

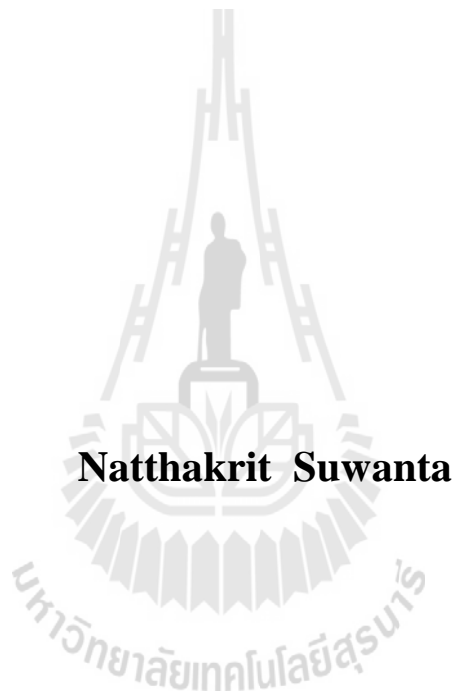
การศึกษาคูณสมบัติเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวร่วม
ระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง



นายณัฐกฤต สุวรรณทา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**STUDY OF STEEL PROPERTIES TREATED BY
COMBINED PROCESSES BETWEEN
GAS SOFT-NITRIDING AND
GAS CARBURIZING**



Natthakrit Suwanta

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

การศึกษาคูณสมบัติหลักกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวร่วม
ระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อุษณีย์ กิตกำธร)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐฤกษ์ สุวรรณทา : การศึกษาคุณสมบัติเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (STUDY OF STEEL PROPERTIES TREATED BY COMBINED PROCESSES BETWEEN GAS SOFT-NITRIDING AND GAS CARBURIZING) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, 111 หน้า.

การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สเป็นการชุบแข็งวิธีการหนึ่ง ซึ่งทำให้ได้ความแข็งแรงเฉพาะบริเวณผิวของชิ้นงาน ส่วนความแข็งแรงภายในผิวถึงแกนกลางยังคงมีลักษณะคล้ายกับเนื้อวัสดุเดิมที่มีความเหนียวกว่าบริเวณผิวแข็ง การชุบแข็งด้วยวิธีนี้ช่วยให้ชิ้นงานทนต่อการสึกหรอ ทนต่อการรับแรงบิดและแรงกระแทกในขณะใช้งานได้ดี กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สจึงเป็นกระบวนการชุบแข็งผิวที่นิยมในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาประหยัด ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพทั้งผิวแข็งและความเหนียว อีกทั้งยังสามารถควบคุมบรรยากาศในการอบชุบได้ง่ายและส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการอื่น ๆ โดยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง จะใช้การแพร่ของอะตอมคาร์บอนเข้าไปสู่ผิวชิ้นงานในขณะที่เหล็กมีโครงสร้างเป็นออสเตไนต์ ในขณะที่กระบวนการแก๊สคาร์โบไนไตรดิงจะใช้ทั้งธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนในการชุบแข็งผิว ซึ่งจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น ส่วนกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง เป็นการสร้างโครงสร้างสารประกอบ ซึ่งมีความแข็งสูงเคลือบผิวชิ้นงานไว้ นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาถึงการใช้กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สร่วมกันระหว่างกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง ซึ่งพบว่ากระบวนการร่วมดังกล่าว ได้ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของค่าความแข็งภายในผิวชิ้นงานในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และยังให้ความแข็งผิวใกล้เคียงกับกระบวนการแก๊สคาร์โบไนไตรดิง งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของกระบวนการร่วมนี้ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลอื่น ๆ ของเหล็กกล้าที่จะนำมาอบชุบแข็งผิว ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม AISI 1010, 1020, 1040, 4140 และ 4340 ที่ผ่านการขึ้นรูปและปรับปรุงโครงสร้างด้วยการอบปกติและทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ จากนั้นนำไปปรับปรุงสมบัติด้วยการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สทั้งหมด 5 กระบวนการ คือ แก๊สซอพต์ไนไตรดิง, แก๊สคาร์บูไรซิง, แก๊สคาร์โบไนไตรดิง และกระบวนการร่วมอีก 2 กระบวนการคือ กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง และกระบวนการร่วมระหว่างคาร์บูไรซิงกับซอพต์ไนไตรดิง ผลการดำเนินงานวิจัยพบว่า กระบวนการร่วมระหว่างซอพต์ไนไตรดิงกับคาร์บูไรซิงสามารถปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม ทั้งด้านความแข็งและการรับแรงดึงให้มีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สคาร์โบไนไตรดิง ในขณะที่ให้สมบัติด้านความเหนียวสูงกว่า ส่วนกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ไนไตรดิง ช่วยให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด

และค่าความแข็งแรง ณ จุดครากในการรับแรงดึงสูงขึ้น แต่ทำให้เกิดโครงสร้างชั้นผิวบางกว่า
หุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งเพียงอย่างเดียว



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2556

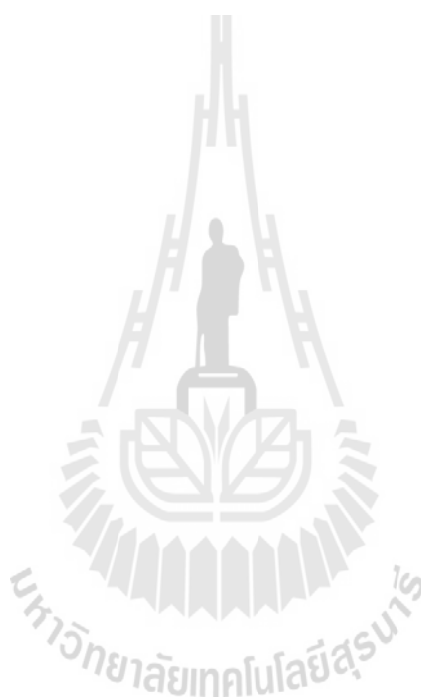
ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

NATTHAKRIT SUWANTA : STUDY OF STEEL PROPERTIES
TREATED BY COMBINED PROCESSES BETWEEN GAS SOFT-
NITRIDING AND GAS CARBURIZING. THESIS ADVISOR :
SOMSAK SIWADAMRONGPONG, D.Eng., 111 PP.

COMBINED PROCESS/ STEEL/ MECHANICAL PROPERTIES

Gas surface hardening methods, for instance, gas carburizing, gas carbonitriding and gas soft-nitriding are conventional techniques that improve mechanical properties of carbon and alloy steels, and mostly used for production process in industrials because there processes are low cost, less pollution and easy to control atmosphere in furnace. Gas carburizing methods is technique that employed carbon diffusion to increase surface hardness, while the steel structure changing to austenite phase. Gas carbonitriding method, both carbon and nitrogen were used in furnace atmosphere. Gas soft-nitriding method is the technique that formed hard and smooth layer, so called white layer. The previous study has reported that the combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing yielded the improvement of the steel properties similar to gas carbonitriding. However, the understanding of the relationship between combined processes and surface hardness is still unclear. This study was aimed to investigate the effect of combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing on mechanical properties of various steel e.g., AISI 1010, 1020, 1040, 4140 and 4340. The specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Gas soft-nitriding, gas carburizing, gas carbonitriding and the combined processes were employed to treat the specimen. Microhardness and optical microscopy were performed to characterize structure and properties of the

steel surfaces. The results signified that the combined processes, SN+CB, improve its properties compared to other methods especially in the ultimate tensile strength and the smoother and lower variation of section hardness, while the toughness was still acceptable. Moreover, the other combined process, CB+SN, yield higher strength with thinner white layer thickness.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจนำมากล่าวได้หมด ทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงให้คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแนะแนวทางแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยมา โดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด ซึ่งสนับสนุนอุปกรณ์ ในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยนี้

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอนให้คำแนะนำมาด้วยดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตกัทร ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงเพื่อนบัณฑิตทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดี ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ณัฐกฤต สุวรรณทา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	2
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรีक्षणัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ปรีक्षणัวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
2.3 เหล็กกล้า (Steel)	6
2.3.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel)	6
2.3.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy steels).....	8
2.3.3 ผลของธาตุที่ผลต่อเหล็กเฟอร์ไรต์	9
2.3.4 ผลของธาตุที่ผลต่อออสเตไนต์.....	9
2.3.5 ผลของนิเกิลและแมงกานีสที่มีต่อออสเตไนต์.....	10
2.3.6 ผลของโครเมียมที่มีต่อออสเตไนต์.....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.7	ผลของโมลลิบดินัมที่มีต่อออสเตไนต์.....	10
2.3.8	บทบาทของธาตุผสมที่มีต่อการฟอร์มคาร์ไบด์	10
2.3.9	บทบาทของธาตุที่มีผลต่อการชุบแข็ง	11
2.4	โลหะวิทยาของเหล็ก	12
2.4.1	โครงสร้างระบบผลึกของโลหะ (Metallic crystal).....	12
2.4.2	จุลโครงสร้างของโลหะ (Micro structure).....	13
2.4.3	การเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็กในขณะปล่อยให้เย็น	14
2.4.4	การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography)	16
2.5	การควบคุมบรรยากาศในเตา	17
2.5.1	บรรยากาศไนโตรเจน.....	17
2.5.2	บรรยากาศไฮโดรเจน	18
2.5.3	บรรยากาศไนโตรเจน-ไฮโดรเจน	19
2.5.4	บรรยากาศแก๊สเอกซ์โซเทอร์มิก (Exothermic gas).....	19
2.5.5	บรรยากาศแก๊สเอนโดเทอร์มิก (Endothermic gas).....	20
2.5.6	บรรยากาศสูญญากาศ.....	21
2.6	การอบปกติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ (Normalizing).....	23
2.7	การทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ (Shot blasting)	24
2.8	การชุบแข็งพื้นผิว (Surface Hardening).....	25
2.8.1	การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์บูไรซิง (Carburizing)	26
2.8.2	การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์โบไนไตรดิ้ง (Carbonitriding).....	27
2.8.3	การชุบแข็งผิวโดยวิธีซอฟต์ไนไตรดิ้ง (Soft-Nitriding)	28
2.9	คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ	29
2.9.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	29
2.9.2	การตรวจโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	29
2.9.3	การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing).....	33
2.9.4	การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing).....	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9.5 การศึกษาพื้นผิวการแตกหัก (Fractography)	40
2.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistics analysis)	41
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	45
3.1 กล่าวนำ	45
3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม	46
3.2.1 วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม	46
3.2.2 ลักษณะของชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสม	47
3.2.3 การอบปกติชิ้นทดสอบ	48
3.2.4 การพ่นทำความสะอาดผิวด้วยเม็ดโลหะ	49
3.3 กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส	50
3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	51
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	52
3.6 การทดสอบความแข็งและการซึมลึก	53
3.7 การตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวขาว	56
3.8 การทดสอบแรงดึง	58
3.9 การศึกษาพื้นผิวการแตกหัก	59
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	60
4.1 ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	61
4.1.1 ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าผสมก่อนกระบวนการชุบแข็งผิว	61
4.1.2 ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอนบริเวณผิวชิ้นทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส	61
4.2 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	63
4.2.1 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชิ้นทดสอบที่ยังไม่ผ่าน การชุบแข็งผิว	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2	ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่าน การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ในทรายคิง.....	63
4.2.3	ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่าน การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง.....	65
4.2.4	ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่าน การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบในทรายคิง.....	65
4.2.5	ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่าน การชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอพต์ในทรายคิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง.....	66
4.2.6	ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่าน การชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ในทรายคิง.....	66
4.3	ผลจากการทดสอบความแข็งและการซึมลึก.....	67
4.3.1	ผลจากการทดสอบความแข็งผิวของชั้นทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว.....	67
4.3.2	ผลจากการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวถึงแกนกลาง ของชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิว.....	69
4.3.3	ผลจากการวิเคราะห์ค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมด ของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว.....	72
4.4	ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว.....	73
4.5	ผลจากการทดสอบแรงดึง.....	75
4.6	ผลจากการศึกษาพื้นผิวการแตกหัก.....	80
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1	ผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอพต์ไนตรรายคิงและแก๊สคาร์บูไรซิงต่อสมบัติเชิงกล ของเหล็กกล้าคาร์บอน	86
5.1.2	ผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอพต์ไนตรรายคิงและแก๊สคาร์บูไรซิงต่อสมบัติเชิงกล ของเหล็กกล้าผสม	86
5.1.3	ผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สซอพต์ไนตรรายคิงต่อสมบัติเชิงกล ของเหล็กกล้าคาร์บอน	87
5.1.4	ผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สซอพต์ไนตรรายคิงต่อสมบัติเชิงกล ของเหล็กกล้าผสม	87
5.2	ข้อเสนอแนะ	87
	รายการอ้างอิง	88
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)	90
	ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	105
	ประวัติผู้เขียน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนด Effective case depth 36
3.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม..... 47
3.2	แสดงอุณหภูมิและเวลาในอบปกติขึ้นทดสอบ..... 49
4.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานของเหล็กกล้า 61
4.2	แสดงผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า..... 61
4.3	แสดงปริมาณธาตุคาร์บอนบริเวณผิวชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส 62
4.4	แสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยการทดสอบความแข็งใต้ผิวชั้นทดสอบ 72
ก.1	แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง 91
ก.2	แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง 91
ก.3	แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายดิง 91
ก.4	แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง 92
ก.5	แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง 92
ก.6	แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายดิง 92
ก.7	แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง 93
ก.8	แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง 93
ก.9	แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายดิง 93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.10	แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง	94
ก.11	แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง	94
ก.12	แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง	94
ก.13	แสดงผล One-way ANOVA: White layer thickness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ในทรายดิง	95
ก.14	แสดงผล One-way ANOVA: White layer thickness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ในทรายดิง	95
ก.15	แสดงผล One-way ANOVA: White layer thickness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ในทรายดิง	95
ก.16	แสดงผล One-way ANOVA: White layer thickness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ในทรายดิง	96
ก.17	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้า คาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง	96
ก.18	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้า คาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง	96
ก.19	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้า คาร์บอนที่ผ่านกระบวนการระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง	97
ก.20	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้า คาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ในทรายดิง	97
ก.21	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้า คาร์บอนที่ผ่านกระบวนการระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ในทรายดิง	97
ก.22	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้า ผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.23	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายิ่ง 98
ก.24	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายิ่งกับแก๊สคาร์บูไรซิ่ง 98
ก.25	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง 99
ก.26	แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง 99
ก.27	แสดงผล One-way ANOVA: Yield strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง 99
ก.28	แสดงผล One-way ANOVA: Yield strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง 100
ก.29	แสดงผล One-way ANOVA: Yield strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง 100
ก.30	แสดงผล One-way ANOVA: Yield strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง 100
ก.31	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิ่ง 101
ก.32	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายิ่ง 101
ก.33	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายิ่งกับแก๊สคาร์บูไรซิ่ง 101
ก.34	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง 102
ก.35	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง 102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.36	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง	102
ก.37	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง	103
ก.38	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง	103
ก.39	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง	103
ก.40	แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ไนไตรดิง	104

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงโครงสร้างระบบผลึกของโลหะ	13
2.2	แสดงอุณหภูมิของการอบปกติ.....	24
2.3	แสดง Spark emission spectrometer	29
2.4	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบระนาบผลึก	30
2.5	แสดงขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ตัวอย่าง	31
2.6	แสดงหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์	32
2.7	แสดงการเกิดรังสีเอ็กซ์.....	32
2.8	แสดงหัวข้อและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	34
2.9	แสดงการหาขนาดเส้นทแยงมุมเฉลี่ยในสองแนวซึ่งทำมุมกัน 90 องศา	35
2.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดในทางวิศวกรรม ในการทดสอบแรงดึงในแนวแกน	37
2.11	แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM	41
3.1	แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	46
3.2	แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ.....	48
3.3	แสดงกระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด.....	51
3.4	แสดงเครื่อง Optical emission spectrometer (OES)	52
3.5	แสดงขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ชิ้นทดสอบ	53
3.6	แสดงการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส	54
3.7	แสดงรอยกดที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส	55
3.8	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะการซึมลึก.....	55
3.9	แสดงโครงสร้างของชั้นสารประกอบไนโตรเจนบนผิวเหล็กกล้า	56
3.10	แสดงถ่ายภาพขนาดของชั้นผิวขาว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบออฟฟิคอล.....	57
3.11	แสดงลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึงและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับ ความเครียดสำหรับเหล็กเหนียว.....	58
3.12	แสดงลักษณะการจับยึดชิ้นทดสอบและเครื่อง SEM ที่ใช้ในการทดสอบ	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในขั้นตอนที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งผิว 63
4.2	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในขั้นตอนแก๊สซอพต์ในทรายคิง 64
4.3	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในขั้นตอนแก๊สคาร์บูไรซิง..... 64
4.4	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในขั้นตอนแก๊สคาร์โบไนตรายคิง 65
4.5	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในขั้นตอนที่กระบวนการร่วม ระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายคิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง..... 66
4.6	แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในขั้นตอนที่กระบวนการร่วม ระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ในทรายคิง..... 67
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface Hardness กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน..... 67
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface Hardness กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม 69
4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับระยะจากผิวถึงแกนกลาง ของขั้นตอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง 70
4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับระยะจากผิวถึงแกนกลางของ ขั้นตอนที่ผ่านกระบวนการระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายคิงกับคาร์บูไรซิง..... 71
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับระยะจากผิวถึงแกนกลางของ ขั้นตอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายคิง 71
4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Total case depth กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน..... 72
4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Total case depth กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม 73
4.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง White layer thicknessกับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน..... 74
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง White layer thicknessกับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม 75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ultimate tensile strength กับกระบวนการ ชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน	76
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ultimate tensile strength กับกระบวนการ ชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าผสม	76
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Yield strength กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน	77
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Yield strength กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม	78
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน	79
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม	79
4.22 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ เหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง	81
4.23 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ เหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง	82
4.24 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ เหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง	83
4.25 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ เหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง	84
4.26 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ เหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ไนไตรดิง	85

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	Ferrite
γ	=	Austenite
γ'	=	Fe_4N
ε	=	Fe_{2-3}N
AISI	=	American Iron and Steel Institute
ANOVA	=	Analysis of Variance
ASM	=	American Society for Metals
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
BCC	=	Body Centered Cubic
CB	=	Carburizing
CN	=	Carbomitridding
Combined 1	=	Soft nitriding + Carburizing
Combined 2	=	Carburizing + Soft nitriding
Deg.	=	Degree
FCC	=	Face Centered Cubic
H_0	=	Null Hypothesis
HCP	=	Hexagonal Close Packed
HV	=	Vickers hardness
mm	=	Millimeter
OES	=	Optical emission spectrometer
SEM	=	Scanning Electron Microscope
SN	=	Soft nitriding
UTM	=	Universal testing machine
UTS	=	Ultimate tensile strength
XRD	=	X-ray diffraction

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส (Gas surface hardening) เป็นการชุบแข็งอีกวิธีการหนึ่ง เพื่อให้ได้ความแข็งแรงเฉพาะบริเวณผิวของชิ้นงาน ส่วนความแข็งภายในผิวจนถึงแกนกลางจะมีสมบัติคล้ายกับเนื้อวัสดุเดิมซึ่งมีความเหนียวกว่าบริเวณผิวแข็ง ทำให้ชิ้นงานทนต่อการสึกหรอ ในขณะที่การใช้งาน ทนต่อการรับแรงบิดหรือแรงกระแทกได้ดีโดยไม่เกิดความเสียหายกับชิ้นงาน ซึ่งต่างจากการบวนการชุบแข็ง (Quenching) ซึ่งชิ้นงานจะมีความแข็งทั้งตัวชิ้นงาน ทำให้มีความเปราะไม่สามารถใช้งานที่มีแรงกระทำสูง ๆ ได้ ถึงแม้จะทำการอบคืนไฟ (Tempering) เพื่อให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น ก็จะสามารถลดความแข็งที่ผิวไป ทำให้ทนต่อการสึกหรอได้น้อยลง และการชุบแข็งด้วยวิธีการนี้ เหล็กกล้าที่จะนำมาชุบแข็งจะต้องมีปริมาณคาร์บอนตั้งแต่ 0.3% ขึ้นไป ต่างจากการชุบแข็งผิว ซึ่งสามารถทำได้กับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำได้ กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สจึงเป็นกระบวนการชุบแข็งผิวที่นิยมในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากมีราคาประหยัด ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพทั้งผิวแข็งและความเหนียว อีกทั้งยังสามารถควบคุมบรรยากาศในการอบชุบได้ง่ายกว่าการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการอื่น ๆ

กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ซอฟต์ไนไตรดิง (Soft-nitriding), คาร์บูไรซิง (Carburizing) และ คาร์โบไนไตรดิง (Carbonitriding) ตัวอย่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่นิยมนำมาชุบแข็งผิว ได้แก่ เพลาข้อเหวี่ยง เพลาแรวลิ้น เฟืองเกียร์ เป็นต้น โดยกระบวนการคาร์บูไรซิง และคาร์โบไนไตรดิง จะมีลักษณะกระบวนการคล้ายกัน คือใช้การแพร่อะตอมของธาตุคาร์บอนเข้าไปสู่ผิวชิ้นงานในขณะที่เหล็กมีโครงสร้างเป็นออสเตไนต์ ส่วนกระบวนการคาร์โบไนไตรดิงจะใช้ทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนในการชุบแข็งผิว ซึ่งจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น ส่วนกระบวนการซอฟต์ไนไตรดิง เป็นการสร้างโครงสร้างสารประกอบ ซึ่งมีความแข็งสูงเคลือบผิวชิ้นงานไว้

อย่างไรก็ตาม ได้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาถึงการใช้กระบวนการอบชุบแข็งผิวด้วยแก๊สร่วมกันระหว่างกระบวนการซอฟต์ไนไตรดิงและคาร์บูไรซิง ซึ่งพบว่ากระบวนการร่วมดังกล่าว ได้ส่งผลต่อความสม่ำเสมอของค่าความแข็งภายในผิวชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และยังให้ความแข็งผิวคล้ายกับกระบวนการคาร์โบไนไตรดิง งานวิจัยนี้จึงได้เห็นความสำคัญของกระบวนการร่วมนี้ ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลอื่น ๆ รวมถึงส่งผลต่อชนิดของเหล็กกล้าที่จะนำมาอบชุบแข็งผิว

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาวิจัยผลกระทบของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง ต่อสมบัติเชิงกล โครงสร้างและความแข็งผิวของเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมชนิดต่าง ๆ โดยคาดว่าจะสามารถนำไปใช้พัฒนากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง ต่อสมบัติเชิงกล โครงสร้างและความแข็งผิวของเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาถึงอิทธิพลของการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่ง และ แก๊สคาร์บูไรซิง ของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม AISI 1010, 1020, 1040, 4140 และ 4340

1.3.2 ศึกษาผลกระทบของกระบวนการชุบแข็งผิวต่อสมบัติเชิงกล โครงสร้าง ความหนาชั้นผิวแข็ง และความแข็งผิว

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบขั้นตอนทดสอบและกระบวนการทดลอง

1.4.3 เตรียมขั้นตอนทดสอบจากวัสดุเหล็กกล้า

1.4.4 ทำการทดลองตามกระบวนการและทดสอบขั้นตอนทดสอบตามที่ได้ออกแบบ

1.4.5 วิเคราะห์การทดลอง

1.4.6 สรุปผลการทดลอง

1.4.7 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 6 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 บริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1.6.1 เตาชุบแข็งผิวของบริษัทไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด ใช้ทำกระบวนการอบปกติ, กระบวนการชุบแข็งผิวของซอฟต์แวร์ในทรายดิ่ง, คาร์บูไรซิง และคาร์โบไนไตรดิ่ง

1.6.2 เครื่อง Shot blast ของ Growell รุ่น GW-10 สำหรับทำความสะอาดผิวของชิ้นงานที่ผ่านการอบปกติ

1.6.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสะท้อน (Optical microscopes) ของ Nikon measuring microscope รุ่น MM-400 และ โปรแกรม NIS-Element D สำหรับการตรวจดูโครงสร้างของชิ้นทดสอบรวมถึงชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้นในกระบวนการซอฟต์แวร์ในทรายดิ่ง

1.6.4 เครื่อง Micro Vickers hardness testing ของ Future-Tech รุ่น FM-700 ใช้สำหรับการวัดค่าความแข็งผิวและความแข็งลึกของชิ้นทดสอบ

1.6.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer : XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบและศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของชิ้นทดสอบ

1.6.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM) ของ JEOL รุ่น JSM6010LV ใช้ในการศึกษาพื้นฐานและรายละเอียดของลักษณะผิวของชิ้นทดสอบ เช่น พื้นผิวภายนอกของชิ้นทดสอบ และพื้นผิวรอยแตกจากการทดสอบแรงดึง

1.6.7 เครื่อง Optical emission spectrometer ของ ARL 3460 METALS ANALYZER ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ธาตุประกอบในชิ้นทดสอบ

1.6.8 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine : UTM) ของ Instron ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN ใช้ในการทดสอบแรงดึงในแนวแกนของชิ้นทดสอบ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจถึงผลของการชุบแข็งผิวเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิงต่อ โครงสร้างจุลภาค ความแข็งและความลึกผิวแข็งของเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมได้

เข้าใจถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกวัสดุและกรรมวิธีการปรับปรุงผิววัสดุเพื่อเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพการปรับปรุงผิววัสดุในอุตสาหกรรมยานยนต์ หรืออุตสาหกรรมอื่นที่ใช้วัสดุเหล็กกล้าเป็นวัตถุดิบ

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรม ทฤษฎีบท รวมไปถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การศึกษางานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการศึกษากระบวนการอบชุบเหล็กกล้าเพื่อปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการผลิตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม โดยเนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น สองส่วนหลักดังนี้

ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและค้นคว้างานวิจัย เอกสาร รวมทั้ง วิทยานิพนธ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งได้เห็นถึงข้อดีของกระบวนการร่วมในการชุบแข็งผิว ด้วยแก๊ส ผู้วิจัยจึงเลือกกระบวนการดังกล่าวมาศึกษาสมบัติทางกลอื่น ๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ใน กระบวนการผลิตต่อไป นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการค้นคว้ารวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเป็นการศึกษากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สต่าง ๆ คือ ซอฟต์ไนตรรายดิง, คาร์บูไรซิง และ คาร์โบไนตรรายดิง กระบวนการชุบแข็งผิวเหล่านี้นิยมใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าให้ดีขึ้น แต่ละกระบวนการมีข้อดีต่างกันไป ซึ่งผู้ผลิตต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะการนำผลิตภัณฑ์ ไปใช้

สำหรับในส่วนที่สองในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีบทต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งผู้วิจัย ได้นำเสนอทฤษฎีซึ่งประกอบด้วยเนื้อหาสามส่วนหลัก โดยส่วนแรกคือทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง กับวัสดุที่ใช้ในการทดสอบคือ เหล็กกล้าและการเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการอบชุบเพื่อทดสอบ หาสมบัติต่าง ๆ โดยเหล็กกล้าที่ได้ทำการศึกษาแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ เหล็กกล้าคาร์บอน และ เหล็กกล้าผสม ส่วนที่สองกล่าวถึงทฤษฎีการอบชุบแข็งผิวเหล็กกล้า ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกกระบวนการ ชุบแข็งผิวด้วยแก๊สมาใช้ในการวิจัย และส่วนท้ายสุดกล่าวถึงการทดสอบสมบัติของชิ้นตัวอย่าง

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สเป็นหนึ่งในกระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าที่ พบได้ในงานวิจัยและภาคอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้งานและศึกษาวิจัยอย่าง แพร่หลายทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่อยู่เสมอ ช่วยในการพัฒนากระบวนการผลิตให้รวดเร็วและ ก้าวหน้ามากขึ้น สำหรับการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย โดยมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

Mirjani, M., et al. (2009) ได้ศึกษาการด้านทานการสึกหรอในชิ้นงานที่ทำด้วยเหล็กกล้า C60W และผ่านกระบวนการไนโตรคาร์บูไรซิง (ซอฟต์แวร์ในทรายดิง) ทั้งแบบพลาสมาและแบบแก๊ส ที่อุณหภูมิ 570°C เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง จากงานวิจัยพบว่า เกิดโครงสร้าง ϵ และ γ' ขึ้นที่ผิวชั้นทดสอบในทุกกระบวนการ โดยระยะเวลาในการอบชุบแข็งผิวที่มากขึ้นส่งผลให้ ชั้นความหนาของโครงสร้างดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น แต่จะมีความด้านทานการสึกหรอลดลง และชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการไนโตรคาร์บูไรซิง แบบพลาสมา จะมีค่าความลึกผิวแข็งที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการอบชุบแบบแก๊ส

Fattah, M., and Mahboubi, F. (2012) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการด้านทานการกัดกร่อนในเหล็กกล้าผสม AISI 4140 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยพลาสมาไนโตรคาร์บูไรซิง ที่อุณหภูมิในช่วง 520-620°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากผลการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิ 620°C เกิดชั้นสารประกอบที่ผิวแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ส่วนที่มีรูพรุน และ โครงสร้างรูปเสาเหลี่ยม ส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะพบโครงสร้างแบบเดี่ยว ความแข็งผิวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการอบชุบ นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อุณหภูมิลบ 545°C ชั้นทดสอบมีความด้านทานการกัดกร่อนสูงสุด

Allenstein, A.N., et al. (2010) ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับ โครงสร้างสารประกอบไนโตรเจนบนผิวชั้นทดสอบเหล็กกล้า CA-6NM ภายหลังจากชุบแข็งผิวด้วยไนโตรทรายดิงแบบพลาสมาที่ 500°C และมีสัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนและไนโตรเจนต่างกัน ผลการวิจัยพบว่า โครงสร้างที่พบที่ผิวชั้นทดสอบได้แก่ $Fe_{2-3}N$ (ϵ), Fe_4N (γ') และ CrN โดยสัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนที่สูงกว่า ทำให้ความหนาของชั้นผิวขาวและความแข็งผิวสูงขึ้น (1200-1400 HV)

Foerster, C.E., et al. (2010) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำกระบวนการไนโตรคาร์บูไรซิง ที่อุณหภูมิ 300°C ของเหล็ก ANSI 304 แล้วดูคุณสมบัติของวัสดุเช่น โครงสร้าง ความแข็ง ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การทำที่บรรยากาศที่มี $N_2:CH_4-98:2$ ที่ 300°C เกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวมีคาร์บอนและไนโตรเจนแทรก ที่กว้างขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่บริเวณขอบจาก 2.5 GPa เป็น 11 GPa

Asi, O., et al. (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทำแก๊สคาร์บูไรซิงที่อุณหภูมิ 940°C เวลา 3 และ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 980°C เวลา 1 และ 2 ชั่วโมง แล้วดูค่าความแข็ง ความล้าของชิ้นงาน ผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การทำคาร์บูไรซิงที่ 980°C มีลิมิตความล้าต่ำกว่าคาร์บูไรซิงที่ 940°C

Tokaji, K., et al. (2004) ได้ทำการศึกษาผลของการทำคาร์บูไรซิงด้วย NaCl ต่อ โครงสร้าง ความแข็ง พฤติกรรมของความล้าและกลไกของการแตกหัก ผลการวิจัยพบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำแก๊สคาร์บูไรซิง 35 ชั่วโมงให้ความแข็งที่ 1000 HV ซึ่งมากกว่าการทำ 15 ชั่วโมง ที่ 800 HV และพฤติกรรมการเกิดรอยแตกเริ่มแรกจะเกิดรอยแตกขนาดเล็กตรง

บริเวณขอบชิ้นงานระหว่างผิวแข็งที่เพิ่มขึ้นกับเนื้อชิ้นงาน ซึ่งความล้าก็เกิดจากการที่มีรอยแตกดังกล่าว

Selcuk, B., et al. (2003) ได้ศึกษาพฤติกรรมการเสียดทานและการสึกหรอในชิ้นทดสอบ เหล็กกล้า AISI 1020 และ 5115 ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยคาร์บูไรซิง, คาร์โบไนตรายดิง และ โบโรไนซิง ซึ่งผลการวิจัยพบว่า การชุบแข็งผิวด้วยคาร์โบไนตรายดิงให้สมบัติด้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าคาร์บูไรซิง แต่ให้ความลึกผิวแข็งที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่า

Siwadamrongpong, S., et al. (2011) ได้ศึกษาผลของการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง ซอฟต์ไนตรายดิง คาร์โบไนตรายดิง และปฏิกิริยาร่วมของแก๊สซอฟต์ไนตรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง ต่อโครงสร้าง ความแข็งแรง ความแข็ง และระยะความแข็งลึกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ผลการวิจัยพบว่าความแข็งและระยะความแข็งลึกของชิ้นงานจากกระบวนการร่วมดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับวิธีแก๊สคาร์โบไนตรายดิง (กระบวนการปรับปรุงที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ) และยังให้ค่าความสม่ำเสมอของความแข็งที่ผิวดีกว่าวิธีแก๊สคาร์โบไนตรายดิง

2.3 เหล็กกล้า (Steel)

เหล็กกล้า คือเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนผสม (มนัส สติรจินดา, 2543) ซึ่งเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า 2.0% จะถือได้ว่าเป็นเหล็กกล้า หากมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่มากกว่านี้ ถือได้ว่าเป็นเหล็กหล่อ นอกจากนี้อาจยังมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วยในลักษณะของธาตุเจือปน (impurities) เช่น ซิลิกอน, แมงกานีส, กำมะถัน และฟอสฟอรัส โดยทั่วไปเหล็กกล้าจะสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้สองกลุ่มคือ เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม

2.3.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) และความอ่อนตัว (Ductility) ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ได้ในช่วงกว้างมาก จึงวัสดุที่นิยมเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมกับลักษณะงานในทางช่าง โดยเหล็กกล้าคาร์บอนนี้ ถ้ามีปริมาณคาร์บอนในเหล็กผสมอยู่ต่างกันเพียงเล็กน้อย ก็ทำให้การทำการชุบแข็งหรือการขึ้นรูป (Mechanical forming) แตกต่างกัน รวมทั้งคุณสมบัติเชิงกลอีกด้วย เช่น ค่าความแข็งแรง และอัตราการยืดตัว (Elongation) เป็นต้น

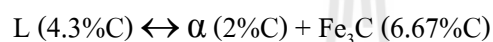
การศึกษาคูณสมบัติและการควบคุมคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนนั้น Equilibrium diagram ของเหล็กกับคาร์บอนมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องนำมาใช้อธิบายร่วมกัน ซึ่งปริมาณคาร์บอนมีความสำคัญต่อความแข็งแรงและความอ่อนตัว อย่างไรก็ตามในการศึกษา Equilibrium diagram ของเหล็กกับคาร์บอน ควรทราบถึงศัพท์เฉพาะที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ออสเตไนต์ (เหล็ก γ) คือ solid solution ของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุดถึง 2% (ใช้ 1.7% ในบางกรณี) ที่อุณหภูมิ 1130°C มีระบบผลึกเป็น face centered cubic

เฟอร์ไรต์ (เหล็ก α) คือ solid solution ของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุด 0.025% ที่อุณหภูมิ 723°C มีระบบผลึกเป็น body centered cubic

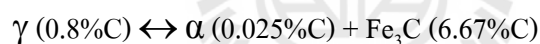
ซีเมนไต์ หรือเหล็กคาร์ไบด์ เป็น intermetallic compound ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนมีสูตรคือ Fe_3C มีความแข็งแรงสูง แต่เปราะไม่สามารถรับแรงกระแทกได้

ยูเต็คติค ที่เกี่ยวกับ Equilibrium diagram ของเหล็กคาร์บอนนี้ คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1130°C โดยเหล็กหลอมเหลวที่มีคาร์บอน 4.3% แยกตัวออกเป็น phase γ มีคาร์บอน 2% กับซีเมนไต์ มีคาร์บอน 6.67%



จากปฏิกิริยายูเต็คติค แสดงว่า อาจเกิดการรวมระหว่าง γ กับ Fe_3C และให้เหล็กหลอมเหลวก็ได้เรียกปฏิกิริยายูเต็คติคเหมือนกันแต่จะเกิดเมื่อเหล็กถูกเผาให้ความร้อน

ยูเต็คตอยด์ มีลักษณะคล้ายคลึงกับปฏิกิริยายูเต็คติค ต่างกันที่ปฏิกิริยานี้เกิดในสภาพของแข็ง ซึ่งเป็นการแยกตัวของ phase γ ไปเป็น phase α กับ Fe_3C หรืออาจเกิดจากการรวมตัวของ phase α กับ Fe_3C ให้ γ ได้เช่นเดียวกัน



เพิร์ไลต์ คือผลึกรวมระหว่างเฟอร์ไรต์ (α) 0.025%C กับซีเมนไต์ 6.67%C ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยายูเต็คตอยด์ ในขณะที่ทำให้เย็นช้า ๆ การเกิดจะสลับกันเป็นแถบยาว (lamellar structure) ของเฟอร์ไรต์กับซีเมนไต์ ดังนั้นเพิร์ไลต์จึงไม่ใช่ phase เดียว แต่เป็นสอง phase ประกอบกัน

A_{cm} คือ เส้นแสดงอุณหภูมิการเปลี่ยน phase จากออสเตไนต์มาเป็นซีเมนไต์ ในขณะที่เหล็กเย็นตัวลงมา ถ้าทำให้เหล็กร้อนขึ้นก็จะเป็นเส้นแสดงการเปลี่ยนซีเมนไต์เป็นออสเตไนต์

A_3 คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของออสเตไนต์มาเป็นเฟอร์ไรต์ ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็น และเป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟอร์ไรต์เป็นออสเตไนต์ ในขณะที่ทำให้เหล็กร้อน

A_2 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะแม่เหล็กของเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะมีอุณหภูมิประมาณ 768 °C เส้น A_2 ไม่มีการเปลี่ยน phase ดังนั้นจึงไม่ปรากฏใน Equilibrium diagram

A_1 คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยายูเต็คตอยด์ คืออุณหภูมิ 723°C ทั่ว ๆ ไป มักจะเขียน r กับ c ต่อท้าย A_3 และ A_1 เช่น Ar_3 , Ar_1 , Ac_3 และ Ac_1 เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย ว่าอุณหภูมิ

นั้น ๆ เป็นอุณหภูมิของการทำให้ร้อน หรือทำให้เย็น โดย r หมายถึง ทำให้เย็น (refroidissement) และ c หมายถึง ทำให้ร้อน (chauffage)

2.3.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy steels)

เหล็กกล้าผสมคือ เหล็กที่ผสมธาตุต่าง ๆ นอกเหนือไปจากธาตุคาร์บอนและธาตุบางตัวที่คิดมาเนื่องจากกรรมวิธีการถลุง (Mn, Si, S และ P) การผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กก็เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่เหล็กคาร์บอนให้คุณสมบัติไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ ทำให้ไม่สามารถใช้งานดี อย่างไรก็ตามการผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กจะทำให้เหล็กมีราคาสูงขึ้น แต่ความมุ่งหมายของการผสมธาตุดังกล่าวมีหลายประการดังนี้

- 1) เพิ่มคุณสมบัติด้านชุบแข็ง
- 2) ปรับปรุงความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติ
- 3) เพิ่มคุณสมบัติด้านทานความสึกหรอ เนื่องจากการเสียดสีขณะใช้งาน
- 4) เพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทก
- 5) เพิ่มคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อน
- 6) ปรับปรุงคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก

ธาตุที่ใช้ผสมในเหล็กมีหลายธาตุ ซึ่งให้ผลต่อเหล็กแตกต่างกันไป ในการศึกษาบทบาทของธาตุเหล่านี้ สามารถแยกออกเป็นกลุ่มเพื่อความสะดวก เช่น กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเตไนต์, กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์, กลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ และกลุ่มรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ ธาตุบางตัวอาจให้บทบาทได้หลายกลุ่ม

กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเตไนต์ ได้แก่ ธาตุนิเกิล, แมงกานีส และคาร์บอน จัดเป็นธาตุที่สำคัญในกลุ่มนี้ ซึ่งเมื่อผสมอยู่ในเหล็กจะมีบทบาทขยายอาณาเขตของออสเตไนต์ โดยช่วยลดอุณหภูมิของเส้น A_3 ให้ต่ำลง และเพิ่มอุณหภูมิของเส้น A_4 ให้สูงขึ้น เมื่อปริมาณของธาตุเหล่านี้เพิ่มขึ้น เหล็กผสมอาจจะมีโครงสร้างออสเตไนต์ที่อุณหภูมิปกติ ถ้าปริมาณของธาตุที่ผสมมีมากพอธาตุในกลุ่มนี้จะมีระบบผลึกเป็น Face centered cubic ซึ่งละลายได้ดีในออสเตไนต์

กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ ธาตุที่สำคัญได้แก่ โครเมียม, ซิลิกอน, โมลิบดีนัม, ทังสแตน และอลูมิเนียม บทบาทของธาตุในกลุ่มนี้จะลดอุณหภูมิเส้น A_4 แต่จะเพิ่มอุณหภูมิเส้น A_3 ให้สูงขึ้น ทำให้อาณาเขตของเฟอร์ไรต์กว้างขึ้นไปทางด้านอุณหภูมิสูง ธาตุในกลุ่มนี้จะมีระบบผลึกเป็น Body centered cubic ซึ่งละลายได้ดีในเฟอร์ไรต์

กลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ ได้แก่ ธาตุโครเมียม, ทังสแตน, โมลิบดีนัม, วานาเดียม และนิโอเบียม ซึ่งมีหลายธาตุที่อยู่ในกลุ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ ธาตุดังกล่าวเมื่อผสมในเหล็กที่มีคาร์บอนจะเกิดการรวมตัวให้คาร์ไบด์ในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งให้คุณสมบัติของเหล็กแตกต่างกันออกไป

กลุ่มรวมตัวกับไนโตรเจนให้ในไตรายด์ ธาตุที่สำคัญได้แก่ อลูมิเนียม, โทเทเนียม และโครเมียม นอกจากธาตุทั้งสามนี้แล้ว ธาตุทุกตัวที่อยู่ในกลุ่มรวมตัวกับคาร์บอน สามารถรวมตัวกับไนโตรเจนให้ในไตรายด์ แต่ให้ผลทางด้านความแข็ง ไม่อยู่ในเกณฑ์สูง

2.3.3 ผลของธาตุที่ผลต่อเหล็กเฟอร์ไรต์ (Influence of alloying elements on the properties of ferrite)

ธาตุผสมส่วนใหญ่จะละลายได้ดีในเหล็กเฟอร์ไรต์ โดยเฉพาะธาตุที่อยู่ในกลุ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ ยิ่งละลายได้ดีในเฟอร์ไรต์ ผลจากการละลายของธาตุในเหล็กเฟอร์ไรต์จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก เพราะในโครงสร้างของเหล็กส่วนมากจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ ดังนั้นเมื่อเฟอร์ไรต์มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ จะทำให้เหล็กโดยรวมเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปด้วย

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความเค้นดึงสูงสุด ปรากฏว่าธาตุทุกตัวมีบทบาทเพิ่มค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด โดยเฉพาะแมงกานีสกับซิลิกอน จะเพิ่มค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดได้มาก เมื่อเทียบกับธาตุอื่น ๆ ดังเช่น นิกเกิล, โมลิบดีนัม และทังสเตน สำหรับโครเมียมนั้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเค้นแรงดึงน้อย

ในด้านความแข็งปรากฏว่าธาตุทุกตัวมีส่วนเพิ่มความแข็งให้กับเฟอร์ไรต์ โดยเฉพาะซิลิกอนและแมงกานีส มีบทบาทด้านความแข็งในอัตราสูง ตามด้วยนิกเกิล, โมลิบดีนัม, วานาเดียม, ทังสเตน โดยมีโครเมียมอยู่ในระดับท้ายสุด เช่นเดียวกับบทบาททางด้านความเค้นแรงดึงสูงสุด

2.3.4 ผลของธาตุที่ผลต่อออสเตไนต์ (Influence of alloying elements in forming Austenite)

ออสเตไนต์เป็น โครงสร้างที่มีความสำคัญในเรื่องการอบชุบเหล็ก เพราะคุณสมบัติของเหล็กภายหลังการอบชุบจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของออสเตไนต์ ดังเช่น เกรนโตหรือเล็ก ความสม่ำเสมอของออสเตไนต์ล้วนแต่มีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กภายหลังการอบชุบทั้งนั้น การผสมธาตุต่าง ๆ ในเหล็กจะพบว่าผลต่อออสเตไนต์หลายประการ ดังเช่น ทำให้อาณาเขตของออสเตไนต์แคบลง จุดยูเท็คตอยด์และอุณหภูมิของยูเท็คตอยด์เปลี่ยนแปลง เป็นต้น เหตุผลที่เห็นได้ชัดก็คือเมื่อผสมธาตุต่าง ๆ ในเหล็ก อะตอมของธาตุจะไปละลายหรือเข้าไปแทรกตามที่ว่างที่มีอยู่ Space Lattice ของอะตอมของเหล็ก ทำให้ที่ว่างสำหรับคาร์บอนน้อยลง เป็นเหตุหนึ่งที่ทำให้จำกัดอาณาเขตของออสเตไนต์ให้แคบลง จุดที่ให้อัตราการละลายของคาร์บอนสูงสุด (maximum solubility) จะลดลงโดยลำดับเมื่อปริมาณของธาตุที่ผสมในเหล็กเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้แล้วปริมาณคาร์บอนที่จุดยูเท็คตอยด์จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของธาตุที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

2.3.5 ผลของนิเกิลและแมงกานีสที่มีต่อออสเตไนต์

นิเกิลและแมงกานีสเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเตไนต์ แต่แมงกานีสแตกต่างกับนิเกิล ตรงที่แมงกานีสสามารถรวมกับคาร์บอนให้แมงกานีสคาร์ไบด์ได้ แต่ทั้งนิเกิลและแมงกานีสมีผลต่อออสเตไนต์คล้ายคลึงกัน ซึ่งจะมีผลต่อออสเตไนต์โดยลดอุณหภูมิของจุดยูเทคตอยด์และลดปริมาณคาร์บอนที่จุดยูเทคตอยด์ให้น้อยลง เมื่อปริมาณของนิเกิลและแมงกานีสเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนิเกิลและแมงกานีสไม่เปลี่ยนแปลงอาณาเขตของออสเตไนต์มากนัก

2.3.6 ผลของโครเมียมที่มีต่อออสเตไนต์

โครเมียมเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ และรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ได้ดี เมื่อผสมโครเมียมในเหล็กจะมีผลต่อออสเตไนต์มาก ทำให้อาณาเขตของออสเตไนต์แคบลง โดยโครเมียมจะมีบทบาทเพิ่มอุณหภูมิของจุดยูเทคตอยด์, ลดปริมาณของคาร์บอนที่จุดยูเทคตอยด์ และจุดที่คาร์บอนละลายสูงสุดในเหล็กจะลดลงด้วย ในขณะที่เดียวกันเส้นแบ่งอาณาเขตของออสเตไนต์กับเหล็กหลอมเหลว (A_4) ก็จะลดต่ำลง

2.3.7 ผลของโมลิบดีนัมที่มีต่อออสเตไนต์

โมลิบดีนัมเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์ และรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ได้ดีเช่นเดียวกับโครเมียม ดังนั้นจึงทำให้ผลต่อออสเตไนต์คล้ายคลึงกับโครเมียม คือมีบทบาทลดอาณาเขตของออสเตไนต์ โดยเปลี่ยนแปลงจุดยูเทคตอยด์ และเส้น A_4

2.3.8 บทบาทของธาตุผสมที่มีต่อการฟอร์มคาร์ไบด์

ธาตุผสมที่จัดอยู่ในกลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์จะมีอยู่หลายธาตุ ซึ่งแต่ละธาตุจะสามารถรวมกับคาร์บอนได้ยากหรือง่ายขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะที่จะรวมกับคาร์บอน (Affinity) การจัดอันดับจะเป็นดังนี้ Mn, Cr, W, Mo, V, Ti, Nb และ Ta สำหรับ Zr นั้นยังมีปัญหาเพราะจากเอกสารอ้างอิงบางฉบับไม่กล่าวถึง

ข้อสังเกตประการหนึ่งก็คือ ธาตุที่รวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ทุกตัวจะเป็นธาตุอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพให้กับเฟอร์ไรต์ ยกเว้นแมงกานีสเป็นธาตุอยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพให้ออสเตไนต์

วิธีการจัดกลุ่มของธาตุที่สัมพันธ์กับการฟอร์มคาร์ไบด์อีกวิธีหนึ่ง โดยการเปรียบเทียบปริมาณของธาตุที่ตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ กับปริมาณของธาตุที่ละลายในเฟอร์ไรต์ เรียกว่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน (Partition coefficient)

กลุ่มที่ 1 ได้แก่ ธาตุ Si, Al, Ni, Cu และ Co ซึ่งเป็นกลุ่มที่ไม่สามารถรวมตัวกับคาร์บอนได้ กลุ่มนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนมีค่าน้อยมาก หรืออาจกล่าวได้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนเป็นศูนย์

กลุ่มที่ 2 ได้แก่ ธาตุ Mn, Cr, W, Mo เป็นกลุ่มที่สามารถรวมกับคาร์บอนและละลายได้ในเฟอร์ไรต์ กลุ่มนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนมีค่าประมาณ 1

กลุ่มที่ 3 ได้แก่ ธาตุ V, Ti Nb และ Ta เป็นกลุ่มที่รวมตัวกับคาร์บอนได้มากกว่าละลายในเฟอร์ไรต์ ดังนั้นกลุ่มนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนจะมีค่ามากกว่า 1

มีข้อยกเว้นสำหรับแมงกานีส เฉพาะกับเหล็กที่มีแมงกานีสสูง 10% คาร์บอน 1% จะปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของแมงกานีสจะสูงถึง 2-5 ซึ่งควรจะอยู่ในกลุ่มที่ 3

2.3.9 บทบาทของธาตุที่มีผลต่อการชุบแข็ง

ในการชุบแข็งเหล็กผสมมีสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาสองประการดังนี้คือ

1) ความแข็งภายหลังการชุบแข็ง ผลจากการทดลองวัดความแข็งภายหลังการชุบแข็งเหล็ก 0.02% C 10% Cr ได้ความแข็ง 35 H_{Rc} แต่เหล็ก 0.35% C ไม่ผสมโครเมียม ภายหลังการชุบแข็งได้ความแข็ง 50 H_{Rc} จะเห็นได้ชัดว่าธาตุที่ผสมในเหล็กไม่มีบทบาทมากนักในการเพิ่มความแข็งให้กับมาร์เทนไซต์ ธาตุคาร์บอนจะให้ผลต่อความแข็งของมาร์เทนไซต์เด่นชัดกว่าธาตุผสม ทั้งนี้เพราะคาร์บอนจะก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอม (Lattice deformation) ได้ดีกว่าธาตุผสม

ธาตุผสมที่อยู่ในประเภทรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ จะมีผลต่อความแข็งอยู่บ้างก็เฉพาะที่เกิดคาร์ไบด์ละลายไม่ละลายตัวในขณะที่เผาที่อุณหภูมิสูง (Non dissolved) เมื่อกระจัดกระจายอยู่ในโครงสร้างของมาร์เทนไซต์จะมีบทบาททางด้านต้านทานต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน (wear resistance) ทำให้การสึกหรอน้อยลง แต่คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะไปมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง ธาตุที่สำคัญได้แก่ ทั้งสแตน, วานาเดียม และ โมลิบดีนัม ซึ่งคาร์ไบด์ของธาตุเหล่านี้มีเสถียรภาพสูงในการชุบแข็งเหล็กที่มีธาตุเหล่านี้ผสมจะต้องเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1200-1300 °C จึงจะละลายตัว

2) ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) จากที่เคยกล่าวมาแล้ว ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ที่สำคัญดังนี้

2.1) เกรนของออสเตไนต์ เหล็กจะมีความสามารถในการชุบแข็งสูงควรจะมีออสเตไนต์เกรนโต เพราะบริเวณรอบเกรนของออสเตไนต์จะเป็นบริเวณที่ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์ไปเป็นซีเมนไตต์และเฟอร์ไรต์ได้ดี เพราะเป็นบริเวณที่มีเสถียรภาพต่ำ กล่าวคือกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นถ้าออสเตไนต์มีขนาดเกรนเล็กบริเวณขอบเกรนจะมีมาก ธาตุที่ให้คาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง เช่น วานาเดียมคาร์ไบด์ หรือทั้งสแตนคาร์ไบด์ จะเป็นตัวป้องกันการขยายตัวของเกรนออสเตไนต์จึงมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งโดยตรง

2.2) พวคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว (Non dissolved carbide) เป็นแฟคเตอร์ หนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง เพราะพวคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะจัดกระจายอยู่ในออสเตไนต์ และพร้อมจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้กับ การทำให้ความแข็งที่จะได้ภายหลังการชุบแข็งต่ำกว่าที่ควรจะได้ นอกจากพวคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวจะมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งแล้ว พวสารมลทินที่อยู่ในรูปของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งจะไม่ละลายตัวเช่นเดียวกัน ในช่วงอุณหภูมิออสเตไนต์จะมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกับคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว

2.3) ความสม่ำเสมอของออสเตไนต์มีความสำคัญต่อความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกัน ในการชุบแข็งเหล็กจะต้องถูกเผาให้ร้อนจนได้โครงสร้างออสเตไนต์อย่างสม่ำเสมอ ถ้าออสเตไนต์ขาดความสม่ำเสมอ เป็นต้นว่า มีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวกันอยู่เป็นกลุ่มเป็นก้อนจะทำให้บริเวณใกล้เคียงมีปริมาณของธาตุผสมแตกต่างกันไปจากบริเวณอื่น ๆ เพราะการเคลื่อนไหวของธาตุผสมโดยทั่วไปจะช้า ยิ่งบริเวณที่มีผลึกของคาร์ไบด์ขนาดโต การเคลื่อนที่ของอะตอมของธาตุผสมจะต้องเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกล ซึ่งต้องใช้เวลามากขึ้น ดังนั้น ธาตุผสมในโครงสร้างของออสเตไนต์จะไม่สม่ำเสมอ และการขยายตัวของเกรนออสเตไนต์จะไม่เท่ากันตลอด เพราะการขยายตัวของออสเตไนต์จะเกิดขึ้นเมื่อคาร์ไบด์ละลายตัวหมดแล้ว ดังนั้นบริเวณใดไม่มีคาร์ไบด์ เกรนของออสเตไนต์จะขยายตัวได้เร็วกว่าบริเวณที่มีคาร์ไบด์ จึงเป็นสาเหตุทำให้ขนาดของเกรนออสเตไนต์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้มาร์เทนไซต์ที่ได้ภายหลังการชุบแข็งไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน ซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติที่ไม่ดีของเหล็กชุบแข็ง

2.4 โลหะวิทยาของเหล็ก

ไพลิน ฤกษ์จิรวาสดี (2555) กล่าวว่าโลหะวิทยาเป็นศาสตร์แขนงหนึ่ง เน้นการศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเป็นหลัก ซึ่งต้องทำความเข้าใจเป็นขั้นตอน เพื่อผู้ศึกษาจะสามารถจินตนาการให้เห็นภาพ ตั้งแต่โครงสร้างอะตอม จนถึงโครงสร้างที่โลหะอยู่รวมกันเป็นผลึกหรือเกรน และสามารถจินตนาการมองเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของเหล็กขณะถูกความร้อนและขณะถูกทำให้เย็นในอัตราต่าง ๆ กัน รวมไปถึงเมื่อเหล็กถูกใช้งาน หรือได้รับแรงกระทำจากภายนอกจะเกิดการเคลื่อนไหวของอะตอม หรือเกรนในลักษณะใด

2.4.1 โครงสร้างระบบผลึกของโลหะ (Metallic crystal)

โลหะทุกชนิดจะประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กที่สุด คืออะตอมซึ่งจะมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบภายในเกรน และบริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นอาณาเขตระหว่างเกรนการเรียงตัวของอะตอมในบริเวณดังกล่าวจะขาดการเรียงตัวที่เป็นระเบียบ เนื่องจากมีสารมลทินถูกผลึกให้มารวมตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นในบริเวณนี้ ในขณะที่โลหะเย็นตัวจากสภาพหลอมเหลวไปสู่สภาพ

ของแข็ง การเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมภายในเกรนหรือผลึกนี้เรียกว่า Space lattice ถ้านำกลุ่มอะตอมหน่วยเล็ก ๆ หนึ่งหน่วยมาขยายเพื่อศึกษาตำแหน่งการวางตัวของกลุ่มอะตอมในหน่วยเล็กนี้ (Unit cell) จะพบว่าการวางตัวของกลุ่มอะตอมจะมีระบบที่แน่นอน และมีอยู่หลายระบบ เรียกว่า ระบบผลึก (Crystallographic system) ในโลหะส่วนใหญ่จะพบระบบผลึกที่สำคัญดังนี้ (รูปที่ 2.1)

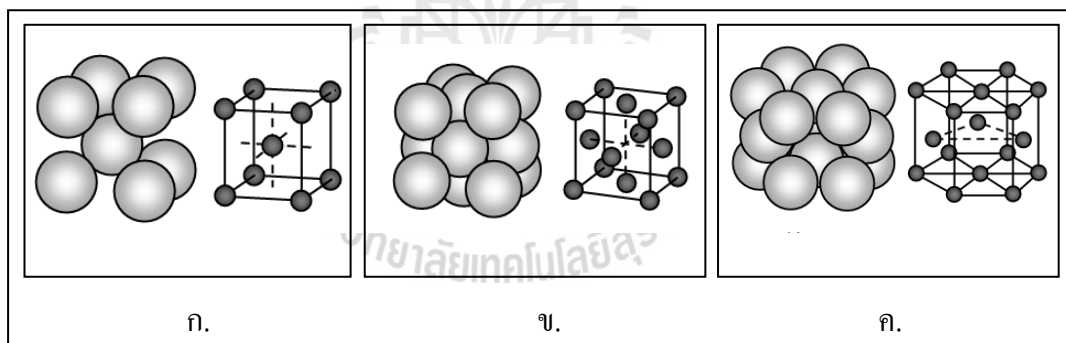
1) ระบบลูกบาศก์ (Cubic system) สามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

1.1) ระบบ Body centered cubic (BCC) เป็นระบบที่มีอะตอมอยู่ตรงกลางของลูกบาศก์

1.2) ระบบ Face centered cubic (FCC) เป็นระบบที่มีอะตอมอยู่ตรงกลางทุกด้านของลูกบาศก์

2) ระบบ Hexagonal เป็นลักษณะรูปหกเหลี่ยม โดยในเหล็กจะพบได้ในลักษณะระบบ Hexagonal close packed (HCP)

3) ระบบ Tetragonal เป็นลักษณะคล้ายลูกบาศก์ แต่มีส่วนสูงมากกว่า พบส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับเหล็ก คือ ระบบ Body centered tetragonal (BCT)



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างระบบผลึกของโลหะ ก. Body centered cubic (BCC),

ข. Face centered cubic (FCC) และ ค. Hexagonal close packed (HCP)

2.4.2 จุลโครงสร้างของโลหะ (Micro structure)

โลหะโดยทั่วไปภายหลังจากการเย็นตัวจะประกอบด้วยเกรนหรือผลึกจำนวนมาก (Polycrystall) ซึ่งการเกิดเกรนของโลหะจำนวนมากจะเกิดขณะมีการเปลี่ยนสถานะจากหลอมเหลวมาเป็นโลหะแข็งตัว ตามทฤษฎีของโลหะกายภาพ การเปลี่ยนสถานะจะเริ่มที่อุณหภูมิแข็งตัว (Solidification temperature) โดยการให้กำเนิดนิวเคลียส อะตอมที่ถ่ายเทพลังงานอิสระไปสู่

บรรยากาศรอบ ๆ ทำให้การเคลื่อนไหวของอะตอมน้อยลง เมื่อมารวมกันจะให้กลุ่มอะตอมที่มีพลังงานต่ำเป็นจุดของโลหะแข็งเล็ก ๆ ที่เรียกว่านิวเคลียส เมื่ออุณหภูมิลดลง อะตอมที่ถ่ายเทพลังงานออกสู่บรรยากาศรอบ ๆ จะค่อย ๆ เข้ามารวมตัวกับนิวเคลียสทำให้มีการขยายตัวกลายเป็นผลึกเล็ก ๆ และโตขึ้นจนเป็นผลึกขนาดใหญ่ เรียกว่าเกรน การขยายตัวจะสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณของโลหะหลอมเหลวหมดไป หรือเกรนที่ขยายตัว ไปชนกับเกรนข้างเคียง ในขณะที่ขยายตัวของนิวเคลียสอาจจะมีการขยายตัวออกเป็นกิ่งก้าน และแตกสาขาออกไปทิศทางต่าง ๆ เรียกโครงสร้างนี้ว่า Dendrite

ขนาดของผลึกหรือเกรนที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว โดยเฉพาะในช่วงเกิดการแข็งตัว จะพบว่า ถ้าการเย็นตัวมีอัตราสูงจะปรากฏนิวเคลียสเกิดขึ้นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีอัตราต่ำเพราะแต่ละเกรนจะแย่งอะตอมของโลหะให้จับรวมตัวกับนิวเคลียส ซึ่งมีอยู่จำนวนมากทำให้ได้โลหะเกรนเล็กละเอียดในทางตรงกันข้าม ถ้าอัตราการเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีน้อยการขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมากทำให้โลหะเกิดเกรนโต ดังนั้นบริเวณที่โลหะสัมผัสกับผนังของแบบซึ่งมีอัตราการเย็นตัวสูง จึงมีขนาดเล็กละเอียด เรียกว่า Chilled crystal ทิศทางการขยายตัวของเกรนจะเป็นไปในทิศทางการถ่ายเทความร้อนได้ดี จะพบว่าเกรนของโลหะที่เย็นตัวจะมีทิศทางที่ตั้งฉากกับผนังของเบ้าหล่อโลหะ ทำให้การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีทิศทางตั้งฉากกับผนังของเบ้าเช่นเดียวกัน เรียกว่า Columnar crystal โลหะหลอมเหลวที่อยู่บริเวณใจกลางของเบ้าจะมีทิศทางการถ่ายเทความร้อนได้หลายทิศทาง การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีแนวโน้มขยายตัวได้หลายทิศทางทำให้ลักษณะของผลึกหรือเกรนเป็นแบบ Equi-axed crystal บริเวณที่เกรน Columnar มาชนกันตรงมุมของแบบหล่อหรือเบ้าโลหะ บริเวณนั้นโลหะจะสามารถแยกตัวหรือแตกออกได้ง่ายเมื่อมีแรงดึงมากระทำในทิศทางตั้งฉากกับรอยชนกันของ Columnar บริเวณนี้คือ Planes of weakness เป็นลักษณะโครงสร้างในทิศทางตัดขวางแท่งโลหะที่หล่อในเบ้าโลหะ

2.4.3 การเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็กในขณะปล่อยให้เย็น

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเตไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์ คือการเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างผลึกในระบบ FCC ไปเป็น BCC ซึ่งต้องปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ การเปลี่ยนลักษณะนี้จะเป็นการเปลี่ยนขนาดระยะห่างระหว่างอะตอมตามแกน กรณีที่มีคาร์บอนเข้ามาเกี่ยวข้อง การเปลี่ยนแปลงของออสเตไนต์ซึ่งมีปริมาณการละลายของคาร์บอนได้สูงเมื่อเปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรต์โดยที่มีปริมาณคาร์บอนละลายได้ต่ำกว่า คาร์บอนส่วนเกินก็จะถูกผลักดันออกมาให้สารประกอบซีเมนไต์

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของออสเตไนต์ในสภาพการเย็นตัวที่ไม่สมดุล การเย็นตัวในอัตราที่ไม่สมดุลจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงจากออสเตไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์และ

เฟอร์ไรต์ เพราะในขณะที่เย็นตัวจะมีการปรับส่วนผสม โดยเฉพาะคาร์บอนซึ่งมีลักษณะการแพร่ซึมนั้นต้องใช้เวลาที่จะเคลื่อนไหว ในกรณีเหล็กไฮโปยูเทคตอยซึ่งพบว่ายิ่งอัตราการเย็นตัวเร็วจะปรากฏออสเตไนต์เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรต์ได้น้อยลง

ซอร์ไบต์ (Sorbite) ผู้ที่ศึกษาและใช้ชื่อโครงสร้างนี้ คือ Clifton sorby ได้พบว่าซอร์ไบต์ก็คือโครงสร้างที่เกิดจากออสเตไนต์แตกตัวให้เฟอร์ไรต์ และ ซิเมนไตต์เช่นเดียวกับเฟอร์ไรต์ โดยการให้กำเนิดนิวเคลียสของซิเมนไตต์ขึ้นมาก่อนบริเวณรอบ ๆ เกรน เมื่อขยายตัวก็ดึงเอาอะตอมของคาร์บอนบริเวณรอบ ๆ เข้ามารวมตัวเพื่อขยายตัวทำให้บริเวณข้างเคียงกลายเป็นบริเวณที่มีอะตอมคาร์บอนต่ำ กลายเป็นจุดที่เกิดเฟอร์ไรต์ขึ้นมาทั้งสองด้านและเมื่อเกิดเฟอร์ไรต์ขึ้นแล้ว จะเกิดมีการขยายตัวทำให้มีปริมาณคาร์บอนถูกผลักออกไป ทำให้เกิดสภาพพร้อมที่จะเกิดซิเมนไตต์ขึ้นได้ทั้งในบริเวณข้างเคียงจะสลับกันไป แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงการเคลื่อนไหวของอะตอมคาร์บอนเป็นไปได้ยาก แถบของเฟอร์ไรต์กับซิเมนไตต์จะเกิดได้เล็กลงมาก จนเราไม่สามารถดูได้จากกล้องไมโครสโคปธรรมดา จะศึกษาโครงสร้างได้จะต้องอาศัยกล้องไมโครสโคปอิเล็กตรอน ซึ่งมีกำลังขยายได้สูงมาก คุณสมบัติของซอร์ไบต์จะมีความแข็งประมาณ $350 H_B$ เมื่อเทียบกับเฟอร์ไรต์มีความแข็งประมาณ $180 H_B$

เบไนต์หรือทรูสไตต์ (Bainite or troostite) เป็นโครงสร้างที่ได้จากสภาพออสเตไนต์แตกตัวภายใต้อัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าซอร์ไบต์ การเกิดยังคงมีกลไกคล้ายคลึงกัน คือ มีการให้กำเนิดนิวเคลียสและมีการขยายตัว แต่เบไนต์จะให้กำเนิดเฟอร์ไรต์ก่อน โดยมีลักษณะคล้ายเข็มยื่นเข้าสู่ใจกลางเกรนออสเตไนต์ เมื่อเฟอร์ไรต์ขยายตัวก็จะผลักอะตอมของคาร์บอนออกไปทางด้านข้าง ทำให้เกิดบริเวณที่มีคาร์บอนหนาแน่นตามบริเวณข้างของเฟอร์ไรต์และเมื่อปริมาณคาร์บอนสูงจนถึงประมาณ 6.67% ก็จะเกิดเป็นแถบบาง ๆ ของซิเมนไตต์เกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง และเมื่อเฟอร์ไรต์ขยายตัวมากขึ้นก็จะไปเกิดซิเมนไตต์บริเวณที่ห่างออกไปเป็นระยะ การเกิดเช่นนี้จะเกิดได้ทั้งตามบริเวณรอบ ๆ เกรนและเกิดทั่วไปหมด เรียกโครงสร้างนี้ว่า เบไนต์ ตามชื่อของ E.C. Bain (ชาวอเมริกัน) แต่อาจจะเกิดได้เป็นแห่ง ๆ และเป็นกลุ่ม ๆ แทรกอยู่กับโครงสร้างมาร์เทนไซต์ จะเรียกโครงสร้างนี้ว่าทรูสไตต์ตามชื่อของ Troost (ฝรั่งเศส) หนังสือบางเล่มจะเรียกรวมไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างเบไนต์หรือทรูสไตต์ จะใช้เรียกเพียงอย่างเดียวว่า ทรูสไตต์ คุณสมบัติความแข็งของเบไนต์และทรูสไตต์ จะมีความแข็งอยู่ระหว่าง $400-450 H_B$ ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวจะสูงมากหรือน้อย

มาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นโครงสร้างที่ได้จากการทำให้ออสเตไนต์เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบน้ำหรือชุบน้ำเกลือ (10%NaCl) เรียกโครงสร้างนี้ตามชื่อของผู้ที่ค้นคว้าเรื่องนี้คือ A. Marten เนื่องจากการทำให้ออสเตไนต์เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วทำให้อะตอมคาร์บอนไม่มีโอกาสเคลื่อนไหวจะอยู่กับที่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้การเรียงตัวของอะตอมของเหล็กเกิดลักษณะ

บิดเบี้ยว (deformation) เป็นสาเหตุให้มาร์เทนไซต์มีความแข็งสูง ปริมาณของคาร์บอนจะเป็นเฟลคเตอร์ที่สำคัญมีผลต่อความแข็งของมาร์เทนไซต์ (เราเรียกมาร์เทนไซต์ได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ไม่สมดุล Non equilibrium หรือ Supersaturated ferrite เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าที่เฟอร์ไรต์จะมีได้)

2.4.4 การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography)

การศึกษาโครงสร้างของโลหะด้วยกล้องขยาย (Microscope) (มันส์ สติร์จินดา, 2543) มีการเริ่มศึกษาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2303 โดยศาสตราจารย์ Henry C. Sorby แห่งเซฟฟิลด์ ประเทศอังกฤษ นับได้ว่าเป็นผู้บุกเบิกแนวทางการศึกษาโครงสร้างของโลหะ ซึ่งจัดเป็นแขนงหนึ่งของโลหะวิทยาภายใต้ชื่อ Metallogy

หลักการของการศึกษานี้เริ่มด้วย การเตรียมผิวตัวอย่างของโลหะ โดยการปรับระดับผิวให้เรียบด้วยหินไฟ ตามด้วยการขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายและน้ำ โดยเริ่มตั้งแต่กระดาษทรายหยาบไปจนถึงกระดาษทรายละเอียด ในขณะที่ขัดใช้น้ำฝอยความร้อนและล้างเศษโลหะที่ติดค้างบนกระดาษทรายออก หลังจากนั้นจึงนำไปขัดละเอียดบนจานหมุนหุ้มผ้าสักหลาด โดยมีน้ำผสมผงขัดที่ละเอียดมาก (0.3-0.05 ไมครอน) นีลบนผ้า อาจใช้ผงขัดอลูมินา หรือโครเมียมออกไซด์ (ทรายโครไมท์) ขัดจนผิวโลหะมีความเรียบเทียบเท่ากระจกเงา จากนั้นจึงนำไปผ่านการกัดผิว (Etching) ด้วยสารละลายกรดเจือจาง (Etchants) ซึ่งมีหลายอย่างขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่ต้องการศึกษาจากโลหะ โดยทั่วไปเหล็กจะใช้กรดไนตริก 2-4% ผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ (Nital) หรือใช้กรดเกลือผสมกับเฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นต้น

ในการกัดผิวหน้าโลหะด้วยสารละลายกรด เพื่อให้สารละลายกัดโลหะ ซึ่งโลหะจะมีความต้านทานกรดต่างกัน โดยเฉพาะบริเวณขอบเกรนซึ่งมีการจัดเรียงอะตอมไม่เป็นระเบียบและมีอะตอมของสารมลทินอยู่หนาแน่น ทำให้ถูกกัดด้วยกรดมากกว่าบริเวณอื่น จัดเป็นบริเวณที่ขาดเสถียรภาพ ภายหลังจากกัดผิวด้วยสารละลายกรดแล้ว ผิวของโลหะจะสูงต่ำต่างกัน ทำให้เห็นเป็นลักษณะโครงสร้างเมื่อนำไปศึกษาด้วยกล้องขยาย

หลักการการทำงานของกล้องขยาย Metallurgical microscope ซึ่งจะประกอบด้วยจุดกำเนิดแสง (Light source) ส่งลำแสงผ่านเลนส์รวมแสง (Condensing lens) ไปตกกระทบบนแผ่นแก้วสะท้อนแสง (Glass reflector) ทำให้แสงที่สะท้อนตกลงบนผิวตัวอย่างโลหะในลักษณะตั้งฉาก ผิวของโลหะที่ขัดเรียบจะสะท้อนแสงกลับขึ้นมา ผ่านเลนส์ขยายชุดแรก (Objective lens) และลำแสงที่ขยายครั้งแรกจะส่งผ่านไปยังเลนส์ขยายอีกชุดหนึ่ง (Eye piece) ก่อนผ่านเข้าตา ทำให้เห็นได้ถึงภาพขยายโครงสร้าง โดยใช้การปรับโฟกัสด้วยการเลื่อนชิ้นตัวอย่างขึ้นลงเพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจน

กล้องขยายที่ใช้แสงสว่างจากดวงไฟจะสามารถขยายภาพได้สูงสุดไม่เกิน 2,000 เท่า ซึ่งกำลังขยายสูงระดับนี้จะต้องใช้เลนส์ขยายพิเศษ และต้องใช้น้ำมัน (Immersion oil) ช่วยเพื่อรวมความเข้มแสงให้ได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีกล้องขยายที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแทนแสงจากหลอดไฟ และสามารถบังคับด้วยระบบแม่เหล็กไฟฟ้าให้ลำแสงอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดวิ่งลงมากระทบกับผิวของตัวอย่างโลหะภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนกระทบกับผิวตัวอย่างโลหะ จะสะท้อนกลับไปเข้าเครื่องรับสัญญาณส่งไปขยายต่อและส่งไปยังจอภาพ เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนถูกบังคับด้วยระบบควบคุมให้เคลื่อนที่ สแกนหรือกวาดไปบนผิวของตัวอย่างโลหะและสะท้อนไปเข้าเครื่องรับและส่งไปยังจอภาพ จะปรากฏภาพโครงสร้างที่สามารถขยายได้สูงถึงแสนเท่าหรืออาจจะมากกว่า กล้องลักษณะนี้เรียกว่า Scanning Electron Microscope (SEM)

นอกจากกล้องแบบ Scanning Electron Microscope แล้วยังมีกล้องขยายที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนวิ่งผ่านตัวอย่างโลหะที่มีความบางมาก ๆ ลงไปกระทบบนจอเรืองแสง ทำให้เกิดภาพปรากฏเป็นโครงสร้างอีกลักษณะหนึ่ง กล้องแบบนี้เรียกว่า Transmission Electron Microscope (TEM) ซึ่งในปัจจุบันนิยมศึกษาโครงสร้างโลหะจากกล้อง SEM มากกว่า TEM เนื่องจากการเตรียมตัวอย่างสะดวกกว่า ไม่ต้องทำให้ชิ้นตัวอย่างบาง

2.5 การควบคุมบรรยากาศในเตา

ในการอบชุบความร้อนที่กระทำต่อเหล็กกล้าบางชนิด โดยเฉพาะเหล็กกล้าชิ้นส่วนเครื่องมือที่ต้องการผิวสะอาดปราศจากออกไซด์และต้องการความแข็งที่ผิวแน่นอน การอบชุบความร้อนจะต้องกระทำภายในเตาที่สามารถควบคุมบรรยากาศได้ (มันส์ สติร์จินดา, 2543) เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียคาร์บอน (Decarburizing) หรือธาตุบางตัวตามบริเวณผิวขณะเผาในเตา หรือเพื่อไม่ให้เกิดการเป็น ออกไซด์ตามผิว ซึ่งทำให้ขนาดของชิ้นงานภายหลังอบชุบความร้อนเปลี่ยนแปลง หรืออาจจะเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการทำมาสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดทรายขัดผิว (Shot Blast) รวมถึงค่าใช้จ่ายในการล้างสนิม หรือทำความสะอาดผิวอื่น ๆ ดังนั้นความมุ่งหมายที่สำคัญของการควบคุมบรรยากาศภายในเตา ได้แก่

- 1) ป้องกันการสูญเสียคาร์บอนและธาตุอื่น ๆ ที่สำคัญขณะทำการเผาในระยะเวลาานาน
- 2) ป้องกันการเกิดออกไซด์บริเวณผิว ซึ่งทำให้ต้องกำจัดออกในภายหลัง
- 3) ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงความแข็งบริเวณผิวเหล็กให้สูงขึ้น สามารถกระทำได้ด้วยการควบคุมบรรยากาศภายในเตา เช่น การทำคาร์บูไรซิง คาร์โบไนไตรดิง หรือไนไตรดิง

2.5.1 บรรยากาศไนโตรเจน

การใช้แก๊สไนโตรเจนควบคุมบรรยากาศภายในเตาทำได้สองลักษณะคือ ใช้แก๊สไนโตรเจนที่บรรจุท่อหรือบรรจุภาชนะภายใต้ความดันสูงในลักษณะไนโตรเจนเหลวก็ได้ เมื่อผ่าน

ลื่นควบคุมความดัน และอัตราการไหลจะปล่อยเข้าสู่เตาอบชุบโดยตรง นับว่าเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุด แต่ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของแก๊สไนโตรเจน เพราะจะมีแก๊สเจือปนที่เป็นปัญหาต่อการอบชุบคือ แก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในทางปฏิบัตินิยมใช้ไนโตรเจนเหลว เพราะจะมีความบริสุทธิ์สูงกว่า อุปสรรคที่สำคัญประการหนึ่งคือราคา ยิ่งแก๊สมีความบริสุทธิ์มากราคาแก๊สก็ยิ่งสูงมาก และบางครั้งการรับรองความบริสุทธิ์ของแก๊สไม่มีความแน่นอน

บรรยากาศไนโตรเจนอีกลักษณะหนึ่ง คือได้จากการเตรียมโดยการนำเอาแก๊สเชื้อเพลิง เช่น โพรเพน หรือ บิวเทน มาผสมกับอากาศในสัดส่วนที่เหมาะสม และนำไปทำให้เกิดการเผาไหม้ภายในเตาปิด ในขณะที่เผาไหม้จะให้ความร้อนและแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้จะประกอบด้วยแก๊สไนโตรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกทำให้เย็นโดยผ่านเครื่องทำความเย็นแบบ Heat exchanger จากนั้นจะผ่านเข้าเครื่องดูดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Molecular sieves หรือ Moneothanolamine) และผ่านเข้าเครื่องทำความเย็น (Refrigeration) อีกครั้งเพื่อลดปริมาณไอน้ำ แก๊สที่ได้จะมีจุดน้ำค้างประมาณ -40°C ก่อนที่จะปล่อยเข้าเตาอบชุบจะต้องทำให้แก๊สแห้งอีกครั้ง (Dehumidification)

2.5.2 บรรยากาศไฮโดรเจน

เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่จัดอยู่ในกลุ่มบรรยากาศรีดิวซิ่งอย่างแรง จึงนิยมใช้เป็นแก๊สสำหรับควบคุมบรรยากาศของการอบชุบเหล็กเครื่องมือและการรีดิวออกไซด์ตามบริเวณผิวของเหล็กคาร์บอนต่ำ ในการอบชุบเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กซิลิกอนนิยมใช้บรรยากาศไฮโดรเจนสำหรับการอบชุบเช่นเดียวกัน แก๊สไฮโดรเจนที่ใช้จะบรรจุท่อซึ่งมีความบริสุทธิ์ 98-99.9% แก๊สเจือปนส่วนใหญ่ได้แก่ ไอน้ำ, ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนผลิตได้จากหลายแหล่ง เช่น ได้จากการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis) ได้จากการแตกตัวของแอมโมเนีย จากปฏิกิริยาของแก๊สกับไอน้ำโดยผ่านตัวแคททาไลส และจากผลพลอยได้จากการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระแสไฟฟ้า

การควบคุมบรรยากาศไฮโดรเจนจะต้องไม่ให้มีไอน้ำติดเข้าไปโดยเด็ดขาดก่อนผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าเตาอบชุบจะต้องกำจัดไอน้ำโดยผ่านเครื่องทำความเย็นให้แก๊สไฮโดรเจนมีจุดน้ำค้างประมาณ -60°C จึงจะปราศจากไอน้ำ

