน่งพิกัดแบบ 3 มิติ เป็นแนวคิดง่ายๆ ในการใช้ตำแหน่งพิกัด 3 มิติ (x, y, z) หลายจุดมาคิดคำนวณหาค่าพิกัดความเผื่อทางเลขาคณิตของชิ้นงาน ตัวอย่างของการวัดในทางเรขาคณิตโดยใช้เครื่องมือวัดตำแหน่งพิกัด ได้แก่ การวัดระยะทาง การวัดมุมความตรง ความเรียบ ความกลม ความตั้งฉาก ความขนาน ความร่วมศูนย์ ความเป็นทรงกระบอก เป็นต้น

2.11.1 มาตรวิทยาของการวัดตำแหน่งพิกัดจะเป็นการพิจารณาถึง

2.11.1.1 การวัดตำแหน่งพิกัดโดยใช้หัวโพรบสัมผัสกับผิวชิ้นงาน โดยมากจะวัดตำแหน่งพิกัดหลายตำแหน่งบนผิวชิ้นงาน (Point-To-Ponint Probings)

2.11.1.2 การกำหนดความเป็นรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงาน (Geometric elements) ในด้านขนาน รูปทรง ตำแหน่ง ทิศทาง

2.11.1.3 รูประเมินฟีเจอร์ของชิ้นงานในรูปของขนาดและพิกัดความเผื่อภาพที่ 2.15 a, b และc แสดงถึงขอบเขตการทำงานทั้ง 3 ส่วนดังกล่าว



ภาพที่ 2.15 แสดงขอบเขตการทำงานของมาตรวิทยาการวัดตำแหน่งพิกัด

(a) การวัดตำแหน่งพิกัดโดย ใช้หัวโพรบ
(b) การกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของผิวชิ้นงาน
(c) การคำนวณหาค่าพิกัดความเผื่อทางเรขาคณิต

2.11.2 เครื่องวัดตำแหน่งพิกัดแบบ 3 มิติจะประกอบด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วนประกอบด้วย ส่วนของเครื่องมือหรือเครื่องจักรทางกล (Mechanical Setup) ส่วนของหัวโพรบ (Probe Head) ส่วนของระบบควบคุม (Control Unit) และส่วนของคอมพิวเตอร์และซอฟแวร์ดังที่แสดงในภาพที่ 2.14 นี้ จะกล่าวถึงส่วนต่างๆ โดยละเอียดในหัวข้อถัดไป การวัดโดยการใช้เครื่องวัดตำแหน่งพิกัดแบบ 3 มิติจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.11.2.1 การสอบเทียบขนาดของหัวโพรบที่ใช้ การสอบเทียบขนาดของหัวโพรบมักจะใช้ลูกเหล็กกลมที่ราบขนาน ขั้นตอนนี้เป็นการบอกให้เครื่องรับรู้ว่ากำลังใช้หัวโพรบขนาดใดอยู่ (Probe Qualification) ในการทำงานจริงมักจะมีการเปลี่ยนหัวโพรบหรือก้านหัวโพรบเพื่อให้เหมาะกับลักษณะของชิ้นงานที่วัดอยู่เสมอ

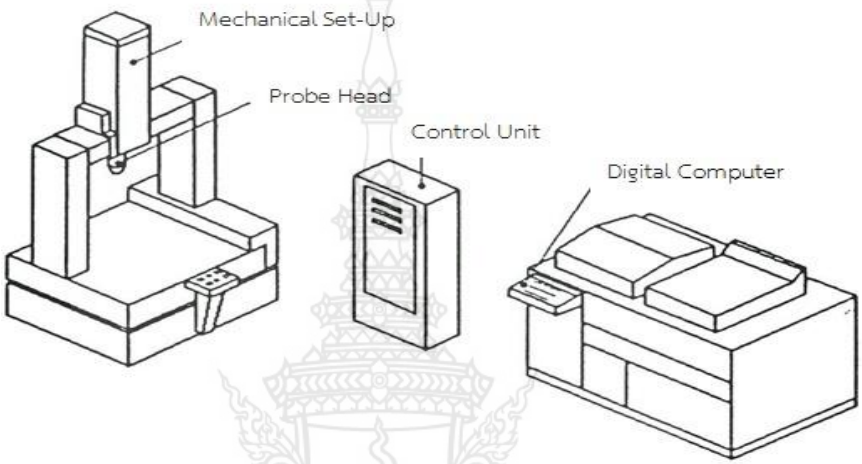
2.11.2.2 การกำหนดระบบตำแหน่งพิกัดของชิ้นงาน (Xw, Yw, Zw) โดยเทียบกับระบบตำแหน่งพิกัดของเครื่อง (Xm, Ym, Zm) ระบบตำแหน่งพิกัดของเครื่องจะอยู่กับที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ระบบตำแหน่งพิกัดชิ้นงานมักจะเลือกให้อยู่กับตำแหน่งที่ง่ายแก่การวัด เช่นให้อยู่ ณ ตำแหน่งที่เป็นระนาบอ้างอิง (Datum) ในแบบของชิ้นงาน เป็นต้น ภาพที่ 2.17 แสดงถึงระบบพิกัดทั้งสองขณะทำการวัด

2.11.2.3 การวัดตำแหน่งพิกัดบนผิวชิ้นงาน โดยทั่วไปตำแหน่งและจำนวนจุดที่วัดจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้และลักษณะทางเรขาคณิตของสิ่งที่จะวัดเป็นหลัก เช่นการวัดความตรงของเส้นจะต้องใช่หัวโพรบวัดตำแหน่งพิกัดจุดที่แตกต่างกันอย่างน้อย 3 ตำแหน่งขึ้นไป ทั้งนี้เป็นเพราะต้องใช้จุด 2 จุดในการนิยามเส้นตรงขึ้นมา สังเกตว่าการสร้างรูปทรงเรขาคณิตขึ้นมาเป็นระนาบอ้างอิงจะใช้จำนวนจุดน้อยกว่าที่ใช้ในการวัดค่าพิกัดความเผื่ออยู่ 1 จุดเสมอ การวัดโดยใช้ตำแหน่งพิกัดจำนวนมาก จะทำให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำขึ้นกว่าเดิมแต่ก็ต้องใช้เวลามากขึ้นด้วย ดังนั้นผู้วัดจึงต้องใช้วิจารญาณเลือกจำนวนจุดและตำแหน่งเพื่อให้เหมาะสม การวัดความเรียบของระนาบจะต้องใช้อย่างน้อย 4 ตำแหน่ง การวัดพิกัดความกลมของวงกลม 2 มิติจะต้องใช้อย่างน้อย 4 ตำแหน่งเช่นกัน การวัดพิกัดความกลมของวงกลม 3 มิติจะต้องใช้อย่างน้อย 5 ตำแหน่ง การวัดพิกัดความเป็นทรงกระบอกจะต้องใช้อย่างน้อย 6 ตำแหน่ง

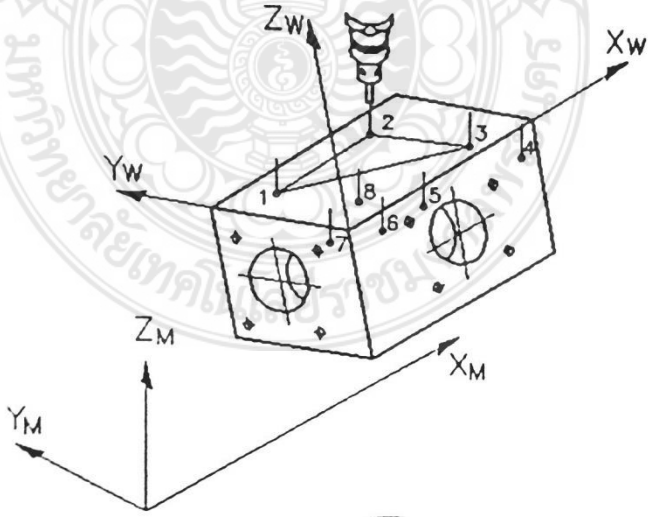
2.11.2.4 การคำนวณค่าที่เกี่ยวข้องกับรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงาน ได้แก่ลักษณะที่สำคัญของรูปทรงเรขาคณิตที่สร้างขึ้นและอาจมีค่าพิกัดความเผื่อทางเรขาคณิตรวมอยู่ด้วย

ตัวอย่างเช่น ถ้าวัดตำแหน่งพิกัด 4 ตำแหน่งบนวงกลม 3 มิติลักษณะสำคัญทางเรขาคณิตที่คำนวณได้ก็คือ จุดศูนย์กลางวงกลมและรัศมี หากวัดมากว่า 4 จุดจะได้ค่าพิกัดความกลมใน 3 มิติ

2.11.2.5 การแสดงผลมักจะแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์หรือส่วนประมวลผลอื่นๆ ในบางครั้งอาจตั้งให้เครื่องมือวัดพิมพ์ค่าออกทางเครื่องพิมพ์ได้โดยอัตโนมัติเช่นกัน



