



รายงานการวิจัย

ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่าน
กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส
(CORROSION RESISTANCE OF LOW CARBON STEEL TREATED BY
GAS SURFACE HARDENING METHOD)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่าน
กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส
(CORROSION RESISTANCE OF LOW CARBON STEEL TREATED BY
GAS SURFACE HARDENING METHOD)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

นายสมศักดิ์ ศิวดารงพงศ์
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายกฤษฏี ท่าชี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2555

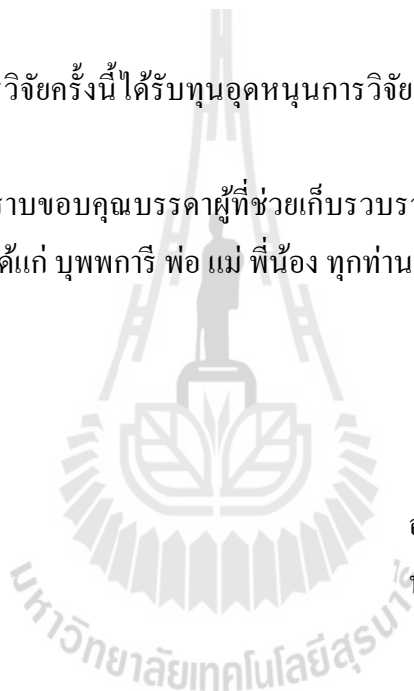
กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือของคณะผู้วิจัย, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกการทำวิจัย ทั้งข้อมูลความรู้ อุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่วิจัยและเก็บข้อมูล คุณนิพนธ์ ทวีจันทร์ ผู้จัดการแผนก QA ที่ได้อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และให้คำแนะนำต่าง ๆ

นอกจากนี้ในการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบรรดาผู้ที่ช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ และผู้ที่เป็นกำลังใจให้กับคณะผู้วิจัยทุกท่าน ได้แก่ บุพพการี พ่อ แม่ พี่น้อง ทุกคน



อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ สีวดารงพงส์

นายกฤษฎี ทำชี

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นวัสดุที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันอย่างมากมายหลายรูปแบบ เนื่องจากขึ้นรูปง่าย และราคาไม่แพง โดยเฉพาะเหล็กแผ่นมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น เหล็กแผ่นหม้อน้ำ เหล็กเส้นงานก่อสร้าง ตัวถังรถยนต์ ชิ้นส่วนยานยนต์ต่าง ๆ เครื่องใช้ในครัวเรือน และในสำนักงาน การใช้งานหลากหลายและมีสัดส่วนการใช้งานที่สูงแต่เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าชนิดอื่น พบว่าก็มีสถานะเสี่ยงต่อการกัดกร่อน ทำให้เกิดปัญหาที่ตามมามากมาย ทั้งการซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือการรีไซเคิลใหม่ทดแทนส่วนที่ชำรุดเสียหาย บางครั้งก็เป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินไป เช่น การออกแบบเพื่อ ใช้โลหะหนาเกินความจำเป็น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส ต่อคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด AISI 1020 ถูกนำไปปรับปรุงคุณสมบัติโดยการอบปกติและทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะด้วยเม็ดบอลขนาด 0.3 มิลลิเมตร จากนั้นปรับปรุงความแข็งที่ผิวชั้นงานด้วยแก๊ส จำนวน 4 กระบวนการคือ (1) ซอฟต์ไนไตรดิง (2) คาร์เบอร์ไรซิง (3) คาร์โบไนไตรดิง และ (4) กระบวนการร่วมระหว่างซอฟต์ไนไตรดิงกับคาร์เบอร์ไรซิง พร้อมทั้งตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความหนาของชั้นเคลือบผิว ความแข็งผิว การกัดกร่อนทางเคมี รวมทั้งโครงสร้างของชั้นงาน เพื่อดูความสามารถของการซึมลึกของผิวแข็งของชั้นงานที่ผ่านกระบวนการที่ต่างกัน และความทนทานต่อการกัดกร่อนในทางเคมี จากการทดลองพบว่า วิธีแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนต่ำที่สุด ในขณะที่แก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ทำให้ได้ชั้นเคลือบผิวที่น้อยแต่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีที่สุด การทำแก๊สซอฟต์ไนไตรดิงร่วมกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ให้ผลของค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกับวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิง แต่กระบวนการร่วมจะให้ค่าความสม่ำเสมอของค่าความแข็งผิวที่ดีกว่ากระบวนการแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

Abstract

Low carbon steel is widely used in industries due to its low cost and easy to recycle. Especially sheet steel is widely used as boiler plate, construction steel, automotive and auto body parts. However, the low carbon steel is also known that be easily attacked by environment and has low strength compared with other kinds of steel. Those lead to many problems, regarding to service life and maintenance cost. Sometimes the damage is excessive expenses such as designed for over size than its necessary. Therefore, the several surface coating and treatment techniques are employed to improve its properties. This study was aimed to investigate influence of gas surface hardening method on the corrosion of low carbon steel. The AISI 1020 specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Then the specimen was treated by gas soft-nitriding, gas carburizing, gas carbonitriding and the combined processes between gas soft nitriding and carburizing method. It was found that the gas carburizing method yielded the good corrosion resistance compared to other methods. The most advantage of the carburized method could be considered to be very small variation of corrosion. Moreover, it was found that the combined method results the best uniform of hardness among treated method.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์การวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	2
วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย	2
สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)	5
การเตรียมชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	6
การอบชุบเหล็ก (Steel heat treatment)	9
คุณสมบัติของวัสดุและการทดสอบ	23
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
การเตรียมชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	46
การชุบแข็งผิว	49
การตรวจดูโครงสร้างชั้นผิวขาวของกระบวนการแก๊สซอพท์ไนไตรดิง	51
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นทดสอบ	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การทดสอบความแข็งและการซึมลึก.....	53
การทดสอบการกัดกร่อน	57
การทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา	60
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว	66
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	69
ผลที่ได้จากการทดสอบ XRD	71
ผลที่ได้จากการทดสอบความแข็ง	77
ผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน.....	85
ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	96
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
สรุปผลการวิจัย	100
ข้อเสนอแนะ	101
รายการอ้างอิง	102
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	104
ประวัติผู้วิจัย	114

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนด Effective case depth	38
ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยิงเม็ดโลหะ GROWELL รุ่น GW-10.....	49
ตารางที่ 3.2 แสดงกระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด.....	50
ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 (%wt, Balance Fe)	69
ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิว ด้วยแก๊ส (%wt, Balance Fe).....	69
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งที่ตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตรและค่าระยะการซึ่มลึก	83

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิของการอบปกติ.....	7
รูปที่ 2.2 แสดงระบบผลึกที่ปรากฏพบในโลหะซึ่งได้แก่ B.C.C, F.C.C และ H.C.P.....	10
รูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิสมมูลของเหล็ก- คาร์บอน (Materials Science and Metallurgy, 1988).....	11
รูปที่ 2.5 แสดง Cooling curve for austempering	21
รูปที่ 2.6 แสดงแผนภูมิการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	24
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการตกกระทบและแสงสะท้อนของแสงบนผิวชิ้นงาน ถูกกัดด้วยสารละลาย	26
รูปที่ 2.8 แสดง Spark emission spectrometer.....	27
รูปที่ 2.9 แสดงหลักการการทำงานของ Spark emission spectrometer.....	27
รูปที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบระนาบผลึก	28
รูปที่ 2.11 แสดงขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ตัวอย่าง	29
รูปที่ 2.12 แสดงหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์.....	30
รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดรังสีเอ็กซ์	30
รูปที่ 2.14 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส	32
รูปที่ 2.15 แสดงหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส	32
รูปที่ 2.16 แสดงหาขนาดเส้นทแยงมุมเฉลี่ยในสองแนวซึ่งทำมุมกัน 90 องศา	33
รูปที่ 2.17 แสดงหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็ง ระดับจุลภาคแบบนูบ (Knoop)	35
รูปที่ 2.18 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์.....	36
รูปที่ 2.19 แสดง Scanning electron microscope (SEM)	41
รูปที่ 2.20 แสดงแสดงหลักการการทำงานของเครื่อง SEM	42
รูปที่ 2.21 แสดงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM	43
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.2 แสดงขนาดต่าง ๆ ของชั้นทดสอบ (มิลลิเมตร)	47
รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ตัวอย่าง	53
รูปที่ 3.4 แสดงการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส	54
รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการกด และวัดรอยบุ๋มปริมาตร	55
รูปที่ 3.6 รอยกดที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส	56
รูปที่ 3.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะการซึมลึก	56
รูปที่ 3.8 แสดง Calibration curve	59
รูปที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ รวมทั้งระบบภายใน Column (A) และ Console unit (B) ของ SEM.....	61
รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ	62
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่ผ่านกระบวนการ แก๊สซอพต์ไนไตรดิง 1	67
รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่ผ่านกระบวนการ แก๊สซอพต์ไนไตรดิง 2	67
รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่ผ่านกระบวนการ แก๊สซอพต์ไนไตรดิง 3	68
รูปที่ 4.4 แสดงภาพ XRD ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020.....	72
รูปที่ 4.5 แสดงภาพ XRD ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง	73
รูปที่ 4.6 แสดงภาพ XRD ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง	74
รูปที่ 4.7 แสดงภาพ XRD ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง.....	75
รูปที่ 4.8 แสดงภาพ XRD ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย กระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งบริเวณผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการยิงเม็ดโลหะ	77
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง.....	78
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิง	80
รูปที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่าน การชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนไตรดิงกับ แก๊สคาร์เบอร์ไรซิง	82
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟอัตราการกัดกร่อนต่อครดไฮโดรคลอริกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส.....	85
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟอัตราการสูญเสียน้ำหนักโดยการกัดของกรดไฮโดรคลอริกของเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส	86
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย แก๊สซอพท์ไนไตรดิงต่อค่าของชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้น.....	87
รูปที่ 4.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการสูญเสียน้ำหนักของขึ้นทดสอบที่ผ่านการ ชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพท์ไนไตรดิงต่อค่าของชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้น.....	88
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าระยะการซึมลึกของ ขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง	89
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิว ด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงต่อค่าความแข็งตำแหน่งที่ 0.4 มิลลิเมตร	90
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าระยะการซึมลึกของ ขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง	91
รูปที่ 4.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิว ด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิงต่อค่าความแข็งตำแหน่งที่ 0.4 มิลลิเมตร	92

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.21 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบ
 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ไนไตรดิงกับ
 แก๊สคาร์เบอร์ไรซิง..... 93

รูปที่ 4.22 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิว
 ด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิงต่อค่าค่าความแข็งตำแหน่งที่ 0.4 มิลลิเมตร 94

รูปที่ 4.23 แสดงกราฟอัตราการกัดกร่อนต่อกรดไฮโดรคลอริกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
 AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส..... 95

รูปที่ 4.24 แสดงภาพถ่าย SEM ที่ผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านทาน
 ต่อกรดไฮโดรคลอริกที่ 5.55 เปอร์เซ็นต์..... 97

รูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่าย SEM ที่ผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านทาน
 ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 99



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	Ferrite หรือ เหล็กแอลฟา
γ	=	Fe_4N
ϵ	=	Fe_{2-3}N
AAS	=	Atomic absorption spectroscopy
AISI	=	American Iron and Steel Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
B.C.C	=	Body Centered Cubic
B.C.T	=	Body Centered Tetragonal
CB	=	Carburizing
CN	=	Carbomitridding
DI	=	De Ionized
F.C.C	=	Face Centered Cubic
H.C.P	=	Hexagonal Close Packed
HV	=	Vickers hardness
mm	=	Millimeter
OES	=	Optical emission spectrometer
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SN	=	Soft nitriding
SNCB	=	Soft nitriding + Carburizing
XRD	=	X-ray diffraction

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) เป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.2% (มณีส สติรจินดา, 2537) นอกจากคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่นผสมด้วยเช่น แมงกานีส ซิลิกอน ฟอสฟอรัสและกำมะถัน แต่มีปริมาณน้อย หลงเหลือมาจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติเหนียวแต่ไม่แข็งแรงนัก สามารถนำไปกลึง กัด ไส เจาะได้ง่าย เป็นเหล็กที่อ่อน สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย เหล็กชนิดนี้เหมาะกันงานที่ไม่ต้องการความเค้นแรงดึงสูงนัก นอกจากนี้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำไม่สามารถนำมาชุบแข็งหรือชุบผิวแข็งได้ แต่ถ้าต้องการชุบแข็งต้องใช้วิธีเติมคาร์บอนที่ผิวก่อนเพราะมีคาร์บอนน้อย เหล็กประเภทนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวันไม่ต่ำกว่า 90% (LPN, www, 2005) เนื่องจากขึ้นรูปได้ง่าย และราคาไม่แพง โดยเฉพาะเหล็กแผ่นมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น เหล็กแผ่นหม้อน้ำ เหล็กเส้นในงานก่อสร้าง ตัวถังรถยนต์ชิ้นส่วนยานยนต์ต่าง ๆ เครื่องใช้ในครัวเรือนและในสำนักงาน

การกัดกร่อน (Corrosion) หรือการเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อน เป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย โดยเฉพาะเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีการใช้งานหลากหลายและมีสัดส่วนการใช้งานที่สูงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ ก็มีสถานะเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเช่นกัน ทำให้เกิดปัญหาที่ตามมามากมาย ทั้งการซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือการรีไซเคิลทดแทน ส่วนที่ชำรุดเสียหาย บางครั้งก็เป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินไป การออกแบบเพื่อใช้โลหะหนาเกินความจำเป็น นอกจากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายของการค้นคว้าวิจัย เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้ในช่วงแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน

การปรับปรุงคุณสมบัติผิววิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง (Gas carburizing) แก๊สคาร์โบไนไตรดิ้ง (Gas carbonitriding) และแก๊สซอฟต์ไนไตรดิ้ง (Gas soft nitriding) เป็นกระบวนการปรับปรุงผิวโลหะที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยการควบคุมอุณหภูมิ เวลา และบรรยากาศภายในเตาให้มีความเหมาะสม วิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ควบคุมบรรยากาศในเตาให้มีคาร์บอนสูงประมาณ 0.8-1.2% ที่อุณหภูมิสูงเหนือเส้น A3 (เปลี่ยนแปลงเฟสเป็นออสเทนไนต์) วิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิ้ง จะควบคุมสภาพบรรยากาศภายในเตาให้มีทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนแล้วทำการอบที่อุณหภูมิสูงเหนือเส้น A3 เช่นเดียวกับวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ส่วนวิธีแก๊สซอฟต์ไนไตรดิ้งจะทำการอบที่อุณหภูมิประมาณ 550-570 องศาเซลเซียส และควบคุมบรรยากาศภายในเตาให้มีคาร์บอนและ

ไนโตรเจนเช่นกัน ซึ่งความเข้มข้นของแก๊สและเวลาในการอบนั้นขึ้นอยู่กับความลึกของผิวแข็งที่ต้องการ กระบวนการปรับปรุงผิวแข็งทั้งหมดดังที่กล่าวข้างต้นอาศัยกฎของการแพร่ซึม หากการแพร่ซึมมีอัตราที่สูงก็จะทำให้เกิดชั้นเคลือบผิวแข็งของแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง แก๊สคาร์โบไนไตรดิง และแก๊สซอพต์ไนไตรดิง ให้มีความหนามากขึ้นด้วย

กระบวนการชุบผิวแข็งด้วยแก๊สในแต่ละกระบวนการนั้นจะให้ผลที่ได้แตกต่างกันโดยลักษณะเด่นของทุก ๆ กระบวนการนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดีตามความเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาถึงผลของการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาถึงอิทธิพลของการชุบแข็งที่ผิวด้วยแก๊สต่อผิวชิ้นงานทางด้านโครงสร้าง ความแข็งแรงของชิ้นงาน ความหนาชั้นผิวแข็งและการทนต่อการกัดกร่อนทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาและเก็บข้อมูลทางเทคนิคของ วัสดุ และกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการอบชุบผิวแข็งเหล็ก รวมถึงเตาอบชุบ
- 3) ออกแบบการทดลองสำหรับการชุบผิวแข็งเหล็กด้วยแก๊ส และการทดสอบหาความแข็งแรงและความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
- 4) ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบ โดยการนำเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 อบชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส 4 กระบวนการคือ ซอพต์ไนไตรดิง คาร์เบอร์ไรซิง คาร์โบไนไตรดิง และกระบวนการร่วมระหว่างซอพต์ไนไตรดิงกับคาร์เบอร์ไรซิง
- 5) นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการชุบแข็งผิวแล้วมาดูโครงสร้าง (Microstructure) ทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความแข็งลึก (Total case depth) ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) Scanning electron microscope (SEM) และ X-ray diffraction (XRD)
- 6) วิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงานต่อการชุบแข็งผิว
- 7) จัดทำเอกสารและรายงานการวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

- 1) อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 1, 5 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2) บริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ตู้อบไฟฟ้า Memmert รุ่น UFE 600 ใช้สำหรับจำลองสภาวะทางความร้อนที่กระทำต่อชิ้นทดสอบในขณะที่ทำปฏิกิริยา
- 2) เครื่องชั่งดิจิทัล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง Analytical balance รุ่น BSA224S ยี่ห้อ Sartorius ใช้ในการชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนและหลังเจอสภาวะกัดกร่อน
- 3) เตาเผาไฟฟ้า Maximum temp 1100 Degree C ใช้ทำกระบวนการอบปกติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของชิ้นทดสอบ
- 4) เตาชุบแข็งผิว ของบริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด ใช้ทำกระบวนการชุบแข็งผิวของ ซอฟต์ไนไตรดิง คาร์เบอร์โรซิง และ คาร์โบไนไตรดิง
- 5) กล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล (Optical microscopes) สำหรับการตรวจดูโครงสร้างของชิ้นทดสอบรวมถึงชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้นได้ในกระบวนการซอฟต์ไนไตรดิง
- 6) เครื่อง Micro vickers hardness ใช้สำหรับการตรวจวัดค่าความแข็งและระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบ
- 7) เครื่อง Water Bath ใช้สำหรับในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับการทำปฏิกิริยาการกัดกร่อนเหล็กในสารละลาย
- 8) เครื่อง Shot blast ของ Gkowell รุ่น GW-10 สำหรับการทำความสะอาดผิวของชิ้นงานที่ผ่านการอบปกติ
- 9) เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของชิ้นทดสอบ
- 10) เครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) ใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบ
- 11) Atomic absorption spectroscop (AAS) ใช้สำหรับในการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่อยู่ในสารละลาย
- 12) Optical emission spectrometer (OES) รุ่น ARL 3460 Metals Analysis ใช้ตรวจวิเคราะห์หาธาตุในชิ้นทดสอบ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถอธิบายผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางกายภาพ และความต้านทานของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำได้
- 2) สามารถนำผลข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้เลือกกระบวนการให้เหมาะสมกับชิ้นงานได้



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงส่วนหลัก ๆ สามส่วน คือการเตรียมชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ส่วนที่สองคือการชุบผิวแข็ง (Surface hardening method) ซึ่งเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำให้มีความแข็งแรงมากขึ้นในส่วนที่สามจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งผิวแล้ว ซึ่งความรู้โดยทั่วไปที่เราได้นำมาศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

- 1) เหล็กกล้าคาร์บอน
- 2) การเตรียมชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอน
- 3) การอบชุบเหล็ก
- 4) การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ
- 5) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนคือเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลัก และมีปริมาณของธาตุผสมอื่น ๆ อยู่ในปริมาณที่น้อย (มันส์ สติร์จินดา, 2537) ตามคำนิยามของ AISI (American Iron and Steel Institute) จำกัดปริมาณธาตุผสมไว้ดังนี้ : แมงกานีสไม่เกิน 1.65%, ซิลิคอนไม่เกิน 0.60%, ทองแดงไม่เกิน 0.60% และปริมาณของฟอสฟอรัสรวมกับกำมะถันไม่เกิน 0.05% (ASM Specialty Handbook, 1996) ถือได้ว่า เฉพาะธาตุคาร์บอนเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้าชนิดนี้ เหล็กกล้าคาร์บอนสามารถแบ่งชนิดตามเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กดังนี้คือ

- 1) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนน้อยไม่เกิน 0.20% เป็นเหล็กที่อ่อนมีความแข็งแรงต่ำ สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย
- 2) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีปริมาณของคาร์บอนตั้งแต่ 0.20-0.50% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าประเภทแรก ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรทั่ว ๆ ไป
- 3) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีคาร์บอนตั้งแต่ 0.50% ขึ้นไปจัดเป็นเหล็กที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูง ใช้ทำเครื่องมือและเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอ

2.1.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน

ธาตุคาร์บอนอยู่ในเหล็กกล้าได้สองลักษณะคือ ในสภาพสารละลายของแข็ง (Solid solution) และส่วนที่เกินจากปริมาณที่สามารถละลายได้ จะรวมตัวกับเหล็กเป็นสารประกอบ อินเตอร์เมทัลลิกหรือซีเมนไต์ (มันส์ สติร์จินดา, 2537) ซึ่งมีบทบาททำให้เหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งแรงและค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนไต์ สำหรับความแข็งปรากฏว่ายังมีปริมาณคาร์บอนมาก ปริมาณซีเมนไต์จะมากตาม ส่งผลให้เหล็กกล้ามีความแข็งมากขึ้นตามปริมาณของคาร์บอน ส่วนค่าความเหนียวของเหล็กจะลดลงเมื่อมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น

2.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติเหนียวแต่ไม่แข็งแรงนัก สามารถนำไปกลึง กัด ใส เจาะ ได้ง่าย เป็นเหล็กที่อ่อน สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่ายเหล็กชนิดนี้เหมาะกันงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงนัก นอกจากนี้เหล็กชนิดนี้ไม่สามารถนำมาชุบแข็งหรือชุบผิวแข็งได้ แต่ถ้าต้องการชุบแข็งต้องใช้วิธีเติมคาร์บอนที่ผิวก่อน เพราะมีคาร์บอนน้อย เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไม่เกิน 0.2% การใช้งานได้แก่ เหล็กแผ่นหม้อน้ำ ท่อน้ำประปา เหล็กเส้นในงานก่อสร้าง เหล็กเคลือบดีบุกเช่น กระป๋องบรรจุอาหาร เหล็กอบสังกะสี เช่น แผ่นสังกะสีมุงหลังคา ทำตัวถังรถยนต์ ถังน้ำมัน งานย้ำหมุด ทำสกรู ลวด สลักเกลียว ชิ้นส่วนของเครื่องจักร โซ่ บานพับประตูพื้นเฟือง เป็นต้น

2.2 การเตรียมชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

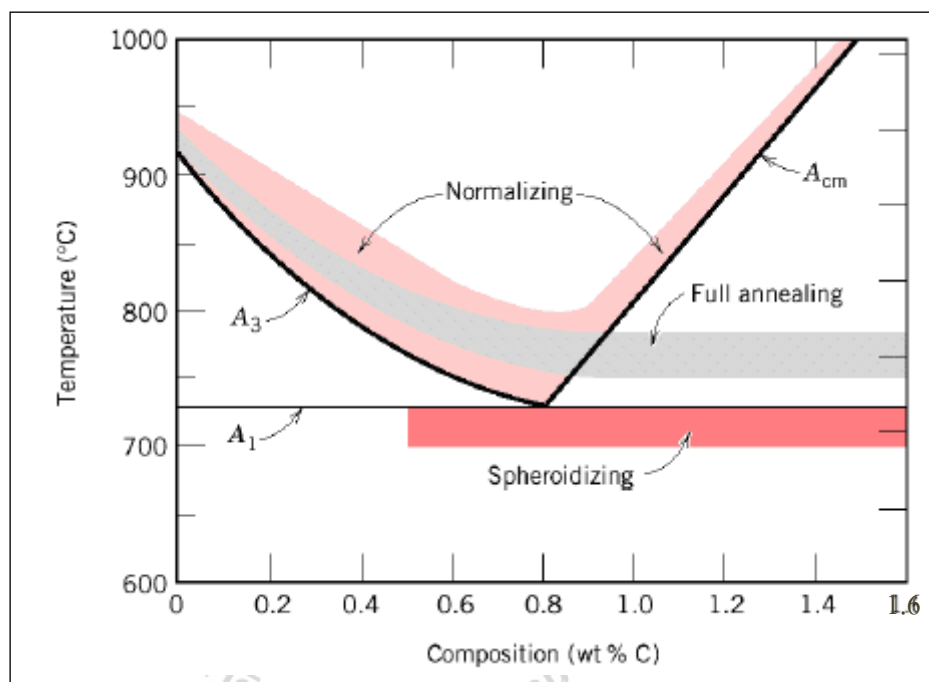
2.2.1 การอบปกติ (Normalizing)

มันส์ สติร์จินดา (2537) กล่าวว่า การอบปกติ เป็นการอบเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติมีวัตถุประสงค์สำคัญหลายประการคือ

- 1) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น
- 2) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการกลึงการไสหรือตัด
- 3) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเหนียวเช่นเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็น
- 4) ปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอเหมาะสมสำหรับทำการชุบแข็งในขั้นต่อไป
- 5) เป็นการทำลายความเครียดภายในที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็น

การอบปกติเป็นกรรมวิธีที่ใช้ทำกับงานสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนเช่นการรีด (Hot rolling) หรือการตีขึ้นรูป (Hot forging) เหล็กจะถูกเผาที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงจะได้เหล็กที่มีเกรน โดคุณสมบัติเชิงกลที่ดีจะเปลี่ยนไป (ทนแรงดึงแรงกระแทกได้น้อยลง) งานที่ผ่านการหล่อมากี่เช่นเดียวกันจะมีขนาดเกรน โดมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) และไม่สม่ำเสมอก็มีข้อเสียที่ควรจะต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

งานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นเช่นการรีด (Cold rolling) หรือการตีขึ้นรูปทำให้โครงสร้างภายในของเหล็กจะเกิดการบิดเบี้ยวไปตามทิศทางของแรงกระทำทำให้เกิดความเครียดภายในสูงเสียดความเหนียวและมีความแข็งเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอสิ่งที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่ดีเหล่านี้สามารถทำให้หมดไปและปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยเฉพาะขนาดของเกรนของเนื้อเหล็กทำให้มีขนาดที่เล็กละเอียดและสม่ำเสมอได้ด้วยการอบปกติซึ่งจะเน้นในเรื่องของการปรับปรุงโครงสร้างมากที่สุด (Grain refinement)



รูปที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิของการอบปกติ

จากรูปที่ 2.1 การอบปกติ ใช้วิธีเผาเหล็กให้ร้อนมีอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงออสเทนไนต์ (Austenite) ทั้งเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8% หรือสูงกว่า 0.8% จะเผาอุณหภูมิให้เหนือเส้น A₃ สำหรับเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ (Hypo eutectoid) และที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_{cm} สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (Hyper eutectoid) ประมาณ 30-50°C ที่ไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 30-60 นาทีต่อความหนาเฉลี่ย 25 มิลลิเมตรจากนั้นจะนำเหล็กออกจากเตาปล่อยให้เย็นในอากาศนิ่งอัตราการเย็นตัวประมาณ 1-5°C ต่อวินาที ถ้าเป็นการเป่าอากาศอัตราการเย็นตัวจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 10°C ต่อวินาทีอัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้นจะมีผลต่อโครงสร้างที่เกิดขึ้นกล่าวคืออัตราการเย็นตัวยิ่งเร็วการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงจุดยูเทคตอยด์ (Eutectoid) ของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงมาทางด้านคาร์บอนต่ำลงสำหรับไฮโปยูเทคตอยด์ และจะย้ายไปทางด้านที่มีคาร์บอน

มากขึ้นสำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ทำให้ปริมาณของเพิร์ไลต์ (Pearlite) เพิ่มขึ้นและความละเอียดของเพิร์ไลต์จะยิ่งดีขึ้น (เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำ) ความละเอียดของเพิร์ไลต์ หมายถึงแถบบาง ๆ ที่อยู่ในระหว่างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และซีเมนต์ไต์ (Cementite) จะแคบมาก นอกจากนี้โปรยูเทคตอยด์เฟอร์ไรต์ (Proeutectoid ferrite) ในเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์จะมีปริมาณน้อยลงและเช่นเดียวกันโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไต์ (Proeutectoid cementite) ในเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จะน้อยลงและลักษณะการต่อเนื่องตามขอบเกรนจะลดน้อยลง คุณสมบัติของโครงสร้างที่ประกอบด้วยเพิร์ไลต์ที่มีความละเอียดเช่นนี้ จะทำให้เหล็กมีความแข็งแรง และความแข็งสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการอบอ่อน จากที่กล่าวมาแล้วว่าการอบปกติเป็นการปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอเพื่อที่จะนำไปทำการชุบแข็งในภายหลังนั้น ทั้งนี้ก็เพื่อให้เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งมีคุณสมบัติที่ดี หลีกเลี่ยงข้อเสียที่จะเกิดขึ้น ปกติเหล็กยังมีเกรนละเอียดย่อมเป็นผลดีต่อการชุบแข็งมาก เพราะเหล็กมีเกรนหยาบและไม่สม่ำเสมอ ภายหลังการชุบแข็งเหล็กจะมีความแข็งไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน และบางทีอาจจะเกิดการบิดหรือแตกร้าวได้ ยิ่งเป็นเหล็กที่มีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่และปริมาณของธาตุที่ผสมขาดความสม่ำเสมอ การชุบแข็งอาจจะไม่ประสบผลดีตามที่ต้องการดังนั้นในกรณีที่ต้องการคุณภาพของเหล็กจากการชุบแข็งสูง จึงสมควรทำการอบปกติเสียขึ้นหนึ่งก่อนแล้วจึงนำไปทำการชุบแข็ง

2.2.2 การทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ (Shot blasting)

การเลือกสารพ่นสำหรับการพ่นทำความสะอาดแบบแห้ง วัสดุที่นิยมใช้ในการพ่นทำความสะอาดแบบแห้งนั้นสามารถแยกได้เป็น กรวดเหล็ก เม็ดเหล็ก ทราชแก้ว และ สารพ่นชนิดอื่น ๆ ความแข็ง ขนาด รูปร่างและความหนาแน่น ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกสรรสารพ่นสำหรับงานนั้น ๆ นอกจากนั้น กระบวนการคัดเลือกสารพ่นอาจต้องพิจารณาจากชิ้นงานที่จะพ่นด้วย โดยคำนึงถึงขนาด รูปร่าง รายละเอียดพื้นผิวที่ต้องการหลังการพ่น และกระบวนการต่าง ๆ ที่จะตามมาหลังจากการพ่นทำความสะอาดเสร็จแล้ว ทั้งนี้การตัดสินใจเลือกสารพ่นและวิธีการพ่นอย่างพิถีพิถันโดยคำนึงถึงปัจจัยที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว นับเป็นเกณฑ์ที่มีผลและนัยสำคัญต่อความสำเร็จของกระบวนการพ่นทำความสะอาดเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปแล้วพื้นผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นผิวที่ประกอบด้วยเหล็ก จะทำปฏิกิริยาได้เร็วมากภายหลังจากการพ่นทำความสะอาด ฉะนั้นแล้วกระบวนการอื่น ๆ เช่น การชุบเคลือบต่าง ๆ ควรกระทำต่อทันทีหลังจากพ่นทำความสะอาดเสร็จ สารพ่นที่เป็นโลหะมักมีรูปร่างเป็น เม็ดโลหะเหลี่ยม เม็ดโลหะกลม และเส้นลวดโลหะ

การพ่นทำความสะอาดหรือการทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ เป็นกระบวนการอัดเม็ดเหล็ก เช่น เม็ดบอล (Ball) หรือเม็ดกริด (Grid) ให้กระทบโดนที่ผิวของชิ้นงาน ด้วยขนาดของเม็ดโลหะ ความแรงและความเร็ว มีผลทำให้ชิ้นงานมีผิวที่สะอาด

ราบเรียบ (ASM International, 1987) ซึ่งเป็นเป้าหมายหลัก แต่ยังมีผลกระทบที่เกิดขึ้นอีกจากการยิงเม็ด โลหะคือความแข็งที่เพิ่มขึ้น (ASM International, Surface Engineering, 1987) ที่บริเวณผิวชิ้นงานจากแรงกระแทกของเม็ด โลหะเกิดความเค้นสะสมมีผลให้รีเทนออสเทนไนท์ (Retain austenite) ที่มีอยู่เปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite)

เม็ดโลหะเหล็ยม มักประกอบด้วยโลหะชั้นเล็ก ๆ ที่มีลักษณะเป็นเหล็ยมแหลมคม มีศักยภาพในการตัดสูง โดยทั่วไปเม็ดโลหะเหล็ยมมักทำขึ้นจากเม็ดเหล็กหล่อที่ผ่านการบดละเอียดหรือ เหล็กหล่อที่มีส่วนผสมของซิลิกาต่ำและผ่านการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมาแล้ว ซึ่งสามารถทำให้เป็นชั้นเล็ก ๆ ได้

เม็ดโลหะกลมมักทำมาจากวัสดุประเภทเดียวกับเม็ด โลหะเหล็ยม หากแต่มีรูปทรงกลม เม็ดโลหะกลมมีวิธีการทำงานต่างจากเม็ดโลหะเหล็ยม โดยการลบเหลี่ยมและสารปนเปื้อนต่าง ๆ บนพื้นผิวที่ทำการพ่นใส่ โดยแรงกระแทกล้วน ๆ เม็ดเหล็กกลมเป็นชนิดที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ซึ่งกระทบและทำลายพื้นผิวที่พ่นใสน้อยที่สุด หากพ่นเหล็กบนพื้นผิวโลหะจะได้พื้นผิวที่ไร้ความเงาวาว และสามารถควบคุมระดับความไม่เงาวาวได้โดยการเลือกขนาดของเม็ดเหล็ก

เส้นลวดโลหะ มีให้เลือกสำหรับโลหะหลัก ๆ เช่น อลูมิเนียม สแตนเลสซิงค์ และเหล็ก มีการใช้งานที่คล้ายกับเม็ดโลหะกลม

2.3 การอบชุบเหล็ก (Steel Heat-Treatment)

ณรงค์ศักดิ์ ชรรณ โชติ (2549) กล่าวว่า การศึกษาเรื่องเทคนิคด้านการอบชุบทางความร้อน จำเป็นต้องมีความเข้าใจในโลหะวิทยา เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และนำไปใช้ได้ถูกต้อง โดยจะเน้นคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเป็นส่วนใหญ่ การศึกษาต้องเข้าใจเป็นขั้นเป็นตอน เพื่อให้สามารถจินตนาการ มองเห็นภาพ เริ่มตั้งแต่โครงสร้างอะตอม จนถึงโครงสร้างที่โลหะอยู่รวมกันเป็นผลึกหรือเกรน

2.3.1 โครงสร้างระบบผลึกของโลหะ (Metallic crystal)

โลหะทุกชนิดประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่าอะตอม ซึ่งจะมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบภายในเกรน พบว่าการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมจะมีระบบที่แน่นอน และมีอยู่หลายระบบเรียกว่า ระบบผลึก (Crystallographic system) ในโลหะส่วนใหญ่จะพบระบบผลึกที่สำคัญอยู่สามระบบที่สำคัญ คือ

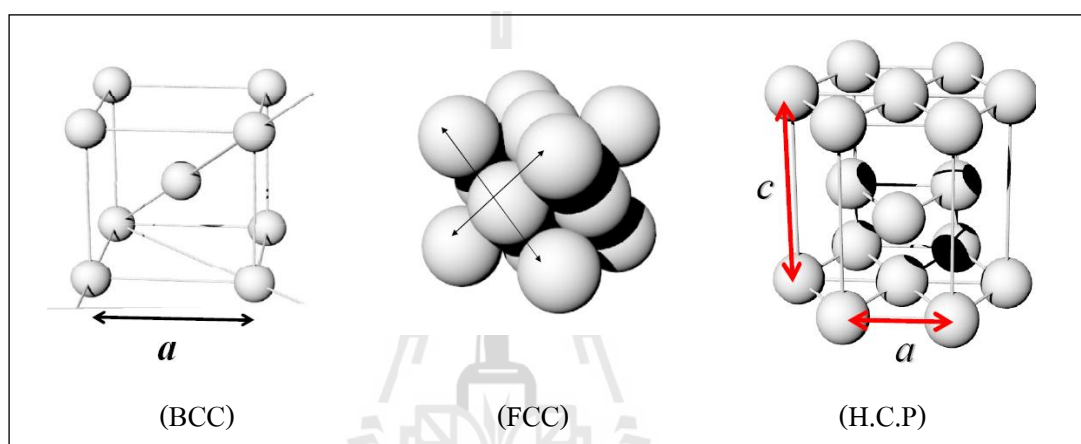
1) ระบบลูกบาศก์ (Cubic system) ซึ่งแบ่งย่อยออกไปเป็น

- ระบบ Body centered cubic (BCC) คือมี 1 อะตอมอยู่ตรงกลางและเรียงเป็นเส้นตรงแนวทแยงมุมกับอะตอมที่อยู่มุมทั้ง 8 และต่อออกไปทั่วทั้งลึกลงซึ่งเป็นทิศทางที่อะตอมอยู่ชิดกันมากที่สุด (ดังรูปที่ 2.2)

- ระบบ Face centered cubic (FCC) มีอะตอมอยู่ที่มุมทั้ง 8 และที่จุดกลางของด้านทั้ง 4 อะตอมจะสัมผัสกันในแนวทแยงมุมของด้านทั้ง 6 ของลูกบาศก์ (ดังรูปที่ 2.2)

2) ระบบ Hexagonal ระนาบบนและระนาบล่างจะมีลักษณะที่อยู่ชิดกันเป็นรูปหกเหลี่ยมและจุดกลางของระนาบ ระนาบกลางจะมี 3 อะตอม ซึ่งจะพบระบบนี้เกี่ยวกับเหล็กคือ ระบบ Hexagonal close packed (HCP) (ดังรูปที่ 2.2)

3) ระบบ Tetragonal เป็นลักษณะคล้ายลูกบาศก์ แต่มีส่วนสูงมากกว่า พบส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับเหล็กคือ ระบบ Body centered tetragonal (BCT)



รูปที่ 2.2 แสดงระบบผลึกที่ปรากฏพบในโลหะซึ่งได้แก่ BCC, FCC และ HCP

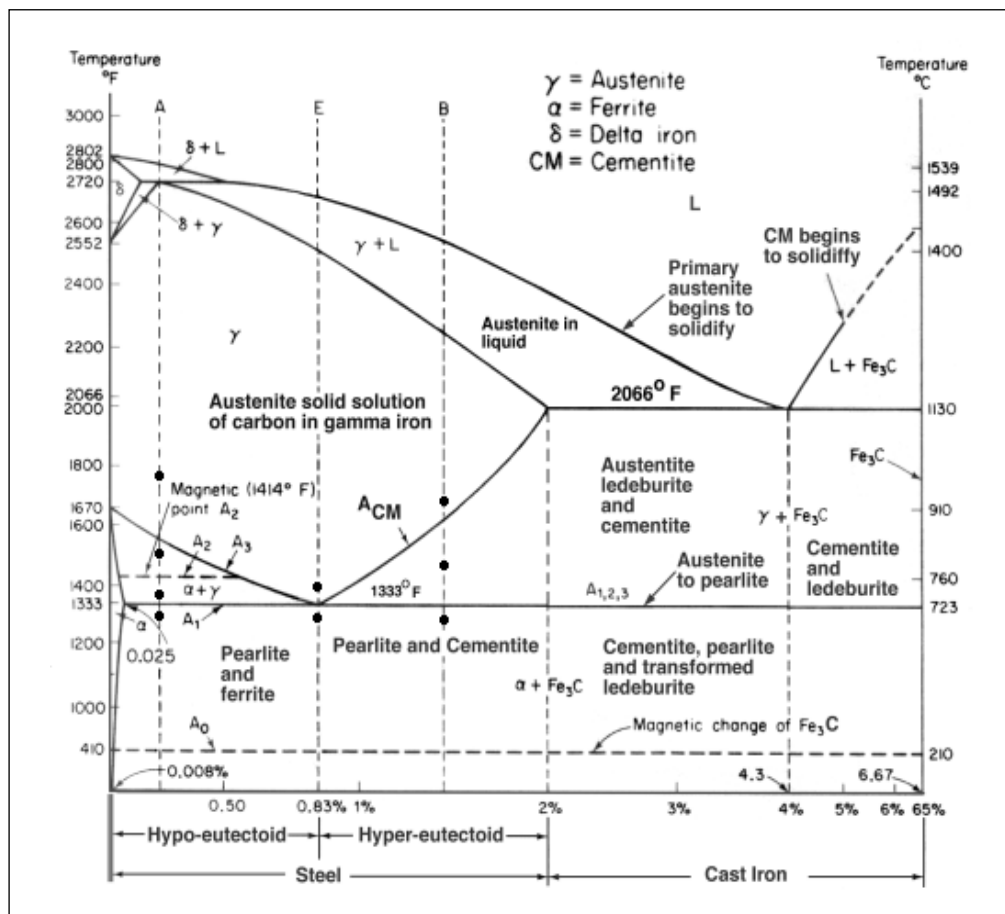
2.3.2 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอน

ในการอบชุบเหล็กกล้า จะกล่าวถึงแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์ไบด์มากกว่าเหล็กกับคาร์บอนเพราะคาร์บอนเป็นฟอร์มที่มีเสถียรภาพจะเกิดได้ในเหล็กต้องมีการเย็นตัวที่ช้ามาก เหล็กคาร์ไบด์จึงมีโอกาสเกิดได้มากกว่า แต่เป็นลักษณะที่ไม่เสถียรภาพเรียกว่ากึ่งเสถียรภาพหรือใช้คำว่า Metastable

เหล็กมีคุณสมบัติพิเศษคือเป็น โลหะที่มีผลึกไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น (มนัส สติรจินดา, 2540) ในเหล็กที่อุณหภูมิปกติจะมีระบบผลึกเป็น BCC และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 910°C เหล็กจะเปลี่ยนระบบผลึกเป็น FCC แต่ถ้าอุณหภูมิสูงถึง $1390-1534^{\circ}\text{C}$ เหล็กจะมีระบบผลึกเป็นแบบ BCC อีกครั้งหนึ่ง คุณสมบัติอีกประการหนึ่งคือเหนืออุณหภูมิ 768°C แม้เหล็กจะไม่ดึงดูเหล็ก เรียกจุดนี้ว่า Curic point (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงผลึกที่อุณหภูมินี้) ธาตุคาร์บอนสามารถละลายในเหล็กและให้สารละลายของแข็งในลักษณะแทรกที่ (Interstitial solid solution) เพราะอะตอมคาร์บอนมีขนาดเล็กกว่าเหล็ก โดยมีจุดอึดตัวที่ปริมาณ