การใช้แก๊สไฮโดรเจนสำหรับบรรยากาศภายในเตาอบชุบ จะต้องระมัดระวังเพราะแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดการระเบิดเมื่อรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ ดังนั้นการปล่อยแก๊สไฮโดรเจนในเตาอบชุบ ควรต้องไล่อากาศภายในเตาออกก่อนด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าผ่าน (Purging) หรืออาจใช้แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้แทนไนโตรเจนก็ได้

บรรยากาศไฮโดรเจนจะใช้มากในการทำซินเตอร์ริง ผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะผง เช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ หรือแทนทาลัมคาร์ไบด์ ในการอบชุบเหล็กคาร์บอนสูงจะไม่ใช้บรรยากาศไฮโดรเจนเพราะแก๊สไฮโดรเจนสามารถแพร่ซึมเข้าสู่ภายในแท่งเหล็ก ทำให้เหล็กสูญเสียความเหนียว และที่อุณหภูมิสูงไฮโดรเจนอาจรวมกับคาร์บอนให้แก๊สมีเทนเป็นการสูญเสียคาร์บอนส่วนหนึ่งได้

2.5.3 บรรยากาศไนโตรเจน-ไฮโดรเจน

แก๊สไนโตรเจนและไฮโดรเจนได้จากการแตกตัวของแก๊สแอมโมเนีย ภายในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 900-980°C โดยมีตัวแคทาไลซิสซึ่งเป็นเหล็กพรุน (iron sponge) หรือนิเกิลช่วยให้เกิดการแตกตัวซึ่งจะได้แก๊สไฮโดรเจน 75% และแก๊สไนโตรเจน 25% ภายหลังจากแก๊สแตกตัวแล้วจะผ่านไปยังเครื่องทำความเย็น (Water-cooled heat exchanger) เพื่อแยกแอมโมเนียที่ไม่แตกตัวออก ก่อนที่จะนำไปใช้เป็นบรรยากาศภายในเตาอบชุบในอุตสาหกรรมแก๊สแอมโมเนียจะมาในสภาพหลอมเหลว ก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องแยกจะต้องผ่านแอมโมเนียเหลวไปยังอุปกรณ์ทำให้กลายเป็นไอก่อน (Vaporizer) จากนั้นจึงจะผ่านเข้าไปยังเครื่องแยกตัว

บรรยากาศไนโตรเจน-ไฮโดรเจนใช้โดยทั่วไปกับเหล็กกล้า, เหล็กเครื่องมือ โดยเฉพาะเหล็กกล้าความเร็วสูง สำหรับการอบอ่อน และการอบเพื่อลดความเครียด

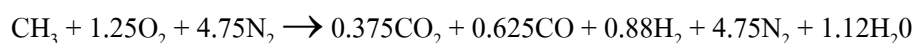
สิ่งที่ต้องระมัดระวังคือแก๊สแอมโมเนียและแอมโมเนียที่แตกตัวแล้วสามารถลุกไหม้ได้เมื่อผสมกับอากาศที่มีสัดส่วนพอเหมาะก่อนเข้าเตาอบชุบ ควรเป่าแก๊สไนโตรเจนไล่อากาศภายในเตาก่อน ถึงเก็บแก๊สแอมโมเนียควรเก็บในที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 50°C เพราะแอมโมเนียมีอัตราการขยายตัวสูงมาก

2.5.4 บรรยากาศแก๊สเอ็กซ์โซเทอร์มิก (Exothermic gas)

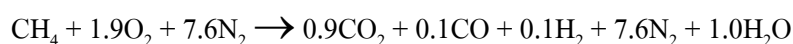
แก๊สเอ็กซ์โซเทอร์มิก คือ แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้บางส่วนของอากาศกับแก๊สเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ แก๊สธรรมชาติ, แก๊สโพรเพน และแก๊สบิวเทน จำนวนอากาศจะถูกกำหนดให้เหมาะสำหรับการเผาไหม้ คำว่า Exothermic หมายถึงการเผาไหม้ของแก๊สจะให้ความร้อนส่วนหนึ่ง ซึ่งจะให้ความร้อนสูงถึงประมาณ 1200-1300°C ภายหลังจากเผาไหม้แล้วจะผ่านเครื่องทำความเย็น (Gas cooler) โดยสัมผัสกับน้ำเป็นการลดอุณหภูมิให้ต่ำลง แต่จะเป็นแก๊สที่มีจุดน้ำค้างสูง เหมาะสำหรับการอบชุบโลหะทองแดง ในกรณีการอบชุบเหล็กกล้าแก๊สเอ็กซ์โซเทอร์มิกจะต้องผ่านเครื่องทำความเย็น (Refrigeration) อีกครั้งเพื่อลดปริมาณไอน้ำให้น้อยลง ซึ่งจะมีจุดน้ำค้างอยู่ที่ 5°C ถ้าต้องการให้ต่ำกว่านี้ต้องผ่านเครื่องดูดไอน้ำเพื่อทำให้แห้ง (Dehumidifier หรือ Desiccant dryer) อีกครั้งเพื่อลดจุดน้ำค้างลงมาถึง -40°C ก่อนที่จะผ่านเข้าไปยังบรรยากาศของเตาอบชุบ

แก๊สเอ็กซ์โซเทอร์มิกจะแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ประเภทเข็ม (Rich) และ ประเภทจาง (Lean) ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอากาศต่อแก๊สเชื้อเพลิง

ประเภทเข็ม จะผสมอากาศน้อยทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์มากกว่าประเภทจาง เช่น แก๊สมีเทนต่ออากาศ สัดส่วน 1:6 จะได้แก๊สหลังเผาไหม้ 6.63 ส่วน ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ประเภทเข็มจะมีแก๊สคาร์บอนมอนอไซด์และแก๊สไฮโดรเจนมากเมื่อเทียบกับประเภทจาง ซึ่งใช้แก๊สมีเทนต่ออากาศเป็น 1:9.5 จะได้แก๊สเอ็กซ์โซเทอร์มิก 8.7 ส่วนดังปฏิกิริยานี้



ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอไซด์และไฮโดรเจนจะน้อยกว่า ซึ่งจะใช้แก๊สประเภทจางสำหรับการควบคุมบรรยากาศโลหะทองแดงเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตแก๊สเอ็กซ์โซเทอร์มิกจะให้แก๊สเชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นแก๊สโพรเพนและบิวเทน

ลักษณะการใช้งาน ในประเภทจางจะนิยมใช้ในบรรยากาศการอบชุบโลหะทองแดง การทำซินเตอร์และการอบอ่อน นอกจากนี้ยังใช้เป็นแก๊สสำหรับไล่แก๊สภายในเตาอบชุบ (purging) สำหรับประเภทเข็มจะใช้เป็นบรรยากาศการอบชุบเหล็กกล้าคาร์บอนทั่ว ๆ ไป โดยเฉพาะการอบอ่อน การชุบแข็งไม่นิยมเพราะแก๊สเอ็กซ์โซเทอร์มิกมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลดคาร์บอน เนื่องจากมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ปริมาณสูงมากพอที่จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้

แก๊สประเภทเข็มซึ่งมีปริมาณ CO และ H₂ มาก อาจเกิดการเผาไหม้ได้เมื่อผสมกับอากาศในปริมาณที่พอเหมาะ จัดเป็นประเภทแก๊สติดไฟ (Flammable) ต้องระมัดระวังเช่นเดียวกันกับแก๊สติดไฟอื่น ๆ และสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งต้องป้องกันการรั่วไหลออกสู่บรรยากาศรอบ ๆ ควรมีระบบระบายอากาศ สำหรับแก๊สประเภทจางก็ควรต้องป้องกันการรั่วไหลเช่นเดียวกัน แม้จะมีอันตรายในการลุกไหม้น้อยกว่าก็ตาม

2.5.5 บรรยากาศแก๊สเอนโดเทอร์มิก (Endothermic gas)

แก๊สเอนโดเทอร์มิกเป็นแก๊สที่ได้จากการแตกตัว (Clacking) ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) เช่น แก๊สธรรมชาติ, แก๊สโพรเพน หรือแก๊สบิวเทนกับอากาศจำนวนที่แน่นอน ที่อุณหภูมิประมาณ 1000°C ภายในเตาที่ปิดมิดชิดและมีโลหะแคทาไลส เช่น นิกเกิล (Nickel-bearing catalyst) จะช่วยทำให้เกิดการแตกตัวของคาร์บอนและไฮโดรเจนได้แก๊สคาร์บอนมอนอไซด์, ไฮโดรเจน, มีเทน และไฮโดรเจน การควบคุมปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศจะต้องกระทำอย่างดีเพื่อให้ปฏิกิริยาแตกตัวเกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำน้อยที่สุด เอนโดเทอร์มิกหมายถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้รับความร้อนจากภายนอก ไม่มีการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศเตาที่ใช้เป็นตัวให้กำเนิดแก๊สเอนโดเทอร์มิก (Heating retort) จะถูกเผาด้วยแก๊สเชื้อเพลิงภายนอก แก๊สเอนโดเทอร์มิกที่เกิดภายในเตาจะถูกทำให้เย็นตัวด้วยระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (โดย

ไม่สัมผัสน้ำ) บริเวณทางออกจากเตาแยก อุณหภูมิจะลดลงมาอยู่ในช่วงประมาณ 300°C เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาแยกตัวของคาร์บอนมอนอไซด์ไปเป็นคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ($2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$) ซึ่งทำให้เกิดเขม่า (Soot) และเขม่าจะถูกพาไปกับแก๊สทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับผิวของเหล็กที่ทำการอบชุบมีเขม่าจับ หลังจากแก๊สเอนโดเทอร์มิกถูกทำให้เย็นในครั้งแรกจะผ่านไปยังเครื่องทำความเย็นอีกครั้งหนึ่ง เพื่อกำจัดไอน้ำให้เหลือน้อยที่สุด โดยมีจุดน้ำค้างอยู่ในช่วง 16 ถึง -12°C ก่อนที่จะผ่านแก๊สเข้าเตาอบชุบ ขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะทำให้การอบชุบ

เนื่องจากแก๊สเอนโดเทอร์มิกเป็นแก๊สที่จัดอยู่ในประเภทรีดิวซิงเพราะมีไฮโดรเจน จึงมีความเหมาะสมอย่างมากต่อการควบคุมบรรยากาศของการอบชุบเหล็กกล้าทุกประเภท ทั้งประเภทการอบอ่อน ชุบแข็ง และยังมีความเหมาะสมในการใช้เป็นแก๊สพาหะ (Carrier gases) ในการชุบผิวแข็งประเภทคาร์บูไรซิง และคาร์โบไนไตรดิง นอกจากนี้ยังใช้เป็นบรรยากาศสำหรับการทำซินเตอร์ริงได้ด้วย

ข้อควรระวังในการใช้งานแก๊สเอนโดเทอร์มิกคือ เป็นแก๊สที่เป็นพิษ (Toxic) เพราะมี CO สูง และเป็นแก๊สติดไฟอย่างรวดเร็ว (Highly flammable) จึงต้องมีระบบป้องกันภัยอย่างดี สิ่งที่จะต้องระมัดระวังอีกอย่างหนึ่งคือ จะต้องปล่อยแก๊สเอนโดเทอร์มิกเข้าเตาอบชุบ เมื่อเตามีความร้อนเกิน 760°C เพราะหากอุณหภูมิต่ำกว่าจะเกิดการระเบิด เมื่อแก๊สเอนโดเทอร์มิกทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ในการปฏิบัติงาน ถ้ากระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 760°C ก่อนการปล่อยแก๊สเข้าเตาต้องทำการไล่อากาศภายในเตาออกด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าไล่ เพื่อความปลอดภัยจะใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าผ่านเตาในปริมาณ 5 เท่าของปริมาตรภายในเตา หรือใช้วิธีปล่อยแก๊สเอนโดเทอร์มิกเข้าเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า 750°C จนเต็มเตาในบรรยากาศภายในเตา แล้วจึงลดอุณหภูมิลงมาต่ำกว่า 760°C แต่จะเป็นการสิ้นเปลืองมาก

2.5.6 บรรยากาศสุญญากาศ

การควบคุมบรรยากาศภายในเตาอบชุบที่เป็นสุญญากาศ จัดเป็นบรรยากาศของการอบชุบโลหะที่ดีที่สุด ผลของการอบชุบจะปลอดจากอ็อกไซด์และการสูญเสียคาร์บอน กล่าวได้ว่าผิวของเหล็กก่อนการอบชุบและหลังการอบชุบแทบจะไม่มี ความแตกต่าง ข้อเสียของการควบคุมบรรยากาศให้เป็นสุญญากาศคือ อุปกรณ์ของเตาและการควบคุมตลอดจนค่าใช้จ่ายในการทำงานสูงมากเมื่อเทียบกับบรรยากาศอื่น ๆ ดังนั้นการอบชุบด้วยสุญญากาศจึงมีความเหมาะสมสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือ เช่น เหล็กกล้าความเร็วสูงที่ใช้ทำเครื่องมือที่ต้องการความเที่ยงตรงแม่นยำสูง ส่วนใหญ่เตาอบชุบสุญญากาศจะมีราคาแพงและมีขนาดไม่ใหญ่โตมากนัก

อุปกรณ์ที่สำคัญของเตาอบชุบความร้อนสุญญากาศ จะประกอบด้วยตัวเตา (Vacuum vessel) ซึ่งจะใช้ระบบให้ความร้อนด้วยพลังงานไฟฟ้า (Heating element) ตัวเตาจะมีท่อดูดอากาศติดกับปั๊มดูดแก๊สชนิดดิฟฟิวชัน (Oil diffusion) และจากปั๊มสุญญากาศดิฟฟิวชัน จะต่อไปยัง

ปั๊มสุญญากาศเชิงกล (Mechanical pump) อีกชั้นหนึ่งซึ่งอาจจะมีปั๊มสุญญากาศเชิงกลชุดเดียวหรือ 2 ชุด หลักการทำงานของปั๊มสุญญากาศลิฟฟวชัน จะเป็นปั๊มสุญญากาศที่ทำให้เกิดสุญญากาศได้มากกว่าปั๊มสุญญากาศเมคคานิก การทำงานจะใช้การต้มน้ำมัน (ประเภทโมเลกุลใหญ่) ให้กลายเป็นไอด้วยเครื่องต้มไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500°C ไอน้ำมันจะระเหยขึ้นทางคอนบนของคอลัมน์และฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) หลายตัวและเป็นชั้น ๆ ด้วยความเร็วสูง (Supersonic speed) ทำให้เกิดแรงดูดอากาศผ่านลงมาทางด้านล่างที่มีท่อลมออกและต่อไปยังปั๊มสุญญากาศเมคคานิก ส่วนไอน้ำมันเมื่อถูกฉีดเป็นฝอยก็จะไปกระทบกับผนังของตัวปั๊มซึ่งมีขดลวดที่มีน้ำเย็นพันอยู่ด้านนอก ไอน้ำมันจะกลั่นตัวกลับเป็นของเหลวไหลกลับลงมาอยู่ในหม้อต้ม และกลับเป็นไอลอยขึ้นไปอีก ส่วนปั๊มสุญญากาศเมคคานิกจะเป็นแบบ โรตารี (Rotary pump) ซึ่งประกอบด้วย ใบพัดหมุนอยู่ในห้องจำกัด โดยใบพัดจะยึดหดได้เพื่อให้สัมผัสกับภายในของตัวปั๊ม จะมีช่องทางให้อากาศเข้าและถูกกวาดออกไปอีกด้านหนึ่งสู่บรรยากาศภายนอก อีกแบบหนึ่งของปั๊มของปั๊มสุญญากาศเมคคานิกที่ใช้กันจะเป็นแบบใบพัด (Rotor) สองตัวหมุนในลักษณะสัมผัสกัน จะดูดอากาศเข้าทางหนึ่งและอัดกันออกไปอีกทางหนึ่ง เป็นลักษณะของปั๊มสุญญากาศที่เรียกว่า Rootes pump

การทำงานร่วมกันของปั๊มเมคคานิกและปั๊มลิฟฟวชัน จะสามารถดูดอากาศภายในเตาให้เป็นสุญญากาศได้มากถึง 10^{-4} torr ซึ่งเป็นสุญญากาศที่การอบชุบจะไม่ปรากฏการเป็นสนิมของเหล็กกล้าภายหลังการอบชุบ ปกติในการอบชุบเหล็กกล้าด้วยเตาสุญญากาศจะกระทำได้ผลดีอยู่ระหว่าง 10^{-1} - 10^{-4} torr ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กและอุณหภูมิที่ใช้อบชุบ

ในการอบชุบเหล็กกล้าที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1000 - 1300°C จะมีปัญหาในเรื่องการสูญเสียโลหะธาตุผสมบางตัวที่มีจุดกลายเป็นไอที่อุณหภูมิในช่วงดังกล่าว เช่น แมงกานีสที่อุณหภูมิ 800°C และความดัน 10^{-4} torr จะกลายเป็นไอ ส่วนโครเมียมที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C ความดันควรต่ำกว่า 10^{-3} torr เพื่อเลี่ยงการสูญเสียโครเมียม ส่วนธาตุอื่น ๆ ไม่ค่อยพบปัญหาการสูญเสียขณะทำการอบชุบภายในเตาสุญญากาศ

การอบชุบแข็ง (Hardening) สำหรับเตาสุญญากาศจะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สอบชุบ ซึ่งต้องเป็นไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ปราศจากออกซิเจนและไอน้ำ เพื่อป้องกันผิวเกิดออกไซด์ แก๊สชุบที่ทำให้อัตราการเย็นตัวสูงที่สุดคือ แก๊สไฮโดรเจน แต่ไม่นิยมใช้เพราะอาจทำให้เกิดการระเบิดได้ หากต้องใช้อาจจำเป็นต้องมีอุปกรณ์รัยที่ช่วยควบคุมการระเบิด

แก๊สชุบที่มีอัตราดึงความร้อนรองจากแก๊สไฮโดรเจนคือ แก๊สฮีเลียม ซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยเหมาะสมอย่างยิ่งในการอบชุบแข็ง แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากราคาแพง

เตาอบชุบสุญญากาศที่ออกแบบสำหรับการอบชุบด้วยน้ำมันจะต้องออกแบบพิเศษ โดยต้องมีฝาปิดเป็นชั้น ๆ เพื่อความสะดวกในการเผาภายในบรรยากาศสุญญากาศและนำเอาชิ้นงานออกจากเตามาอบในน้ำมันอีกด้านหนึ่ง ส่วนที่จะบรรจุชิ้นงานเข้าเตาสุญญากาศ เตาสอบเผา

ภายใต้สูญญากาศและอ่างน้ำมันรวมทั้งกลไกในการเอาชิ้นงานเข้าออกจะถูกสร้างอยู่ภายในเตาเดียวกันซึ่งเรียกว่า Integrated quench vacuum furnace

2.6 การอบปกติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ (Normalizing)

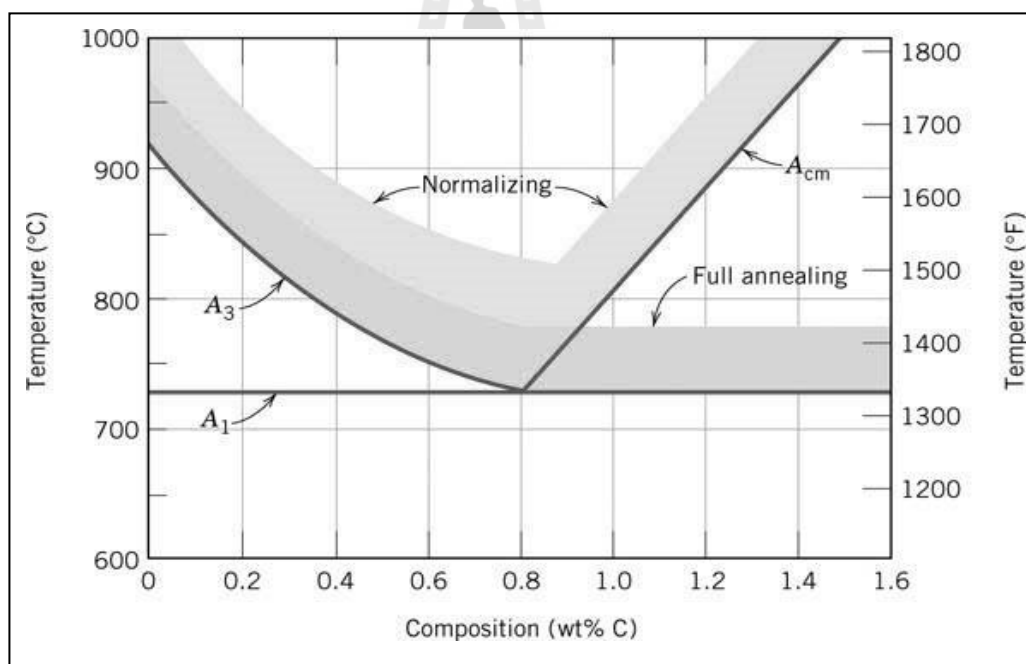
การอบปกติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติมีวัตถุประสงค์สำคัญหลายประการคือ

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

การอบปกติเป็นกรรมวิธีที่ใช้ทำกับงานสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนเช่นการรีด (Hot rolling) หรือการตีขึ้นรูป (Hot forging) เหล็กจะถูกเผาที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงจะได้เหล็กที่มีเกรนโตคุณสมบัติเชิงกลที่ดีจะเปลี่ยนไป (ทนแรงดึงแรงกระแทกได้น้อยลง) งานที่ผ่านการหล่อมาก็เช่นเดียวกันจะมีขนาดเกรนโตมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) และไม่สม่ำเสมออันมีข้อเสียที่จะต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นเช่นการรีด (Cold rolling) หรือการตีขึ้นรูปทำให้โครงสร้างภายในของเหล็กเกิดการบิดเบี้ยวไปตามทิศทางของแรงกระทำทำให้เกิดความเครียดภายในสูญเสียความเหนียวและมีความแข็งเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมออันสิ่งที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่ดีเหล่านี้สามารถทำให้หมดไปและปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยเฉพาะขนาดของเกรนของเนื้อเหล็กทำให้มีขนาดที่เล็กละเอียดและสม่ำเสมอได้ด้วยการอบปกติซึ่งจะเน้นในเรื่องของการปรับปรุงโครงสร้างมากที่สุด (Grain refinement)

การอบปกตินั้น จะใช้วิธีเผาเหล็กให้ร้อนมีอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงออสเตนไนต์ (Austenite) (รูปที่ 2.2) ทั้งเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8% หรือสูงกว่า 0.8% จะเผาอุณหภูมิให้เหนือเส้น A_3 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 ต่อวินาทีอัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้นจะมีผลต่อโครงสร้างที่เกิดขึ้นกล่าวคืออัตราการเย็นตัวยิ่งเร็ว การเปลี่ยนแปลงออสเตนไนต์จะเกิดที่อุณหภูมิยิ่งต่ำลงยูเทคตอยด์ (Eutectoid) ของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงมาทางด้านคาร์บอนต่ำลงสำหรับไฮโปยูเทคตอยด์ และจะย้ายไปทางด้านที่มีคาร์บอนมากขึ้นสำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ทำให้ปริมาณของเพิร์ลไลท์ (Pearlite) เพิ่มขึ้น

และความละเอียดของเฟอไรต์จะยิ่งดีขึ้น (เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่ำ) ความละเอียดของเฟอไรต์ หมายถึงแถบบาง ๆ ที่อยู่ในระหว่างเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และซีเมนต์ไต์ (Cementite) จะแคบมาก นอกจากนี้ โปรยูเทคตอยด์เฟอร์ไรต์ (Proeutectoid ferrite) ในเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์จะมีปริมาณน้อยลงและเช่นเดียวกัน โปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไต์ (Proeutectoid cementite) ในเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จะน้อยลงและลักษณะการต่อเนื่องตามขอบเกรนจะลดน้อยลง คุณสมบัติของโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอไรต์มีความละเอียดเช่นนี้ จะทำให้เหล็กมีความแข็งแรง และความแข็งสูงกว่าเหล็กที่ผ่านการอบอ่อน จากที่กล่าวมาแล้วว่าการอบปกติเป็นการปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอเพื่อที่จะนำไปทำการชุบแข็งในภายหลังนั้น ทั้งนี้ก็เพื่อให้เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งมีคุณสมบัติที่ดี หลีกเลี่ยงข้อเสียที่จะเกิดขึ้น ปกติเหล็กยังมีเกรนละเอียดย่อมเป็นผลดีต่อการชุบแข็งมากเพราะเหล็กมีเกรนหยาบและไม่สม่ำเสมอ ภายหลังจากการชุบแข็งเหล็กจะมีความแข็งไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน และบางทีอาจจะเกิดการบิดหรือแตกร้าวได้



รูปที่ 2.2 แสดงอุณหภูมิของการอบปกติ

2.7 การทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ (Shot blasting)

การพ่นทำความสะอาดผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบปกติด้วยการพ่นเม็ดโลหะนั้น การเลือกวัสดุที่ใช้ในการพ่นทำความสะอาดแบบแห้งเป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงทั้งขนาด รูปร่าง รายละเอียดพื้นผิวที่ต้องการหลังการพ่น และกระบวนการต่าง ๆ ที่จะตามมาหลังจากการพ่น

ทำความสะอาดเสร็จแล้ว วัสดุที่นิยมใช้สามารถแยกได้เป็น ครัวเหล็ก, เม็ดเหล็ก, ทราซ, แก้ว และ สารฟอสเฟตอื่นๆ ซึ่ง ความแข็ง, ขนาด, รูปร่าง และความหนาแน่น ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในการ เลือกระรค์สารฟอสเฟตสำหรับงานนั้นๆ นอกจากนั้น กระบวนการคัดเลือกสารฟอสเฟตต้องพิจารณาจาก ชิ้นงานที่จะพ่นด้วย สารฟอสเฟตที่เป็น โลหะ มักมีรูปร่างเป็น เม็ดโลหะเหลี่ยม เม็ดโลหะกลม และ เส้น ลวดโลหะ

การพ่นทำความสะอาดหรือการทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ เป็นกระบวนการ อัดเม็ดเหล็ก เช่น เม็ดโลหะกลม (Ball) หรือเม็ดโลหะเหลี่ยม (Grit) ให้กระทบที่ผิวของชิ้นงาน โดย ขนาดของเม็ดโลหะ ความแรงและความเร็ว มีผลทำให้ชิ้นงานมีผิวที่สะอาดราบเรียบ แต่จะส่งผล ต่อความแข็งผิวชิ้นงานซึ่งจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น (ASM International, 1994) เนื่องจากที่บริเวณ ผิวชิ้นงานจากแรงกระแทกของเม็ดโลหะเกิดความเค้นสะสมมีผลทำให้การเกิด โครงสร้างแบบ รีเทนออสเตไนต์(Retain austenite) ที่มีอยู่เปลี่ยน โครงสร้างไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite)

เม็ดโลหะเหลี่ยม มักประกอบด้วยโลหะชิ้นเล็ก ๆ ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมแหลมคม มี ศักยภาพในการตัดสูง โดยทั่วไปเม็ดโลหะเหลี่ยมมักทำขึ้นจากเม็ดเหล็กหล่อที่ผ่านการบดละเอียด หรือ เหล็กหล่อที่มีส่วนผสมของซิลิกาต่ำและผ่านการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมาแล้ว ซึ่ง สามารถทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ได้

เม็ดโลหะกลมมักทำมาจากวัสดุประเภทเดียวกับเม็ดโลหะเหลี่ยม หากแต่มีรูปร่างกลม เม็ด โลหะกลมมีวิธีการทำงานต่างจากเม็ดโลหะเหลี่ยม โดยการลบเหลี่ยมและสารปนเปื้อนต่าง ๆ บน พื้นผิวที่ทำการพ่นใส่ โดยแรงกระแทกล้วน ๆ เม็ดเหล็กกลมเป็นชนิดที่ได้รับความนิยมมาก ที่สุด ซึ่งกระทบและทำลายพื้นผิวที่พ่นใส่น้อยที่สุด หากพ่นเหล็กบนพื้นผิวโลหะจะได้พื้นผิวที่ไร้ ความเงาวาว และสามารถควบคุมระดับความไม่เงาวาวได้โดยการเลือกขนาดของเม็ดเหล็ก

เส้นลวดโลหะ มีให้เลือกสำหรับโลหะหลัก ๆ เช่น อลูมิเนียม สแตนเลสซิงค์ และเหล็ก มี การใช้งานที่คล้ายกับเม็ดโลหะกลม

2.8 การชุบแข็งพื้นผิว (Surface Hardening)

การชุบแข็งพื้นผิวเป็นการชุบแข็งเพื่อให้ได้ค่าความแข็งเฉพาะตามบริเวณผิวเท่านั้น ส่วนเนื้อเหล็กภายในผิวแข็งจนถึงใจกลางยังคงเป็นเนื้อเหล็กเดิม ซึ่งมีคุณสมบัติด้านความเหนียว สูง (มนัส สติรจินดา, 2543) ความมุ่งหมายก็เพื่อต้องการให้เหล็กทนต่อการสึกหรอในขณะที่ใช้งาน ทนต่อแรงบิดหรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้ดีโดยไม่แตกหัก นับเป็นกรรมวิธีชุบแข็งเหล็กที่มี ส่วนดีว่าการชุบแข็งตามที่ได้กล่าวมาแล้วเพราะการชุบแข็งโดยวิธีที่กล่าวมาแล้วแม้จะให้ความ แข็งที่ผิวสูงก็ตามแต่จะสูญเสียความเหนียวของเหล็ก การทำ Tempering จะสามารถช่วยเพิ่มความ เหนียวได้บ้างแต่กลับจะต้องสูญเสียค่าความแข็งไปบ้าง ยกเว้นเหล็กผสมสูงบางชนิดที่ทำให้ได้

คุณภาพทั้งความแข็งและความเหนียวแต่เหล็กผสมสูงส่วนมากราคาจะแพงดังนั้นจะเห็นว่าการชุบแข็งพื้นผิวจึงนับว่าเป็นกรรมวิธีชุบแข็งที่น่าสนใจมากในด้านความประหยัดและได้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ดีและมีคุณภาพพร้อมทั้งความแข็งผิวและความเหนียวตัวอย่างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่นิยมทำการชุบแข็งผิวได้แก่เพลาช้อเหวียงเพลาราวล้นเฟืองเกียร์และอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

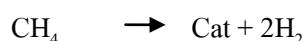
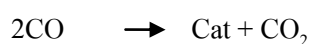
2.8.1 การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์บูไรซิง (Carburizing) หรือ Case Hardening

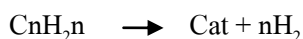
เหล็กที่ชุบแข็งพื้นผิวด้วยกรรมวิธีนี้จะต้องเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำ โดยอยู่ที่ประมาณ 0.1-0.2% และอาจจะมีธาตุบางตัวเช่น นิกเกิล โครเมียม วานาเดียม ผสมอยู่บ้างในปริมาณเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับเหล็กปกติ เหล็กที่มีคาร์บอนต่ำจะไม่สามารถทำการชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดาเพราะมีคาร์บอนน้อยจะไม่มีโอกาสได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ แต่เหล็กชนิดนี้จะมี ความเหนียวสูงทนได้ดีต่อแรงบิดและแรงกระแทก หลักในการชุบด้วยวิธีนี้ใช้หลักการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กได้สูงประมาณ 0.8% ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอนที่มีคุณสมบัติชุบแข็งดีที่สุดหลังจากนั้นจะนำเหล็กไปทำการชุบเพื่อให้ได้ความแข็งและความเหนียวต่อไปวิธีการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวเหล็กมี 3 ลักษณะด้วยกันคือ การชุบแข็งผิวโดยการใส่สารเพิ่มธาตุคาร์บอนในสภาพแก๊สของเหลวและของแข็ง

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

แก๊สที่เป็นตัวเพิ่มคาร์บอนจะใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอน ที่สำคัญได้แก่แก๊สธรรมชาติ (แก๊สมีเทน ; CH_4) แก๊สชนิดนี้จะต้องมีความบริสุทธิ์มาก เพราะถ้ามีน้ำมันติดเข้ามาจะทำให้เกิดเขม่าของน้ำมันที่เผาไหม้และไปจับตามบริเวณผิวของแท่งเหล็ก อันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อะตอมคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยาไม่สามารถแพร่ซึมผ่านผิวเหล็กได้ การชุบแข็งผิวจะได้ผลไม่ดี

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





เมื่อเราทราบปริมาณของคาร์บอนที่ผิวของแท่งเหล็ก ทราบอุณหภูมิของการชุบแข็งผิว เราสามารถควบคุมปริมาณของ CO และ H₂ ของแก๊สที่เป็นตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนได้โดยทางปฏิบัติ ในตอนแรกจะผสมแก๊สตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนในปริมาณที่สูงและจะค่อย ๆ ลดลง จนถึงช่วงสุดท้ายจะไม่มาผสมแก๊สตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนเลย ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูงจนเกินไป เพราะจะทำให้เกิดซีเมนไตต์ตามบริเวณขอบเกรน (Proeutectoid cementite) จะทำให้เหล็กแตกง่ายในขณะที่ชุบแข็ง ปกติเวลาที่ใช้ในการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สนี้จะสั้นกว่าการใช้ของแข็งเล็กน้อย ทำให้เหล็กที่ได้มีเกรนเล็ก

มีวิธีที่พัฒนาขึ้นมาในระยะเวลาไม่นาน โดยการเผาเหล็กด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ (Induction) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000°C ให้มีความร้อนแต่บริเวณผิว ทั้งเหล็กและขดลวดทองแดงเหนี่ยวนำจะอยู่ในเตาปิดมิดชิดโดยมีท่อปล่อยให้แก๊สเพิ่มคาร์บอนผ่านเข้าด้านหนึ่งและผ่านออกอีกด้านหนึ่ง วิธีนี้สามารถชุบแข็งผิวได้ความหนาของผิวแข็ง 0.8-1.0 มิลลิเมตร ใช้เวลาเพียง 30-40 นาที

2.8.2 การชุบแข็งผิวโดยวิธีคาร์โบไนตรายดิง (Carbonitriding)

คาร์โบไนตรายดิงคือวิธีการชุบแข็งพื้นผิว โดยการเพิ่มปริมาณทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนบริเวณผิวเหล็กพร้อม ๆ กันคล้ายคลึงกับการทำ Cyaniding (เพิ่มทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนจากอ่างเกลือ) ผิดแต่การทำคาร์โบไนตรายดิงสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มคาร์บอนและไนโตรเจนจะเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิง (แก๊สธรรมชาติหรือแก๊สที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม) ประมาณ 70-80% โดยปริมาตรกับแก๊สแอมโมเนียประมาณ 20-30% หรืออาจกล่าวได้ว่าการทำคาร์โบไนตรายดิง เป็นการทำคาร์บูไรซิงด้วยแก๊สพร้อม ๆ กับการทำไนตรายดิง (Nitriding ; การเพิ่มไนโตรเจนที่ผิว) การทำคาร์โบไนตรายดิง แบ่งช่วงอุณหภูมิในการทำงานออกเป็น 3 ช่วงคือ

- คาร์โบไนตรายดิงที่อุณหภูมิต่ำ (540-560°C) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งที่ผิวสูงประมาณ 950-1100 H_v แต่ความหนาของผิวแข็งน้อยซึ่งอยู่ระหว่าง 0.02-0.04 มิลลิเมตร และใช้เวลาในการทำงานประมาณ 30 นาทีถึง 3 ชั่วโมงเหมาะสำหรับชุบแข็งผิวอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการตัด (Cutting tool) ที่ทำด้วยเหล็กกล้าความเร็วสูง เช่น มีดตัด โลหะชนิดหมุน (Milling cutter) ดอกสว่าน (Twist drills) และอุปกรณ์สำหรับทำเกลียวเป็นต้นซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ต้องการความแข็งที่ผิวสูงและสัมประสิทธิ์ความฝืดต่ำการทำคาร์โบไนตรายดิงที่อุณหภูมิต่ำไม่ต้องทำการชุบน้ำเพราะความแข็งที่ได้จะเป็นผลจากไนโตรเจนส่วนคาร์บอนมีปริมาณน้อย

- คาร์โบไนตรายดิงที่อุณหภูมิปานกลาง (840-860°C) เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความหนาของผิวแข็งสูงโดยจะต้องใช้เวลาประมาณไม่เกิน 10 ชั่วโมงจะได้ความหนาของผิวแข็งสูงประมาณ 1 มิลลิเมตรจะใช้แก๊สแอมโมเนียผสมประมาณ 30% ชิ้นงานที่ได้ในการชุบแข็งผิวในช่วงอุณหภูมิส่วนใหญ่จะเป็นพวกชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไปแม้จะเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน (Complex shape) สามารถทำการชุบแข็งผิวได้ภายหลังจากการชุบในน้ำแล้วจะต้องนำมาทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200°C เพื่อคลายความเครียดอันเนื่องมาจากการชุบด้วยน้ำ

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

การชุบแข็งด้วยวิธีคาร์โบไนตรายดิงมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแก๊สคาร์บูไรซิงก็คือใช้เวลาในการชุบแข็งผิวสั้นกว่าและได้ความแข็งที่ผิวสูงกว่าและที่สำคัญก็คือสามารถที่จะใช้อุณหภูมิต่ำได้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำ Cyaniding แล้วข้อที่คิดว่ามีเพียงไม่มีสารพิษเข้ามาเกี่ยวข้องกับชิ้นงาน

2.8.3 การชุบแข็งผิวโดยวิธีซอฟต์แวร์ไนตรายดิง (Soft-Nitriding)

กระบวนการซอฟต์แวร์ไนตรายดิงจะทำที่อุณหภูมิต่ำ (520-570°C) ทำให้เกิดชั้นผิวของสารประกอบไนโตรเจน ($Fe_xC_yN_z$) ชั้นผิวของสารประกอบนี้ จะทนทานต่อการสึกกร่อน (เป็นสนิมยาก ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี) มีคุณสมบัติทนทานต่อการเสียดสี เนื่องจากชั้นผิวสารประกอบทนทานต่อการกัดกร่อน ทำให้เห็นโครงสร้างเป็นแถบสีขาวที่บริเวณผิวของชิ้นทดสอบ (Test) ในขณะที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวขาวนี้จึงถูกเรียกว่า "White layer" ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของ White layer นี้กับความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิงและคาร์โบไนตรายดิงแล้วจะมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าเล็กน้อย ดังนั้นจึงได้เรียกกระบวนการนี้ว่า "Soft nitriding" อีกทั้ง อุณหภูมิที่ใช้ต่ำ (520-570°C) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการคาร์บูไรซิงหรือคาร์โบไนตรายดิง จึงถูกเรียกกระบวนการนี้ว่าเป็น Low temperature carbonitriding โดยปกติชิ้นสารประกอบจะมีความแข็งดังต่อไปนี้

- Carbon steel Hv 450~650
- Alloy steel (SCr, SCM) Hv 600~800
- สารประกอบ Fe_3N , Fe_4N : CrN, Cr_2N , AlN, MoN, Mo_2N , Cr-N และ Al-N จะมีความแข็งที่สูง

2.9 คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ

2.9.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis)

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีสามารถกระทำได้หลายวิธี แต่วิธีการที่นิยมมากที่สุด ในโรงงานอุตสาหกรรมคือ การตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Spectrometer ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องจากสามารถเตรียมชิ้นงานได้ง่าย และใช้เวลาในการทดสอบรวดเร็ว (ASM International, 1992) Emission spectrometer นี้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และหาปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็ง โดยจะใช้หลักการ Spark เพื่อทำให้ชิ้นงานให้แสงและคายพลังงานออกมาหรือที่เรียกว่าหลักการ Optical emission spectrometer โดยจะใช้ตัวรับสัญญาณหรือ Detector แบบ Muticcd ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อสามารถแยก Spectrum ของแสงได้ และจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวประมวลผลเพื่อทำการประมวลผลและวิเคราะห์ปริมาณของธาตุออกมา (NDT Instruments)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน โลหะ เป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นสำหรับการควบคุมมาตรฐานการผลิต ตลอดจนช่วยในการพัฒนาวิจัยผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางเคมีตามต้องการ

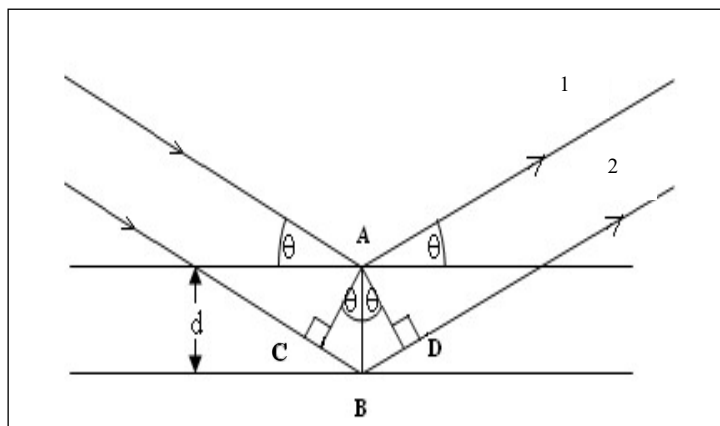


รูปที่ 2.3 แสดง Spark emission spectrometer

2.9.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกความเครียดของโลหะ ขนาดของอนุภาคและการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งในผลึกแต่ละชนิดมีขนาดของหน่วยเซลล์ไม่เท่ากันและประกอบด้วยสารที่

แตกต่างกัน แพทเทอร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการเลี้ยวเบนกับความเข้มสัมพัทธ์ของฟิสิก การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับขนาดของหน่วยเซลล์ คือมีขนาดตั้งแต่ประมาณ 0.1-100 อังสตรอม จึงสามารถเลี้ยวเบนได้ดีจากผลึก เช่นเดียวกับแสงที่สามารถเลี้ยวเบนจากคิฟแฟรคชั้นเกรตติง



รูปที่ 2.4 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบบนผลึก
ที่มา : Advanced Technology (2007)

จากรูปที่ 2.4 จะพบว่ารังสีขนาดกลางบนผลึกที่จุด A และ B ตามลำดับโดยทำมุม θ กับระนาบของผลึก การเลี้ยวเบนของรังสีจะเกิดขึ้นเมื่อระยะทางที่รังสีเอ็กซ์ 1 และ 2 เดินทางต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น ดังสมการที่ 2.1

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ

d : ระยะห่างมอดกกระทบ

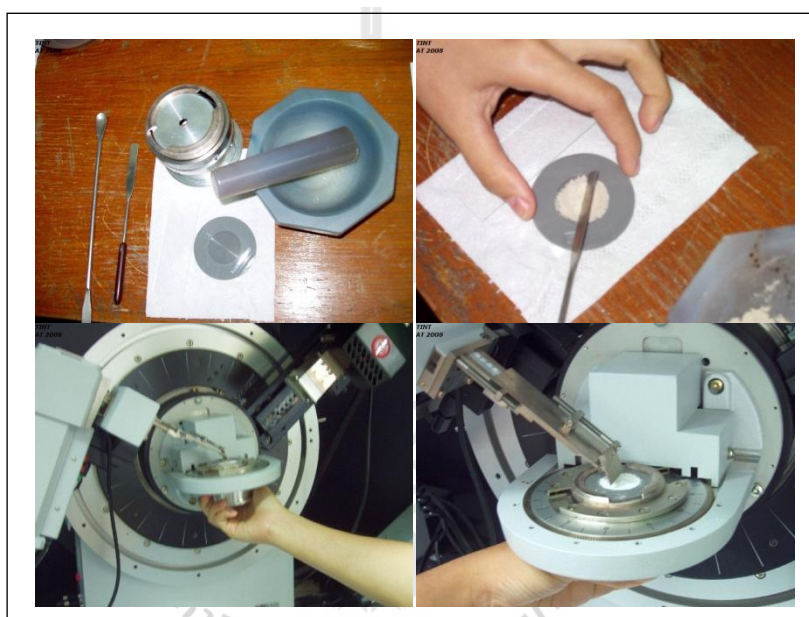
θ : มุมตกกระทบ

λ : ความยาวคลื่น

โดยกฎข้อนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้ารังสีเอ็กซ์ ตกกระทบบนผลึกที่มีความยาวคลื่นที่คงที่แล้ว มุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง

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



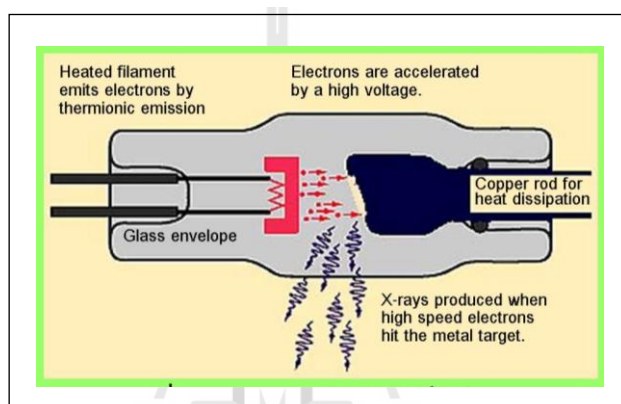
รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ตัวอย่าง

ที่มา : AdvancedTechnology (2007)

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

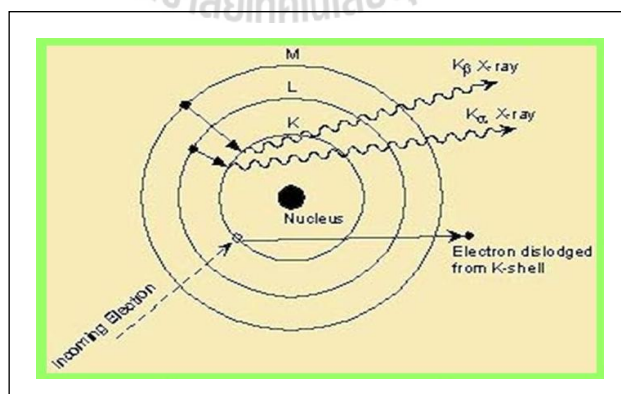
ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ (รูปที่ 2.5) โดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ภายในหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการ

ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เคลื่อนที่เส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเร็วสูงเข้าชนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้ห่วงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไป จึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอ็กซ์ออกมาดังแสดงในรูปที่ 2.6 รังสีเอ็กซ์ที่คายออกมาจะผ่านออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ รังสีเอ็กซ์ (Detector) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แสดงหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์

ที่มา : ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดรังสีเอ็กซ์

ที่มา : ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.