ภาพที่ 2-16 แสดงส่วนประกอบของเครื่องวัดตำแหน่งพิกัดแบบ 3 มิติ



ภาพที่ 2.17 แสดงระบบพิกัดของเครื่องวัดกับระบบพิกัดของชิ้นงานไม่จำเป็นต้องตรงกัน

จะเห็นได้ว่าเครื่องมือวัดตำแหน่งพิกัดจุดดีเหนือกว่าเครื่องมือวัดแบบอื่นตรงที่

ก) ไม่จำเป็นต้องจัดวางแนวของชิ้นงานให้ตรงกับแนวของแกนของเครื่องมือวัดดังที่แสดงในภาพที่ 2.17 ทำให้เสียเวลาในการจัดวางชิ้นงาน้อยลง

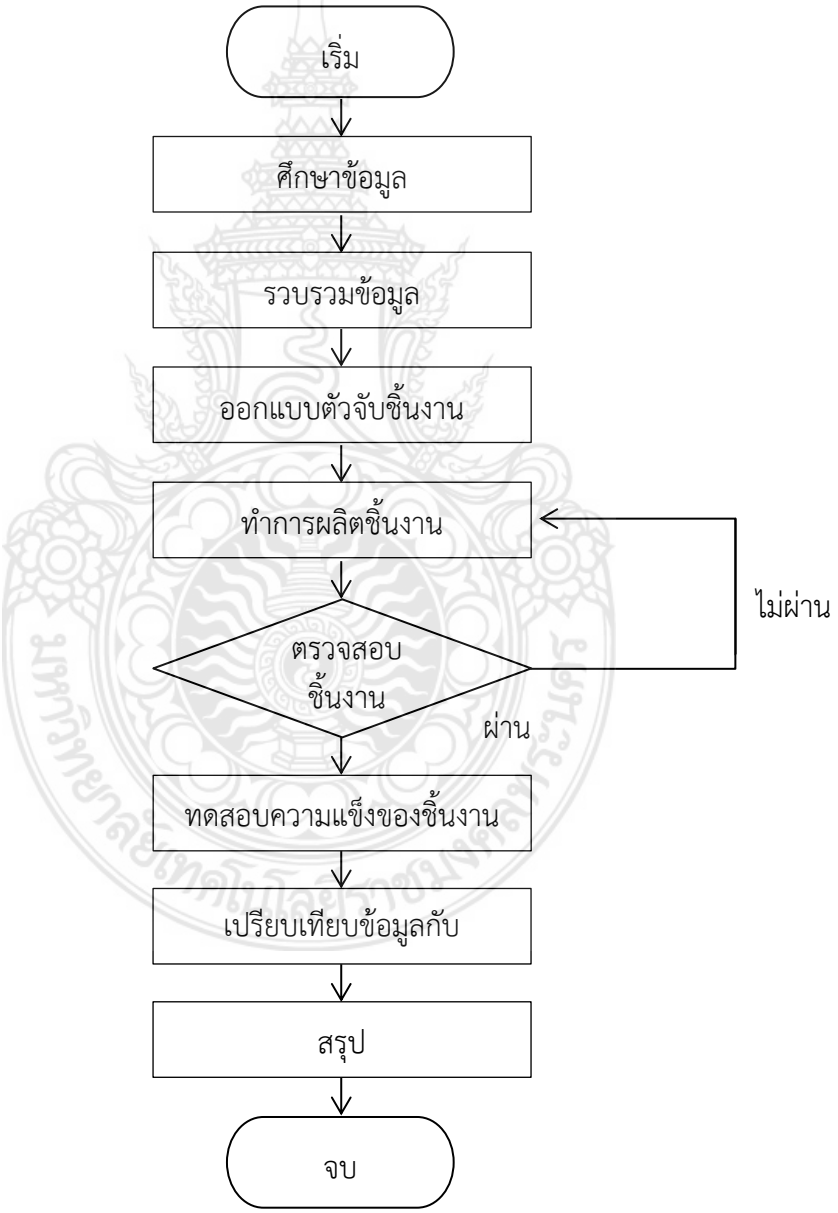
ข) ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานหรืออุปกรณ์เสริมอย่างอื่นยกเว้นแต่ถ้าชิ้นงานไม่สามารถจัดวางได้อย่างมั่นคงในตำแหน่งที่ต้องทำการวัด

ค) การคำนวณค่าพิกัดความเผื่อของหลายฟีเจอร์สามารถทำได้ในครั้งเดียว

อย่างไรก็ดีข้อจำกัดของเครื่องมือวัดตำแหน่งพิกัดคือ ไม่เหมาะสมสำหรับการวัดชิ้นงานจำนวนมากๆ ถึงแม้จะไม่สามารถเขียนโปรแกรมเครื่องให้สามารถทำงานได้เหมือนเครื่องจักรซีเอ็นซีก็ตาม

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

จากการเลือกเกรดเหล็ก K460 และเหล็ก 2510 ในการศึกษาการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็ง จะมุ่งเน้นในการเลือกใช้เหล็กที่สามารถหาซื้อได้ในประเทศและมีคุณภาพเพื่อนำมาผลิตตามมาตรฐาน



ภาพที่ 3-1 แสดงวิธีการและลำดับขั้นตอนการทำโครงงาน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทำโครงงาน

3.1.1 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ ยี่ห้อ AFFRI รุ่น 206 RTSD ผลิตที่อิตาลี

3.1.2 ไมโครมิเตอร์วัดนอก ค่าความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Mitutoyo ผลิตที่ญี่ปุ่น

3.1.3 เครื่องกลึง

3.1.4 เครื่องเจียระไนราบยี่ห้อ Okamoto รุ่น GRIND – X ผลิตที่ญี่ปุ่น

3.1.5 เครื่องเลื่อย

3.1.6 เครื่องขัดกระดาษทราย

3.1.7 กระดาษทรายเบอร์ 320, 600, 1,200 และผ้าสักหลาด

3.1.8 ผงเพชรขนาด 6 ไมครอน (μm) ผงอลูมิน่าขนาด 0.05 ไมครอน (μm)

3.1.9 เครื่องวัดสามมิติ Coordinate Measuring Machine (CMM) ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น BEYOND - A504 ผลิตที่ญี่ปุ่น

3.1.10 เครื่องวัดความหยาบผิวขนาดหัววัด 0.025 มิลลิเมตร ยี่ห้ออMitutoyo รุ่น SJ – 400 ผลิตที่ญี่ปุ่น

3.1.11 เหล็กกล้างานเย็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร จำนวน 2 ท่อน

3.2 ขั้นตอนและการดำเนินงาน

3.2.1 นำเหล็กกล้างานเย็นไปกลึงปอกชิ้นงานจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตรดังภาพที่ 3-2

ภาพที่ 3-2 แสดงการกลึงปอกชิ้นงาน

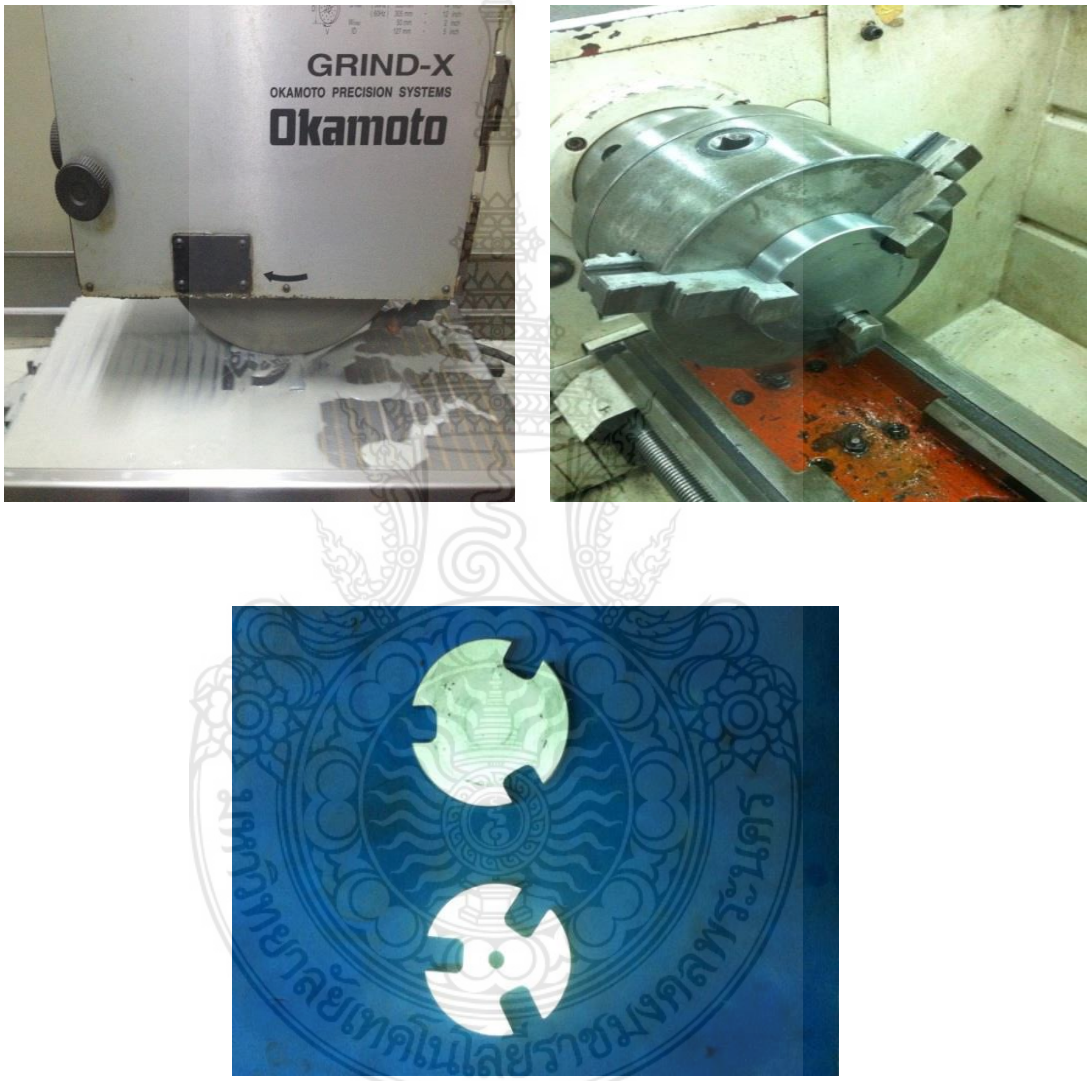
3.2.2 นำเหล็กที่กลึงปอกในข้อ 3.2.1 มาตัดแบ่งให้ได้ขนาดความหนา 18 มิลลิเมตรดังภาพที่ 3-3