และอุณหภูมิที่ต่างกันเช่น ที่อุณหภูมิ 723°C คาร์บอนจะละลายได้สูงสุด 0.025% ให้สารละลายของแข็งที่เรียกว่า เฟอร์ไรท์ (Ferrite) หรือเหล็กแอลฟา (α)

เมื่อปริมาณคาร์บอนเกินกว่าจุดอิ่มตัวที่จะให้สารละลายของแข็ง คาร์บอนส่วนเกินจะรวมตัวกับเหล็กเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ระหว่างคาร์บอนกับเหล็กมีสูตรคือ Fe_3C เป็นฟอร์มกึ่งเสถียรภาพ (Metastable) และจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเหล็กกับคาร์บอนเมื่อถูกเผาด้วยความร้อนและใช้เวลานาน



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภูมิสมดุลของเหล็ก คาร์บอน (Materials Science and Metallurgy, 1988)

ปฏิกิริยายูเต็คตอยด์ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดในสภาพของแข็ง สารละลายที่มีส่วนผสมและอุณหภูมิที่แน่นอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของแข็ง สองเฟสพร้อมกันที่อุณหภูมิกงที่มีคาร์บอนค่านี้นิวเคลียสและขยายตัวในเวลาเดียวกัน โดยที่เฟสทั้งสองมีส่วนผสมที่ต่างกัน จึงมีการแลกเปลี่ยนอะตอมของธาตุทั้งสอง โดยลักษณะการแพร่ซึมทำให้เกิด โครงสร้างเฟสของแข็งเกิดสลับกันไปมา เรียกว่าโครงสร้างยูเต็คตอยด์ ซึ่งมีชื่อเรียกทางวิชาการว่าเพิร์ไลต์ (Pearlite)

2.3.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็ก

1) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในขณะที่ได้รับความร้อน

มันส์ สติร์จินดา (2540) กล่าวว่า ในการอบชุบความร้อนทุก ๆ กรรมวิธีไม่ว่าจะเป็นการชุบแข็งหรือการอบอ่อน เหล็กจะต้องถูกเผาให้ร้อนจากอุณหภูมิปกติจนถึงอุณหภูมิสูงในช่วงออสเตนไนท์ จากที่โครงสร้างเดิมซึ่งประกอบด้วยเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และ ซีเมนไตต์ (Cementite) ในการศึกษาจำเป็นต้องอาศัยแผนภูมิสมดุลของเหล็กและซีเมนไตต์ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าใจกลไกของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็ก จากแผนภูมิสมดุล (รูปที่ 2.3) ในระบบของ Metastable จะเป็น Fe-Fe₃C พบว่า อุณหภูมิยูเทคตอยด์จะเป็น 723°C ที่เปอร์เซ็นต์คาร์บอนประมาณ 0.8 ปริมาณคาร์บอนที่ละลายได้ในเหล็กแอลฟาหรือเฟอร์ไรท์สูงสุดที่อุณหภูมิ 723°C คือ 0.025% และปริมาณคาร์บอนที่ละลายได้ในเหล็กแกมมาหรือออสเตนไนท์ที่อุณหภูมิ 1130°C คือ 2%

เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ (0.025% < C < 0.8%) ที่อุณหภูมิในช่วงปกตินั้นจะประกอบด้วยเฟอร์ไรท์และเฟอไรต์ (ประกอบด้วยเฟอร์ไรท์และซีเมนไตต์) ช่วงที่มีการอบอุณหภูมิ 20-723°C ซีเมนไตต์จะสลายตัวให้อะตอมคาร์บอนและได้อะตอมคาร์บอนละลายตัวอยู่สูงสุด 0.025% ที่อุณหภูมิ 723°C เมื่ออุณหภูมิ 723°C จะเกิดการรวมตัวของเฟอร์ไรท์กับซีเมนไตต์ให้เฟสออสเตนไนท์ เป็นลักษณะการแพร่ซึมของคาร์บอนจากซีเมนไตต์ไปเฟอร์ไรท์ ซึ่งจะปรับระบบลักษณะผลึกจาก BCC ไปเป็น FCC และที่อุณหภูมิสูงกว่า 723°C จะปรากฏปริมาณของออสเตนไนท์เพิ่มขึ้นโดยการเปลี่ยนของเฟอร์ไรท์

2) การเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็กในขณะที่ปล่อยให้เย็น

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเตนไนท์ไปเป็นเฟอร์ไรท์ คือการเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างผลึกในระบบ FCC ไปเป็น BCC ซึ่งต้องปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ การเปลี่ยนลักษณะนี้จะเป็นการเปลี่ยนขนาดระยะห่างระหว่างอะตอมตามแกน กรณีที่มีคาร์บอนเข้ามาเกี่ยวข้อง การเปลี่ยนแปลงของออสเตนไนท์ซึ่งมีปริมาณการละลายของคาร์บอนได้สูงเมื่อเปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรท์โดยที่มีปริมาณคาร์บอนละลายได้ต่ำกว่า คาร์บอนส่วนเกินก็จะถูกผลักดันออกมาให้สารประกอบซีเมนไตต์

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของออสเตนไนท์ในสภาพการเย็นตัวที่ไม่สมดุล การเย็นตัวในอัตราที่ไม่สมดุลจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์ไปเป็นเฟอร์ไรท์และเฟอไรต์ เพราะในขณะที่เย็นตัวจะมีการปรับส่วนผสมโดยเฉพาะคาร์บอนซึ่งมีลักษณะการแพร่ซึมนั้นต้องใช้เวลาที่จะเคลื่อนไหว ในกรณีเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ซึ่งพบว่ายิ่งอัตราการเย็นตัวเร็วจะปรากฏออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรท์ได้น้อยลง

ซอร์ไบท์ (Sorbite) ผู้ที่ศึกษาและใช้ชื่อ โครงสร้างนี้ คือ Clifton sorby ได้พบว่า ซอร์ไบท์ก็คือโครงสร้างที่เกิดจากออสเตนไนท์แตกตัวให้เฟอร์ไรท์ และ ซีเมนไตต์ เช่นเดียวกับเพิร์ไลต์ โดยการให้กำเนิดนิวเคลียสของซีเมนไตต์ขึ้นมาก่อนบริเวณรอบ ๆ เกรน เมื่อขยายตัวก็ดึงเอาอะตอมของคาร์บอนบริเวณรอบ ๆ เข้ามารวมตัวเพื่อขยายตัวทำให้บริเวณข้างเคียงกลายเป็นบริเวณที่มีอะตอมคาร์บอนต่ำ กลายเป็นจุดที่เกิดเฟอร์ไรท์ขึ้นมาทั้งสองด้านและเมื่อเกิดเฟอร์ไรท์ขึ้นแล้ว จะเกิดมีการขยายตัวทำให้มีปริมาณคาร์บอนถูกผลักออกไป ทำให้เกิดสภาพพร้อมที่จะเกิดซีเมนไตต์ขึ้นได้ทั้งในบริเวณข้างเคียงจะสลับกันไป แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูง การเคลื่อนไหวของอะตอมคาร์บอนเป็นไปได้ยาก แถบของเฟอร์ไรท์กับซีเมนไตต์จะเกิดได้เล็กน้อย จนเราไม่สามารถดูได้จากกล้องไมโครสโคปธรรมดา จะศึกษาโครงสร้างได้จะต้องอาศัยกล้องไมโครสโคปอิเล็กตรอน ซึ่งมีกำลังขยายได้สูงมาก คุณสมบัติของซอร์ไบท์จะมีความแข็งแรงประมาณ $350 H_b$ เมื่อเทียบกับเพิร์ไลต์มีความแข็งแรงประมาณ $180 H_b$

เบนไนท์หรือทรูสไตต์ (Bainite or troostite) เป็นโครงสร้างที่ได้จากสภาพออสเตนไนท์แตกตัวภายใต้อัตราการเย็นตัวที่สูงกว่า ซอร์ไบท์ การเกิดยังคงมีกลไกคล้ายคลึงกัน คือ มีการให้กำเนิดนิวเคลียสและมีการขยายตัว แต่เบนไนท์จะให้กำเนิดเฟอร์ไรท์ก่อน โดยมีลักษณะคล้ายเข็มยื่นเข้าสู่ใจกลางเกรนออสเตนไนท์ เมื่อเฟอร์ไรท์ขยายตัวก็จะผลักอะตอมของคาร์บอนออกไปทางด้านข้าง ทำให้เกิดบริเวณที่มีคาร์บอนหนาแน่นตามบริเวณข้างของเฟอร์ไรท์ และเมื่อปริมาณคาร์บอนสูงจนถึงประมาณ 6.67% ก็จะเกิดเป็นแถบบาง ๆ ของซีเมนไตต์เกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง และเมื่อเฟอร์ไรท์ขยายตัวมากขึ้นก็จะไปเกิดซีเมนไตต์บริเวณที่ห่างออกไปเป็นระยะ การเกิดเช่นนี้จะเกิดได้ทั้งตามบริเวณรอบ ๆ เกรนและเกิดทั่วไปหมด เรียกโครงสร้างนี้ว่า เบนไนท์ ตามชื่อของ E.C. Bain (ชาวอเมริกัน) แต่อาจจะเกิดได้เป็นแห่ง ๆ และเป็นกลุ่ม ๆ แทรกอยู่กับโครงสร้างมาร์เทนไซต์ จะเรียกโครงสร้างนี้ว่าทรูสไตต์ตามชื่อของ Troost (ฝรั่งเศส) หนังสือบางเล่มจะเรียกรวมไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างเบนไนท์หรือทรูสไตต์ จะใช้เรียกเพียงอย่างเดียวว่า ทรูสไตต์ คุณสมบัติความแข็งแรงของเบนไนท์และทรูสไตต์ จะมีความแข็งแรงอยู่ระหว่าง $400-450 H_b$ ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวจะสูงมากหรือน้อย

มาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นโครงสร้างที่ได้จากการทำให้ออสเตนไนท์เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำหรือชุบน้ำเกลือ (10%NaCl) เรียกโครงสร้างนี้ตามชื่อของผู้ที่ค้นคว้าเรื่องนี้คือ A. Marten เนื่องจากการทำให้ออสเตนไนท์เย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้อะตอมคาร์บอนไม่มีโอกาสเคลื่อนไหวจะอยู่กับที่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้การเรียงตัวของอะตอมของเหล็กเกิดลักษณะบิดเบี้ยว (deformation) เป็นสาเหตุให้มาร์เทนไซต์มีความแข็งแรงสูง ปริมาณของคาร์บอนจะเป็นเฟคเตอร์ที่สำคัญมีผลต่อความแข็งแรงของมาร์เทนไซต์ (เราเรียกมาร์เทนไซต์ได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ไม่

สมดุล Non equilibrium หรือ Supersaturated ferrite เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าที่เฟอร์ไรท์จะมีได้)

2.3.4 การควบคุมบรรยากาศภายในเตา

ในการอบชุบความร้อนต่อเหล็กนั้น โดยเฉพาะเหล็กกล้าชิ้นส่วนของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ต้องการความสะอาดและต้องการความแข็งผิวที่แน่นอนปราศจากออกไซด์ ในการอบชุบนั้นต้องกระทำภายในเตาที่สามารถควบคุมบรรยากาศได้เพื่อป้องกันการสูญเสียธาตุบางตัวที่สำคัญ ขณะเผาและป้องกันการเกิดออกไซด์ตามผิว ซึ่งจะทำให้ขนาดชิ้นงานมีความเปลี่ยนแปลงผิดเพี้ยนได้ หรืออาจต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายในการทำ ความสะอาด

ความมุ่งหมายที่สำคัญของการควบคุมบรรยากาศภายในเตามี 3 ประการ ดังนี้คือ

- 1) ป้องกันการสูญเสียธาตุคาร์บอนและธาตุอื่น ๆ ที่สำคัญขณะทำการเผาในระยะเวลา
- 2) ป้องกันการเกิดออกไซด์ตามบริเวณผิว ทำให้เกิดปัญหาของขนาดและการกำจัดในภายหลัง
- 3) ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงความแข็งบริเวณผิวแท่งเหล็กให้สูงขึ้นสามารถกระทำด้วยการควบคุมบรรยากาศภายในเตา เช่น การทำคาร์โบไนไตรดิง การทำคาร์เบอร์ไรซิงหรือการชุบแข็งผิว เป็นต้น

2.3.5 การชุบแข็งผิว (Surface Hardening)

การชุบแข็งพื้นผิวเป็นการชุบแข็งเพื่อให้ได้ค่าความแข็งเฉพาะตามบริเวณผิวเท่านั้น ส่วนเนื้อเหล็กภายในผิวแข็งจนถึงใจกลางยังคงเป็นเนื้อเหล็กเดิมซึ่งมีความเหนียวสูง (มันส์ สติริจินดา, 2540) ความมุ่งหมายก็เพื่อต้องการให้เหล็กทนต่อการสึกหรอในขณะที่ใช้งานทนต่อแรงบิดหรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้ดีโดยไม่แตกหัก นับเป็นกรรมวิธีชุบแข็งเหล็กที่มีส่วนดีกว่าการชุบแข็งตามที่ได้กล่าวมาแล้วเพราะการชุบแข็งโดยวิธีที่กล่าวมาแล้วแม้จะได้ความแข็งที่ผิวสูงก็ตามแต่จะสูญเสียความเหนียวของเหล็ก การทำ Tempering จะสามารถช่วยเพิ่มความเหนียวได้บ้างแต่กลับจะต้องสูญเสียค่าความแข็งไปบ้าง ยกเว้นเหล็กผสมสูงบางชนิดที่ทำให้ได้คุณภาพทั้งความแข็งและความเหนียวแต่เหล็กผสมสูงส่วนมากราคาจะแพงดังนั้นจะเห็นว่าการชุบแข็งพื้นผิวจึงนับว่าเป็นกรรมวิธีชุบแข็งที่น่าสนใจมากในด้านความประหยัดและได้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ดี และมีคุณภาพพร้อมทั้งความแข็งผิวและความเหนียวตัวอย่างชิ้นเครื่องจักรกลที่นิยมทำการชุบแข็งผิวได้แก่เพลาช้อเหียงเพลาราวลีนเฟืองเกียร์และอื่น ๆ การชุบแข็งพื้นผิวกระทำได้หลาย ๆ วิธีดังต่อไปนี้

1) การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์เบอร์ไรซิง (Carburizing) หรือ Case Hardening

เหล็กที่ชุบแข็งพื้นผิวด้วยกรรมวิธีนี้จะต้องเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำประมาณ 0.1-0.2% และอาจจะมีธาตุบางตัวเช่น นิเกิล โครเมียม วานาเดียม ผสมอยู่บ้างในปริมาณเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับเหล็กปกติ เหล็กที่มีคาร์บอนต่ำจะไม่สามารถทำการชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดาเพราะมีคาร์บอนน้อยจะไม่มีโอกาสได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่เหล็กชนิดนี้จะมี ความเหนียวสูงทนได้ดีต่อแรงบิดและแรงกระแทก หลักในการชุบด้วยวิธีนี้ใช้หลักการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กได้สูงประมาณ 0.8% ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอนที่มีคุณสมบัติชุบแข็งดีที่สุดหลังจากนั้นจะนำเหล็กไปทำการชุบเพื่อให้ได้ความแข็งและความเหนียวต่อไปวิธีการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กมี 3 ลักษณะด้วยกันคือ การชุบแข็งผิวโดยการใส่สารเพิ่มธาตุคาร์บอนในสภาพแก๊สของเหลวและของแข็ง

การชุบแข็งผิวโดยใช้สารเพิ่มคาร์บอนในสภาพแก๊ส (Gas carburizing) การชุบแข็งผิวโดยการเพิ่มคาร์บอน ด้วยวิธีใช้แก๊สมีข้อที่ดีกว่าการใช้ของแข็งอยู่หลายประการ เช่น เวลาที่ใช้ในการชุบแข็งผิวจะสั้นกว่า เพราะไม่ต้องเสียเวลาไปเผาหีบ (Case) และสารตัวเพิ่มคาร์บอนที่เป็นของแข็งซึ่งเป็นฉนวนความร้อน สามารถใช้เตาที่มีเนื้อที่เล็กกว่า การควบคุมปริมาณคาร์บอน และความหนาของผิวแข็งทำได้แน่นอนกว่าประการสุดท้ายก็คือ ลดแรงงานในการบรรจุเหล็กลงหีบ และรี้ออกเมื่อสำเร็จ

แก๊สที่เป็นตัวเพิ่มคาร์บอนจะใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอน ที่สำคัญได้แก่แก๊สธรรมชาติ (แก๊สมีเทน ; CH_4) แก๊สชนิดนี้จะต้องมีความบริสุทธิ์มาก เพราะถ้ามีน้ำมันติดเข้ามาจะทำให้เกิดเขม่าของน้ำมันที่เผาไหม้และไปจับตามบริเวณผิวของแท่งเหล็ก อันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยาไม่สามารถแพร่ซึมผ่านผิวเหล็กได้ การชุบแข็งผิวจะได้ผลไม่ดี

หลักในการชุบแข็งผิวแบบแก๊สนี้ จะใช้เตาที่ปิดมิดชิด อาจจะเป็นชนิดบรรจุเหล็กทีละครั้ง หรือแบบต่อเนื่อง โดยสายพานเหล็กทนความร้อน เป็นตัวพาแท่งเหล็กให้เคลื่อนผ่านเตาในอัตราช้า ๆ อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ $900-950^{\circ}C$ ภายในเตาจะปล่อยให้แก๊สไฮโดรคาร์บอน ไหลผ่านในอัตราที่พอเหมาะเพื่อให้ได้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวเหล็กตามที่กำหนด คือ ควรจะได้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวประมาณ 0.8% ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้คือ



เมื่อเราทราบปริมาณของคาร์บอนที่ผิวของแท่งเหล็ก ทราบอุณหภูมิของการชุบแข็งผิว เราสามารถควบคุมปริมาณของ CO และ H_2 ของแก๊สที่เป็นตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนได้โดยทางปฏิบัติ ในตอนแรกจะผสมแก๊สตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนในปริมาณที่สูงและจะค่อย ๆ ลดลง จนถึงช่วงสุดท้ายจะไม่ผสมแก๊สตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนเลย ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้เกิดซีเมนไตต์ตามบริเวณขอบเกรน (Proeutectoid cementite) จะทำให้เหล็กแตกง่ายในขณะชุบแข็ง ปกติเวลาที่ใช้ในการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สนี้จะสั้นกว่าการใช้ของแข็งเล็กน้อย ทำให้เหล็กที่ได้มีเกรนเล็ก

มีวิธีที่พัฒนาขึ้นมาในระยะเวลาไม่นาน โดยการเผาเหล็กด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ (Induction) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1000^{\circ}C$ ให้มีความร้อนแต่บริเวณผิว ทั้งเหล็กและขดลวดทองแดงเหนี่ยวนำจะอยู่ในเตาปิดมิดชิด โดยมีท่อปล่อยให้แก๊สเพิ่มคาร์บอนผ่านเข้าด้านหนึ่ง และผ่านออกอีกด้านหนึ่ง วิธีนี้สามารถทำการชุบแข็งผิวได้ความหนาของผิวแข็ง 0.8-1 มิลลิเมตร ใช้เวลาเพียง 30-40 นาที

2) การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์โบไนไตรดิ้ง (Carbonitriding)

คาร์โบไนไตรดิ้งคือวิธีการชุบแข็งพื้นผิวโดยการเพิ่มปริมาณทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนบริเวณผิวเหล็กพร้อม ๆ กันคล้ายคลึงกับการทำ Cyaniding (เพิ่มทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนจากอ่างเกลือ) ผิดแต่การทำคาร์โบไนไตรดิ้งสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มคาร์บอนและไนโตรเจนจะเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไรซิง (แก๊สธรรมชาติหรือแก๊สที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม) ประมาณ 70-80% โดยปริมาตรกับแก๊สแอมโมเนียประมาณ 20-30% หรืออาจกล่าวได้ว่าการทำคาร์โบไนไตรดิ้ง เป็นการทำคาร์บอนไรซิงด้วยแก๊สพร้อม ๆ กับการทำไนไตรดิ้ง (Nitriding ; การเพิ่มไนโตรเจนที่ผิว) การทำคาร์โบไนไตรดิ้ง แบ่งช่วงอุณหภูมิในการทำงานออกเป็น 3 ช่วงคือ

- คาร์โบไนไตรดิ้งที่อุณหภูมิต่ำ ($540-560^{\circ}C$) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งที่ผิวสูงประมาณ $950-1100 H_v$ แต่ความหนาของผิวแข็งน้อยซึ่งอยู่ระหว่าง 0.02-0.04 มิลลิเมตรและใช้เวลาในการทำงานประมาณ 30 นาทีถึง 3 ชั่วโมงเหมาะสำหรับชุบแข็งผิวอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการตัด (Cutting tool) ที่ทำด้วยเหล็กกล้าความเร็วสูงเช่นมีดตัด โลหะชนิดหมุน (Milling cutter) ดอกสว่าน (Twist drills) และอุปกรณ์สำหรับทำเกลียวเป็นต้นซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ต้องการความแข็งที่ผิวสูงและสัมประสิทธิ์ความเสียดต่ำการทำคาร์โบไนไตรดิ้งที่อุณหภูมิต่ำไม่ต้องทำการชุบน้ำเพราะความแข็งที่ได้จะเป็นผลจากไนโตรเจนส่วนคาร์บอนมีปริมาณน้อย

- คาร์โบไนไตรดิ้งที่อุณหภูมิปานกลาง ($840-860^{\circ}C$) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความหนาของผิวแข็งสูงโดยจะต้องใช้เวลาประมาณไม่เกิน 10 ชั่วโมงจะได้ความหนาของ

ผิวแข็งสูงประมาณ 1 มิลลิเมตรจะใช้แก๊สแอมโมเนียผสมประมาณ 30% ซึ่งงานที่ได้ในการชุบแข็งผิวในช่วงอุณหภูมิส่วนใหญ่จะเป็นพวกชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไปแม้จะเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน (Complex shape) สามารถทำการชุบแข็งผิวได้ภายหลังจากการชุบในน้ำแล้วจะต้องนำมาทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200°C เพื่อคลายความเครียดอันเนื่องมาจากการชุบด้วยน้ำ

- คาร์โบไนไตรดิงที่อุณหภูมิสูง (900-950°C) เป็นวิธีการชุบแข็งผิวที่ต้องการความหนาของผิวแข็งสูงและใช้เวลาสั้นเมื่อเทียบกับการทำคาร์เบอร์ไรซิงด้วยแก๊สเพียงอย่างเดียว จะได้ความหนาของผิวแข็งในอัตราที่ช้ากว่า (ประมาณ 0.1 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) แต่เมื่อเพิ่มแก๊สแอมโมเนียประมาณ 15-25% ความหนาของผิวแข็งที่ได้จะเป็นประมาณ 0.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงแต่อย่างไรก็ตามความหนาของผิวแข็งที่ได้จะน้อยกว่าการทำ Cyaniding เมื่อใช้เวลาเท่ากันภายหลังจากการชุบแข็งแล้วจะต้องทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200°C เช่นเดียวกัน

การชุบแข็งด้วยวิธีคาร์โบไนไตรดิงมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงก็คือใช้เวลาในการชุบแข็งผิวสั้นกว่าและได้ความแข็งที่ผิวสูงกว่าและที่สำคัญก็คือสามารถที่จะใช้อุณหภูมิต่ำได้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำ Cyaniding แล้วข้อที่คิดว่ามีเพียง ไม่มีสารพิษเข้ามาเกี่ยวข้องกับงานนั้น

3) การชุบแข็งผิวโดยวิธีซอฟต์แวร์ไนไตรดิง (Soft-Nitriding)

กระบวนการซอฟต์แวร์ไนไตรดิงจะทำที่อุณหภูมิต่ำ (520-570°C) ทำให้เกิดชั้นผิวของสารประกอบไนโตรเจน ($Fe_xC_yN_z$) ชั้นผิวของสารประกอบนี้ จะทนทานต่อการสึกกร่อน (เป็นสนิมยาก ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี) มีคุณสมบัติทนทานต่อการเสียดสี เนื่องจากชั้นผิวสารประกอบทนทานต่อการกัดกร่อน ทำให้เห็นโครงสร้างเป็นแถบสีขาวที่บริเวณผิวของชิ้นทดสอบ (Test) ในขณะที่ทำการตรวจสอบ โครงสร้างชั้นผิวขาวนี้จึงถูกเรียกว่า "White layer" ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของ White layer นี้กับความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ คาร์เบอร์ไรซิงและคาร์โบไนไตรดิงแล้วจะมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าเล็กน้อย ดังนั้นจึงได้เรียกกระบวนการนี้ว่า "Soft nitriding" อีกทั้ง อุณหภูมิที่ใช้ต่ำ (520-570°C) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิงหรือคาร์โบไนไตรดิง จึงถูกเรียกกระบวนการนี้ว่าเป็น Low temperature carbonitriding โดยปกติชิ้นสารประกอบจะมีความแข็งดังต่อไปนี้

- Carbon steel Hv 450~650
- Alloy steel (SCr, SCM) Hv 600~800
- สารประกอบ Fe₃N, g-Fe₄N : CrN, Cr₂N, AlN, MoN, Mo₂N, Cr-N, Al-N etc จะมีความแข็งที่สูง

4) การชุบแข็ง (Hardening)

การชุบแข็งคือการอบชุบความร้อนเพื่อต้องการให้เหล็กภายหลังจากการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้นเพื่อทนต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน การชุบแข็งเป็นวิธีจะให้ได้โครงสร้างของเหล็กสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) หรือเบนไนท์ (Bainite) ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนท์ (Austenite) เป็นมาเทนไซต์ (Martensite) หรือเบนไนท์ (Bainite) ซึ่งจะได้เหล็กที่มีความแข็งสูงจะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างน้อย 3 ประการคือ

- ปริมาณคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญเพราะการที่ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ในลักษณะการชุบแข็งธรรมดาด้วยน้ำเหล็กควรมีคาร์บอนมากกว่า 0.3% ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่น ๆ เช่น นิกเกิล โครเมียม และ โมลิบดีนัม จะเพียงทำหน้าที่ช่วยให้การชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น ความแข็งของมาร์เทนไซต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนดังตัวอย่างเช่น เหล็กคาร์บอน 0.35% สามารถชุบแข็งได้ความแข็งประมาณ 50 H_{RC} ตรงกันข้ามกับเหล็ก 0.02%C, 10%Cr ได้ความแข็งภายหลังการชุบแข็งเพียง 35 H_{RC}

- อุณหภูมิก่อนการชุบคืออุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์ก่อนการชุบน้ำหรือน้ำมันอุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์หมดเราจะชุบในน้ำหรือน้ำเกลือแล้วความแข็งที่ได้จะไม่สูงเท่าที่ควรเพราะมาร์เทนไซต์ที่ได้จะต้องมาจากออสเตนไนท์เท่านั้นและเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างโดยปราศจากการกำเนิดนิวเคลียสไม่เหมือนอย่างเช่นเฟอร์ไรท์ (Ferrite) หรือซีเมนไตต์ (Cementite)

- อัตราการเย็นตัวเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอซึ่งจะปรากฏคำว่า “อัตราการเย็นตัววิกฤติ (Critical cooling rate)” หมายถึงอัตราการเย็นตัวที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ ออสเตนไนท์จะไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์แต่จะได้เฟอไรท์หรือซอร์ไบท์ (Sorbite) แทน

อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็ง (Hardening temperature) แบ่งออกตามส่วนผสมของคาร์บอนดังนี้

- Hypo eutectoid steels hardening temp จะอยู่ที่เหนือ Ac₃ ประมาณ 50°C ซึ่งอุณหภูมินี้จะได้โครงสร้างที่เป็นออสเตนไนท์ทั้งหมดถ้าพิจารณาในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้และอยู่ในช่วง Ac₁-Ac₃ จะปรากฏมี Ferrite เหลืออยู่บางส่วนถ้าทำการชุบที่อุณหภูมินี้ ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์แต่ Ferrite จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงสภาพอยู่เช่นเดิมเหล็กภายหลังจากการชุบแข็งแล้วจะไม่ได้ความแข็งสูงเท่าที่ควรและบริเวณโครงสร้างที่เป็น Ferrite จะเป็นบริเวณที่อ่อน (Soft spots) ขาดคุณสมบัติต้านทานต่อการเสียดสี

ในกรณีถ้าทำการเผาที่อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 ไปมาก (Overheating) นั้นจะได้โครงสร้างของออสเตนไนท์ที่มีเกรนโตภายหลังการชุบน้ำจะได้อนุภาคมาร์เทนไซต์ที่หยาบ (Coarse martensite) ซึ่งจะทนแรงกระแทกได้น้อยลง อีกประการหนึ่งชิ้นงานในขณะที่ชุบน้ำจะเกิดการบิดงอหรือแตกร้าวได้ง่าย

- Hyper eutectoid steels จะใช้อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_1 ประมาณ $30-50^\circ C$ เท่านั้นจะเห็นว่าในช่วงของอุณหภูมินี้จะปรากฏโครงสร้างของโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ (Proeutectoid cementite) เหลืออยู่บางส่วนเท่านั้นที่กลายหรือสลายตัวไปเป็นออสเตนไนท์และซีเมนไตต์เหลืออยู่นี้จะกระจุกกระจายอยู่ในโครงสร้างของออสเตนไนท์เมื่อทำการชุบน้ำจะได้โครงสร้างของมาร์เทนไซต์โดยมีโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์แทรกอยู่ซึ่งจะปรากฏเป็นผลดีในส่วนที่เหล็กจะมีความแข็งสูงและทนการเสียดสีในขณะที่ใช้งานได้ดีทั้งนี้เพราะโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์มีความแข็งประมาณ $700-800 H_B$ ซึ่งแข็งกว่ามาร์เทนไซต์ ($650-700 H_B$) ประเด็นที่สำคัญคือจะต้องเลือกอุณหภูมิที่จะไม่เกิดโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ในลักษณะต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ตามขอบเกรน

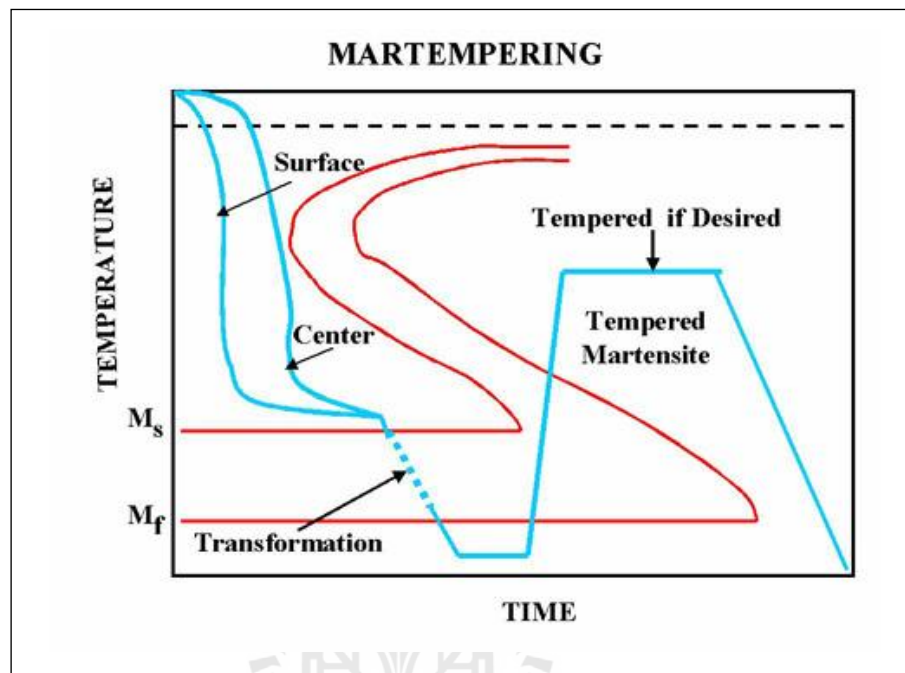
ในกรณีที่เผาอุณหภูมิเหนือเส้น A_{cm} จะไม่เกิดผลดีนอกจากต้องใช้เวลาใช้งานมากขึ้นแล้วออสเตนไนท์จะขยายตัวให้เกรนโตเร็วมากจะทำให้ผลที่ได้ภายหลังการชุบไม่ดีเพราะจะได้อนุภาคมาร์เทนไซต์เกรนหยาบทนแรงกระแทกได้ไม่ดีและยังอาจเกิดการบิดงอและแตกร้าวได้โดยง่าย

5) การชุบแข็งมาร์เทมเปอร์ริง (Martempering)

เป็นการชุบแข็งลักษณะหนึ่งที่มีขั้นตอนการชุบที่มีรูปร่างซับซ้อนมีความหนาบางแตกต่างกันมากซึ่ง ถ้าเป็นการชุบด้วยกรรมวิธีปกติเหล็กอาจเกิดการบิดงอหรือเกิดความเครียดอันเนื่องมาจากการเย็นตัวเร็วทำให้แตกร้าวได้ง่าย การชุบแข็งแบบ Martempering จะได้โครงสร้างสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์เช่นเดียวกับการชุบแข็งด้วยวิธีปกติอุปกรณ์ที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากกรรมวิธีชุบแข็งทั่วไปแล้วจะต้องมีอ่างเกลือหลอมละลาย (Salt bath) ที่อุณหภูมิประมาณ $400^\circ C$ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เกลือโซเดียมไนเตรดกับโปแตสเซียมไนเตรด (40-50%) เกลือผสมนี้จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ $145^\circ C$ มีช่วงการใช้งานอยู่ระหว่าง $160-650^\circ C$ นอกจากนี้ยังต้องอาศัยแผนภูมิ T.T.T. ของเหล็กที่ต้องการชุบแข็งมาประกอบกับการชุบแข็งด้วยเพราะแผนภูมิ T.T.T. จะเป็นเสมือนแผนที่นำทางให้การชุบแข็งประสบผลตามความมุ่งหมาย

การชุบแข็งจะเริ่มโดยการเผาเหล็กจนร้อนถึงอุณหภูมิในช่วงออสเตนไนท์ คือเหนือเส้น Ac_1 หรือ Ac_3 ประมาณ $50^\circ C$ ภายหลังที่ทิ้งไว้จนอุณหภูมิของแท่งเหล็กเท่ากันทั้งภายนอกและภายในแล้วจะนำออกมาจากเตาแล้วชุบในอ่างเกลือที่อุณหภูมิเหนือเส้น M ที่ปรากฏในแผนภูมิ T.T.T. จากนั้นปล่อยทิ้งไว้เพื่อให้มีการปรับอุณหภูมิระหว่างผิวกับภายในให้เท่ากันระยะเวลาหนึ่ง โดยที่เวลาจะไม่ยาวจนถึงจุดที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นเบนไนท์

จะต้องนำเอาชิ้นเหล็กขึ้นมาจากอ่างเกลือก่อนถึงจุดนั้นนำไปชุบในอ่างน้ำทันทีเพื่อให้โครงสร้างออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ จากนั้นจะต้องนำไปอบคืนตัวในกระบวนการต่อไปเพื่อลดความเครียดลักษณะการทำงานจะเป็นไปดังรูปที่ 2.4



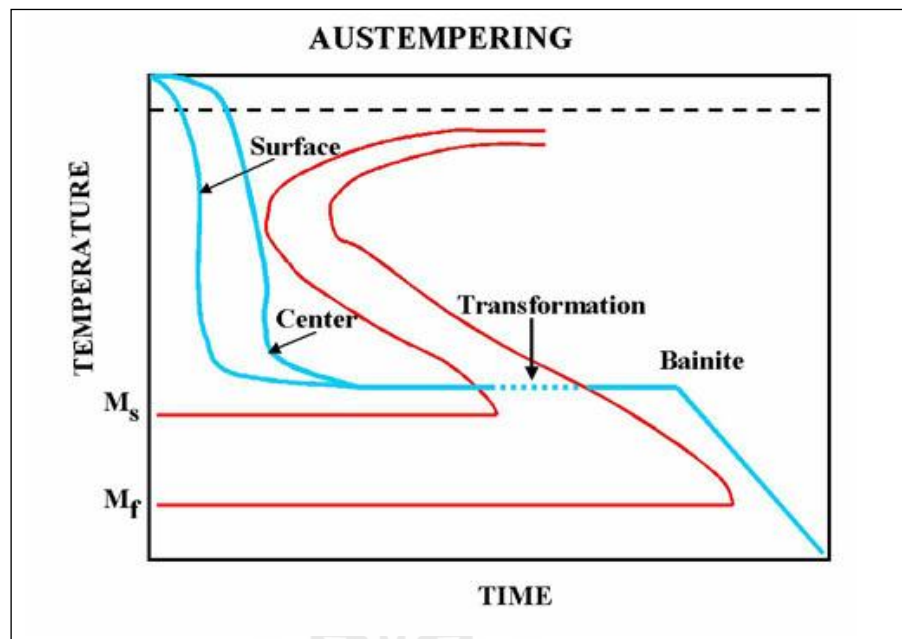
รูปที่ 2.4 แสดง Cooling curve for martempering

6) การชุบแข็งออสเทมเปอร์ริง (Austempering)

การชุบแข็งมีลักษณะคล้ายคลึงกับวิธี Martempering ส่วนแตกต่างจะอยู่ที่โครงสร้างสุดท้ายที่ต้องการคือ โครงสร้างแบบเบนไนท์ อาจจะเป็นโครงสร้างเบนไนท์แบบขนนกหรือแบบอซิคล่าขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิที่จะปล่อยให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างอุปกรณ์ที่ใช้คงมีลักษณะเหมือนกัน

ขั้นตอนของการชุบแข็ง Austempering จะเริ่มตั้งแต่การเผาเหล็กจนกระทั่งเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์หมด จากนั้นนำออกจากเตาเผา ชุบชิ้นเหล็กในอ่างเกลือหลอมละลายถ้าต้องการเบนไนท์ชนิดแบบขนนก (Upper bainite) อุณหภูมิอ่างเกลือหลอมละลายจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 500-600°C ถ้าต้องการเบนไนท์ชนิดอซิคล่า (Lower bainite) จะควบคุมอุณหภูมิของอ่างเกลือให้อยู่ในช่วง 400-500°C เมื่อชุบแข็งเหล็กลงในอ่างเกลือแล้ว จะทิ้งไว้ระยะเวลาที่ยาวจนแน่ใจว่าระยะเวลานานพอที่การเปลี่ยนแปลงของออสเตนไนท์ไปเป็นเบนไนท์จะสิ้นสุดอย่างสมบูรณ์ซึ่งสามารถกำหนดระยะเวลาได้จากแผนภูมิ T.T.T เมื่อเวลาผ่านไปตามกำหนดแล้วจึงนำชิ้นเหล็กออก

จากอ่งเกลือ ปล่อยให้เย็นในอากาศ ไม่จำเป็นต้องทำการชุบน้ำอีก เพราะในช่วงที่ชิ้นเหล็กถูกนำขึ้นมาจากอ่งเกลือแล้วจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแต่อย่างใด ขั้นตอนการทำงานจะปรากฏ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดง Cooling curve for austempering

7) การอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งแล้วจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วย มาร์เทนไซต์และออสเตนไนท์เหลือค้าง (Residual austenite) ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนสูงนั้นจะมี โปรยูเท็คคอยด์ซีเมนไต์จัดกระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายในอันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูงคุณสมบัติของเหล็กตาม ลักษณะที่กล่าวจะมีความแข็งสูงแต่จะขาดคุณสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก (Poor impact strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอหรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะที่ใช้งาน ได้ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนตัวเพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไปหรือเหลืออยู่น้อยที่สุดและในขณะเดียวกันจะทำให้มาร์เทนไซต์แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุล (Tempered martensite) ซึ่งจะมีผลอย่างกว้างขวาง ต่อคุณสมบัติของเหล็กดังเช่น ความแข็งจะลดลงแต่ความเหนียวจะกลับสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วง อุณหภูมิของการอบคืนตัวและเวลาที่ใช้

การอบคืนตัวเป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_1 ภายหลังเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้ว จะปล่อยให้เย็นช้า ๆ ภายในเตาการเปลี่ยนแปลงของ มาร์เทนไซต์และออสเตนไนท์เหลือค้างไปสู่โครงสร้างกิ่งสมดุลจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กันดังนี้

อุณหภูมิช่วงแรก ($80-200^{\circ}\text{C}$) โครงสร้างมาร์เทนไซต์ จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ชนิดที่ใกล้จะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ 0.25% คาร์ไบด์ชนิดเอพซีลอน (ϵ carbide) มีสูตร Fe_2C หรือ Fe_2C_4 และมีคาร์บอนประมาณ 8.2% ทั้งคาร์ไบด์และเฟอร์ไรท์ (0.25% C) จะตกผลึกชนิดละเอียดและกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างสามารถศึกษาได้โดยกล้องขยายอิเล็กตรอนเท่านั้น การอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งแรงจะลดลงเล็กน้อยแต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมด

อุณหภูมิช่วงที่สอง ($200-280^{\circ}\text{C}$) โครงสร้างออสเตนไนท์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ทันในขณะชุบแข็ง (Retained austenite) จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ (0.025% C) และซีเมนไตต์ (Fe_3C) ที่มีความละเอียดและกระจายโครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับ Bainite ความแข็งแรงจะลดลงมากแต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิช่วงที่สาม ($300-500^{\circ}\text{C}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฟอร์ไรท์ (Pseudo cubic) จะแตกตัวให้เฟอร์ไรท์ (Cubic) ที่มีคาร์บอน 0.025% และซีเมนไตต์ส่วน ϵ -carbide จะเปลี่ยนเป็นซีเมนไตต์ (Fe_3C) โครงสร้างที่จะได้จะยังอยู่ในลักษณะละเอียดและกระจายมีลักษณะคล้ายซอร์ไบท์

อุณหภูมิช่วงที่สี่ (สูงกว่า 500°C ขึ้นไปจนถึง A_1) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะปรับตัวเข้ากับสภาพสมดุลและมีการขยายตัวของเฟอร์ไรท์และซีเมนไตต์โตขึ้น ความแข็งแรงจะลดลงมากโดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้น ในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำสเฟอไรไรด์ไม่สมบูรณ์ (Incomplete annealing)