2.9.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

ความแข็ง (Hardness) เป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิวในการทดสอบความแข็ง ไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่จะสามารถทำการทดสอบได้กับทุกวัสดุ (อิทธิพล เดียววิชย์, 2550) ซึ่งในหัวข้อนี้ได้แสดงถึงกระบวนการทดสอบความแข็งแบบรอยกด (Indentation) เป็นการวัดแรงที่กระทำเทียบกับการรอยกดที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำนั้นด้วยกระบวนการเคลื่อนหัวกดลงบนวัสดุ

วิธีการวัดค่าความแข็งแบบการใช้หัวกด (Indenter) สามารถแบ่งออกได้หลายวิธีตามลักษณะของหัวกดที่ใช้ ได้แก่ Brinell, Rockwell, Vicker และ Knoop โดยสามารถเลือกใช้การทดสอบตามมาตรฐานสากลตามความเหมาะสมของลักษณะชิ้นงานและวัสดุที่นำมาทดสอบ และข้อมูลค่าความแข็งที่ต้องการนำไปวิเคราะห์

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดเป็นรอยกดซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่าง ๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอลแบบระนาบหรือแบบกรวยปลายมนหรือปิรามิดซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็งหรือเพชร และใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักคงที่ โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอยกดตามที่กำหนดหรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น

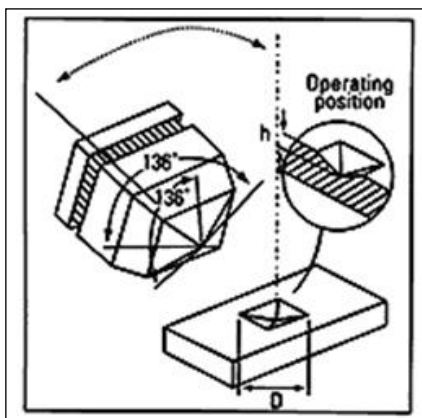
1) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Testing) หลักการของการทดสอบแบบวิกเกอร์สคล้ายคลึงกับหลักการของแบบบริเนลล์ ที่กำหนดให้ค่าความแข็งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้กดต่อหน่วยพื้นที่รอยกด ข้อแตกต่างระหว่างการทดสอบแบบวิกเกอร์สกับการทดสอบแบบบริเนลล์อยู่ที่รูปทรงสัญญาณของหัวกด แบบวิกเกอร์สเป็นหัวกดจัตุรัสที่ทำจากเพชร มุมระหว่างหน้าปิรามิดด้านที่ตรงกันข้ามกันจะเท่ากับ 136 องศา ดังรูปที่ 2.8 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (H_V) จะคำนวณจากสูตรตามสมการที่ 2.2 โดยค่า d คือค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมดังรูปที่ 2.9

$$HV = \frac{2p \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ

p : น้ำหนักที่ใช้กด (กิโลกรัม)

d : ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.8 แสดงหัวกดและรอยกดของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

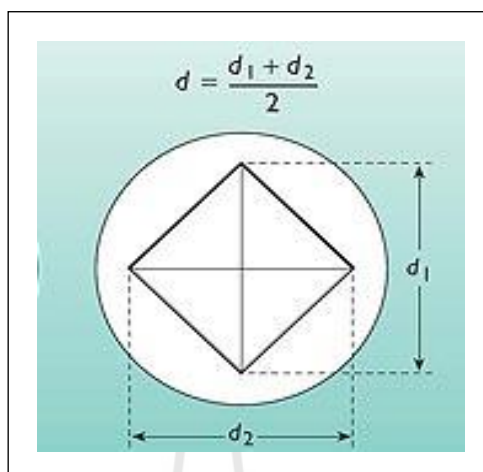
การรายงานค่าความแข็งแบบวิกเกอร์จะรายงานแบบไม่ระบุหน่วยเช่นเดียวกับความแข็งแบบบริเนลล์ จึงควรระมัดระวังไม่ใช้หน่วยที่ผิดเนื่องจากจะทำให้คำนวณค่าความแข็งผิดไป

หัวกดสำหรับการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์จะมีเพียงแบบเดียว การทดสอบวัสดุที่มีความหลากหลายแตกต่างกันจะใช้การปรับน้ำหนักที่ใช้กด ซึ่งในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สแบบธรรมดาใช้น้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่างที่ 1 ถึง 20 กิโลกรัม การทดสอบวัสดุที่มีความแข็งสูงจะใช้น้ำหนักกดมากเพื่อให้ได้รอยกดที่ใหญ่พอจะตรวจวัดขนาดเส้นทแยงมุมได้อย่างแม่นยำ ในทางกลับกันหากวัสดุที่จะทดสอบค่อนข้างอ่อนจะต้องเลือกน้ำหนักกดที่น้อยเพื่อป้องกันไม่ให้อหัวกดจมลึกกลงไปในชิ้นงานมากเกินไป

จุดเด่นของการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์คือตรงที่ค่าความแข็งที่ตรวจวัดได้จะไม่ขึ้นกับน้ำหนักที่ใช้กด หัวกดแบบวิกเกอร์ที่เป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมซึ่งมีมุมของหน้าตรงกันข้ามเท่ากับ 136 องศา ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อแก้ปัญหาที่เป็นข้อเสียสำคัญของหัวกดแบบบริเนลล์ที่เป็นทรงกลม หัวกดที่เป็นลักษณะทรงกลมนั้นเมื่อทำการทดสอบวัสดุชนิดเดียวกันสองครั้งโดยใช้น้ำหนักกดที่ต่างกันไป เนื่องจากหัวกดมีลักษณะเป็นทรงกลม การจมลึกที่ต่างกันทำให้รอยกดที่ได้มีลักษณะทางเรขาคณิตที่ต่างกันส่งผลให้การกระจายของความเค้นตรงรอยกดมีสถานะแตกต่างทำให้ความแข็งที่คำนวณได้จึงแตกต่างกัน

สำหรับหัวกดแบบปิระมิดของวิกเกอร์ส้นมุมของหน้าปิรามิดด้านตรงกันข้ามกันที่เท่ากับ 136° ช่วยให้อรอยกดสามารถรักษารัศมีอัตราส่วนรูปทรงเรขาคณิตเอาไว้ได้แม้ระยะการจมลึกของหัวกด (จากการใช้น้ำหนักกดที่ต่างกัน) จะแตกต่างกันไป จากจุดเด่นของการทดสอบ

แบบวิกเกอร์สนี้เองทำให้ช่องการทดสอบความแข็งมีความต่อเนื่องกันตลอดตั้งแต่วัสดุอ่อนจนถึงวัสดุแข็งด้วยการทดสอบความแข็งเพียงสเกลเดียว



รูปที่ 2.9 แสดงการหาขนาดเส้นทแยงมุมเฉลี่ยในสองแนวซึ่งทำมุมกัน 90 องศา

เนื่องจากหลักการและขั้นตอนการปฏิบัติงานในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สคล้ายกันกับการทดสอบแบบบริเนลล์ ดังนั้นความผิดพลาดจากการทดสอบมักจะมีสาเหตุมาจากการเตรียมชิ้นงานและการอ่านค่าขนาดเส้นทแยงมุมเป็นส่วนใหญ่

หัวกดแบบวิกเกอร์สมีขนาดเล็กทำให้รอยกดที่ได้มีขนาดเล็กมาก การวัดค่าเส้นทแยงมุมจึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงเพื่อช่วยให้สามารถวัดความยาวของเส้นได้ถูกต้องและแม่นยำ การเตรียมชิ้นงานในการวัดก็จะยุ่งยากกว่าวิธีบริเนลล์ คือผิวของชิ้นงานจะต้องเรียบและมัน โดยการขัดด้วยผ้าขัดและผงขัด (ผงอะลูมินา) เพิ่มเติมจากการขัดกระดาษทรายหยาบ ที่ต้องขัดด้วยผงขัดเพิ่มเพราะการขัดแบบธรรมดาจะส่งผลต่อการวัดของหัวกดที่มีขนาดเล็กได้ การใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงยังต้องสะท้อนแสงได้ดีเพื่อความสว่างของภาพ ในทางปฏิบัติจึงเตรียมชิ้นทดสอบแบบวิกเกอร์สเหมือนกับการเตรียมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องโลหวิทยา

ถึงแม้ว่าการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สจะเป็นที่นิยมอย่างมากของกลุ่มนักวิจัยและห้องปฏิบัติการ แต่เนื่องจากการเตรียมชิ้นทดสอบที่ยุ่งยากและใช้เวลานานทำให้ไม่ได้รับความนิยมในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องทดสอบชิ้นงานจำนวนมาก

2) ความแข็งผิว (Case hardness) และความลึกผิวแข็ง (Case depth)

โดยปกติแล้วค่าความแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งผิวแล้วจะมีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณผิวและค่าความแข็งลดลงตามความลึกเข้าไปในชิ้นงาน (ASM International, 2000) ดังนั้นการตรวจวัดคุณภาพงานชุบแข็งผิวจึงสนใจที่ ค่าความแข็งผิว (Surface hardness or case hardness) และค่าความลึกผิวแข็ง (Case depth) ด้วย

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

ความลึกผิวแข็งทั้งหมด (Total case depth) คือระยะทางจากผิวถึงบริเวณหรือจุดแรกด้านในชิ้นงานที่มีค่าความแข็งเท่ากับค่าความแข็งของชิ้นงานด้านในหรือใจกลางชิ้นงาน (Core hardness) โดยปกติแล้วการตรวจวัด total case depth จะใช้วิธีการตรวจสอบโดยการเตรียมตัวอย่างทางโลหะวิทยา แล้วถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน โดยต้องสอบเทียบชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพต่าง ๆ ด้วยเพื่อที่จะกำหนดระยะจากภาพถ่ายได้

ความลึกผิวแข็งที่มีประสิทธิภาพ (Effective case depth) คือระยะทางจากผิวนอกถึงบริเวณหรือจุดแรกด้านในชิ้นงานที่มีค่าความแข็งลดลงจนถึงค่าความแข็งตามเกณฑ์ เช่น กำหนดให้ $513 H_V$ หรือ $50 H_{RC}$ ค่าความแข็งที่ตำแหน่งลึกไปจากนี้จะลดลงต่อไปจนถึงระยะ total case depth โดยเรียกค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์ว่า effective case depth hardness การวัดค่า Effective case depth hardness นั้น ส่วนใหญ่อาศัยเทคนิคการวัดความแข็งแบบ Micro-Vickers และ knoop โดยต้องเลื่อนชิ้นงานเพื่อวัดความแข็งที่ระยะความลึกเข้าไปจากผิวต่างๆ กัน จนกระทั่งถึงระยะหนึ่งที่ค่าความแข็งลดลงเท่ากับเกณฑ์เป็นตำแหน่งแรก

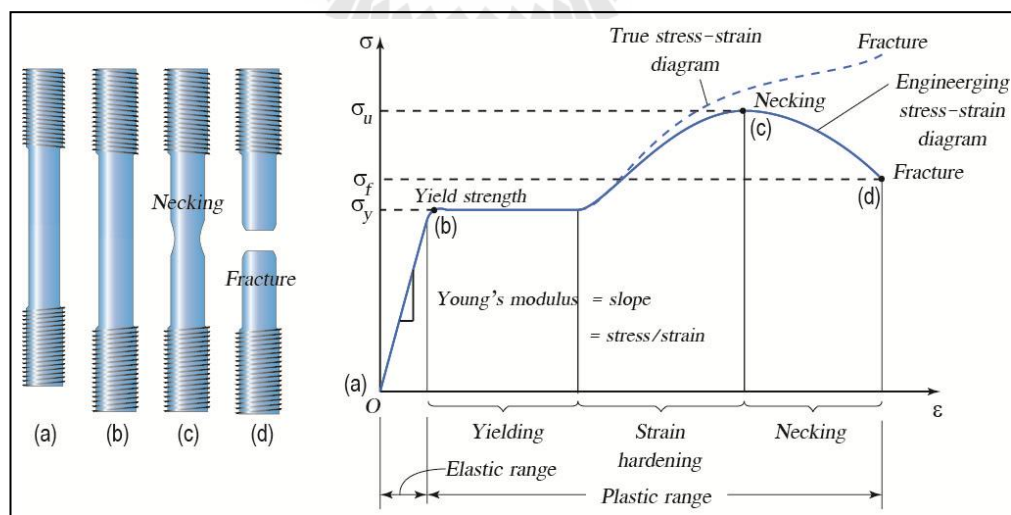
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนด Effective case depth อ้างอิงตาม SAE J423

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

2.9.4 การทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นการทดสอบพื้นฐานทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาความแข็งแรงของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึงในทิศทางเดียว (Uniaxial tensile test) โดยช่วยให้ทราบค่าสมบัติที่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบและเลือกวัสดุได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม เมื่อนำมาใช้ในงานในทางวิศวกรรม ค่าสมบัติเหล่านี้ได้แก่ Ultimate tensile strength (UTS), yield strength และ %Elongation

มาตรฐานในการทดสอบแรงดึง (ASTM International, 2012) ได้กำหนดลักษณะของชิ้นทดสอบโดยอาจเป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอกหรือชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่น ปลายของชิ้นทดสอบทั้งสองข้างต้องมีขนาดและพื้นผิวที่เหมาะสมกับการจับยึดเข้ากับเครื่องทดสอบ เพื่อป้องกันการหลุดของชิ้นทดสอบในระหว่างการทดสอบแรงดึง ขนาดของชิ้นทดสอบ ได้แก่ ความยาวเกจ (Gauge length, L_0), ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_0) หรือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (A_0) จะมีสัดส่วนแปรผันกัน กำหนดเป็นค่ามาตรฐานตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของประเทศต่าง ๆ ชิ้นทดสอบแรงดึงที่ต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางด้านความแข็งผิวของชิ้นงาน (Surface hardening) เช่น การทำ Nitriding, Carburizing หรือการเคลือบที่ผิว ควรนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการเหล่านี้ ภายหลังการขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อให้ได้ผลการทดสอบสมบัติแรงดึงของชิ้นงานที่ต้องการ รวมถึงสมบัติผิวของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงแล้วด้วย



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดในทางวิศวกรรม ในการทดสอบแรงดึงในแนวแกน

วัสดุที่ได้รับแรงดึงจะมีการเปลี่ยนรูปในช่วงแรกเป็นแบบ Elastic โดยจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำต่อชิ้นงานและการยืดตัวของชิ้นงานเป็นเชิงเส้น เมื่อนำมาคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดในทางวิศวกรรมที่จุดใด ๆ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ 2.3 และ 2.4

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ

σ : ความเค้นทางวิศวกรรม

P : แรงดึงที่กระทำขนานกับความยาวของชิ้นงาน

A_0 : พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงาน

$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

เมื่อ

ϵ : ความเครียดทางวิศวกรรม

L_0 : ความยาวเดิมของชิ้นงาน

L_f : ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน

หากพิจารณากราฟความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม ในช่วงที่โลหะมีการเปลี่ยนแปลงแบบ Elastic หากนำแรงภายนอกออกไปจะทำให้รูปทรงของชิ้นงานกลับสู่สภาพเดิม ตามกฎของฮุกส์ (Hook's Law) ซึ่งค่าความชันระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมคือค่าโมดูลัสของยังส์ (Young's modulus ; E) ดังสมการที่ 2.5

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.5)$$

ค่าโมดูลัสของยังส์มีความสำคัญอย่างมากในทางวิศวกรรมในเรื่องเกี่ยวกับการดัดงอของวัสดุ (Deflection of material) เช่นการงอตัวของคานเหล็กเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกในสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ เช่น สะพาน อาคาร เรือ เป็นต้น

ถ้าชิ้นงานยังได้รับแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอต่อไป จะเกิดปรากฏการณ์ Yielding ซึ่งเป็นจุดแรกที่ชิ้นงานโลหะเกิดการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก (Plastic deformation) โดยค่าความแข็งแรงที่จุดนี้เรียกว่า Yield strength (σ_y) ซึ่งได้จากค่าแรงกระทำตรงตำแหน่งการเกิด Yielding (P_y) ต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานตามสมการ 2.6

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0} \quad (2.6)$$

ค่า Yield strength เป็นค่าที่บอกถึงจุดเริ่มต้นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ซึ่งมีความสำคัญต่องานทางด้านวิศวกรรมอย่างมาก ทั้งงานโครงสร้าง และงานออกแบบในการก่อสร้าง โดยใช้เพื่อหาค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัย ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ประมาณค่าหรือทำนายค่าความแข็งแรงของวัสดุให้สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย

ค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด หรือ Ultimate tensile strength (σ_{TS}) เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องหลังจากการเกิด Yielding ซึ่งต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นเพื่อให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ในช่วงที่โลหะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เรียกว่าการเกิด Work hardening หรือ Strain hardening เมื่อให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่อง ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด คือค่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด หรือ Ultimate tensile strength (σ_{TS}) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุสามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด จากนั้นพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานจะเริ่มเกิดการคอดลง ที่จุดกึ่งกลางชิ้นงาน เรียกว่าการเกิด Necking ชิ้นงานจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากพื้นที่ในการรับแรงมีขนาดลดลง กราฟจะลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะแตกหัก (Fracture) ในที่สุด โดยค่าความแข็งแรงของวัสดุที่จุดแตกหัก (σ_f)

ค่าความยืดหยุ่นตัวของชิ้นงาน (Tensile ductility) สามารถหาได้จากเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) หรือเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน (%RA) ตามสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$\%Elongation = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (2.7)$$

$$\%RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100 \quad (2.8)$$

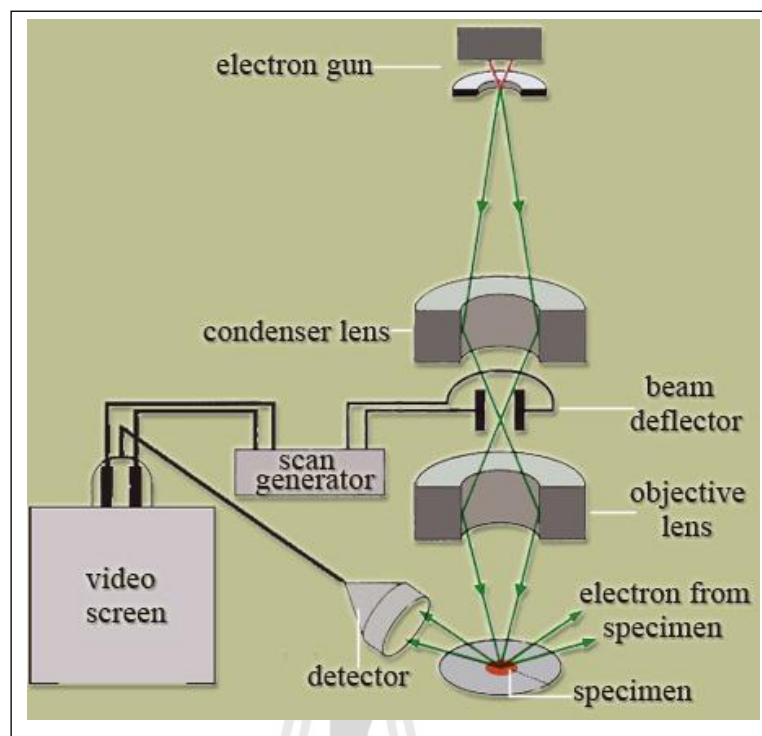
เมื่อ A_f : พื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานหลักการแตกหัก

2.9.5 การศึกษาพื้นผิวการแตกหัก (Fractography)

การป้องกันการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงาน โครงสร้าง หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรในระหว่างการใช้งานในทางวิศวกรรมนั้น จะเริ่มจากการศึกษาถึงต้นตอของปัญหาที่เกิดขึ้นกับความเสียหายดังกล่าว โดยการใช้หลักการในการวิเคราะห์ความเสียหาย เรียกว่า Failure analysis โดยการวิเคราะห์นี้ต้องอาศัยผู้มีความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์มากพอสมควร เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลการตรวจสอบที่ถูกต้องได้ ความเสียหายหรือการแตกหักสามารถแบ่งประเภทออกเป็นหลัก ๆ ได้ 2 กลุ่มใหญ่ คือ การแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) และการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) โดยการศึกษาการแตกหักแบบเปราะจะได้รับความสนใจมากกว่า เนื่องจากมีช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรน้อย ซึ่งมีผลกระทบมากกว่าและยากต่อการป้องกันความเสียหายดังกล่าว แต่การแตกหักแบบเหนียวจะมีช่วงการเปลี่ยนรูปมากพอที่จะแก้ไขความเสียหายได้ ก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้นจริง

วิธีการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักที่นิยมมากคือ การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscopy) หรือ SEM (ASM International, 1992) โดยขั้นตอนสอบควรทำความสะอาดและถูกจับยึดอย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันการหลุดในระหว่างตรวจสอบในสภาพสุญญากาศ ซึ่งในการตรวจสอบขั้นตอนสอบ อาจต้องมีการหมุนปรับชิ้นงานระหว่างตรวจสอบ และชิ้นงานที่นำมาทำการตรวจสอบต้องปราศจากความชื้น ขั้นตอนต้องเป็นวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้า หากไม่มีสมบัติการนำไฟฟ้าดังกล่าว นิยมเคลือบผิวด้วยทอง (กระบวนการ Sputtering)

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้



รูปที่ 2.11 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง SEM

ที่มา : วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

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

2.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistics analysis)

สถิติ คือการนำข้อมูลหลายๆ ค่า ซึ่งได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูล มาทำการวิเคราะห์โดยไม่เจาะจงข้อมูลค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งมีประโยชน์ในการศึกษาและการวัดที่ต้องการข้อมูลที่เชื่อถือได้สูง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ สถิติพรรณนา (Descriptive statistics) และสถิติอ้างอิง (Inferential statistics) (Montgomery, D.O., et. al., 2012)

สถิติพรรณนา เป็นสถิติที่ใช้อธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของสิ่งที่ต้องการศึกษาในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง วิธีการทางสถิติที่อยู่ในลักษณะนี้ เช่น การจัดกระทำกับข้อมูลโดยนำเสนอในรูปแบบของตารางหรือรูปภาพ การแปลงคะแนนให้อยู่ในรูปแบบอื่น ๆ เช่น เปอร์เซ็นต์ไทล์ คะแนนมาตรฐาน เป็นต้น การคำนวณค่าเฉลี่ยหรือการกระจายของข้อมูล ได้แก่ มัชฐาน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พิสัย

เป็นต้น ส่วนสถิติอ้างอิง เป็นสถิติที่ใช้อธิบายคุณลักษณะของสิ่งที่ต้องการศึกษาในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งแล้วสามารถอ้างอิงไปยังกลุ่มอื่น ๆ ได้ โดยกลุ่มที่นำมาศึกษาจะต้องเป็นตัวแทนที่ดีของประชากรซึ่งได้มาด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างและตัวแทนที่ดีของประชากรนี้ เรียกว่า กลุ่มตัวอย่าง สถิติอ้างอิงสามารถแบ่งได้อีก 2 ประเภท คือ สถิติมีพารามิเตอร์ (Parametric statistics) และสถิติไร้พารามิเตอร์ (Non-parametric statistics)

สถิติมีพารามิเตอร์ เป็นวิธีการทางสถิติที่จะต้องเป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น 3 ประการ คือ ตัวแปรที่ต้องการวัดจะต้องอยู่ในมาตรฐานการวัดระดับช่วงขึ้นไป (Interval scale) ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากกลุ่มตัวอย่างจะต้องมีการแจกแจงเป็น โค้งปกติ และกลุ่มประชากรแต่ละกลุ่มที่นำมาศึกษาจะต้องมีความแปรปรวนเท่ากัน สถิติมีพารามิเตอร์นี้ ได้แก่ t-test, ANOVA, Regression analysis เป็นต้น

สถิติไร้พารามิเตอร์ เป็นวิธีการทางสถิติที่ไม่มีข้อจำกัดใด ๆ นั่นคือ ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากกลุ่มตัวอย่างมีการแจกแจงแบบใดก็ได้ (Free distribution) กลุ่มประชากรแต่ละกลุ่มที่นำมาศึกษาไม่จำเป็นต้องมีความแปรปรวนเท่ากัน สถิติในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไคสแควร์, Median test, Sign test เป็นต้น

ความแปรปรวน (Variance) เป็นมาตรฐานการวัดการกระจายของข้อมูลซึ่งมีความสัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เนื่องจากความแปรปรวนสามารถคำนวณได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ยกกำลังสอง ความแปรปรวนจึงเป็นการวัดการกระจายข้อมูลในรูปของพื้นที่ สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือเรียกว่า ANOVA เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งยังคงใช้หลักการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มประชากรเดียวหรือ 2 กลุ่ม ในการใช้ z หรือ t ในการทดสอบ กล่าวคือ ถ้าเป็นการเปรียบเทียบกับประชากรเพียงกลุ่มเดียว ส่วนใหญ่จะเป็นการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าที่ผู้วิจัยสนใจหรือค่าที่กำหนดขึ้น ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างประชากร 2 กลุ่ม จะเป็นที่กำหนดไว้ ในกรณีที่มีประชากรมากกว่า 2 กลุ่มหรือมีสิ่งที่ต้องการศึกษามากกว่า 2 สิ่ง ความแตกต่างระหว่างกลุ่มจะถูกวัดในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือความแปรปรวน ซึ่งในที่นี้ก็คือค่าเฉลี่ยของความแปรผัน (Mean squares) โดยที่ความแปรผันเกิดจากผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าแต่ละค่าของค่าเฉลี่ย การวิเคราะห์ความแปรปรวน จึงเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มกับความแตกต่างภายในกลุ่มในกรณีที่ประชากรมีมากกว่า 2 กลุ่มในลักษณะของความแปรผัน โดยมีเงื่อนไขว่าข้อมูลที่ได้จากกลุ่มประชากรที่นำมาทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยข้อมูลของแต่ละกลุ่ม จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติเท่านั้น การวิเคราะห์ความแปรปรวน จำแนกออกได้ 2 ประเภท คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวเดียวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative variable) ที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่าง ๆ ส่วนตัวแปรตามอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative variable) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และสมการที่ 2.9-2.13

ตารางที่ 2.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
Treatments	$SS_{\text{Treatments}}$	$a-1$	$MS_{\text{Treatments}}$	$\frac{MS_{\text{Treatments}}}{MS_E}$
Error	SS_E	$a(n-1)$	MS_E	
Total	SS_T	$an-1$		

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (2.9)$$

$$SS_{\text{Treatments}} = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (2.10)$$

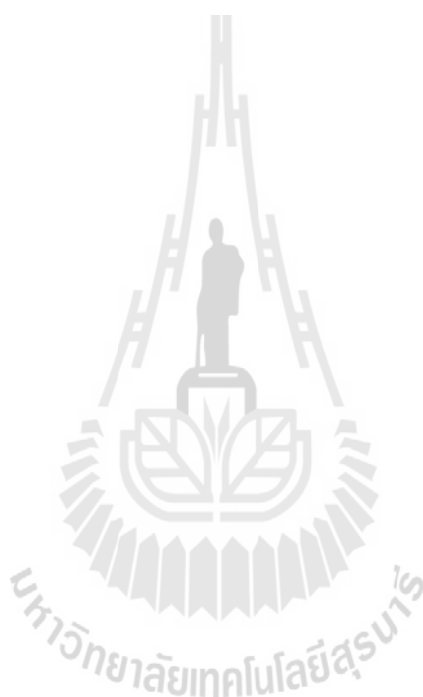
$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Treatments}} \quad (2.11)$$

$$MS_{\text{Treatments}} = \frac{SS_{\text{Treatments}}}{a-1} \quad (2.12)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{a(n-1)} \quad (2.13)$$

- เมื่อ
- a : The level of a single factor. (Treatment)
 - n : Sample size
 - y : Observed data

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่เป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่าง ๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองไปพร้อมกันแล้ว ยังสามารถศึกษาได้ถึงผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัว ว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่ง นอกจากจะส่งผลใด ๆ ต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรตามอีกตัวหนึ่งหรือไม่



บทที่ 3

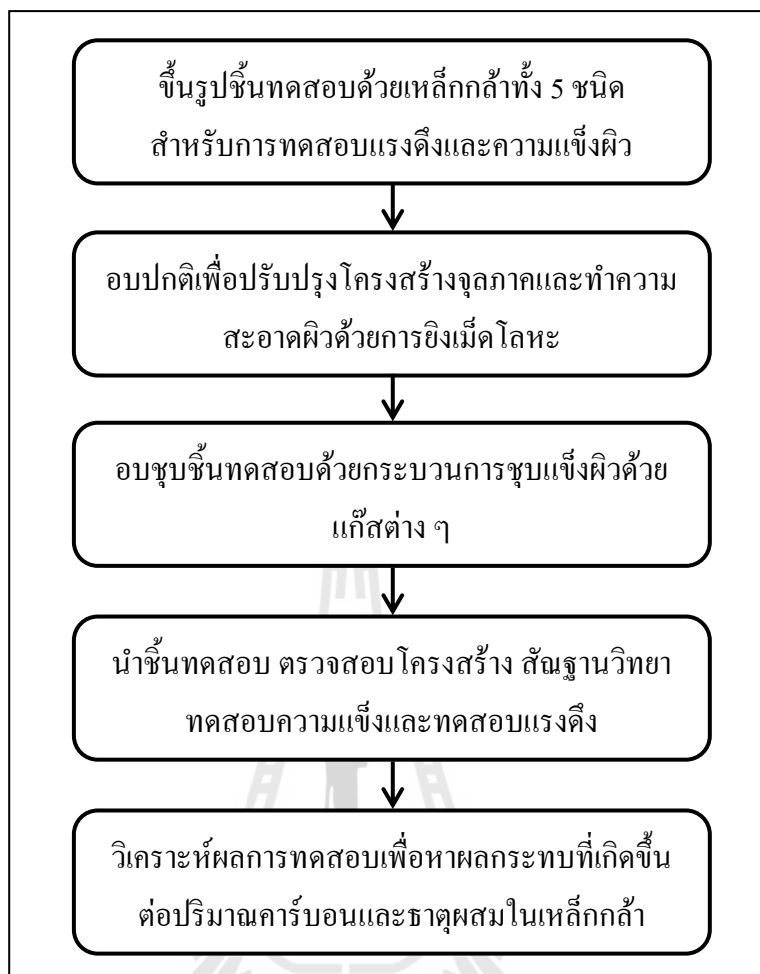
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ เหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง ต่อสมบัติเชิงกล โครงสร้างและความแข็งผิวของเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสม ซึ่งกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สในการทำวิจัย ได้แก่ ซอพท์ไนตรายดิง, คาร์บูไรซิง และคาร์โบไนตรายดิงกระบวนการชุบแข็งผิวเหล่านี้นิยมใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าให้ดีขึ้น ในภาคอุตสาหกรรม แต่ละกระบวนการมีข้อดีต่างกันไป การศึกษาผลกระทบของการบวนการร่วมดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการชุบแข็งที่มีอยู่เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการชุบแข็งเหล็กกล้าต่าง ๆ ทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม เพื่อให้ผู้ผลิตสามารถนำไปเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ต่อไป

เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เหล็กกล้าเกรด AISI 1010, 1020, 1040, 4140 และ 4340 โดยแบ่งออกได้เป็นกลุ่ม ๆ คือ กลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งมีปริมาณคาร์บอนแตกต่างกัน คือ AISI 1010, 1020 และ 1040 ส่วนกลุ่มที่สองคือเหล็กกล้าผสมซึ่งมีปริมาณคาร์บอนเท่ากัน แต่มีปริมาณธาตุผสมต่างกัน คือ AISI 1040, 4140 และ 4340 เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบเมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณคาร์บอนหรือปริมาณธาตุผสมในการอบชุบด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง โดยเปรียบเทียบกับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สอื่น ๆ ได้แก่ ซอพท์ไนตรายดิง, คาร์บูไรซิง และ คาร์โบไนตรายดิง

จากนั้นทำการออกแบบและเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการอบปกติและทำความสะอาผิวด้วยการยิงเม็ด โลหะ ก่อนจะนำชิ้นตัวอย่างไปชุบแข็งผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ แก๊สซอพท์ไนตรายดิง แก๊สคาร์บูไรซิง แก๊สคาร์โบไนตรายดิง และกระบวนการผสมระหว่างแก๊สซอพท์ไนตรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทดสอบแรงดึงและการทดสอบความแข็งผิว ทำการวิเคราะห์โครงสร้างผิวซึ่งทดสอบที่ผ่านการอบชุบและสภาพสัณฐานวิทยา เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทดลองต่อไป โดยแผนผังการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม

3.2.1 วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม

ในการเตรียมชิ้นทดสอบนั้น ใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมตามมาตรฐานของ AISI (American Iron and Steel Intitute) ซึ่งเป็นมาตรฐานของสถาบันเหล็กของสหรัฐอเมริกา (ตารางที่ 3.1) โดยแบ่งเหล็กออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- กลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งมีปริมาณคาร์บอนแตกต่างกัน คือ AISI 1010, 1020 และ 1040 โดยมีปริมาณคาร์บอน 0.1%, 0.2% และ 0.4% ตามลำดับ เหล็กกล้าเหล่านี้เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่เป็นหลัก ใช้เป็นชิ้นทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นทดสอบมีปริมาณธาตุคาร์บอนต่างกัน
- ส่วนกลุ่มที่สองคือเหล็กกล้าผสมซึ่งมีปริมาณคาร์บอนเท่ากัน แต่มีปริมาณธาตุผสม

ต่างกัน คือ AISI 1040, 4140 และ 4340 ซึ่งเหล็กเหล่านี้มีประมาณคาร์บอนเท่า ๆ กันคือประมาณ 0.4% และมีธาตุผสมเพิ่มช่วยในการอบชุบ โดย AISI 4140 มีธาตุโครเมียมและโมลิบดีนัมเป็นธาตุผสมหลัก ส่วน AISI 4340 มีธาตุผสมใกล้เคียงกับ AISI 4140 คือ โครเมียม และ โมลิบดีนัมผสมอยู่ แต่จะมีธาตุนิเกิลเป็นธาตุผสมหลักด้วย ซึ่งมีบทบาทด้านเพิ่มคุณสมบัติชุบแข็ง เหล็กกล้าเหล่านี้ใช้เป็นชิ้นทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นทดสอบมีธาตุผสมหลักที่มีบทบาทด้านการชุบแข็งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม (%wt, Balance Fe)

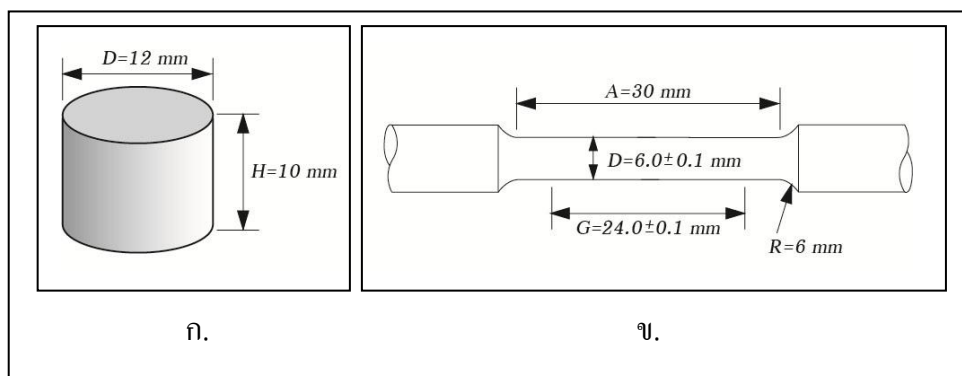
Materials	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe
AISI 1010	0.1218	0.2009	0.4305	0.0140	0.0080	0.0661	0.0291	0.0527	0.0041	0.0009	0.0054	Bal.
AISI 1020	0.2241	0.1952	0.4694	0.0149	0.0098	0.2046	0.0564	0.0856	0.0085	0.0013	0.0053	Bal.
AISI 1040	0.4198	0.2112	0.6344	0.0186	0.0148	0.1555	0.0658	0.0568	0.0109	0.0016	0.0052	Bal.
AISI 4140	0.3942	0.2186	0.6946	0.0267	0.0043	0.0691	0.0457	0.8599	0.1526	0.0075	0.0245	Bal.
AISI 4340	0.3818	0.2689	0.7064	0.0175	0.0340	0.1721	1.7194	0.8926	0.2618	0.0067	0.0146	Bal.