ภาพที่ 3-3 แสดงการตัดแบ่งชิ้นงาน

3.2.3 นำชิ้นงานในข้อ 3.2.2 มาทำการตอกรหัสชิ้นงานดังภาพที่ 3-4

ภาพที่ 3-4 แสดงการตอกรหัสชิ้นงาน

3.2.4 ทำการผลิตตัวจับชิ้นงาน โดยนำเหล็กมาทำการวัดกับปากกาจับของเครื่องกลึงที่มีระยะห่าง 3 มุม แต่ละมุมห่างกัน 120 องศาและขนาดจะต้องไม่น้อยกว่า 65 มิลลิเมตรนำไปทำการ มิลลิ่ง (Milling)และการเจียระไนดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 แสดงการผลิตตัวจับยึดชิ้นงาน

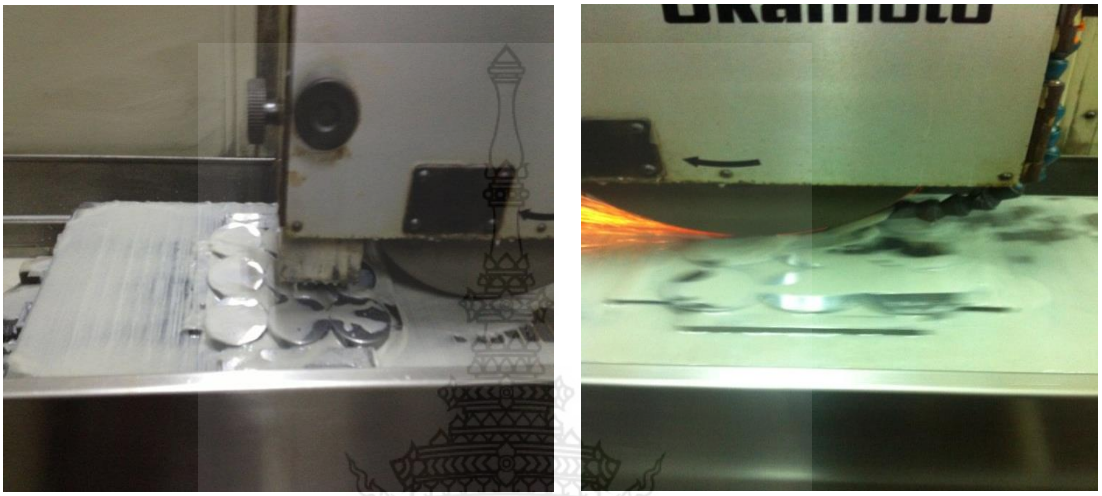
3.2.5 นำชิ้นงานที่ตอกรหัสแล้วมากลึงปาดหน้าชิ้นงานให้ได้ขนาดความหนา 15.50 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3-6

ภาพที่ 3-6 แสดงการกลึงปาดหน้าชิ้นงาน

3.2.6 นำชิ้นงานมาตรวจสอบโดยไมโครมิเตอร์วัดนอก ความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร แต่ละชิ้น จำนวน 8 จุด หาค่าใกล้ที่เคียงกันของชิ้นงานเพื่อที่จะนำไปทำการเจียระไนดังภาพที่ 3-7

ภาพที่ 3-7 แสดงการตรวจสอบชิ้นงานเพื่อจะนำไปเจียระไน

3.2.7 นำชิ้นงานที่ตรวจสอบในข้อ 3.2.6 มาทำการเจียระไนให้ได้ความหนา 15.20 มิลลิเมตร และนำชิ้นงานที่เจียระไนไปทำการชุบแข็งดังภาพที่ 3-8

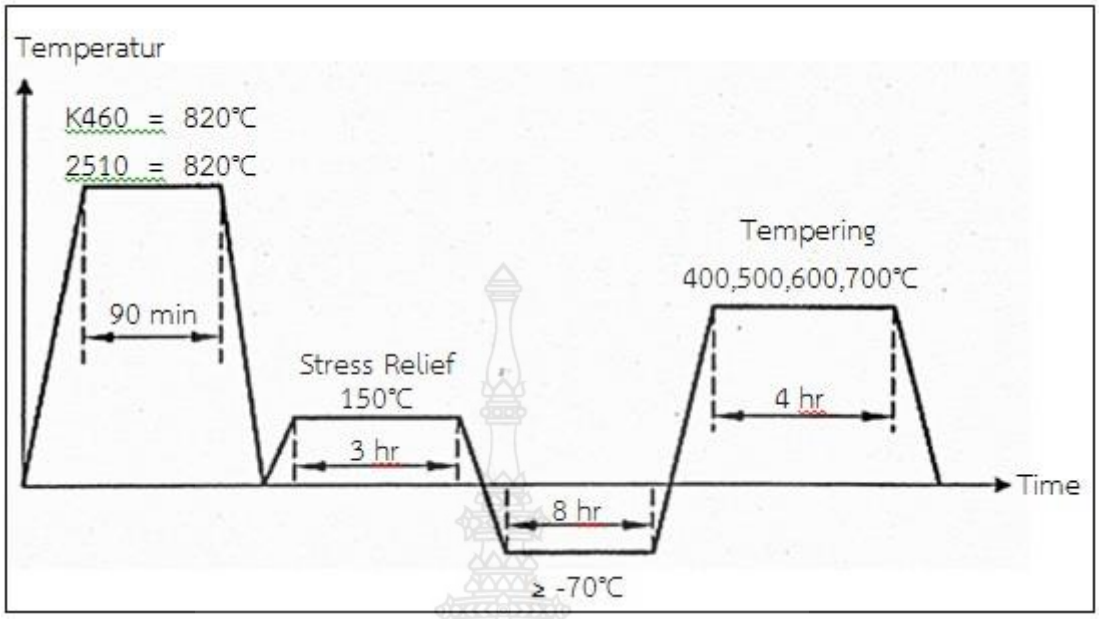


ภาพที่ 3-8 แสดงการเจียระไนชิ้นงาน

3.2.8 ทำการชุบแข็ง ซึ่งผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) ชุบแข็งที่เตาควบคุมบรรยากาศโดยเหล็กเกรด K460 และเหล็กเกรด 2510 ชุบที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิ (Holding Time) 90 นาที อุณหภูมิน้ำมันชุบแข็ง 60 องศาเซลเซียส และทำการคลายความเครียด (Stress Relief) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.2.9 ทำการบำบัดเย็น (Sub Zero Treatment) หลังจากทำการชุบแข็งนำชิ้นงานมาทดสอบชุบอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส เพื่อช่วยลดปัญหาการเกิดออสเทนไนต์ตกค้าง โดยใช้น้ำแข็งแห้งใส่ลงในแอลกอฮอล์ได้อุณหภูมิที่น้อยกว่า -70 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินาน 8 ชั่วโมง

3.2.10 อบคืนตัว (Tempering) โดยแบ่งกระบวนการอบคืนตัวของเหล็กทั้งสองเกรดออกเป็น 4 อุณหภูมิ คือ 400, 500, 600 และ700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยการอบคืนตัวทำในเตาสูญญากาศดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 แสดงขั้นตอนการชุบแข็งของเหล็ก