จากการทดลองอบคืนตัวเหล็กยูเต็คโตออยด์ (0.8% C) ที่ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ปรากฏได้ความแข็งแรงลดลงจากความแข็งแรงภายหลังการชุบแข็ง (64 Rc) อบคืนตัวอุณหภูมิช่วงแรก 1 ชั่วโมง ได้ความแข็งแรง 60-64 Rc ช่วงที่สองได้ความแข็งแรง 40-60 Rc ช่วงที่สามความแข็งแรง 20-40 Rc และช่วงที่สี่เหลือความแข็งแรง 5-10 Rc

ในทางปฏิบัติแบ่งช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบคืนตัวออกเป็น 3 ช่วงคือ

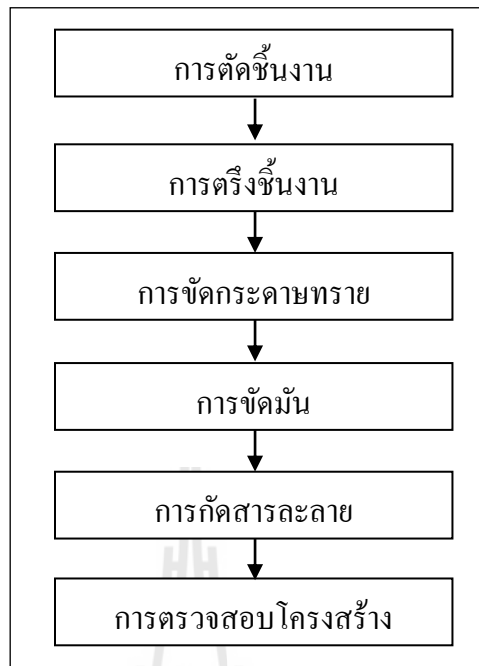
- การอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำ ($150-250^{\circ}\text{C}$) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายในและปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเหนียวโดยพยายามรักษาระดับความแข็งแรงไว้ในระดับใกล้เคียงกับความแข็งแรงที่ได้ภายหลังการชุบแข็งเวลาที่ใช้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

- การอบคืนตัวที่อุณหภูมิปานกลาง (350-450°C) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูงและมีคุณสมบัติทางด้านยืดหยุ่นสูงส่วนใหญ่ใช้สำหรับเหล็กทำหมอบสปริง โครงสร้างของเหล็กจะใกล้เคียงกับเบนไนท์ หรือทราสไตต์
- การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง (500-650°C) จะกระทำเมื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไปและเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวสูงโดยมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงด้วยโครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็นเฟอไรต์ละเอียดใกล้เคียงกับโครงสร้างเซอร์ไบท์

2.4 คุณสมบัติของวัสดุและการทดสอบ

2.4.1 การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallographic)

ไพโรจน์ฐานวิเศษ (2540) กล่าวว่าการศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography) เป็นการศึกษาโครงสร้างของโลหะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพื่อตรวจสอบชนิดของภาค (Phase) การกระจายตัวของภาคตลอดจนลักษณะและขนาดโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ยังสามารถทราบถึงสถานะของโลหะได้ว่าเป็นสารละลายของแข็งสารประกอบหรือบริสุทธิ์องค์ประกอบต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วนั้นมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของโลหะหลักการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจดูโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ อาจเป็นการตรวจสอบดูโครงสร้างมหภาค และ โครงสร้างจุลภาคกล้องจุลทรรศน์สำหรับดูโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ (Metallurgical microscopes) ที่ใช้กันมากมี 2 ชนิดคือกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล (Optical microscopes) และกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electron microscopes) แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัลของ



รูปที่ 2.6 แสดงแผนภูมิการตรวจสอบโครงสร้างจูลภาค
ที่มา : ไพโรจน์ฐานวิเศษ (2540)

1) การตัดชิ้นงาน

การตัดชิ้นงานเพื่อนำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ขณะทำการตัดต้องระวังไม่ให้ชิ้นงานร้อนและการตัดห้ามตัดด้วยแก๊ส (Gas cutting) เพราะความร้อนจะเป็นสาเหตุทำให้ลักษณะโครงสร้าง ขนาดของโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงได้ การตัดที่นิยมใช้กันมากคือเลื่อยมือ เครื่องเลื่อย ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดและง่าย เหมาะสำหรับใช้ตัดโลหะ ที่มีความแข็งต่ำกว่าไบเลื่อยอีกวิธีหนึ่งคือตัดด้วยเครื่องตัด (Cut off machine) ชิ้นงานทดสอบเฉพาะเรียกว่าการตัดเย็นนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการซึ่งสามารถตัดชิ้นงานได้ขนาดเล็กและบาง

2) การตรึงชิ้นงาน

การตรึงชิ้นงานทดสอบหมายถึงการจับยึดชิ้นงานทดสอบด้วยวัสดุอื่นเช่นสารสังเคราะห์พลาสติกหรือเรซิน (Resin) เพื่อจุดมุ่งหมายดังต่อไปนี้

- เพื่อให้สามารถจับถือได้สะดวกขณะเตรียมการและทำการตรวจสอบ
- เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมกับเครื่องมืออุปกรณ์หรือกล้องที่ใช้ตรวจสอบ
- เพื่อให้สามารถทำเครื่องหมายได้ง่ายเช่นใส่หมายเลขหรือ ใส่รหัส

3) การขัดกระดาษทราย

ขั้นตอนขัดผิวด้วยกระดาษทราย เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ เนื่องจากการขัดด้วยกระดาษทรายเป็นการปรับระนาบผิวขัดให้ได้ระดับเรียกว่าเป็นการขัดหยาบหรือปรับระนาบและเป็นการขัดผิวหน้าให้เรียบเรียกว่าเป็นการขัดละเอียดการขัดด้วยกระดาษทรายมักขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่าง ๆ จากหยาบไปจนกระทั่งละเอียดคือเบอร์ 240, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

4) การขัดมัน

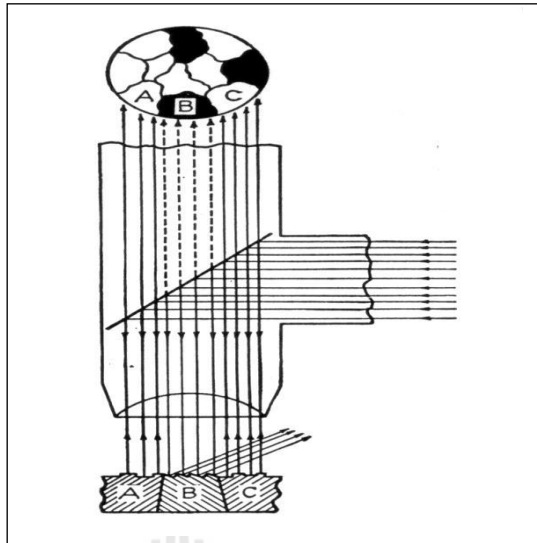
เป็นขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานทดสอบขั้นสุดท้ายเพื่อขจัดรอยขีดข่วนที่เกิดจากขั้นตอนการขัดผิวด้วยกระดาษทรายให้หมดไปและให้ผิวงานเรียบเป็นมันเงาการขัดมันกระทำโดยใช้ผ้าขัด (Polishing cloth) กับผงขัดหรือสารขัด (Polishing abrasive) โดยผงขัดที่นิยมใช้คือผงขัดชนิดออกไซด์ (Oxide polishing ; OP) ได้แก่อะลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 และผงขัดชนิดผงเพชร (Diamond polishing ; DP)

5) การกัดสารละลาย

เนื่องจากผิวชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการขัดมันมาแล้วมีผิวเรียบปราศจากการขีดข่วนและเป็นมันวาวเมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมองเห็นภาพเป็นพื้นเรียบสว่างตลอดผิวขัดและถ้าการเตรียมผิวชิ้นงานทดสอบไม่ดีก็จะมองเห็นรอยขีดข่วน หลุมหรือรูพรุน ไม่สามารถมองเห็นเฟสต่าง ๆ โครงสร้างมหภาคหรือจุลภาคได้จึงต้องนำไปทำการกัดสารละลายหรือกัดผิวหน้าด้วยสารเคมีภาพที่ปรากฏในกล้องจุลทรรศน์จะเป็นกลุ่มสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมี (Reagent) ที่ใช้วิเคราะห์และกลุ่มเฟสที่แตกต่างกัน

6) การตรวจสอบโครงสร้าง

เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจดูโครงสร้างภายในเนื้อโลหะอาจเป็นการตรวจดูโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการตกกระทบและแสงสะท้อนของแสงบนผิวชิ้นงาน ถูกกัดด้วยสารละลาย ที่มา : ไพโรจน์ฐานวิเศษ (2540)

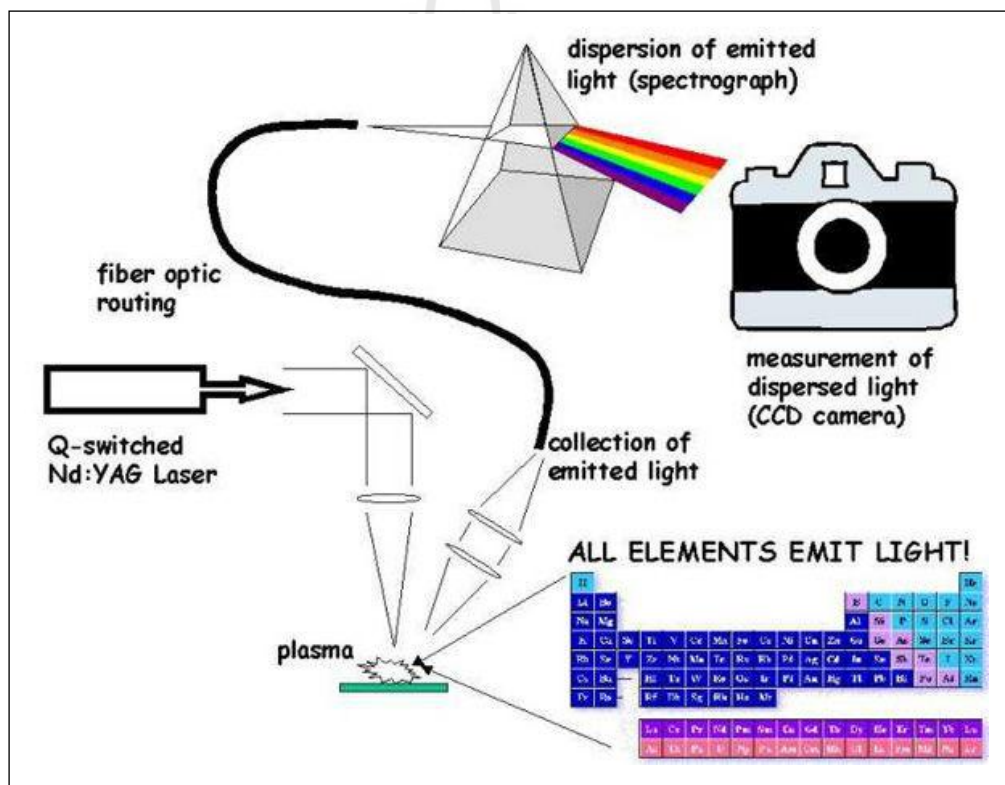
2.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis)

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีการที่นิยมมากที่สุด ในโรงงานอุตสาหกรรมคือ การตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Spectrometer ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เนื่องจากสามารถเตรียมชิ้นงานได้ง่าย และใช้เวลาในการทดสอบรวดเร็ว Emission spectrometer นี้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และหาปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็ง โดยจะใช้หลักการ Spark เพื่อให้ชิ้นงานให้แสงและคายพลังงานออกมาหรือที่เรียกว่า หลักการ Optical emission spectrometer โดยจะใช้ตัวรับสัญญาณหรือ Detector แบบ Muticcd ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อสามารถแยก Spectrum ของแสงได้ และจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวประมวลผลเพื่อทำการประมวลผลและวิเคราะห์ปริมาณของธาตุออกมา (NDT Instruments)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานโลหะ เป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นสำหรับการควบคุมมาตรฐานการผลิต ตลอดจนช่วยในการพัฒนาวิจัยผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางเคมีตามต้องการ



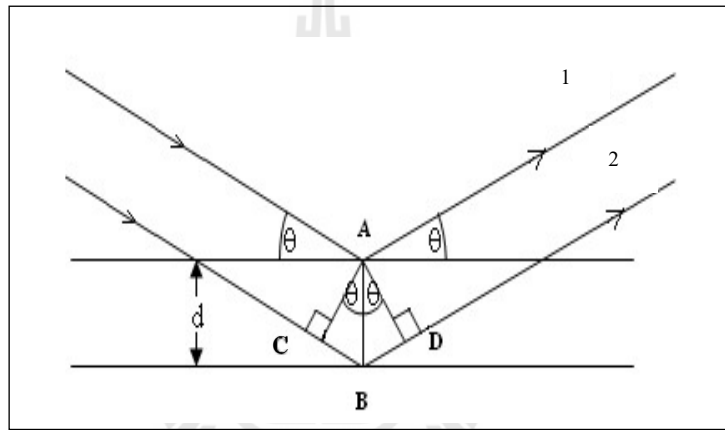
รูปที่ 2.8 แสดง Spark emission spectrometer



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการทำงานของ Spark emission spectrometer
ที่มา : RC Optical systems

2.4.3 X-Ray Diffraction

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึก ความเครียดของโลหะ ขนาดของอนุภาคและการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งในผลึกแต่ละชนิดมีขนาดของหน่วยเซลล์ไม่เท่ากันและประกอบด้วยสารที่แตกต่างกัน แพทเทอร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการเลี้ยวเบนกับความเข้มสัมพัทธ์ของพีค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่มีความยาวคลื่น ใกล้เคียงกับขนาดของหน่วยเซลล์ คือมีขนาดตั้งแต่ประมาณ 0.1-100 อังสตรอม จึงสามารถเลี้ยวเบนได้ดีจากผลึก เช่นเดียวกับแสงที่สามารถเลี้ยวเบนจากดิฟแฟรคชันเกรตติง



รูปที่ 2.10 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบบนระนาบผลึก
ที่มา : Advanced Technology (2007)

จากภาพจะพบว่ารังสีขนานตกลงบนผลึกที่จุด A และ B ตามลำดับ โดยทำมุม θ กับระนาบของผลึก การเลี้ยวเบนของรังสีจะเกิดขึ้นเมื่อระยะทางที่รังสีเอ็กซ์ 1 และ 2 เดินทางต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น จะได้ว่า

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

โดยกฎข้อนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้ารังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนผลึกที่มีความยาวคลื่นที่คงที่แล้ว มุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) การเตรียมตัวอย่าง ต้องนำตัวอย่างมาบดให้ละเอียดเป็นผง บรรจุลงในเพลท
- 2) นำเข้าเครื่อง Diffractometer ในขั้นตอนนี้เราสามารถที่จะกำหนดเวลาในการตรวจวัดความเข้มของรังสีเลี้ยวเบน จากนั้นจะได้ข้อมูลตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน
- 3) นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EVA จะเปรียบเทียบกับแพทเทิร์นมาตรฐานที่เก็บรวบรวมไว้แล้วสามารถจำแนกชนิดของสารประกอบนั้นได้



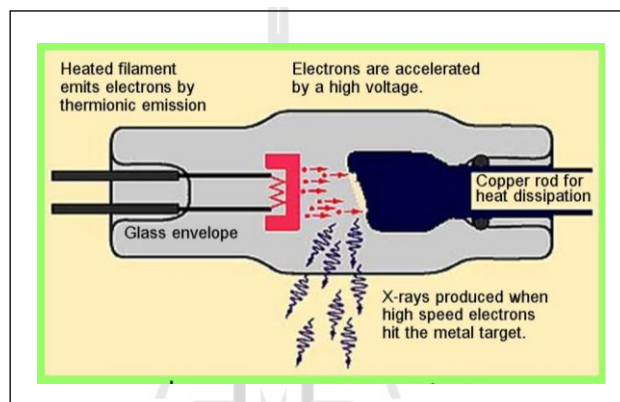
รูปที่ 2.11 แสดงขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ตัวอย่าง

ที่มา : AdvancedTechnology (2007)

ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ค่อนข้างรวดเร็วและถูกต้อง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายกรณี อาทิเช่น ในทางการแพทย์ ใช้จำแนกชนิดของนิ้วในไต สะดวกในการบำบัด ในทางโบราณคดี ใช้จำแนกสีเก่าออกจากสีใหม่ ในทางเกษตรกรรมใช้วิเคราะห์ส่วนประกอบของยา นอกจากนี้ยังใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายอย่าง (อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อุตสาหกรรมเซรามิกส์ อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ ฯลฯ)

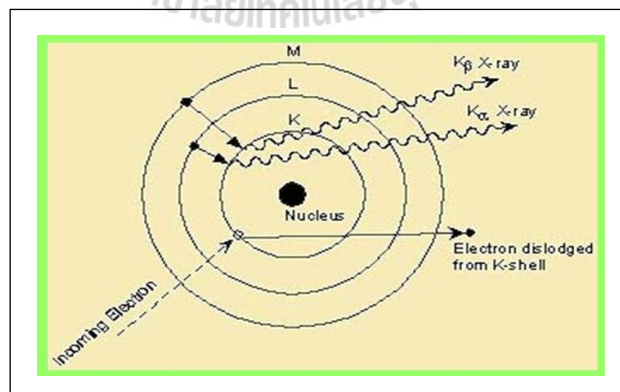
ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สถานะสุญญากาศ (รูปที่ 2.11) โดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ภายในหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการ

ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เคลื่อนที่เส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเร็วสูงเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้ห่วงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไป จึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอ็กซ์ออกมาดังแสดงในรูปที่ 2.12 รังสีเอ็กซ์ที่คายออกมาจะผ่านออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ รังสีเอ็กซ์ (Detector)



รูปที่ 2.12 แสดงหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์

ที่มา : ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.



รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดรังสีเอ็กซ์

ที่มา : ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.

2.4.4 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) เป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิวในการทดสอบความแข็งไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุซึ่งในหัวข้อนี้ได้แสดงถึงกระบวนการทดสอบความแข็งแบบบรอยกด (Indentation) เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับการรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อนหัวกดลงบนวัสดุ

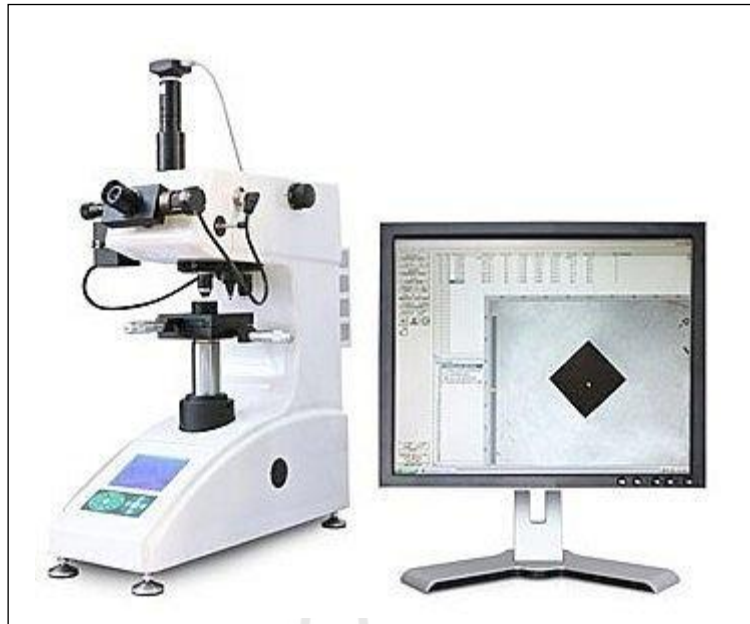
หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกดซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่าง ๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอลแบบระนาบหรือแบบกรวยปลายมนหรือปิรามิดซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชร และใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักกดที่โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น

1) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Testing) หลักการของการทดสอบแบบวิกเกอร์สคล้ายคลึงกับหลักการของแบบบริเนลล์ ที่กำหนดให้ค่าความแข็งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้กดต่อหน่วยพื้นที่รอยกด ข้อแตกต่างระหว่างการทดสอบแบบวิกเกอร์สกับการทดสอบแบบบริเนลล์อยู่ที่รูปทรงสัญญาณของหัวกด แบบวิกเกอร์สเป็นหัวกดจัตุรัสที่ทำจากเพชร มุมระหว่างหน้าปิรามิดด้านที่ตรงกันข้ามกันจะเท่ากับ 136 องศา ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (H_V) จะคำนวณจากสูตร

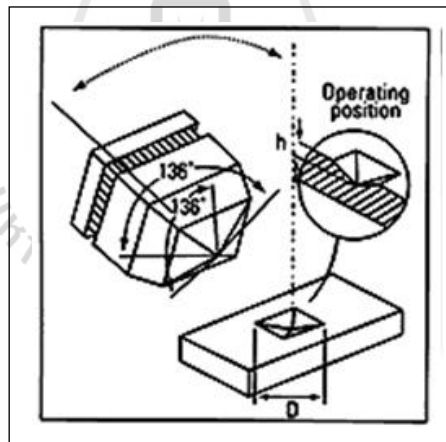
$$H_V = \frac{2p \sin\left(\frac{360^\circ}{2}\right)}{d^2}$$

โดยที่ p คือ น้ำหนักที่ใช้กด (กิโลกรัม)

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.14 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

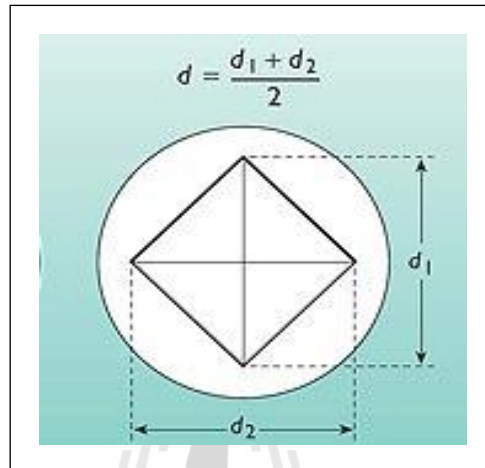


รูปที่ 2.15 แสดงหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

การรายงานค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สจะรายงานแบบไม่ระบุหน่วยเช่นเดียวกับความแข็งแบบบริเนลล์ จึงควรระมัดระวังไม่ใช่หน่วยที่ผิดเนื่องจากจะทำให้คำนวณค่าความแข็งผิดไป

หัวกดสำหรับการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สจะมีเพียงแบบเดียว การทดสอบวัสดุที่มีความหลากหลายแตกต่างกันจะใช้การปรับน้ำหนักที่ใช้กด ซึ่งในการทดสอบความ

แข็งแบบวิกเกอร์สแบบธรรมดาใช้น้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่างที่ 1 ถึง 20 กิโลกรัม การทดสอบวัสดุที่มีความแข็งสูงจะใช้น้ำหนักกดมากเพื่อให้ได้รอยกดที่ใหญ่พอจะตรวจวัดขนาดเส้นทแยงมุมได้อย่างแม่นยำ ในทางกลับกันหากวัสดุที่จะทดสอบค่อนข้างอ่อนจะต้องเลือกน้ำหนักกดที่น้อยเพื่อป้องกันไม่ให้หัวกดจมลึกลงไปในชิ้นงานมากเกินไป



รูปที่ 2.16 แสดงการหาขนาดเส้นทแยงมุมเฉลี่ยในสองแนวซึ่งทำมุมกัน 90 องศา

จุดเด่นของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สอยู่ตรงที่ค่าความแข็งที่ตรวจวัดได้จะไม่ขึ้นกับน้ำหนักที่ใช้กด หัวกดแบบวิกเกอร์สที่เป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมซึ่งมีมุมของหน้าตรงกันข้ามเท่ากับ 136 องศา ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อแก้ปัญหาที่เป็นข้อเสียสำคัญของหัวกดแบบบริเนลล์ที่เป็นทรงกลม หัวกดที่เป็นลักษณะทรงกลมนั้นเมื่อทำการทดสอบวัสดุชนิดเดียวกันสองครั้งโดยใช้น้ำหนักกดที่แตกต่างกันไป เนื่องจากหัวกดมีลักษณะเป็นทรงกลม การจมลึกที่แตกต่างกันทำให้รอยกดที่ได้มีลักษณะทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันส่งผลให้การกระจายของความเค้นตรงรอยกดมีสถานะแตกต่างทำให้ความแข็งที่คำนวณได้จึงแตกต่างกัน

สำหรับหัวกดแบบปิระมิดของวิกเกอร์สนั้นมุมของหน้าปิรามิดด้านตรงกันข้ามกันที่เท่ากับ 136 องศา ช่วยให้อรอยกดสามารถรักษารูปทรงเรขาคณิตเอาไว้ได้แม้ระยะการจมลึกของหัวกด (จากการใช้น้ำหนักกดที่ต่างกัน) จะแตกต่างกันไป จากจุดเด่นของการทดสอบแบบวิกเกอร์สนี้เองทำให้ช่องการทดสอบความแข็งมีความต่อเนื่องกันตลอดตั้งแต่วัสดุอ่อนจนถึงวัสดุแข็งด้วยการทดสอบความแข็งเพียงสเกลเดียว

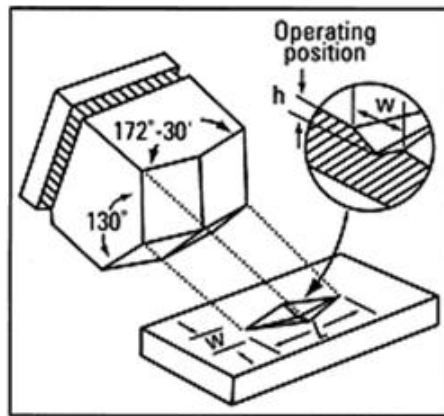
เนื่องจากหลักการและขั้นตอนการปฏิบัติงานในการทดสอบความแข็งแรงแบบวิคเกอร์สคล้ายกันกับการทดสอบแบบบริเนลล์ ดังนั้นความผิดพลาดจากการทดสอบมักจะมีสาเหตุมาจากการเตรียมชิ้นงานและการอ่านค่าขนาดเส้นทแยงมุมเป็นส่วนใหญ่

ห้วกดแบบวิคเกอร์สมิขนาดเล็กรทำให้รอยกดที่ได้มีขนาดเล็กมาก การวัดค่าเส้นทแยงมุมจึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงเพื่อช่วยให้สามารถวัดความยาวของเส้นได้ถูกต้องและแม่นยำ การเตรียมชิ้นงานในการวัดก็จะยุ่งยากกว่าวิธีบริเนลล์ คือผิวของชิ้นงานจะต้องเรียบและมัน โดยการขัดด้วยผ้าขัดและผงขัด (ผงอะลูมินา) เพิ่มเติมจากการขัดกระดาษทรายหยาบ ที่ต้องขัดด้วยผงขัดเพิ่มเพราะการขัดแบบธรรมดาจะส่งผลต่อการวัดของห้วกดที่มีขนาดเล็กได้ การใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงยังต้องสะท้อนแสงได้ดีเพื่อความสว่างของภาพ ในทางปฏิบัติจึงเตรียมชิ้นทดสอบแบบวิคเกอร์สเหมือนกับการเตรียมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องโลหวิทยา

ถึงแม้ว่าการทดสอบความแข็งแรงแบบวิคเกอร์สจะเป็นที่นิยมอย่างมากของกลุ่มนักวิจัยและห้องปฏิบัติการ แต่เนื่องจากการเตรียมชิ้นทดสอบที่ยุ่งยากและใช้เวลานานทำให้ไม่ได้รับความนิยมในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องทดสอบชิ้นงานจำนวนมาก

2) การทดสอบความแข็งแรงระดับจุลภาค (Microhardness testing) ในบางครั้งการตรวจสอบสมบัติของวัสดุอาจต้องกระทำในระดับที่เล็กมาก ตัวอย่างเช่น การตรวจสอบเพื่อยืนยันความลึกของการชุบแข็งผิวที่มีชั้นชุบแข็งที่หนาเพียงไม่กี่ร้อยไมโครเมตร (10⁻⁶ เมตร) ถึงระดับมิลลิเมตร เนื่องจากการทดสอบแบบนี้ต้องการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงตามตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระยะทางที่สั้นมาก การใช้ห้วกดทดสอบแบบปกติ จะทำให้ได้รอยกดขนาดใหญ่เกินไปจึงมีการพัฒนาเครื่องทดสอบความแข็งแรงที่สามารถใช้น้ำหนักกดเบามาก (น้อยกว่า 1 กิโลกรัม) กดลงบนห้วกดขนาดเล็กที่มีมิติเพียงตรงสูงเพื่อให้ได้รอยกดขนาดเล็กตามต้องการ

นอกจากการตรวจสอบสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปในระยะทางที่สั้นมากแล้วเรายังใช้การทดสอบความแข็งแรงในระดับจุลภาคของโลหะหรือวัสดุที่ประกอบด้วยเฟสจำนวนมากกว่าหนึ่งเฟส ซึ่งบ่อยครั้งที่การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาไม่สามารถแยกเฟสหรือโครงสร้างได้จากความแข็งแรง ในปัจจุบันเทคโนโลยีระดับเล็กมากได้มีการพัฒนาและมีบทบาทในอุตสาหกรรม การทดสอบในระดับจุลภาคจึงได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบความแข็งแรงหรือการทดสอบในระดับเล็กมาก (Nano indentation test) นิยมใช้ทดสอบกับชั้นฟิล์มเคลือบที่มีความหนาน้อยกว่าระดับไมโครเมตร ค่าความแข็งแรงหรือพฤติกรรมของวัสดุที่ตรวจวัดขณะทำการทดสอบจะถูกนำไปคำนวณเพื่อแปลงไปเป็นสมบัติของวัสดุอย่างอื่นที่ไม่สามารถตรวจวัดได้โดยตรง อาทิเช่น ค่ามอดูลัสอีลาสติกหรือค่าความเค้นจุดครากของชั้นฟิล์มบาง เป็นต้น



รูปที่ 2.17 แสดงหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบนูน (Knoop)

เครื่องทดสอบความแข็งในระดับจุลภาคในปัจจุบันมีช่วงน้ำหนักที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 1 กรัม ถึง 1 กิโลกรัม โดยมีหัวกดที่นิยมใช้คู่สองแบบ คือ หัวกดแบบวิกเกอร์ส และหัวกดแบบนูน (Knoop) หัวกดแบบวิกเกอร์สที่ใช้กับเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคจะเหมือนกับหัวกดแบบวิกเกอร์สแบบธรรมดาทุกประการเพียงแต่ย่อส่วนขนาดที่เล็กลง ส่วนหัวกดแบบนูนนั้นจะมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (ในภาษาอังกฤษเรียกว่า ฐานรูปเพชร หรือ Diamond shaped indenter)

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งระดับจุลภาคจะเหมือนกับการทดสอบแบบวิกเกอร์สทุกประการ แต่เนื่องหัวกดมีขนาดเล็กมากการเตรียมผิวที่เรียบและมันจึงมีความสำคัญมากในการทดสอบ โดยปกติชิ้นงานที่ต้องทดสอบความแข็งในระดับจุลภาคมักจะฝังตัวอยู่ในพลาสติกและผ่านการเตรียมเหมือนกับขั้นตอนที่ใช้ชิ้นงานตรวจวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 2.18 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์จะแสดงบนจอภาพ
ที่แยกออกมาจากเครื่อง สามารถวัดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดได้บนจอภาพ

การคำนวณค่าความแข็งจากการทดสอบจะเหมือนกับการทดสอบแบบ
วิกเกอร์สกล่าวคือ วัดความยาวของเส้นทแยงมุมทั้งสองแนวเพื่อหาค่าความยาวของเส้นทแยงมุม
เฉลี่ยและนำไปคำนวณความแข็งตามสูตรการคำนวณความแข็งแบบวิกเกอร์ส สำหรับหัวกด
แบบนูนนั้นเส้นทแยงมุมในสองแนวจะไม่เท่ากัน (โดยประมาณมีอัตราส่วน 7 ต่อ 1) ค่าความแข็ง
ในการทดสอบโดยใช้หัวกดแบบนูนจะคำนวณจากสูตร

$$HK = \frac{14.228p}{d^2}$$

ที่ p คือน้ำหนักที่ใช้กดในหน่วยกิโลกรัม

d คือความยาวของเส้นทแยงมุมด้านยาวของรอยกด (มิลลิเมตร)

หัวกดแบบนูนจะมีประโยชน์อย่างมากในการวัดความแข็งจำนวนหลายจุด
ภายในระยะทางสั้น ๆ เนื่องจากรูปทรงที่มีเส้นทแยงมุมด้านหนึ่งที่ยาวกว่าด้านยาวมาก

ข้อควรระวังของการทดสอบความแข็งระดับจุลภาคมีอยู่หลายประการ แต่ข้อควรระวังที่สุดจะอยู่ที่การวางตำแหน่งกด การกดวัดความแข็งที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ชิดกับรอยกดเดิมมากเกินไปจะทำให้ได้ค่าความแข็งผิดไปจากความจริง อันที่จริงแล้วข้อควรระวังข้อนี้เป็นข้อควรระวังร่วมสำหรับการทดสอบความแข็งทุกแบบแต่ที่เน้นย้ำในที่นี้เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการทดสอบความแข็งในระดับจุลภาคมักเป็นการวัดความแข็งในหลายจุดในแนวต่อเนื่องกัน การกดวัดความแข็งต้องทิ้งระยะห่างจากรอยกดเดิม ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดในทิศทางนั้น เกณฑ์การเว้นระยะนี้ใช้ได้กับการทดสอบแบบอื่นได้เช่นกัน

3) ความแข็งผิว (Case hardness) และความลึกผิวแข็ง (Case depth)

โดยปกติแล้วค่าความแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งผิวแล้วจะมีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณผิวและค่าความแข็งลดลงตามความลึกเข้าไปในชิ้นงาน ดังนั้นการตรวจวัดคุณภาพงานชุบแข็งผิวจึงสนใจที่ ค่าความแข็งผิว (Surface hardness or case hardness) และค่าความลึกผิวแข็ง (Case depth) ด้วย

ความแข็งผิว (Case hardness) คือค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่ได้จากการชุบแข็งผิว ส่วนค่าความลึกผิวแข็ง คือระยะทางจากผิวถึงบริเวณด้านในชิ้นงานที่มีค่าความแข็งลดลงจนถึงค่าตามเกณฑ์ที่พิจารณา โดยปกติแล้วการกำหนดค่าความลึกผิวแข็งตามเกณฑ์มี 2 แบบ ที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า ค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมด (total case depth) และค่าความลึกผิวแข็งที่มีประสิทธิภาพ (effective case depth)

Total case depth คือระยะทางจากผิวถึงบริเวณหรือจุดแรกด้านในชิ้นงานที่มีค่าความแข็งเท่ากับค่าความแข็งของชิ้นงานด้านในหรือใจกลางชิ้นงาน (Core hardness) โดยปกติแล้วการตรวจวัด total case depth จะใช้วิธีการตรวจสอบโดยการเตรียมตัวอย่างทางโลหะวิทยา ได้แก่ การตัด ขัดหยาบ ขัดละเอียด และ กัดกรด แล้วถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อนโดยต้องสอบเทียบระยะจากการขยายของเลนส์และชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพต่าง ๆ ด้วยเพื่อที่จะกำหนดระยะจากภาพถ่ายได้

Effective case depth คือระยะทางจากผิวนอกถึงบริเวณหรือจุดแรกด้านในชิ้นงานที่มีค่าความแข็งลดลงจนถึงค่าความแข็งตามเกณฑ์ เช่น กำหนดให้ $513 H_V$ หรือ $50 H_{RC}$ ค่าความแข็งที่ตำแหน่งลึกไปจากนี้จะยังคงลดลงต่อไปจนถึงระยะ total case depth นั้นเอง โดยเรียกค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์ว่า effective case depth hardness การวัดค่า Effective case depth hardness นั้นส่วนใหญ่อาศัยเทคนิคการวัดความแข็งแบบ Micro-Vickers และ Knoop โดยต้องเลื่อนชิ้นงานเพื่อวัดความแข็งที่ระยะความลึกเข้าไปจากผิวต่างๆ กัน จนกระทั่งถึงระยะหนึ่งที่ค่าความแข็งลดลงเท่ากับเกณฑ์เป็นตำแหน่งแรก

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนด Effective case depth อ้างอิงตาม SAE J423

Carbon content (wt.%)	Effective case depth hardness	
	H _{RC}	H _V
0.28 – 0.32	35	345
0.33 – 0.42	40	392
0.43 – 0.52	45	446
0.53 and over	50	513

2.4.5 การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ (Corrosion Test)

การกัดกร่อนของโลหะ คือ การสูญเสียเนื้อโลหะโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี กับสิ่งแวดล้อมอาจเป็นปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction) ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก เพื่อให้สามารถประเมินการกัดกร่อน จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบการกัดกร่อน การทดสอบการกัดกร่อนสามารถแบ่งออกได้ เป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

- การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory test) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีส่วนผสมทางเคมี (Chemical compositions) เหมือนกันกับชิ้นส่วนจริงที่ใช้งาน (ชิ้นส่วนทางวิศวกรรม) แต่มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานจริงและ จัดสภาวะแวดล้อมให้ใกล้เคียงกับสภาวะที่เป็นจริง แต่ใช้ปริมาณน้อยกว่าการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ มีประโยชน์ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการต้านทานการกัดกร่อนเพื่อหาวัสดุใหม่มาทดแทนวัสดุเดิม

การทดสอบระยะเวลาสั้นในสารละลาย ส่วนใหญ่เป็นการจำลองบรรยากาศในห้องปฏิบัติการที่มีสารเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อน ทำให้ทราบผลของการทดสอบในเวลาอันสั้น เช่น การทดสอบการจุ่มชิ้นงานลงในน้ำทะเลเทียม (ASTM B185-43) เป็นต้น

- การจำลองสภาวะการใช้งานจริงที่เรียกว่า Pilot-plant หรือ Semiwork-tests เป็นการทดสอบที่ดีที่สุดและเป็นข้อมูลที่มีความต้องการใช้งานมากที่สุด ผลการทดลองที่ได้ค่อนข้างถูกต้องเพราะมีสภาวะที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากที่สุด กล่าวคือ ใช้วัสดุจริง (Actual material) ความเข้มข้นของสารละลายจริง (Actual concentration) อุณหภูมิที่ใช้ใกล้เคียงสภาวะจริง (Actual temperature) ความเร็วของสารละลายที่มากระทบ หรือสัมผัสกับสารละลายใกล้เคียงสภาวะจริง (Actual velocity) นอกจากนี้ยังรวมไปถึงปริมาณของสารละลายที่สัมผัสอยู่บนผิวของชิ้นงานอีกด้วย อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัด คือ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการทดสอบและเก็บข้อมูลนาน ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบการจับเก็บ และประมวลผลที่ดี

- การทดสอบในโรงงานจริงหรือสภาวะจริง เป็นข้อมูลที่สามารถเปลี่ยนแปลงสภาวะและเปลี่ยนแปลงข้อมูลทางเศรษฐกิจ เหมาะสำหรับงานศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน

1) จุดประสงค์ของการทดสอบการกัดกร่อน

- เพื่อตรวจสอบ และเลือกใช้วัสดุสำหรับสิ่งแวดล้อมใหม่ หรือการใช้งานเฉพาะทาง ที่ในบางครั้งอาจเป็นโรงงานใหม่ที่ยังไม่เคยสร้าง หรือทดลองใช้วัสดุกับสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ มาก่อน หรือในบางกรณีใช้เพื่อทดสอบวัสดุใหม่ว่ามีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่าวัสดุเดิมหรือไม่

- เพื่อตรวจสอบวัสดุทั้งเก่าและใหม่ในสภาวะแวดล้อมที่กำหนด งานทดสอบชนิดนี้มักกระทำโดยผู้ผลิตวัสดุเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับลูกค้า

- เพื่อดูพฤติกรรมความต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ ตัวอย่างเช่น เพื่อตรวจสอบว่ากระบวนการอบชุบทางความร้อนสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมถูกต้อง เหมาะสมหรือไม่ โดยใช้ Huey test (Boiling 65% HNO₃) หรือเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการเคลือบที่มีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้ การพ่นละอองน้ำเกลือ หรือละอองน้ำทะเล ที่เรียกว่า Salt spray testing

- ประเมินผลของสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการกัดกร่อนของวัสดุ เช่น สารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitor testing)

2) ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นก่อนเริ่มทดสอบการกัดกร่อนก่อนเริ่มต้นการทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ หรือ โลหะผสมที่ใช้เป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ทางวิศวกรรม มีข้อมูลเบื้องต้นของวัสดุที่จำเป็นต้องทราบก่อนเริ่มต้นการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ และประมวลผลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างข้อมูลพื้นฐานที่ควรทราบ

- ส่วนผสมทางเคมี (Chemical compositions) ของโลหะที่ถูกทดสอบ
- ประวัติกระบวนการผลิตหรือกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ นั้นๆ (Fabrication history) เช่น ขึ้นรูปด้วยการหล่อรีดขึ้นรูปและรวมไปถึงกระบวนการอบชุบทางความร้อน

- โครงสร้างจุลภาคก่อนการทดสอบการกัดกร่อน

- ภาพถ่ายของวัสดุตลอดจนบันทึกเกี่ยวกับขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน

3) การเตรียมพื้นผิว (Surface preparation)

ในความเป็นจริงหรืออุดมคติพื้นผิวของชิ้นงานที่ถูกทดสอบควรมีสภาพใกล้เคียงกับชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่นำไปใช้งานจริงแต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากเพราะกระบวนการเตรียมผิว ดังนั้นจึงต้องกำหนดมาตรฐานในการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนทดสอบดังต่อไปนี้

สำหรับชิ้นงานที่มีชั้นเคลือบที่ผิวเช่นชั้นเคลือบไนไตรด์ชั้นเคลือบป้องกัน สนิม เป็นต้น จากมาตรฐาน ASTM G1-103 Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens เป็นดังนี้

- ผิวต้องขัดด้วยกระดาษทรายอย่างน้อยเบอร์ 120 แต่ในความเป็นจริงหากต้องการพื้นผิวที่เรียบกว่านี้อาจขัดด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียดมากได้ตัวอย่างเช่น (จากการทดลองจริง ในงานวิจัยระดับปริญญาโทของผู้เขียน) เพื่อตัดผลกระทบจากความหยาบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมคูเพิล็กซ์ที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนจึงเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงความละเอียดที่เบอร์ 1200