3.2.2 ลักษณะของชิ้นตัวอย่างเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสม

ลักษณะของชิ้นทดสอบสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทตามลักษณะการทดสอบคือ

- การทดสอบความแข็งและสภาพทางสัณฐานวิทยา เตรียมชิ้นทดสอบให้มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกระบอกดังรูปที่ 3.2 (ก) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และมีความสูง 10 มิลลิเมตร ใช้สำหรับการทดสอบโครงสร้างผลึกที่ผิวด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) การตรวจสอบปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผิวชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการอบชุบแข็งผิวด้วยแก๊สด้วยเครื่อง Optical emission spectrometer (OES) การทดสอบความแข็งผิว ระยะการซึมลึกและสภาพทางสัณฐานวิทยา ในการเตรียมชิ้นทดสอบใช้เครื่องตัดละเอียด เพื่อให้ได้ผิวชิ้นทดสอบที่มีความเรียบ

- การทดสอบแรงดึง อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) เป็นมาตรฐานของสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่กำหนดมาตรฐานซึ่งเป็นที่นิยมใช้และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงสำหรับวัสดุกลุ่มโลหะคือ ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ใช้ชิ้นทดสอบขนาดเล็กแบบชิ้นงานกลมซึ่งมีสัดส่วนของชิ้นทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ดังรูปที่ 3.2 (ข) ด้วยวิธีการกลึงขึ้นรูป



รูปที่ 3.2 แสดงขนาดต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ (มิลลิเมตร) ก. ชิ้นทดสอบทรงกระบอก และ ข. ชิ้นทดสอบแรงดึงแบบกลม

3.2.3 การอบปกติชิ้นทดสอบ

วัสดุเหล็กกล้าที่นำมาใช้ในการทำชิ้นทดสอบนั้น ได้ผ่านกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น การรีดขึ้นรูป ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบทั้งความสม่ำเสมอและความหยาบของเกรน นอกจากนี้การขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยกรรมวิธีทางกล เช่น การตัด การกัด การกลึง ยังอาจส่งผลให้ชิ้นทดสอบเกิดความเครียดตกค้างที่ผิว รวมถึงส่งผลต่อความสม่ำเสมอและความหยาบของเกรนบริเวณดังกล่าวอีกด้วย ดังนั้นการอบปกติเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและกำจัดความเครียดตกค้างจึงได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติชิ้นทดสอบก่อนจะนำไปทำการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส เพื่อเป็นการกำหนดมาตรฐานให้ชิ้นทดสอบมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน

ในการอบปกติเหล็กกล้า นั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการอบชุบคือ อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบชุบ การอบปกตินั้นต้องอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_3 ประมาณ 30-50 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่อยู่ในชิ้นทดสอบ ส่วนระยะเวลาในการอบชุบต้องมีเวลาเพียงพอต่อการเปลี่ยนโครงสร้างชิ้นทดสอบให้เป็นออสเตนไนต์ (Austenitizing) ทั้งหมด โดยระยะเวลาในการอบชุบจะประกอบด้วย การอุ่นชิ้นงาน (Preheating) และการอบแช่ (Holding) ที่อุณหภูมิออสเตนไนต์ เพื่อให้ความร้อนกระจายทั่วทั้งชิ้นงานและมีความสม่ำเสมอทั้งผิวนอกและแกนกลาง เวลาที่ใช้อบแช่ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน ในชิ้นงานที่มีความหนา 1 นิ้ว ใช้เวลาอบแช่ประมาณ 1 ชั่วโมง และเวลาอย่างน้อยที่สุด 30 นาที ซึ่งต้องเพียงพอที่ทำให้คาร์ไบด์ละลายตัวเป็นออสเตนไนต์ทั้งหมด แต่หากมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากขนาดของเกรนโตมากกว่าปกติ

จากตารางที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิและเวลาในอบปกติขึ้นทดสอบซึ่งขึ้นรูปจาก เหล็กกล้าเกรด AISI 1010, 1020, 1040, 4140 และ 4340

ตารางที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิและเวลาในอบปกติขึ้นทดสอบ

ชนิดวัสดุเหล็กกล้า	ประเภทขึ้นทดสอบ	อุณหภูมิอบปกติ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาอบปกติ (นาที)
AISI 1010	ขึ้นทดสอบความแข็ง	930	60
	ขึ้นทดสอบแรงดึง	930	45
AISI 1020	ขึ้นทดสอบความแข็ง	930	60
	ขึ้นทดสอบแรงดึง	930	45
AISI 1040	ขึ้นทดสอบความแข็ง	870	60
	ขึ้นทดสอบแรงดึง	870	45
AISI 4140	ขึ้นทดสอบความแข็ง	870	60
	ขึ้นทดสอบแรงดึง	870	45
AISI 4340	ขึ้นทดสอบความแข็ง	870	60
	ขึ้นทดสอบแรงดึง	870	45

3.2.4 การพ่นทำความสะอาดผิวด้วยเม็ดโลหะ

การพ่นทำความสะอาดผิวขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบปกติด้วยการพ่นเม็ดโลหะนั้น การเลือกวัสดุที่ใช้ในการพ่นทำความสะอาดแบบแห้งเป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงทั้งขนาด รูปร่าง รายละเอียดพื้นผิวที่ต้องการหลังการพ่น และ กระบวนการต่าง ๆ ที่จะตามมาหลังจากการพ่นทำความสะอาดเสร็จแล้ว วัสดุที่นิยมใช้สามารถแยกได้เป็น กรวดเหล็ก, เม็ดเหล็ก, ทราช, แก้ว และ สารพ่นชนิดอื่นๆ ซึ่ง ความแข็ง, ขนาด, รูปร่าง และความหนาแน่น ล้วนเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกสรรวัสดุพ่นสำหรับงานนั้นๆ นอกจากนี้ กระบวนการคัดเลือกสารพ่นอาจต้องพิจารณาจากชิ้นงานที่จะพ่นด้วย สารพ่นที่เป็นโลหะ มักมีรูปร่างเป็น เม็ดโลหะเหลี่ยม เม็ดโลหะกลม และ เส้นลวดโลหะ

ขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบปกติจะถูกนำมาทำความสะอาดผิวโดยการพ่นทำความสะอาด ด้วยเม็ดโลหะเหลี่ยมขนาด 0.3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน 60 นาที ด้วยเครื่องยิงเม็ดโลหะ (Shot Blasting Machine) GROWELL รุ่น GW-10 ซึ่งเม็ดโลหะเหลี่ยม มักประกอบด้วย โลหะชั้นเล็กที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมแหลมคมมีศักยภาพในการตัดสูง โดยทั่วไปแล้ว

เม็ดโลหะเหลี่ยมมักทำขึ้นจาก เม็ดเหล็กหล่อที่ผ่านการบดละเอียดมาแล้ว หรือเหล็กหล่อที่มี ส่วนประกอบซิลิก้าต่ำและผ่านการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมาแล้ว ซึ่งสามารถทำให้เป็นชิ้นเล็กๆได้

3.3 กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทำความสะอาดผิวแล้ว จะถูกนำมาผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วย แก๊ส (Gas surface hardening method) ทั้งหมด 5 กระบวนการคือ

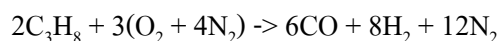
- 1) แก๊สซอพต์ไนตรายดิง (Gas Soft-nitriding; SN)
- 2) แก๊สคาร์บูไรซิง (Gas Carburizing; CB)
- 3) แก๊สคาร์โบไนตรายดิง (Gas Carbonitriding; CN)

และกระบวนการร่วม (Combined processes) ระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิงกับแก๊ส คาร์บูไรซิงอีก 2 กระบวนการคือ

4) กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB หรือ Combined 1) คือ ชิ้นทดสอบจะผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนตรายดิงก่อน จากนั้นนำชิ้น ทดสอบชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงอีกครั้ง

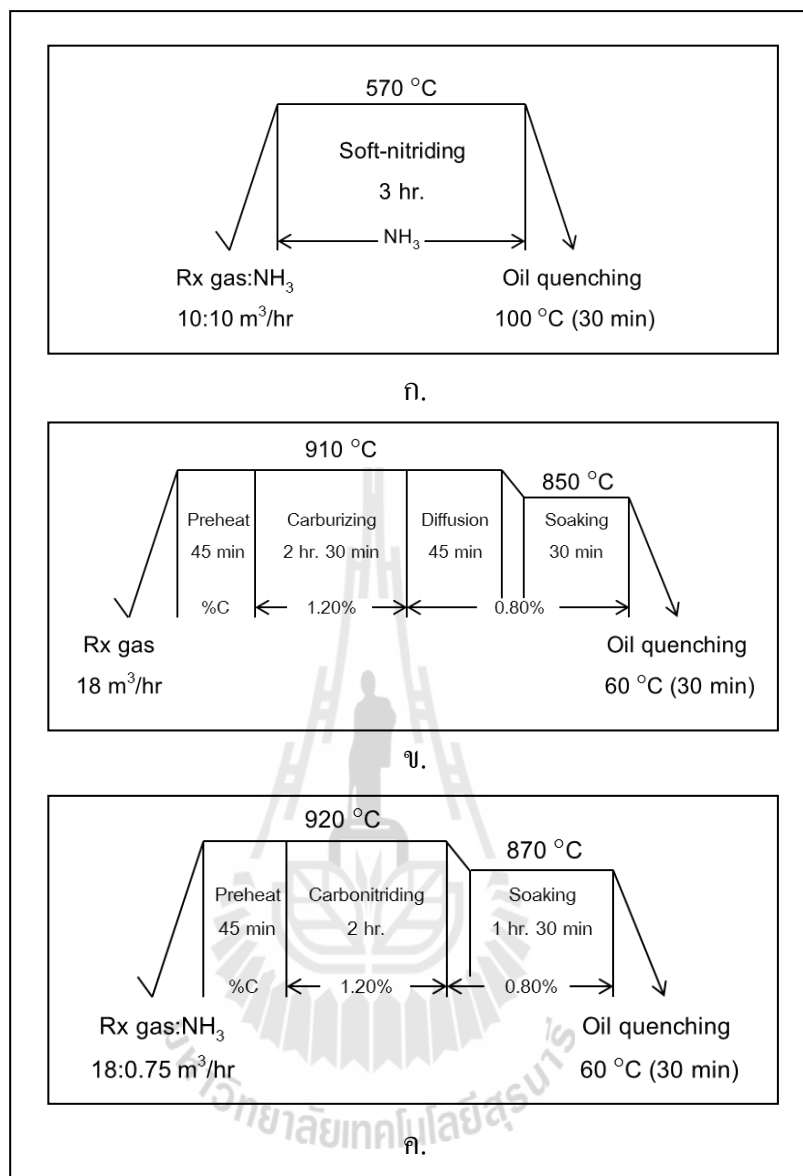
5) กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ไนตรายดิง (CB+SN หรือ Combined 2) คือ ชิ้นทดสอบจะผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงก่อน จากนั้นนำชิ้นทดสอบ ชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนตรายดิงอีกครั้ง

กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส เป็นการเติมธาตุผสมเพื่อให้ผิวมีความแข็งแรงขึ้น สามารถ ทำได้หลายสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม แบบแก๊สเป็นวิธีที่ นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งช่วยประหยัดเวลาในการชุบผิวแข็งได้ ในการชุบแข็งผิวชิ้นทดสอบ ใช้แก๊สเอนโดเทอร์มิกเป็นแก๊สที่ได้จากการแตกตัว (Clacking) ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) ได้จากแก๊สโพรเพน (C_3H_8) ในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก่อนนำไปใช้ในเตา โดยการทำปฏิกิริยาของโพรเพนกับอากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ดังนี้



ส่วนธาตุไนโตรเจนซึ่งได้จากการใช้แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ในการทำปฏิกิริยาจะแตกตัวให้ ไนโตรเจน (N) ในเตา โดยธาตุทั้งสองเติมเข้าไปเพื่อให้ได้ความแข็งแรงของผิวชิ้นทดสอบ กระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 3.3 โดย (ก) แสดงกระบวนการแก๊ส ซอพต์ไนตรายดิง (ข) แสดงกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (ค) แสดงกระบวนการแก๊ส คาร์โบไนตรายดิง

กระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดอ้างอิงมาจากข้อมูลการชุบแข็งผิวที่ใช้ใน บริษัทไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด โดยเลือกจากระยะเวลาในการชุบแข็งประมาณ 3-4 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 แสดงกระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ก. แก๊สซอฟต์ไนตรายคิง (SN)
ข. แก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และ ค. แก๊สคาร์โบไนตรายคิง (CN)

3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การชุบแข็งผิวด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ส่งผลให้ส่วนประกอบทางเคมี หรือธาตุผสมที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบมีความเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการและ ธาตุผสมที่มีอยู่เดิมในชิ้นทดสอบ

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีสามารถตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Spectrometer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และหาปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็ง โดยจะใช้

หลักการ Spark โดยเครื่องที่ใช้ คือ Optical emission spectrometer (OES) ของ Thermo Scientific รุ่น ARL 3460 METALS ANALYZER ใช้สำหรับการตรวจสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบทั้งก่อนและหลังกระบวนการชุบแข็งผิว



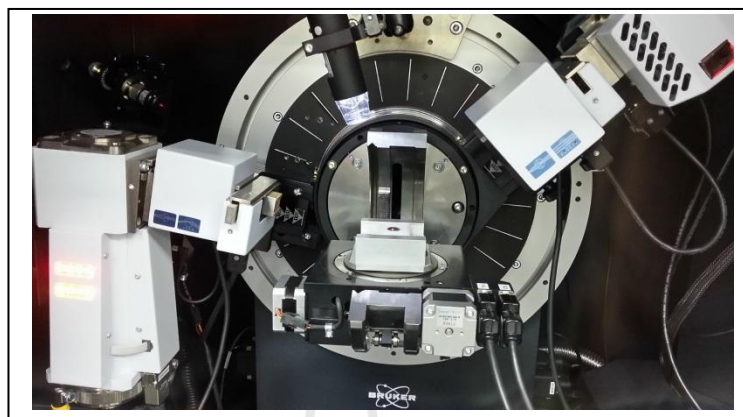
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่อง Optical emission spectrometer (OES)

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว

การตรวจสอบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างหรือสารประกอบนั้น สามารถทำได้โดยการใช้เครื่อง XRD (X-ray diffraction) รุ่น D8 Advance โดยการเตรียมชิ้นทดสอบ จะนำชิ้นทดสอบบรรจุลงในอุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นทดสอบ เพื่อวางผิวหน้าของด้านที่ต้องการทดสอบให้ได้ระยะจากนั้นนำเข้าเครื่อง XRD ในขั้นตอนนี้เราสามารถที่จะกำหนดเวลาในการตรวจวัดความเข้มของรังสีเลี้ยวเบน ข้อมูลตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน จากมุม 35-85 องศา

เมื่อได้ผลจากการตรวจสอบชิ้นทดสอบแล้ว นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EVA จะสามารถเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานที่เก็บรวบรวมไว้ ทำให้สามารถจำแนกชนิดของสารประกอบต่าง ๆ บนผิวชิ้นทดสอบได้

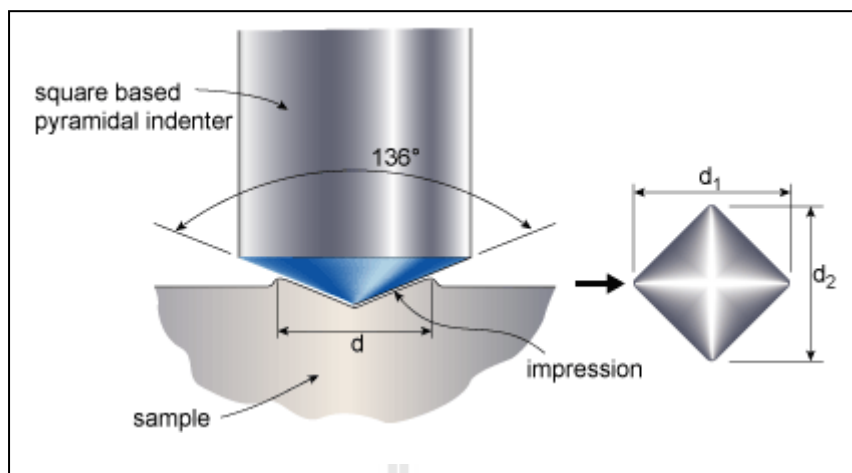


รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการเตรียมวิเคราะห์ชิ้นทดสอบ

3.6 การทดสอบความแข็งและการซึมลึก

ในการทดสอบความแข็งเลือกใช้การทดสอบความแข็งแบบ Vickers ในขั้นต้นนิยมใช้ในงานวิจัย ข้อดีของการทดสอบนี้ คือการวัดขนาดของเส้นทแยงมุมจะมีความแม่นยำกว่าการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และสามารถใช้ทดสอบกับชิ้นงานที่บางได้ คือความหนาประมาณ 0.006 นิ้ว นอกจากนี้ยังให้ค่าความแข็งที่ถูกต้องเมื่อใช้ทดสอบกับวัสดุที่แข็งมากประมาณ 1300 HV หรือประมาณ 850 BHN เนื่องจากหัวกดไม่เกิดการยุบตัวขณะทดสอบ และค่าความแข็งที่ได้เป็นที่ยอมรับมากกว่า นอกจากนี้หัวกดยังมีขนาดเล็กและแรงที่ใช้กดต่ำ รอยกดจึงอาจมีขนาดเล็กกว่าเกรนของโลหะ จึงสามารถวัดความแข็งได้ถึงระดับ โครงสร้างจุลภาค เหมาะกับงานทดสอบที่ต้องการความละเอียดของค่าความแข็งสูง สามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง

ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวจะมีความแข็งบริเวณผิวสูง ต่างจากเนื้อภายในของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าความแข็งลดลงตามความลึกเข้าไปในชิ้นทดสอบ การทดสอบความแข็งใช้เครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส (Micro Vickers hardness tester) ทั้งการวัดความแข็งบริเวณผิว และความแข็งตามความลึกจากบริเวณผิวเข้าไปในเนื้อชิ้นทดสอบ ใช้เครื่อง Micro Vickers Hardness Testing ของ Future-Tech รุ่น ในการทดสอบ จากรูปที่ 3.6 แสดงมุมของหัวกดแบบเพชรคือ 136° แรงที่ใช้ในการกด 0.1 กิโลกรัม โดยกดค้างไว้ประมาณ 30 วินาที พื้นผิวที่ทดสอบควรที่จะราบเรียบแบนสะอาด และเป็นแนวระนาบก่อนที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 3.6 แสดงการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส์

สำหรับการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวชั้นทดสอบตั้งแต่ผิวจากบริเวณผิวนอกจนถึงข้างใน ต้องมีการเตรียมชั้นทดสอบเพื่อวัดค่าความแข็งภายในเนื้อชั้นทดสอบ โดยขั้นตอนการทดสอบความแข็งเพื่อหาค่าความลึกผิวแข็งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดแบ่งครึ่งชั้นทดสอบด้วยเครื่องตัด (Cut off machine) มีการหล่อเย็นเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากการตัดชั้นทดสอบ ซึ่งความร้อนอาจส่งผลต่อค่าความแข็งของชั้นทดสอบได้
- 2) นำชั้นทดสอบหล่อหุ้มด้วยเรซิน เพื่อง่ายต่อการจับยึดชั้นทดสอบในการวัดค่าความแข็ง และให้ชั้นทดสอบได้ระนาบ
- 3) ขัดผิวชั้นทดสอบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 400, 600, 800, และ 1000 โดยใช้เครื่องขัดที่มีน้ำไหลผ่าน
- 4) ทำความสะอาดและเป่าด้วยลมร้อนให้แห้ง
- 5) วางชั้นทดสอบบนแท่น เปิดสวิสซ์ให้เครื่องให้เครื่องทำการกดชั้นทดสอบ ให้หัวกดเพชรที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เคลื่อนตัวลงมาอย่างช้า ๆ จนไปสัมผัสกับชั้นทดสอบ จากนั้นก็ค่อย ๆ เพิ่มแรงกดไปให้ถึง 0.1 กิโลกรัม นำหัวกดออกไป พบว่าชั้นงานจะเกิดรอยบุ๋มเป็นรูปทรง พีระมิด (Pyramidal) ขนาดเล็ก
- 6) ทำการวัดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกด เครื่องวัดความแข็งจะทำการคำนวณหาค่าความแข็งจากความยาวเส้นทแยงมุมที่ผู้ปฏิบัติงานได้วัด โดยใช้สมการข้างล่างนี้นำมาคำนวณ

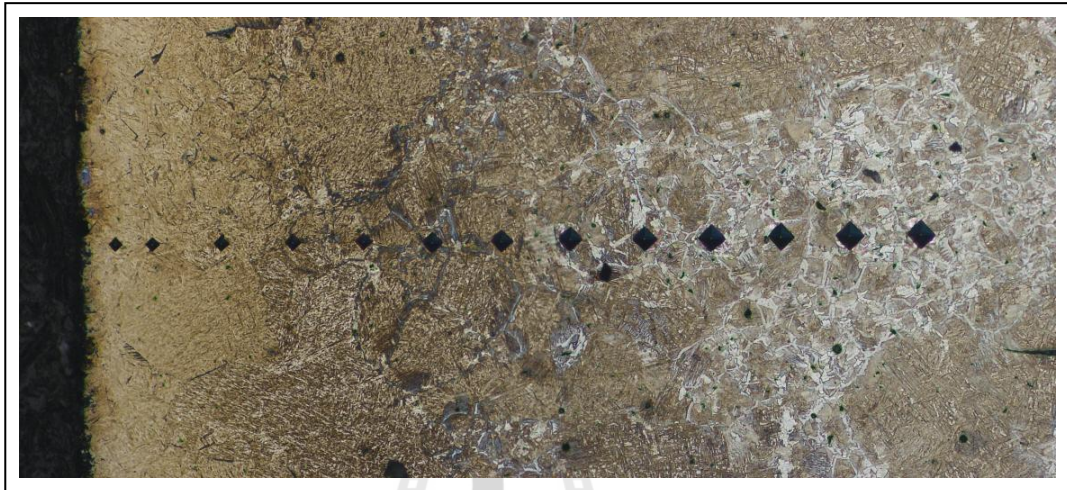
$$HV = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (3.1)$$

เมื่อ

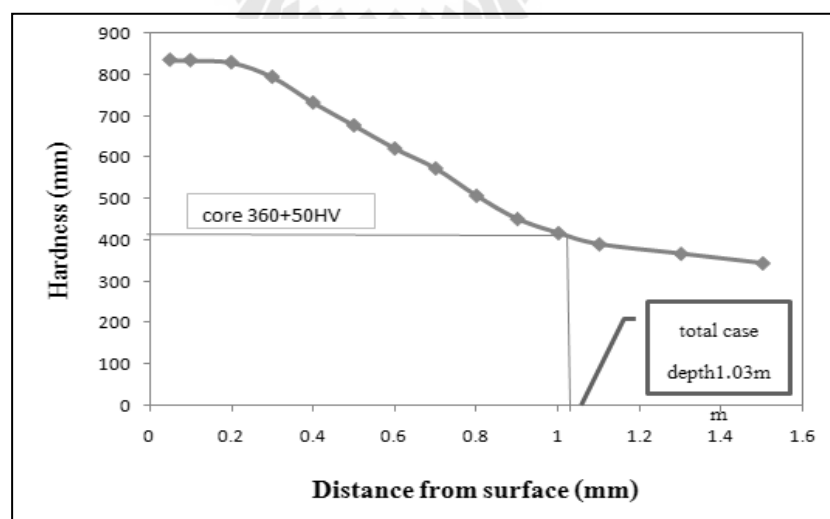
HV : ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส หน่วยเป็น H_V

F : ค่าแรงที่ใช้กดใน หน่วยกิโลกรัม

d : ความยาวเฉลี่ยของแนวทแยงของรอยเว้าในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 3.7 แสดงรอยกดที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส

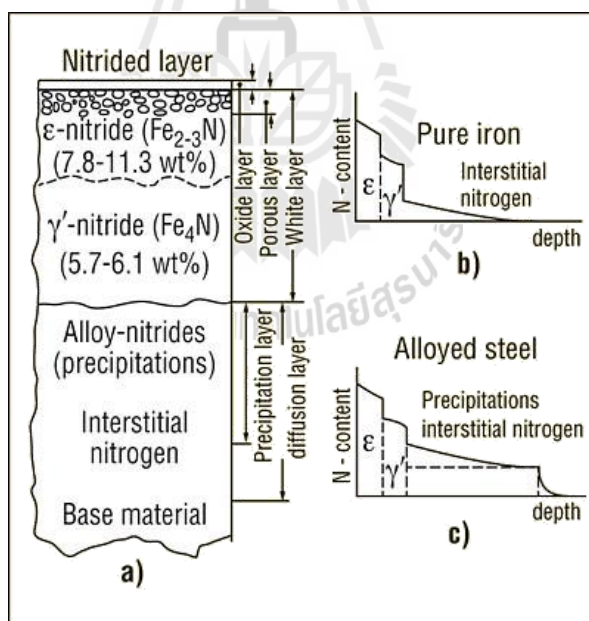


รูปที่ 3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะการซึมลึก

จากรูปที่ 3.7 แสดงค่าความแข็งที่ผิวซึ่งทดสอบตามระยะของผิวด้านนอกเข้าไปถึงผิวด้านใน ซึ่งค่าที่ได้จะนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งจากผิวนอกสุดเข้าไปในเนื้อชิ้นทดสอบแสดงในรูปที่ 3.8 โดยค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมด (Total case depth) หาได้จากค่าความแข็งที่บริเวณแกนกลางซึ่งทดสอบด้วย 50 HV ซึ่งตัวอย่างจากรูปที่ 3.8 พบว่าค่าความแข็งแกนกลางจากการวัดความแข็งมีค่า 360 HV เมื่อวัดด้วย 50 HV จะได้ค่า 410 HV จะได้ค่าจุดตัดบนเส้นกราฟในแนวแกนนอนคือ 1.03 mm เป็นค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมด

3.7 การตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวขาว

ชั้นผิวขาว (White layer) มีคุณสมบัติทนทานต่อการเสียดสี และทนทานต่อการกัดกร่อน จึงทำให้เห็นโครงสร้างเป็นแถบสีขาวที่บริเวณผิวซึ่งทดสอบ ซึ่งเป็นสารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ Fe_{2-3}N (โครงสร้าง ϵ) และ Fe_4N (โครงสร้าง γ') เกิดขึ้นในกระบวนการซอพต์ไนตรายิ่งซึ่งทำที่อุณหภูมิค่า ประมาณ $520-570^\circ\text{C}$ รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะโครงสร้างชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม



รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของชั้นสารประกอบไนโตรเจนบนผิวเหล็กกล้า

การวัดความหนาชั้นผิวขาวที่เกิดจากสารประกอบไนโตรเจน ใช้การตรวจดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล (Optical microscopes) ด้วยกำลังขยาย 400 เท่า เนื่องจาก

โครงสร้างชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้นที่ผิวของชั้นทดสอบมีขนาดที่บางมาก ซึ่งมีขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวขาวที่ผิวของชั้นทดสอบดังนี้

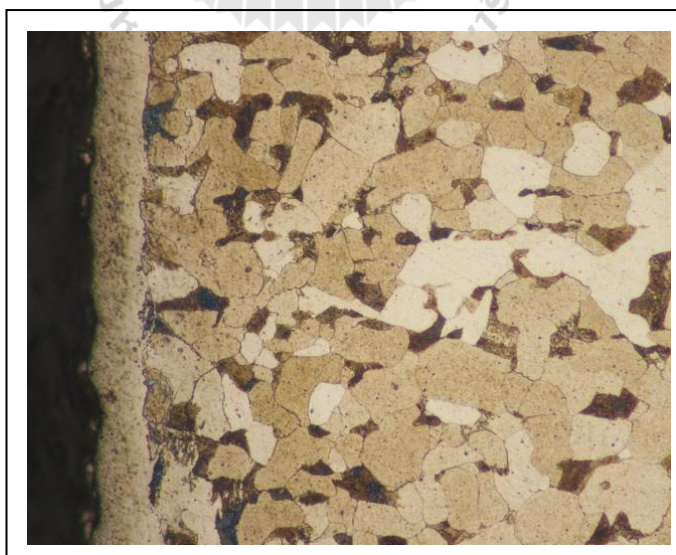
1) แบ่งครึ่งชั้นทดสอบด้วยเครื่องตัด (Cut off machine) มีการหล่อเย็นเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากการตัดชั้นทดสอบ ซึ่งความร้อนอาจส่งผลต่อค่าความแข็งของชั้นทดสอบได้

2) นำชั้นทดสอบหล่อหุ้มด้วยเรซิน เพื่อง่ายต่อการจับยึดชั้นทดสอบในการวัดค่าความแข็ง และให้ชั้นทดสอบได้ระนาบ

3) การเตรียมผิวหน้าชั้นทดสอบ ขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบมาก ๆ จนถึงกระดาษทรายที่มีความละเอียด ได้แก่เบอร์ 180, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดที่มีน้ำผสมผงขัดอะลูมินา (0.3-0.5 ไมครอน) ขัดจนมีความเงาคล้ายกระจก

4) การกัดผิว (Etching) บาง ๆ ด้วยไนตล (Nital) 5% ล้างน้ำสะอาดและเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน

5) นำชั้นทดสอบที่ผ่านการเตรียมผิวแล้วตรวจสอบโครงสร้างและวัดขนาดของชั้นผิวขาวด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบออปติคอลของ Nikon measuring microscope รุ่น MM-400 และโปรแกรม NIS-Element D สำหรับการตรวจดูโครงสร้างของชั้นทดสอบรวมถึงชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้นในกระบวนการซอฟต์แวร์ในตรายคิง ถ่ายภาพโครงสร้างชั้นผิวขาวที่เกิดขึ้นบนผิวชั้นทดสอบ ตัวอย่างภาพถ่ายที่กำลังขยาย 400 เท่า แสดงในรูปที่ 3.10

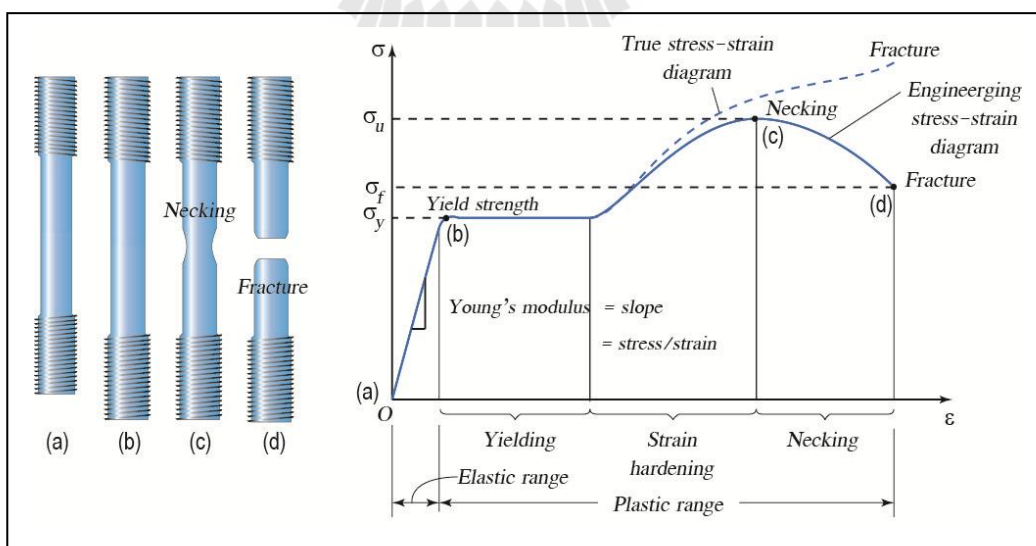


รูปที่ 3.10 แสดงถ่ายภาพขนาดของชั้นผิวขาว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบออปติคอล กำลังขยาย 400 เท่า

3.8 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึง ใช้หาคุณสมบัติทางกลอันเนื่องมาที่ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (Tensile test specimen) ถูกดึงให้ยืดจนขาดในแนวแกน โดยกำหนดให้ความเร็วในการดึงมีค่าต่ำและมีค่าคงที่ตลอดการดึง ทั้งนี้เพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดสอบมีความผิดพลาดคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด นอกจากนี้ชิ้นงานทดสอบที่ถูกดึงจะต้องไม่รับภาระกรรมอื่นนอกเหนือจากแรงดึง

ในการทดสอบแรงดึงจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8 ซึ่งระบุถึงวิธีการทดสอบแรงดึงของผลิตภัณฑ์โลหะ การทดสอบนี้สามารถใช้งานได้กับโลหะในรูปแบบต่าง ๆ โดยในแต่ละรูปแบบนั้น มาตรฐานจะกำหนดรูปร่างและขนาดที่เหมาะสม รวมทั้งวิธีการจับยึดชิ้นงานที่ต้องการ เพื่อให้การทดสอบประสบความสำเร็จ โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (UTM) ของ Instron ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN ใช้ในการทดสอบแรงดึงในแนวแกนของชิ้นทดสอบที่มีการจับยึดแบบเกลียว แต่ละการทดลองใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 5 ชิ้น โดยใช้ความเร็วในการทดสอบเท่ากันคือ 0.8 มิลลิเมตรต่อนาที ตามที่มาตรฐานได้ระบุไว้ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จสำหรับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ของ Instron ผลการทดสอบที่ได้จากโปรแกรมสามารถคำนวณหาความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และการยืดตัวได้ จากนั้นนำผลการทดสอบหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติต่อไป รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะผลการทดสอบในชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุเหล็กเหนียว

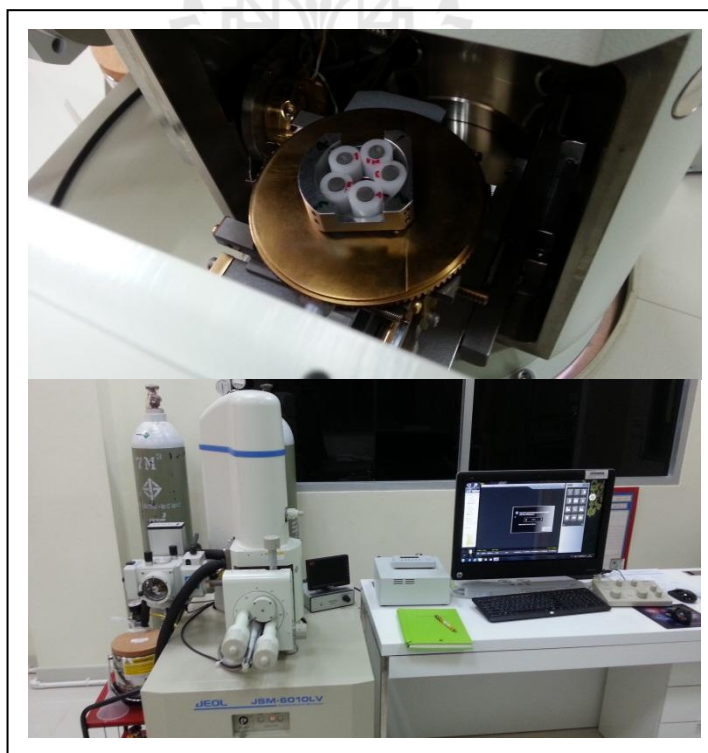


รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึงและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับเหล็กเหนียว

3.9 การศึกษาพื้นผิวการแตกหัก

วิธีการตรวจสอบพื้นผิวการแตกหักที่นิยมมากคือ การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscopy) หรือ SEM โดยขั้นตอนสอบควรทำความสะอาดและถูกจับยึดอย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันการหลุดในระหว่างการตรวจสอบในสภาพสุญญากาศ ซึ่งในการตรวจสอบขั้นตอนอาจต้องมีการหมุนปรับชิ้นงานระหว่างการตรวจสอบ และชิ้นงานที่นำมาทำการตรวจสอบต้องปราศจากความชื้น ขั้นตอนสอบต้องเป็นวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้า หากไม่มีสมบัติการนำไฟฟ้ดังกล่าว นิยมเคลือบผิวด้วยทอง (กระบวนการ Sputtering)

ในการศึกษาพื้นผิวการแตกหักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบแรงดึง ซึ่งมีทั้งการแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) และการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) ในการศึกษานี้จะเน้นไปที่การศึกษาการแตกหักแบบเปราะ เนื่องจากมีช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรน้อย ซึ่งมีผลกระทบมากกว่าและยากต่อการป้องกันความเสียหายดังกล่าว แต่การแตกหักแบบเหนียวจะมีช่วงการเปลี่ยนรูปมากพอที่จะแก้ไขความเสียหายได้ ก่อนที่จะเกิดความเสียหายขึ้นจริง ชิ้นทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบโดยใช้ SEM ของ JEOL รุ่น JSM6010LV (รูปที่ 3.12) สามารถบอกได้ถึงตำแหน่งของกำเนิดรอยแตก (Crack initiation) ซึ่งสังเกตได้จากทิศทางของ Stress line ที่ชี้ไปยังจุดเดียวกัน



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะการจับยึดชิ้นทดสอบและเครื่อง SEM ที่ใช้ในการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม ด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง จากการนำชิ้นงานตัวอย่างจากเหล็กกล้า 5 ชนิดคือ AISI 1010, 1020, 1040, 4140 และ 4340 ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- 1) กลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งมีปริมาณธาตุคาร์บอนต่างกัน คือ AISI 1010, 1020 และ 1040
- 2) กลุ่มเหล็กกล้าผสมซึ่งมีปริมาณธาตุผสมต่างกัน แต่จำกัดปริมาณคาร์บอนเท่ากัน คือ AISI 1040, 4140 และ 4340

เมื่อนำชิ้นทดสอบผ่านการอบปกติเพื่อปรับปรุงโครงสร้างและทำความสะอาดผิวชิ้นทดสอบด้วยการพ่นเม็ดโลหะแล้ว ชิ้นทดสอบจะถูกนำไปผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ รวมไปถึงกระบวนการร่วม ทั้งหมด 5 วิธีการ ได้แก่

- 1) แก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่ง (SN)
- 2) แก๊สคาร์บูไรซิง (CB)
- 3) แก๊สคาร์โบไนไตรดิ่ง (CN)
- 4) กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งกับแก๊สคาร์บูไรซิง (Combined 1)
- 5) กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่ง (Combined 2)

โดยศึกษาความสัมพันธ์ในการปรับเปลี่ยนปริมาณธาตุคาร์บอนและธาตุผสม กับกระบวนการชุบแข็งผิว ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี และการทดสอบสมบัติเชิงกล ทั้งการทดสอบความแข็งและการรับแรงดึง ซึ่งได้ผลการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกได้เป็น 6 หัวข้อดังนี้

- 1) ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
- 2) ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก
- 3) ผลจากการทดสอบความแข็งและการซึ่มลึก
- 4) ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว
- 5) ผลจากการทดสอบแรงดึง
- 6) ผลจากการศึกษาพื้นผิวการแตกหัก

4.1 ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

4.1.1 ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม ก่อนกระบวนการชุบแข็งผิว

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานของเหล็กกล้า (%wt, Balance Fe)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe
AISI 1010	0.08-0.13	-	0.30-0.60	≤0.040	≤0.050	-	-	-	-	-	-	Bal.
AISI 1020	0.18-0.23	-	0.30-0.60	≤0.040	≤0.050	-	-	-	-	-	-	Bal.
AISI 1040	0.36-0.44	-	0.60-0.90	≤0.040	≤0.050	-	-	-	-	-	-	Bal.
AISI 4140	0.38-0.43	0.15-0.35	0.75-1.00	≤0.035	≤0.040	-	-	0.80-1.10	0.15-0.20	-	-	Bal.
AISI 4340	0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.80	≤0.035	≤0.040	-	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30	-	-	Bal.

จากตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของสถาบันเหล็กของสหรัฐอเมริกา ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งผลการตรวจสอบเป็นไปตามมาตรฐานของเหล็กกล้า โดยทั้งปริมาณของธาตุคาร์บอนและธาตุผสมอื่น ๆ อยู่ในช่วงที่กำหนด

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า (%wt, Balance Fe)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe
AISI 1010	0.1218	0.2009	0.4305	0.0140	0.0080	0.0661	0.0291	0.0527	0.0041	0.0009	0.0054	Bal.
AISI 1020	0.2241	0.1952	0.4694	0.0149	0.0098	0.2046	0.0564	0.0856	0.0085	0.0013	0.0053	Bal.
AISI 1040	0.4198	0.2112	0.6344	0.0186	0.0148	0.1555	0.0658	0.0568	0.0109	0.0016	0.0052	Bal.
AISI 4140	0.3942	0.2186	0.6946	0.0267	0.0043	0.0691	0.0457	0.8599	0.1526	0.0075	0.0245	Bal.
AISI 4340	0.3818	0.2689	0.7064	0.0175	0.0340	0.1721	1.7194	0.8926	0.2618	0.0067	0.0146	Bal.

4.1.2 ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอนบริเวณผิวชั้นทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการ ชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

ชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส ด้วยวิธีการต่าง ๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนเข้าไปในบริเวณผิวชั้นทดสอบ ทำให้ที่บริเวณผิวชั้นทดสอบมีปริมาณธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล จึงได้ทำการตรวจสอบปริมาณธาตุคาร์บอนบริเวณผิวชั้นทดสอบดังกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณธาตุคาร์บอนบริเวณผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส (%wt, Balance Fe)

Sample	Process					
	Untreat	Soft-nitriding (SN)	Carburizing (CB)	Carbonitriding (CN)	Combined 1 (SN+CB)	Combined 2 (CB+SN)
AISI 1010	0.1218	0.0882	0.5850	0.6395	0.6371	0.6027
AISI 1020	0.2241	0.2025	0.5908	0.6216	0.6122	0.6041
AISI 1040	0.4198	0.3478	0.6166	0.6569	0.6697	0.6397
AISI 4140	0.3942	0.2921	0.7074	0.7620	0.7099	0.6799
AISI 4340	0.3818	0.3010	0.7204	0.7535	0.6678	0.6894

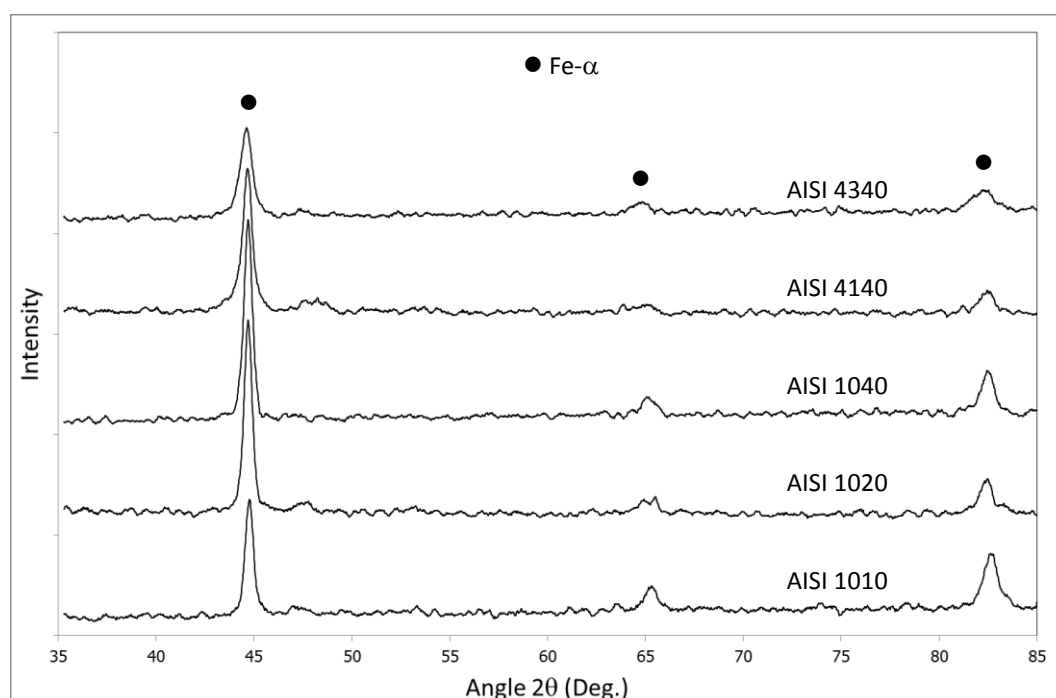
จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุคาร์บอนก่อนและหลังจากผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวโดยส่วนใหญ่มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผิวชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 0.58 – 0.75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากบรรยากาศการอบชุบในเตาที่ควบคุมปริมาณธาตุคาร์บอนไว้ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ทั้งกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และแก๊สคาร์โบไนไตรดิง (CN) ทำให้เกิดการแพร่ของธาตุคาร์บอนจากบรรยากาศเข้าสู่ผิวชิ้นทดสอบ ในขณะที่เหล็กมีโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ ซึ่งมีช่องว่างระหว่างอะตอมเหล็กมากกว่าโครงสร้างเฟอร์ไรต์ อะตอมของธาตุคาร์บอนจึงสามารถแพร่เข้าสู่ผิวโลหะได้ดีกว่า นอกจากนี้ในชิ้นทดสอบเหล็กกล้าเกรด AISI 1010 และ 1020 จะมีปริมาณธาตุคาร์บอนต่ำกว่าเหล็กกล้าอื่น เนื่องจากช่วงการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์จะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างชิ้นทดสอบเหล็กกล้าในขณะเกิดการแพร่ของธาตุคาร์บอนเข้าสู่ผิวชิ้นทดสอบเช่นกัน

ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง (SN) พบว่ามีปริมาณธาตุคาร์บอนลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากบริเวณผิวชิ้นทดสอบมีสารประกอบไนโตรเจนเกิดขึ้น ได้แก่ $Fe_{2-3}N$ (โครงสร้าง ϵ) และ Fe_4N (โครงสร้าง γ') ทำให้ปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผิวที่ได้จากการตรวจสอบลดลง นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สซอพต์ไนไตรดิง (Combined 2) มีปริมาณธาตุคาร์บอนใกล้เคียงกันกับแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) เนื่องจากผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านแก๊สซอพต์ไนไตรดิงในภายหลัง มีปริมาณธาตุคาร์บอนบริเวณผิวเหล็กอยู่จำนวนมากจากการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงมาก่อน

4.2 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

4.2.1 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชิ้นทดสอบที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งผิว

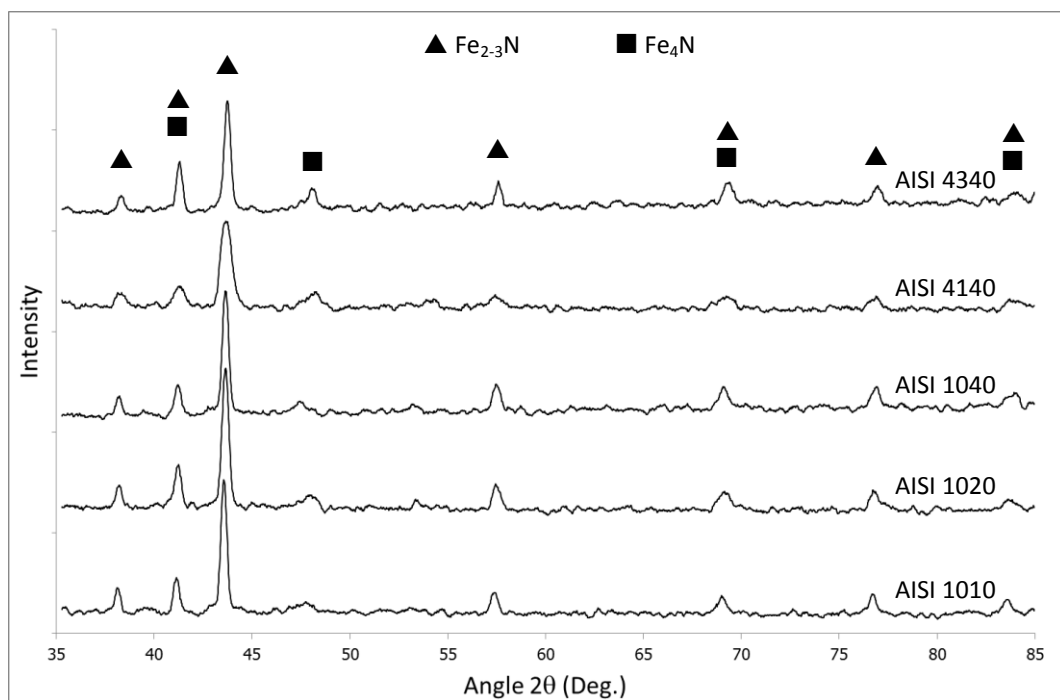
รูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในชิ้นทดสอบที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งผิวของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด มีโครงสร้างเป็นเหล็กแอลฟา (α) หรือเหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferrite) มีการวางตัวของอะตอมเป็นแบบ BCC (Body Centered Cubic) มีลักษณะเป็นสารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอน



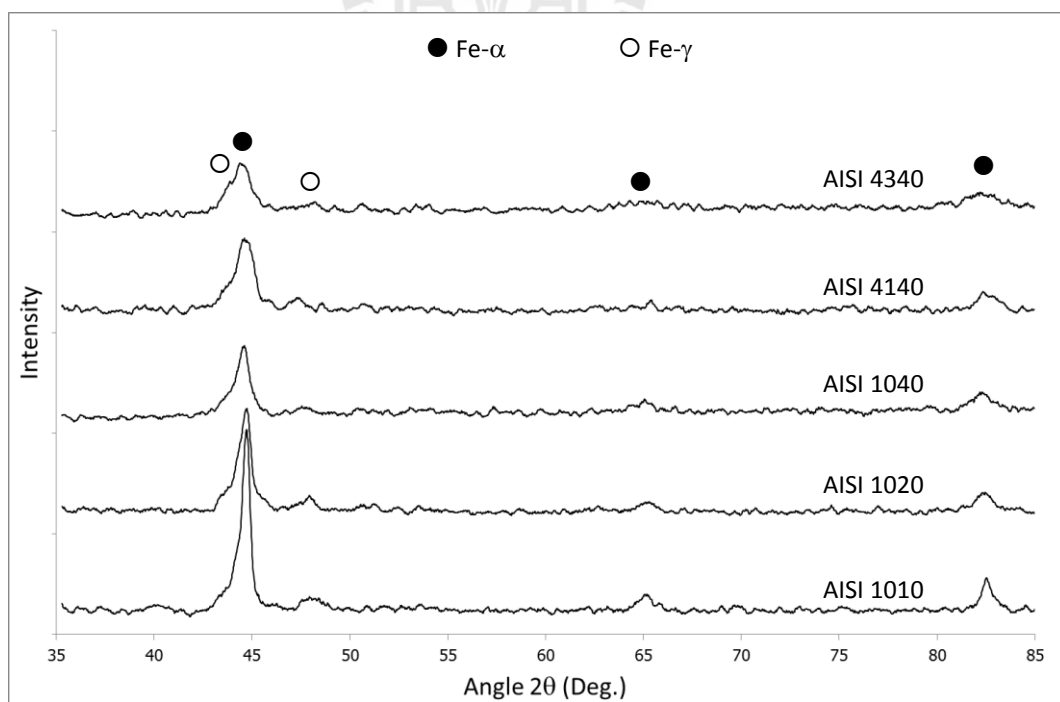
รูปที่ 4.1 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในชิ้นทดสอบที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งผิว

4.2.2 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง ที่บริเวณผิวชิ้นทดสอบมีสารประกอบไนโตรเจนเกิดขึ้น ได้แก่ Fe_{2-3}N (ϵ) และ Fe_4N (γ) โดยพบในชิ้นทดสอบเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด



รูปที่ 4.2 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในชั้นทดสอบแก๊สซอพต์ในตารางดัง



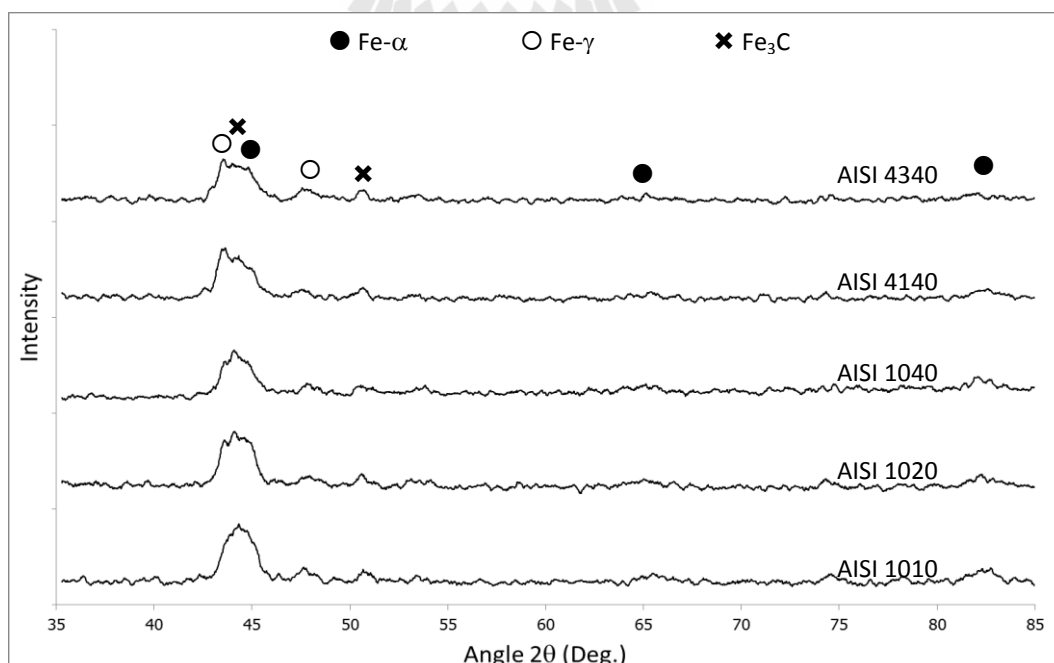
รูปที่ 4.3 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในชั้นทดสอบแก๊สคาร์บูไรซิง

4.2.3 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด มีโครงสร้างทั้งเหล็กแอลฟา (α) หรือ มาร์เทนไซต์ (α') และเหล็กแกมมา (γ) หรือเหล็กออสเทนไนท์ (Austenite) มีการวางตัวของอะตอมเป็นแบบ FCC (Face Centered Cubic) เกิดจากอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วเกินไป ในกระบวนการชุบแข็งผิวในน้ำมัน ทำให้ออสเทนไนต์บางส่วนเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ไม่ทัน ซึ่งออสเทนไนต์ที่เหลือค้างนี้เรียกว่า Retained Austenite

4.2.4 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายดิง

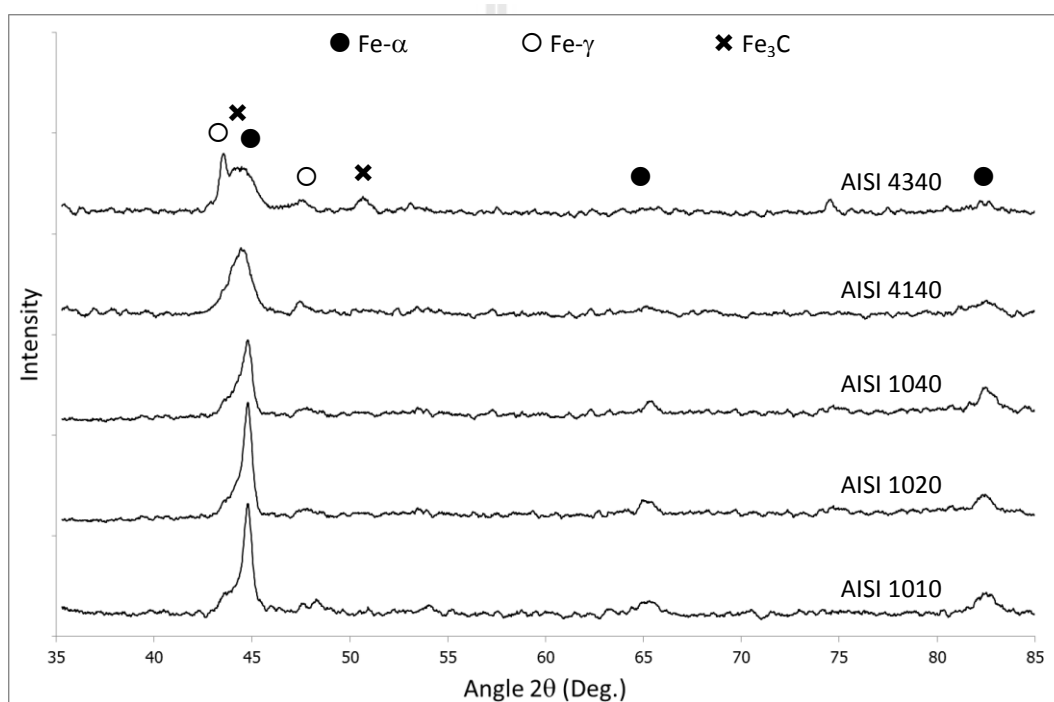
รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในชั้นทดสอบเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายดิง มีลักษณะโครงสร้างต่างไปจากแก๊สคาร์บูไรซิง คือ นอกจากมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และ Retained Austenite แล้ว ยังพบโครงสร้างซีเมนไต์ (Fe_3C) ซึ่งการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการนี้ มีธาตุไนโตรเจนช่วยทำให้การแพร่ของคาร์บอนเข้าสู่ผิวเหล็กกล้าได้ดีขึ้น จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผิวของชิ้นทดสอบแก๊สคาร์โบไนตรายดิงมากกว่าแก๊สคาร์บูไรซิง โดยคาร์บอนส่วนเกินจะทำให้เกิด Fe_3C อีสมะมากขึ้น



รูปที่ 4.4 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในชั้นทดสอบแก๊สคาร์โบไนตรายดิง

4.2.5 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

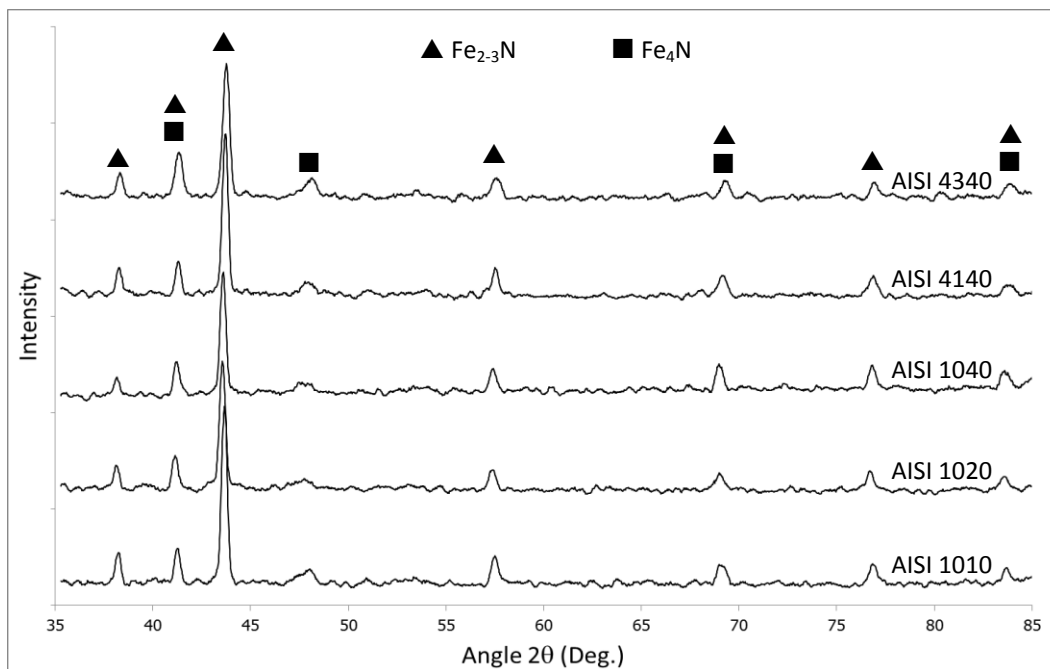
รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง (Combined 1) มีโครงสร้างของชั้นทดสอบเหล็กกล้าเกือบทั้งหมดคล้ายกับแก๊สคาร์บูไรซิง ยกเว้นเหล็กกล้า AISI 4340 คือมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และ Retained Austenite ส่วนเหล็กกล้า AISI 4340 นอกจากโครงสร้างดังกล่าวแล้ว ยังพบโครงสร้างซิเมนไต์ (Fe_3C) ด้วย



รูปที่ 4.5 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในชั้นทดสอบที่กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

4.2.6 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ไนตรายดิง

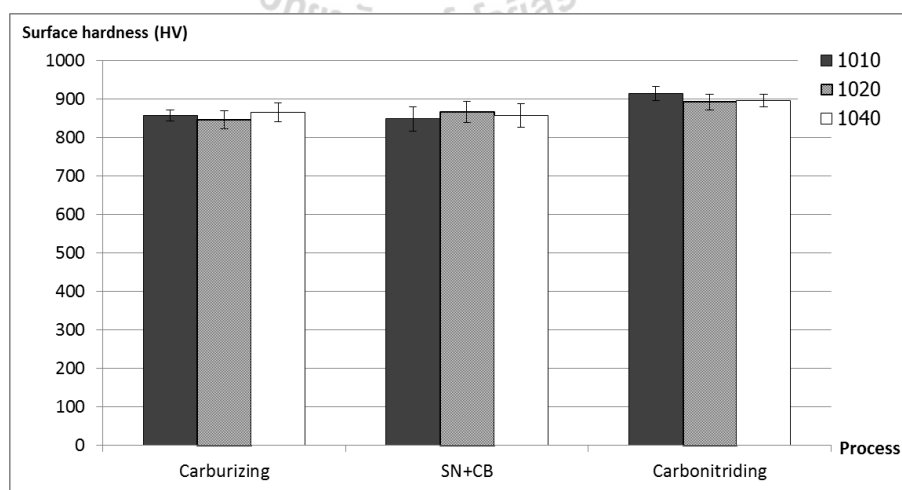
รูปที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าในชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ไนตรายดิง (Combined 2) มีลักษณะผลการทดสอบคล้ายกับแก๊สซอพต์ไนตรายดิง (SN) คือที่บริเวณผิวชั้นทดสอบมีสารประกอบไนโตรเจนเกิดขึ้น ได้แก่ Fe_2-3N (ϵ) และ Fe_4N (γ') ในชั้นทดสอบเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด



รูปที่ 4.6 แสดงรูปผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ในชั้นทดสอบกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอฟต์ไนตรายิ่ง

4.3 ผลจากการทดสอบความแข็งและการซึมลึก

4.3.1 ผลจากการทดสอบความแข็งผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว



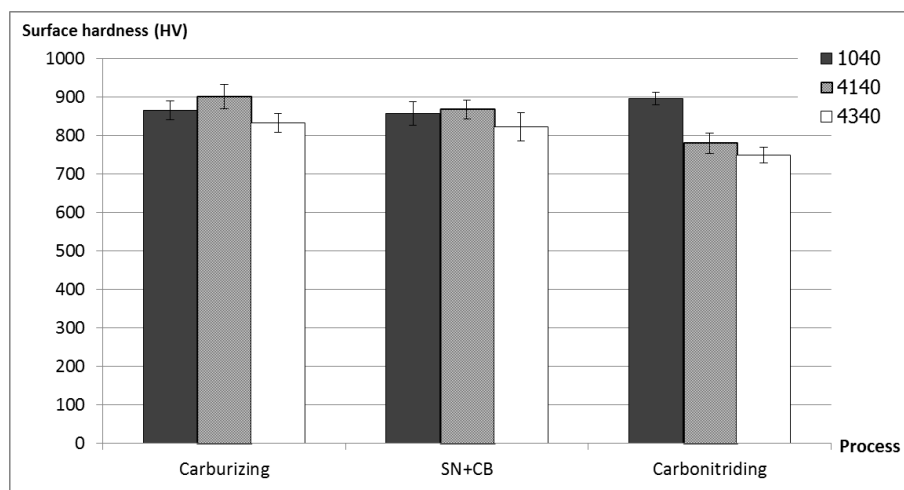
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface Hardness กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวขึ้นทดสอบกับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มขึ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน ผลจากการวัดค่าความแข็งผิวพบว่าขึ้นทดสอบที่มีปริมาณคาร์บอนต่างกันที่ 0.1%, 0.2% และ 0.4% ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB), กระบวนการร่วมระหว่าง SN+CB (Combined 1) และแก๊สคาร์โบไนตรายดิง (CN) พบว่าค่าความแข็งผิวของขึ้นทดสอบที่ผ่านแต่ละกระบวนการชุบแข็งผิวมีค่าใกล้เคียงกัน โดยขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย CB มีความแข็งผิวประมาณ 850 Hv ซึ่งใกล้เคียงกับขึ้นทดสอบที่ชุบแข็งผิวด้วย Combined 1 ส่วนขึ้นทดสอบที่ชุบแข็งผิวด้วย CN จะมีความแข็งมากกว่าประมาณ 50 Hv ซึ่งระดับความแข็งผิวนี้สัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างผลึกของผิวขึ้นทดสอบตามหัวข้อ 4.3 ซึ่งขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย CB (รูปที่ 4.3) และกระบวนการร่วม Combined 1 (รูปที่ 4.5) มีลักษณะใกล้เคียงกันจึงมีความแข็งผิวใกล้เคียงกัน ส่วนขึ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย CN (รูปที่ 4.4) พบโครงสร้างซีเมนไตต์ (Fe_3C) ที่ผิวด้วย ซึ่ง Fe_3C ช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็ง ทำให้ขึ้นทดสอบมีความแข็งเพิ่มขึ้น

ผลจากการทดสอบในแต่ละกระบวนการสามารถยืนยันด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA โดยตั้งสมมติฐานหลัก (H_0) ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งผิวอันเนื่องมาจากการใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่างชนิดกัน มีความแข็งผิวไม่ต่างกัน และใช้การเปรียบเทียบค่า P-Value ที่ได้จากการวิเคราะห์กับระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 หาก P-Value มากกว่า α จะยอมรับสมมติฐานดังกล่าว โดยทำการวิเคราะห์ผลในแต่ละกระบวนการ พบว่าค่า P-Value ของขึ้นทดสอบที่ชุบแข็งผิวด้วย CB เท่ากับ 0.120 เมื่อเปรียบเทียบค่า P-Value กับค่าระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ค่า P-Value มากกว่าก็จะยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่อนำขึ้นทดสอบที่มีปริมาณคาร์บอนต่างกันมาทำการชุบแข็งผิวในแต่ละกระบวนการ จะได้ความแข็งผิวภายหลังการอบชุบแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับค่า P-Value ของขึ้นทดสอบที่ชุบแข็งผิวด้วย Combined 1 และ CN ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ คือ 0.302 และ 0.432 ตามลำดับ ก็สามารถสรุปได้ในทำนองเดียวกัน ว่าความแข็งผิวภายหลังการอบชุบแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งผิวขึ้นทดสอบกับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มขึ้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่มีชนิดของธาตุผสมต่างกัน แต่ปริมาณคาร์บอนเท่ากันที่ 0.4% ผลจากการวัดค่าความแข็งผิวพบว่าขึ้นทดสอบเมื่อผ่านการชุบแข็งผิวด้วย CB และ Combined 1 ให้ผลคล้ายกันคือ ในขึ้นทดสอบเหล็กเกรด AISI 4340 ซึ่งมีธาตุผสมนิเกิล (Ni) จะมีความแข็งผิวลดลง เนื่องจาก Retained Austenite ที่ผิวขึ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.5 ส่วนในขึ้นทดสอบที่ชุบแข็งผิวด้วย CN พบว่าเหล็กกล้าผสมทั้ง AISI 4140 (Cr-Mo) และ AISI 4340 (Ni-Cr-Mo) มีความแข็งผิวลดลงอย่างมาก ซึ่งมีสาเหตุร่วมทั้งธาตุผสมที่ช่วยในการชุบแข็งและกระบวนการเพิ่มคาร์บอนที่ผิว ซึ่งจากตารางที่ 4.3 พบว่าขึ้นทดสอบมีปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูง

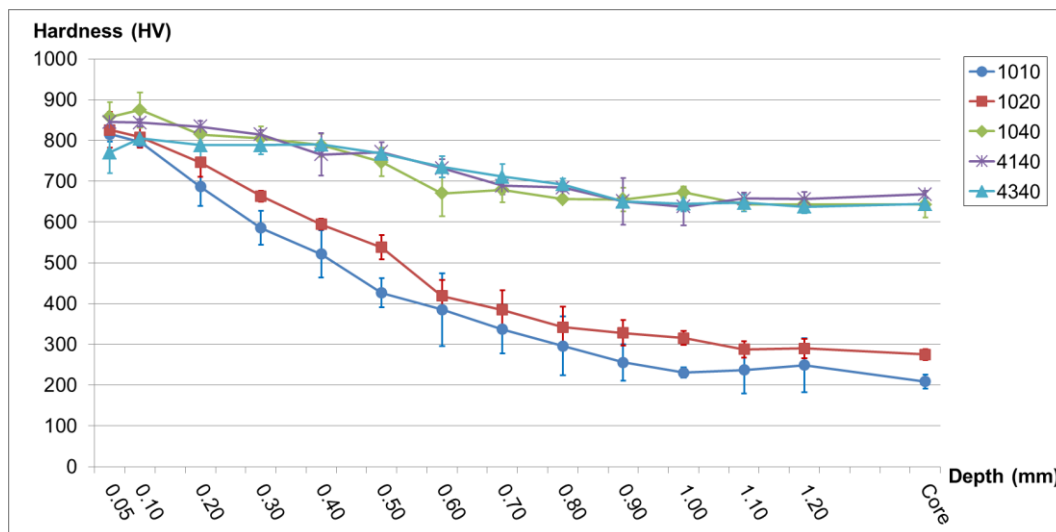
กว่ากระบวนการอื่น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกเกิด Retained Austenite ที่ผิวมากเช่นกัน (รูปที่ 4.4) ส่งผลทำให้ความแข็งผิวลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วม จะได้ความแข็งผิวของชั้นทดสอบภายหลังการอบชุบแข็ง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่า P-Value เท่ากับ 0.285 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ (α)



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Surface Hardness กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าผสม

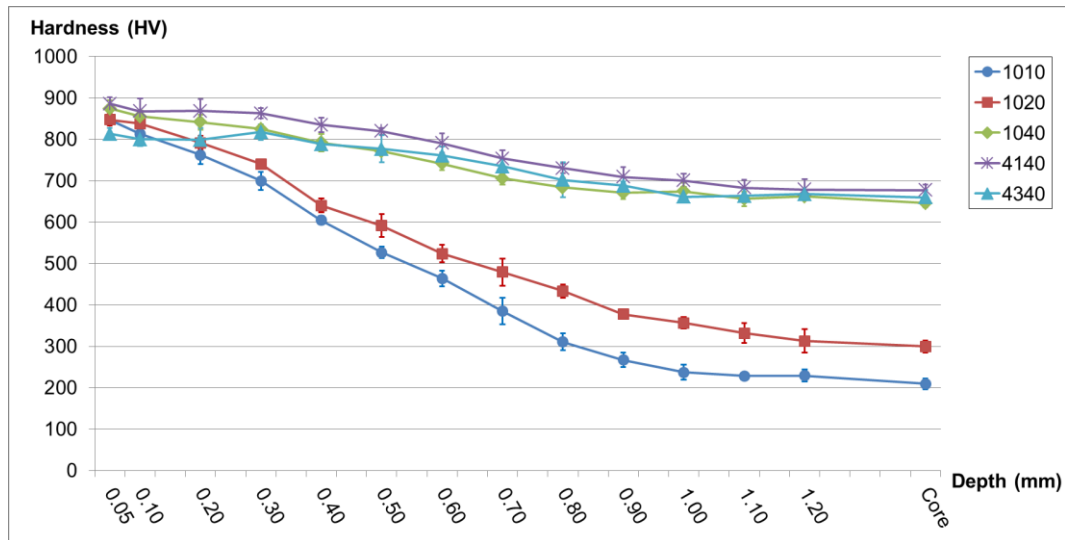
4.3.2 ผลจากการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวถึงแกนกลางของชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิว

กราฟแสดงผลการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวของชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าความแข็งภายใต้ผิวของชั้นทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะในการวัดค่าความแข็งใกล้เข้าสู่แกนกลางชั้นทดสอบ เนื่องจากกระบวนการชุบแข็งผิวดังกล่าว เป็นการเพิ่มธาตุคาร์บอนที่บริเวณผิวเท่านั้น ปริมาณคาร์บอนบริเวณแกนกลางชั้นทดสอบจึงมีปริมาณคาร์บอนเท่ากับก่อนผ่านกระบวนการชุบแข็ง โดยชั้นทดสอบเหล็กกล้า AISI 1010 และ 1020 มีความแข็งน้อยเมื่อเทียบกับชั้นทดสอบอื่น ส่วนความแข็งของเหล็กกล้า AISI 1040, 4140 และ 4340 มีความแข็งภายใต้ผิวใกล้เคียงกัน แต่ให้เหล็กกล้า AISI 4340 พบว่าค่าความแข็งภายใต้ผิวช่วงต้นมีค่าความแข็งค่อนข้างต่ำ จากการเกิด Retained Austenite ที่ผิวชั้นทดสอบนี้ซึ่งพบมากกว่าเหล็กกล้าอื่น

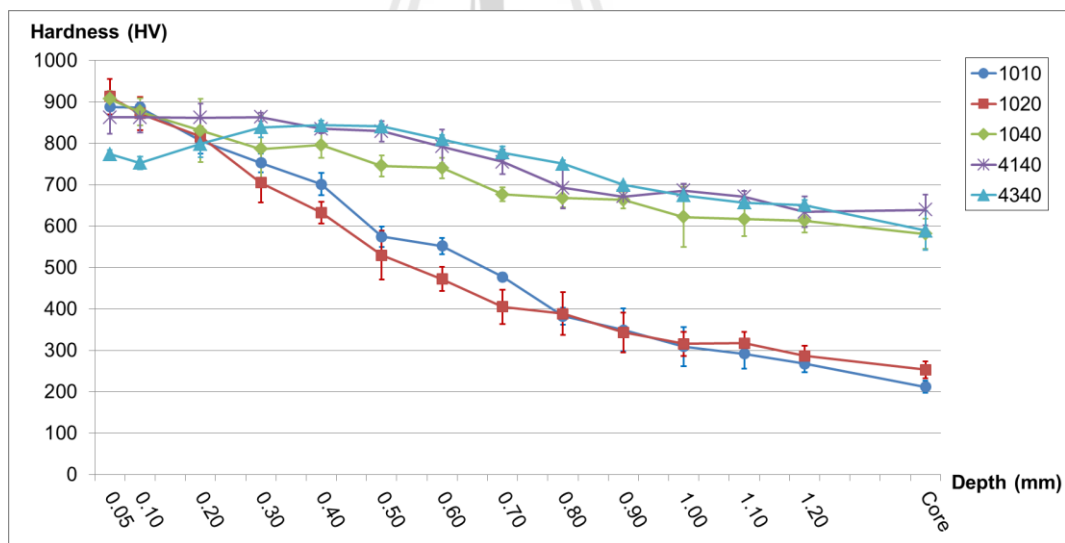


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับระยะจากผิวถึงแกนกลางของชิ้นทดสอบ ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

ในรูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งภายใต้ผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง พบว่ามีลักษณะคล้ายกับการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง แต่จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยน้อยกว่าการชุบแข็งผิวด้วยวิธีอื่น ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งชิ้นทดสอบเหล็กกล้าแต่ละชนิดมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 14.3-19.0 แสดงให้เห็นว่าการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง ให้ความสม่ำเสมอในด้านความแข็งภายใต้ผิวคล้ายกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ส่วนค่าความแข็งภายใต้ผิวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไนไตรดิงพบว่าบริเวณใกล้ผิวชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนมีความแข็งมากกว่ากระบวนการอื่น เนื่องจากเกิดโครงสร้าง Fe_3C ที่ผิว ซึ่งมีสมบัติในการเพิ่มความแข็งให้กับชิ้นทดสอบ ส่วนเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมมีความแข็งลดลงค่อนข้างมาก โดยเฉพาะ AISI 4340 เนื่องจากเกิด โครงสร้าง Retained Austenite ที่ผิว ชิ้นทดสอบจำนวนมาก



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับระยะจากผิวถึงแกนกลางของชิ้นทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพดีไนตรอยดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

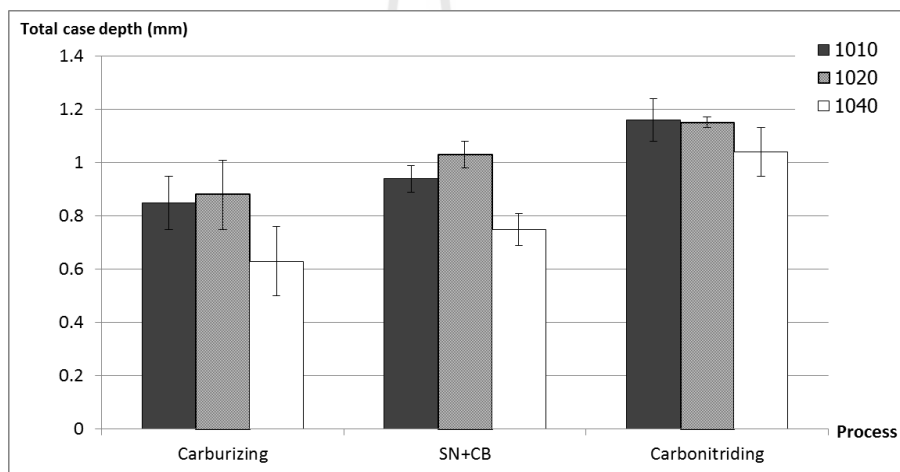


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hardness กับระยะจากผิวถึงแกนกลางของชิ้นทดสอบ ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรอยดิง

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยในการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวชั้นทดสอบ

Process	Average of Standard Deviations				
	AISI 1010	AISI 1020	AISI 1040	AISI 4140	AISI 4340
CB	45.1	29.0	27.9	23.4	20.1
SN+CB	16.4	18.2	14.3	19.0	18.5
CN	24.5	36.4	37.7	28.2	15.6