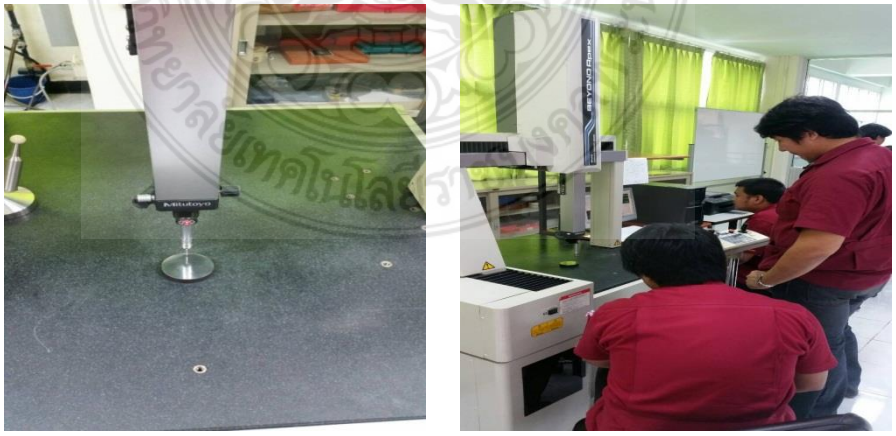
3.2.11 นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งเรียบร้อยแล้วมาทำการเจียระไน เพื่อให้ได้ขนาด 15 มิลลิเมตร เพื่อปรับผิวของชิ้นงานหลังจากการชุบดังภาพที่ 3-10

ภาพที่ 3-10 แสดงการเจียระไนชิ้นงานโดยมีปากกาจับชิ้นงาน

3.2.12 นำชิ้นงานในข้อ 3.2.11 มาขัดผิวหน้าโดยเริ่มจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 600 และ1,200 ด้วยเครื่องขัดตามลำดับ แล้วจึงเปลี่ยนเป็นการขัดด้วยผ้าสักหลาด โดยใช้ผงอลูมิน่าขนาด 0.05 ไมครอน (μm) เป็นตัวหล่อลื่นในการขัดดังภาพที่ 3-11

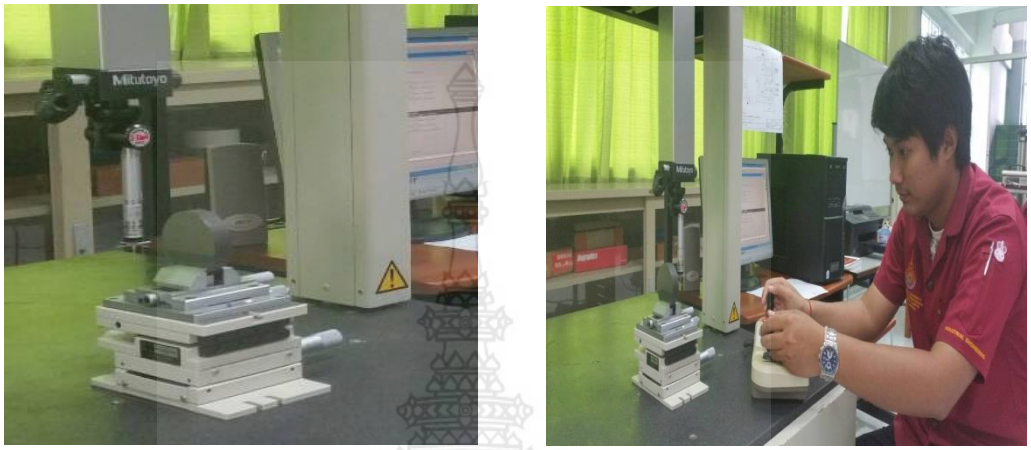
ภาพที่ 3-11 แสดงการขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเครื่องขัดกระดาษทรายและผ้าสักหลาด

3.2.13 ตรวจสอบความราบผิว (Flatness) ด้านบนของชิ้นงาน โดยเครื่องวัด 3 มิติ (Coordinate Measuring Machine : CMM) ดังภาพที่ 3-12



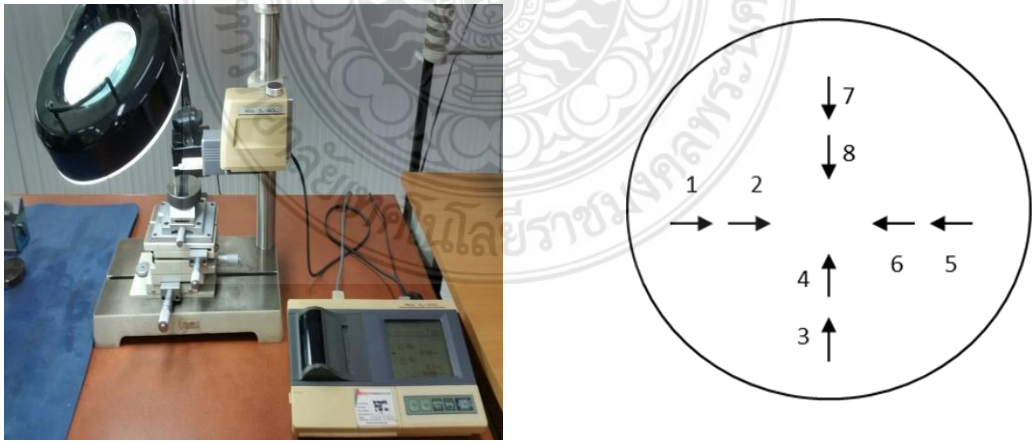
ภาพที่ 3-12 แสดงการตรวจสอบความราบผิวของชิ้นงานโดยเครื่องวัด 3 มิติ

3.2.14 ตรวจสอบความขนานของแท่งอ้างอิงความแข็ง (Parallel) โดยเครื่องวัดวัด 3 มิติ (Coordinate Measuring Machine : CMM) ดังภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 แสดงการตรวจสอบความขนานของชิ้นงาน

3.2.15 ตรวจสอบความหยาบผิวของชิ้นงานโดยเครื่องวัดความหยาบผิวขนาดหัววัด 0.025 มิลลิเมตร โดยทำการวัดจากขอบด้านนอกของแท่งอ้างอิงความแข็งเข้าหาจุดศูนย์กลาง ความยาวการวัด 1.25 มิลลิเมตร ความเร็วในการวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที แท่งละ 8 จุด เนื่องจากเครื่องวัดความหยาบผิวมีระยะในการวัดสั้นดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 แสดงการวัดความหยาบผิวของแท่งอ้างอิงความแข็งตำแหน่งและทิศทางการวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน

3.2.16 ตรวจสอบหาค่าความแข็งโดยเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลซี ชิ้นละ 10 จุด บันทึกผลจากการทดสอบและนำมาหาค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยดังภาพที่ 3-15

ภาพที่ 3-15 แสดงการทดสอบค่าความแข็งโดยใช้เครื่องวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลซี

3.2.17 นำค่าพิสัยมาวิเคราะห์และสรุปผล เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005 เพื่อสรุปผลการทำโครงงาน

บทที่ 4
ผลการดำเนินงานและทดสอบ

ในการดำเนินการศึกษา กรรมวิธีการผลิตแท่งอ้างอิงมาตรฐานการวัดความแข็งร็อคเวลล์ สเกลซี โดยเลือกใช้วัสดุ K460 กับ 2510 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 และมีความหนา 15 มิลลิเมตร

4.1 ผลการวัดแท่งอ้างอิงทางความแข็ง

4.1.1 ความราบของผิวบน (Flatness) ของเหล็ก K460 และ 2510

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการวัดค่าความราบผิวบนแท่งอ้างอิงทางความแข็ง

ลำดับที่	Serial Number ของเหล็ก K460	ค่าความราบผิว (มม.)	Serial Number ของเหล็ก 2510	ค่าความราบผิว (มม.)
1	K01	0.0075	D01	0.0021
2	K02	0.0086	D02	0.0035
3	K03	0.0076	D03	0.0082
4	K04	0.0086	D04	0.0047
5	K05	0.0083	D05	0.0028
6	K06	0.0063	D06	0.0089
7	K07	0.0083	D07	0.0032
8	K08	0.0095	D08	0.0058
9	K09	0.0054	D09	0.0056
10	K10	0.0088	D10	0.0086
11	K11	0.0083	D11	0.0058
12	K12	0.0062	D12	0.0032
13	K13	0.0044	D13	0.0078
14	K14	0.0059	D14	0.0077
15	K15	0.0073	D15	0.0062
16	K16	0.0081	D16	0.0076
17	K17	0.0043	D17	0.0024
18	K18	0.0079	D18	0.0018
19	K19	0.0091	D19	0.0056
20	K20	0.0084	D20	0.0086

ผลการค่าความราบผิวบนอยู่ระหว่าง 0.001-0.009 มิลลิเมตร อยู่ในมาตรฐานคือไม่เกิน 0.01 มิลลิเมตร

4.1.2 ความขนานเมื่อเทียบกับพื้นผิวด้านล่างของเหล็ก K460 และ 2510

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการวัดค่าความขนานแท่งอ้างอิงทางความแข็ง

ลำดับที่	Serial Number ของเหล็ก K460	ค่าความขนานผิว (มม.)	Serial Number ของเหล็ก 2510	ค่าความขนานผิว (มม.)
1	K01	0.0162	D01	0.0160
2	K02	0.0138	D02	0.0133
3	K03	0.0089	D03	0.0089
4	K04	0.0096	D04	0.0096
5	K05	0.0151	D05	0.0048
6	K06	0.0153	D06	0.0050
7	K07	0.0063	D07	0.0138
8	K08	0.0131	D08	0.0159
9	K09	0.0131	D09	0.0097
10	K10	0.0076	D10	0.0076
11	K11	0.0115	D11	0.0155
12	K12	0.0081	D12	0.0065
13	K13	0.0097	D13	0.0081
14	K14	0.0110	D14	0.0106
15	K15	0.0131	D15	0.0084
16	K16	0.0140	D16	0.0142
17	K17	0.0170	D17	0.0139
18	K18	0.0050	D18	0.0150
19	K19	0.0125	D19	0.0083
20	K20	0.0108	D20	0.0099

ผลการวัดค่าความขนานเมื่อเทียบกับพื้นผิวด้านล่างอยู่ระหว่าง 0.004-0.017 มิลลิเมตร อยู่ในมาตรฐานคือไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตร

4.1.3 ความหยาบผิวบน (Surface Roughness) ด้านบนของเหล็ก K460 และ 2510

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวบน (Ra) แท่งอ้างอิงทางความแข็งของเหล็ก K460

ลำดับที่	Serial Number	ค่าความหยาบผิวบน (μm)								เฉลี่ย (μm)	เฉลี่ย (mm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8		
1	K01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
2	K02	0.02	0.02	0.06	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00003
3	K03	0.05	0.02	0.02	0.02	0.05	0.04	0.03	0.01	0.03	0.00003
4	K04	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.05	0.03	0.00003
5	K05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002
6	K06	0.01	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00002
7	K07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
8	K08	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.01	0.03	0.00003
9	K09	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
10	K10	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00002
11	K11	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
12	K12	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00003
13	K13	0.06	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00003
14	K14	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002
15	K15	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.05	0.03	0.00003
16	K16	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
17	K17	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00003
18	K18	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.01	0.03	0.00003
19	K19	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
20	K20	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002

ผลการวัดค่าความหยาบผิวบน (Ra) อยู่ระหว่าง 0.00001-0.00005 มิลลิเมตร อยู่ในมาตรฐาน คือไม่เกิน 0.0003 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4-4 แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวบน (Ra) แท่งอ้างอิงทางความแข็งของเหล็ก 2510

ลำดับที่	Serial Number	ค่าความหยาบผิวบน (µm)								เฉลี่ย (µm)	เฉลี่ย (mm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8		
1	D01	0.02	0.02	0.06	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00003
2	D02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002
3	D03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002
4	D04	0.01	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00002
5	D05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
6	D06	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.05	0.03	0.00003
7	D07	0.05	0.02	0.02	0.03	0.05	0.04	0.03	0.01	0.03	0.00003
8	D08	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.01	0.03	0.00003
9	D09	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
10	D10	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00002
11	D11	0.04	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.00003
12	D12	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
13	D13	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00002
14	D14	0.03	0.02	0.02	0.01	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00002
15	D15	0.03	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00002
16	D16	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00003
17	D17	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00003
18	D18	0.06	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00003
19	D19	0.02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.00003
20	D20	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002

ผลการวัดค่าความหยาบผิวบน (Ra) อยู่ระหว่าง 0.00001-0.00006 มิลลิเมตร อยู่ในมาตรฐาน คือไม่เกิน 0.0003 มิลลิเมตร

4.1.5 ความหยาบผิวล่าง (Surface Roughness) ด้านล่างของเหล็ก K460 และ 2510

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวล่าง (Ra) แท่งอ้างอิงทางความแข็งของเหล็ก K460

ลำดับที่	Serial Number	ค่าความหยาบผิวล่าง (μm)								เฉลี่ย (μm)	เฉลี่ย (mm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8		
1	K01	0.01	0.05	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00003
2	K02	0.02	0.05	0.02	0.06	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.00003
3	K03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.03	0.03	0.00003
4	K04	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.03	0.02	0.03	0.00003
5	K05	0.06	0.02	0.01	0.05	0.04	0.02	0.03	0.05	0.04	0.00004
6	K06	0.02	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00003
7	K07	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.06	0.02	0.02	0.03	0.00003
8	K08	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.03	0.03	0.00003
9	K09	0.06	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	0.00003
10	K10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
11	K11	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002
12	K12	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002
13	K13	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
14	K14	0.02	0.02	0.06	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00003
15	K15	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00003
16	K16	0.05	0.02	0.06	0.03	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.00004
17	K17	0.04	0.03	0.06	0.02	0.02	0.03	0.05	0.01	0.03	0.00003
18	K18	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
19	K19	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00002
20	K20	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002

ผลการวัดค่าความหยาบผิวล่าง (Ra) อยู่ระหว่าง 0.00001-0.00006 มิลลิเมตร อยู่ในมาตรฐาน คือไม่เกิน 0.0008 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4-6 แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวล่าง (Ra) แท่งอ้างอิงทางความแข็งของเหล็ก 2510

ลำดับที่	Serial Number	ค่าความหยาบผิวล่าง (µm)								เฉลี่ย (µm)	เฉลี่ย (mm)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8		
1	D01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.00003
2	D02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002
3	D03	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00003
4	D04	0.03	0.02	0.06	0.03	0.05	0.01	0.03	0.04	0.03	0.00003
5	D05	0.02	0.03	0.06	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	0.03	0.00003
6	D06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00002
7	D07	0.01	0.02	0.03	0.05	0.03	0.01	0.02	0.04	0.03	0.00003
8	D08	0.02	0.02	0.06	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00003
9	D09	0.04	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00002
10	D10	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
11	D11	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.00003
12	D12	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
13	D13	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00003
14	D14	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
15	D15	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
16	D16	0.01	0.02	0.02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.00003
17	D17	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.01	0.03	0.00003
18	D18	0.01	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00002
19	D19	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00002
20	D20	0.01	0.05	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.03	0.00003

ผลการวัดค่าความหยาบผิวล่าง (Ra) อยู่ระหว่าง 0.00001-0.00006 มิลลิเมตร อยู่ในมาตรฐาน คือไม่เกิน 0.0008 มิลลิเมตร

4.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความแข็ง

ทำการผลิตแท่งอ้างอิงทางความแข็งในหน่วย ร็อคเวลล์ สเกล ซี โดยวิธีการชุบแข็งของเหล็ก K460 และ 2510 ซึ่งทำการชุบแข็งในเตาควบคุมบรรยากาศที่อุณหภูมิชุบ 820 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิ (Holding Time) เป็นเวลา 90 นาที อุณหภูมิกวนน้ำมัน 60 องศาเซลเซียส ทำการอบคลายความเครียด (Stress Relief) 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทำการบำบัดเย็น ที่อุณหภูมิน้อยกว่า -70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และอบคืนตัว (Tempering) 400, 500, 600 และ700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงตามลำดับ

4.2.1 เหล็ก K460 รหัส K01-K05 กับเหล็ก 2510 รหัส D01-D05 ทำการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 แสดงผลการวัดค่าความแข็งของเหล็กการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ลำดับที่	Serial Number	ค่าความแข็งในการวัดแต่ละครั้ง										ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย (Max-Min)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	K01	52.4	52.9	52.7	52.8	52.5	52.4	52.3	52.9	52.6	52.4	52.59	0.6
2	K02	52.2	53.1	53	53	53.1	52.2	52.7	52.7	52.2	52.4	52.66	0.9
3	K03	53.6	53.7	53.3	53.6	53.7	53	53.2	53.3	53.5	53.1	53.40	0.7
4	K04	53	53.1	53	53.3	53.3	52.6	53.2	52.7	52.7	52.4	52.93	0.9
5	K05	53.2	52.9	52.9	53.2	53	53	53.6	53.3	53.3	53.4	53.18	0.7
6	D01	52.8	53	53	53.3	53.4	53.6	53.4	53.5	53.5	53.4	53.29	0.8
7	D02	52.4	53.1	52.7	52.8	52.7	53.1	53.3	53.1	53.2	53.1	52.95	0.9
8	D03	52.5	52.7	52.7	52.4	52.5	52.6	52.8	52.5	52.2	53	52.59	0.8
9	D04	52.7	52.9	53	53.3	53	53.2	53.2	53.2	53.2	53.2	53.09	0.6
10	D05	52.4	52.9	52.9	52.9	52.8	52.7	52.8	53	53	53	52.84	0.6

ผลการวัดค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 52-53 HRC และค่าพิสัยอยู่ในมาตรฐานคือไม่เกิน ±1 HRC

4.2.2 เหล็ก K460 รหัส K06-K10 กับเหล็ก 2510 รหัส D06-D10 ทำการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส องศาเซลเซียสดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 แสดงผลการวัดค่าความแข็งของเหล็กการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ลำดับที่	Serial Number	ค่าความแข็งในการวัดแต่ละครั้ง										ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย (Max-Min)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	K06	46.6	46.4	46.5	46.5	46.4	45.8	46	46	46.3	46.4	46.29	0.6
2	K07	46.1	46.3	46.1	46.2	46.1	45.4	46.1	45.7	45.8	45.7	45.95	0.9
3	K08	45.6	45.8	45.5	45.2	46	45.5	45.7	45.7	45.4	45.5	45.59	0.8
4	K09	46.2	46.2	46.2	46.2	46.2	45.7	45.9	46	46.3	46	46.09	0.6
5	K10	45.7	45.8	46	46	46	45.4	45.9	45.9	45.9	45.8	45.84	0.6
6	D06	45.4	45.3	45.9	45.6	45.4	45.4	45.9	45.7	45.8	45.5	45.59	0.6
7	D07	45.2	45.7	45.7	45.2	45.4	45.2	46.1	46	46	46.1	45.66	0.9
8	D08	46	46.2	46.3	46.5	46.1	46.6	46.7	46.3	46.6	46.7	46.40	0.7
9	D09	45.6	46.2	45.7	45.7	45.4	46	46.1	46	46.3	46.3	45.93	0.9
10	D10	46	46.6	46.3	46.3	46.4	46.2	45.9	45.9	46.2	46	46.18	0.7

ผลการวัดค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 45-46 HRC และค่าพิสัยอยู่ในมาตรฐานคือไม่เกิน ±1 HRC

4.2.3 เหล็ก K460 รหัส K11-K15 กับเหล็ก 2510 รหัส D11-D15 ทำการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส องศาเซลเซียสดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 แสดงผลการวัดค่าความแข็งของเหล็กการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ลำดับที่	Serial Number	ค่าความแข็งในการวัดแต่ละครั้ง										ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย (Max-Min)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	K11	42	42.1	42.5	42.3	42.3	42.2	42.7	42.6	42.7	42.6	42.40	0.7
2	K12	41.6	41.4	41.7	41.7	42	41.2	42.1	42.3	42.3	42	41.83	0.9
3	K13	41.6	42	41.2	41.5	41.7	41.8	41.7	41.4	41.5	41.5	41.59	0.6
4	K14	41.7	42	42	42	41.9	41.8	41.9	41.9	41.8	41.4	41.84	0.6
5	K15	41.4	41.4	41.6	41.9	41.7	41.3	41.9	41.8	41.5	41.4	41.59	0.6
6	D11	41.2	41.4	41.2	41.7	42	41.7	42.1	42	42.1	41.2	41.66	0.9
7	D12	42.2	42.2	42.2	42.2	42	42.2	41.9	42.3	42	41.7	42.09	0.4
8	D13	42	42.4	42.3	42.3	41.9	42.6	41.9	42.2	42	42.2	42.18	0.7
9	D14	42.6	42.4	42.5	42.5	42	42.4	42	42.3	42.4	41.8	42.29	0.8
10	D15	42.1	42.1	42.2	42.1	41.7	42.3	42.1	41.8	41.7	41.4	41.95	0.9

ผลการวัดค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 41-42 HRC และค่าพิสัยอยู่ในมาตรฐานคือไม่เกิน ±1 HRC

4.2.3 เหล็ก K460 รหัส K15-K20 กับเหล็ก 2510 รหัส D15-D20 ทำการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส องศาเซลเซียสดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 แสดงผลการวัดค่าความแข็งของเหล็กการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ลำดับที่	Serial Number	ค่าความแข็งในการวัดแต่ละครั้ง										ค่าเฉลี่ย	ค่าพิสัย (Max-Min)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	K16	35	35.2	35.3	35.2	35.2	35	34.8	35.2	34.9	35.2	35.09	0.5
2	K17	34.7	34.7	35	34.2	34.2	35.1	34.2	35	35.1	34.4	34.66	0.9
3	K18	35.5	35.4	35.3	35	35.6	35.4	34.8	35.5	35	35.4	35.29	0.8
4	K19	35.3	35.6	35.2	35.3	35	35	35.2	34.9	34.9	35.4	35.18	0.7
5	K20	34.9	34.3	34.8	34.6	34.4	34.5	34.4	34.7	34.9	34.4	34.59	0.6
6	D16	34.5	34.8	34.4	34.2	34.6	34.5	34.5	34.7	34.7	35	34.59	0.8
7	D17	34.7	35.2	35.3	34.7	34.6	35.3	35	35	35.1	34.4	34.93	0.9
8	D18	35.1	35.3	34.8	35.2	35.1	34.7	34.4	34.7	35.1	35.1	34.95	0.9
9	D19	35.3	35.2	35.6	35.5	35	35.7	35.6	35.3	35.7	35.1	35.40	0.7
10	D20	35	34.8	34.9	35	34.7	34.8	34.5	34.9	34.9	35	34.84	0.4

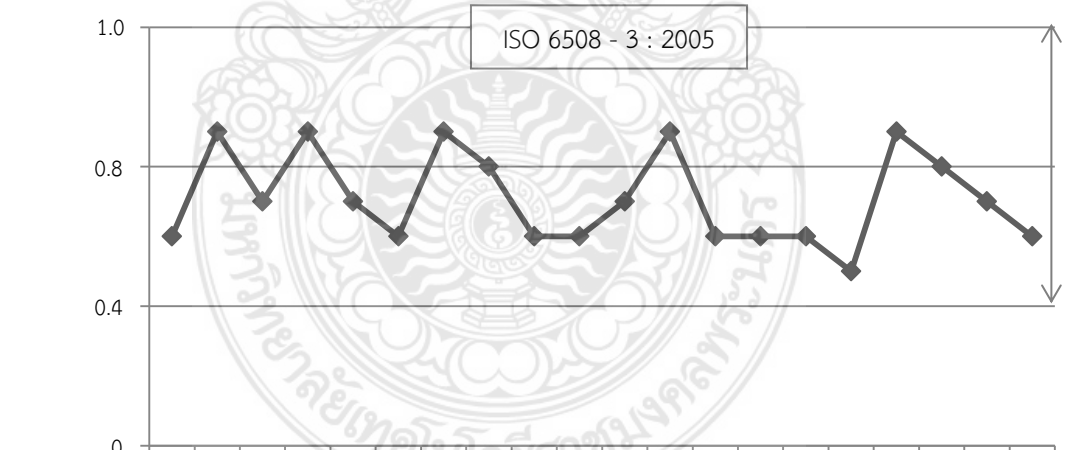
ผลการวัดค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 34-35 HRC และค่าพิสัยอยู่ในมาตรฐานคือไม่เกิน ±1 HRC

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการศึกษาการผลิตอ้างอิงทางความแข็งมาตรฐานโดยใช้ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กเกรด K460 และ 2510 ตามมาตรฐาน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 และมีความหนา 15 มิลลิเมตร นำมาทำการผลิตโดยการชุบแข็งที่เตาควบคุมบรรยากาศที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมิเป็นเวลา 90 นาที อุณหภูมิน้ำมันชุบแข็ง 60 องศาเซลเซียส และทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, และ700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตามลำดับและทำการบำบัดเย็นที่อุณหภูมิน้อยกว่า -70 องศาเซลเซียส นำมาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ สเกลซี สามารถสรุปได้ดังนี้

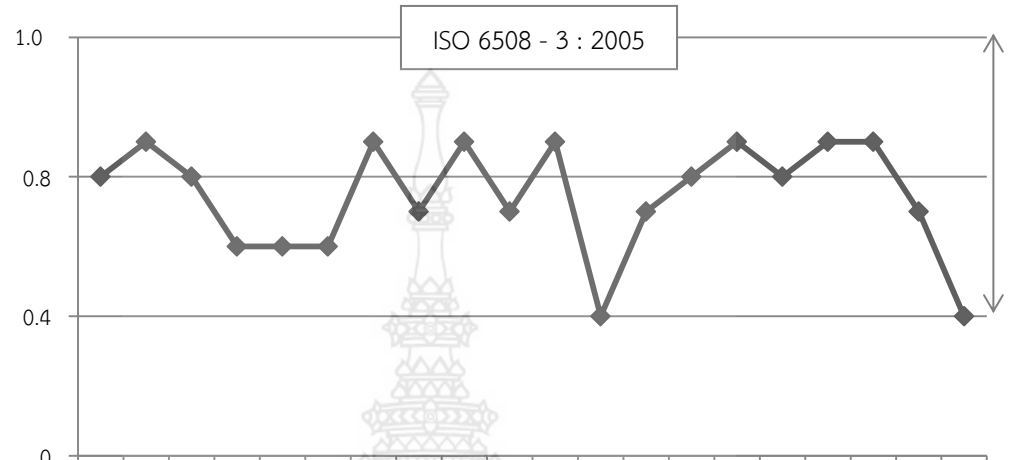
5.1.1 ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบเหล็ก K460 ได้ค่าความแข็งและมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.4-0.9 HRC ตามลำดับซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน



	K01	K02	K03	K04	K05	K06	K07	K08	K09	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18	K19	K20
ค่าพิสัย	0.6	0.9	0.7	0.9	0.7	0.6	0.9	0.8	0.6	0.6	0.7	0.9	0.6	0.6	0.6	0.5	0.9	0.8	0.7	0.6
Tempering	400 ℃					500 ℃					600 ℃					700 ℃				

ภาพที่ 5-1 กราฟแสดงค่าพิสัยของเหล็ก K460

5.1.2 ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบเหล็ก 2510 ได้ค่าความแข็งและมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 - 0.9 HRC ตามลำดับซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน



	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20
ค่าพิสัย	0.8	0.9	0.8	0.6	0.6	0.6	0.9	0.7	0.9	0.7	0.9	0.4	0.7	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.7	0.4

Tempering	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C

ภาพที่ 5-2 กราฟแสดงค่าพิสัยของเหล็ก 2510

5.1.3 ผู้ทำโครงงานสามารถควบคุมรูปร่างและสัดส่วนขนาดของแท่งอ้างอินทางความแข็งหน่วยร็อคเวลล์ สเกลซี ให้อยู่ในมาตรฐาน ISO 6508-3 : 2005 และการเปรียบเทียบระหว่างเหล็ก K460 และ 2510 จากกระบวนการอบชุบอุณหภูมิเดียวกันจะเห็นได้ว่าช่วงความแข็งที่ได้จะต่างกันไม่มากและค่าพิสัยอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ ± 1 HRC

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรนำเหล็กชนิดอื่นมาทำการผลิต

5.2.2 ควรทดสอบอุณหภูมิการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิหลายระดับ

5.2.3 ควรทดสอบเหล็กหลายชนิดเพื่อดูความแตกต่างของเหล็กแต่ละชนิด

5.3 อุปสรรคและปัญหาในการดำเนินงาน

5.3.1 เหล็กที่นำมาใช้ในการผลิตมีราคาสูงและบางชนิดหาซื้อได้ยาก

5.3.2 ต้องรอเวลาในการใช้เครื่องจักรในการผลิตชิ้นงาน

5.3.3 ต้องรอเวลาใช้เครื่องในการทดสอบแท่งอ้างอิงทางความแข็ง เนื่องจากมีการเรียนการสอน

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

การทดสอบความแข็งร็อคเวลล์สเกลซี. [ออนไลน์]. 2556 [สืบค้นวันที่ 16 มกราคม 2556]. จาก http://www.elenet.chandra .ac.th

การทดสอบ HRC. [ออนไลน์]. 2556 [สืบค้นวันที่ 22 มกราคม 2556]. จาก http://www.elenet.chandra.ac.th

การวัดค่าความหยาบผิว (Rt). [ออนไลน์]. 2556 [สืบค้นวันที่ 29 มกราคม 2556]. จาก http://www.tonanasia.com

การวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra). [ออนไลน์]. 2556 [สืบค้นวันที่ 30 มกราคม 2556]. จาก http://www.tonanasia.com

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าที่ยอมรับได้ของหัวบอล. [ออนไลน์]. 2556 [สืบค้นวันที่ 30 มกราคม 2556]. จาก http://www.tonanasia.com

ความเร็วตัดของงานกลึง. [ออนไลน์]. 2556 [สืบค้นวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2556]. จาก http://www.anurak007. myreadywed. com

จรัมพร หรรษมนตร์. **มาตรวิทยาการวัดขนาดและมิติ**. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.

ธิดาเดียว มยุรีสวรรค์. **สถิติสำหรับวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์**. กรุงเทพมหานคร: คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544.

บุญญศักดิ์ ใจจงกิจ. **ทฤษฎีงานเครื่องมือกล**. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตพระนครเหนือ, 2518.

มนัส สถิรจินดา. **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก**. กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2538.

มานพ ตันตระบัณฑิตย์. **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม**. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2541.

เม็ดมีดที่ทำจากวัสดุ Cemented Tungsten CarbideHenri Moissan. [ออนไลน์]. 2556 [สืบค้นวันที่ 27 มกราคม 2556]. จาก http://www.thefabricator.com

รูปทรงต่างๆของเม็ด WC. [ออนไลน์]. 2555 [สืบค้นวันที่ 27 มกราคม 2555]. จาก http://www.thefabricator.com

สมนึก วัฒนศรียกุล. **หลักการทดสอบวัสดุ**. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544.

โลหะวิทยา. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2538

ภาษาอังกฤษ

ISO 6508-1 : 1999 , **Metallic material-Rockwell herdness test-part 1 test method.**

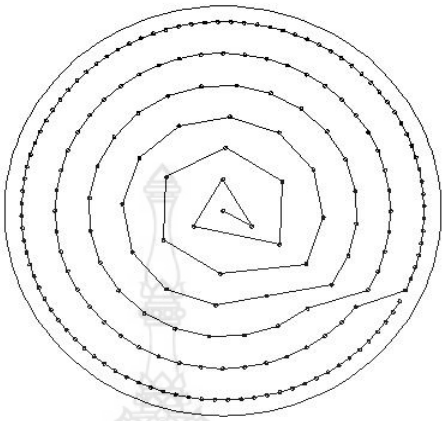
ISO 6508-2 : 1999 , **Metallic material-Rockwell herdness test-part 2 Verification and Calibration of testing machine.**

ISO 6508-3 : 1999 , **Metallic material-Rockwell herdness test-part 3 Calibration of reference blocks.**

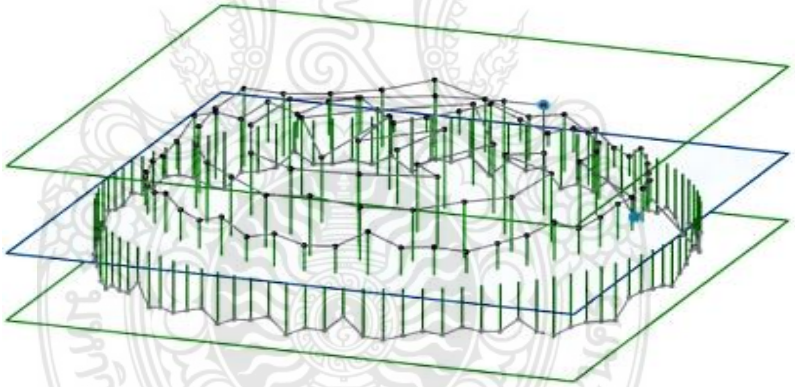
ISO 6508-3 : 2005 , **Metallic material-Rockwell herdness test-part 3 Calibration of reference blocks**

ภาคผนวก ก

ตำแหน่งการวัดความราบผิวและความขนานของชิ้นงาน



ภาพที่ ก-1 แสดงตำแหน่งการวัดความราบผิวและความขนานของชิ้นงานจำนวน 190 จุด



ภาพที่ ก-2 แสดงระดับความราบและความขนานของชิ้นงาน

ตางรางที่ ก-1 ตำแหน่งการวัดค่าความราบและความขนาน

ครั้งที่	จำนวนจุด	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	มุมที่ตรวจสอบ (องศา)
1	1	X0 , Y0	
2	3	10	0 , 120 , 240
3	6	20	260 , 320 , 20 , 80 , 140 , 200
4	12	30	270 , 300 , 330 , 360 , 30 , 60 , 90 , 120 , 150 , 180 , 210 , 240
5	24	40	280 , 295 , 310 , 325 , 340 , 355 , 10 , 25 , 40 , 55 , 70 , 85 , 100 , 115 , 130 , 145 , 160 , 175 , 190 , 205 , 220 , 235 , 250 , 265
6	48	50	290 , 297.5 , 305 , 312.5 , 320 , 327.5 , 335 , 342.5 , 350 , 357.5 , 5 , 12.5 , 20 , 27.5 , 35 , 42.5 , 50, 57.5 , 65 , 72.5 , 80 , 87.5 , 95 , 102.5 , 110 , 117.5 , 125 , 132.5 , 140 , 147.5 , 155 , 162.5 , 170 , 177.5 , 185 , 192.5 , 200 , 207.5 , 215 , 222.5 , 230 , 237.5 , 245 , 252.5 , 260 , 267.5 , 275 , 282.5
7	96	60	300 , 303.75 , 307.5 , 311.25 , 315 , 318.75 , 322.5 , 326.25 , 330 , 333.75 , 337.5 , 341.25 , 345 , 348.75 , 352.5 , 356.25 , 360 , 3.75 , 7.5 , 11.25 , 15 , 18.75 , 22.5 , 26.25 , 30 , 33.75 , 37.5 , 41.25 , 45 , 48.75 , 52.5 , 56.25 , 60 , 63.75 , 67.5 , 71.25 , 75 , 78.75 , 82.5 , 86.25 , 90 , 93.75 , 97.5 , 101.25 , 105 , 108.75 , 112.5 , 116.25 , 120 , 123.75 , 127.5 , 131.25 , 135 , 138.75 , 142.5 , 146.25 , 150 , 153.75 , 157.5 , 161.25 , 165 , 168.75 , 172.5 , 176.25 , 180 , 183.75 , 187.5 , 191.25 , 195 , 198.75 , 202.5 , 206.25 , 210 , 213.75 , 217.5 , 221.25 , 225 , 228.75 , 232.5 , 236.25 , 240 , 243.75 , 247.5 , 251.25 , 255 , 258.75 , 262.5 , 266.25 , 270 , 273.75 , 277.5 , 281.25 , 285 , 288.75 , 292.5 , 296.25
รวม	190		

ภาคผนวก ข

ISO 6508-3 : 2005

1. MANUFACTURE of reference blocks

1.1 The block shall be specially manufactured for use a hardness-reference block. note Attention is drawn to the need to use a manufacturing process which will give the necessary homogeneity. Stability of structure and uniformity of surface hardness

1.2 Each metal block to be calibrated shall be of a thickness not less than 6 mm. Reference block should have a thickness of 6 mm to 16 mm. To minimize the effect of hardness change with increasing number of indents. a minimum thickness of 12 mm should be used for steel. For other materials. Different thicknesses could be used.

1.3 The reference block shall be free of magnetism. It is recommended that the manufacturer ensure that the block, if made of steel, have been demagnetized at the end of the manufacturing process (before calibration)

1.4 The tolerance in flatness of the surfaces shall not exceed 0.01 mm. The bottom of the blocks shall not be convex.

1.5 The test and lower surfaces shall be free from damage, such as notches, scratches, oxide layers, etc., which interfere with the measurement of the indentations. The surface roughness Ra shall not exceed 0.0003 mm for the test surface and 0.0008 mm for the bottom surface: sampling length / = 0.8 mm (see ISO 4287:1997 , 3.1.9)

1.6 To verify that no material is subsequently removed from the reference block, the thickness at the time of calibration shall be marked on it, to the nearest 0.1 mm, or an identifying mark shall be made on the test surface [see 8.1 e]

2 Calibration machine

2.1 In addition to fulfilling the general conditions specified in Clause 3 of ISO 6508-2:2005, the calibration machine shall also meet the requirements given in 4.2 to 4.8

2.2 The machine shall be verified directly in intervals not exceeding 12 months. Direct verification involves:

a) calibration of the test force

b) verification of the indenter; the verification period can be extended for up to 5 years, if the indenter is verified for performance against at least one other reference indenter at intervals not exceeding 12 months;

c) calibration of the measuring system;

d) verification of the testing cycle; if this is not possible, at least the force versus time behavior.

2.3 The instruments used for the verification and calibration of the calibration machine shall be traceable to national standards.

2.4 “Each test force shall be measured using an elastic proving device (of ISO 376:2004 Class 0.5 or better), or by another method having the same or better accuracy. This measurement shall agree with the nominal preliminary test force F_0, to within ± 0.2 % and the nominal total test force F, to within $\pm 0.1\%$”

2.5 The diamond cone indenter shall meet the following requirements:

a) The diamond cone shall have a mean included angle of $(120 \pm 0.1)^\circ$. In each measured section, the included angle shall be $(120 \pm 0.17)^\circ$.

When the roundness of the cone is not measured, at least eight axial section planes, equidistant from each other, shall be measured. When the error in roundness of the cone does not exceed 0.004 mm, adjacent to the blend, two sections, normal to the indenter axis, shall be measured.

NOTE 1 The error of roundness is defined as the greatest radial distane between the conical surface and the circumscribing circle.

Deviations from straightness of the generatrix of the diamond cone, adjacent to the blend, shall not exceed 0.0005 mm over a minimum length of 0.4 mm.

b) The tip of the indenter is spherical. Its radius is determined from single values, measured in the axial section planes defined in a). The radius can be obtained by determining the intersection of two segments of the concentric circles. The distance between the concentric circles shall not be more than 0.002 mm. The single value is the mean value of the two radii of the concentric circles. Each single value shall within (0.2 ± 0.007) mm. Then mean value of at least eight single values shall be within (0.2 ± 0.005) mm. The surfaces of the cone and the spherical tip shall blend in a truly tangential manner.

c) The inclination of the axis of the diamond cone to the axis of the indenter holder (normal to the seating surface) shall be within 0.3°

d) Tests shall be made in accordance with the procedure described in Clause 5, on a minimum of the four blocks given in Table 1.

Table 1 – Hardness levels for different scales

Scale	Hardness	Tolerances
HRC	23	± 3
HRC	55	
HR45N	43	
HR15N	91	

For each block, the mean hardness value of three indentations made using the indenter to be verified shall not differ from the mean hardness value of the three indentation obtained with the reference indenter by more than ± 0.4 Rockwell units. The indentations made with the indenter to be verified, and with the reference indenter, should be adjacent.

The tests shall be made in accordance with ISO 6508-1 with a calibration machine. Reference indenters shall be recalibrated at a frequency no greater than 5 years.

NOTE 2 The reference indenter is the indenter or the indenters being recognized as the reference indenter(s) at a national level.

2.6 The characteristics of the hardmetal and steel balls, see ISO 6508-2, with the exception of the following tolerances for the ball diameter:

— ± 0.002 mm for the ball of diameter 1.5875 mm

— ± 0.003 mm for the ball of diameter 3.175 mm

2.7 The measuring system shall have a resolution of ± 0.0001 mm and an expanded uncertainty (2σ) of 0.0002 mm.

2.8 The testing cycle shall be tined with an uncertainty less than ± 0.5 s and shall conform to the testing cycle of Clause 5.

ภาคผนวก ค

ประวัติผู้จัดทำ

ประวัติคณะผู้วิจัย

<u>หัวหน้าโครงการวิจัย</u>

1. ชื่อ – นามสกุล นายสุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์

Mr. Sutthipong Jumroonrut

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 44299 00001 65 5

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

4. หน่วยงานที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทร. 0-2913-2424 ต่อ 4210 , มือถือ 081-441 9089

E-Mail : suttipong.j@rmutp.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ

วศ.ม. วิศวกรรมการผลิต

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างวุฒิการศึกษา)

6.1 วิศวกรรมหล่อโลหะ

6.2 การอบชุบโลหะด้วยความร้อน

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิชาภายในประเทศ โดยระบุสถานะในการทำวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการวิจัย : ไม่มี

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : การศึกษาความหยาบมีอิทธิพลต่อการวัดค่าความแข็ง

7.3 งานวิจัยที่ทำแล้วเสร็จ : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

1. การศึกษาผลของมุมการเทน้ำโลหะที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน ในกระบวนการหล่อโลหะอลูมิเนียม การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19 ภูเก็ต 2548 การสนับสนุนทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ หมายเลขโครงการ 4801060123
2. การจำลองการไหล และการแข็งตัวของกระบวนการหล่ออลูมิเนียม วารสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19 ภูเก็ต 2548
3. อิทธิพลของอุณหภูมิน้ำโลหะในกระบวนการหล่อโลหะอลูมิเนียม วารสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 นครราชสีมา 2549 ได้รับ การสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โครงการ F - 31-101 -21- 08

ผู้ร่วมโครงการ

1. ชื่อ – นามสกุล นายประสิทธิ์ แพงเพชร

Mr. Prasit Phangphet

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 5 6505 90009 17 1

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

4. หน่วยงานที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์และโทรสาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทร. 0-2913-2424 ต่อ 141 , มือถือ 083-890 9305

E-Mail : p_sitnbk@yahoo.com

5. ประวัติการศึกษา

วศ.บ. วิศวกรรมอุตสาหการ

วศ.ม. การจัดการอุตสาหกรรม

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างวุฒิการศึกษา)

6.1 การวัดและตรวจสอบ ขนาด รูปร่าง

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิชาภายในประเทศ โดยระบุสถานะในการทำวิจัย

7.1 ผู้อำนวยการวิจัย : ไม่มี

7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : การศึกษาความเป็นไปได้ของการนำแท่งอ้างอิงความแข็งกลับมาใช้ใหม่ตามมาตรฐาน ISO 6508-3

7.3 งานวิจัยที่ทำแล้วเสร็จ : ไม่มี