- ควรระบุหมายเลขที่ชิ้นงาน โดยอาจใช้การตอกหมายเลข แต่มีข้อเสียคือ บริเวณที่ใกล้รอยตอกเกิดความความเค้น-ความเครียดสะสมและ อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ อาจเลือกใช้ปากกาไฟฟ้า (Electric engraving) เพื่อลดการเกิดผลกระทบจากความเค้น-ความเครียดเฉพาะที่ (Localized stress-strain) ใดๆก็ตามรอยเขียนอาจลบเลือนได้ง่าย

- หากชิ้นงานมีมุมแหลมคมควรลบรอยแหลมคมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณที่มีมุมแหลมอย่างรุนแรงมากกว่าบริเวณอื่น

- หากจำเป็นและไม่ต้องการให้มีรอยขีดข่วนใด ๆ บนผิวชิ้นงานจากการเขียนรหัสหรือหมายเลขประจำชิ้นงานอาจใช้ชอล์ก โลหะ หรือพลาสติกติดที่ชิ้นงานเพื่อระบุหมายเลข แต่มีข้อควรพิจารณาคือในกรณีใช้ชอล์ก โลหะอาจเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกแทนเป็นต้น

- หลังจากเขียนหมายเลขเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องล้างชิ้นงานให้สะอาดปราศจากคราบน้ำมันด้วยสารละลายอินทรีย์ หรือตัวทำละลายที่เป็นแอลคาไลด์ ตามด้วยการทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกทั้งก่อนและหลังการทดสอบ

- หากมีสนิมหรือออกไซด์เกิดที่ผิวก่อนการทดสอบจำเป็นต้องล้างทำความสะอาดและกำจัดสนิมหรือออกไซด์ดังกล่าวออกไปก่อน

- ขั้นสุดท้ายคือทำความสะอาดอีกครั้งเป่าให้แห้งและชั่งน้ำหนักก่อนนำไปทดสอบในลำดับต่อไป

สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบมา ไม่ควรทำลายชั้นเคลือบ เพียงแต่ล้างทำความสะอาด เป่าแห้ง และชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบการกัดกร่อน ใดๆก็ตามควรมีการทดสอบสมบัติของชั้นเคลือบก่อนเริ่มทดสอบการกัดกร่อนเช่นความสามารถในการยึดเกาะของชั้นเคลือบบนผิววัสดุความแข็งแรงของชั้นเคลือบ เป็นต้น

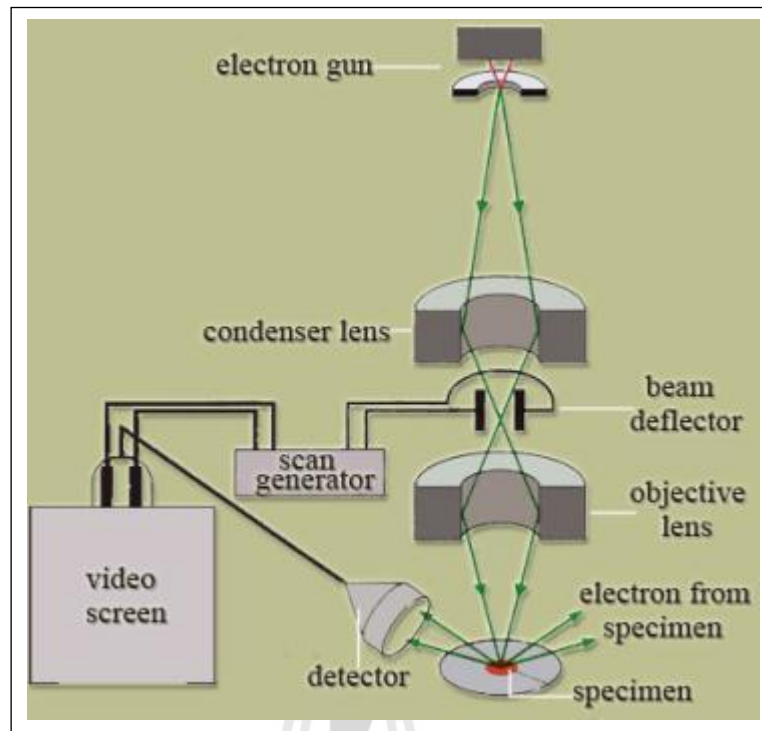
2.4.6 Scanning Electron Microscope (SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วย

เครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



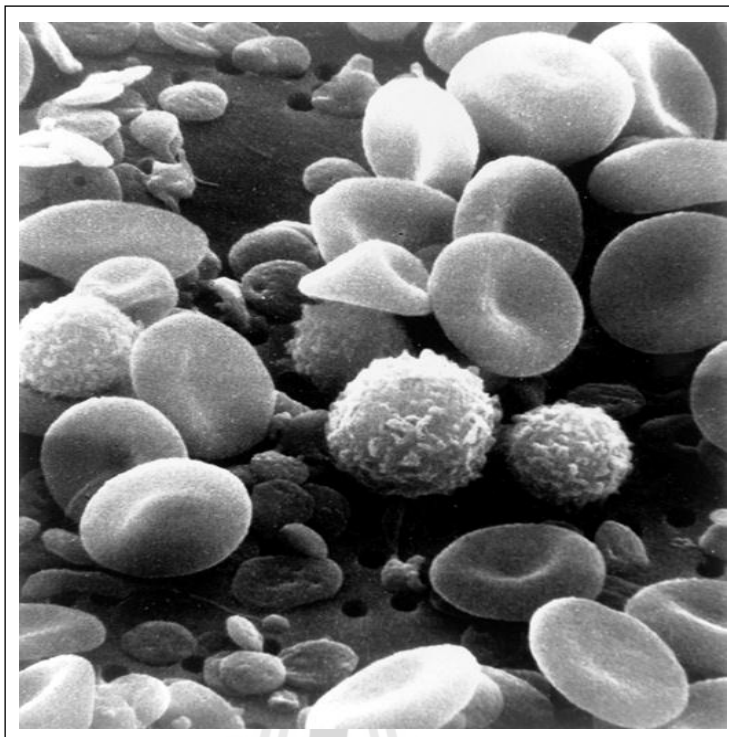
รูปที่ 2.19 แสดง Scanning electron microscope (SEM)



รูปที่ 2.20 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM

ที่มา : วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย



รูป 2.21 แสดงพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

ที่มา : วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

ข้อดีของเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง TEM คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) งานวิจัยของ Selcuk, B., Ipek, R., and Karamis, M. B. (2003) **A study on friction and wear behaviour of carburizing, carbonitriding and borided AISI 1020 steel** ได้ศึกษาเกี่ยวกับแรงเสียดทานและพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 และเหล็กผสม AISI 5115 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิงคาร์โบไนไตรดิง และ Borided ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การชุบแข็งผิววิธี Carbonitriding มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI1020 และเหล็กผสม AISI 5115 มากกว่ากระบวนการ Carbonitriding

2) งานวิจัยของ Foerster, C. E., Assmann, A., Silva, S. L. R., Nascimento, F. C., Lepienski, C.M., Guimaraes, J.L., and Chinelatto, A.L. (N.D.) **ANSI 304 nitrocarburized at low temperature: Mechanical and tribological** ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำกระบวนการไนโตรคาร์บูไรท์ที่อุณหภูมิ 300°C ของเหล็ก ANSI 304 แล้วดูคุณสมบัติของวัสดุเช่น โครงสร้าง ความแข็ง ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การทำที่บรรยากาศที่มี $N_2:CH_4=98:2$ ที่ 300°C เกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวมีคาร์บอนและไนโตรเจนแทรก ที่กว้างขึ้นส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นที่บริเวณขอบจาก 5 GPa เป็น 11 GPa

3) งานวิจัยของ Asi, O., Can, A.C., Pineault, J., and Belassel, M. (2008) **The effect of high temperature gas carburizing on bending fatigue strength of SAE 8620 steel** ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทำแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงที่อุณหภูมิ 940°C เวลา 3, 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 980°C เวลา 1, 2 ชั่วโมง แล้วดูค่าความแข็ง ความล้าของชิ้นงาน ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การทำคาร์เบอร์ไรซิงที่ 980°C มีลิมิตความล้าที่ต่ำกว่าการทำคาร์เบอร์ไรซิงที่ 940°C

4) งานวิจัยของ Jauhari, I., Rozali, S., Masdek, N., and Hiroyuki, O. (2007) **Surface properties and activation energy analysis for superplastic carburizing of duplex stainless steel** ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง ที่อุณหภูมิ 850-950°C เป็นเวลา 2-8 ชั่วโมง ของเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วดูคุณสมบัติของวัสดุ ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า กระบวนการคาร์เบอร์ไรซิงทำให้เกิดโครงสร้าง FeC และ Fe_3C โดยตรวจสอบจากวิธี XRD

5) งานวิจัยของ Noor, E., and Moubaraki, A. (2008) **Corrosion Behavior of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solutions** ได้ศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของวัสดุโดยกรดไฮโดรคลอริกต่อเหล็กเหนียว ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับเหล็กเหนียวเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็มและยิ่งเด่นชัดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดมากขึ้น

6) งานวิจัยของ Osarolube, E., Owate, I. O., and Oforka, N. C., (2008) **Corrosion behaviour of mild and high carbon steels in various acidic media** ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กอ่อนและเหล็กคาร์บอนสูงในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของกรดไนตริก (HNO_3) ไฮโดรคลอริก (HCl) และกรด perchloric ($HClO_4$) ผลการวิจัยทำให้ทราบว่าเหล็กอ่อนซึ่งมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่ามีผลต่อการกัดกร่อนมากกว่า โดยมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าเหล็กคาร์บอนสูง

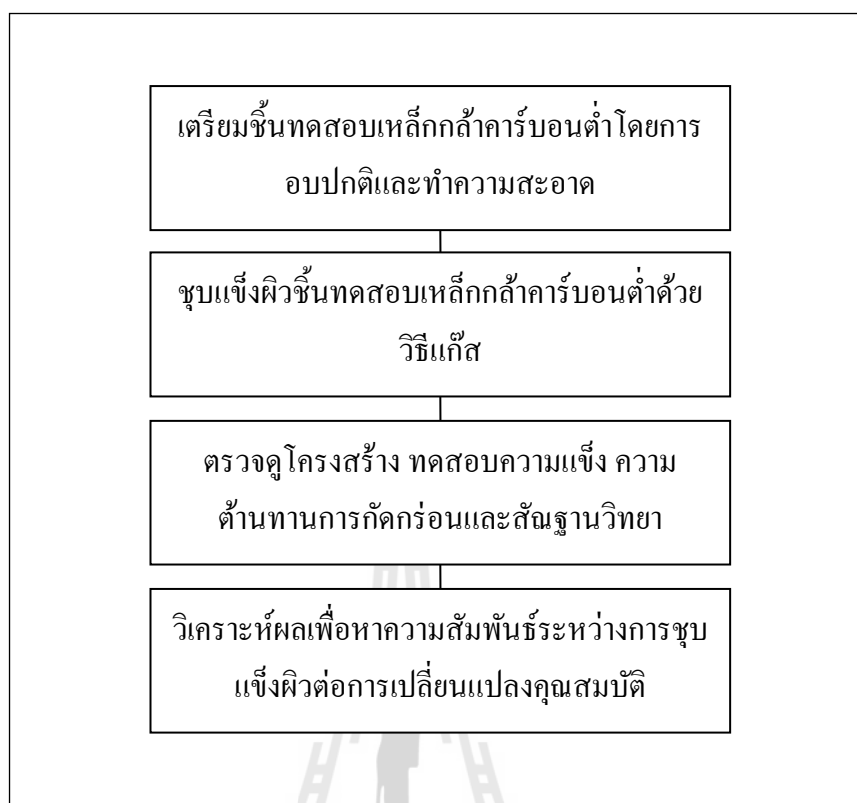
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เป็นวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรมและในชีวิตประจำวันไม่ต่ำกว่า 90% เนื่องจากขึ้นรูปง่าย เชื่อมง่าย และราคาไม่แพง มีการมาประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีสัดส่วนการใช้งานที่สูงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ ก็มีสถานะเสี่ยงต่อการกัดกร่อนและความแข็งแรงโดยเกิดการเสื่อมสภาพของเหล็กที่ทำให้สมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยที่เปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อน การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการอบชุบทางความร้อนและการผสมธาตุต่าง ๆ เพื่อความแข็งแรงและใช้งานได้กว้างมากขึ้น ทั้งนี้ต่อการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นดังกล่าว โดยการชุบแข็งผิวในแต่ละวิธีการเพื่อให้เกิดความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจุดประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้เพื่อศึกษาวิเคราะห์ถึงกระบวนการชุบแข็งผิวได้แก่ วิธีซอฟต์แวร์ไนไตรดิง คาร์เบอร์ไรซิง และคาร์โบไนไตรดิง ต่อคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาผลของการชุบแข็งผิวที่ส่งผลต่อชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยทำการออกแบบการทดลองขึ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

ทำการออกแบบและเตรียมขึ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำโดยทำการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการอบปกติและทำความสะอาดผิวด้วย Shot blasting นำชิ้นตัวอย่างไปชุบแข็งผิวด้วยวิธีการ แก๊สซอฟต์แวร์ไนไตรดิง แก๊สคาร์เบอร์ไรซิง แก๊สคาร์โบไนไตรดิง และกระบวนการผสมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ทดสอบคุณสมบัติเชิงกล วิเคราะห์โครงสร้าง ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนและสภาพทางสัณฐานวิทยา วิเคราะห์ผลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการชุบแข็งผิวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน ของชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ



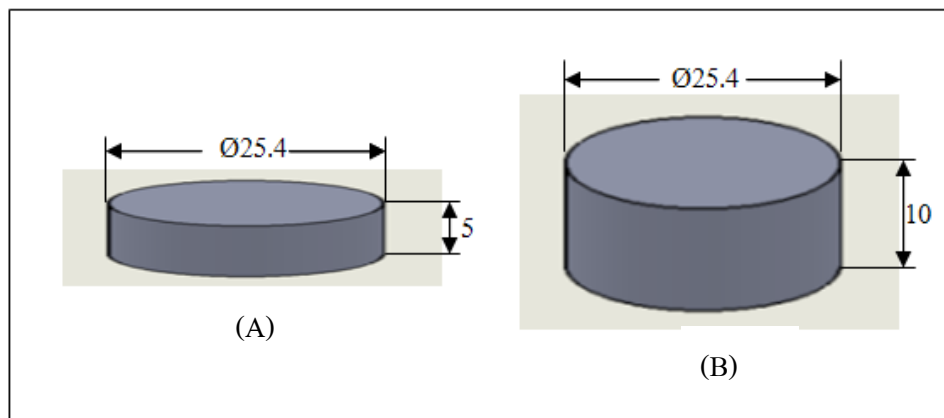
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมชิ้นทดสอบเส้นใยคาร์บอนดำ

3.1.1 ชิ้นตัวอย่างเส้นใยคาร์บอนดำ AISI 1020

ชิ้นทดสอบทำจากวัสดุเส้นใยคาร์บอนดำตามมาตรฐานสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (AISI) โดยใช้เหล็กเกรด AISI 1020 มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไม่เกิน 0.2%

ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบเส้นใยคาร์บอนดำ AISI 1020 ด้วยโปรแกรม Solid work 2007 SP 2.2 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร)

จากรูปที่ 3.2 แสดงชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ดังนี้ (A) คือชิ้นทดสอบทรงกระบอกบางเพื่อทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร และมีความสูง 5 มิลลิเมตร (B) คือชิ้นทดสอบทรงกระบอกสูงเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและ โครงสร้าง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร และมีความสูง 10 มิลลิเมตร

การเตรียมชิ้นทดสอบ ต้องใช้เครื่องตัดละเอียด เนื่องจากขนาดของชิ้นทดสอบบาง ผิวของชิ้นทดสอบต้องมีความเรียบ

3.1.2 การปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีการอบปกติ

การสร้างมาตรฐานชิ้นทดสอบให้มีคุณสมบัติที่เหมือนกันสามารถทำได้โดยการอบปกติ เนื่องจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 อาจเป็นปัจจัยที่ทำให้มีความเกรนที่หยาบและไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งในการตัดเตรียมชิ้นทดสอบอาจส่งผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติได้เช่นกัน

ข้อมูลพื้นฐานของชิ้นทดสอบคือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร สูง 5 และ 10 มิลลิเมตร มีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.20% จากข้อมูลของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 สามารถปรับปรุงคุณสมบัติอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

การอบปกติ มีข้อควรคำนึงที่สำคัญอยู่สองประการคือ ประการที่หนึ่ง ต้องอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_3 ประมาณ 50 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่อยู่ในชิ้นทดสอบ ประการที่สองคือเวลาในการอบ ต้องอบชิ้นทดสอบให้เป็นออสเตนไนต์ (Austenitizing) ทั้งหมด กระบวนการออสเตนไนต์ไทซิงเป็นการให้ความร้อนแก่เหล็กที่อุณหภูมิ

เหนืออุณหภูมิวิกฤตบน (A_3) วิธีการประกอบไปด้วยการอุ่นชิ้นงาน (Preheating) และการอบแช่ (Holding) ที่อุณหภูมิอสเตนไนต์ ในกระบวนการนี้ สภาพบรรยากาศภายในเตามีผลต่อกรรมวิธีการอบชุบเป็นอย่างมาก การอุ่นชิ้นงานจะทำก่อนถึงอุณหภูมิอสเตนไนต์เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิต่ำไปสูงมาก ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความเค้นต่อชิ้นงาน การแช่ชิ้นงานที่อุณหภูมิอสเตนไนต์ เป็นการให้เวลาเพื่อกระจายความร้อนแก่ชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอทั้งผิวนอกและแกนกลางของชิ้นงานเวลาที่ใช้ออบแช่ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน ปกติเวลาที่แช่จะอยู่ที่ 1 ชั่วโมงต่อความหนา 1 นิ้ว และเวลาอย่างน้อยที่สุดในการอบแช่คือ 30 นาที อุณหภูมิการแช่ต้องสูงเพียงพอที่ทำให้คาร์ไบด์ละลายตัวเป็นอสเตนไนต์ทั้งหมดแต่ไม่สูงเกินจนทำให้ขนาดเกรนโตเป็นเหตุให้ความแกร่งของชิ้นงานลดลง

3.1.3 การทำความสะอาดผิว

การเลือกสารพ่นสำหรับการพ่นทำความสะอาดแบบแห้ง กระบวนการคัดเลือกสารพ่นอาจต้องพิจารณาจากชิ้นงานที่จะพ่นและวัสดุที่ใช้พ่นด้วยโดยคำนึงถึงขนาด รูปร่าง รายละเอียดพื้นผิวที่ต้องการหลังการพ่น และ กระบวนการต่าง ๆ ที่จะตามมาหลังจากการพ่นทำความสะอาดเสร็จแล้ว ทั้งนี้การตัดสินใจเลือกสารพ่นและวิธีการพ่นอย่างพิถีพิถันโดยคำนึงถึงปัจจัยที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว นับเป็นเกณฑ์ที่มีผลและนัยสำคัญต่อความสำเร็จของกระบวนการพ่นทำความสะอาดเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปแล้วพื้นผิว โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นผิวที่ประกอบด้วยเหล็ก จะทำปฏิกิริยาได้เร็วมากภายหลังจากทำการพ่นทำความสะอาด ฉะนั้นแล้วกระบวนการอื่น ๆ เช่น การชุบเคลือบต่าง ๆ ควรกระทำต่อทันทีหลังจากพ่นทำความสะอาดเสร็จ

ตามข้อมูลพื้นฐานของชิ้นทดสอบสามารถทำความสะอาดผิวโดยการพ่นทำความสะอาดหรือเรียกว่าการทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ (Shot Blasting) ด้วยเม็ดโลหะกลมขนาด 0.3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน 80 นาทีด้วยเครื่องยิงเม็ดโลหะ (Shot Blasting Machine) GROWELL รุ่น GW-10 โดยมีข้อมูลทางเทคนิคดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องขึงเม็ดโลหะ GROWELL รุ่น GW-10

Technical Specification	GW-10
Wheel projection capacity	40 kg / min.
Power of wheel turbine	2.2 kW 2 P
Apron dimension	dia. 500 x 600 mm.
Rubber belt drive	0.4 kW 4 P
Bucket elevator capacity	60 kg / min.
Power of bucket elevator	0.4 kW 4 P
Capacity of bag filter	600 m ³ / hr
Power of dust collector	0.75 kW 2 P
Loading weight capacity	60 kgs. (0.10 m ³)
Overall dimensions (W x D x H)	850 x 710 x 2460 mm.
Overall weight	850 kgs.

3.2 การชุบแข็งผิว

การชุบแข็งผิว (Surface hardening method) โดยวิธีทางความร้อนเคมี เป็นการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของผิวเหล็กที่อุณหภูมิสูง ความแข็งผิวอาจได้จากการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมทางเคมีที่ผิวโดยตรงโดยไม่ต้องชุบแข็งก็ได้ หรือบางกรรมวิธีต้องมีการชุบแข็งในภายหลัง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุผสมที่ได้จากสารเคมีนั้น ๆ ในการเติมธาตุผสมเพื่อให้ผิวมีความแข็งแรงขึ้นนั้นสามารถทำได้หลายสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม วิธีที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมคือแบบแก๊ส ซึ่งช่วยประหยัดเวลาในการชุบผิวแข็งได้

ชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สามารถนำมาชุบแข็งผิวได้ด้วยวิธีแก๊ส ประกอบด้วย ซอฟต์ไนไตรดิง (Soft-nitriding) คาร์บูไรซิง (Carburizing) คาร์บอนไนไตรดิง (Carbonitriding) และกระบวนการร่วม (Combined processes) ระหว่างซอฟต์ไนไตรดิงกับคาร์บูไรซิง ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงกระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

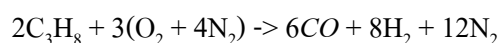
Condition	Gas Process	Temp (°C)	Time (min)	Atmosphere	Diffusion 0.8%C.P	Soaking 0.8%C.P	Oil Quenching
SN1	Soft-nitriding1	570	180	C:NH ₃ (10:10)m ³ /hr	-	-	100°C,30m
SN2	Soft-nitriding2	550	240	C:NH ₃ (6:15)m ³ /hr	-	-	100°C,30m
SN3	Soft-nitriding3	560	120	C:NH ₃ (12:15)m ³ /hr	-	-	100°C,30m
CB1	Carburizing1	930	150	C.P (1.2%)	930°C,1hr	870°C,30m	60°C,30m
CB2	Carburizing2	930	120	C.P (1.2%)	930°C,1hr	870°C,30m	60°C,30m
CB3	Carburizing3	930	150	C.P (1.2%)	930°C,1hr	850°C,30m	60°C,30m
CN1	Carbonitriding1	840	205	C.P-NH ₃ (1.1-1%)	-	-	70°C,30m
CN2	Carbonitriding2	890	180	C.P-NH ₃ (1-0.75%)	-	-	60°C,30m
CN3	Carbonitriding3	870	180	C.P-NH ₃ (1-0.75%)	-	-	60°C,30m
SN1CB1	Soft-Nitriding1+Carburizing1						
SN2CB2	Soft-Nitriding2+Carburizing2						
SN3CB3	Soft-Nitriding3+Carburizing3						

กระบวนการทดลองทั้งหมดอ้างอิงมาจากข้อมูลของบริษัทไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด ซึ่งมีทั้งหมด 12 กระบวนการ โดยที่

SN	คือ	Soft-nitriding
CB	คือ	Carburizing
CN	คือ	Carbonitriding
SNCB	คือ	Soft-nitriding + Carburizing

แก๊สที่ใช้เดิมเข้าไปเพื่อให้ได้ความแข็งแรงของผิวนั้นก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการ แต่โดยหลักแล้วมีธาตุอยู่ 2 ตัวที่มีความจำเป็น คือ คาร์บอน และ ไนโตรเจน

ธาตุคาร์บอนได้จากแก๊สโพรเพน (C₃H₈) ในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ก่อนนำไปใช้ในเตา โดยการทำปฏิกิริยาของโพรเพนกับอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ดังนี้



สำหรับธาตุไนโตรเจนซึ่งได้จากการใช้แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ในการทำปฏิกิริยาจะแตกตัวให้ไนโตรเจน (N) ในเตา

ตามตารางที่ 3.2 กระบวนการแก๊สซอพต์ไนโตรดิงจะใช้ทั้งคาร์บอนและแอมโมเนียในการเติมลงไปในตัวขึ้นทดสอบ กระบวนการแก๊สคาร์เบอร์โรซิง ใช้คาร์บอนอย่างเดียวเติมลงไปในตัวของขึ้นทดสอบ และกระบวนการแก๊สคาร์โบไนโตรดิง จะเหมือนกันกับกระบวนการแก๊สซอพต์ไนโตรดิงที่ใช้ทั้งคาร์บอนและแอมโมเนีย แต่จะแตกต่างกันที่สัดส่วนของการเติม

3.3 การตรวจดูโครงสร้างชั้นผิวขาวของกระบวนการแก๊สซอพต์ไนโตรดิง

การชุบแข็งผิววิธี แก๊สซอพต์ไนโตรดิง เป็นการอบชุบผิวขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ เติมธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนที่ผิวขึ้นทดสอบ เป็นที่ทราบกันดีว่า ผิวขึ้นทดสอบที่ได้จะเกิดโครงสร้างชั้นผิวขาว เป็นผลมาจากไนโตรเจนที่มาจากเตาโดยตรงบริเวณผิว

ในการตรวจดูเพื่อหาขนาดของชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้นซึ่งมีขนาดที่บาง การตรวจดูโครงสร้างชั้นผิวขาวของขึ้นทดสอบสามารถทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจดูโครงสร้างภายในเนื้อโลหะกลิ้งที่ใช้เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบ ออปติคอลล (Optical microscopes) โดยใช้กำลังขยาย 400 เท่า ขั้นตอนในการตรวจดูโครงสร้างมีดังนี้

3.3.1 การตัดขึ้นทดสอบโดยใช้เครื่องตัด (Cut off machine) ซึ่งเป็นเครื่องมาตรฐาน ในระหว่างการตัดขึ้นทดสอบ ต้องระวังไม่ให้ขึ้นทดสอบร้อนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบ

3.3.2 การขัดผิวขึ้นทดสอบ ขั้นตอนขัดผิวด้วยกระดาษทรายเมื่อตัดขึ้นทดสอบแล้วขัดผิวหน้าขึ้นทดสอบให้เรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่าง ๆ จากหยาบไปจนกระทั่งละเอียดคือเบอร์ 240, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างและวัดขนาดของชั้นผิวขาวเป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจดูโครงสร้างการเกิดชั้นผิวขาว

3.3.4 ถ่ายภาพขนาดของชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้น โดยใช้กำลังขยาย 400 เท่าของกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคอลล

3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขึ้นทดสอบ

3.4.1 การตรวจสอบปริมาณธาตุผสม

การชุบแข็งผิวด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ส่งผลให้ส่วนประกอบทางเคมี หรือธาตุผสมที่มีอยู่ในขึ้นทดสอบมีความเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการและ ธาตุผสมที่มีอยู่เดิมในขึ้นทดสอบ

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีสามารถตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Spectrometer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และหาปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็ง โดยจะใช้หลักการ Spark โดยเครื่องมือที่ใช้คือ Optical emission spectrometer

3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอะตอมและผลึก

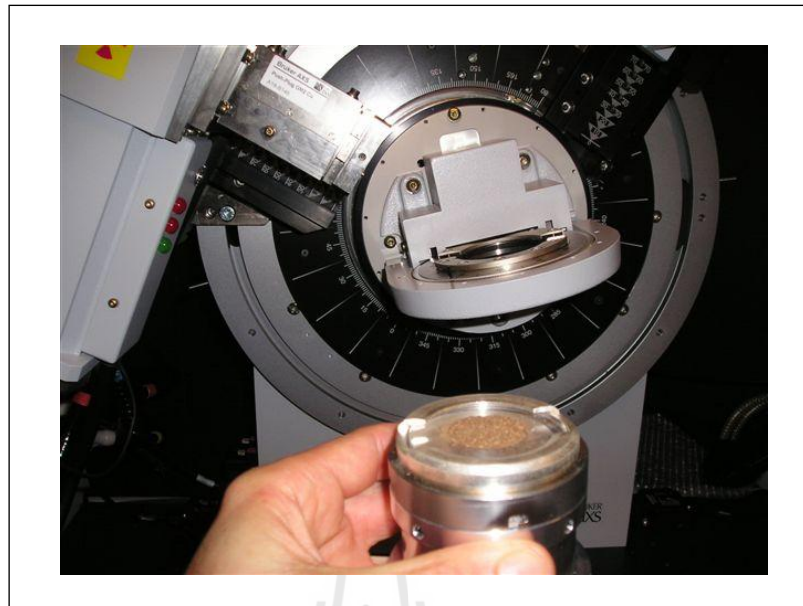
การจัดเรียงตัวของโครงสร้างนั้น จะมีการเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างผลึก (Crystal structure) และโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure) ทั้งสองส่วนจะแตกต่างกันที่ความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัว

ธาตุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนระบบผลึกหรือการจัดเรียงตัวได้เมื่อมีอุณหภูมิหรือความดันเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของผลึกมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ทั้งทางกายภาพและทางกล เมื่อ ระบบโครงสร้างเปลี่ยนแปลง ก็ย่อมส่งผลให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงด้วย

การตรวจสอบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างหรือสารประกอบนั้น สามารถทำได้โดยใช้เครื่อง XRD (X-ray diffraction) อาศัยคุณสมบัติการดิฟแฟรกชัน (Diffraction) ของรังสีเอ็กซ์ เมื่อวิ่งผ่าน โครงสร้างผลึก ทำให้ทราบรายละเอียดการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึก

ขั้นตอนการวิเคราะห์ขั้นทดสอบ

- 1) การเตรียมชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบบรรจุลงในถ้วยจับชิ้นงาน (Sample cup) ข้อควรระวังคือ ต้องวางผิวหน้าของด้านที่ต้องการทดสอบให้ได้ระนาบ
- 2) นำเข้าเครื่อง Diffractometer ในขั้นตอนนี้เราสามารถที่จะกำหนดเวลาในการตรวจวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบน จากนั้นจะได้ข้อมูลตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน
- 3) นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EVA จะเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานที่เก็บรวบรวมไว้แล้วสามารถจำแนกชนิดของสารประกอบนั้นได้



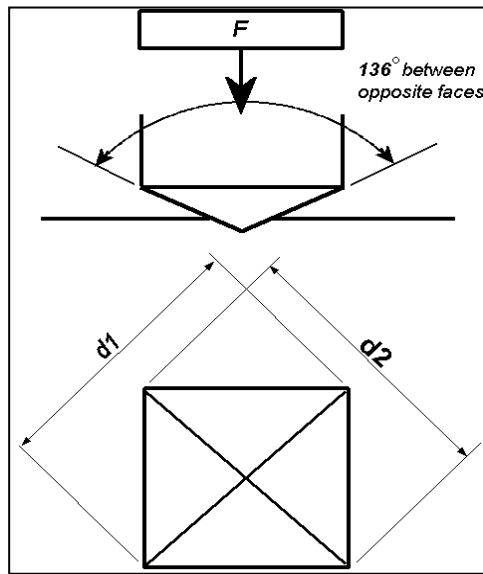
รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.5 การทดสอบความแข็งและการซึมลึก

ความแข็ง (Hardness) เป็นคุณสมบัติหนึ่งของผิววัสดุ หมายถึง ค่าความต้านทานในการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง หรือการเกิดรอยขีดขูด เสียหายบริเวณพื้นผิววัสดุ (ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และอนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล, ม.ป.ป., หน้า 144) การเพิ่มความแข็งให้กับผิวชิ้นงาน หรือการชุบแข็งผิวนั้น ความแข็งที่เพิ่มขึ้นจะเกิดเฉพาะบริเวณผิว ต่างจากเนื้อวัสดุภายใน ทั้งนี้เกิดจากการซึมลึก (Case depth) ของธาตุผสมที่เติมเข้าไปตามตารางที่ 3.2 ดังนั้นความแข็งที่เพิ่มขึ้น ย่อมบ่งชี้ถึงการซึมลึกของธาตุผสมด้วยเช่นกัน

การทดสอบความแข็งซึ่งทดสอบใช้เครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (Micro vickers hardness tester) ซึ่งเป็นเครื่องอัตโนมัติ คำนวณความแข็งให้อยู่ในรูปของตัวเลข การทำงานของเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส มีจุดเด่นคือ

- 1) หัวกดเพชรที่มีสัณฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส
- 2) แรงกระทำที่น้อย
- 3) หน่วยวัดความแข็งเป็น HV



รูปที่ 3.4 แสดงการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

จากรูปที่ 3.4 มุมของหัวกดเพชรมีค่าประมาณ 136° แรงที่ใช้ในการกดอยู่ที่ 0.1 กิโลกรัม แรงที่ใช้กด ควรค้างไว้ที่ขึ้นทดสอบประมาณ 30 วินาที พื้นผิวที่ทดสอบควรที่จะราบเรียบแบน สะอาด และเป็นแนวระนาบก่อนที่จะทำการทดสอบ

เนื่องจากขึ้นทดสอบได้ผ่านกระบวนการชุบผิวแข็ง ทำให้ความแข็งที่ผิวจากข้างนอกไปถึงข้างในมีค่าที่ไม่เท่ากัน การทดสอบความแข็งจึงต้องวัดความแข็งตั้งแต่ผิวจากบริเวณผิวนอกจนถึงข้างในเช่นกัน

ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดผ้าขึ้นทดสอบ
- 2) ขัดหน้าขึ้นทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 230, 400, 600, 800, และ 1000 โดยใช้เครื่องขัดที่มีน้ำไหลผ่าน
- 3) ทำความสะอาดผิวขึ้นทดสอบพร้อมทั้งเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง
- 4) นำชิ้นงานทดสอบมาวางบนตั้ง ใต้เครื่องกด
- 5) เปิดสวิสซ์ให้เครื่องให้เครื่องทำการกดขึ้นทดสอบ โดยหลักการทำงานของเครื่องคือ ให้หัวกดเพชรที่มีสัณฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ให้เคลื่อนหัวกดลงมาอย่างช้า ๆ จนไปสัมผัสกับขึ้นทดสอบ จากนั้นก็ค่อย ๆ เพิ่มแรงกดไปให้ถึง 0.1 กิโลกรัม นำหัวกดออกไป พบว่าชิ้นงานจะเกิดรอยบุ๋มเป็นรูปทรง พีระมิด (Pyramidal) ขนาดเล็ก

6) ทำการวัดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดโดยผู้ปฏิบัติงาน เครื่องวัดความแข็งจะทำการคำนวณค่าความแข็งจากความยาวเส้นทแยงมุมที่ผู้ปฏิบัติงานได้วัด โดยใช้สมการข้างล่างนี้นำมาคำนวณ

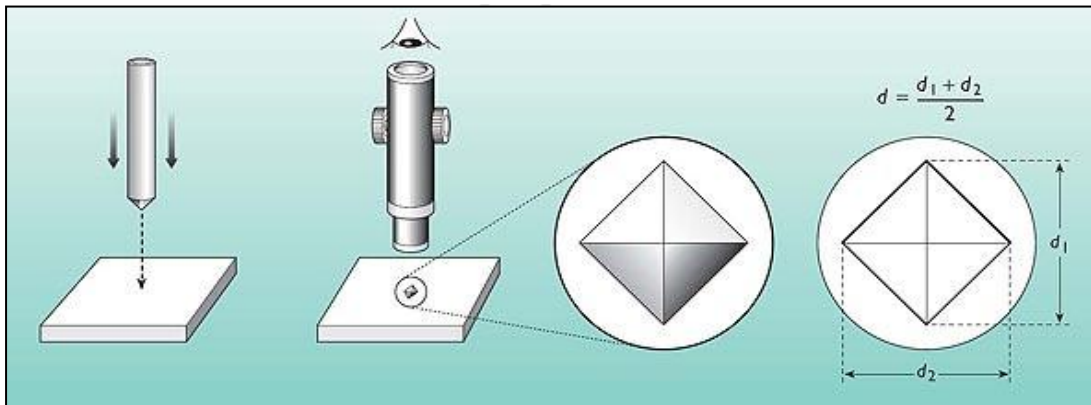
$$HV = 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

กำหนดให้

HV คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส หน่วยเป็น H_V

F คือ ค่าแรงที่ใช้กดใน หน่วยกิโลกรัม

d คือ ความยาวของแนวทแยงของรอยไว้ในหน่วยมิลลิเมตร

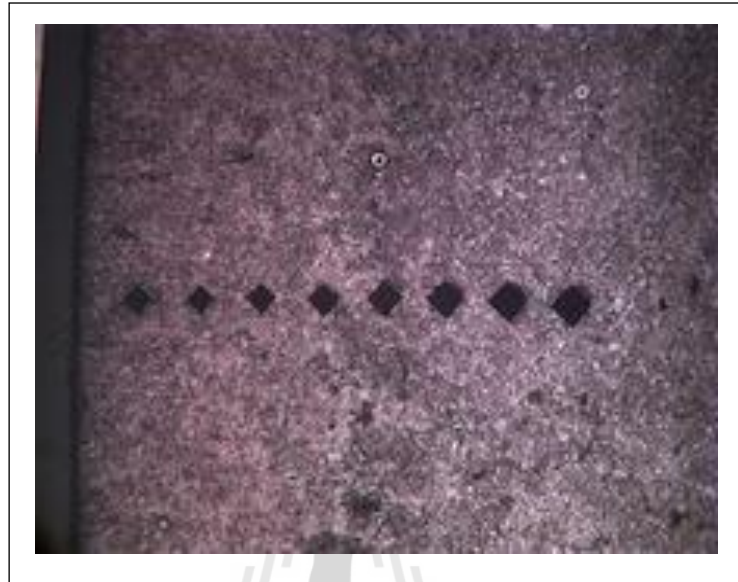


รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการกด และวัดรอยบ่มประมิต

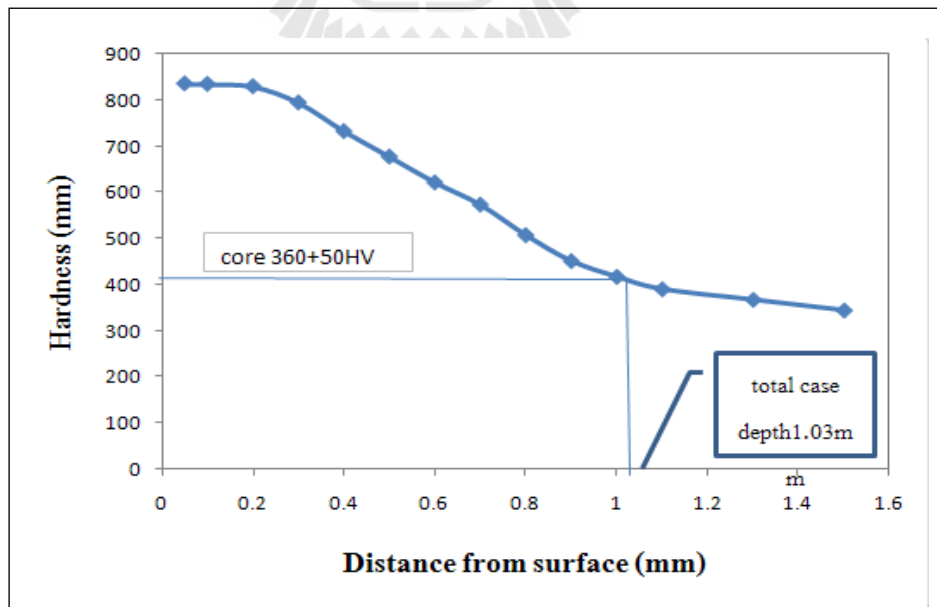
ค่าความลึกผิวแข็ง (Case depth) ปกติแล้วค่าความแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งผิว จะมีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณผิว และค่าความแข็งลดลงตามความลึกเข้าไปในชิ้นงาน ค่าความลึกผิวแข็ง เป็นค่าที่ทำให้ทราบถึงความสามารถในการซึมลึกของธาตุผสมที่ใส่เข้าไปในชิ้นงาน ในการวัดค่าดังกล่าวจะวัดจากค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมด (total case depth) คือระยะทางจากผิวถึงบริเวณหรือจุดแรกด้านในชิ้นงานที่มีค่าความแข็งเท่ากับค่าความแข็งของชิ้นงานด้านในหรือใจกลางชิ้นงาน (Core hardness)

ค่าความแข็งลึกทั้งหมด สามารถหาได้จากการนำค่าความแข็งที่ผิวชั้นทดสอบตามระยะของผิวด้านนอกเข้าไปถึงผิวด้านใน ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 หลักการคือ นำความแข็งที่กดวัดได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งจากผิวนอกสุดเข้าไปในเนื้อชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.7 โดย

ที่ ค่าความแข็งลึกทั้งหมด คือ ค่าความแข็งในใจกลางชิ้นงานบวกด้วย 50 H_v ตามมาตรฐาน
ภาคอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.6 แสดงรอยกดที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส



รูปที่ 3.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะการซึมลึก

3.6 การทดสอบการกัดกร่อน

การกัดกร่อน คือ การสูญเสียเนื้อโลหะ โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติของวัสดุทั่วไป เช่นเดียวกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เมื่อทำการอบชุบผิวแข็งในกระบวนการที่ต่างกันย่อมทำให้คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเปลี่ยนแปลงไป

การทดสอบการกัดกร่อนมีวัตถุประสงค์เพื่อมุ่งเน้นให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพและคุณสมบัติของวัสดุ ประเมินอายุการใช้งานและเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ได้

3.6.1 การทดสอบในกรดไฮโดรคลอริก

กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ โดยเป็นสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ในน้ำมีสูตรเคมีคือ HCl มีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

- 1) เตรียมชิ้นทดสอบโดยการวัดขนาดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
- 2) เตรียมขวดแก้วที่สะอาดสำหรับการแช่กรด
- 3) เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1.85 และ 5.55 เปอร์เซ็นต์ในน้ำ DI (Deionized water) โดยใช้ 100 มิลลิลิตร สำหรับ 1 ชิ้นทดสอบ
- 4) นำชิ้นทดสอบแช่ในสารละลายกรดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 5) แยกชิ้นงานออกจากสารละลายกรด นำชิ้นงานที่ได้ทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดแล้วนำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นก็นำชิ้นงานออกมาชั่งน้ำหนัก บันทึกผลในรูปของข้อมูลและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักต่อกระบวนการอบชุบผิวแข็งในแต่ละวิธีการ ซึ่งค่าที่ได้นั้น จะบ่งบอกถึงความต้านทานต่อการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบในสภาวะกรดดังกล่าวได้
- 6) นำสารละลายที่ได้ไปวัดหาค่าปริมาณเหล็กด้วยเครื่อง AAS เพื่อยืนยันผลจากการสูญเสียน้ำหนักข้างต้น

3.6.2 การทดสอบในโซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟ เป็นของแข็งลักษณะผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ระเหย ไม่ติดไฟ น้ำหนักของโมเลกุล 40.01 เป็นด่างแก่ จุดหลอมเหลว 318 องศาเซลเซียส ละลายน้ำได้ดีและเกิดความร้อนสูง และมีวันหรือตะอองสาร เมื่อถูกความชื้นจะเยิ้มได้ง่าย สารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมักอยู่ในรูปของแข็งเป็นเม็ด (pellets) มีขั้นตอนในการทดสอบคล้ายคลึงกับการทดสอบด้วยกรดไฮโดรคลอริกดังนี้

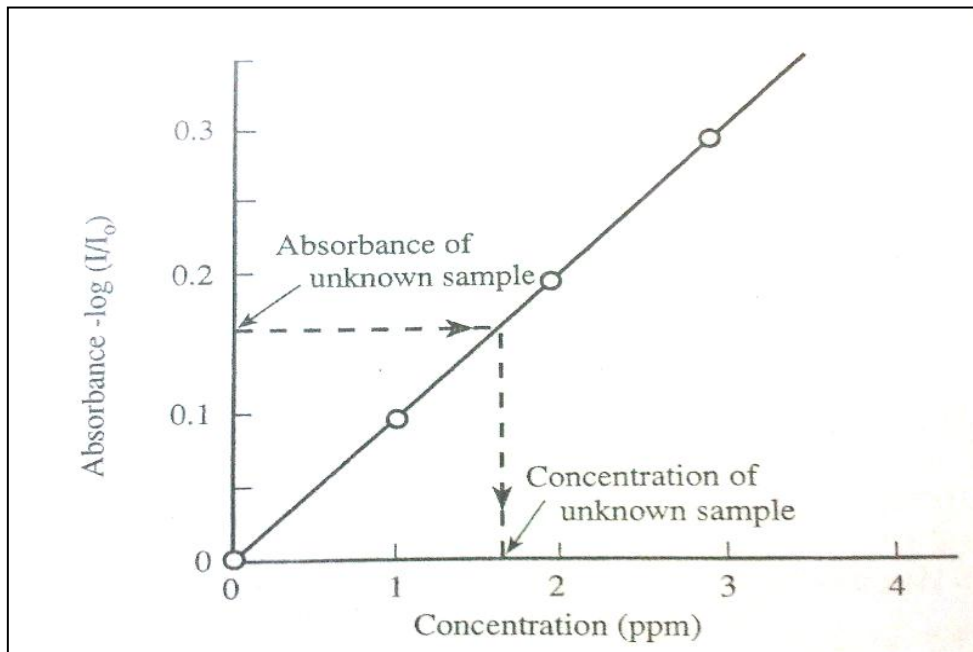
- 1) เตรียมชิ้นทดสอบโดยการวัดขนาดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
- 2) เตรียมขวดพลาสติกที่สะอาดสำหรับการแช่สารละลายเบส
- 3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ในน้ำ DI (Deionized water) โดยใช้ 100 มิลลิลิตร สำหรับ 1 ชิ้นทดสอบ
- 4) นำชิ้นทดสอบแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 วัน
- 5) แยกชิ้นงานออกจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำชิ้นงานที่ได้ทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดแล้วนำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้น เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นก็นำชิ้นงานออกมาชั่งน้ำหนัก บันทึกผลในรูปของข้อมูลและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลการสูญเสีย น้ำหนักต่อกระบวนการชุบผิวแข็งในแต่ละวิธีการเช่นเดียวกับการทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรด ซึ่งค่าที่ได้นั้น จะบ่งบอกถึงความต้านทานต่อการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบในสภาวะเบสดังกล่าวได้

3.6.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กในสารละลายด้วย

ในอะตอมิกสเปกโตรสโกปีแบบดูดกลืนแสง (Atomic absorption spectroscopy) หรือ AAS ธาตุที่จะถูกวิเคราะห์จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะอะตอมอิสระในเครื่องสร้างอะตอม (อะตอมไมเซชัน ; atomization) โดยพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไป อะตอมเหล่านี้จะสามารถดูดกลืนรังสีเฉพาะของธาตุได้ เพื่อให้ได้ตามนี้ หลอดรังสีเฉพาะของธาตุพร้อมขั้วบวกที่มีลักษณะกลวงที่ทำจากธาตุที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกนำเข้าไปในแนวรังสีของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์นี้ พร้อมเครื่องอะตอมไมเซชัน และเครื่องตรวจจับ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่จะตรวจหาในสารตัวอย่าง ความเข้มของรังสีบางชนิดของหลอดขั้วบวกแบบกลวงจะถูกดูดกลืนไปโดยอะตอมที่ถูกสร้างขึ้นเหล่านี้ ด้วยขั้วสัญญาณสองชุดจะวัดความเข้มของรังสีเริ่มต้นและรังสีหลังจากผ่านออกจากระบบสร้างอะตอมระหว่างการใส่สารละลายสารตัวอย่าง ความเข้มข้นของธาตุในสารตัวอย่างจะคำนวณได้จากความแตกต่างของความเข้มแสง

1) Calibration method

วิเคราะห์โดยเทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ทำโดยปรับ Signal ที่ได้จาก Blank ให้เป็นศูนย์ แล้ววัดค่า Absorbance ของสารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ 4-5 ความเข้มข้นนำผลมาสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นกับค่า Absorbance จะได้ Calibration curve ทั้งนี้ในการเตรียมนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณสารที่ต้องการตรวจ ควรเตรียมให้มีมวลคลอบคลุมปริมาณสารที่ต้องการตรวจ



รูปที่ 3.8 แสดง Calibration curve

ข้อพึงระวังคือ Calibration curve ที่ได้ ใช้ได้เฉพาะการวิเคราะห์สารแต่ละครั้งเท่านั้น เมื่อจะวิเคราะห์ใหม่ก็ต้องทำใหม่ เนื่องจาก Parameters ต่าง ๆ ที่ใช้อาจมีการเปลี่ยนแปลง

2) การเตรียมตัวอย่าง

เนื่องจากเครื่องมือมีข้อจำกัดในการทำงาน การทนต่อสภาพความเป็นกรด จากกระบวนการการกัดกร่อนที่ใช้ HCl ความเข้มข้นที่ 1.85 และ 5.55 เปอร์เซ็นต์นั้นย่อมส่งผลต่อสภาพการใช้งานของเครื่อง AAS ดังนั้น จึงทำการเจือจางสารละลายกรด HCl ลง 200 เท่าเพื่อให้สามารถใช้เครื่องตรวจได้ มีขั้นตอนการเตรียมคือ ดูดสารละลายกรด HCl ที่ได้ทำการกัดกร่อนขึ้นทดสอบแล้ว ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ผสมลงในน้ำ DI ให้ได้ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เช่นเดียวกันทุกตัวอย่าง ทั้งนี้เมื่อนำไปทดสอบตรวจวัด ต้องเตรียม Blank ของ DI เพื่อยืนยันค่าของการทดสอบ

3) การใช้เครื่องมือ

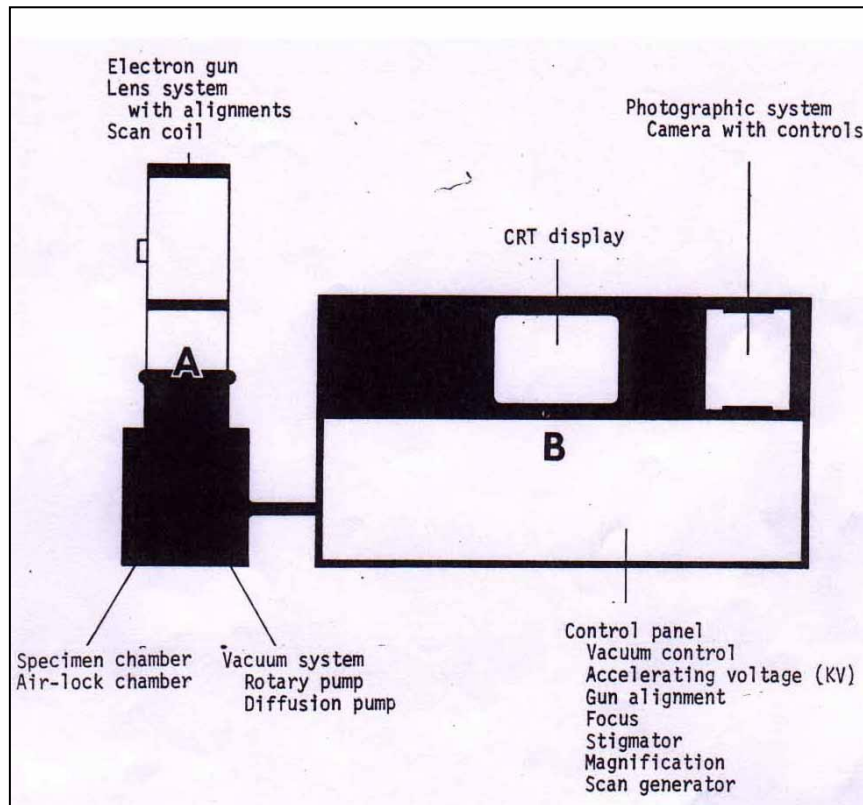
- เปิดถังแก๊สและปั๊มอัดอากาศ ตรวจสอบความดัน รอยรั่ว และความผิดปกติต่างๆของแก๊สและ Burner
- เปิดเครื่อง AAS ปรับตำแหน่งของหลอดที่ต้องการตรวจและตำแหน่ง Burner พร้อมทั้งเปิด Program วิเคราะห์ (AA winlab analysis)
- ตั้งค่าความยาวคลื่นที่ต้องการใช้ ดูจาก Energy meter

- จุดไฟ ปรับความดันแก๊สอีกครั้ง และปรับอัตราการไหลที่เหมาะสม (Normal flame, Reduced flame, Oxidized flame)
- ทดสอบ Sensitivity ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์
- ปรับตำแหน่ง Burner และ Nebulizer อีกครั้ง
- นำ Blank และ สารละลายมาตรฐานมาอ่านค่าหาค่า Absorbance เพื่อสร้าง Calibration curve
- อ่านค่า Absorbance ของสารตัวอย่าง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้ทราบถึง ปริมาณเหล็กที่ละลายอยู่ในสารละลายด้วย

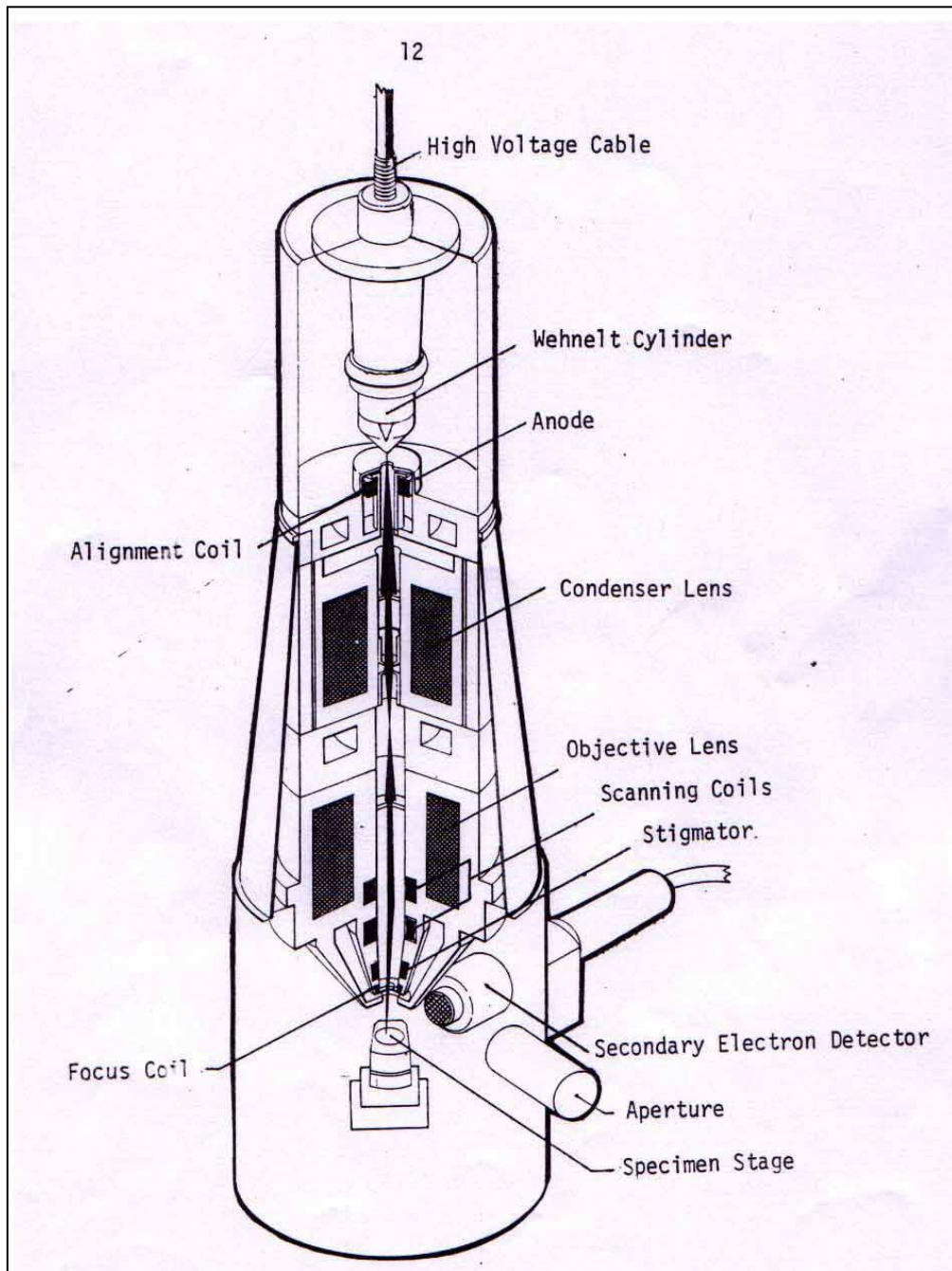
3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscopy) หรือ SEM เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายตาประเภท กล้องจุลทรรศน์ ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกราด ไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็น ได้ด้วยตาเปล่า

SEM ทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน โครงสร้างง่าย ๆ ที่เห็นได้ชัดเจนได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ (รูปที่ 3.9) คือส่วนที่มีลักษณะคล้ายปล่องภายในกลวงเรียกว่า Colum และส่วนที่เป็นตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดเรียกว่า Consoleunit ทั้ง 2 ส่วนนี้สามารถเห็นได้ชัดเพราะเป็นลักษณะภายนอกทั่วไปของ SEM จะขาดอย่างใดอย่างหนึ่งเสียมิได้ เพราะ Colum ยังประกอบด้วย ส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างที่วางอยู่ภายในช่องตัวอย่างซึ่งอยู่บริเวณฐานของ Colum อุปกรณ์ซึ่งรับสัญญาณที่เกิดขึ้นภายหลังอิเล็กตรอนกระทบตัวอย่างถูก จัดวางไว้อย่างเหมาะสมในบริเวณนี้เช่นกันส่วนภายใน Consoleunit ซึ่งแผงควบคุมระบบควบคุมไฟฟ้าระบบสุญญากาศ และระบบถ่ายภาพนั้นประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบเช่นการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายใน Colum จำเป็นต้องใช้ ปุ่มบังคับที่อยู่บนแผงควบคุมของ Consoleunit นอกเหนือจาก Colum และ Consoleunit ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็น สำหรับยิง SEM



รูปที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งระบบภายใน column (A) และ console unit (B) ของ SEM



รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ

ส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM ซึ่งควรจะทราบถึงหลักการและเหตุผลพร้อมคำอธิบายตามความจำเป็นมีดังนี้ (รูปที่ 3.9 และ 3.10)

- 1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electrongun) อยู่ด้านปลายบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลง

2) เลนส์ที่ใช้ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (Electronmagniclens and scancoils)

3) ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimenchamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวาง

4) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector and scintillator) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุ + ขนาด 30-250 โวลต์เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยา ระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5) อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging and photographicdevices) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและ

รูปที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอน ให้เป็นแสงไฟฟ้าการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภท ท่อนำแสงในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (Photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด Photons นี้ไป อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณ ไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ (CRT) ที่ติดตั้งไว้บน Consoleunit

3.6.1 การปรับลำอิเล็กตรอน

เมื่อต้องการจะใช้กล้อง SEM ก่อนอื่นเราจะต้องทำการ Alignment กล้องเป็นอันดับแรก ซึ่งการ Alignment นี้คือ การปรับแต่งสถานะต่างๆ ของกล้องให้อยู่ในระดับที่ใช้การได้และเหมาะสมกับลักษณะงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และลักษณะของตัวอย่าง ในการ Alignment นี้เราจะใช้ตัวอย่างที่เราทราบลักษณะขนาดและรูปร่างที่แน่นอน เช่น ZnO_2 ซึ่งจะมีขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร ซึ่งมีขั้นตอนการปฏิบัติดังนี้

1) นำ ZnO_2 ติดบนแท่นของตัวอย่าง (Stub) แล้วนำไปวางบน Specimen holder สอดตัวอย่างเข้าไปในเครื่องโดยใช้ก้านส่งตัวอย่าง (Specimen exchanger rod)

2) เมื่อนำตัวอย่าง ZnO_2 เข้าไปในส่วนของ Specimen exchange chamber ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อกับภายนอกและดูดอากาศออกแล้วจึง นำตัวอย่างเข้าไปในบริเวณ Specimen chamber

3) สอดตัวอย่างเข้าไปใน Specimen chamber วางบน Specimen stage หลังจากนั้น กำหนดค่าศักดาไฟฟ้า (15 kV-20 kV) แล้วเปิด Accel voltage แล้วไปอัสกระแสที่ Filament

4) เมื่อ Filament ร้อนขึ้น เราจะพบสัญญาณของอิเล็กตรอน โดยใช้ Mode wave form ถ้าไม่พบเราจะต้องทำการปรับ Gun alignment ทั้งในทิศทาง X และ Y จนพบสัญญาณของอิเล็กตรอน

5) เมื่อพบสัญญาณของลำอิเล็กตรอนแล้วจึงเพิ่มกระแสไบอัสของ Filament เราจะพบจังหวะการเพิ่มขึ้นของสัญญาณสองจังหวะ ซึ่งจังหวะแรกเรียก First peak และจังหวะที่สองเรียก Second peak

จาก Second peak นี้ เมื่อเราเพิ่มกระแส Filament ไปจนสุด (หมุนตามเข็มนาฬิกา) เราจะพบว่าระดับ Waveform ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตรงบริเวณจุดเริ่มต้นของ Second peak (ประมาณ ที่ 12.30 นาฬิกา) และหมุนปุ่ม Gun alignment ทั้งซ้ายและขวาในแนว X-Y จนได้ระดับ Waveform สูงสุด จะเป็นจุดใช้งานสำหรับกระแสไบอัส ซึ่ง ณ จุดนี้อายุของ Filament จะยาว (ไม่น้อยกว่า 30 ชั่วโมง) แต่ถ้าใช้ กระแส Filament เพิ่มขึ้นอีก ความสว่างของภาพจะลดลงทำให้กำลังในการแจกแจงลดลง

6) เมื่อเราพบสัญญาณของสัญญาณอิเล็กตรอนแล้วนำภาพ Second electron image (SEI) ขึ้นบนจอ จากนั้นเรากดปุ่ม Wobbler (ปุ่มที่ 10) เพื่อทดสอบว่า ลำอิเล็กตรอนผ่านบริเวณตรงกลางของ Objective apertureหรือไม่ ซึ่งถ้าลำอิเล็กตรอนไม่ผ่านบริเวณตรงกลางของ Objective aperture ความสว่างของภาพจะลดลง โดยเราสังเกตว่า เมื่อกดปุ่ม Wobbler แล้วลักษณะของภาพจะหมุนลักษณะการหมุน จะต้องหมุนแล้วภาพไม่ส่าย ถ้าส่ายนั้นหมายถึงลำอิเล็กตรอนไม่ผ่านบริเวณตรงกลางของ Objective aperture ซึ่งเราแก้ไขโดยการหมุน ที่ aperture centering knob (X/Y) จนภาพไม่ส่ายมีลักษณะ zoom เข้าออกเท่านั้น

7) หลังจากนั้นให้ Off ปุ่ม Wobbler แล้วสังเกตว่าลักษณะของภาพสมมาตรหรือไม่ถ้าภาพมีลักษณะบิดเบือนไปทางซ้ายหรือขวา ให้เราปรับที่ปุ่ม Stigmator เพื่อแก้การบิดเบือนของภาพ เราสามารถแก้ได้ทั้งทางทิศซ้ายและขวา หลังจากแก้แล้วก็กลับไปโฟกัสภาพอีกครั้งถ้าภาพยังไม่ชัดเจนให้ลองลดขนาด Spot size เพื่อจะให้ภาพคมชัดแล้วลองโฟกัสดูอีกที่ถ้าภาพยังไม่ชัดเจนให้ลองทำตามข้อ 6-7 สลับไปมาจนกว่าจะได้รูปที่ชัดเจน

3.6.2 เทคนิคการปรับภาพให้มีคุณภาพ

เมื่อเราทำการปรับลำแสงอิเล็กตรอนและแก้ความบิดเบือน (Stigmator) แล้วเราก็สามารถใช้งานได้ซึ่งก่อนที่เราจะบันทึกภาพเราจะต้องปรับโฟกัส ภาพและปรับ Contrasts และ Brightness ให้เหมาะสมก่อนซึ่งจะมีขั้นตอนต่อไปนี้

1) เลือกภาพหรือบริเวณที่สนใจที่ต้องการบันทึกภาพในขนาดกำลังขยายที่เหมาะสมแล้วสังเกตว่าลักษณะของภาพนั้นมีความชัดเจน หรือไม่ถ้าไม่ชัดเจนให้ปรับโฟกัสโดยการให้ทดลองหมุนไปในทิศทางวนเข็มนาฬิกาแล้วจึงสังเกตว่าภาพชัดเจนหรือไม่ถ้าไม่ให้หมุนไปใน

ทิศตรงกันข้ามจนได้รูปที่ชัดเจน แต่โดยทั่วไปการปรับโฟกัสเราจะต้องปรับในกำลังขยายที่สูงกว่า กำลังขยายที่ต้องการบันทึกภาพถ้าในกรณี ที่กล้องปกติ เมื่อเราปรับโฟกัสในกำลังขยายที่สูงแล้วมา บันทึกภาพในกำลังขยายที่ต่ำกว่าโฟกัสจะต้องไม่เปลี่ยน ในกรณีที่ลักษณะภาพมีลักษณะความสูงต่ำไม่เท่ากันในพื้นที่ที่เราสนใจทำให้เราไม่สามารถโฟกัสให้ชัดเจนทั้งพื้นที่กล่าวคือ ถ้าเราโฟกัส ในบริเวณที่สูงกว่าในบริเวณที่สูงกว่าก็จะมีลักษณะเป็น Overfocused ถ้าเราโฟกัสในบริเวณที่สูงกว่าในบริเวณที่ต่ำกว่าจะมีลักษณะเป็น Underfocused ซึ่งปัญหานี้เราสามารถแก้ไขได้โดยใช้ วิธี Dynamic focus correction ซึ่งเราจะได้รูปที่มีความชัดเจน ทั้งบริเวณที่สูงและต่ำทั้งนี้ภาพนั้นจะ มีความชัดเจนมากขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ ประกอบกับเช่นระยะของพื้นผิวของตัวอย่างกับ ออฟเฟกทีฟเลนส์ (Working distance) ขนาดของ Spot Size ไฟฟ้าที่ใช้แรงอิเล็กทรอนิกส์ความสมดุล ของ contrast และ Brightness เป็นต้น

2) เมื่อเลือกบริเวณที่ต้องการและปรับโฟกัสเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะบันทึกภาพ จะต้องปรับ Contrast และ Brightness ให้สมดุลกัน โดยใช้ Waveform monitoring จะมีอยู่ 6 ระดับ ตั้งแต่ 0 V ถึง 5 V contrast และ Brightness ของภาพกำหนดด้วยระดับความสูง (Amplitude) และ ระดับฐาน (Basic line) ของกราฟ ถ้าฐานของกราฟอยู่ในระดับที่สูงภาพจะมีความสว่างมากแต่ ถ้า ความสูงของกราฟมากภาพก็จะมี Contrast สูง ค่าที่เหมาะสมสำหรับเครื่อง 6400 คือ ฐานของ กราฟอยู่ในบริเวณระดับที่ 2 (1V) และความสูงของกราฟไม่เกินระดับที่ 5 (4V)

3) เมื่อปรับ Contrast และ Brightness ให้สมดุลกันแล้ว ในขั้นต่อไปเราก็จะทำการ บันทึกภาพซึ่งการบันทึกภาพเราจะต้องเลือก ความเร็วในการบันทึกภาพให้เหมาะสมคือถ้าเราใช้ กำลังขยายสูงความเร็วในการบันทึกก็ต้องช้า เพื่อจะได้ความละเอียดของภาพสูงขึ้น (สำหรับ เครื่อง 6400 เราเลือกใช้ตั้งแต่ 40-120 วินาที ต่อ 1 ภาพ) และนอกจากนั้นการล้างและอัดภาพก็ยัง เป็นปัจจัยที่สำคัญในการที่จะ ได้รูปที่ชัดคมเช่นถ้าใช้เวลาในการล้างไม่สอดคล้องกับฟิล์มหรือกับ หน้ากล้องที่ใช้ในการบันทึกภาพก็จะทำให้ความสว่างของรูปที่ บันทึกนั้นเปลี่ยนไปขั้นตอนในการ อัดภาพก็เช่นกัน ถ้าเราเลือกกระดาษหรือเวลาในการอัดไม่เหมาะสมกับความสว่างของฟิล์มเราก็จะ ได้รูปที่ไม่ชัดคมเท่าที่ควร

บทที่ 4

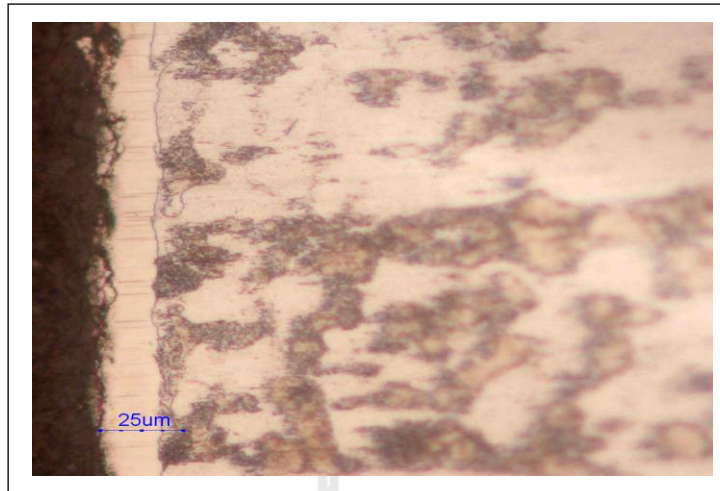
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากผลการดำเนินงานในการศึกษาผลการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการ แก๊สซอพท์ไนไตรดิง แก๊สคาร์เบอร์ไรซิง แก๊สคาร์โบไนไตรดิง และกระบวนการผสมระหว่าง แก๊สซอพท์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างการชุบแข็งผิวต่อคุณสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี การทดสอบความแข็ง ความต้านทานการกัดกร่อนและ สภาพทางสัณฐานวิทยา เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ดังนั้นจึงทำการศึกษาและวิจัยในเรื่องดังกล่าว ซึ่งผลในการดำเนินงานมีดังนี้

- 4.1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว
- 4.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
- 4.3 ผลที่ได้จากการทดสอบ XRD
- 4.4 ผลที่ได้จากการทดสอบความแข็ง
- 4.5 ผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน
- 4.6 ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา

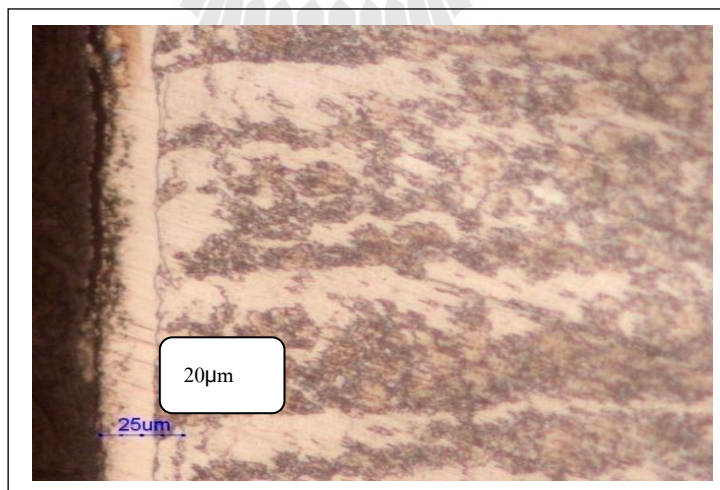
4.1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว

โครงสร้างชั้นผิวขาว (White layer) สามารถเกิดขึ้นได้เฉพาะกับการชุบแข็งผิวชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 จากกระบวนการแก๊สซอพท์ไนไตรดิง โดยที่ใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งผิวชั้นทดสอบที่ต่ำทำให้สามารถเกิดโครงสร้างชั้นผิวขาวได้ซึ่งเป็นสารประกอบไนโตรเจน สำหรับการชุบแข็งผิวชั้นทดสอบจากวิธีอื่น ๆ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งผิวสูงไม่ทำให้เกิดโครงสร้างชั้นผิวขาวดังกล่าว ผลของการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการซอพท์ไนไตรดิงแสดงได้ดังรูปที่ 4.1-4.3 ดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่ผ่านกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง 1

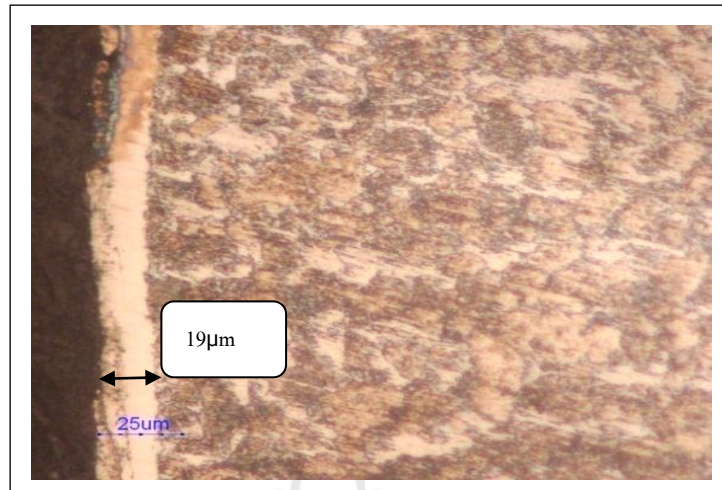
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่เกิดกับชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง ที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที โดยการเติมธาตุ คาร์บอนและไนโตรเจน จากรูปที่ 4.1 เป็นภาพกำลังขยาย 400 เท่า และพบว่า ขนาดของชั้นผิวขาวสามารถวัดค่าได้ 23 μm



รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่ผ่านกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง 2

รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่เกิดกับชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง ที่อุณหภูมิ 550 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 240 นาที โดยการเติมธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน จากรูปที่ 4.2 เป็นภาพกำลังขยาย 400 เท่า และพบว่าขนาดของชั้นผิวขาวสามารถวัดค่าได้ 20 μm



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่ผ่านกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง 3

รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคชั้นผิวขาวที่เกิดกับชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง ที่อุณหภูมิ 560 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 120 นาที โดยการเติมธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน จากรูปที่ 4.3 เป็นภาพกำลังขยาย 400 เท่า และพบว่าขนาดของชั้นผิวขาวสามารถวัดค่าได้ 19 μm

จากการชุบแข็งผิวด้วยวิธี แก๊สซอพต์ไนไตรดิง ทำให้เกิดโครงสร้างชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้น มีสภาพเป็นสารประกอบของไนไตรด์เฟส ในขณะที่อะตอมไนโตรเจนแทรกซึมเข้าไปในเหล็กจำนวนเล็กน้อยของอะตอมคาร์บอนแทรกซึมเช่นกันในรูปแบบคาร์ไบด์ขนาดเล็กมาก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับไนไตรดิง คาร์บอนสามารถแทรกซึมได้ทั้งเหล็กและไนโตรเจน อีกทั้งยังปกคลุมที่ผิวนอกสุดด้วย การชุบแข็งผิวโดยมีอุณหภูมิต่ำและเวลาดำเนินการสั้นส่งผลให้มีการเปลี่ยนรูปของเหล็กเพียงเล็กน้อย ความเปราะอาจลดลงได้ กระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง 1 มีขนาดชั้นผิวขาวมากที่สุดที่ 23 μm และเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง 2 และ 3 ซึ่งมีขนาด 20 และ 19 μm แล้วพบว่า การเกิดขนาดชั้นผิวขาวนั้นอาจเกิดมาจากตัวแปร 3 ตัว คือ อุณหภูมิ เวลา และปริมาณคาร์บอนที่เติมลงไปในการชุบแข็ง จากตัวแปรทั้ง 3 ตัวนั้น ปริมาณคาร์บอนที่เติมลงไปมีส่วนช่วยทำให้เกิดชั้นผิวขาวได้ โดยอาจเป็นตัวกลางในการยึดเกาะของโครงสร้าง แต่ทั้งนี้ความสำคัญที่อาจทำให้เกิดชั้นผิวขาวได้มากที่สุดคืออุณหภูมิและเวลา

4.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

4.2.1 ผลของการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งผิว

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020(%wt, Balance Fe)

AISI	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Al	Cu
1020	0.2040	0.7756	0.2348	0.0113	0.0195	0.0056	0.0152	0.0078	0.0011

จากตารางที่ 4.1 พบว่าธาตุคาร์บอนที่เป็นธาตุหลักมีค่า 0.2040 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด AISI 1020 ที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.18-0.23 เปอร์เซ็นต์

4.2.2 ผลของการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส (%wt, Balance Fe)

Process	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Al	Cu
SN1	3.2779	0.7269	0.2384	0.0145	0.0004	0.0055	0.0563	0.0152	0.0097
SN2	2.1493	0.7543	0.2526	0.0364	0.0029	0.0048	0.0578	0.0165	0.0089
SN3	1.8395	0.8362	0.2506	0.0271	0.0047	0.0038	0.0230	0.0082	0.0019
CB1	0.7777	0.7440	0.2521	0.0088	0.0170	0.0048	0.0189	0.0065	0.0017
CB2	0.7537	0.7297	0.2583	0.0094	0.0168	0.0059	0.0190	0.0075	0.0026
CB3	0.7698	0.6940	0.2430	0.0111	0.0172	0.0058	0.0186	0.0063	0.0032
CN1	0.8810	0.7619	0.2451	0.0104	0.0166	0.0048	0.0196	0.0071	0.0013
CN2	0.7111	0.6826	0.2391	0.0223	0.0104	0.0067	0.0553	0.0140	0.0116
CN3	0.8416	0.6623	0.2389	0.0056	0.0091	0.0064	0.0533	0.0145	0.0113
SN1CB1	0.8294	0.7526	0.2657	0.0033	0.0109	0.0071	0.0591	0.0130	0.0110
SN2CB2	0.7808	0.7762	0.2606	0.0066	0.0172	0.0106	0.0302	0.0072	0.0031
SN3CB3	0.8402	0.9872	0.3497	0.0126	0.0079	0.0069	0.0802	0.0176	0.0118

จากตารางที่ 4.2 พบว่าธาตุคาร์บอนมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส เปรียบเทียบกับตารางที่ 4.1 โดยเฉพาะการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สซอพต์ไนไตรดิง ทั้ง 3 กระบวนการมีค่าค่อนข้างที่จะสูงกว่ากระบวนการอื่น ๆ อาจเนื่องมาจากการปกคลุมของคาร์บอนที่ผิว เป็นผลมาจากการใช้เวลาและปริมาณธาตุที่เติมลงไปในการอบชุบผิว รวมถึงอุณหภูมิในการอบชุบผิวที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการทำปฏิกิริยา ในการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง 1 ใช้เวลาในการอบชุบที่น้อย ทำให้เกิดการปกคลุมที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ ในกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง ตรงกันข้ามกับกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง 2 ที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานที่สุด แต่เกิดการปกคลุมของคาร์บอนต่ำกว่ากระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง 1 อาจเนื่องมาจากการเติมคาร์บอนที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ในแต่ละกระบวนการมีความแตกต่างกันทำให้เกิดผลที่แตกต่างกันด้วย

สำหรับกระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง แก๊สคาร์โบไนไตรดิงและกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงนั้น มีค่าการเพิ่มของธาตุคาร์บอนที่ใกล้เคียงกัน เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.8 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากการควบคุมในการปล่อยธาตุคาร์บอนให้อยู่ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ทั้ง 3 วิธีการ ถึงแม้ในช่วงแรกของการกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง ควบคุมให้มีธาตุคาร์บอนอยู่ที่ 1.2 เปอร์เซ็นต์ แต่ในช่วงหลังก็มีการควบคุมให้มีค่าของธาตุคาร์บอนอยู่ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ เช่นกัน ดังนั้น ในการตรวจวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนที่บริเวณผิวจึงมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.8 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับการควบคุมค่าในกระบวนการ

ในส่วน of ธาตุตัวอื่น ๆ ที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบหลังจากผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สแบบวิธีต่าง ๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าการวิเคราะห์ธาตุของชิ้นทดสอบที่ยังไม่ได้ผ่านการชุบแข็งผิว เป็นผลมาจากการเติมธาตุลงไปในการอบชุบ กล่าวคือ ในทุกกระบวนการนั้นจะเติมแค่ธาตุ คาร์บอนและไนโตรเจน ดังนั้นธาตุตัวอื่น ๆ จึงมีค่าที่เท่าเดิมหรือใกล้เคียงกับค่าเดิมที่ยังไม่ได้ผ่านการชุบแข็งผิว

4.3 ผลที่ได้จากการทดสอบ XRD

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ XRD ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งผิว

รูปที่ 4.4 แสดงผล XRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งผิว จากรูป พบว่าโครงสร้างเป็นเหล็กแอลฟา(α) หรือเหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอนซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมีระบบผลึกเป็น bcc (Body Centered Cubic)

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ XRD ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพลีไนไตรดิง

รูปที่ 4.5 แสดงผล XRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพลีไนไตรดิงประกอบด้วย SN1 SN2 และ SN3 จากรูป พบว่าทั้งสามกระบวนการมีโครงสร้างที่คล้ายกันคือ ปรากฏโครงสร้างผิว $\alpha(\text{Fe})$ $\gamma'(\text{Fe}_4\text{N})$ และ $\epsilon(\text{Fe}_{2.3}\text{N})$

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ XRD ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง

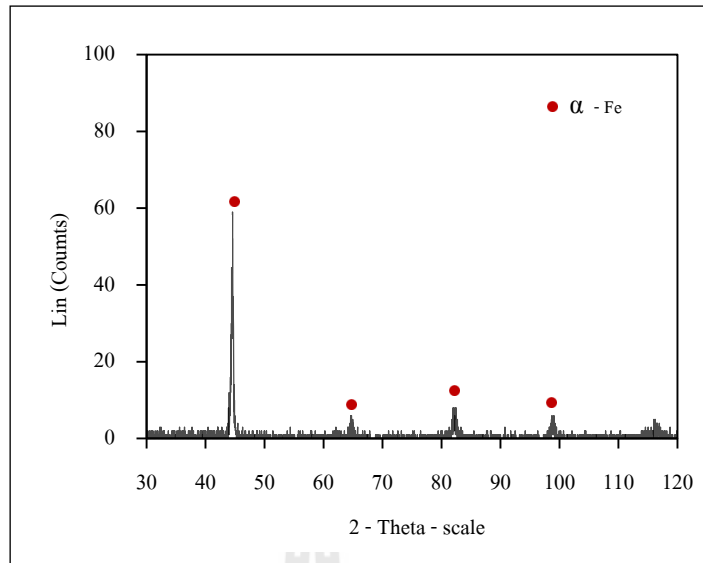
รูปที่ 4.6 แสดงผล XRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงประกอบด้วย CB1 CB2 และ CB3 จากรูป พบว่าทั้งสามกระบวนการมีโครงสร้างที่คล้ายกันคือ ปรากฏโครงสร้างผิวมาร์เทนไซต์ ($\text{Fe} + \text{C}$) ซิเมนไตต์ (Fe_3C) และ Fe_5C_2 ซึ่งโครงสร้างที่มีคาร์บอนนั้นเป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดความแข็งเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นทดสอบ

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ XRD ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

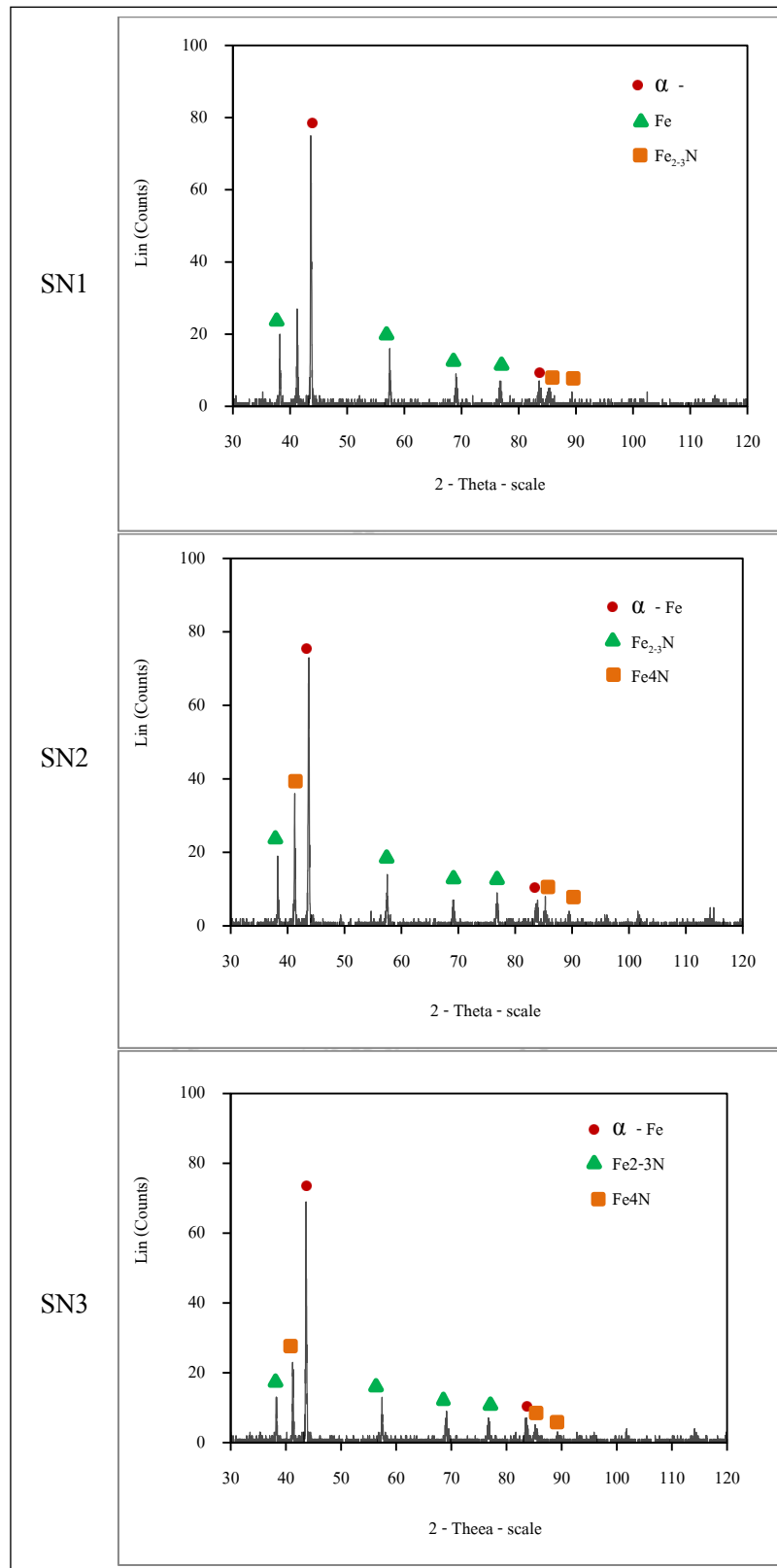
รูปที่ 4.7 แสดงผล XRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิงประกอบด้วย CN1 CN2 และ CN3 จากรูป พบว่าทั้งสามกระบวนการมีโครงสร้างที่คล้ายกันคือ ปรากฏโครงสร้างผิว $\alpha(\text{Fe})$ มาร์เทนไซต์ ($\text{Fe} + \text{C}$) ซิเมนไตต์ (Fe_3C) และ Fe_5C_2 ซึ่งโครงสร้างที่มีคาร์บอนนั้นเป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดความแข็งเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวของชิ้นทดสอบ

4.3.5 ผลการวิเคราะห์ XRD ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพลีไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง

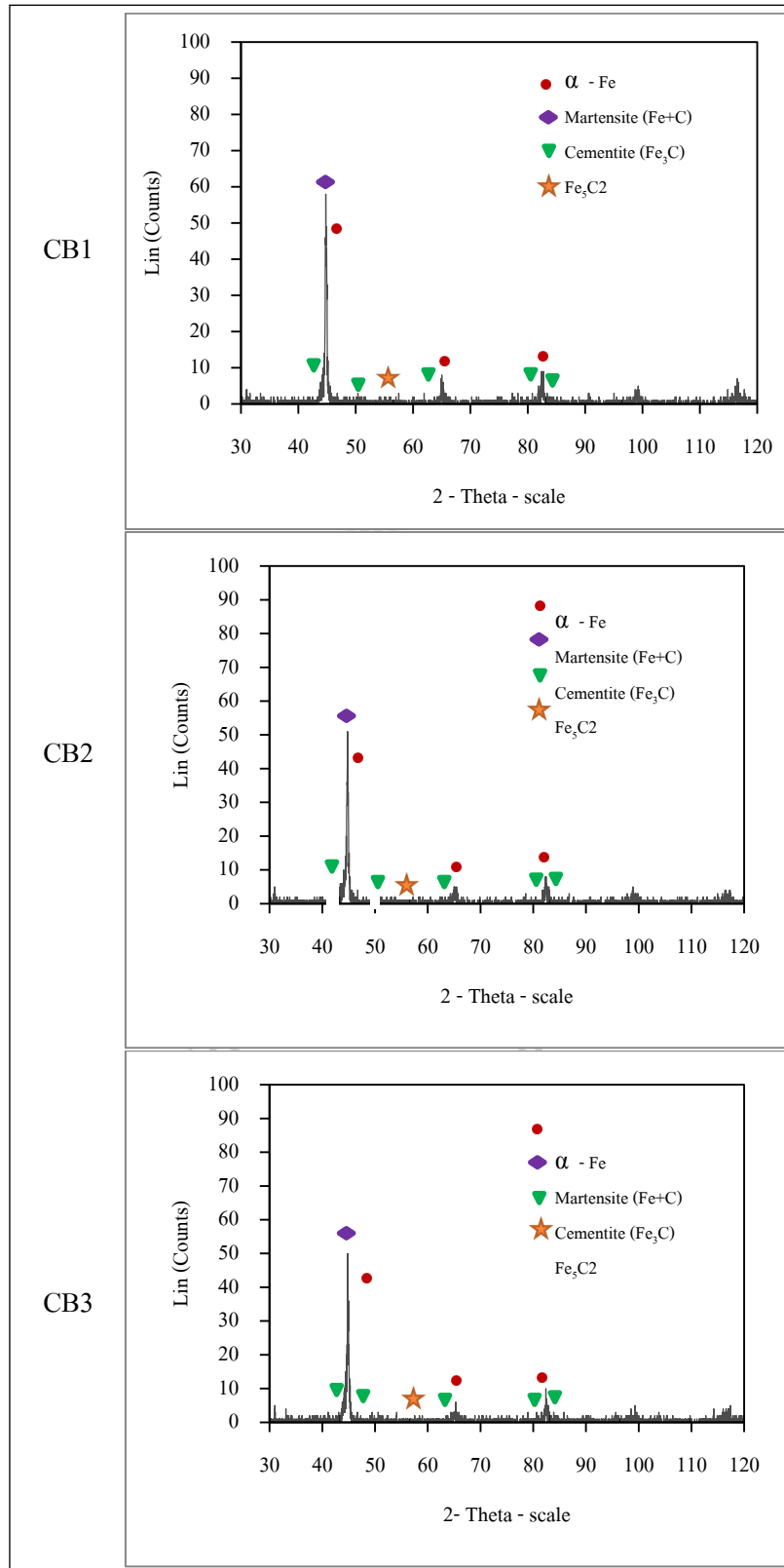
รูปที่ 4.8 แสดงผล XRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพลีไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงประกอบด้วย SN1CB1 SN2CB2 และ SN3CB3 จากรูป พบว่าทั้งสามกระบวนการมีโครงสร้างที่คล้ายกันคือ ปรากฏโครงสร้างผิว ซิเมนไตต์ (Fe_3C) และ Fe_2N



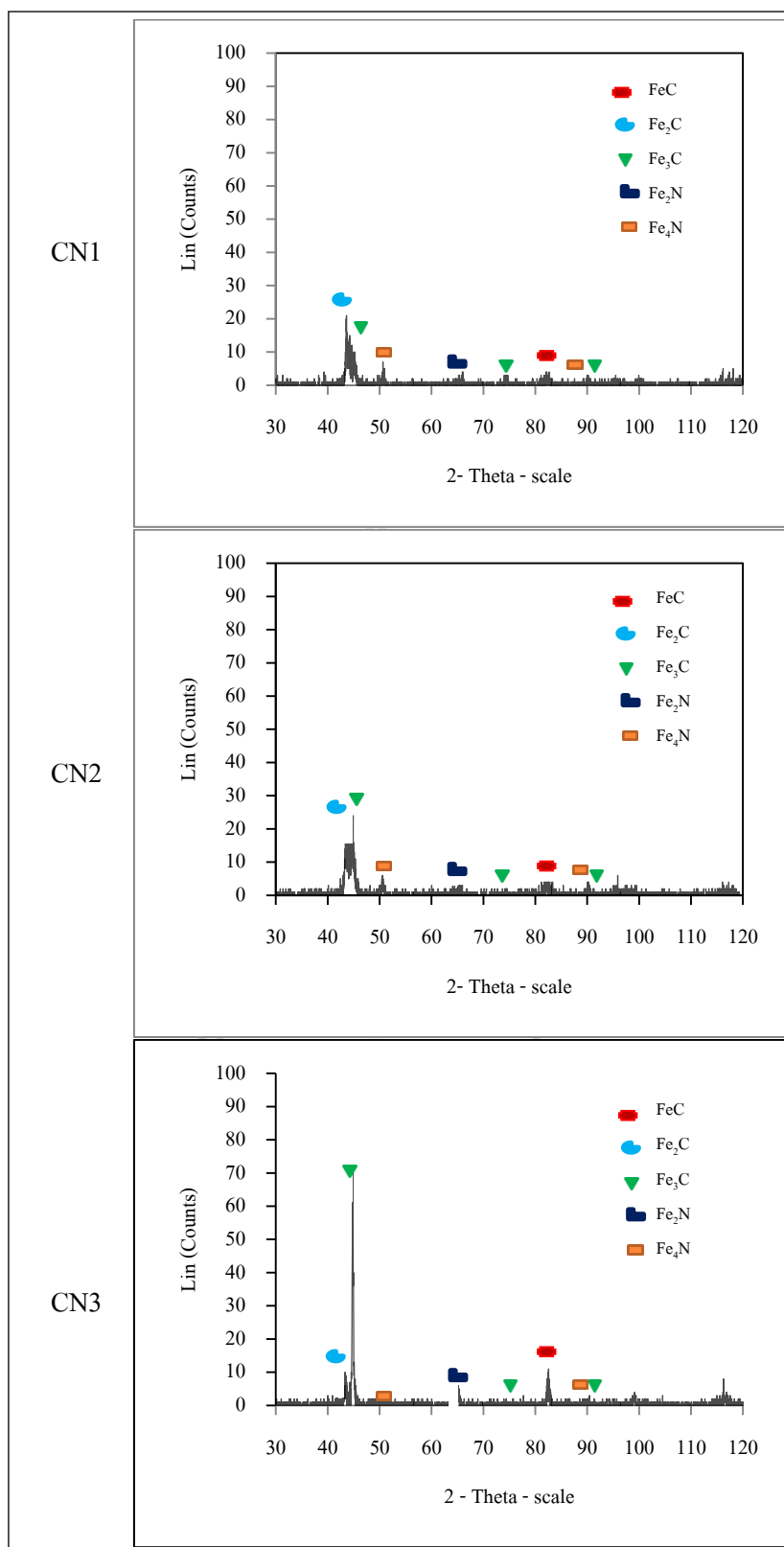
รูปที่ 4.4 แสดงรูป XRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020



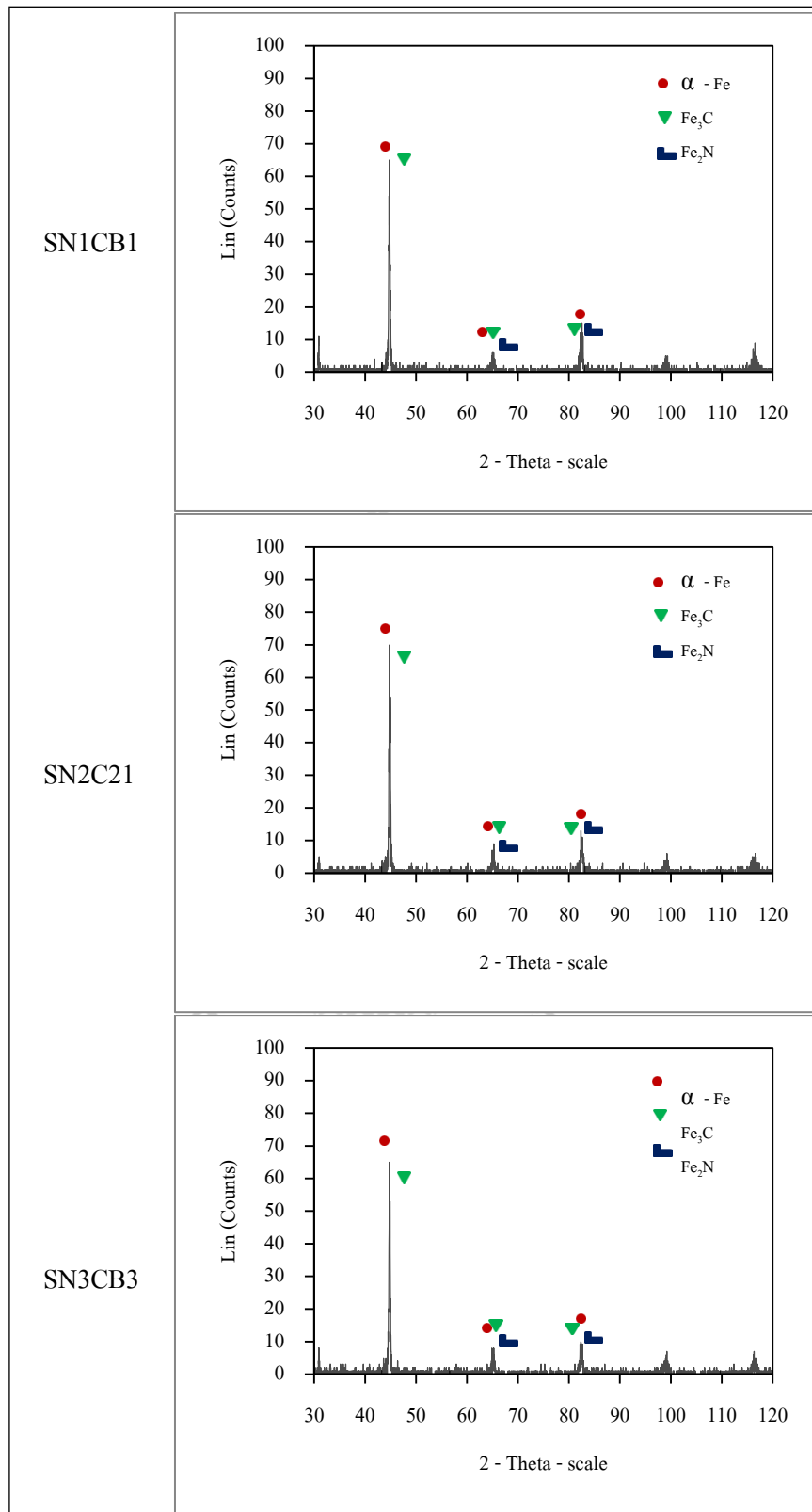
รูปที่ 4.5 รูปXRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย แก๊สซอพลานไตรดิง



รูปที่ 4.6 รูปXRD ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บอนไรซิง



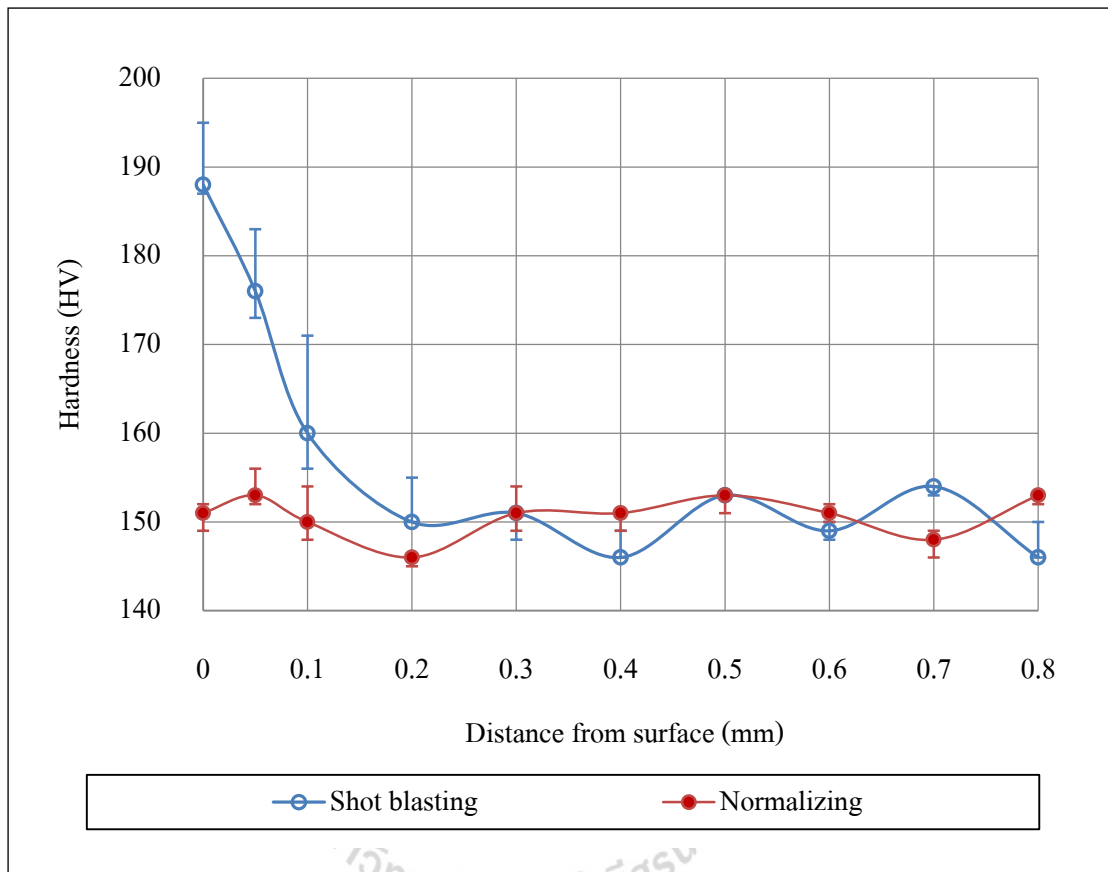
รูปที่ 4.7 รูป XRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย แก๊สคาร์บอนไนโตรดิ่ง



รูปที่ 4.8 รูปXRD ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพลีไนไตรดกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง

4.4 ผลที่ได้จากการทดสอบความแข็ง

4.4.1 ผลของการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ

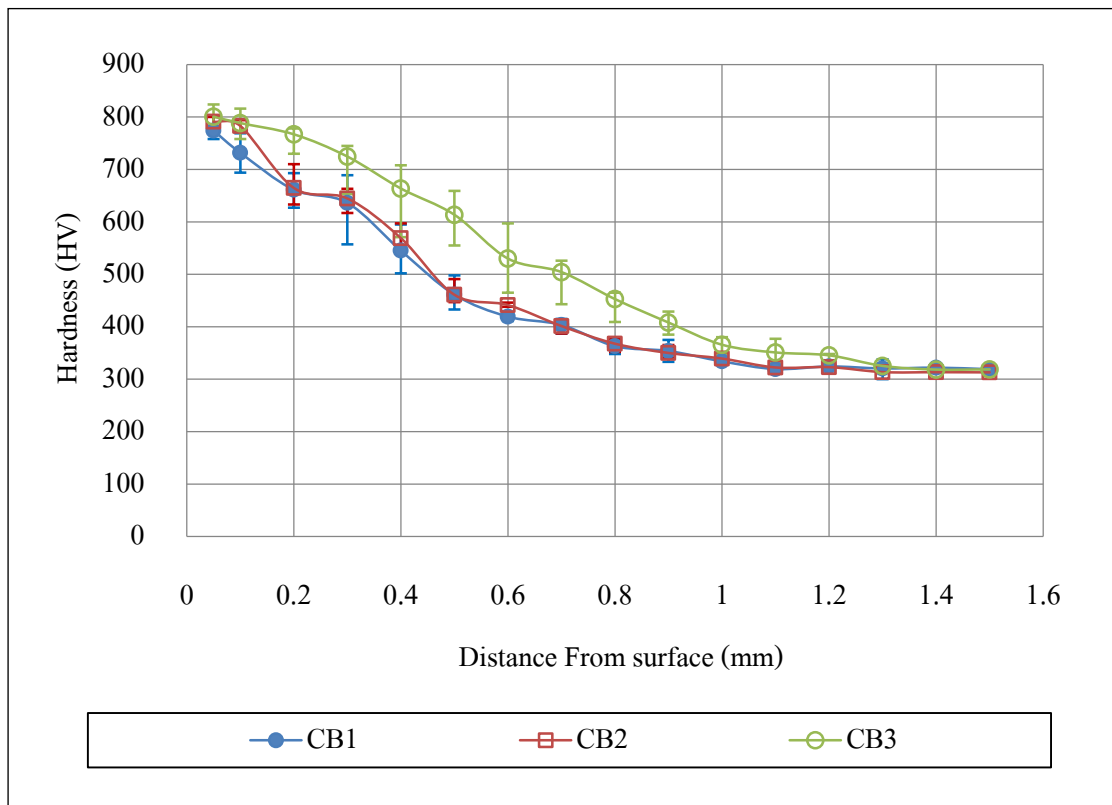


รูปที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งบริเวณผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการยิงเม็ดโลหะ

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการทำความสะอาดผิว ด้วยวิธีการยิงเม็ดบอลโลหะขนาด 0.3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการทำความสะอาดผิว 80 นาที ที่บริเวณผิว โดยที่ ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ซึ่งมีธาตุคาร์บอนอยู่ประมาณ 0.20% หลังจากที่ทำกรอบปกติ (Normalizing) เพื่อปรับปรุงขนาดและการกระจายตัวของเกรน สามารถวัดความแข็งได้อยู่ที่ประมาณ 150 H_V ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อนำชิ้นทดสอบไปทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ วัดความแข็งได้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากรูปพบว่าค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นและมากที่สุดบริเวณผิวนอกสุดประมาณ 187 H_V เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงที่ผิว กล่าวคือ เมื่อยิงเม็ดโลหะไป

ชนกับผิวของชิ้นทดสอบ แรงกระแทกที่เกิดจากเม็ดโลหะทำให้เกิดความเค้นสะสมที่บริเวณผิวของชิ้นทดสอบ มีผลให้รีเทนออสเตนไนท์ (Retain Austenite) ที่มีอยู่เปลี่ยน โครงสร้างไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็ง ทำให้เกิดความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น

4.4.2 ผลของการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง

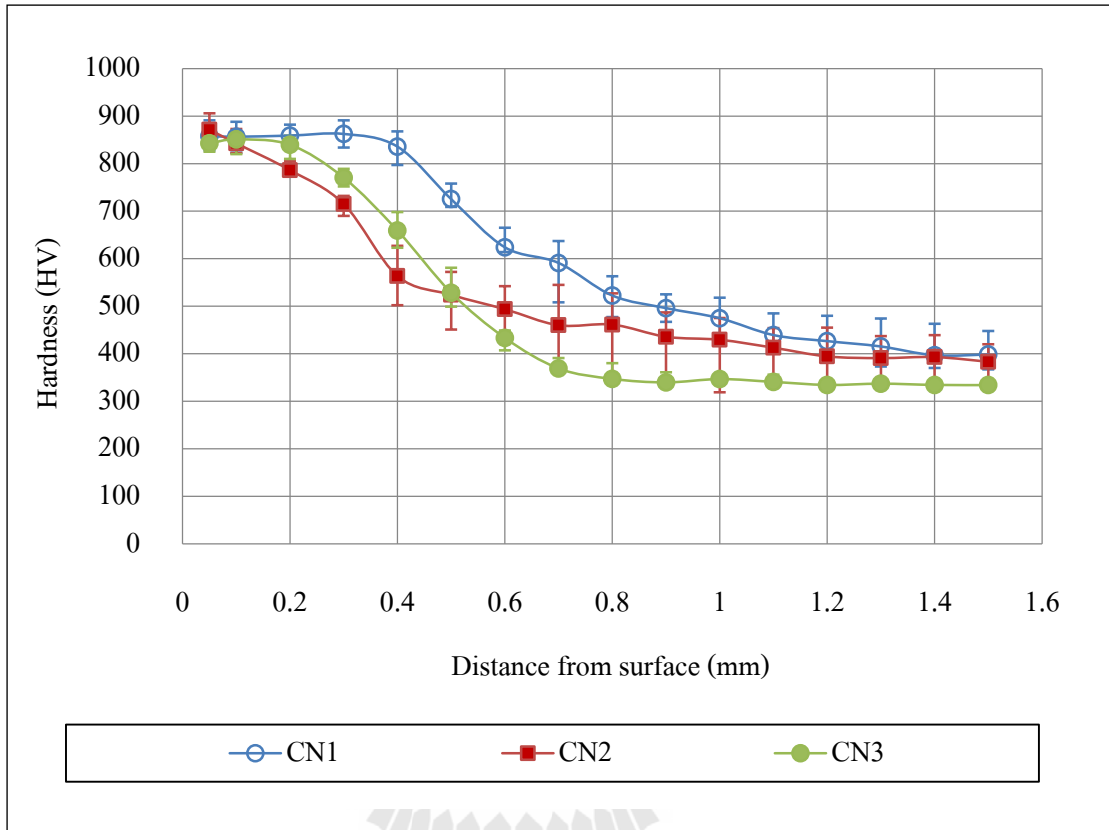
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง มี 3 กระบวนการคือ CB1 CB2 และ CB3 ซึ่งในการอบด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงสำหรับทั้ง 3 กระบวนการนั้น มีวิธีการอบที่เหมือนกันคือ มี 3 ช่วงหลัก ๆ ได้แก่ช่วง Absorbs carbon ช่วง Diffusion และช่วง Soaking

ในช่วง Absorbs carbon และ Diffusion ใช้อุณหภูมิที่เท่ากันคือ 930 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่ให้คาร์บอนซึมเข้าไปในผิวชิ้นทดสอบโดยในช่วง Absorbs carbon ใช้ค่า C.P. (Carbon potential) เท่ากับ 1.2 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง Diffusion ใช้ค่า C.P. เท่ากับ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในช่วง Soaking ใช้ค่า C.P. เท่ากับ 0.8 เปอร์เซ็นต์ เท่ากันทั้งสามกระบวนการ แต่อุณหภูมิในช่วงนี้มีความแตกต่างกันคือ CB1 และ CB2 ใช้อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส CB3 ใช้อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

หลังจากทำการอบปกติ (Normalizing) และทำความสะอาดผิวชิ้นทดสอบด้วยการยิงเม็ดโลหะแล้ววัดค่าความแข็งได้ประมาณ $187 H_V$ ที่บริเวณผิวนอกสุดดังแสดงในรูปที่ 4.9 ดังกล่าว เมื่อทำการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ความแข็งผิวที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 774-801 H_V ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จากรูปพบว่า ค่าของความแข็งที่ตำแหน่งนอกสุดหรือที่ตำแหน่ง 0.05 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นทดสอบนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และแนวโน้มของกราฟของทั้ง 3 กระบวนการมีค่าลดลงที่เหมือนกัน แต่ค่าความแข็งของกระบวนการ CB3 มีค่าที่สูงกว่า CB1 และ CB2 ซึ่ง 2 กระบวนการหลังนั้นมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันเป็นผลจากอุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิ Soaking ที่ต่ำสุดของกระบวนการสำหรับ CB3 ทำให้เกิดความแข็งผิวสูงสุดอาจเนื่องมาจากการ Soaking ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดการแพร่ออกของคาร์บอนได้ยากกว่าการ Soaking ที่ อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส ตามหลักการของการขยายตัวของอะตอมเมื่อได้รับความร้อน

การกระจายตัวของความแข็งหรือความสม่ำเสมอของปริมาณคาร์บอนที่ซึมเข้าไปในตำแหน่งต่างๆของผิวชิ้นงานของทั้ง 3 กระบวนการนั้นสามารถดูได้จากค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกราฟในรูปที่ 4.10 พบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้ง 3 กระบวนการมีค่าใกล้เคียงกัน โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของกระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงมีค่าอยู่ที่ประมาณ 21.85

4.4.3 ผลของการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์โบไนไตรดิง



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

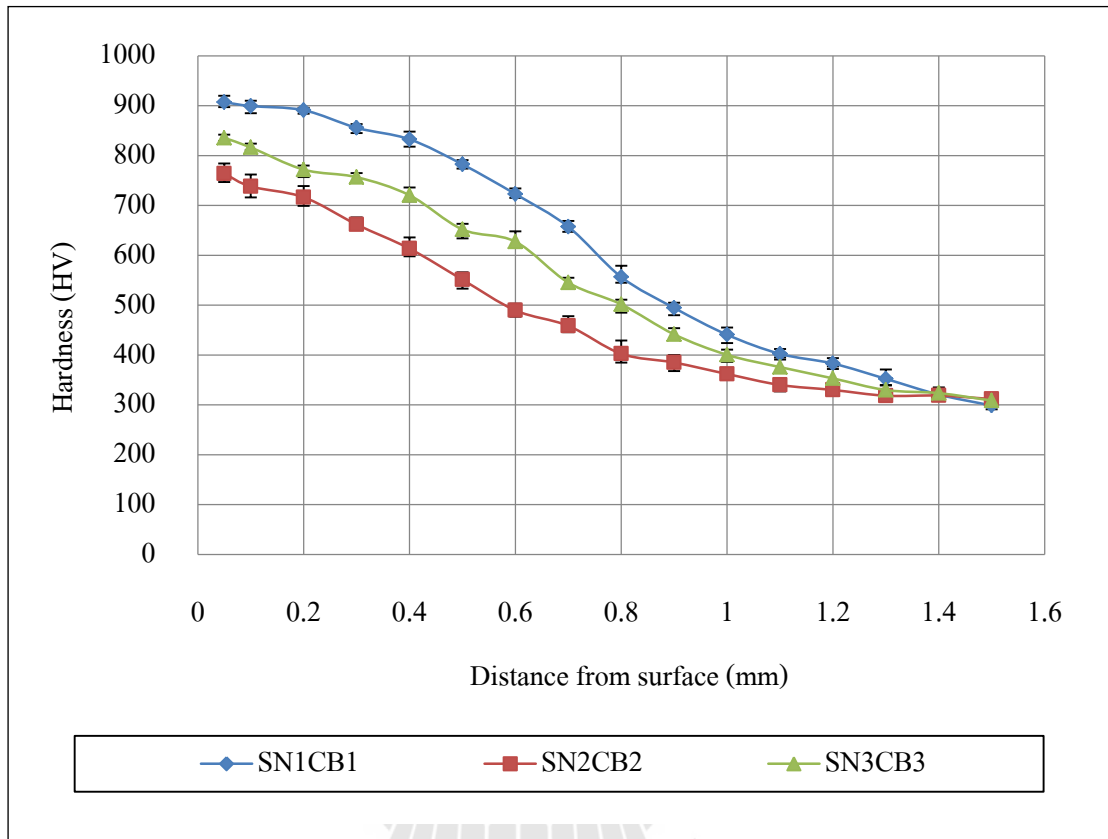
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิง มี 3 กระบวนการคือ CN1 CN2 และ CN3 ซึ่งในการอบด้วยวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิงทั้ง 3 กระบวนการนั้น เป็นการเติมคาร์บอนและไนโตรเจนลงไปใต้ผิว ตามตารางที่ 3.2 ดังกล่าวข้างต้น

เมื่อทำการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิง ความแข็งผิวที่วัดได้จากชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 187 HV (รูปที่ 4.9) เป็น 843-871 HV ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากรูปพบว่า ค่าความแข็งที่ตำแหน่งนอกสุดหรือที่ตำแหน่ง 0.05 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นทดสอบนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และแนวโน้มของกราฟของทั้ง 3 กระบวนการมีค่าลดลงที่เหมือนกัน

จากกราฟพบว่า ค่าความแข็งของ กระบวนการ CN1 มีค่าที่สูงกว่า กระบวนการ CN2 และ CN3 ทั้งนี้เป็นผลมาจากเวลาในการอบขึ้นทดสอบที่มากกว่า กล่าวคือ คาร์บอนและไนโตรเจนมีเวลาในการแทรกซึมเข้าไปในผิวโลหะได้มากขึ้น โดยที่ 2 กระบวนการที่เหลือนี้มีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันในช่วงแรก (ตำแหน่ง 0.6 มิลลิเมตร) และในช่วงหลัง พบว่าค่าความแข็งของกระบวนการ CN2 จะมีความแข็งที่สูงกว่า กระบวนการ CN3 โดยที่ค่าความแข็งนั้นมีค่าใกล้เคียงกันกับกระบวนการ CN1 ค่าความแข็งของ กระบวนการ CN2 ที่สูงกว่า CN1 เป็นผลมาจากอุณหภูมิในการอบที่สูงกว่า เป็นผลให้ คาร์บอนและไนโตรเจนสามารถแทรกซึมเข้าไปในผิวได้เร็วและลึกกว่า

ค่าความแข็งของกระบวนการ แก๊สคาร์บอนไนโตรดิง จะมีค่าความแข็งที่มากกว่า กระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ถึงแม้ว่าจะใช้อุณหภูมิและเวลาในการอบชุบน้ำ้อยกว่าก็ตาม สำหรับค่าความสม่เสมอของความแข็ง ณ ตำแหน่งเดียวกัน พบว่ากระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงกลับมีค่าที่ดีกว่ากระบวนการแก๊สคาร์บอนไนโตรดิงคือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของ กระบวนการแก๊ส คาร์บอนไนโตรดิงมีค่าเท่ากับ 40.56 มากกว่า กระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงซึ่งมีค่าเท่ากับ 21.85 ทั้งนี้เป็นเพราะเวลาในการอบชุบของกระบวนการแก๊สคาร์บอนไนโตรดิงใช้เวลาน้อยกว่า มีผลเกี่ยวกับการแพร่ที่น้อยกว่า การปรับสภาพความสมดุลจึงมีน้อยกว่าทำให้ได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากกว่า ดังกล่าว

4.4.4 ผลของการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนโตรดิงกับ แก๊สคาร์เบอร์โรซิง



รูปที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนโตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์โรซิง

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความแข็งบริเวณใต้ผิวของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างวิธีแก๊สซอพต์ไนโตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์โรซิง มี 3 กระบวนการคือ SN1CB1 SN2CB2 และ SN3CB3 ซึ่งในการอบด้วยกระบวนการร่วมทั้ง 3 กระบวนการนั้น เป็นการเติมคาร์บอนและไนโตรเจนลงไปใต้ผิว ตามตารางที่ 3.2 ดังกล่าวข้างต้น

เมื่อทำการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนโตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์โรซิง ความแข็งผิวที่วัดได้จากชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 187 HV (รูปที่ 4.9) เป็น 764-907 HV ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากรูปพบว่า ค่าความแข็งที่ตำแหน่งนอกสุดหรือที่ตำแหน่ง 0.05 มิลลิเมตรจากผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบนั้นมีค่าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่ง

ต่างจากกระบวนการ แก๊สคาร์เบอร์ไรซิงและแก๊สคาร์โบไนไตรดิงที่มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับแนวโน้มของกราฟของกระบวนการร่วมนั้นมีความเหมือนกับกระบวนการวิธีอื่นคือ แนวโน้มของกราฟของทั้ง 3 กระบวนการมีค่าลดลงที่เหมือนกัน ซึ่งค่าความแข็งของทั้งสามกระบวนการแตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ SN1CB1 มีค่าความแข็งมากที่สุด SN2CB2 และ SN3CB3 มีค่าความแข็งที่น้อยกว่าตามลำดับ ความแข็งที่สูงที่สุดของกระบวนการ SN1CB1 มีผลมาจากการใช้อุณหภูมิและเวลา กล่าวคือในการอบชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิงนั้น ใช้อุณหภูมิที่สูงส่งผลต่อการแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนที่ทำให้ดีกว่ากระบวนการอื่น ในการอบชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์บูไรซิง เมื่อมีปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนที่ผิวชิ้นงาน (ได้มาจากการทำแก๊สซอพต์ไนไตรดิง) จะส่งผลให้การอบชุบในขั้นตอนนี้ทำได้ง่ายขึ้น อีกทั้งในการอบที่ใช้เวลาในการอบนานยิ่งส่งผลให้ได้ความแข็งที่เพิ่มขึ้นดังกราฟรูปที่ 4.12 ดังกล่าว

สำหรับค่าความสม่ำเสมอของความแข็ง ณ ตำแหน่งเดียวกัน พบว่ากระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิงมีค่าที่ดีกว่ากระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สคาร์โบไนไตรดิงคือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของกระบวนการร่วมมีค่าเท่ากับ 10.05 ดีที่สุดในทุกวิธีการ ทั้งนี้เป็นเพราะเวลาในการอบชุบของกระบวนการที่ยาวนานกว่าโดยรวมกันของกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ส่งผลให้การแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนสามารถแพร่กระจายได้อย่างสมคูลมากที่สุด

4.4.5 ผลของการซึมลึกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

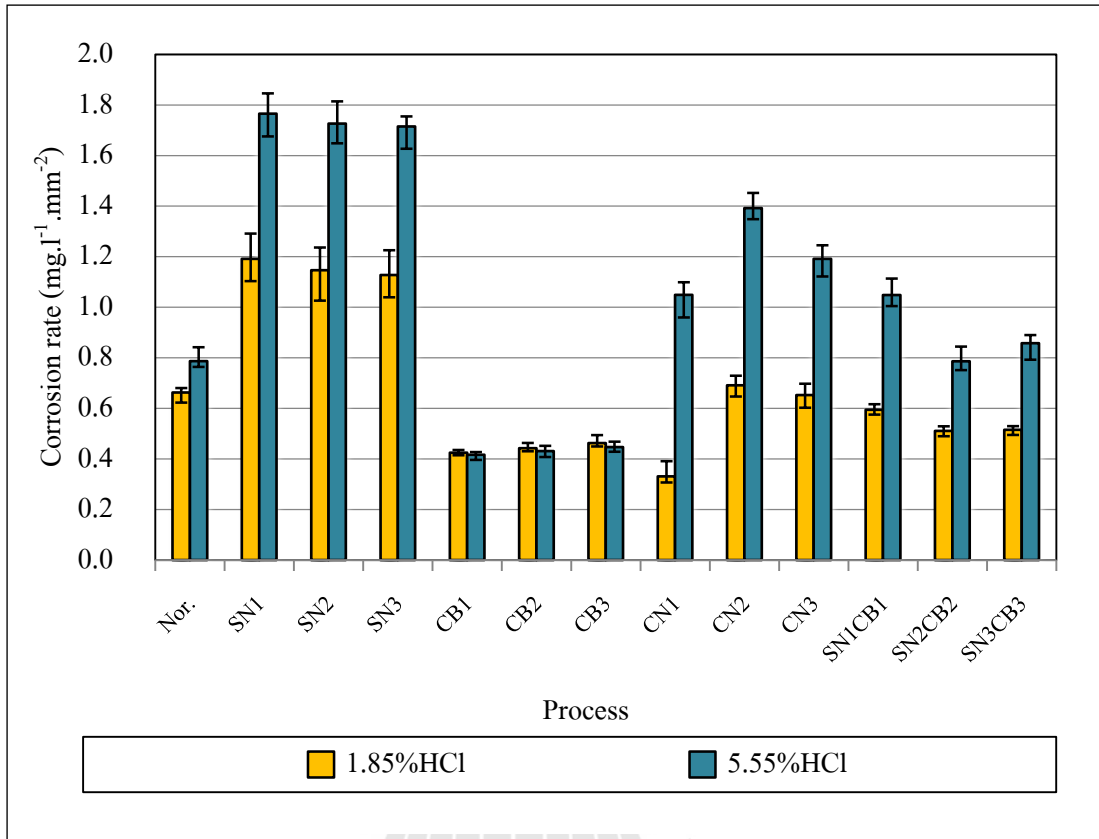
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งที่ตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตรและค่าระยะการซึมลึก

Condition	Hardness at 0.4 mm (HV)	Total case depth (mm)
CB1	545	0.85
CB2	569	0.90
CB3	664	1.00
CN1	836	1.50
CN2	564	1.30
CN3	659	1.00
SN1CB1	833	1.30
SN2CB2	613	1.10
SN3CB3	720	1.20

จากตารางที่ 4.3 แสดงถึงค่าความแข็งที่ตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตร จากผิวของชิ้นทดสอบ และค่าระยะการซึมลึก (Case depth) ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบผิวแข็งด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง แก๊สคาร์โบไนไตรดิง และกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ค่าระยะการซึมลึกทั้งหมด (Total case depth) อ้างอิงมาจากค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถในการชุบแข็งผิวหรือความสามารถในการแพร่ซึมของธาตุที่เติมลงไปผิวชิ้นทดสอบ จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า โดยรวมแล้วกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงได้ระยะการซึมลึกที่น้อยที่สุด กระบวนการที่ได้ค่าระยะการซึมลึกทั้งหมดสูงที่สุดคือ CN1 มีค่าเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร สอดคล้องกับค่าความแข็งในกราฟรูปที่ 4.6 แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่มีระยะการซึมลึกทั้งหมดที่น้อยกว่าอย่าง SN1CB1 ที่มีค่า 1.3 มิลลิเมตร กลับพบว่า SN1CB1 จะให้ค่าความสม่ำเสมอของความแข็งที่ดีกว่าตามค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่แสดงดังภาพ 4.7 ความแข็งของเนื้อภายในที่ตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตรจากผิวชิ้นทดสอบ เป็นตำแหน่งที่ชิ้นทดสอบมีความแข็งที่ต่างกันในแต่ละวิธีการ ทั้งนี้ในแต่ละกระบวนการมีการใช้อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน จากความแข็งของชิ้นงานทั้งหมด (รูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7) จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งที่ผิวนอกสุด (ตำแหน่งที่ 0.05 มิลลิเมตร) มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก เปรียบเทียบจากวิธีการเดียวกัน ตำแหน่งสุดท้ายหรือตำแหน่งแกนกลาง (ตำแหน่งที่ 1.5 มิลลิเมตร) ค่าความแข็งที่วัดได้จากชิ้นทดสอบทั้งหมดจะมีค่าใกล้เคียงมากด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งในตำแหน่งที่ 0.4 มิลลิเมตร จะเป็นตำแหน่งที่อธิบายถึงความแข็งภายในเนื้อได้เป็นอย่างดี

4.5 ผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

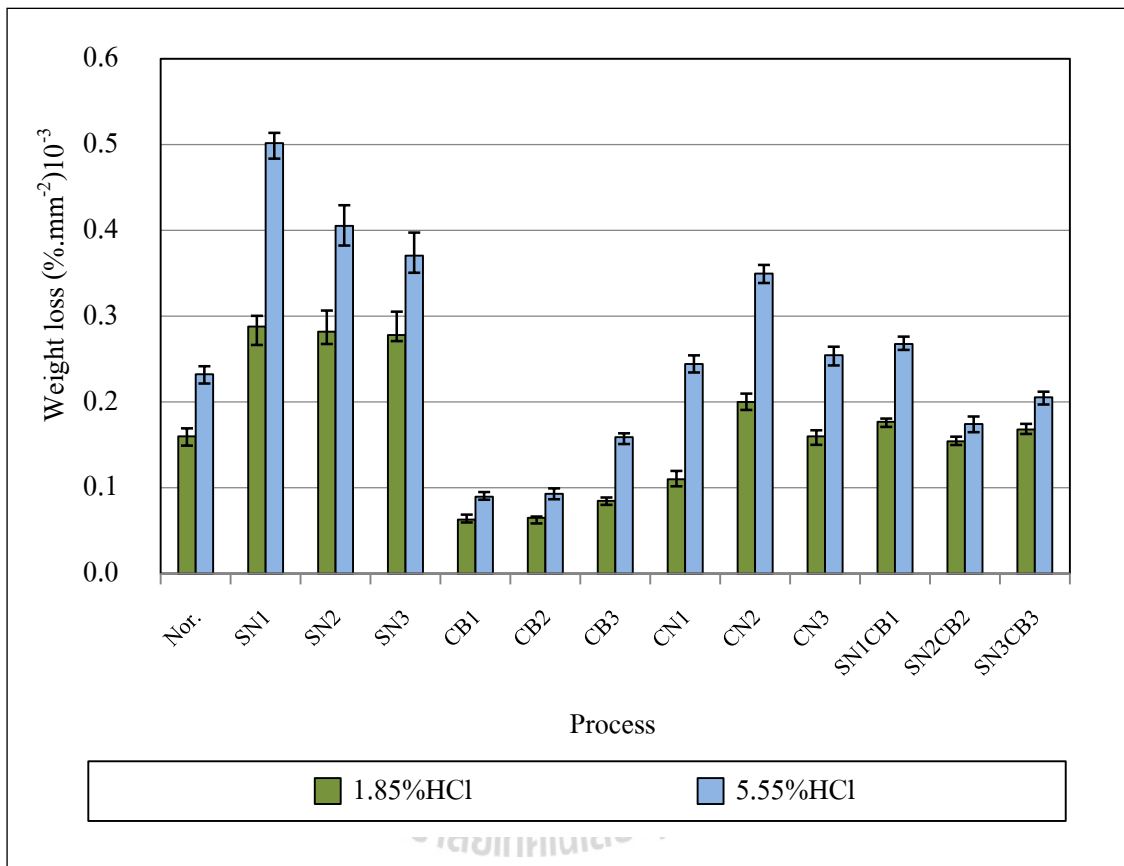
4.5.1 ผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริก



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟอัตราการกัดกร่อนต่อกรดไฮโดรคลอริกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

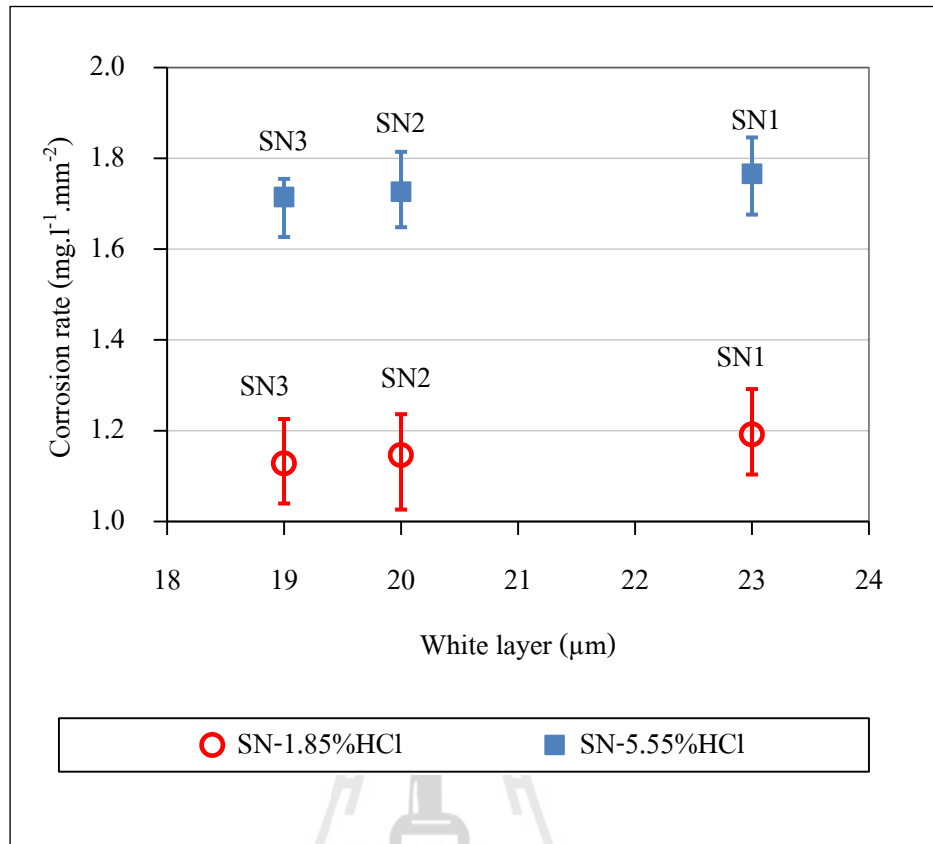
รูปที่ 4.13 แสดงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบต่อกรดไฮโดรคลอริก 1.85 และ 5.55 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงมีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด จากรูปที่ 4.13 กระบวนการ CB1 CB2 และ CB3 มีอัตราการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 0.42-0.46 มิลลิกรัมต่อลิตรตารางมิลลิเมตร ซึ่งหมายถึงความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด เป็นผลมาจากกระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงเป็นกระบวนการเพิ่มคาร์บอนที่บริเวณผิวเหล็กได้สูงประมาณ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ใช้อุณหภูมิสูงและเวลาที่ยาวนาน เมื่อชุบแข็งผิว โครงสร้างที่เกิดขึ้นบริเวณผิวจะประกอบไปด้วย มาร์เทนไซต์ (Fe + C) และ ซีเมนไต์ (Fe₃C) ดังกราฟผล XRD ในรูปที่ 4.6 โดยคุณสมบัติของซีเมนไต์ จะสามารถทนต่อการกัดเซาะทางเคมีได้ดี ชิ้นทดสอบที่มีอัตราการกัดกร่อนมากที่สุดคือ ชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งด้วย

กระบวนการแก๊สซอพต์ไนโตรดิง ชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สซอพต์ไนโตรดิงจะปรากฏโครงสร้าง Fe_4N และ $Fe_{2.3}N$ ดังกราฟผล XRD ในรูปที่ 4.5 การชุบแข็งผิวที่อุณหภูมิต่ำของกระบวนการแก๊สซอพต์ไนโตรดิง มีผลให้เกิดการอึมตัวของไนโตรเจนและคาร์บอนได้มากกว่าการชุบแข็งผิวที่อุณหภูมิสูง อาจส่งผลให้ความแข็งแรงน้อย



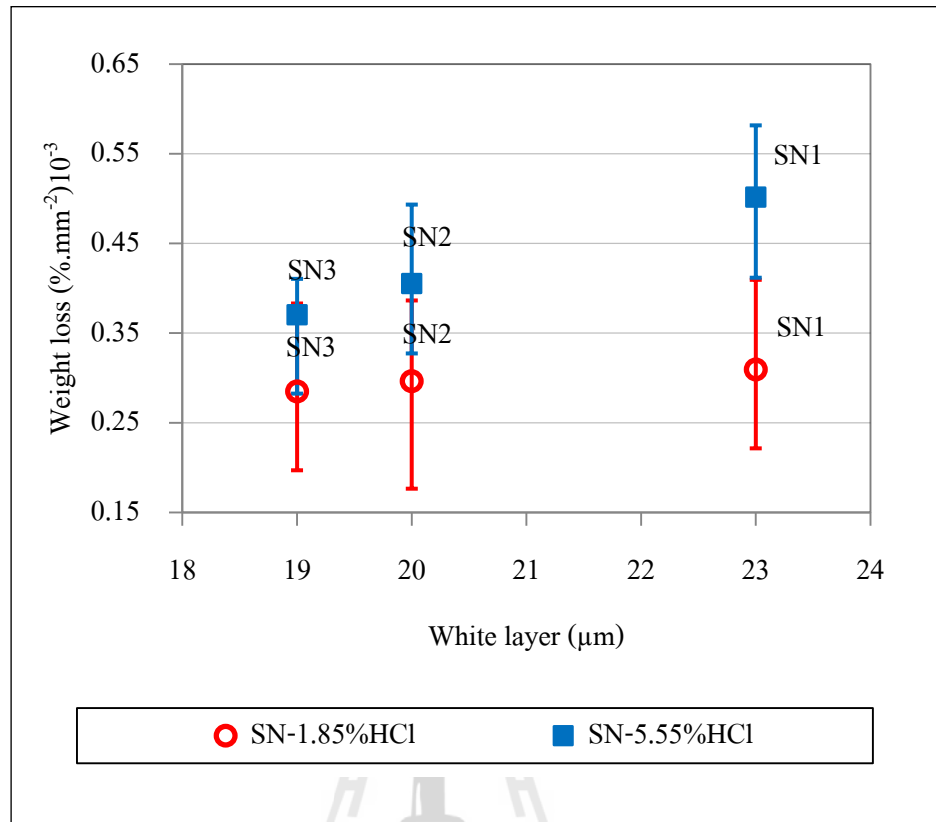
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟอัตราการสูญเสียน้ำหนักโดยการกัดของกรดไฮโดรคลอริกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

รูปที่ 4.13 แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักโดยการกัดของกรดไฮโดรคลอริก 1.85 และ 5.55 เปอร์เซ็นต์ ของชั้นทดสอบ จากผลการทดลองพบว่า อัตราการสูญเสียน้ำหนักของชั้นทดสอบเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวมีแนวโน้มของกราฟเหมือนกับแนวโน้มของอัตราการกัดกร่อนในรูปที่ 4.13 ข้างต้น โดยชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีที่สุด



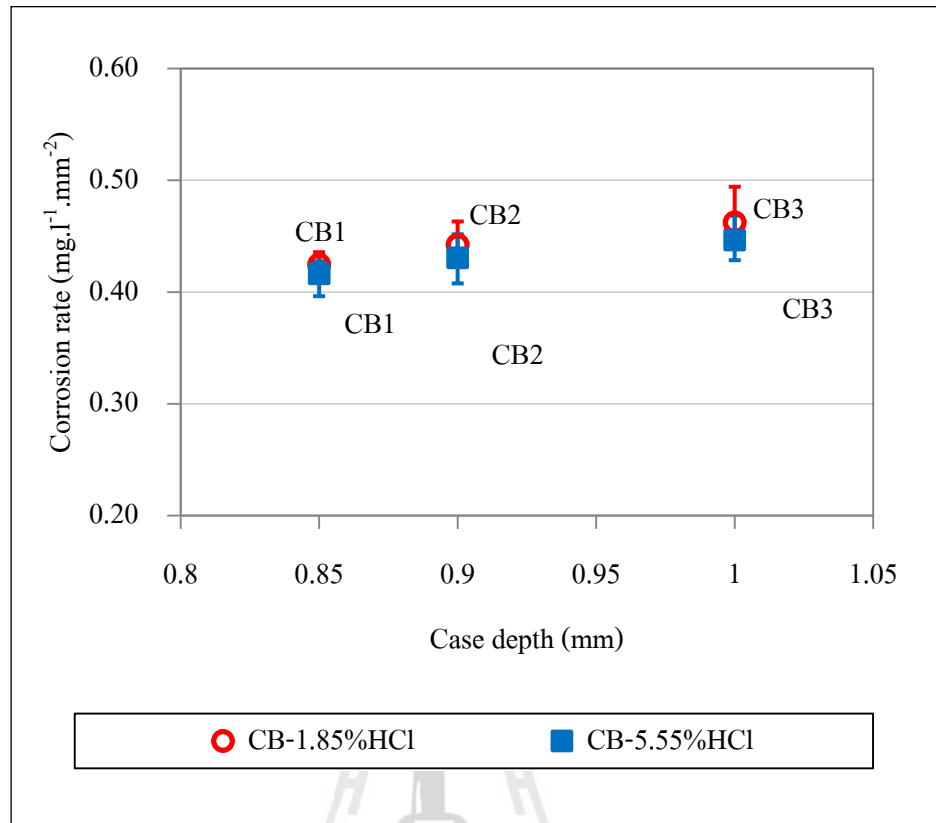
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส ซอฟต์ไนไตรดิงต่อค่าของชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อขนาดชั้นผิวขาวของขึ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง ประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ SN1 SN2 และ SN3 จากรูปพบว่าอัตราการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกทั้ง 2 ความเข้มข้นมีแนวโน้มเหมือนกัน จากรูปที่ 4.1 ขนาดชั้นผิวขาวของ SN1 มีค่ามากที่สุด เมื่อทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกกลับพบว่ามีอัตราการกัดกร่อนที่สูงที่สุด หรือมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ต่ำ อาจกล่าวได้ว่า อัตราการกัดกร่อนของขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอฟต์ไนไตรดิงมีค่าแปรผกผันจากขนาดของชั้นผิวขาว ชั้นผิวขาวที่มากทำให้เกิดการกัดกร่อนที่มากเช่นกัน ทั้งนี้ชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 4.1-4.3 เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าผิวมากกระบวนการอื่นๆ อาจเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิที่ต่ำในการอบชุบ



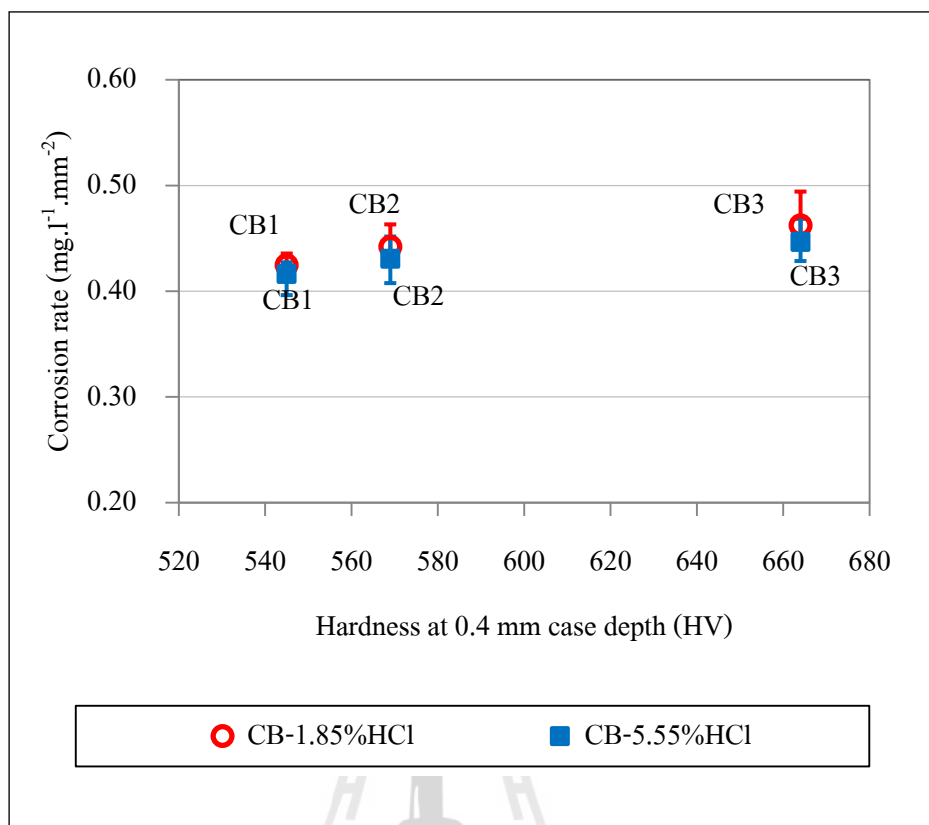
รูปที่ 4.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการสูญเสียน้ำหนักของชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอฟต์ไนไตรดิงต่อค่าของชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการสูญเสียน้ำหนักโดยการกัดของกรดไฮโดรคลอริก 1.85 และ 5.55 เปอร์เซ็นต์ กับขนาดของชั้นผิวขาวของชั้นทดสอบ จากผลการทดลองพบว่า แนวโน้มของกราฟเปรียบเทียบอัตราการสูญเสียน้ำหนักของชั้นทดสอบต่อค่าของชั้นผิวขาวเหมือนกับแนวโน้มของกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดก่อนขึ้นทดสอบต่อค่าของชั้นผิวขาวในรูปที่ 4.15 ข้างต้น โดยอัตราการสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากขึ้นเมื่อมีขนาดชั้นผิวขาวมากขึ้น



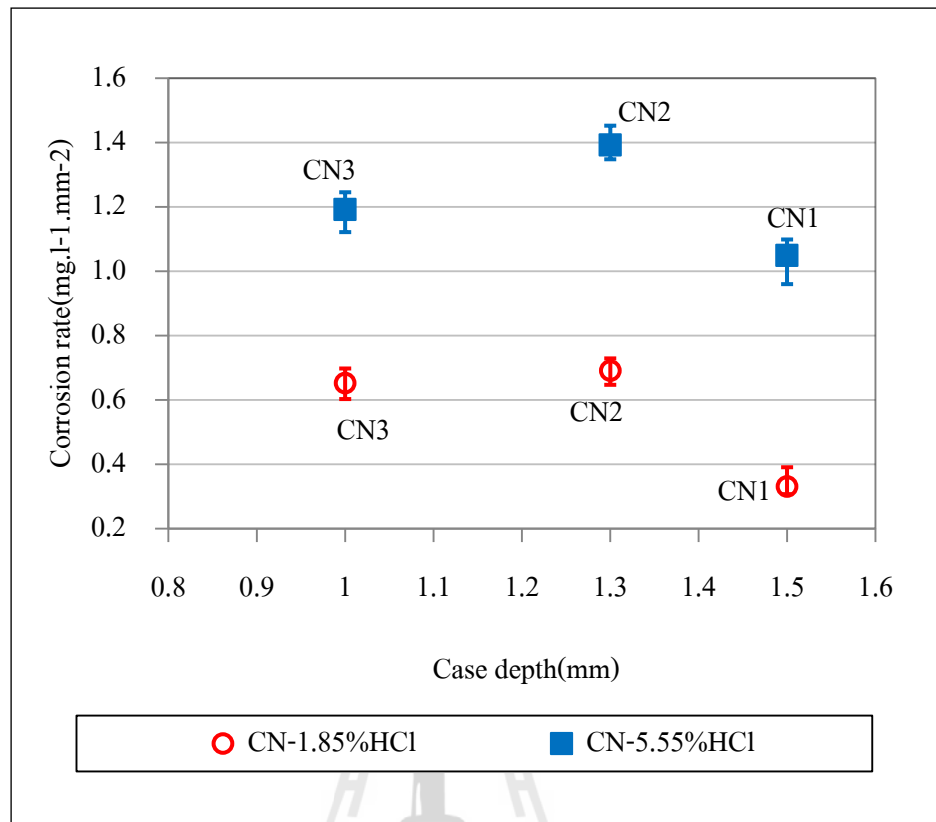
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง

รูปที่ 4.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ CB1 CB2 และ CB3 จากรูปพบว่าการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกทั้ง 2 ความเข้มข้นมีแนวโน้มเหมือนกัน จากตารางที่ 4.3 ระยะการซึมลึกของทั้ง 3 กระบวนการมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทดสอบการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่ามีอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงเช่นกัน หรือมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกัน เปรียบเทียบดูจากรูปที่ 4.14 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบของทั้ง 3 กระบวนการมีค่า อยู่ระหว่าง 0.42-0.46 อาจกล่าวได้ว่า อัตราการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 กระบวนการ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



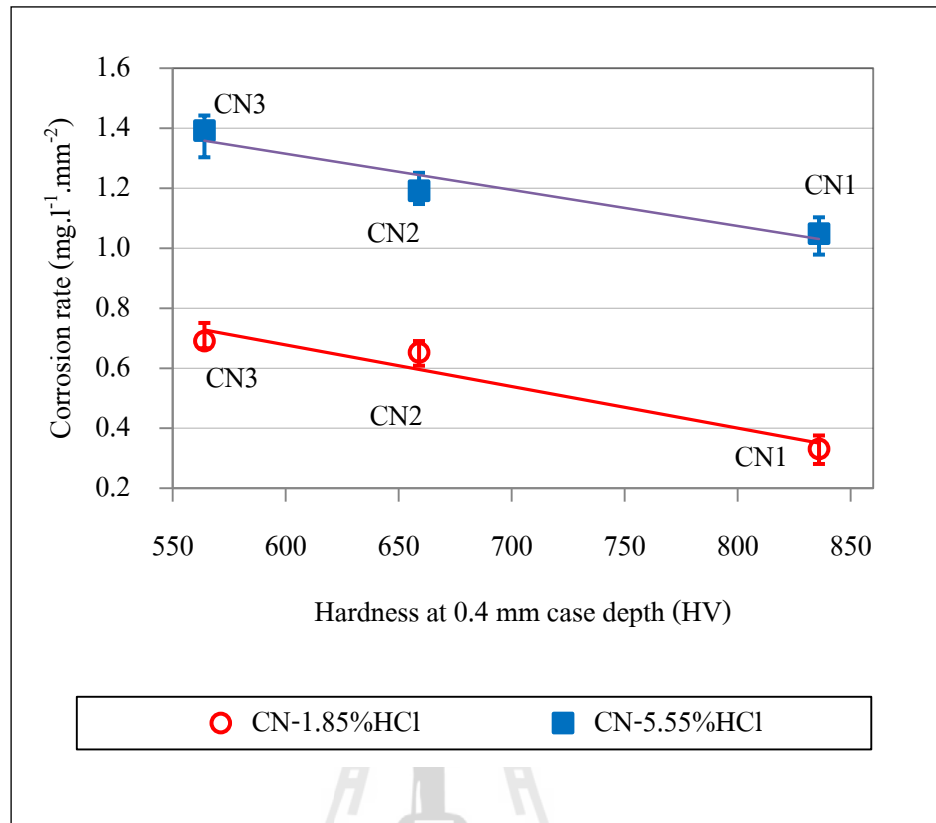
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บอนโรซิงต่อค่าค่าความแข็งตำแหน่งที่ 0.4 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าความแข็งตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตรของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บอนโรซิง ประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ CB1 CB2 และ CB3 จากรูปพบว่าการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบทั้ง 2 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมีแนวโน้มเหมือนกัน นั่นคือความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เป็นไปในทางเดียวกันกับกราฟรูปที่ 4.17



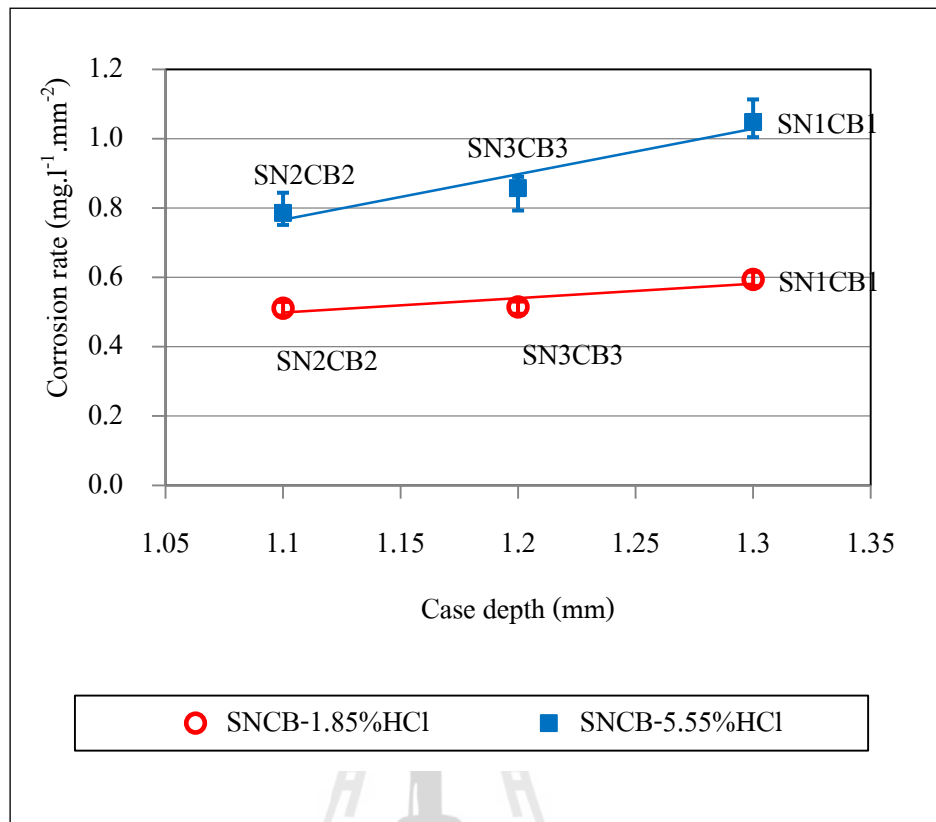
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บอนไนโตรดิงซึ่ง

รูปที่ 4.19 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บอนไนโตรดิง ประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ CN1 CN2 และ CN3 จากรูปพบว่าการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกทั้ง 2 ความเข้มข้นมีแนวโน้มเหมือนกัน จากตารางที่ 4.3 ระยะการซึมลึกของ CN2 มีค่ามากกว่า CN3 แต่เมื่อเปรียบเทียบจากกราฟรูปที่ 4.17 กลับพบว่า CN3 มีความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรด ไฮโดรคลอริกที่ดีกว่า อาจกล่าวได้ว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บอนไนโตรดิงไม่ได้มีผลสอดคล้องกับค่าระยะการซึมลึก



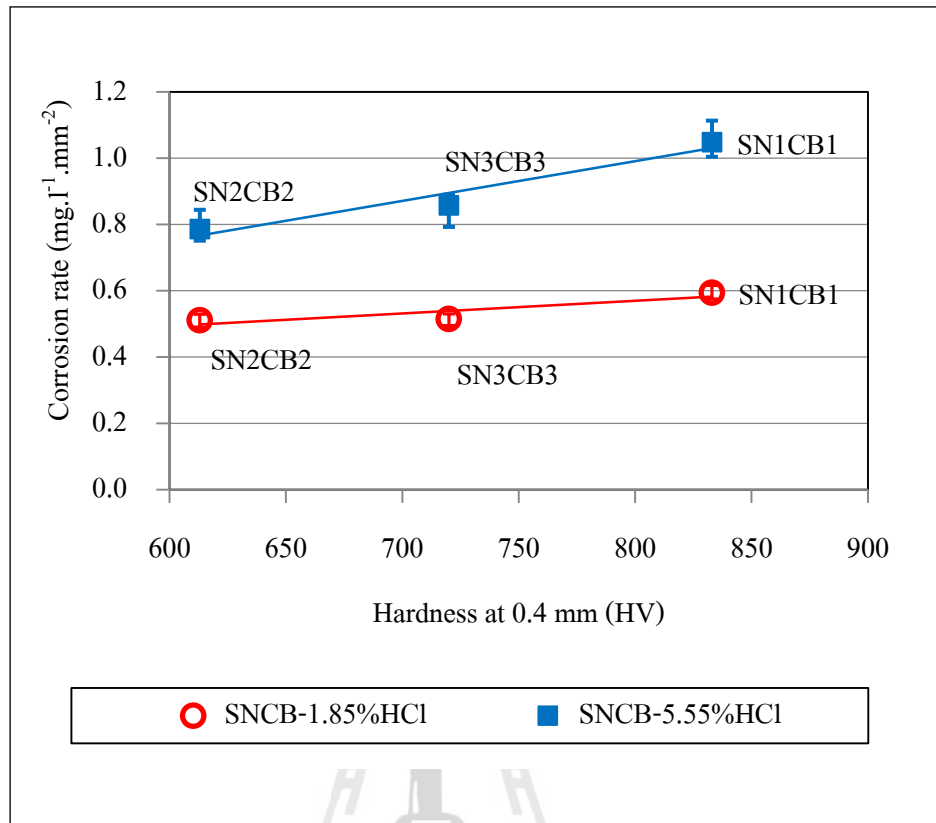
รูปที่ 4.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิงต่อค่าค่าความแข็งตำแหน่งที่ 0.4 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าความแข็งตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตรของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง ประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ CN1 CN2 และ CN3 จากรูปพบว่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบทั้ง 2 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมีแนวโน้มเหมือนกัน คือชิ้นทดสอบ CN1 มีความแข็งที่ตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตร สูงที่สุดและมีความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดไฮโดรคลอริกดีที่สุดในกระบวนการทั้ง 2 ความเข้มข้น ตามด้วย CN2 และ CN3 ตามลำดับ กล่าวได้ว่าค่าความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์โบไนไตรดิง ค่าสอดคล้องกับความแข็งภายในชิ้นทดสอบที่ตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตร เมื่อความแข็งสูงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนก็สูง จากรูปที่ 4.8 พบว่ากระบวนการ CN1 มีโครงสร้างที่เด่นชัดคือ Fe_2C และ Fe_4N อาจกล่าวได้ว่า โครงสร้างผลึก Fe_2C และ Fe_4N ที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบได้



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์โรซิง

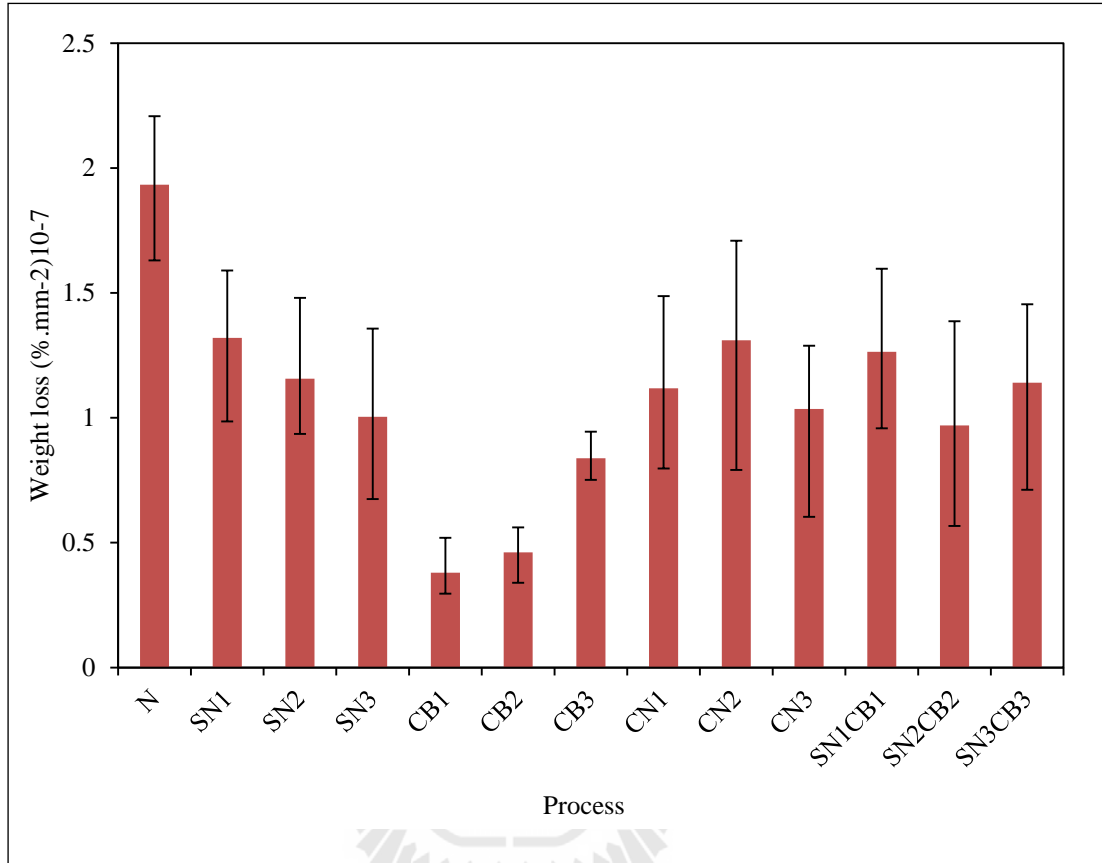
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์โรซิง ประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ SN1CB1 SN2CB2 และ SN3CB3 จากรูปพบว่าการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกทั้ง 2 ความเข้มข้นมีแนวโน้มเหมือนกัน คือค่าความต้านทานการกัดกร่อนของกระบวนการ SN1CB1 มีค่าน้อยที่สุดแปรผกผันกับค่าระยะการซึมลึกที่มีค่ามากที่สุด เช่นเดียวกับกระบวนการ SN2CB2 มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนดีที่สุดแต่กลับมีค่าระยะการซึมลึกที่น้อยอาจกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์โรซิงมีค่าแปรผกผันกับค่าระยะการซึมลึกของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิงต่อค่าค่าความแข็งตำแหน่งที่ 0.4 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.22 แสดงกราฟเปรียบเทียบอัตราการกัดกร่อนต่อค่าความแข็งตำแหน่ง 0.4 มิลลิเมตรของขึ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ประกอบด้วย 3 กระบวนการคือ SN1CB1 SN2CB2 และ SN3CB3 จากรูปพบว่าการกัดกร่อนของขึ้นทดสอบทั้ง 2 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมีแนวโน้มเหมือนกัน เช่น กระบวนการ SN1CB1 มีค่าความแข็งภายในขึ้นทดสอบตำแหน่งที่ 0.4 มิลลิเมตรจากผิวสูงที่สุด แต่มีอัตราการกัดกร่อนที่สูง ซึ่งกล่าวได้ว่าสำหรับกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง อัตราการกัดกร่อนมีค่าแปรผกผันกับความแข็งซึ่งเหมือนกับรูปที่ 4.21 ที่อัตราการกัดกร่อนมีค่าแปรผกผันกับค่าระยะการซึมลึกเช่นกัน ทั้งนี้ในกระบวนการร่วมดังกล่าวโครงสร้างที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.8 ของ SN2CB2 ที่ชัดเจนคือ Fe_2N อาจมีผลให้เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดไฮโดรคลอริก แต่ถือว่าค่าอัตราการกัดกร่อนของทั้ง 3 กระบวนการนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

4.5.2 ผลที่ได้จากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟอัตราการกัดกร่อนต่อกรดไฮโดรคลอริกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

รูปที่ 4.23 แสดงอัตราการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบต่อสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงมีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุด จากรูปที่ 4.23 พบว่าอัตราการสูญเสียน้ำหนักของกระบวนการทั้ง 13 กระบวนการมีความใกล้เคียงกันคือความแตกต่างอยู่ในระดับ 10^{-8} ถือได้ว่าความแตกต่างมีน้อย โดยลักษณะการกัดกร่อนชิ้นทดสอบมีความคล้ายคลึงกันทั้ง 13 กระบวนการ คือกัดเซาะเพียงเล็กน้อยที่บริเวณผิวชิ้นทดสอบ แตกต่างจากการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีการกัดกร่อนที่ผิวอย่างเห็นได้ชัด แต่กระบวนการที่มีความต้านทานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยที่สุดคือชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการชุบแข็งผิว (N) แต่โดย

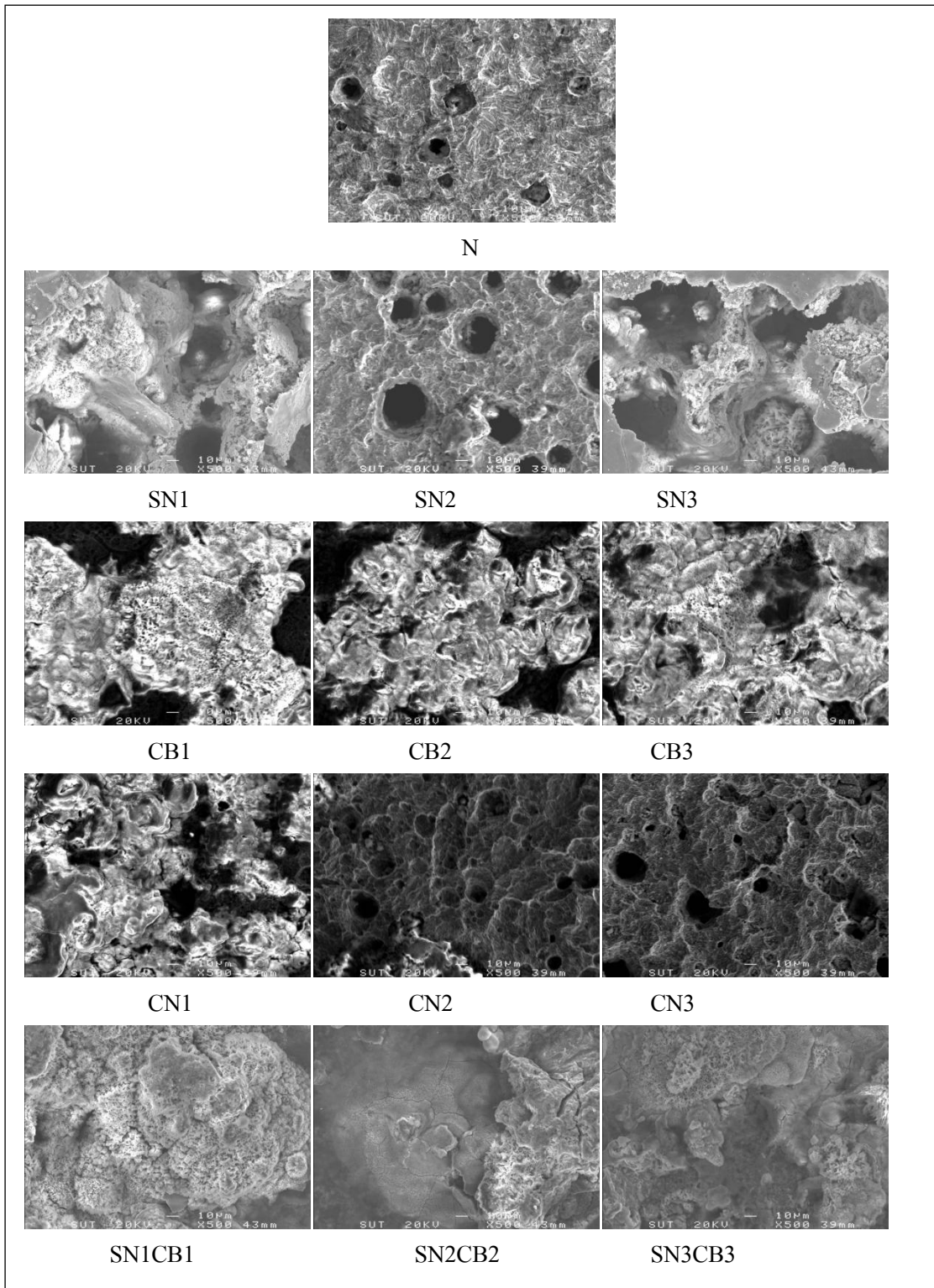
ภาพรวมแล้วการกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังคงคล้ายคลึงกับการกัดกร่อนด้วยกรดไฮโดรคลอริก

4.6 ผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา

4.6.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยไฮโดรคลอริก

จากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ ในกรดไฮโดรคลอริก พบว่าในแต่ละกระบวนการมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ต่างกันตามผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยสามารถยืนยันผลของสภาพการกัดกร่อนได้จากภาพถ่ายด้วยวิธี (Scanning Electron Microscope ; SEM) ที่สภาพพื้นผิวตรงบริเวณผิวหน้าของชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 4.24 พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สซอฟต์ไนไตรดิงมีการกัดกร่อนมากที่สุด โดยมีสภาพการกัดกร่อนที่ลึก



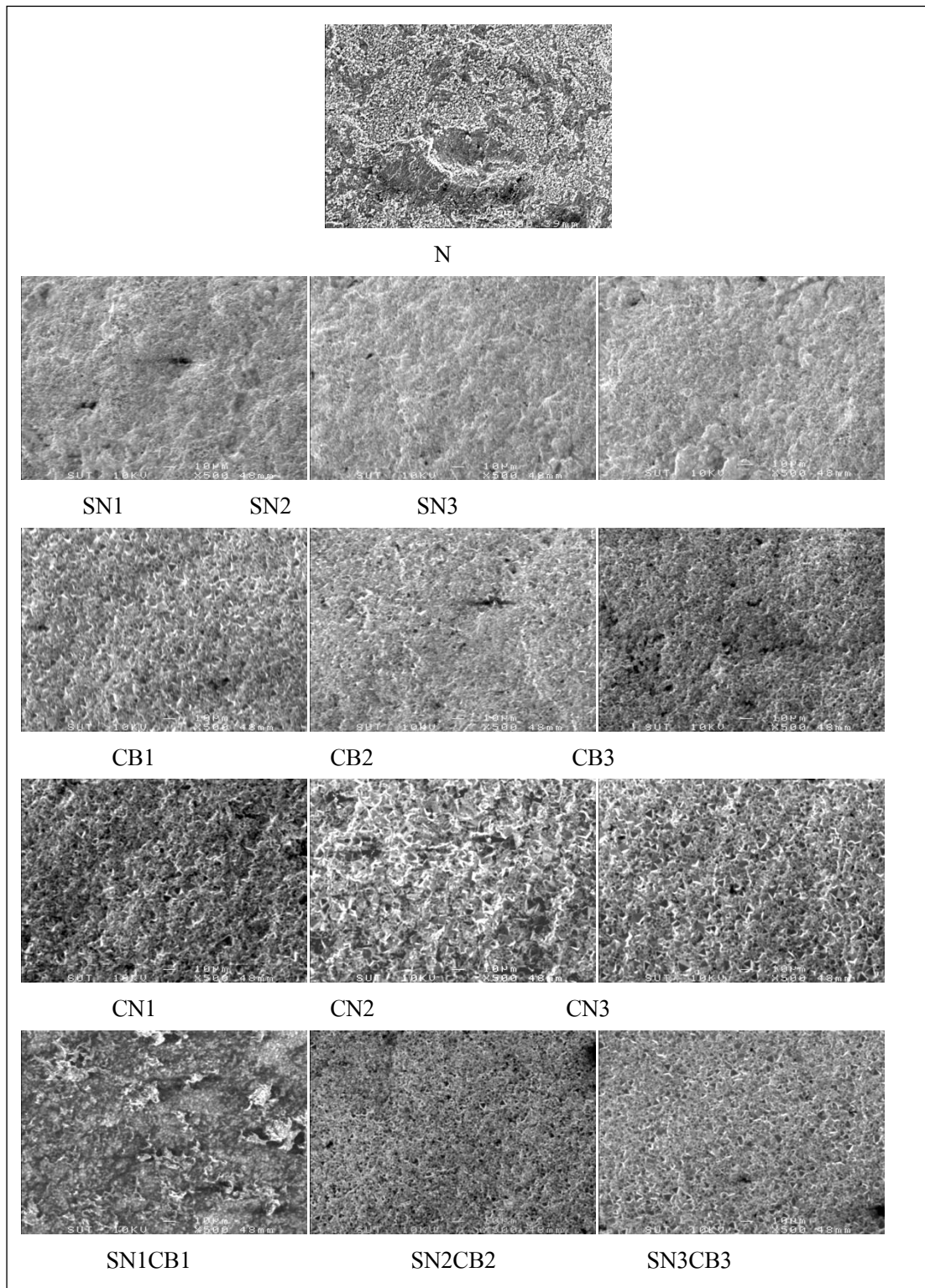


รูปที่ 4.24 แสดงภาพถ่าย SEM ที่ผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อกรดไฮโดรคลอริกที่ 5.55 เปอร์เซ็นต์

4.6.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

จากการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าในแต่ละกระบวนการมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถยืนยันผลของสภาพการกัดกร่อนได้จากภาพถ่ายด้วยวิธี (Scanning electron microscope ; SEM) ที่สภาพพื้นผิวตรงบริเวณผิวหน้าของชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งลักษณะการกัดกร่อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยที่บริเวณผิว





รูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่าย SEM ที่ผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยและผลของงานวิจัยเรื่อง ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส ซึ่งประกอบด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ ศึกษาถึงผลของการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งผลการวิจัยนั้นมีผลออกมาสามารถสรุป ดังนี้

5.1.1 ชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนต่อสภาวะกรดและเบส (ไฮโดรคลอริกและโซเดียม ไฮดรอกไซด์) ได้ดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับทุกกระบวนการในการทดลอง

5.1.2 ชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิงมีความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดไฮโดรคลอริกต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับทุกกระบวนการที่ทำการทดลอง และอัตราการกัดกร่อนยังขึ้นอยู่กับขนาดชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้น คือชั้นผิวขาวที่มากทำให้เกิดการกัดกร่อนได้มาก

5.1.3 อัตราการกัดกร่อนต่อกรดไฮโดรคลอริกขึ้นอยู่กับความแข็งที่เกิดขึ้น คือ ชั้นทดสอบที่มีความแข็งบริเวณผิวต่ำจะมีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าชั้นทดสอบที่มีความแข็งสูง อีกทั้งยังพบว่า การชุบแข็งผิวด้วยวิธีแก๊สคาร์โบไนไตรดิงสามารถทำให้เกิดการซึมลึกได้สูงมากกว่ากระบวนการอื่น ๆ ในการทดลอง

5.1.4 การชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมส่งผลให้ความแข็งบริเวณผิว ณ ตำแหน่งต่าง ๆ มีความสม่ำเสมอมากที่สุด

5.1.5 การทดสอบชั้นทดสอบในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีอัตราการกัดกร่อนที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบในกรดไฮโดรคลอริก อัตราการกัดกร่อนต่อสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์น้อยที่สุดคือชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์เบอร์ไรซิง ส่วนอัตราการกัดกร่อนต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง แก๊สคาร์โบไนไตรดิง และ กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิง และ แก๊สคาร์เบอร์ไรซิง มีอัตราที่ใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 กระบวนการร่วมเป็นกระบวนการที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงที่สูงอีกทั้งยังมีความสม่ำเสมอของความแข็งที่ดี อาจทำการทดลองกับวัสดุชนิดอื่น ๆ สำหรับกระบวนการร่วมเพื่อศึกษาในขั้นต่อไป

5.2.2 การชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงเป็นวิธีที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานในสภาวะกัคกร่อน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมตามสภาพการใช้งาน สำหรับวัสดุที่ต้องการใช้งานตามสภาวะดังกล่าว โดยไม่เน้นถึงความแข็งมากนัก กระบวนการแก๊สคาร์เบอร์ไรซิงก็เป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสม



บรรณานุกรม

- กัญญา ตระกูลดู. (2534). เทคโนโลยีการกัดกร่อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ
 มนัส สติรจินดา.(2537). เหล็กกล้า. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 มนัส สติรจินดา.(2540). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่ง
 ประเทศไทย
 มาน พ ต้น ตระ บัณ ฑิต ย์. (2535). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม.พิมพ์ครั้งที่ 2.
 กรุงเทพฯ: ประชาชน จำกัด
 อธิพิล เตียววณิชย์. (2550). การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก.สถาบันเหล็กและ
 เหล็กกล้าแห่งประเทศไทย.กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 Asi, O., Can, A., Pineault, J., and Belassel, M. (N.D.) **The effect of high temperature gas carbu
 rizing on bending fatigue strength of SAE 8620 steel.**
 ASM International. Materials Park, OH (1996). **Carbon and alloy steels.**ASM Specialty Handbo
 ok. United States of America
 ASM International. Materials Park, OH (1987). **Properties and Selection: Iron, Steel and High-
 Performance Alloys.**Vol. 1.ASM Specialty Handbook. United States of America
 ASM International. Materials Park, OH (1987). **Heat treating,** Vol. 4.ASM Specialty Handbook.
 United States of America
 ASM International. Materials Park, OH (1987). **Surface engineering,** Vol. 5.ASM Specialty Han
 dbook. United States of America
 ASM International. Materials Park, OH (1987). **Mechanical testing,** Vol. 8.ASM Specialty Hand
 book. United States of America
 ASM International. Materials Park, OH (1987). **Corrosion,** Vol. 13.ASM Specialty Handbook. U
 nited States of America
 ASTM E-140 –
 02 : **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among.** Brinell
 Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness,
 and Scleroscope Hardness
 Available: <http://www.ndtthailand.com>
 Available: <http://www.lpnpm.co.th/th/knowledge.php>

Available: <http://www.rcopticalsystems.com/projects/libs.html>

Available: <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scanning-eletron-microscopysem->

Available: <http://www.tint.or.th/adv/AmPly/XRD.html>

Available: http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm

Noor, E.A., Aisha, H., Aad Moubaraki, A. (2008) **Corrosion Behavior of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solutions**. Int. J. Electrochem. Sci., 3 806 - 818

Foerster, C., Assmann, A., Silva, S., Nascimento, F., Lepienski, C., and Guimaraes, J. (N.D.) **AN SI 304 nitrocarburized at low temperature: Mechanical and tribological**. PR, BRAZIL

Jauhari, I., Rozali, S., Masdek, N., and Hiroyuki, O. (2007) **Surface properties and activation energy analysis for superplastic carburizing of duplex stainless steel**. Materials science and engineering A 466 (2007) 230-234

Kreysa, G., and Schutze, M. (2004) Corrosion Handbook., **Hydrochloric Acid, Nitric Acid**. Second, Vol. 2,

Fontana, M. G. (N.D.) **Corrosion engineering**. McGraw-Hill Book Company, ISBN 0-07-021463-8.

Noor, E., Moubaraki, A., (2008) **Corrosion Behavior of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solutions**. Int. J. Electrochem. Sci., 3 (2008) 806-818

Osarolube, E., Owate, I., and Oforika, N. (2008) **Corrosion behaviour of mild and high carbon steels in various acidic media**, **Scientific Research and Essay**. Vol.3 (6), pp. 224-228, June 2008

SAE J423: Case Depth, (February 1998)

Selcuk, B., Ipek, R., and Karamis, M. (2003) **A study on friction and wear behaviour of carburizing, carbonitriding and borided AISI 1020 steel**. Journal of material processing technology 141 (2003) 189-196



ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Siwadamrongpong, S., Khaengkarn, S., and Tachee, K. (2011) **Influence of combined processes between gas soft nitriding and carburizing to hardness of low carbon steel.**Advanced Materials Research Vols.415-417 (2012).pp1186-

1189 Online available since 2011/Dec/06 at www.scientific.net © (2012) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.415-417.1186

Siwadamrongpong, S., Khaengkarn, S., and Tachee, K. (2012) **Corrosion resistance of low carbon steel treated by gas surface hardening method.** South East Asian Technical University Consortium (SEATUC 2012).6-7 March.KMUTT. Bangkok Thailand



Influence of combined processes between gas soft nitriding and carburizing to hardness of low carbon steel

Somsak Siwadamrongpong^{1, a}, Sorada Khaengkarn^{2, b}, Krid Tachee^{3, c}

^{1,2} School of Manufacturing Engineering, ³ School of Mechanical Engineering
 Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand

^a somsaksi@sut.ac.th, ^b soradak@sut.ac.th, ^c t_krid@hotmail.com

Keywords: Low carbon steel, Carburizing, Carbonitriding, Soft nitriding, Hardness

Abstract. Low carbon steel is widely used in industries due to its low cost and easy to recycle. However, the low carbon steel is also known that easily attacked by environment and low strength compared with other kinds of steel. Therefore, several surface coating and treatment techniques are employed to improve its properties. This study was aimed to investigate influence of combined processes between gas soft nitriding and gas carburizing on the hardness of low carbon steel. The specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Then the specimen was treated by gas carburizing, gas carbonitriding and combined processes between gas soft nitriding and gas carburizing. It was found that the combined processes yielded the good surface hardness and total case depth compared to other conditions. The most advantage of the combined processes could be considered to be very small variation of hardness.

Introduction

Plain carbon steel is the most popular steel that used in industries due to its low cost and easy to recycle. However, it is also known that plain carbon steel, especially low carbon steel, is quite weak among their kind and highly rate of rust. Several surface treatment methods are selected to protect its surface from environment. Surface hardening techniques are employed to improve its mechanical properties such as carburizing, carbonitriding and soft nitriding.

Gas carburizing is well-known techniques that suitable with low carbon alloy steel. Carbon can be diffused into the steel surface leading to its higher surface hardness. Gas carbonitriding is the technique that suitable for low carbon steel. Nitrogen and carbon potential in the controlled atmosphere is the key different from carburizing. The advantage of carbonitriding is reported that diffusion of carbon atom is greater due to the effect from large size of nitrogen atom [1]. Gas soft-nitriding is quite different technique from the 2 described techniques above. The additional hard and smooth layer, so call White Layer, will be formed cover the surface by this technique. Due to the piece part has not to be heated above eutectic temperature; it is appropriated to all kind of steels. All surface hardening techniques mentioned above will improve surface hardness and also other properties such as fatigue and corrosion resistance. This study aims to investigate the influence of combined processes between gas soft nitriding and gas carburizing to hardness of low carbon steel.

Experimental Procedures

Low carbon steel AISI 1020 was used in this study. The composition of sample was tested and indicated in Table 1. The raw material was cut into specimen size of 25 mm. in diameter and thickness 10 mm. The specimen was brought into normalizing process at 850 C for 1 hr. Then the specimen was shot blasting by steel ball 0.3 mm. for surface cleaning. 3 gas surface hardening techniques with various conditions were employed to improve specimen properties as shown in Table 2. Hardness and case depth of treated specimen were investigated, 6 sampling points for each condition.

Table 1 Compositions of low carbon steel AISI 1020 (wt %)

AISI	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Al	Cu	Fe
1020	0.2040	0.7756	0.2348	0.0113	0.0195	0.0056	0.0152	0.0078	0.0011	Bal.

Table 2 Treatment conditions of specimen by various gas surface hardening methods

Condition	Gas Process	Temp (°C)	Time (min)	Atmosphere	Diffusion 0.8%C.P	Soaking 0.8%C.P	Oil Quenching
SN1	Soft-Nitriding1	570	180	C:NH ₃ (10:10)m ³ /hr	-	-	100°C,30m
CB1	Carburizing1	930	150	C.P (1.2%)	930°C,1hr	870°C,30m	60°C,30m
CB2	Carburizing2	930	120	C.P (1.2%)	930°C,1hr	870°C,30m	60°C,30m
CB3	Carburizing3	930	150	C.P (1.2%)	930°C,1hr	850°C,30m	60°C,30m
CN1	Carbonitriding1	840	205	C.P-NH ₃ (1.1-1%)	-	-	70°C,30m
CN2	Carbonitriding2	890	180	C.P-NH ₃ (1-0.75%)	-	-	60°C,30m
CN3	Carbonitriding3	870	180	C.P-NH ₃ (1-0.75%)	-	-	60°C,30m
SN1CB1	Soft-Nitriding1+Carburizing1						

Results and Discussion

Normalizing and Shot Blasting

Hardness profile of specimen as normalizing and shot blasting was illustrated in Fig. 1. It was found that, the shot blasting yields about 40 HV increasing in surface hardness. The effect of shot blasting was disappeared at deeper than around 0.2 mm. from surface. The increasing of surface hardness can be discussed as the transforming of retained austenite at the surface to martensite phase which is reported by other works [2, 3].

Carburizing

Hardness profile of specimen treated by gas carburizing was shown in Fig. 2. It was found that the surface hardness was increased to 772-824 HV, with total case depth about 0.85-1.0 mm, as shown in Table 3. Please note that the total case depth was examined by core hardness + 50 HV criteria. It could be discussed that the large numbers of carbon atom diffuse into specimen surface during treatment time. After that, the carbon atom might diffuse back during soaking period for its equilibrium [1, 4]. Therefore, the lowest soaking temperature, condition CB3, will lead to the highest surface hardness.

Carbonitriding

Hardness profile of specimen treated by carbonitriding was indicated in Fig. 3. It was found that the surface hardness is in a range of 843-871 HV which are obviously higher than specimen treated by carburizing. The case depth of specimen, 1.0-1.5 mm., were also deeper than that of carburizing, as shown in Table 3. It may be discussed that it is due to the effect of large atom of nitrogen as also found in other studies [1, 5].

Combined processes (gas soft nitriding - gas carburizing)

Fig. 4 illustrates photo from microscope of white layer which was generated by gas soft nitriding processes. The white layer was approximately 23 µm thick covered the specimen surface. From soft nitriding processes, only small amount of carbon atom could diffuse into the specimen surface due to its low treated temperature. The layer of nitrogen and carbon compound was formed on the specimen surface instead [6]. After treatment by carburizing, the white layer was disappearing. The hardness profile of specimen treated by gas soft nitriding and carburizing, SN1CB1, was indicated in Fig. 5. Although the CB1 specimen showed the lowest surface hardness in this study, the specimen of SN1CB1 has the highest surface hardness. The case depth of the SN1CB1 is about

1.3 mm., in the same level of specimen treated by carbonitriding. Moreover, the variations of hardness data from 6 sampling points were found that very small compared other conditions. The very small variation of hardness could be observed at every distance from surface, as shown in Fig. 2, 3 and 5. This result could be the most advantage of the combined processes between gas soft nitriding and carburizing. It could be discussed that the combined processes taking longer treated time compared to other conditions. It might lead to the great diffusion and homogenous of carbon atom in specimen surface and its structure.

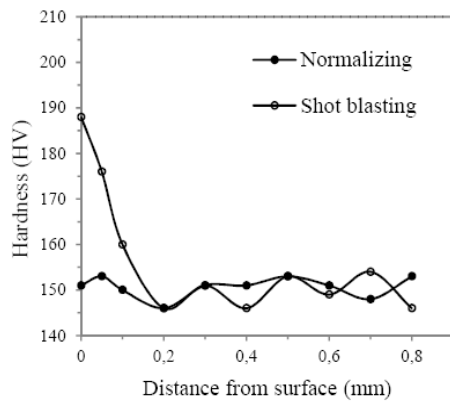


Fig. 1 Hardness profile of specimen as normalizing and shot blasting

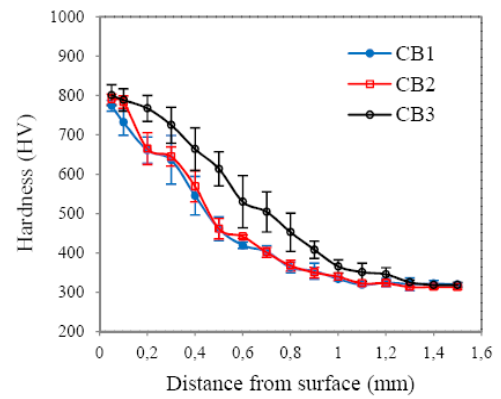


Fig. 2 Hardness profile of specimen as carburizing

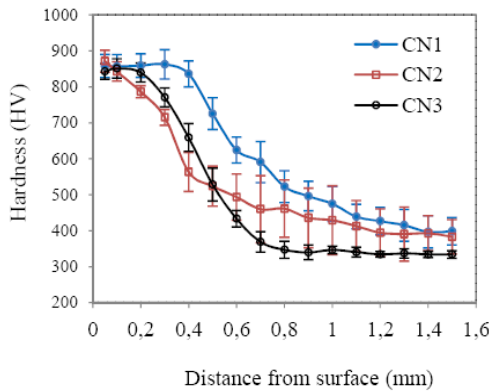


Fig. 3 Hardness profile of specimen as carbonitriding

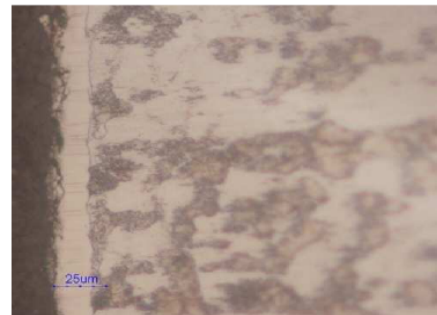


Fig. 4 White layer formed by soft nitriding process

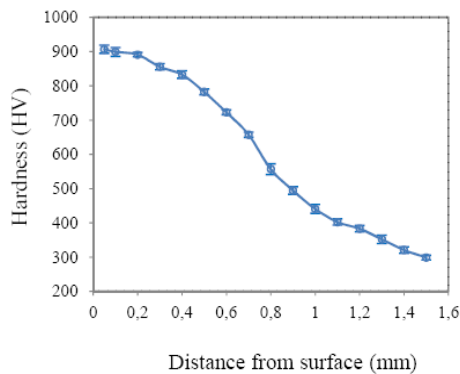


Fig. 5 Hardness profile of specimen as soft nitriding – carburizing

Table 3 Total case depth of specimen treated with various conditions

Condition	Gas Process	Total case depth (mm)
CB1	Carburizing1	0.85
CB2	Carburizing2	0.90
CB3	Carburizing3	1.00
CN1	Carbonitriding1	1.50
CN2	Carbonitriding2	1.30
CN3	Carbonitriding3	1.00
SN1CB1	Soft-nitriding1+Carburizing2	1.30

Conclusion

This study was aimed to investigate influence of combined processes between gas soft nitriding and gas carburizing on the hardness of low carbon steel. The specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Then the specimen was treated by gas carburizing, gas carbonitriding and combined processes between gas soft nitriding and gas carburizing. It was found that the combined processes yielded the good surface hardness and total case depth compared to other conditions in this study. The most advantage of the combined processes could be considered to be very small variation of hardness.

These results may help related industries to improve manufacturing process design and part specification tolerancing.

References

- ASM Metals Handbook: Heat Treating" Vol. 4, Metal Park, Ohio, ASM International. (c1987)
- ASM Metals Handbook: Surface engineering" Vol. 5, Metal Park, Ohio, ASM International. (c1987)
- R. Colaco, R. VilarY: On the influence of retained austenite in the abrasive wear behaviour of a laser surface melted tool steel, *Wear* 258 (2005) 225–231
- K.Palaniradja, N. Alagumurthi, V. Soundararajan: Optimization of Process Variables in Gas Carburizing Process: A Taguchi Study with Experimental Investigation on SAE 8620 and AISI 3310 Steels, *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 29 (2005), 279-284
- B. Selcuk, R. Ipek, M.B. Karamis: A study on friction and wear behavior of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115, *Journal of Materials Processing Technology* 141 (2003) 189-196
- Konstantin Sipos, Marta Lopez, Mauricio Trucco: Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel, *Rev. LatinAm. Metal. Mater.* 2008; 28 (1): 46-50

CORROSION RESISTANCE OF LOW CARBON STEEL TREATED BY GAS SURFACE HARDENING METHOD

Somsak Siwadamrongpong, Sorada Khaengkarn , Krid Tachee

¹ School of Manufacturing Engineering, ^{2,3} School of Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand

^{1*}: E-mail: somsaksi@sut.ac.th.Tel: 0-4422-4236, Fax: 0-4422-4613

ABSTRACT.

Low carbon steel is widely used in industries due to its low cost and easy to recycle. However, the low carbon steel is also known that be easily attacked by environment and has low strength compared with other kinds of steel. Therefore, the several surface coating and treatment techniques are employed to improve its properties. This study was aimed to investigate influence of surface hardening method on the corrosion of low carbon steel. The specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Then the specimen was treated by gas soft-nitriding, gas carburizing and gas carbonitriding method. It was found that the gas carburizing method yielded the good corrosion resistance compared to other methods. The most advantage of the carburized method could be considered to be very small variation of corrosion.

1. INTRODUCTION

Plain carbon steel is the most popular steel that used in industries due to low cost and easy to recycle. However, it is also known that plain carbon steel, especially low carbon steel, is quite weak among their kind and high rate of rust. Several surface treatment methods are selected to protect the surface from environment, which can improve its mechanical properties such as carburizing, carbonitriding and soft nitriding methods.

The gas carburizing method is well-known techniques that suitable for low carbon alloy steel. Carbon can be diffused into the steel surface lead to the higher surface hardness. The gas carbonitriding method is the technique that suitable for low carbon steel. The potential nitrogen and carbon use to treat to the surface in the controlled atmosphere.

The advantage of carbonitriding is reported that diffusion of carbon atom is greater due to the effect

from large size of nitrogen atom (ASM v.4, 1987). The gas soft-nitriding method is quite different technique from the 2 described techniques above. The additional hard and smooth layer, so call White Layer, will be formed cover the surface by this technique due to the piece part has not to be heated above eutectic temperature; it is appropriated to all kind of steels. All surface hardening techniques mentioned above will improve surface strength and also other properties such as fatigue and corrosion resistance. This study aims to investigate the influence of the gas soft nitriding, gas carburizing and gas carbonitriding methods to corrosion of low carbon steel.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURES

Low carbon steel AISI 1020 was used in this study. The composition of sample was tested and indicated in Table 1. The raw material was cut into specimen size of 25 mm diameter and 5 mm thickness. The specimens were brought into normalizing process at 850 C for 1 hour and shot blasting by steel ball 0.3 mm (ASM v.5, 1987) for surface cleaning. The various conditions of all gas surface hardening techniques were shown in Table 2. Hardness, case depth and corrosion resistances of treated specimens were investigated by 6 samples for each condition. The samples were measured the size and weight. For the corrosion resistance measurement (resistance to acid and heat), the samples were soaked into the hydrochloric acid at concentration 1.86 and 5.55 percent (ASM v.13, 1987 and G Kreysa and M Schutze, 2004) in the 100 ml bottles separately, at 70°C for 1 hour. Then analyzed the acid solution by AAS (Atomic Absorption Spectroscopy) and measured weight of specimens.

Table 1 Compositions of low carbon steel AISI 1020 (wt %)

AISI	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Al	Cu	Fe
1020	0.2040	0.7756	0.2348	0.0113	0.0195	0.0056	0.0152	0.0078	0.0011	Bal.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The total case depth, white layer and hardness of specimen were illustrated in Table 3. The Corrosion rate profile of specimen of normalizing, soft nitriding, carburizing and carbonitriding methods were illustrated in Fig. 1. It was found that, the soft nitriding method had low corrosion resistance in both of 1.85 and 5.55% HCl concentrations which the same trends. The corrosion rate of SN1 at 1.85 and 5.55% HCl concentrations were 1.19 and 1.76 $\text{mg/l}\cdot\text{mm}^2$, respectively (Ehteram A Noor and Aisha H, 2008). The corrosion rate of SN2 and SN3 were lower than SN1 according to the thickness of white layer (Fig. 3 and Fig. 4). The white layer was approximately 19-23 μm thick covered the specimen surface shown in Table 3. For the carburizing method, the specimens at 1.85% and 5.55% HCl had the similar corrosion rate 0.37-0.46 $\text{g/l}\cdot\text{mm}^2$. From the Fig. 1, the carburizing method had the highest corrosion resistance, and the corrosion rate about 0.37-0.42 $\text{mg/l}\cdot\text{mm}^2$. The CB1 was the most corrosion resistance about 0.37-0.42 $\text{mg/l}\cdot\text{mm}^2$. The CB1 was better than CB2 and CB3, because it takes the time to treatment longer than CB2 and the

soaking process used higher temperature than CB3. However, there was very little difference of corrosion resistance, and it was found that the corrosion resistance is dependent on the total case depth (Fig. 5 and Fig 6). The carbonitriding method had corrosion resistance better than the soft nitriding method but lower than the carburizing and normalizing methods. The corrosion rate of CN1 at 1.85% and 5.55% HCl concentrations were 0.33 and 1.04 $\text{mg/l}\cdot\text{mm}^2$, respectively. The CN1 was better corrosion resistance than CN2 and CN3, because it takes the time to treatment longer than CB2 and use highest temperature for oil quenching process. Considering the total case depth shown in Table 3, it was found that the corrosion resistance was not only dependent on total case depth (shown in Fig. 5 and Fig 6), but also hardness of surface (shown in Fig. 7 and Fig. 8). The trend of weight loss was similar to the trend of corrosion rate. The weight loss profiles of specimens of normalizing, soft nitriding, carburizing and carbonitriding methods were illustrated in Fig. 2. The minimum weight loss was CB and the maximum weight loss was SN, as same as the corrosion rate.

Table 2 Treatment conditions of specimens by various gas surface hardening methods

Condition	Gas Process	Temp (°C)	Time (min)	Atmosphere	Diffusion 0.8%C.P	Soaking 0.8%C.P	Oil Quenching
SN1	Soft-nitriding1	570	180	C:NH ₃ (10:10) m^3/hr	-	-	100°C,30m
SN2	Soft-nitriding2	550	240	C:NH ₃ (6:15) m^3/hr	-	-	100°C,30m
SN3	Soft-nitriding3	560	120	C:NH ₃ (12:15) m^3/hr	-	-	100°C,30m
CB1	Carburizing1	930	150	C.P (1.2%)	930°C,1hr	870°C,30m	60°C,30m
CB2	Carburizing2	930	120	C.P (1.2%)	930°C,1hr	870°C,30m	60°C,30m
CB3	Carburizing3	930	150	C.P (1.2%)	930°C,1hr	850°C,30m	60°C,30m
CN1	Carbonitriding1	840	205	C.P-NH ₃ (1.1-1%)	-	-	70°C,30m
CN2	Carbonitriding2	890	180	C.P-NH ₃ (1-0.75%)	-	-	60°C,30m
CN3	Carbonitriding3	870	180	C.P-NH ₃ (1-0.75%)	-	-	60°C,30m

Table 3 Total case depth, white layer and hardness of specimen treated with various conditions

Condition	Gas Process	Total case depth (mm)	White layer (μm)	Hardness at 0.4 mm (HV)
SN1	Soft-nitriding1	-	23	-
SN2	Soft-nitriding2	-	20	-
SN3	Soft-nitriding3	-	19	-
CB1	Carburizing1	0.85	-	545
CB2	Carburizing2	0.90	-	569
CB3	Carburizing3	1.00	-	664
CN1	Carbonitriding1	1.50	-	836
CN2	Carbonitriding2	1.30	-	564
CN3	Carbonitriding3	1.00	-	659

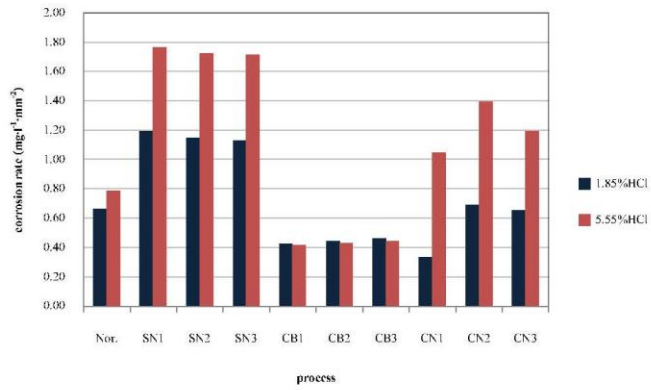


Fig. 1 Corrosion rate profile of specimen treated by gas surface hardening

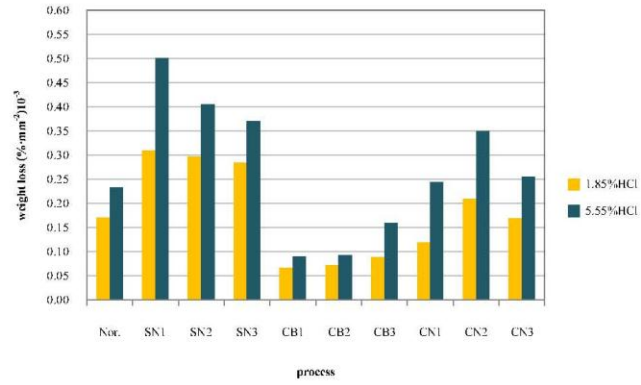


Fig. 2 Weight loss profile of specimen treated by gas surface hardening

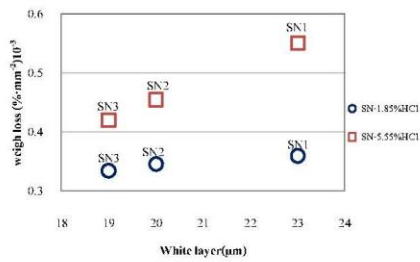


Fig.3 Relationship between weight loss and white layer

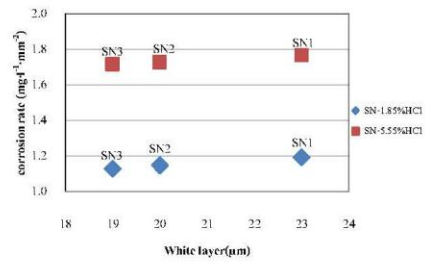


Fig.4 Relationship between corrosion rate and white layer

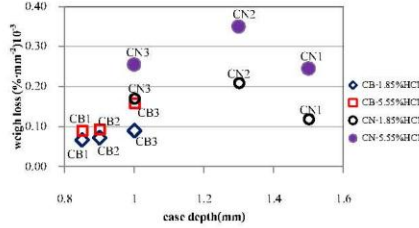


Fig.5 Relationship between weight loss and case depth

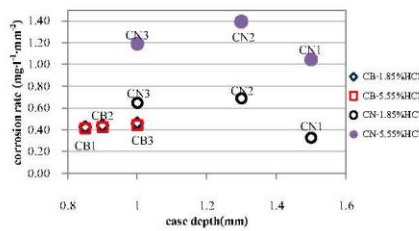


Fig.6 Relationship between corrosion rate and case depth

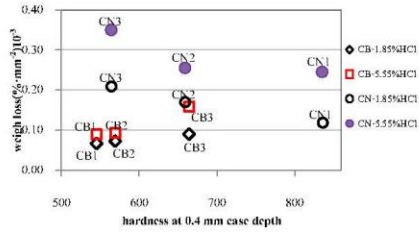


Fig.7 Relationship between weight loss and hardness

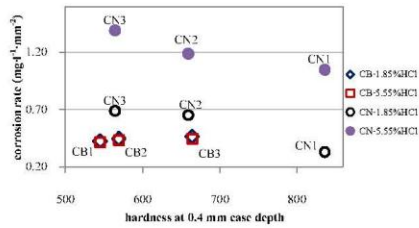


Fig.8 Relationship between corrosion rate and hardness

4. CONCLUSION

This study was aimed to investigate influence of gas surface hardening on the corrosion resistance of low carbon steel. The specimens were normalized by normalizing and shot blasting. Then the specimens were treated by the gas soft nitriding, gas carburizing and gas carbonitriding methods. The carburizing method had the higher corrosion resistance compared to other methods in this study. The most advantage of the carburized method could be considered to be very small variation of corrosion.

These results may help the related industries to improve manufacturing process design and part specification tolerance.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Suranaree University of Technology for financial support and Thai Tohken Thermo Co.,Ltd for sample preparation.

6. REFERENCES

ASM Handbook., Heat Treating., *Metierial Park Ohio. ASM International.*, Vol. 4, (1987)
 ASM Handbook., Surface engineering., *Metierial Park Ohio. ASM International*, Vol. 5, (1987)
 ASM Handbook., Corrosion., *Metierial Park Ohio. ASM International*, Vol. 13, (1987)
 G, Kreysa., M, Schutze., *Corrosion Handbook., Hydrochloric Acid, Nitric Acid Second.*, Vol. 2, (2004)
 Ehteram A, Noor., Aisha H, Al-Moubaraki., *Corrosion Behavior of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solutions.*, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 3 (2008) 806 - 818

ประวัติผู้วิจัย



somsaksi@sut.ac.th

อ. ดร. สมศักดิ์ สีวดำรงพงศ์

Dr. Somsak Siwadamrongpong

ID: 3 9599 00436 89 6

การศึกษา/คุณวุฒิ

- 2538 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ. เครื่องกล)
เกียรตินิยมอันดับ 2, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2544 Master of Engineering (M.Eng, Environmental
System Engineering), Nagaoka University of
Technology, Japan
- 2547 Doctor of Engineering (D.Eng, Energy and
Environment Science), Nagaoka University of
Technology, Japan

ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตร
วิศวกรรมการผลิต) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
โทร. 044-224-236 แฟกซ์. 044-224-613 e-mail.
somsaksi@sut.ac.th

ประวัติการทำงาน

- พ.ศ. 2538 วิศวกร
บริษัท เอ บี บี เพาเวอร์ จำกัด
- พ.ศ. 2539 - 2542 วิศวกรโครงการ ส่วนบำรุงรักษา
บริษัท สยามยูไนเต็ดสตีล (1995)
จำกัด
- พ.ศ. 2548 ผู้ช่วยผู้จัดการ ฝ่ายวิศวกรรม
บริษัท สยามยูไนเต็ดสตีล (1995)
จำกัด
- พ.ศ. 2549 - ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เกียรติประวัติที่ได้รับ

พ.ศ. 2542 – 2547 ได้รับทุนรัฐบาลญี่ปุ่นเพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและเอก ณ ประเทศญี่ปุ่น

งานวิจัยในปัจจุบัน

1. Study of comb lift time due to mechanical failure and chemical/thermal factor
แหล่งทุน บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
2. Develop new Gramload calibrator for Gramload tester calibration measurement
แหล่งทุน สวทช / บริษัท ฮิตาชิ โกลบอล สตอร์เรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
3. Improvement of Automation Machine for HGST Processing
แหล่งทุน สวทช / บริษัท ฮิตาชิ โกลบอล สตอร์เรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด
ตำแหน่ง ผู้ร่วมวิจัย
4. การออกแบบอุปกรณ์จับยึดและวางสายการผลิตในการประกอบ Chassis รถโดยสาร
แหล่งทุน iTAP / บริษัท อู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ

ผลงานวิชาการ

บทความวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

- S. Siwadamrongpong**, M. Koide and K. Matusita, 塩素含有ガラス融液の電気伝導度, 8th Asian Symposium on Ecotechnology, December 2001, Toyama Japan.
- T. Yoshikawa, **S. Siwadamrongpong**, M. Koide and K. Matusita, *Diffusion behavior of chloride in glass melts – Simulation with Molecular Dynamics*, 8th Asian Symposium on Ecotechnology, December 2001, Toyama Japan.
- S. Siwadamrongpong**, M. Koide and K. Matusita, *Electrical conductivity of glass melts containing chloride at high temperature*, 15th Fall Meeting of the Ceramic Society of

Japan, September 2002, Akita Japan.

N. Kamiyama, K. Matusita, M. Koide and **S. Siwadamrongpong**, *Chemical durability of glasses containing chloride*, 15th Fall Meeting of the Ceramic Society of Japan, September 2002, Akita Japan.

S. Siwadamrongpong, M. Koide and K. Matusita, *Electrical conductivity of CaO-Al₂O₃-SiO₂ glass melts containing chloride*, 9th Asian Symposium on Ecotechnology, December 2002, Toyama Japan.

S. Siwadamrongpong, M. Koide and K. Matusita, *Electrical conductivity of glass melts containing chloride*, J. Ecotech. Res., 9 (1), 15-20 (2003).

S. Siwadamrongpong, M. Koide and K. Matusita, *Chloride solubility in calcium alumino-silicate glasses*, XX International Congress on Glass, September 2004, Kyoto Japan.

S. Siwadamrongpong, M. Koide and K. Matusita, *Prediction of chloride solubility in CaO-Al₂O₃-SiO₂ glass systems*, J. Non-Cryst. Solids, 347, 114-120 (2004).

S. Siwadamrongpong, M. Koide and K. Matusita, *Structure of ternary alumino-silicate glasses – condition of the existence of triclusters*, J. Ceram. Soc. Japan, 112(11), 590-593 (2004).

C. Subpasupsiri and **S. Siwadamrongpong**, *Development of screw inspection by image processing process*, The 2nd International Data Storage Technology Conference “DST-CON 2009”, May 2009, Bangkok Thailand

เฉลิมพงศ์ สรรพทรัพย์ศิริ, ดวงใจ เชิดพุดซา และ สมศักดิ์ ทิวดำรงพงศ์, *Development Of Screw Inspection By Image Processing Process*, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

Somsak Siwadamrongpong, Usawadee Ongarjwutichai, *Jig Design for Bus Chassis Platform Production*, The 6th International Conference on Automotive Engineering (ICAE-6), 29 Mar - 2 Apr 2010, Bangkok Thailand

Chaiwinee Laksana, **Siwadamrongpong Somsak**, *Study on Stiffness of Suspension-like Thin Sheet*, The 3rd

International Data Storage Technology Conference “DST-CON 2010”, May 2010, Bangkok Thailand (Accepted)

สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และ ลักษณะ ชัยวินี การศึกษาค่าความยืดหยุ่นเชิงกลของโลหะแผ่นบาง การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 จังหวัดอุบลราชธานี 2553

สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และ อุษาวดี อองอาจวุฒิชัย การออกแบบชุดจับยึดสำหรับการผลิตโครงสร้างหลักรถโดยสาร การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 จังหวัดอุบลราชธานี 2553

Somsak Siwadamrongpong and Usawadee Ongarjwutichai, *Simulation and Design of Production Jigs for Bus Chassis, The 9th International Conference on SYSTEM SCIENCE and SIMULATION in ENGINEERING (ICOSSSE'10), Iwate, Japan*

ผลงานอื่นๆ

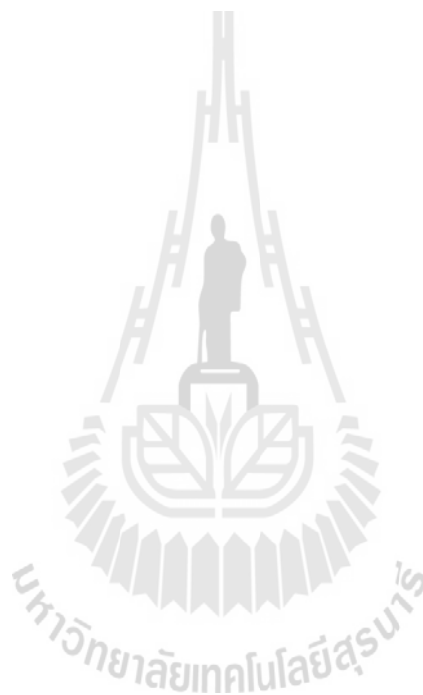
1. ผู้เชี่ยวชาญในการดำเนินโครงการ “การบริหารการจัดการองค์การและปรับปรุงกระบวนการผลิตใหม่” บริษัท เอเชีย คาบิเนต จำกัด จ.สุรินทร์ ภายใต้โครงการ CF ของศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมภาค 6, มกราคม – สิงหาคม 2551
2. ผู้ดำเนินโครงการ “E-learning for Seagate” ในการจัดสร้างระบบฐานข้อมูลและสื่อการเรียนอิเล็กทรอนิกส์ให้กับบริษัทซีเกท ในด้านพื้นฐานความรู้ การติดตั้งเครื่อง และแก้ไขปัญหาของเครื่องจักรของบริษัท
3. วิทยากรบรรยายเรื่อง Hard Disk Drive Manufacturing, Recording Head Manufacturing, TPM ของสถาบัน SUT-HDDI Hard Disk Drive Training Center (NECTEC)
4. กรรมการในคณะกรรมการ Technical Program Committee ของการประชุมวิชาการนานาชาติ DST-CON 2009, Bangkok Thailand
5. ประธานฝ่ายวิชาการ และคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, จ.นครราชสีมา

งานวิจัยที่สนใจ

1. Heat treatment processes and Material properties (Metal, Ceramic and Polymers)
2. Reliability of Product, Processes and Parts.
3. Jig & Fixture Design for Manufacturing / Maintenance

ความเชี่ยวชาญ

1. การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานและอาคาร
2. Maintenance System
3. Productivity Improvement
4. Jig & Fixture Design for Manufacturing /
Maintenance
5. Material Sciences (Glasses)





C_CC_CCC@hotmail.com

กฤษฎี ทาชี

Krid Tachee

ระบุเลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1 8415 00014 95 9

การศึกษา/คุณวุฒิ

2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2546 มัธยมศึกษาตอนต้น-ปลาย โรงเรียนเวียงสระ จ.สุราษฎร์ธานี

ตำแหน่งปัจจุบัน

นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (ระดับปริญญาโท)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการฝึกทำงาน

2550 บริษัท ยูไอเอฟ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ตำแหน่ง ผู้ช่วยวิศวกรแผนกซ่อมบำรุง
หน้าที่ความรับผิดชอบ ควบคุมดูแลการซ่อมบำรุงและจัดทำเอกสาร

ผลงานวิชาการ

กฤษฎี ทาชี, ขงยุทธ จันทร์จอม, รัตนาพร หมกทอง, ธวัชชัย น้อยจันอัด, *e-learning*
(machine and forming process), 2550

งานวิจัยที่สนใจ

Material Properties, Plant Layout and Design