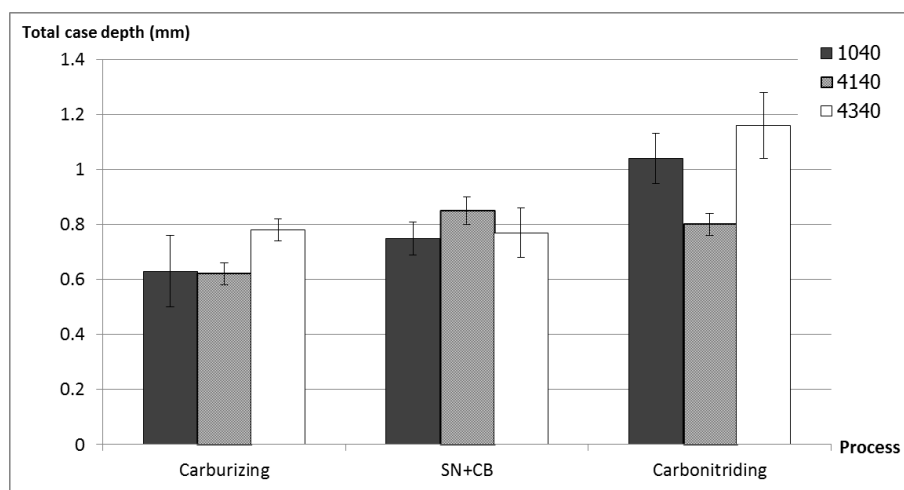
4.3.3 ผลจากการวิเคราะห์ค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมดของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Total case depth กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน

จากรูปที่ 4.12 กราฟแท่งแสดงค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมดของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการแทรกซึมหรือแพร่เข้าไปภายใต้ผิวชั้นทดสอบของธาตุที่เติมให้กับชั้นทดสอบ จากกราฟพบว่าชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งหมดที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) มีความลึกผิวแข็งทั้งหมดน้อยกว่าการชุบแข็งด้วยวิธีอื่น ส่วนการชุบแข็งผิวที่ให้ค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมดมากที่สุดคือ แก๊สคาร์โบไนตรายดิ้ง (CN) ซึ่งการชุบแข็งด้วยวิธีการดังกล่าวมีการเพิ่มธาตุไนโตรเจนเข้าไปในบรรยากาศการอบชุบ เพื่อเพิ่มความสามารถในการแพร่ของธาตุคาร์บอนสู่ผิวของชั้นทดสอบ เช่นเดียวกับกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิ้งกับแก๊สคาร์บูไรซิง (Combined 1) ซึ่งมี

ธาตุไนโตรเจนอยู่บริเวณผิวชั้นทดสอบจากกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่ง จึงทำให้ธาตุคาร์บอนแพร่เข้าสู่ชั้นทดสอบได้ดีกว่า เมื่อผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง



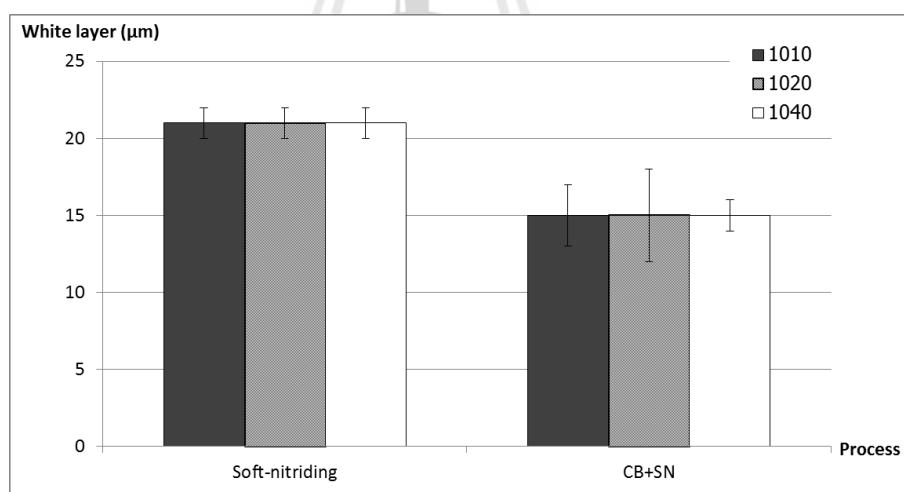
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Total case depth กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าผสม

เช่นเดียวกัน ค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมดของชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว ดังแสดงในกราฟแท่งรูปที่ 4.13 พบว่าชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) มีแนวโน้มของค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมดน้อยกว่าการชุบแข็งด้วยวิธีอื่น ส่วนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง (CN) มีแนวโน้มของค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมดมากกว่า นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA พบว่าชั้นทดสอบที่มีธาตุผสมต่างกัน เมื่อทำการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วม Combine 1 ยังให้ค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมดเท่า ๆ กันด้วย

4.4 ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นผิวขาว

จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นผิวขาวของชั้นทดสอบกับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่ง โครงสร้างเป็นแถบสีขาวที่บริเวณผิวชั้นทดสอบ ซึ่งเป็นสารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ $Fe_{2-3}N$ (โครงสร้าง ϵ) และ Fe_4N (โครงสร้าง γ') เกิดขึ้นในกระบวนการซอฟต์ในทรายดิ่ง (SN) และกระบวนการร่วมระหว่าง CB+SN (Combined 2) ซึ่งทำการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการซอฟต์ในทรายดิ่งในภายหลัง จึงทำให้เกิดชั้นผิวขาวที่ผิวชั้นทดสอบ ผลจากการวัดความหนาชั้นผิวขาวพบว่าชั้นทดสอบที่มี

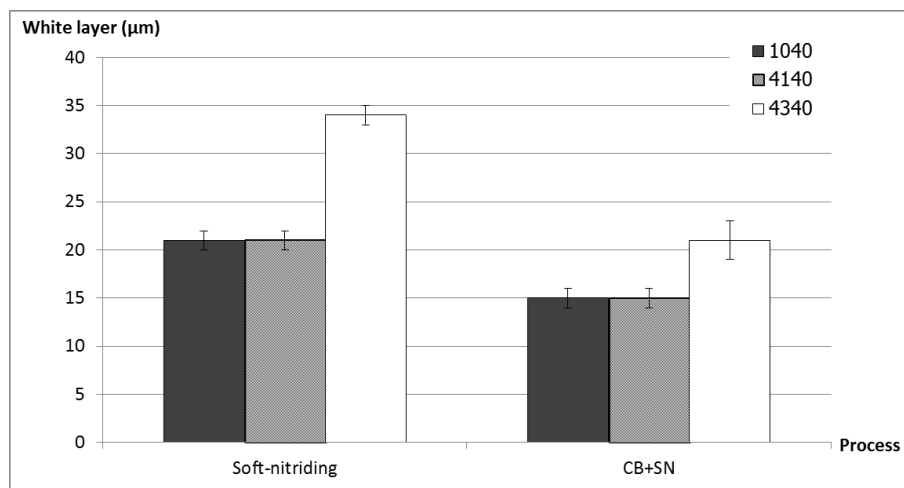
ปริมาณคาร์บอนต่างกัน และผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วย SN และ Combined 2 พบว่าความหนาชั้นผิวขาวของชิ้นทดสอบที่ผ่านชุบแข็งผิวด้วย SN จะมีความหนาเท่ากัน แม้จะมีปริมาณคาร์บอนก่อนการชุบแข็งผิวต่างกัน ส่วนในกระบวนการร่วม Combined 2 ปริมาณคาร์บอนที่ผิวจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน เนื่องจากผ่านการชุบแข็งผิวด้วย CB มาก่อน โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านแต่ละกระบวนการชุบแข็งผิวด้วย SN ของเหล็กกล้าคาร์บอนมีความหนาชั้นผิวขาวอยู่ที่ประมาณ 21 ไมโครเมตร มากกว่า Combined 2 ที่มีความหนาชั้นผิวขาวเพียง 15 ไมโครเมตร ซึ่งจากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณคาร์บอนที่ผิวจากการชุบแข็งผิวด้วย CB ส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างชั้นผิวขาว นอกจากนี้ รูปที่ 4.1 และ 4.3 ซึ่งแสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างที่ผิวชิ้นทดสอบในชิ้นทดสอบเหล็กกล้าที่ยังไม่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว และชิ้นทดสอบที่ผ่าน CB ตามลำดับ โดยในชิ้นทดสอบที่ผ่าน CB จะพบโครงสร้าง Retained Austenite ซึ่งเกิดจากการมีปริมาณของธาตุคาร์บอนสูง แต่ในชิ้นทดสอบที่ยังไม่ผ่านการชุบแข็งผิวพบเพียงโครงสร้างเฟอร์ไรต์เท่านั้น ซึ่งเป็นเหตุผลที่จะสรุปได้ว่าหากเหล็กกล้าคาร์บอนมีปริมาณธาตุคาร์บอนสูงมากพอ จนเกิด Retained Austenite อาจส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างชั้นผิวขาวได้



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง White layer thickness กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน

เช่นเดียวกับกับความหนาชั้นผิวขาวของชิ้นทดสอบในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิว แสดงในกราฟแท่งรูปที่ 4.15 พบว่าชิ้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย SN มีแนวโน้มของความหนาชั้นผิวขาวมากกว่าการชุบแข็งด้วย Combined 2 เนื่องจากสาเหตุเดียวกันกับกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กกล้าผสมที่มีส่วนผสม

ของธาตุไนเกิล (Ni) คือ AISI 4340 ส่งผลให้สามารถเกิดชั้นผิวขาวที่ผิวได้หนาขึ้นเป็นประมาณ 34 และ 21 ไมโครเมตรตามลำดับ

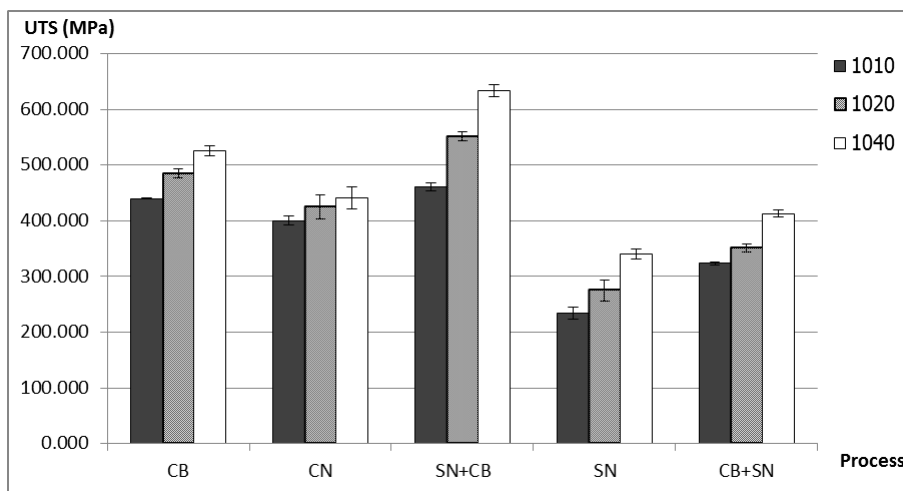


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง White layer thickness กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม

4.5 ผลจากการทดสอบแรงดึง

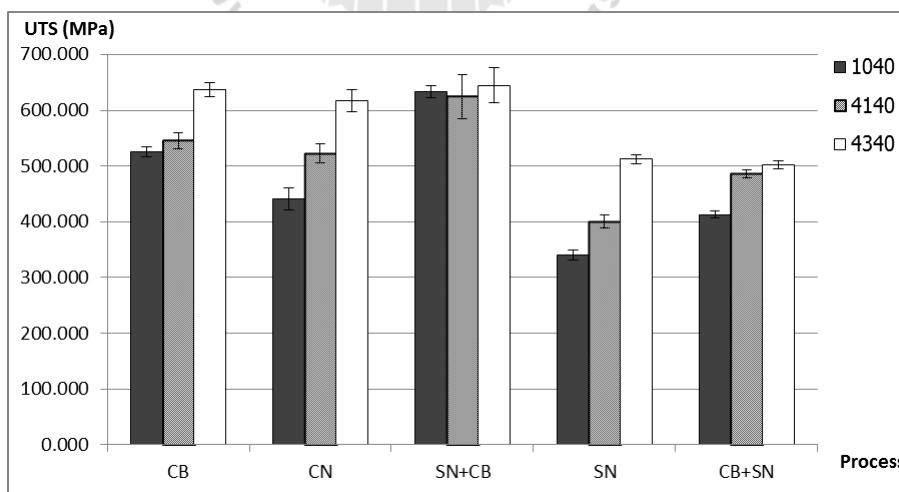
ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าที่มีธาตุคาร์บอนแตกต่างกัน เมื่อผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการชุบแข็งผิวต่าง ๆ ดังแสดงในกราฟแท่งรูปที่ 4.16 พบว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate tensile strength) จะเพิ่มตามปริมาณคาร์บอนของวัสดุ เนื่องจากบริเวณเนื้อวัสดุของชิ้นทดสอบโดยส่วนใหญ่ยังคงสภาพเดิมอยู่ ทำให้ความแข็งแรงสูงสุดแปรผันตามปริมาณคาร์บอนของวัสดุที่นำมาทำชิ้นทดสอบด้วย

หากพิจารณาที่กระบวนการชุบแข็งผิวแต่ละกระบวนการแล้ว จะพบว่าชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย SN+CB (Combined 1) มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงสูงสุดมากกว่าการชุบแข็งด้วยวิธีการอื่น ซึ่งมีความแข็งแรงสูงสุดมากกว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย CB เพียงอย่างเดียว ส่วนการชุบแข็งผิวด้วย CN ซึ่งเป็นการเพิ่มธาตุไนโตรเจนช่วยในการอบชุบ ซึ่งได้ค่าความแข็งแรงผิวและค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมดสูงกว่า (หัวข้อ 4.3) แต่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดต่ำกว่า เมื่อพิจารณาที่ลักษณะการอบชุบที่อุณหภูมิสูงเช่นกัน



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ultimate tensile strength กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน

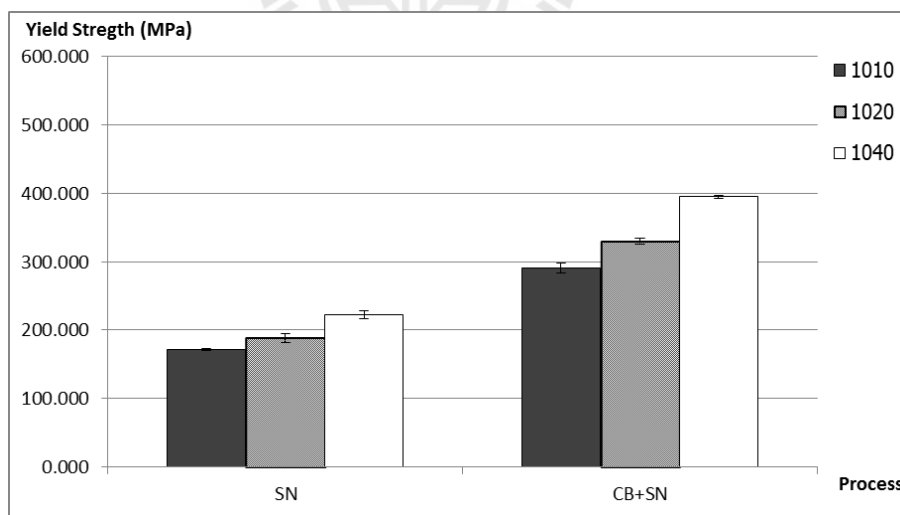
นอกจากนี้ยังพบว่า การชุบแข็งผิวด้วย CB ก่อน SN ในกระบวนการร่วมแบบ Combined 2 ช่วยให้ความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการชุบแข็งผิวด้วย SN เพียงอย่างเดียว เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่ผิวที่มากกว่า (ตารางที่ 4.3) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงสูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ultimate tensile strength กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าผสม

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มธาตุผสมที่คุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการอบชุบ ได้แก่ Cr, Mo และ Ni ทำให้ชิ้นทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในทุกกระบวนการ โดยเฉพาะในเหล็กกล้า AISI 4340 ซึ่งมีส่วนผสมของ Ni ด้วย จะมีความแข็งแรงสูงสุดมากกว่าเหล็กกล้าที่ไม่มีธาตุผสมหรือเหล็กกล้าที่มีเพียง Cr และ Mo เป็นธาตุผสม และเมื่อพิจารณาที่กระบวนการชุบแข็งผิวแต่ละกระบวนการ พบว่าชิ้นทดสอบเหล็กกล้าผสมมีแนวโน้มเดียวกันกับเหล็กกล้าคาร์บอน (รูปที่ 4.16) คือชิ้นทดสอบเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย Combined 1 มีแนวโน้มของค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate tensile strength) มากกว่าการชุบแข็งด้วย CB และ CN ตามลำดับ และยังพบข้อสังเกตอีกประการหนึ่งคือ ในการชุบแข็งผิวด้วย Combined 1 มีความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงสูงสุดของเหล็กกล้าผสม AISI 1040 และ 4140 ได้เท่ากับเหล็กกล้าผสม AISI 4340 ซึ่งมีธาตุ Ni ช่วยในการอบชุบ ซึ่งยืนยันได้ด้วยผลการวิเคราะห์ทางสถิติ คือ ค่า P-Value เท่ากับ 0.057 มีค่ามากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ

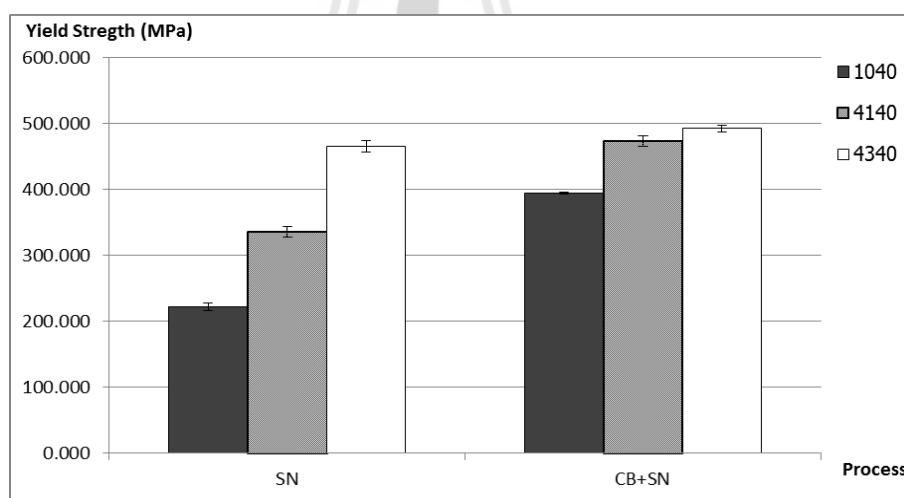
ส่วนในกระบวนการร่วมแบบ Combined 2 และการชุบแข็งผิวแบบ SN ในเหล็กกล้าผสมก็มีลักษณะคล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอนเช่นกัน คือเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย CB ก่อน จะให้ความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการชุบแข็งผิวด้วย SN เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Yield strength กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน

ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) จะเกิดขึ้นกับชั้นทดสอบที่มีพฤติกรรมการเสียหายแบบวัสดุเหนียวเท่านั้น ซึ่งเกิดขึ้นกับชั้นทดสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งด้วย SN และ Combined 2 ส่วนกระบวนการชุบแข็งผิวแบบอื่น จะมีพฤติกรรมการเสียหายแบบวัสดุเปราะ จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรง ณ จุดครากกับกระบวนการชุบแข็งผิว ทั้ง 2 แบบในชั้นทดสอบกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับค่าความแข็งแรงสูงสุดของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการดังกล่าว คือ การชุบแข็งผิวด้วย CB ก่อน SN ในกระบวนการร่วมแบบ Combined 2 ช่วยให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการชุบแข็งผิวด้วย SN เพียงอย่างเดียว เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่ผิวที่มากกว่า

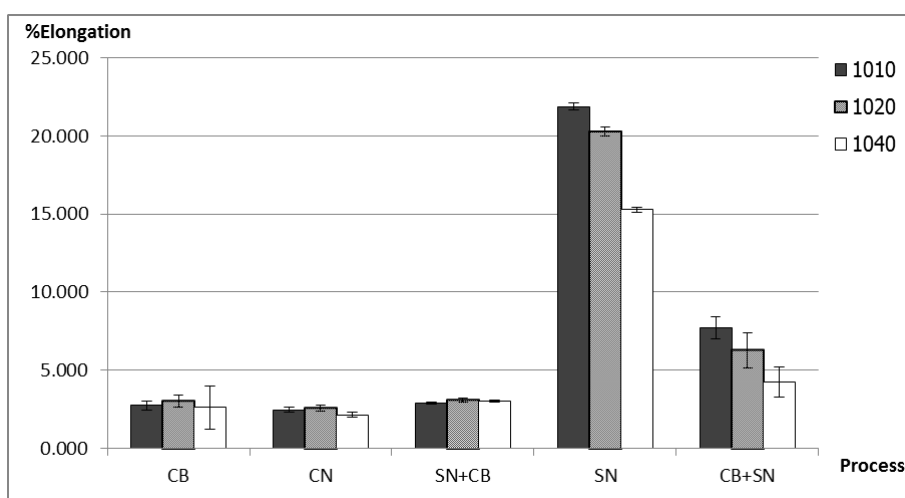
ในทำนองเดียวกันค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ที่เกิดขึ้นในชั้นทดสอบเหล็กกล้าผสม ก็จะมีลักษณะคล้ายกับค่าความแข็งแรงสูงสุดของชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วย SN และ Combined 2 ซึ่งการชุบแข็งผิวด้วย Combined 2 ให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากซึ่งมากกว่าการชุบแข็งผิวด้วย SN เพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับผลที่เกิดกับค่าความแข็งแรงสูงสุด (รูปที่ 4.19)



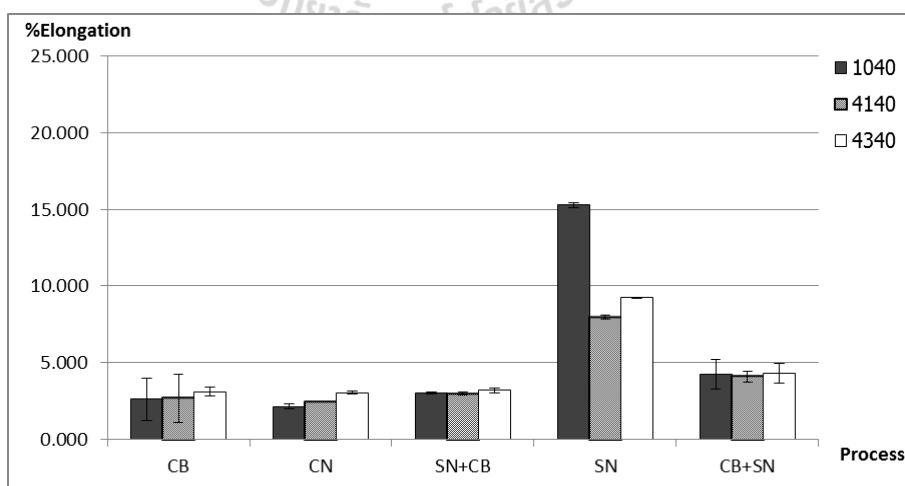
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Yield strength กับกระบวนการชุบแข็งผิว ในกลุ่มเหล็กกล้าผสม

จากรูปที่ 4.20 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ของชั้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน พบว่าในชั้นทดสอบที่มีพฤติกรรมการเสียหายแบบวัสดุเหนียว คือชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย SN และ Combined 2 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงสูงสุด ซึ่งพบว่าชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย SN จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าส่วนชั้นทดสอบที่มีพฤติกรรมการเสียหายแบบเปราะ ได้แก่ชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย

CB, CN และ Combined 1 จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อย แต่จะสังเกตเห็นได้ว่า แม้ค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย Combined 1 จะมีแนวโน้มมากกว่า แต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวไม่ได้ลดลงน้อยกว่า และยังมีค่าใกล้เคียงกันในเหล็กกล้าคาร์บอนแต่ละชนิด ซึ่งยืนยันได้ด้วยผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย One-way ANOVA พบว่าค่า P-Value ของชิ้นทดสอบที่ชุบแข็งผิวเกือบทั้งหมด มีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ ยกเว้นใน Combined 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.442



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน



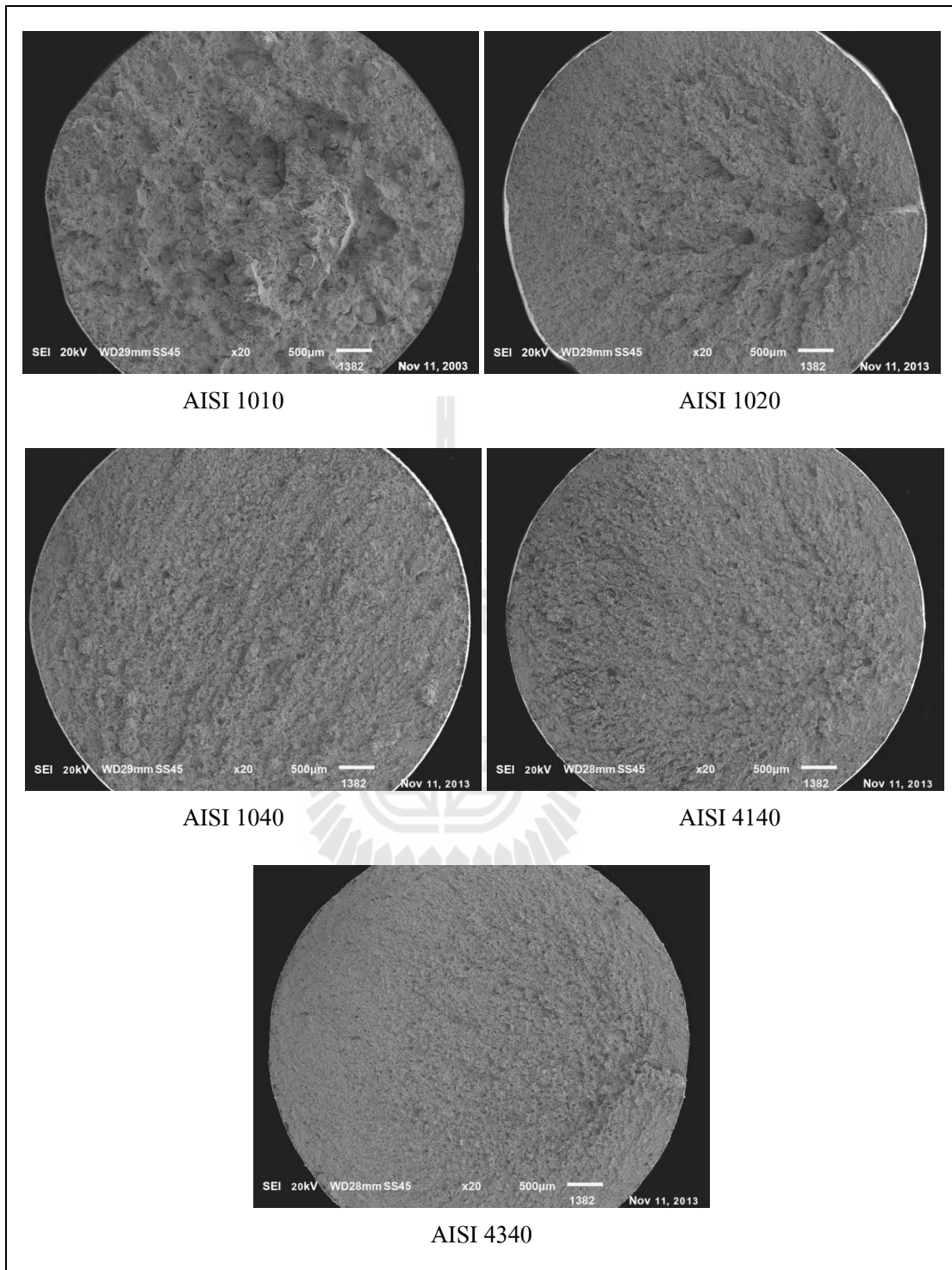
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับกระบวนการชุบแข็งผิวในกลุ่มเหล็กกล้าผสม

ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมมีลักษณะคล้ายกับกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.21 คือเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าผสม ในชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย SN และ Combined 2 พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย SN จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่า แต่ในชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย Combined 2 จะมีค่าใกล้เคียงกันในเหล็กกล้าแต่ละชนิด ส่วนชิ้นทดสอบที่มีพฤติกรรมการเสียหายแบบเปราะ จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อย และในชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย Combined 1 จะมีแนวโน้มมากกว่า และมีค่าใกล้เคียงกันในเหล็กกล้าแต่ละชนิด

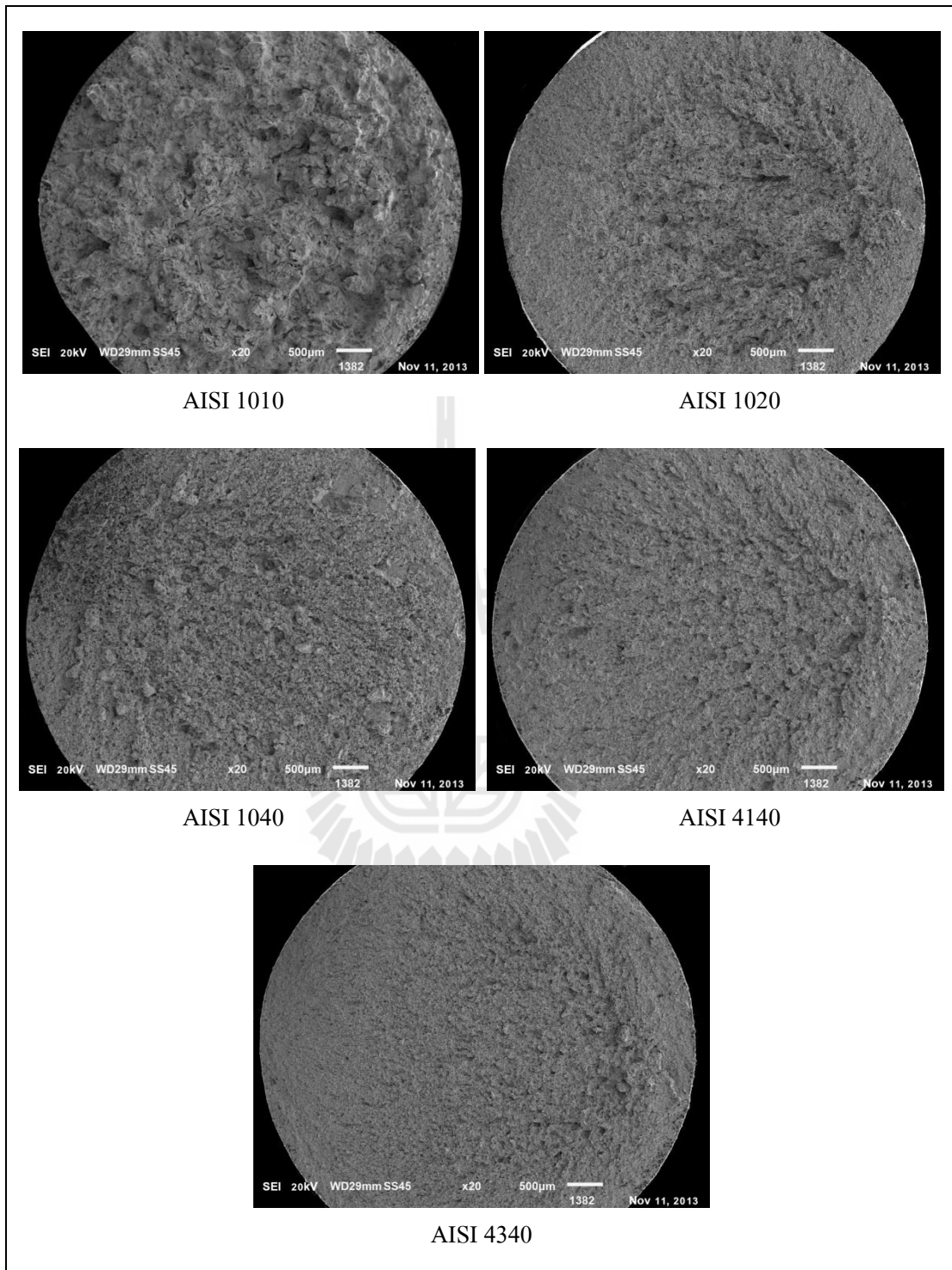
4.6 ผลจากการศึกษาพื้นผิวการแตกหัก

ชิ้นทดสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ เมื่อทำการทดสอบแรงดึงแล้ว จะถูกนำมาศึกษาพื้นผิวการแตกหัก ด้วยภาพถ่ายพื้นผิวจากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในชิ้นทดสอบที่มีพฤติกรรมการเสียหายแบบวัสดุเปราะ ซึ่งได้แก่ชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย CB, CN และ Combined 1 (รูปที่ 4.22-4.24) จะมีลักษณะพื้นผิวแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือส่วนที่อยู่บริเวณขอบจะมีรอยแตกค่อนข้างละเอียดกว่าส่วนที่อยู่บริเวณแกนกลาง โดยส่วนแรกจะมีระยะจากผิวนอกใกล้เคียงกับค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าว มีการแพร่เข้าไปของธาตุคาร์บอนหรือไนโตรเจน ทำให้มีความแข็งมากกว่าแกนกลาง และมีความเปราะมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นทดสอบเสียหายจากส่วนที่มีความเปราะก่อน คือบริเวณขอบ จากนั้นส่วนที่มีความเหนียวจึงเสียหาย โดยจุดกำเนิดของรอยแตก (Crack initiation) ในส่วนที่มีความเหนียวจะอยู่ระหว่างพื้นผิวทั้งสองส่วน

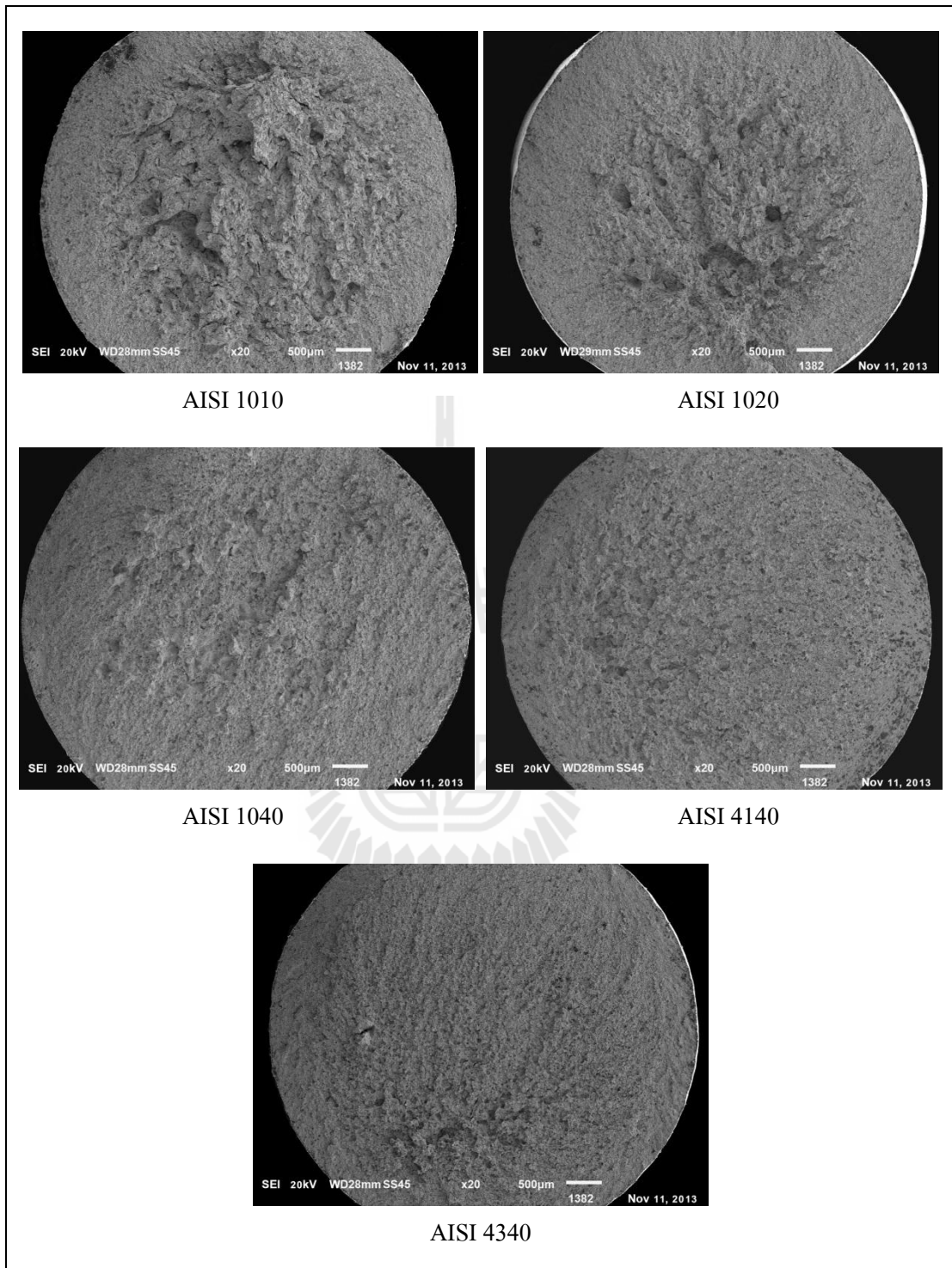
ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย SN (รูปที่ 4.25) และ Combined 2 (รูปที่ 4.26) ซึ่งมีพฤติกรรมการเสียหายแบบวัสดุเหนียว พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย SN จะมีลักษณะการแตกเป็นแบบถ้วยและกรวย (Cup and cone) ซึ่งเกิดจากแรงเฉือน โดยจะเห็นได้ชัดเจนในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน ส่วนกลุ่มเหล็กกล้าผสมจะพบว่าบริเวณขอบมีลักษณะการแตกแบบเปราะซึ่งเกิดจากการแพร่เข้าไปของธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนในบรรยากาศการอบชุบ แต่บริเวณเนื้อภายในยังคงมีลักษณะการแตกแบบเหนียวอยู่ ส่วนในชิ้นทดสอบเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย Combined 2 จะคล้ายกับชิ้นทดสอบกลุ่มเหล็กกล้าผสมของ SN คือบริเวณขอบมีลักษณะการแตกแบบเปราะและภายในแตกแบบเหนียว ซึ่งเกิดขึ้นทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม ซึ่งเกิดจากที่บริเวณผิวมีปริมาณธาตุคาร์บอนจำนวนมาก เนื่องจากการชุบแข็งผิวด้วย CB มาก่อน ทำให้ที่บริเวณขอบของชิ้นทดสอบมีความแข็งมากกว่าตรงแกนกลาง และมีความเปราะมากกว่า



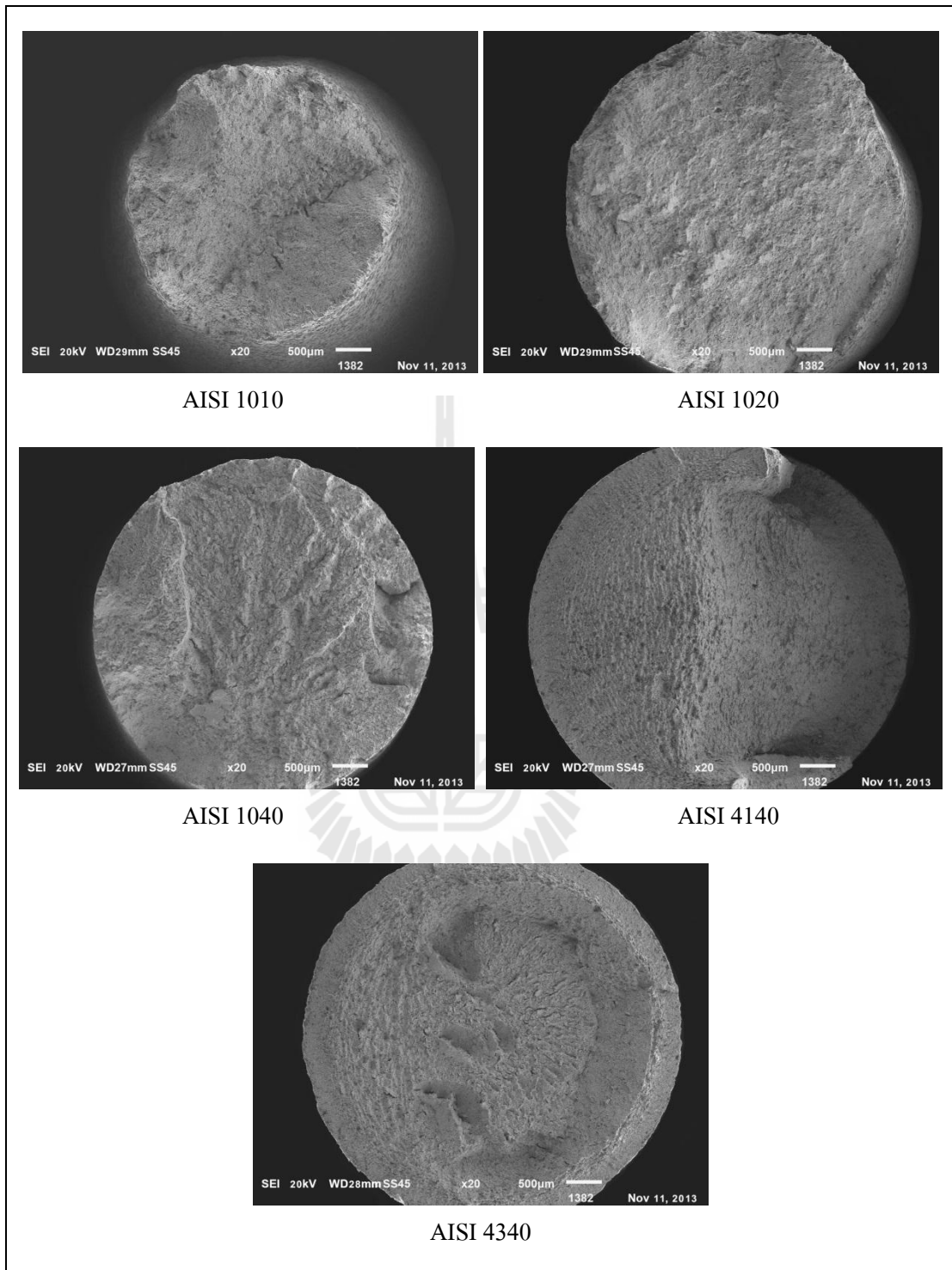
รูปที่ 4.22 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบเหล็กกล้า
ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง



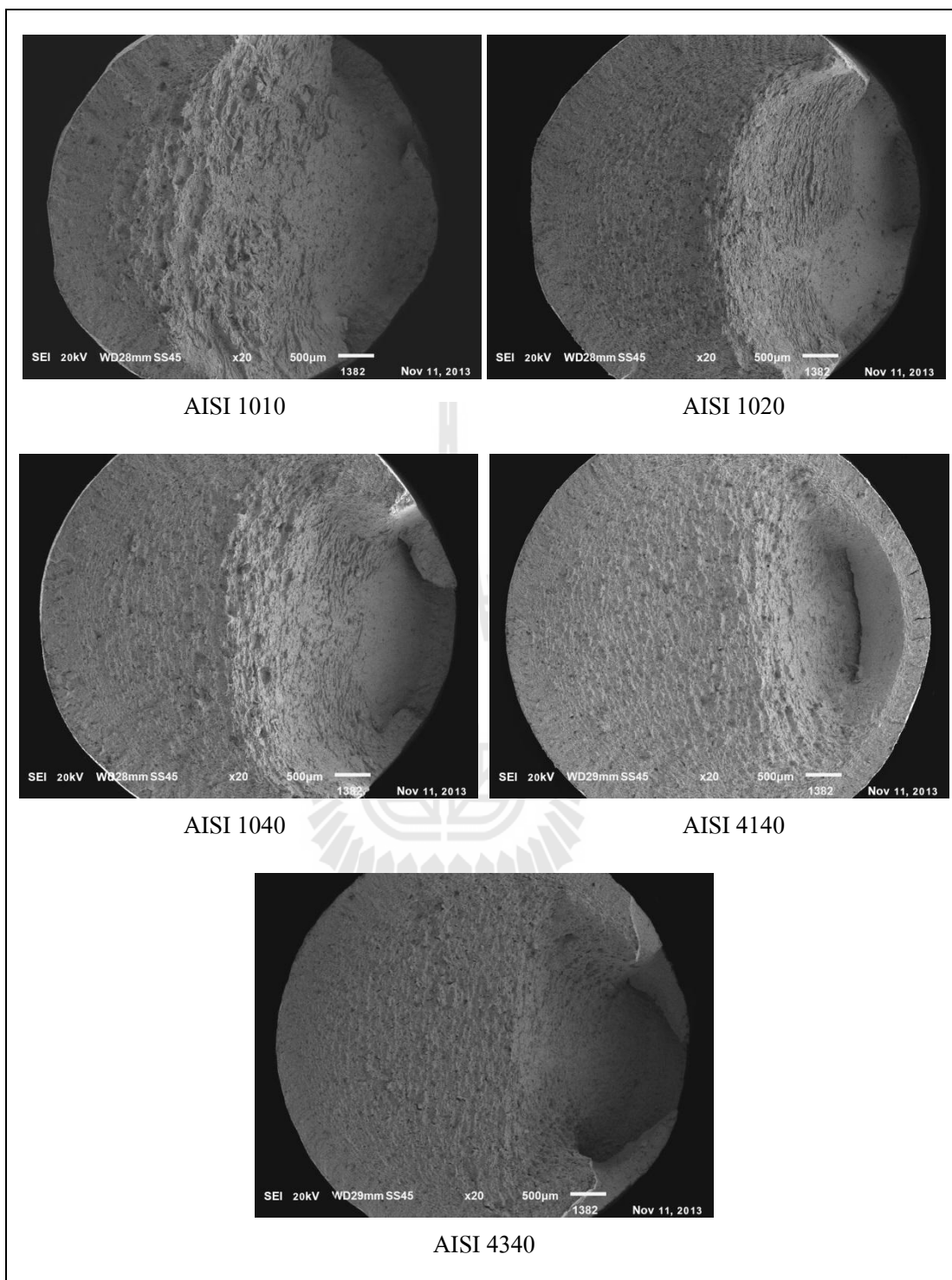
รูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบเหล็กกล้า
ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนตรายิ่ง



รูปที่ 4.24 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบเหล็กกล้า ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพตี้ในทรายดิง กับแก๊สคาร์บูไรซิง



รูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพท์ในทรายดิ่ง



รูปที่ 4.26 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบเหล็กกล้า
 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิง
 กับแก๊สซอพต์ไนตรายดิง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการดำเนินงานวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง ต่อสมบัติเชิงกล โครงสร้างและความแข็งผิวของเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสม ผลจากการวิจัยสามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1.1 ผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิงต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอน

กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง สามารถปรับปรุงสมบัติของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณธาตุคาร์บอนต่างกันให้มีสมบัติดีขึ้น ทั้งด้านความแข็งและการรับแรงดึงคือ ให้ค่าความแข็งผิวที่ใกล้เคียงกันและความแข็งภายใต้ผิวที่สม่ำเสมอ แม้ชิ้นทดสอบนี้จะมีปริมาณคาร์บอนก่อนการชุบแข็งผิวต่างกันก็ตาม โดยความแข็งผิวที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันกับการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติในการรับแรงดึงให้แนวโน้มสูงขึ้นกว่าการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สคาร์โบไนตรายดิง ทั้งค่าความแข็งแรงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

5.1.2 ผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิงต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสม

ผลต่อค่าความแข็งจากกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยวิธีการนี้ มีลักษณะคล้ายกับกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอน คือให้ค่าความแข็งผิวที่ใกล้เคียงกัน และความแข็งภายใต้ผิวที่สม่ำเสมอ แม้ชิ้นทดสอบจะถูกกำหนดให้ปริมาณธาตุคาร์บอนเท่ากัน แต่มีชนิดของธาตุผสมซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งผิวที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าให้ค่าความแข็งลึกทั้งหมดที่ใกล้เคียงกันอีกด้วย ส่วนในด้านสมบัติในการรับแรงดึงมีลักษณะคล้ายกับกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอนเช่นกัน คือ มีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สคาร์โบไนตรายดิง ทั้งค่าความแข็งแรงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว และยังมีค่าใกล้เคียงกันในชิ้นทดสอบเหล็กกล้าแต่ละชนิด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการนี้สามารถชุบแข็งผิวเหล็กกล้าคาร์บอนให้มีสมบัติด้านความแข็งและการรับแรงดึงได้เท่า ๆ กับเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมช่วยในการอบชุบ

5.1.3 ผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สซอพท์ไนตรายดิงต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอน

การชุบแข็งผิวดังกล่าวส่งผลต่อปริมาณธาตุคาร์บอนบริเวณผิวชั้นทดสอบ ซึ่งเกิดจากการเพิ่มธาตุคาร์บอนที่บริเวณผิวจากกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง ทำให้การเกิดโครงสร้างชั้นผิวขาวบางกว่าการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพท์ไนตรายดิงเพียงอย่างเดียว แต่กระบวนการร่วมจะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความแข็งแรง ณ จุดครากในการรับแรงดึงสูงกว่าแก๊สซอพท์ไนตรายดิง

5.1.4 ผลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สซอพท์ไนตรายดิงต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าผสม

ผลที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าผสมจะคล้ายกับเหล็กกล้าคาร์บอน คือมีโครงสร้างชั้นผิวขาวที่บางลง แต่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความแข็งแรง ณ จุดครากในการรับแรงดึงสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบข้อสังเกตเกี่ยวกับเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิล ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดโครงสร้างชั้นผิวขาวให้ดีขึ้นอย่างมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากบทสรุปของการอบชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง สามารถนำคุณสมบัติที่ได้ทั้งในด้านความแข็งแรงและการรับแรงดึงมาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ได้คือ กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการชุบแข็งผิวเหล็กกล้าคาร์บอนให้สมบัติเชิงกลได้เท่า ๆ กับเหล็กกล้าผสมที่ปริมาณคาร์บอนเท่ากัน ซึ่งช่วยลดต้นทุนจากราคาวัสดุเหล็กกล้าผสมที่มีราคาแพงกว่าได้ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการร่วมดังกล่าวใช้เวลาในการอบชุบมากกว่า ซึ่งควรต้องพิจารณาในส่วนนี้ด้วยเช่นกัน และควรมีการอบคืนตัวก่อนการนำชิ้นงานไปใช้

5.2.2 ถ้าพิจารณาที่กระบวนการชุบแข็งผิวในแต่ละครั้ง หากชิ้นงานที่นำมาทำการชุบแข็งผิว มีชนิดของเหล็กกล้าแตกต่างกัน แต่ต้องการความแข็งแรงหรือความแข็งแรงภายหลังการอบชุบเท่ากัน เช่น งานทดสอบผลิตภัณฑ์ใหม่ก่อนนำไปผลิตจริง สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการร่วมในการชุบแข็งผิวดังกล่าวได้

5.2.3 จากผลการวิจัยพบข้อดีของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิงหลายประการ อาจนำไปศึกษากับชิ้นงานจริง เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ เฟืองเกียร์ เป็นต้น โดยอาจศึกษาร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบจริง

รายการอ้างอิง

- ไพลิน ฤกษ์จิรสวัสดิ์. (2555). **หลักพื้นฐานของกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มนัส สติรจินดา. (2543). **เหล็กกล้า**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- มนัส สติรจินดา. (2543). **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์. (2535). **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ประชาชน จำกัด
- อิทธิพล เดี่ยวณิษฐ์. (2550). **การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก**. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Allenstein, A.N., Lepienski, C.M., Buschinelli, A.J.A., and Brunatto, S.F. (2010). Plasma nitriding of CA-6NM steel: effect of H₂ + N₂ gas mixtures in nitriding layer formation for low N₂ contents at 500oC. **Materials Research**. Vol. 13(4): pp. 557-562.
- Asi, O., Can, A., Pineault, J., and Belassel, M. (2009). The effect of high temperature gas carburizing on bending fatigue strength of SAE 8620 steel. **Materials and Design**. Vol. 30: pp. 1792-1797.
- ASM International. (2005). **ASM Handbook Volume 1 Properties and Selection: Iron, Steel and High-Performance Alloys**. USA: ASM International.
- ASM International. (1991). **ASM Handbook Volume 4 Heat treating**. USA: ASM International.
- ASM International. (1992). **ASM Handbook Volume 10 Materials Characterization**. 3rd ed. USA: ASM International.
- ASM International. (1994). **ASM Handbook Volume 5 Surface engineering**. USA: ASM International.
- ASM International. (1996). **ASM Specialty Handbook Carbon and alloy steels**. USA: ASM International.
- ASM International. (2000). **ASM Handbook Volume 8 Mechanical testing**. USA: ASM International.

ASTM International. (2012). **Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials (E8/E8M-11)**. USA: ASM International.

Available: <https://sites.google.com/site/mystatistics01/chapter5/1-way-anova>

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

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

Available: <http://xraysrv.wustl.edu/web/xrd/brukerd8.html>

Fattah, M., and Mahboubi, F. (2012). Microstructure characterization and corrosion properties of nitrocarbured AISI 4140 low alloy steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**. Vol. 21(4): pp. 548-552.

Foerster, C., Assmann, A., Silva, S., Nascimento, F., Lepienski, C., and Guimaraes, J. (2010). ANSI 304 nitrocarbured at low temperature: Mechanical and tribological. **Surface & Coatings Technology**. Vol. 204: pp. 3004-3008.

Mirjani, M., Shafyei, A., and Ashrafizadeh, F. (2009). Plasma and gaseous nitrocarburing of C60W steel for tribological applications. **Vacuum**. Vol. 83: pp. 1043-1048.

Montgomery, D.O., Runger, G.C., and Hubele, N.F. (2012). **Engineering Statistics**. 5th ed. Singapore: John Wiley & Sons., Inc.

Pye, D. (2003). **Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburing**. 1st ed. USA: ASM International.

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

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**. Vol. 415-417: pp. 1186-1189.

Tokaji, K., Kohjama, K., and Akita, M. (2004). Fatigue behaviour and fracture mechanism of a 316 stainless steel hardened by carburizing. **International Journal of Fatigue**. Vol. 26: pp. 543-551.



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

ตารางที่ ก.1 แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Carbon-CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	2503	1251	2.55	0.120
Error	12	5895	491		
Total	14	8398			
S = 22.16 R-Sq = 29.80% R-Sq(adj) = 18.11%					

ตารางที่ ก.2 แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพตีไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Carbon-SN+CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	1700	850	1.33	0.302
Error	12	7685	640		
Total	14	9384			
S = 25.31 R-Sq = 18.11% R-Sq(adj) = 4.46%					

ตารางที่ ก.3 แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-CN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	746	373	0.90	0.432
Error	12	4972	414		
Total	14	5718			
S = 20.35 R-Sq = 13.05% R-Sq(adj) = 0.00%					

ตารางที่ ก.4 แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Alloy-CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	18368	9184	9.57	0.003
Error	12	11518	960		
Total	14	29886			
S = 30.98 R-Sq = 61.46% R-Sq(adj) = 55.04%					

ตารางที่ ก.5 แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพตีไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Alloy-SN+CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	3977	1989	1.40	0.285
Error	12	17100	1425		
Total	14	21078			
S = 37.75 R-Sq = 18.87% R-Sq(adj) = 5.35%					

ตารางที่ ก.6 แสดงผล One-way ANOVA: Surface hardness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-CN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	72196	36098	72.28	0.000
Error	12	5993	499		
Total	14	78189			
S = 22.35 R-Sq = 92.33% R-Sq(adj) = 91.06%					

ตารางที่ ก.7 แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Carbon-CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.1526	0.0763	5.05	0.034
Error	9	0.1359	0.0151		
Total	11	0.2884			
S = 0.1229 R-Sq = 52.89% R-Sq(adj) = 42.42%					

ตารางที่ ก.8 แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Carbon-SN+CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.15558	0.07779	26.02	0.000
Error	9	0.02691	0.00299		
Total	11	0.18249			
S = 0.05468 R-Sq = 85.25% R-Sq(adj) = 81.98%					

ตารางที่ ก.9 แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-CN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.05470	0.02735	6.60	0.017
Error	9	0.03727	0.00414		
Total	11	0.09197			
S = 0.06435 R-Sq = 59.47% R-Sq(adj) = 50.47%					

ตารางที่ ก.10 แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Alloy-CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.06295	0.03148	4.74	0.039
Error	9	0.05972	0.00664		
Total	11	0.12267			
S = 0.08146 R-Sq = 51.32% R-Sq(adj) = 40.50%					

ตารางที่ ก.11 แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพตีไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Alloy-SN+CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.01872	0.00936	1.97	0.195
Error	9	0.04267	0.00474		
Total	11	0.06139			
S = 0.06885 R-Sq = 30.49% R-Sq(adj) = 15.04%					

ตารางที่ ก.12 แสดงผล One-way ANOVA: Total case depth ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-CN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.26473	0.13236	16.65	0.001
Error	9	0.07156	0.00795		
Total	11	0.33628			
S = 0.08917 R-Sq = 78.72% R-Sq(adj) = 73.99%					

ตารางที่ ก.13 แสดงผล One-way ANOVA: White layer thickness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.13	0.07	0.05	0.955
Error	12	17.20	1.43		
Total	14	17.33			
S = 1.197 R-Sq = 0.77% R-Sq(adj) = 0.00%					

ตารางที่ ก.14 แสดงผล One-way ANOVA: White layer thickness ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-CB+SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.93	0.47	0.12	0.891
Error	12	48.00	4.00		
Total	14	48.93			
S = 2 R-Sq = 1.91% R-Sq(adj) = 0.00%					

ตารางที่ ก.15 แสดงผล One-way ANOVA: White layer thickness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	504.40	252.2	157.63	0.000
Error	12	19.20	1.60		
Total	14	523.60			
S = 1.265 R-Sq = 96.33% R-Sq(adj) = 95.72%					

ตารางที่ ก.16 แสดงผล One-way ANOVA: White layer thickness ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-CB+SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	141.73	70.87	27.26	0.000
Error	12	31.20	2.60		
Total	14	172.93			
S = 1.612 R-Sq = 81.96% R-Sq(adj) = 78.95%					

ตารางที่ ก.17 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิ่ง

One-way ANOVA: Carbon-CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	14596	7298	23.49	0.000
Error	9	2797	311		
Total	11	17392			
S = 17.63 R-Sq = 83.92% R-Sq(adj) = 80.35%					

ตารางที่ ก.18 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-CN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	3421.2	1710.6	21.37	0.000
Error	9	720.6	80.1		
Total	11	4141.8			
S = 8.948 R-Sq = 82.60% R-Sq(adj) = 78.74%					

ตารางที่ ก.19 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน
ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพตีไนโตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Carbon-SN+CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	59045	29523	152.03	0.000
Error	9	1748	194		
Total	11	60793			
S = 13.94 R-Sq = 97.13% R-Sq(adj) = 96.49%					

ตารางที่ ก.20 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน
ที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพตีไนโตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	18627	9314	43.49	0.000
Error	9	1928	214		
Total	11	20555			
S = 14.63 R-Sq = 90.62% R-Sq(adj) = 88.54%					

ตารางที่ ก.21 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอน
ที่ผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพตีไนโตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-CB+SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	16800.6	8400.3	149.29	0.000
Error	9	506.4	56.3		
Total	11	17307.0			
S = 7.501 R-Sq = 97.07% R-Sq(adj) = 96.42%					

ตารางที่ ก.22 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Alloy-CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	27009	13505	45.83	0.000
Error	9	2652	295		
Total	11	29661			
S = 17.17 R-Sq = 91.06% R-Sq(adj) = 89.07%					

ตารางที่ ก.23 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-CN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	62145	31073	34.84	0.000
Error	9	8026	892		
Total	11	70171			
S = 29.86 R-Sq = 88.56% R-Sq(adj) = 86.02%					

ตารางที่ ก.24 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพดีไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Alloy-SN+CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	498.6	249.3	4.02	0.057
Error	9	558.5	62.1		
Total	11	1057.1			
S = 7.878 R-Sq = 47.17% R-Sq(adj) = 35.43%					

ตารางที่ ก.25 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	60964.7	30482.4	680.80	0.000
Error	9	403.0	44.8		
Total	11	61367.7			
S = 6.691 R-Sq = 99.34% R-Sq(adj) = 99.20%					

ตารางที่ ก.26 แสดงผล One-way ANOVA: Ultimate tensile strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-CB+SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	18170.0	9085.0	148.42	0.000
Error	9	550.9	61.2		
Total	11	18720.9			
S = 7.824 R-Sq = 97.06% R-Sq(adj) = 96.40%					

ตารางที่ ก.27 แสดงผล One-way ANOVA: Yield strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	4666.2	2333.1	91.03	0.000
Error	7	179.4	25.6		
Total	9	4845.7			
S = 5.063 R-Sq = 96.30% R-Sq(adj) = 95.24%					

ตารางที่ ก.28 แสดงผล One-way ANOVA: Yield strength ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอพตีไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-CB+SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	22141.5	11070.7	389.55	0.000
Error	9	255.8	28.4		
Total	11	22397.2			
S = 5.331 R-Sq = 98.86% R-Sq(adj) = 98.60%					

ตารางที่ ก.29 แสดงผล One-way ANOVA: Yield strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพตีไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	118992.4	59496.2	992.30	0.000
Error	9	539.6	60.0		
Total	11	119532.1			
S = 7.743 R-Sq = 99.55% R-Sq(adj) = 99.45%					

ตารางที่ ก.30 แสดงผล One-way ANOVA: Yield strength ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอพตีไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-CB+SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	21572.5	10786.3	363.86	0.000
Error	9	266.8	29.6		
Total	11	21839.3			
S = 5.445 R-Sq = 98.78% R-Sq(adj) = 98.51%					

ตารางที่ ก.31 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Carbon-CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.3504	0.1752	5.99	0.022
Error	9	0.2632	0.0292		
Total	11	0.6136			
S = 0.1710 R-Sq = 57.11% R-Sq(adj) = 47.58%					

ตารางที่ ก.32 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-CN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.39102	0.19551	28.06	0.000
Error	9	0.06271	0.00697		
Total	11	0.45372			
S = 0.08347 R-Sq = 86.18% R-Sq(adj) = 83.11%					

ตารางที่ ก.33 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพดีไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Carbon-SN+CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.0928	0.0464	0.90	0.442
Error	9	0.4667	0.0519		
Total	11	0.5596			
S = 0.2277 R-Sq = 16.59% R-Sq(adj) = 0.00%					

ตารางที่ ก.34 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพตีไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	94.655	47.327	64.21	0.000
Error	9	6.633	0.737		
Total	11	101.288			
S = 0.8585 R-Sq = 93.45% R-Sq(adj) = 92.00%					

ตารางที่ ก.35 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพตีไนไตรดิง

One-way ANOVA: Carbon-CB+SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	24.552	12.276	50.82	0.000
Error	9	2.174	0.242		
Total	11	26.725			
S = 0.4915 R-Sq = 91.87% R-Sq(adj) = 90.06%					

ตารางที่ ก.36 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Alloy-CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.5051	0.2525	15.92	0.001
Error	9	0.1428	0.0159		
Total	11	0.6479			
S = 0.1260 R-Sq = 77.96% R-Sq(adj) = 73.06%					

ตารางที่ ก.37 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์โบไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-CN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	1.6934	0.8467	59.73	0.000
Error	9	0.1276	0.0142		
Total	11	1.8210			
S = 0.1191 R-Sq = 92.99% R-Sq(adj) = 91.44%					

ตารางที่ ก.38 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง

One-way ANOVA: Alloy-SN+CB versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.1004	0.0502	3.20	0.089
Error	9	0.1412	0.0157		
Total	11	0.2416			
S = 0.1252 R-Sq = 41.56% R-Sq(adj) = 28.57%					

ตารางที่ ก.39 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	121.707	60.854	125.26	0.000
Error	9	4.372	0.486		
Total	11	126.08			
S = 0.6970 R-Sq = 96.53% R-Sq(adj) = 95.76%					

ตารางที่ ก.40 แสดงผล One-way ANOVA: %Elongation ในกลุ่มเหล็กกล้าผสมที่ผ่าน
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิ่งกับแก๊สซอพท์ไนไตรดิง

One-way ANOVA: Alloy-CB+SN versus Sample type					
Source	DF	SS	MS	F	P
Sample type	2	0.084	0.042	0.14	0.873
Error	9	2.739	0.304		
Total	11	2.823			

S = 0.5517 R-Sq = 2.98% R-Sq(adj) = 0.00%





ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Siwadamrongpong, S., Varagul, J., and Suwanta, N. (2013). **The effect of combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing on the hardness of alloy steels.** South East Asian Technical University Consortium SEATUC 2013). Vol. 1: pp. 102-105. March 4-6, 2013, Bandung, Indonesia.



THE EFFECT OF COMBINED PROCESSES BETWEEN GAS SOFT-NITRIDING AND GAS CARBURIZING ON THE HARDNESS OF ALLOY STEELS

Somsak Siwadamrongpong, Jittima Varagul and Natthakrit Suwanta

¹ School of Manufacturing Engineering, ² School of Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand

^{1*} Corresponding Author: E-mail: somsaksi@sut.ac.th. Tel: +66-4422-4236, Fax: +66-4422-4494

ABSTRACT

Gas surface hardening methods, for instance, gas carburizing, gas carbonitriding and gas soft-nitriding are conventional techniques that improve mechanical properties of carbon and alloy steels. Although the combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing are reported to improve the properties similar to gas carbonitriding. However, the understanding of the relationship between combined processes and surface hardness is still unclear. This study was aimed to investigate the effect of combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing on mechanical properties of various steel e.g., AISI 1040, 4140 and 4340. The specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Gas soft-nitriding, gas carburizing, gas carbonitriding and the combined processes were employed to treat the specimen. Microhardness and optical microscopy were performed to characterize structure and properties of the steel surfaces. The results signified that the combined processes, SN+CB, improve its properties compared to other methods especially in the surface hardness, the smoother and lower variation of section hardness. Moreover, the other combined process, CB+SN, showed the same level of surface hardness with thinner white layer thickness.

INTRODUCTION

Gas surface hardening such as gas carburizing, gas carbonitriding and gas soft-nitriding are well-known techniques that improve mechanical properties of carbon and alloy steels. These methods are used because of low cost and easy to control atmosphere in furnace. Gas soft-nitriding method is suitable for all steels type. The steel was heated with lower temperature than others and white layer structure, hard and smooth, was formed on steel surface. Gas carburizing is the method that carbon atom was diffused into the surface with higher temperature to improve surface hardness (Asi, O., 2009). Gas carbonitriding method is the method that nitrogen

and carbon atmosphere was applied at high temperature. The nitrogen atom was believed to help carbon atom to diffuse into steel surface easier than usual (ASM v.4, 1987). The previous study has been reported that the combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing yielded the properties of low carbon steel similar to gas carbonitriding with narrower variation of hardness (Siwadamrongpong, S., 2012). However the understanding of the relationship between the processes on other type of steel is still unclear. This research was aimed to investigate the effect of combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing on properties of various steel types with same carbon content.

EXPERIMENTAL PROCEDURES

The steel graded AISI 1040, AISI 4140 and AISI 4340 were investigated. The composition was analyzed and indicated in Table 1 (ASM v.1, 2005). The raw materials were machined into specimen shape with 12 mm diameter and 10 mm thickness for hardness testing. The specimens were treated by normalizing process with 870 °C for 1 hour to reform microstructure and eliminate residual stress. The surface cleaning was carried out by shot blasting with 0.3 mm grit type steel for 1 hour (ASM v.5, 1987). The temperature patterns of gas surface hardening techniques were shown in Fig 1-3. The specimens were treated with various techniques, soft-nitriding (SN), carburizing (CB), carbonitriding (CN) and combined processes between soft-nitriding and carburizing. The combined processes were done both SN+CB and CB+SN. The 6 samples of each condition were prepared for reproducibility. The surface hardness and total case depth were measured by Future-Tech FM-700 hardness tester, white layer thickness and micro structure were determined by Nikon MM-400 optical microscope, and surface carbon content were investigated by ARL 3460 Metals Analyzer optical emission spectrometer.

Table 1 Compositions of raw materials (wt %)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe
AISI 1040	0.4198	0.2112	0.6344	0.0186	0.0148	0.1555	0.0658	0.0568	0.0109	0.0016	0.0052	Bal.
AISI 4140	0.3942	0.2186	0.6946	0.0267	0.0043	0.0691	0.0457	0.8599	0.1526	0.0075	0.0245	Bal.
AISI 4340	0.3818	0.2689	0.7064	0.0175	0.0340	0.1721	1.7194	0.8926	0.2618	0.0067	0.0146	Bal.

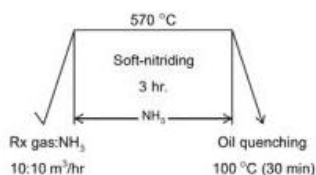


Fig. 1 Treatment conditions of soft-nitriding method

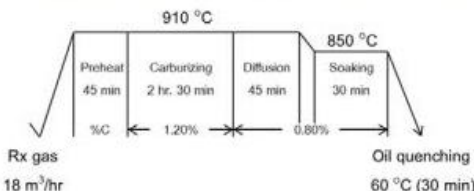


Fig. 2 Treatment conditions of carburizing method

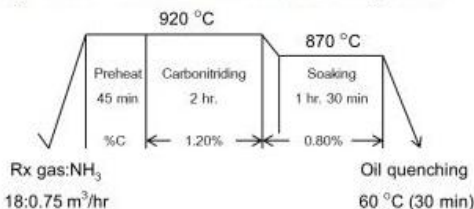


Fig. 3 Treatment conditions of carbonitriding method

RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 4 presents the carbon content on surfaces. It was found that, the AISI 1040 seem to have less carbon content than others except soft-nitriding. It was implied that the diffusion of carbon atom into the surface of AISI 1040 was lower. It could be considered that there are the influence of alloy content in the AISI 4140 and 4340. The surface hardness of specimens treated by carburizing were about 769-950 HV and by the combined process (SN+CB) about 762-913 HV, shown in Fig. 5. It was found that the carburizing and combined process (SN+CB) have same level of surface hardness. It was implied that the high nitrogen content of the specimen (SN+CB) had no effect on surface hardness in the carburizing process. But surface hardness of the carbonitriding on alloy steel was less

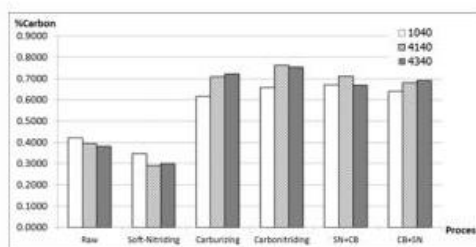


Fig. 4 Carbon content on surfaces of specimens

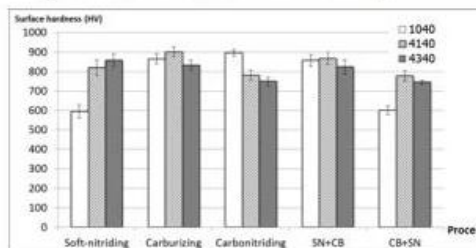


Fig. 5 Surface hardness of specimens

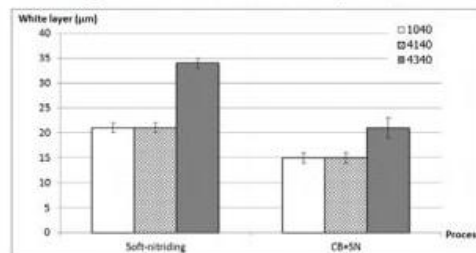


Fig. 6 White layer thickness of specimens

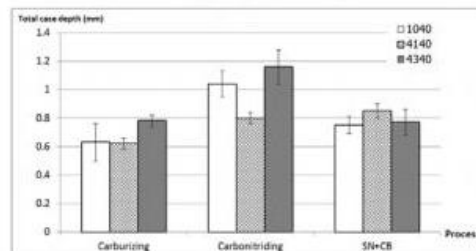


Fig. 7 Total case depth of specimens

than plain carbon steel. Furthermore, the surface hardness of the soft-nitriding process was slightly more than the combined process (CB+SN) for alloy steels (AISI 4140 and AISI 4340). It could be considered that white layer forming of on the specimen (CB+SN) surface was prevented by effect of alloy composition. The white layer thickness was shown in figure 6, it was obvious that AISI 4340 showed excellence properties to form the white layer

for both soft-nitriding and combined process (CB+SN). It might be discussed as the effect of nickel (Ni) composition in the alloy steel (ASM v.4, 1987). The steel grade AISI 1040 and AISI 4140 showed the white layer thickness approximately 21 μm (soft-nitriding process) and 15 μm (CB+SN) respectively (Nolan, D., 2006). Considering the influence of the combined process (CB+SN), the white layer thickness were thinner than the

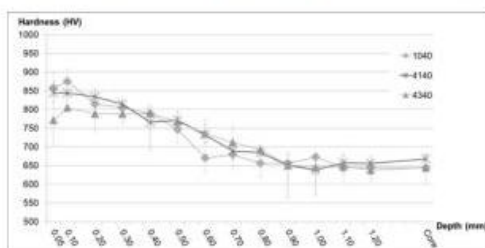


Fig. 8 Section hardness of specimens on carburizing process

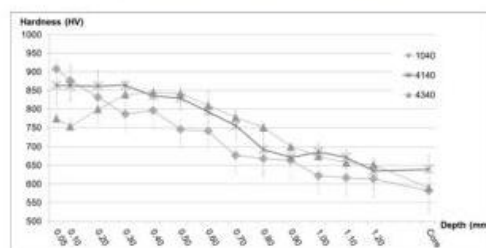


Fig. 9 Section hardness of specimens on carbonitriding process

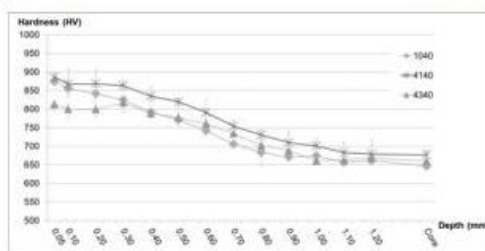


Fig. 10 Section hardness of specimens on combined process (SN+CB)

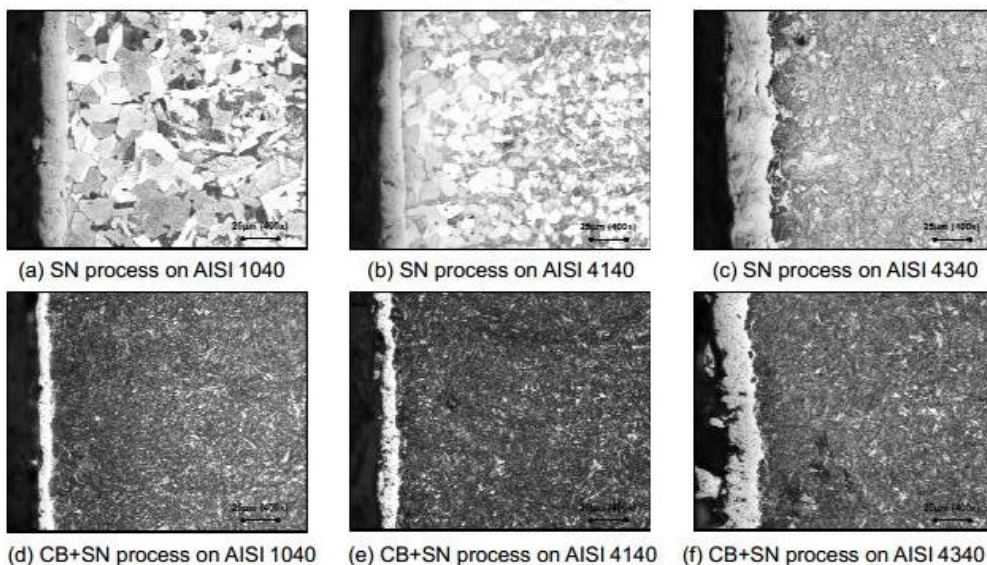


Fig. 11 Microstructure picture of soft-nitriding and combined process between carburizing and soft-nitriding

soft-nitriding specimen. It could be the effect of high carbon content on the pre-treated by carburizing and lead to blocking of nitrogen atom diffusion into the surface. The total case depth was shown on Fig. 7, the results showed that the specimen of carbonitriding process was the highest total case depth, especially on the steel grade AISI 1040 and AISI 4340. The total case depth could be estimated from the section hardness of the specimen shown in Fig. 8-10. On these results, it was obvious to exhibit special advantage of the combined process (SN+CB). Although the total case depth of the specimen treated by combined process (SN+CB) show lower case depth than carbonitriding process, the hardness of the specimen was seem to be maintained for approximately 0.3 mm from the surface without decreasing. This effect was clearer for alloy steels. It was also found that, the section hardness of the specimen treated by combined process (SN+CB) was smoother and lower variation. Figure 11 presented the microstructure picture of white layer thickness with magnification was 400X, It was found the white layer on AISI 4340 steels illustrated the highest thickness for both the soft-nitriding and combined process (CB+SN).

CONCLUSION

This study was aimed to investigate the effect of combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing, both SN+CB and CB+SN, on mechanical properties of various steel types. The specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Gas soft-nitriding, gas carburizing, gas carbonitriding and the combined processes were employed to treat the specimen. Microhardness and optical microscopy were performed to characterize structure and properties of the steel surfaces. From the results, although, the total case depth of the specimen treated by combined process (SN+CB) show lower case depth than carbonitriding process, the hardness of the specimen was seem to be maintained for approximately 0.3 mm from the surface without decreasing. This effect was clearer for alloy steels. The results signified that the combined processes, SN+CB, improve its properties compared to other methods especially in the surface hardness, the smoother and lower variation of section hardness.

Moreover, the other combined process, CB+SN, showed the same level of surface hardness with thinner white layer thickness. The results considered that white layer forming of on the specimen (CB+SN) surface was prevented by effect of alloy composition.

ACKNOWLEDGEMENTS

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

REFERENCES

- ASM Handbook., Heat Treating., Material Park Ohio. ASM International., Vol. 4, (1987)
- Siwadamrongpong, S., Khaengkam, S., Tachee, K., Corrosion resistance of low carbon steel treated by gas surface hardening method. *SEATUC2012*, KMUTT, 2012
- ASM Handbook., Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys., Material Park Ohio. ASM International, Vol. 1, (2005)
- ASM Handbook., Surface engineering., Material Park Ohio. ASM International, Vol. 5, (1987)
- Asi, O., Can, A.C., Pineault, J., Belassel, M., The effect of high temperature gas carburizing on bending fatigue strength of SAE 8620 steel, *Materials and Design*, 30 (5), pp. 1792-1797, 2009.
- Nolan, D., Leskovsek, V., Jenko, M., Estimation of fracture toughness of nitride compound layers on tool steel by application of the Vickers indentation method, *Surface & Coatings Technology*, 201, pp. 182-188, 2006.



Somsak Siwadamrongpong

received the B.E. (1995) degrees in mechanical engineering from Chulalongkorn University., M.E. (2001) degrees in environmental system engineering and D.E. (2004) degrees in energy and environment science from Nagaoka University of Technology.

He is a Professor, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.



Natthakrit Suwanta received the B.E. (2008) degrees in environmental engineering and the B.E. (2011) degrees in mechanical engineering from Suranaree University of Technology.

He is a Graduate student, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology.

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐกฤต สุวรรณทา เกิดเมื่อวันที่ 17 กันยายน พ.ศ. 2528 ที่อำเภอเมืองยาง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาในระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนพุทไธสง จังหวัดบุรีรัมย์ และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการสิ่งแวดล้อม) เมื่อ พ.ศ. 2551 และวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) เมื่อ พ.ศ. 2554 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ประสบการณ์การทำงาน

- สหกิจศึกษาในตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกรที่บริษัท เคลียร์ เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนซัลแตนท์ จำกัด จังหวัดนนทบุรี (มกราคม-เมษายน พ.ศ. 2551)
- สหกิจศึกษาในตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกรที่บริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดนครราชสีมา (มกราคม-เมษายน พ.ศ. 2554)
- ฝึกงานในตำแหน่งนักศึกษาฝึกงานและทำงานวิจัยที่บริษัทไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด จังหวัดชลบุรี (มีนาคม-กรกฎาคม พ.ศ. 2555)
- เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมการผลิต ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต และ วิชาเขียนแบบวิศวกรรม (พ.ศ. 2554-2557)

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำความรู้ความเข้าใจในด้านการศึกษาคูสมบัติของวัสดุเหล็กกล้า นำเสนอผลงานทางวิชาการในหัวข้อ The effect of combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing on the hardness of alloy steels ใน การ สัม ม น า วิ ช า ก า ร South East Asian Technical University Consortium หรือ SEATUC ครั้งที่ 7 เมื่อ 4-6 มีนาคม 2556 ณ เมืองบันดุง ประเทศอินโดนีเซีย รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก.