

การออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่โดยใช้เหล็กกล้า
คาร์บอนต่ำและการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส



นางสาวพรไพลิน ดำรงดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**DESIGN OF SEAT BELT ANCHORAGE FOR LARGE
VEHICLE USING LOW CARBON STEEL
AND GAS SURFACE HARDENING**



Pornpailin Damrongdee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Manufacturing Engineering**

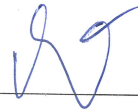
Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอน
ต่ำและการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

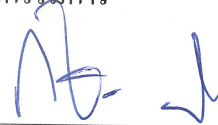
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



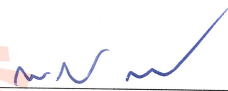
(อ. ดร.ปิยมณ พัวพงศกร)

ประธานกรรมการ



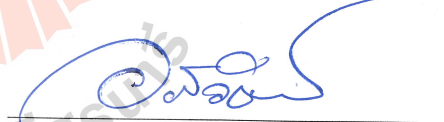
(ผศ. ดร.กัญชลา สุดตาชาติ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.สมศักดิ์ สีวดำรงพงศ์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พรไพลิน คำรงค์ดี : การออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส (DESIGN OF SEAT BELT ANCHORAGE FOR LARGE VEHICLE USING LOW CARBON STEEL AND GAS SURFACE HARDENING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุดตาชาติ, 114 หน้า

กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สเป็นที่นิยมในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้เวลาก่อนข้างน้อยและสามารถควบคุมบรรยากาศภายในเตาได้เป็นอย่างดี ใช้ในการเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับวัสดุ เหมาะสำหรับการปรับปรุงเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมต่ำ การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคือการเพิ่มความแข็งที่บริเวณผิวและคงความเหนียวเดิมที่บริเวณใจกลาง วัสดุ จึงทำให้วัสดุเกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จากข้อมูลดังกล่าวจึงสนใจการปรับปรุงสมบัติวัสดุ โดยการนำเหล็กกล้าคาร์บอนแบบแผ่นผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส เนื่องจากเหล็กแผ่นรูปพรรณเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถจัดซื้อได้ง่ายและมีราคาประหยัด โดยศึกษา 2 กระบวนการ คือ 1) การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) 2) การชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) ซึ่งในกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงนั้นเป็นการเติมธาตุคาร์บอนให้กับผิววัสดุ โดยอาศัยหลักการแพร่ที่อุณหภูมิออสเทนไนท์ และกระบวนการแก๊สซอพท์ไนไตรดิงเป็นการเติมธาตุไนโตรเจนและคาร์บอนที่เป็นการสร้างโครงสร้างสารประกอบที่มีความแข็งแรงสูงเคลือบผิววัสดุไว้ ซึ่งจะได้วัสดุที่มีสมบัติทั้งแข็งแรงและเหนียว งานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลจากกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1010 ที่ผ่านการขึ้นรูปปรับปรุงโครงสร้างด้วยการอบปกติและทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ จากนั้นนำไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 550°C โดยนำวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยนำไปออกแบบชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ เนื่องจากชิ้นส่วนนี้เป็นจุดที่น่าสนใจและเป็นจุดสำคัญในการปกป้องผู้โดยสารจากการเกิดอุบัติเหตุ โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ผล เคมท์ในการทดสอบอ้างอิงตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัยจากคณะกรรมการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ (United Nations Economic Commission for Europe UN/ECE R-14) เป็นมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยและที่นั่งรถโดยสาร ผลการดำเนินงานวิจัยพบว่า หลังจากนำวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบแผ่นผ่านการปรับปรุงสมบัติวัสดุ โดยกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สทั้ง 2 กระบวนการ ส่งผลให้สมบัติทั้งด้านความแข็งแรงและการรับแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้น และพบว่ากระบวนการร่วมเกิดแนวโน้มที่สูงกว่ากระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียวเล็กน้อย นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยได้จริง จากการวิเคราะห์จุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยใช้เหล็กแผ่นความหนา 3 mm จะสามารถลดขนาดของ

ชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยลงได้ 19% โดยที่ชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยไม่เกิดความเสียหายและผ่านตามมาตรฐานความปลอดภัย UN/ECE R-14



สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา 2560

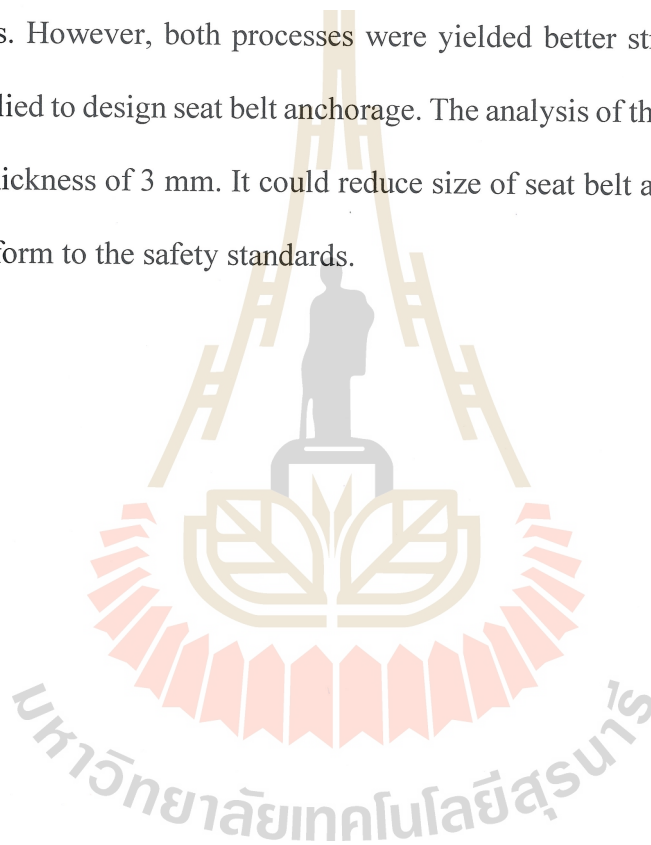
ลายมือชื่อนักศึกษา พ/พวัน ดำรงค์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Ab-1

PORNPAILIN DAMRONGDEE : DESIGN OF SEAT BELT
ANCHORAGE FOR LARGE VEHICLE USING LOW CARBON STEEL
AND GAS SURFACE HARDENING. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. KANCHALA SUDTACHAT,. Ph.D., 114 PP.

AISI 1010 / MECHANICAL PROPERTIES / GAS SURFACE HARDENING

Gas surface hardening methods is widely used in general industries, because of their processes take a short time, ease control of atmosphere in furnace, and suitable for improving low alloy steels. Gas surface hardening will increase hardness at the surface and retaining the toughness at the core of the material, leading to improve strength with acceptable ductility. There are interested to improve the material properties by gas surface hardening processes. Thin low carbon steel is one of the most widely used material in various industries due to its low cost. In this study, 2 processes were investigated 1) Gas carburizing (CB) and 2) Combined processes between Gas soft-nitriding and Gas carburizing (SN+CB). Gas carburizing methods are technique that employed carbon diffusion to increase surface hardness, while the steel structure changing to austenite phase. Gas soft-nitriding method, both carbon and nitrogen were diffused and formed the hard layer, so call white layer. This study was aimed to investigate the effect of gas surface hardening processes on mechanical properties of AISI 1010 thin steel. The specimens were normalized by normalizing and shot blasting. Then, the specimens were brought through the gas surface hardening, Gas carburizing (CB) and combined processes between Gas soft-nitriding and Gas carburizing (SN+CB). After treatment processes, the specimens were tempered at 400 °C, 500°C and 550 °C. The improved material properties will be applied to design of seat belt

anchorage for large vehicle. Because this part is one of a point of interest and a key point in protecting passengers during accidents. In the design and analysis processed, Finite Element Method was employed. Test criteria based on safety requirements of the United Nations Economic Commission for Europe UN/ECE R-14, Testing standard for the strength of seat belt anchorage and passenger seat. It was found that, the improved properties by combined processes were slightly higher than that by gas carburizing (CB) process. However, both processes were yielded better strength than original. It could be applied to design seat belt anchorage. The analysis of the anchorage with using steel sheet thickness of 3 mm. It could reduce size of seat belt anchorage by 19% with and still conform to the safety standards.



School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature พชรพล อิ่มทอง

Advisor's Signature AB- J

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจนำมากล่าวได้หมด ทั้งทางด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงให้คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่าน ผู้ซึ่งให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแนะแนวทางแก้ปัญหา ในการทำงานวิจัยมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย รวมถึงพนักงานบริษัทไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด, บุคลากร ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเพื่อนบัณฑิตทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ตลอดการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริม การศึกษา ให้กำลังใจเป็นอย่างดี ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

พรไพลิน ดำรงดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ต
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 เหล็กกล้า (Steel).....	5
2.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)	5
2.2.2 โครงสร้างระบบผลึกของโลหะ (Metallic crystal).....	8
2.2.3 การอบชุบความร้อนเหล็กกล้า	9
2.2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในขณะที่ได้รับความร้อน	9
2.3 การอบปกติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ (Normalizing)	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	38
3.1	กล่าวนำ	38
3.2	การเตรียมชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	38
3.3	การอบปกติชิ้นทดสอบ (Normalizing).....	39
3.4	การพ่นทำความสะอาดผิวด้วยเม็ดโลหะ	40
3.5	กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส.....	41
3.6	การอบคืนตัว (Tempering)	43
3.7	การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติวัสดุ	43
3.7.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	43
3.7.2	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	44
3.7.3	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	45
3.7.4	การวิเคราะห์ตรวจสอบธาตุและสารประกอบ.....	46
3.7.5	การทดสอบค่าความแข็งและการซึมลึก	47
3.7.6	การทดสอบแรงดึง	50
3.8	การวิเคราะห์และออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย.....	52
3.8.1	การวิเคราะห์และออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยด้วย วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์	54
3.8.2	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ ทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	60
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	63
4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	64
4.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	65
4.3	การตรวจสอบโครงสร้าง.....	66
4.3.1	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope).....	60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2	การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS.....	70
4.4	ผลการทดสอบค่าความแข็งและการซึมลึก.....	76
4.4.1	ผลการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง.....	76
4.4.2	ผลการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง.....	77
4.5	การทดสอบแรงดึง.....	80
4.5.1	การตรวจสอบการรับแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ.....	80
4.5.2	การตรวจสอบการรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส.....	80
4.5.3	การตรวจสอบการรับแรงดึงจุดครากของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส.....	81
4.5.4	การตรวจสอบอัตราการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส.....	82
4.6	ผลการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	85
4.6.1	ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย.....	85
4.6.2	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	87
4.6.3	การออกแบบชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย.....	90
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	95
5.1.1	อิทธิพลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส.....	95
5.1.2	การวิเคราะห์และออกแบบด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	96
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	96
	รายการอ้างอิง.....	97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	100
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	105
ประวัติผู้เขียน	114



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนด Effective case depth อ้างอิงตาม SAE J423	24
3.1	แสดงขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง	39
3.2	แสดงการอบคืนตัวภายหลังกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส	43
3.3	แสดงสมบัติของวัสดุที่ได้จากการคำนวณความเค้น-ความเครียดจริง	55
3.4	แสดงการกระทำที่กำหนดในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	58
4.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010	64
4.2	แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส	64
4.3	แสดงผลค่าความแข็งภายใต้ผิวที่ตำแหน่ง 0.1 มิลลิเมตรและค่าระยะการซึมลึก	79
4.4	แสดงสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	83
4.5	แสดงการออกแบบการทดสอบ	91
4.6	แสดงผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยตามเงื่อนไข ECE R-14.....	92
4.7	แสดงผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย.....	93

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดง Equilibrium Diagram ของเหล็ก	6
2.2	แสดงลักษณะโครงสร้างระบบผลึก	8
2.3	แสดงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบปกติ	11
2.4	แสดงแผนผังการทำงานของ Spectrometer	18
2.5	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบระนาบผลึก	19
2.6	แสดงลักษณะการตกกระทบและแสงสะท้อนของแสงบนผิวชิ้นงาน	21
2.7	แสดงแผนภาพการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscope	22
2.8	แสดง Engineering stress-strain diagram	26
2.9	แสดงลักษณะของการทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย ของโครงสร้างที่นึ่งผู้โดยสารแบบที่นั่งคู่	29
2.10	แสดงการแบ่งรูปร่างของปัญหาทางด้านของแข็งออกเป็นเอลิเมนต์ต่าง ๆ กัน	29
2.11	แสดงลักษณะของเอลิเมนต์	31
2.12	แสดงโลคัสการแตกหักในสถานะความเค้นหลักสองมิติต่าง ๆ	34
2.13	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด ทฤษฎีความเค้น เฉือนสูงสุด และทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทฤษฎีรัลหรือพลังงานแปรรูป	34
3.1	แสดงลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึง	39
3.2	แสดงลักษณะการเรียงชิ้นงานเข้าเตาอบปกติ	40
3.3	แสดงลักษณะการเรียงชิ้นทดสอบภายในเครื่องยิงเม็ดโลหะ	41
3.4	แสดงลักษณะเม็ดโลหะกลม 3 mm	41
3.5	แสดงรูปแบบการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส	42
3.6	แสดงการ Spark emission spectrometer	44
3.7	แสดงการติดตั้งชิ้นทดสอบบนเครื่อง XRD	45
3.8	แสดงลักษณะชิ้นทดสอบและเครื่อง Optical microscopes, OM	46
3.9	แสดงลักษณะชิ้นทดสอบและเครื่อง SEM และ EDS	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10	แสดงลักษณะการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส 48
3.11	แสดงรอยกดที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส 49
3.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะการซึมลึก..... 49
3.13	แสดงเครื่อง Micro Vickers Hardness Testing ของ Future-Tech 50
3.14	แสดงขั้นตอนทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ Extensometer กับขั้นตอนทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง 51
3.15	แสดงขั้นตอนทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ Strain gauge กับขั้นตอนทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง 51
3.16	แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย..... 52
3.17	แสดงขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์..... 54
3.18	แสดงลักษณะรูปทรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย 54
3.19	แสดงลักษณะการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย 56
3.20	แสดงภาระกระทำ (Load) โดยข้อกำหนดการทดสอบตามเงื่อนไข ECE R-14..... 57
3.21	แสดงตำแหน่งจุดยึดเข็มขัดนิรภัยที่ให้ภาระแรง F_{belt} และ F_{CG} 57
3.22	แสดงเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ 58
3.23	แสดงผลการลู่เข้าของค่าการเสียรูปสูงสุดที่ได้ทำการทดสอบ 59
3.24	แสดงผลการลู่เข้าของค่าความเค้นพอนมิสเซลสูงสุดที่ได้ทำการทดสอบ 60
3.25	แสดงการติดเกจวัดความเครียด (Stain gauge) บริเวณขั้นตอนทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย 61
3.26	แสดงการติดตั้งชุดทดสอบอย่างง่ายเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง 61
4.1	แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของชิ้นทดสอบ 66
4.2	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิว..... 67
4.3	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการ แก๊สคาร์บูไรซิง (CB) ที่อุณหภูมิการอบคืบตัวต่าง ๆ 68
4.4	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอพต์ไนตรายคิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) ที่อุณหภูมิการอบคืบตัวต่าง ๆ..... 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	แสดงการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส..... 71
4.6	แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ในชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ ชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่ง (SN) 73
4.7	แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ในชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการ ชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) 74
4.8	แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ในชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการร่วม ระหว่างการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB)..... 75
4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งภายใต้ผิวที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย กระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) 77
4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งภายใต้ผิวที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วย กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) 78
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ultimate tensile strength กับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส 81
4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Yield strength กับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส 81
4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส 82
4.14	ลักษณะจุดยึดเข็มขัดนิรภัยและ โครงสร้างที่นั่ง..... 86
4.15	แสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย 87
4.16	เปรียบเทียบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยที่เกิดความเสียหาย..... 88
4.17	แสดงตำแหน่งในการวัดความเครียด 89
4.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของผลการทดสอบจริงอย่างง่ายและ ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์..... 90
4.19	แสดงขนาดรูปร่างการออกแบบชิ้นงานจุดยึดเข็มขัดนิรภัย..... 91
4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นฟอนมิสเซลกับขนาดพื้นที่จุดยึดเข็มขัดนิรภัย..... 93
4.21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของความปลอดภัยกับขนาดพื้นที่จุดยึดเข็มขัดนิรภัย..... 94

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กแผ่นเป็นเหล็กรูปพรรณชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง รวมไปถึงนำมาเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งในการผลิตรถโดยสารขนาดใหญ่เป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่นำเหล็กแผ่นมาประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนต่าง ๆ ภายในรถโดยสาร เนื่องจากการใช้งานที่หลากหลายเราจึงมีความสนใจในการนำเอาเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบแผ่นมาปรับปรุงเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อยอด ในการนำเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีสมบัติด้านความเหนียว มาเพิ่มความแข็งแรงโดยกรรมวิธีการอบชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส (ฉัฏฐกฤศ สุวรรณทา, 2556) ซึ่งเป็นการนำวัสดุหลังจากปรับปรุงมาประยุกต์ให้สามารถใช้งานได้งานจริงในอุตสาหกรรม ซึ่งเริ่มจากการศึกษาชิ้นส่วนภายในรถโดยสารขนาดใหญ่

เนื่องจากในปัจจุบันการคมนาคมภายในประเทศพยายามยกระดับปลอดภัยของรถโดยสารประจำทาง เพื่อลดความสูญเสียจากการเกิดอุบัติเหตุ โดยกำหนดให้มีการออกแบบรถโดยสารขนาดใหญ่ให้ผ่านมาตรฐานการทดสอบสากล ซึ่งนำข้อเสนอด้านความปลอดภัยจากคณะกรรมการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ (United Nations Economic Commission for Europe UN/ECE) มาเป็นข้อกำหนดให้กับผู้ประกอบการ เพื่อสร้างมาตรฐานให้มีความเป็นสากลมากยิ่งขึ้น จากข้อมูลพบว่าโดยส่วนใหญ่ เมื่อเกิดอุบัติเหตุกับรถโดยสาร มีผู้ได้รับบาดเจ็บเนื่องจากเบาะหรือที่นั่งหลุดออกจากตัวรถ และบริเวณจุดยึดเข็มขัดนิรภัยเกิดความเสียหายส่งผลทำให้ผู้โดยสารเกิดการบาดเจ็บหรือเสียชีวิต จึงมีการคำนึงถึงระบบความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น ทำให้กรมการขนส่งทางบกได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยและที่นั่งรถโดยสาร โดยอ้างอิงมาตรฐาน ECE R-14

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแบบแผ่นที่ผ่านการปรับปรุงวัสดุโดยการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส นำมาประยุกต์ใช้ในส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่ทำจากวัสดุเหล็กแบบแผ่น โดยทำการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ (Computer Aided Engineering) ซึ่งวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงประโยชน์จากการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงต่อสมบัติวัสดุของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการชุบแข็งผิวต่าง ๆ มุ่งเน้นการออกแบบวิเคราะห์จุดยึดเชื่อมชนิดนิริภัย โดยคาดว่าจะสามารถนำวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงไปประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภัยให้มีคุณภาพและประสิทธิภาพที่เพียงพอ สามารถใช้ในรถโดยสารขนาดใหญ่ได้อย่างปลอดภัย ลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น รวมถึงเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตแก่ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010
- 1.2.2 เพื่อออกแบบจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภัยโดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส
- 1.2.3 สามารถออกแบบจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภัยที่แข็งแรงผ่านมาตรฐานความปลอดภัยตามเงื่อนไขข้อกำหนด UN ECE R-14

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาถึงอิทธิพลของการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สต่อความแข็งแรงของจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภัยที่ขึ้นรูปด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 โดยศึกษาการชุบแข็งที่ผิวด้วยแก๊ส 2 กระบวนการ คือ
 - 1.3.1.1 กระบวนการ Gas Carburizing
 - 1.3.1.2 กระบวนการร่วมระหว่าง Gas Soft-Nitriding และ Gas Carburizing
- 1.3.2 ศึกษาอิทธิพลหลังกระบวนการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 400°C, 500°C และ 550°C ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 หลังการชุบแข็งที่ผิวด้วยแก๊สของทั้ง 2 กระบวนการ
- 1.3.3 ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภัยประเภทกรรมคาแบบ 2 จุดยึด โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.3.4 วิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภัยโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.3.5 ออกแบบจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภัยที่มีความแข็งแรงตามมาตรฐานความปลอดภัยเงื่อนไขข้อกำหนด UN ECE R-14 โดยใช้วิธีการทดสอบอย่างง่าย

1.4 วิธีดำเนินการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบชิ้นทดสอบและกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส โดยเลือกจากกระบวนการชุบแข็งผิวของบริษัทไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด
- 1.4.3 เตรียมชิ้นทดสอบจากวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
- 1.4.4 ทำการทดลองและทดสอบสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้องหลังผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส
- 1.4.5 ออกแบบแบบจำลองโครงสร้างจุดยึดเข็มขัดนิรภัยและกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ
- 1.4.6 วิเคราะห์สมบัติวัสดุและวิเคราะห์แบบจำลอง โครงสร้างจุดยึดเข็มขัดนิรภัยทางไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.4.7 ออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่
- 1.4.8 สรุปผลการทดลอง
- 1.4.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

- 1.5.1 อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 4, 6 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 1.5.2 อาคารเครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา
- 1.5.3 บริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด นิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร จังหวัดชลบุรี

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.6.1 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire Cutting Machine) สำหรับตัดชิ้นงานทดสอบ
- 1.6.2 เตาชุบแข็งผิวของบริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด สำหรับการอบชุบกระบวนการอบปกติ, การอบชุบกระบวนการชุบแข็งผิวแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง
- 1.6.3 เครื่องพ่นทำความสะอาดผิว Shot blast ยี่ห้อ Growell รุ่น GW-10 สำหรับทำความสะอาดผิวชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการอบปกติ
- 1.6.4 กล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อน (Optical microscopes) ยี่ห้อ Nikon measuring microscope รุ่น MM-400 สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ
- 1.6.5 เครื่อง Micro Vickers hardness testing ยี่ห้อ Future-Tech รุ่น FM-700 สำหรับการวัดค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ

1.6.6 เครื่อง Optical emission spectrometer ยี่ห้อ ARL 3460 METALS ANALYZER สำหรับการตรวจวิเคราะห์ธาตุประกอบในชิ้นงานทดสอบ

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

1.6.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6010LV สำหรับวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบ

1.6.9 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy: EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-act

1.6.10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine: UTM) ยี่ห้อ Instron กำลังการทดสอบสูงสุด 100 kN สำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวแกนของชิ้นงานทดสอบ

1.6.11 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine: UTM) ยี่ห้อ Lloyd 100LS Plus กำลังการทดสอบสูงสุด 100 kN สำหรับการทดสอบแรงดึงในแนวแกนของชิ้นงานทดสอบ

1.6.12 เครื่องอ่านค่าเกจวัดความเครียด (Bridge Box) ยี่ห้อ KYOWA รุ่น EDX-10A/B

1.6.13 คอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ ANSYS Workbench

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจถึงการออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยโดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 และกระบวนการชุบแข็งผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ต่อยอดไปสู่งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หรือนำไปสู่การผลิตเพื่อใช้งานได้ในอนาคต

1.7.2 เข้าใจถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในกรรมวิธีการปรับปรุงผิววัสดุเพื่อเพิ่มคุณภาพและประสิทธิภาพการปรับปรุงผิววัสดุในอุตสาหกรรมยานยนต์ หรืออุตสาหกรรมอื่นที่ใช้วัสดุเหล็กกล้าเป็นวัตถุดิบ

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีบท องค์ความรู้ และปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา งานวิจัย ซึ่งเป็นการออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่โดยใช้เหล็กกล้า คาร์บอนต่ำและการหุบแข็งผิวด้วยแก๊ส โดยนำแนวทางด้านวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์เพื่อช่วยในการอธิบายพฤติกรรมของปัญหาในลักษณะต่าง ๆ งานวิจัยนี้นำกรรมวิธีการด้านการหุบแข็งผิว วัสดุ และคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อแสดงพฤติกรรมของปัญหา ซึ่งนำระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหา เนื้อหาที่จะกล่าวถึงต่อไปได้คัดเลือกข้อมูลในหัวข้อสำคัญจากแหล่งอ้างอิงที่น่าเชื่อถือเพื่อให้เกิดความเข้าใจแก่งานวิจัยมากยิ่งขึ้นและเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านต่อไป

2.2 เหล็กกล้า

2.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel)

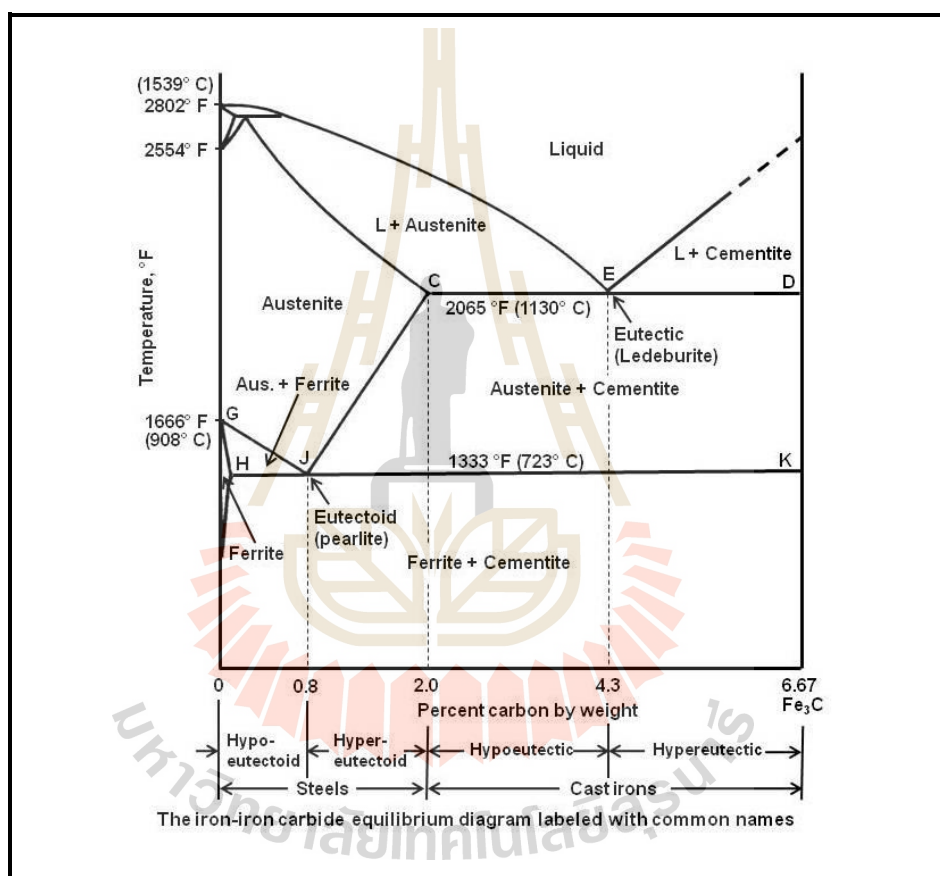
เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมเป็นหลัก และมีธาตุอื่น ๆ ในปริมาณน้อย เช่น แมงกานีส, ซิลิกอน, กำมะถัน, ฟอสฟอรัส, ออกซิเจนและไฮโดรเจน และบางครั้งอาจจะมีโครเมียม นิกเกิล, ทองแดง ปะปนเข้ามากับโลหะ ธาตุต่าง ๆ ที่ผสมในเนื้อเหล็กโดยไม่ตั้งใจนี้เรียกว่าธาตุมลทิน คาร์บอนมีอิทธิพลต่อสมบัติของเหล็กและเป็นธาตุสำคัญที่จะควบคุมพฤติกรรมของเหล็ก เหล็กที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 2%wt เรียกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน นอกจากนี้ยังแยกตามปริมาณคาร์บอนได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) มีคาร์บอนไม่เกิน 0.2% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงต่ำ สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย ทำเป็นเหล็กเส้นใช้ในงานก่อสร้าง หรือรีดเป็นแผ่นใช้ในงานวิศวกรรมทั่ว ๆ ไป บางทีเรียกเหล็กชนิดนี้ว่าเหล็กละมุน (Mild steel)

2. เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) มีคาร์บอนตั้งแต่ 0.2-0.5% เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกว่าประเภทแรก ใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไป สามารถทำการหุบได้

3. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) มีคาร์บอนตั้งแต่ 0.5% ขึ้นไป จัดเป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงและมีความแข็งสูง สามารถทำการชุบแข็งให้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้ ใช้ทำเครื่องมือ เครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอได้เป็นอย่างดี

การศึกษาถึงสมบัติและการควบคุมสมบัติของเหล็กคาร์บอน จำเป็นอย่างยิ่งต้องอาศัยการอธิบายร่วมกับ Equilibrium diagram ของเหล็กคาร์บอน ซึ่งเราทราบว่าปริมาณคาร์บอนในเหล็กมีความสำคัญมากต่อความแข็งแรง (Strength) และความอ่อนตัว (Ductility)



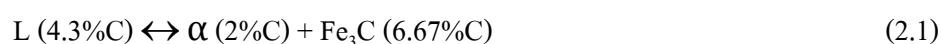
รูปที่ 2.1 Equilibrium Diagram ของเหล็ก

ออสเทนไนท์ (เหล็ก γ) คือ Solid solution ของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุดถึง 2% (ใช้ 1.7% ในบางกรณี) ที่อุณหภูมิ 1130°C มีระบบผลึกเป็น Face centered cubic

เฟอร์ไรท์ (เหล็ก α) คือ Solid solution ของเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุด 0.025% ที่อุณหภูมิ 723°C มีระบบผลึกเป็น Body centered cubic

ซีเมนต์ไคต์ หรือเหล็กคาร์ไบด์ เป็น Intermetallic compound ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนมีสูตรคือ Fe_3C มีความแข็งแรงสูง แต่เปราะไม่สามารถรับแรงกระแทกได้

ยูเต็คติค ที่เกี่ยวกับ Equilibrium diagram ของเหล็กคาร์บอนนี้ คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ $1130^{\circ}C$ โดยเหล็กหลอมเหลวที่มีคาร์บอน 4.3% แยกตัวออกเป็น phase γ มีคาร์บอน 2% กับซีเมนต์ไคต์ 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



เฟอไรต์ คือ ผลการรวมระหว่างเฟอร์ไรต์ (α) 0.025%C กับซีเมนต์ไคต์ 6.67%C ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยายูเต็คตอยด์ ในขณะที่ทำให้เย็นช้า ๆ การเกิดจะสลับกันเป็นแถบยาว (Lamellar structure) ของเฟอร์ไรต์กับซีเมนต์ไคต์ ดังนั้นเฟอไรต์จึงไม่ใช่ phase เดียว แต่เป็นสอง phase ประกอบกัน

A_{cm} คือ เส้นแสดงอุณหภูมิการเปลี่ยน phase จากออสเตนไนท์มาเป็นซีเมนต์ไคต์ในขณะที่เหล็กเย็นตัวลงมา ถ้าทำให้เหล็กร้อนขึ้นก็จะเป็นเส้นแสดงการเปลี่ยนซีเมนต์ไคต์เป็นออสเตนไนท์

A_3 คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของออสเตนไนท์มาเป็นเฟอร์ไรต์ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็น และเป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟอร์ไรต์เป็นออสเตนไนท์ในขณะที่ทำให้เหล็กร้อน

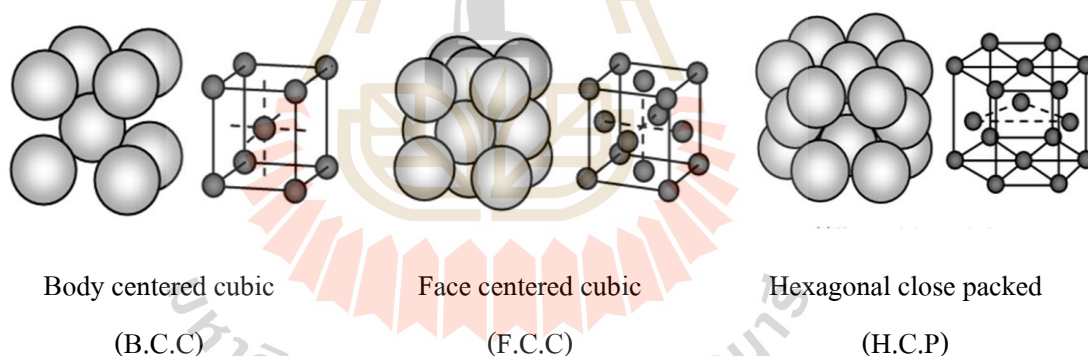
A_2 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะแม่เหล็กของเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะมีอุณหภูมิประมาณ $768^{\circ}C$ เส้น A_2 ไม่มีการเปลี่ยน phase ดังนั้นจึงไม่ปรากฏใน Equilibrium diagram

A_1 คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยายูเต็คตอยด์ คืออุณหภูมิ $723^{\circ}C$ ทั่ว ๆ ไป มักจะเขียน r กับ c ต่อท้าย A_3 และ A_1 เช่น Ar_3 , Ar_1 , Ac_3 และ Ac_1 เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย ว่าอุณหภูมินั้น ๆ เป็นอุณหภูมิของการทำให้ร้อน หรือทำให้เย็น โดย r หมายถึง ทำให้เย็น (Refroidissement) และ c หมายถึง ทำให้ร้อน (Chauffage)

2.2.2 โครงสร้างระบบผลึกของโลหะ (Metallic crystal)

โลหะทุกชนิดจะประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กที่สุดคืออะตอมซึ่งจะมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบภายในเกรน ถ้านำกลุ่มอะตอมหน่วยเล็ก ๆ หน่วยหนึ่งมาขยายเพื่อศึกษาดำเนินการวางตัวของกลุ่มอะตอมในหน่วยเล็กนี้ (Unit Cell) จะพบว่าการวางตัวของกลุ่มอะตอมจะมีระบบที่แน่นอน และมีอยู่หลายระบบเรียกว่า ระบบผลึก (Crystallographic System) ในโลหะส่วนใหญ่จะพบระบบผลึกที่สำคัญอยู่สามระบบ คือ

1. ระบบลูกบาศก์ (Cubic System) ซึ่งจะแบ่งย่อยออกไปเป็น
 - ระบบ Body centered cubic, (B.C.C) คือมีอะตอมอยู่ตรงกลางของลูกบาศก์
 - ระบบ Face centered cubic, (F.C.C) คือมีอะตอมตรงกลางทุกด้านของลูกบาศก์
2. ระบบ Hexagonal เป็นลักษณะรูปทรงหกเหลี่ยม ซึ่งจะพบระบบนี้เกี่ยวข้องกับเหล็กคือระบบ Hexagonal close packed (H.C.P)
3. ระบบ Tetragonal เป็นลักษณะคล้ายลูกบาศก์ แต่มีส่วนสูงมากกว่า พบส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับเหล็กคือ ระบบ Body centered tetragonal (B.C.T)



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างระบบผลึก

จากประเภทของระบบผลึกต่าง ๆ มีข้อที่ควรทราบ คือ โลหะที่มีระบบผลึกเป็น F.C.C จะมีคุณสมบัติอ่อนตัวสูง สามารถยืดได้มาก แต่ความแข็งแรง (Strength) จะต่ำ โลหะที่มีระบบผลึกเป็น B.C.C จะมีความแข็งแรงสูงกว่าและความอ่อนตัวจะลดลง ส่วนโครงสร้างที่เป็นระบบผลึก H.C.P หรือ B.C.T จะเป็นลักษณะของโลหะแข็ง คุณสมบัติความอ่อนตัวต่ำกว่าระบบ B.C.C และ F.C.C

2.2.3 การอบชุบความร้อนเหล็กกล้า

ในเรื่องของการอบชุบความร้อนเหล็กกล้า เหล็กเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติพิเศษคือมีระบบผลึกที่ไม่แน่นอนสามารถเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เหล็กที่อุณหภูมิปกติจะมีระบบผลึกเป็น B.C.C (Body Centered Cubic) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 910°C เหล็กจะเปลี่ยนระบบผลึกเป็น F.C.C (Face Centered Cubic) ธาตุคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กและให้สารละลายของแข็งในลักษณะแทรกที่ (Interstitial solid solution) เพราะอะตอมคาร์บอนมีขนาดเล็กกว่าของเหล็ก โดยมีจุดอิ่มตัวหรือสูงสุดที่ปริมาณและที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เช่น

อุณหภูมิ 723°C คาร์บอนจะละลายได้สูงสุด 0.025% ให้สารละลายของแข็งที่เรียกว่าเฟอร์ไรต์ (Ferrite) หรือเหล็กแอลฟา (α)

อุณหภูมิ 1147°C คาร์บอนจะละลายได้สูงสุด 1.7 หรือ 2% ให้สารละลายของแข็งที่เรียกว่าออสเตนไนต์ (Austenite) หรือเหล็กแกมมา (γ)

2.2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในขณะได้รับความร้อน

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างออสเตนไนต์ในสภาพการเย็นตัวที่ไม่สมดุล การเย็นตัวในอัตราที่ไม่สมดุลจะมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนต์ไปสู่โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟอไรต์ ทั้งนี้เพราะในขณะที่ยังมีการปรับส่วนผสมโดยเฉพาะคาร์บอน โดยลักษณะแพร่ซึมซึ่งจะต้องใช้เวลาที่ยาวนานกว่าอะตอมคาร์บอนจะเคลื่อนที่ไวกว่าทั้งออสเตนไนต์และเฟอร์ไรต์ เพื่อไปรวมตัวกันและรวมกับเหล็กให้สารประกอบซีเมนต์ไคต์จากการค้นพบความจริงประการหนึ่งคือ ยิ่งอัตราการเย็นตัวเร็วจะปรากฏออสเตนไนต์เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรต์ได้ปริมาณน้อยลงในกรณีของเหล็กส่วนผสมไฮโปยูเทคตอยด์ ปริมาณของคาร์บอนที่จุดยูเทคตอยด์จะน้อยกว่า 0.8% และอุณหภูมิที่จะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์จะลดลงต่ำกว่า 723°C ในกรณีของเหล็กผสมยูเทคตอยด์ ดังนั้นจึงพบว่ายังอัตราการเย็นตัวยิ่งสูงขึ้นเท่าไร โครงสร้างที่ได้จะปรากฏมีเฟอไรต์มากขึ้น และมีลักษณะละเอียดมากขึ้นกลายเป็นโครงสร้างที่มีชื่อต่าง ๆ กัน เช่น ซอร์ไบต์, เบนไนต์, ทรูตไซต์ และในที่สุดคือ มาร์เทนไซต์ ซึ่งเกือบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นอะไรได้เลยจากออสเตนไนต์ ก่อนจะเกิดมาร์เทนไซต์ เมื่ออัตราการเย็นตัวสูง

ซอร์ไบต์ (Sorbite) คือ โครงสร้างที่เกิดจากออสเตนไนต์แตกตัวให้เฟอร์ไรต์ และซีเมนต์ไคต์ เช่นเดียวกับเฟอไรต์ โดยการให้กำเนิดนิวเคลียสของซีเมนต์ไคต์ขึ้นมาก่อนตามบริเวณรอบ ๆ เกรน เมื่อขยายตัวก็ดึงเอาอะตอมของคาร์บอนบริเวณรอบ ๆ เข้ามารวมตัวเพื่อขยายตัวทำให้บริเวณข้างเคียงกลายเป็นบริเวณที่มีอะตอมคาร์บอนต่ำ กลายเป็นจุดที่เกิดเฟอร์ไรต์ขึ้นทั้งสองด้าน และเมื่อเกิดเฟอร์ไรต์ขึ้นแล้ว จะเกิดมีการขยายตัวทำให้มีปริมาณคาร์บอนถูกผลักออกไปทำให้เกิด

สภาพพร้อมที่จะเกิดซีเมนต์ไคต์ขึ้นได้ในบริเวณข้างเคียง จะสลับกันไปดังนี้ แต่เนื่องจากอัตราการเย็นตัวสูงการเคลื่อนไหวของอะตอมคาร์บอนเป็นไปได้ยาก แถบของเฟอร์ไรท์กับซีเมนต์ไคต์จะได้อเล็กมาก คุณสมบัติของซอไบท์จะมีความแข็งประมาณ $350 H_B$ เมื่อเทียบกับเพิร์ไลต์ที่มีความแข็งประมาณ $180 H_B$

เบนไนท์หรือทรูสไตต์ (Bainite or Trostite) คือ โครงสร้างที่ได้จากออสเทนไนท์แตกตัวภายใต้การเย็นตัวสูงกว่าซอไบท์ การเกิดยังคงมีกลไกคล้ายคลึงกัน มีการให้กำเนิดนิวเคลียสและมีการขยายตัวเบนไนท์ จะให้กำเนิดเฟอร์ไรท์ก่อน โดยมีลักษณะคล้ายเข็มยื่นเข้าสู่ใจกลางของเกรนออสเทนไนท์ เมื่อเฟอร์ไรท์ขยายตัวก็จะผลักอะตอมของคาร์บอนสูงออกไปทางด้านข้าง ทำให้บริเวณที่มีคาร์บอนหนาแน่นตามบริเวณข้างของเฟอร์ไรท์และเมื่อปริมาณคาร์บอนสูงจนถึงประมาณ 6.67% ก็จะเกิดเป็นแถบบาง ๆ ของซีเมนต์ไคต์เกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง และเมื่อเฟอร์ไรท์ขยายตัวมากขึ้นก็จะไปเกิดซีเมนต์ไคต์บริเวณที่ห่างออกไปเป็นระยะ ๆ การเกิดเช่นนี้จะเกิดได้ทั้งตามบริเวณรอบ ๆ เกรนและเกิดทั่วไปหมด เรียกว่าเบนไนท์ แต่ถ้าเกิดเป็นเป็นแห่ง ๆ และเป็นกลุ่ม ๆ แทรกอยู่กับโครงสร้างมาร์เทนไซต์ จะเรียกว่าทรูสไตต์ คุณสมบัติความแข็งของเบนไนท์และทรูสไตต์ จะมีความแข็งอยู่ระหว่าง $400-450 H_B$ ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวจะสูงมากหรือน้อย

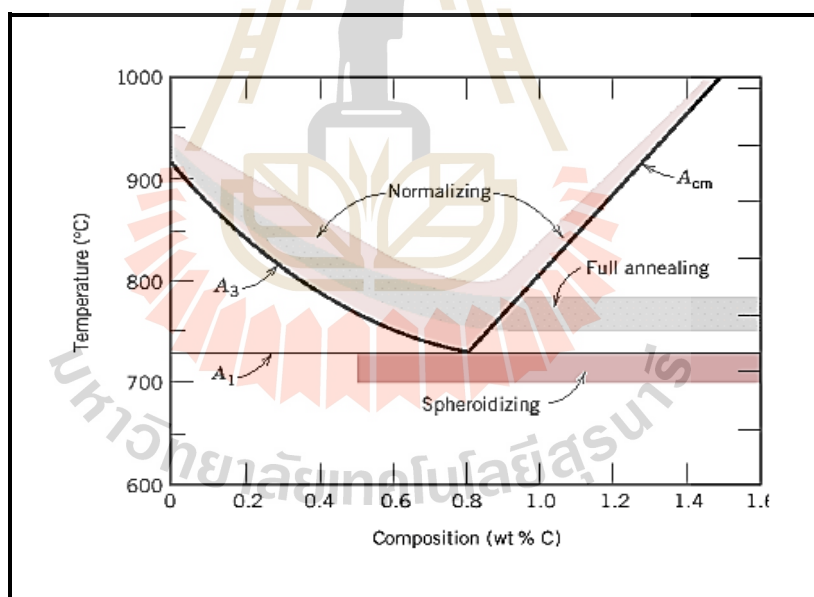
มาร์เทนไซต์ (Martensite) คือ โครงสร้างที่ได้จากการทำให้ออสเทนไนท์เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบแข็งน้ำหรือชุบน้ำเกลือ (10% NaCl) เนื่องจากทำให้ออสเทนไนท์เย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้อะตอมคาร์บอนไม่มีโอกาสเคลื่อนไหวจะอยู่กับที่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้การเรียงตัวของอะตอมของเหล็กเกิดลักษณะบิดเบี้ยว (Deformation) อันเป็นสาเหตุที่ทำให้มาร์เทนไซต์มีความแข็งสูง ปริมาณของคาร์บอนจะเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญต่อความแข็งของมาร์เทนไซต์ (เราอาจจะเรียกมาร์เทนไซต์ว่าเป็นโครงสร้างไม่สมดุล (Non-equilibrium หรือ Supersaturate ferrite เพราะมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าที่เฟอร์ไรท์จะมีได้) เพื่อความเข้าใจในเรื่องนี้ จะต้องอาศัยภาพแสดงตำแหน่งของคาร์บอนในยูนิทเซลล์ของเหล็กออสเทนไนท์และในเฟอร์ไรท์

การปล่อยให้เหล็กกล้าจากโครงสร้างออสเทนไนท์เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วทำให้ออสเทนไนท์ที่แตกตัวภายใต้การเย็นตัวสูงจะเปลี่ยนแปลงไปเริ่มตั้งแต่เพิร์ไลต์ไปสู่มาร์เทนไซต์ ซึ่งคุณสมบัติของเหล็กที่ได้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เป็นผลจากคุณสมบัติเฉพาะประการหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้ด้วยวิธีการอบชุบความร้อน คือคุณสมบัติ Allotropy (โครงสร้างของระบบผลึกเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ) และแน่นอนที่สุดคืออัตราการเย็นตัวมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติภายหลังการอบชุบความร้อน

2.3 การอบปกติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ (Normalizing)

เพื่อการปรับปรุงโครงสร้างให้สม่ำเสมอ เพื่อที่จะนำไปทำการชุบแข็งภายหลัง ทั้งนี้ก็เพื่อให้เหล็กภายหลังการชุบเหล็กมีคุณสมบัติที่ดี หลีกเลี่ยงข้อเสียที่จะเกิดขึ้น ปกติเหล็กยังมีเกรนละเอียดย่อมเป็นผลดีต่อการอบชุบแข็งมาก เพราะถ้าเหล็กมีเกรนหยาบและไม่สม่ำเสมอ ภายหลังการชุบแข็งเหล็กจะที่มีความแข็งไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน และบางครั้งอาจจะไม่ประสบผลดีตามที่ต้องการ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการคุณภาพของเหล็กจากการชุบแข็งสูง จึงสมควรที่จะทำการอบปกติเสียก่อนและจึงนำไปทำการชุบแข็ง

การทำการอบปกติใช้วิธีเผาเหล็กให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงออสเทนไนท์ จะเผาจนอุณหภูมิอยู่เหนือเส้น A_3 ประมาณ $30-50^{\circ}\text{C}$ ทั้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ $30-60$ นาทีต่อความหนาเฉลี่ย 25 mm จากนั้นนำเหล็กออกจากเตาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศนิ่งอัตราการเย็นตัวประมาณ $1-5^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ถ้าเป็นการเป่าอากาศ อัตราการเย็นตัวจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 10°C ต่อนาที



รูปที่ 2.3 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบปกติ

2.4 การทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ (Shot blasting)

การทำความสะอาดด้วยการยิงเม็ดโลหะ วัสดุที่ใช้ในการพ่นทำความสะอาดแบบแห้งที่นิยมใช้มีหลากหลายขนาดและรูปร่าง เช่น ทราซแก้ว กรวดเหล็ก เม็ดเหล็ก และสารพ่นชนิดอื่น ๆ การเลือกวัสดุพ่นต้องคำนึงให้เหมาะกับชิ้นงานและจะต้องคำนึงถึงเรื่องของเวลาในการพ่น

เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อสมบัติด้านความแข็งของชิ้นงาน รายละเอียดพื้นผิวที่ต้องการ หลังการพ่นและกระบวนการต่าง ๆ ที่จะตามมาหลังจากการพ่นทำความสะอาดเสร็จแล้ว

เม็ดโลหะเหลี่ยม มักประกอบด้วยโลหะชั้นเล็ก ๆ ที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมแหลมคม มีศักยภาพในการตัดสูง โดยทั่วไปเม็ดโลหะเหลี่ยมมักทำขึ้นจากเม็ดเหล็กหล่อที่ผ่านการบดละเอียด หรือ เหล็กหล่อที่มีส่วนประกอบของซิลิกาต่ำและผ่านการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมาแล้ว ซึ่งสามารถทำให้เป็นชั้นเล็ก ๆ ได้

เม็ดโลหะกลมมักทำมาจากวัสดุประเภทเดียวกับเม็ดโลหะเหลี่ยม หากแต่มีรูปร่างกลม เม็ดโลหะกลมมีวิธีการทำงานต่างจากเม็ดโลหะเหลี่ยม โดยการลบเหลี่ยมและสารปนเปื้อนต่าง ๆ บนพื้นผิวที่ทำการพ่นใส่ โดยแรงกระแทกล้วน ๆ เม็ดเหล็กกลมเป็นชนิดที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ซึ่งกระทบและทำลายพื้นผิวที่พ่นใสน้อยที่สุด หากพ่นเหล็กบนพื้นผิวโลหะจะได้พื้นผิวที่ไร้ความเงาวาว และสามารถควบคุมระดับความไม่เงาวาวได้โดยการเลือกขนาดของเม็ดเหล็ก

เส้นลวดโลหะ มีให้เลือกสำหรับโลหะหลัก ๆ เช่น อลูมิเนียม สแตนเลสซิงค์ และเหล็ก มีการใช้งานที่คล้ายกับเม็ดโลหะกลม

การพ่นทำความสะอาดหรือการทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ เป็นกระบวนการอัดเม็ดเหล็ก เช่น เม็ดบอล (Ball) หรือเม็ดกริด (Grid) ให้กระทบโดนที่ผิวของชิ้นงาน ด้วยขนาดของเม็ดโลหะ ความแรงและความเร็ว มีผลทำให้ชิ้นงานมีผิวที่สะอาดราบเรียบ (ASM International, 1987) ซึ่งเป็นเป้าหมายหลัก แต่ยังมีผลกระทบที่เกิดขึ้นอีกจากการยิงเม็ดโลหะคือความแข็งที่เพิ่มขึ้น ที่บริเวณผิวชิ้นงานจากแรงกระแทกของเม็ดโลหะเกิดความเค้นสะสมมีผลให้รีเทนออสเทนไนท์ (Retain austenite) ที่มีอยู่เปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite)

2.5 การควบคุมบรรยากาศภายในเตา

การอบชุบความร้อนที่ต้องการผิวที่สะอาดปราศจากออกไซด์และต้องการความแข็งผิวที่แน่นอน การอบชุบความร้อนจะต้องกระทำภายในเตาที่สามารถควบคุมบรรยากาศ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียคาร์บอน (Decarburizing) หรือธาตุตัวตามในขณะเผาในเตา หรือเพื่อไม่ให้เกิดการออกไซด์ตามผิว การอบชุบความร้อนภายในเตาที่ควบคุมบรรยากาศ จะทำให้ผิวเหล็กภายหลังการอบชุบสะอาด

ความมุ่งหมายที่สำคัญของการควบคุมบรรยากาศภายในเตา มี 3 ประการ ดังนี้

1. ป้องกันการสูญเสียคาร์บอนและธาตุอื่น ๆ ที่สำคัญขณะทำการเผาในระยะเวลาานาน
2. ป้องกันการเกิดออกไซด์ตามผิวทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดภายหลัง

3. ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงความแข็งแรงบริเวณผิวแท่งเหล็กให้สูงขึ้นสามารถกระทำได้ด้วยวิธีการควบคุมบรรยากาศภายในเตา

ในการอบชุบความร้อนเหล็กกล้าภายในเตาที่มีแก๊สอย่างเดี่ยวหรือแก๊สผสมหลายชนิดจะต้องเข้าใจหลักการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สต่าง ๆ แก๊สที่มีบทบาทต่อการทำปฏิกิริยาภายในเตามีหลายชนิด เช่น แก๊สออกซิเจน, แก๊สไนโตรเจน, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, ไฮโดรเจน, ไออน้ำ และแก๊สเฉื่อยอื่น ๆ (อาร์กอน และฮีเลียม)

2.5.1 บรรยากาศไนโตรเจน-ไฮโดรเจน

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

บรรยากาศไนโตรเจน-ไฮโดรเจนใช้โดยทั่วไปกับเหล็กกล้า, เหล็กเครื่องมือโดยเฉพาะเหล็กกล้าความเร็วสูง สำหรับการอบอ่อน และการอบเพื่อลดความเครียด

สิ่งที่ต้องระมัดระวังคือแก๊สแอมโมเนียและแอมโมเนียที่แตกตัวแล้วสามารถลุกไหม้ได้เมื่อผสมกับอากาศที่มีสัดส่วนพอเหมาะก่อนเข้าเตาอบชุบ ควรเป่าแก๊สไนโตรเจนไล่อากาศภายในเตา ก่อน ถึงเก็บแก๊สแอมโมเนียควรเก็บในที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 50°C เพราะแอมโมเนียมีอัตราการขยายตัวสูงมาก

2.5.2 บรรยากาศแก๊สเอนโดเทอร์มิก (Endothermic gas)

แก๊สเอนโดเทอร์มิกเป็นแก๊สที่ได้จากการทำให้แตกตัว (Cracking) ของแก๊สเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) เช่น แก๊สธรรมชาติ แก๊สโพรเพนหรือบิวเทนกับอากาศจำนวนที่แน่นอน ที่อุณหภูมิประมาณ 1000°C ภายในเตาที่ปิดมิดชิดและมีโลหะแคทาไลซิส เช่น นิเกิล (Nickel-bearing catalyst) จะช่วยทำให้เกิดการแตกตัวของคาร์บอน และไฮโดรเจนได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไออน้ำน้อยที่สุด คำว่าเอนโดเทอร์มิกนั้นหมายถึงปฏิกิริยาที่เกิดจะรับ

ความร้อนจากภายนอก ไม่มีการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศ เตาที่ใช้เป็นตัวให้กำเนิดแก๊ส เอนโดเทอร์มิก (Heating retort) จะถูกเผาด้วยแก๊สเชื้อเพลิงภายนอกแก๊สเอนโดเทอร์มิกที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาจะถูกทำให้เย็นตัวด้วยระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (โดยไม่สัมผัสน้ำ) บริเวณทางออกจากเตาแยก อุณหภูมิลดลงมาอยู่ในช่วงประมาณ 300°C เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาแยกตัวของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นคาร์บอนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดเขม่า (Soot) และเขม่าจะถูกพาไปกับแก๊สทำให้เกิดปัญหากับผิวของเหล็กที่ทำการอบชุบมีเขม่าจับ หลังแก๊สเอนโดเทอร์มิกถูกทำให้เย็นในครั้งแรกจะผ่านไปยังเครื่องทำความสะอาดยังอีกครั้งหนึ่ง เพื่อกำจัดไอให้เหลือน้อยที่สุด โดยมีจุดน้ำค้างอยู่ในช่วง 16°C ถึง -12°C ก่อนที่จะผ่านแก๊สเข้าเตาอบชุบ ขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะทำการอบชุบ

ลักษณะในการใช้งานเนื่องจากแก๊สเอนโดเทอร์มิกเป็นแก๊สที่จัดอยู่ในประเภทรีดิวซิง เพราะมีไฮโดรเจนจึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากต่อการควบคุมบรรยากาศของการอบชุบเหล็กกล้าทุกประเภท

ข้อควรระวัง เนื่องจากแก๊สเอนโดเทอร์มิกเป็นแก๊สที่เป็นพิษ (Toxic) เพราะมี CO สูง และเป็นแก๊สติดไฟอย่างรวดเร็ว (Highly flammable) จึงต้องมีระบบป้องกันภัยอย่างดี สิ่งที่จะต้องระมัดระวังอีกประการหนึ่ง คือ จะต้องปล่อยแก๊สเอนโดเทอร์มิกเข้าเตาอบชุบ โดยภายในเตาต้องร้อนเกินกว่า 760°C เพราะถ้าอุณหภูมิเตาต่ำจะเกิดการระเบิดเมื่อแก๊สเอนโดเทอร์มิกทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทั้งนี้เพราะจุดลุกไหม้ (Ignition point) ของแก๊สที่จัดเป็นแก๊สติดไฟ (Flammable gas) จะอยู่ที่ 760°C ในการปฏิบัติงานถ้ากระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 760°C ก่อนปล่อยแก๊สเข้าไปในเตาต้องทำการไล่อากาศภายในเตาออกด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจน (Purging) เป่าไล่ เพื่อความปลอดภัยจะต้องใช้แก๊สไนโตรเจนปล่อยผ่านเตาในปริมาณ 5 เท่าของปริมาตรภายในเตา หรืออาจใช้วิธีปล่อยแก๊สเอนโดเทอร์มิกเข้าเตาที่อุณหภูมิสูงกว่า 750°C จนเต็มในบรรยากาศภายในเตา แล้วจึงลดอุณหภูมิลงมาที่ต่ำกว่า 760°C แต่จะเป็นการสิ้นเปลืองมากกว่า

2.6 การชุบแข็งผิว (Surface Hardening)

การชุบแข็งผิวเป็นการชุบแข็งเพื่อให้เกิดความแข็งแรงเฉพาะบริเวณผิวเท่านั้น ส่วนเนื้อเหล็กภายในผิวแข็งถึงใจกลางยังคงเป็นเนื้อเหล็กเดิมซึ่งมีความเหนียวสูง เพื่อต้องการให้เหล็กทนต่อการสึกหรอในขณะที่ใช้งาน ทนแรงบิดหรือแรงกระแทกอย่างรุนแรงได้ดีโดยไม่แตกหัก

2.6.1 การชุบแข็งผิวโดยวิธีแก๊สคาร์บูไรซิง (Gas Carburizing)

เป็นกรรมวิธีการชุบแข็งผิวโดยการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้แก่ผิวเหล็ก โดยหลักการทำคาร์บูไรซิงเป็นการสร้างบรรยากาศของแก๊สคาร์บอนมอนอไซด์ให้มาก เพื่อให้แก๊สคาร์บอนมอนอไซด์แตกตัวเป็นอะตอมของคาร์บอน ดังนั้นแก๊สที่ใช้เพิ่มคาร์บอนจะใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอน หลักการชุบแข็งผิวด้วยวิธีนี้จะเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับบริเวณผิวได้สูงประมาณ 0.8% ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอนความแข็งผิวและมีความเหนียวที่ใจกลางเหล็ก ส่วนอุณหภูมิในกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงอยู่ที่ประมาณ 900-950 องศาเซลเซียส และเวลาประมาณ 4-8 ชั่วโมง ขึ้นกับความหนาของชั้นผิวแข็งที่ต้องการ

การเติมคาร์บอนเข้าไปที่ชั้นผิวนั้นต้องอาศัยการแพร่ของคาร์บอนซึ่งจัดเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยความร้อนและเวลา ดังนั้นจึงต้องทำที่อุณหภูมิที่สูงเป็นเวลาที่เหมาะสม รวมทั้งต้องควบคุมสภาวะคาร์บอนที่ผิวนอกสุดของชิ้นงานเหล็กด้วย อะตอมของคาร์บอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน โดยความเข้มข้นของคาร์บอนในชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาในการทำคาร์บูไรซิงนานขึ้น

ในกระบวนการคาร์บูไรซิงด้วยแก๊สนั้นแหล่งจ่ายคาร์บอนอยู่ในสถานะแก๊ส เรียกว่า อาร์เอ็กซ์แก๊ส (RX-gas) หรือ เอ็นโดเทอร์มิกแก๊ส (Endothermic gas) หรือแคริเออร์แก๊ส (Carrier gas) โดยเป็นแก๊สผสมที่มีส่วนผสมระหว่าง CO , CO_2 , H_2 , N_2 และ CH_4 แก๊สผสมเหล่านี้ได้จากการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ของไฮโดรคาร์บอนแก๊ส เช่น โพรเพน บิวเทน เป็นต้น ในห้องเผาไหม้ที่มีแคตาลิสต์ NiAl บรรจุอยู่ภายใน การใช้สารตั้งต้นเป็นไฮโดรคาร์บอนต่างชนิดกันก็จะผลิตออกมาเป็นคาร์บูไรซิงแก๊สได้ในปริมาณที่แตกต่างออกไปเล็กน้อย

การควบคุมบรรยากาศนั้นเป็นเรื่องสำคัญมาก CO และ CH_4 เป็นแก๊สที่สามารถจ่ายคาร์บอนให้กับชิ้นงานได้ดังปฏิกิริยา



โดยปฏิกิริยาที่ 2.3 และ 2.6 เป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในการทำคาร์บูไรซิงด้วยแก๊ส ซึ่งนอกจากการจ่ายคาร์บอนให้เหล็กแล้วยังได้ CO_2 และ H_2O มาด้วย ทั้งนี้หากมี CO_2 และ H_2O มากเกินไปก็อาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้คาร์บอนที่ผิวเหล็กลดลง เรียกว่า ดีคาร์เบอร์ไรเซชัน

(Decarburization) ทั้งนี้ปริมาณ CO_2 ที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ต้องใช้ CO เป็นจำนวนมากในการสร้างสมดุลเพื่อรักษาศักยภาพคาร์บอนที่ผิวไว้ โดยสามารถคำนวณได้ตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์

เมื่อเราทราบปริมาณของคาร์บอนที่ผิวของแท่งเหล็ก ทราบอุณหภูมิของการชุบแข็งผิว เราสามารถควบคุมปริมาณของ CO และ H_2 ของแก๊สที่เป็นตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนได้โดยทางปฏิบัติ ในตอนแรกจะผสมแก๊สตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนในปริมาณที่สูงและจะค่อย ๆ ลดลง จนถึงช่วงสุดท้ายจะไม่มีแก๊สตัวเพิ่มปริมาณคาร์บอนเลย ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวสูงจนเกินไปเพราะจะทำให้เกิดซีเมนต์ไต์ต์ตามบริเวณขอบเกรน (Proeutectoid cementite) จะทำให้เหล็กแตกง่ายในขณะที่ชุบแข็ง ปกติเวลาที่ใช้ในการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สนี้จะสั้นกว่าการใช้ของแข็งเล็กน้อย ทำให้เหล็กที่ได้มีเกรนเล็ก

2.6.2 การชุบแข็งผิวโดยวิธีแก๊สซอพต์ไนไตรดิ้ง (Soft-Nitriding)

กระบวนการซอพต์ไนไตรดิ้งจะทำที่อุณหภูมิต่ำ ($520\text{-}570^\circ\text{C}$) ทำให้เกิดชั้นผิวของสารประกอบไนโตรเจน ($\text{Fe}_x\text{C}_y\text{N}_z$) ชั้นผิวของสารประกอบนี้ จะทนทานต่อการสึกกร่อน (เป็นสนิมยาก ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี) มีคุณสมบัติทนทานต่อการเสียดสี เนื่องจากชั้นผิวสารประกอบทนทานต่อการกัดกร่อน ทำให้เห็น โครงสร้างเป็นแถบสีขาวที่บริเวณผิวของชิ้นทดสอบ (Test) ในขณะที่ทำการตรวจสอบโครงสร้างชั้นผิวขาวนี้จึงถูกเรียกว่า "White layer" ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของ White layer นี้กับความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิงและคาร์โบไนไตรดิ้งแล้วจะมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าเล็กน้อย ดังนั้นจึงได้เรียกกระบวนการนี้ว่า "Soft nitriding" อีกทั้ง อุณหภูมิที่ใช้ต่ำ ($520\text{-}570^\circ\text{C}$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการคาร์บูไรซิงหรือคาร์โบไนไตรดิ้ง จึงถูกเรียกกระบวนการนี้ว่าเป็น Low temperature carbonitriding โดยปกติชั้นสารประกอบจะมีความแข็งดังต่อไปนี้

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

มีความแข็งที่สูง

2.7 การอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กภายหลังการชุบแข็งผิวจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์เหลือค้าง (Residual austenite) นอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายในสมบัติเหล็กตามลักษณะดังกล่าวจะมีความแข็งสูง แต่ขาดคุณสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรง

กระแทก (Poor impact strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอ หรือ อาจเกิดการแตกร้าวในขณะที่ใช้งาน ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้อง นำมาทำการอบคืนตัว เพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไป หรือเหลืออยู่น้อยที่สุด และใน ขณะเดียวกันจะทำให้มาร์เทนไซต์แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุล (Tempered martensite) ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนตัวและเวลาที่ใช้ด้วย

การอบคืนตัวเป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_1 ภายหลังจากเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้ว จะปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ภายใต้อากาศ การเปลี่ยนแปลงของ มาร์เทนไซต์และออสเทนไนท์เหลือค้างไปสู่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กัน ดังนี้

อุณหภูมิช่วงแรก (80-200°C) โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ชนิด ที่ใกล้จะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ 0.25% กับคาร์ไบด์ชนิดเอฟซี ลอน มีสูตร Fe_2C หรือ Fe_2C_4 และมีคาร์บอนประมาณ 8.2% ทั้งคาร์ไบด์ และเฟอร์ไรท์ (0.25%C) จะตกผลึกชนิดละเอียดและกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง สามารถศึกษาได้โดยกล้องขยาย อิเล็กตรอนเท่านั้น การอบคืนตัวในช่วงนี้ความแข็งแรงจะลดลงเล็กน้อย แต่ความเครียดภายในจะถูก ทำลายไปเกือบหมด

อุณหภูมิช่วงที่สอง (200-280°C) โครงสร้างออสเทนไนท์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นมาร์เทน ไซต์ได้ทันในขณะที่ชุบแข็ง (Retained austenite) จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ (0.25%C) และ ซีเมนต์ไคต์ (Fe_3C) ที่มีความละเอียดและกระจายโครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับเบน ไนท์ความแข็งแรงจะลดลงมาก แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิช่วงที่สาม (300-500°C) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฟอร์ไรท์ จะแตกตัวให้เฟอร์ไรท์ ที่มีคาร์บอน 0.025% และซีเมนต์ไคต์ ส่วนเอฟซีลอนคาร์ไบด์ จะเปลี่ยนเป็นซีเมนต์ไคต์ (Fe_3C) โครงสร้างที่ได้จะยังอยู่ในลักษณะละเอียด และกระจายมีลักษณะคล้ายซอร์ไบท์

อุณหภูมิช่วงที่สี่ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ขึ้นไปจนถึง A_1) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะปรับตัว เข้าสู่สภาพสมดุล และมีการขยายตัวของเฟอร์ไรท์และซีเมนต์ไคต์โตขึ้น ความแข็งแรงจะลดลงมาก โดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำสเฟอไรไรด์ซึ่ง (Incomplete annealing)

2.7.1 ในทางปฏิบัติแบ่งช่วงการอบคืนตัวออกเป็น 3 ช่วง คือ

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำ (150-250°C) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายใน และปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเหนียว โดยพยายามรักษาระดับความแข็งไว้ให้ใกล้เคียงกับ ภายหลังจากชุบแข็ง เวลาที่ใช้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

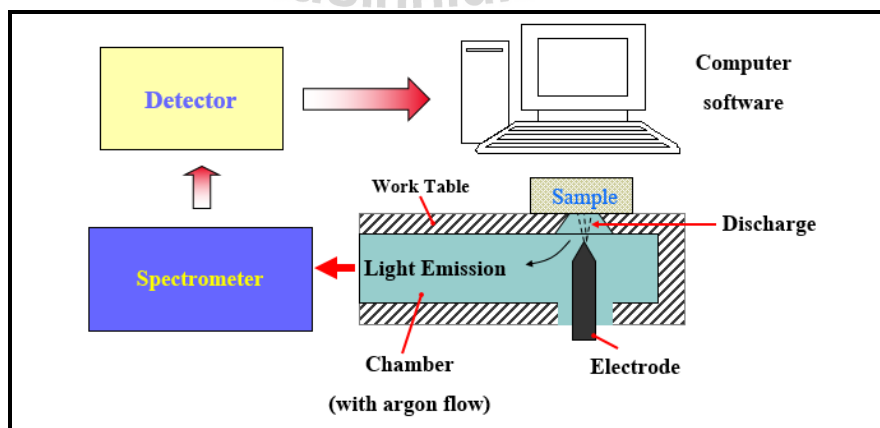
การอบคืนตัวที่อุณหภูมิปานกลาง (350-450°C) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความเหนียว สูงและคุณสมบัติทางด้านยืดหยุ่นสูง ส่วนใหญ่ใช้สำหรับเหล็กทำแบบสปริง โครงสร้างของเหล็ก จะใกล้เคียงกับเบนไนท์ หรือทรูสไตต์

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง (500-650°C) จะกระทำเมื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไป และเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวสูง โดยมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงด้วย โครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็นเฟอไรต์ละเอียดใกล้เคียงกับโครงสร้างซอไบท์

2.8 คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ

2.8.1 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีการที่นิยมมากที่สุดในอุตสาหกรรมคือ การตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Spectrometer สามารถวิเคราะห์ธาตุได้พร้อมกันหลายตัวในเวลาเดียวกัน และมีความไวในการวิเคราะห์สูง Emission spectrometer นี้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และหาปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็ง โดยจะใช้หลักการ Spark เพื่อทำให้ชิ้นงานให้แสงและคายพลังงานออกมาหรือที่เรียกว่า หลักการ Optical emission spectrometer โดยจะใช้ตัวรับสัญญาณหรือ Detector แบบ Mutated ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อสามารถแยก Spectrum ของแสงได้ และจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวประมวลผลเพื่อทำการประมวลผลและวิเคราะห์ปริมาณของธาตุออกมา (NDT Instruments)

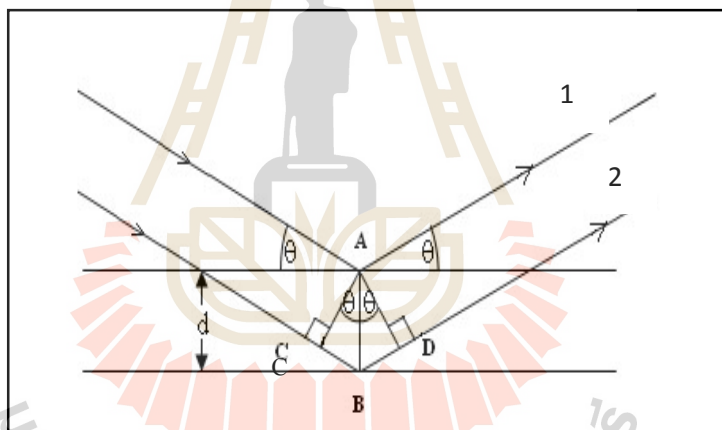


รูปที่ 2.4 แผนผังการทำงานของ Spectrometer

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานโลหะ เป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นสำหรับการควบคุมมาตรฐานการผลิต ตลอดจนช่วยในการพัฒนาวิจัยผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางเคมีตามต้องการ

2.8.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) หรือนิยมเรียกสั้น ๆ ว่า XRD เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารและวัสดุโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เนื่องจากความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์มีขนาดในช่วงเดียวกับระยะห่างระนาบระนาบของอะตอมของสารแทบทุกชนิด ในกรณีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึก รูปแบบการเรียงตัวที่ซ้ำ ๆ กันของผลึกจะทำหน้าที่เหมือนกับเป็นเกรตติงให้กับรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไป ทำให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการศึกษาทางคristallography



รูปที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบบนผลึก

จากรูปที่ 2.5 จะพบว่ารังสีขนานตกลงบนผลึกที่จุด A และ B ตามลำดับ โดยทำมุม θ กับระนาบของผลึก การเลี้ยวเบนของรังสีจะเกิดขึ้นเมื่อระยะทางที่รังสีเอกซ์ 1 และ 2 เดินทางต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น ดังสมการที่ 2.7

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (2.7)$$

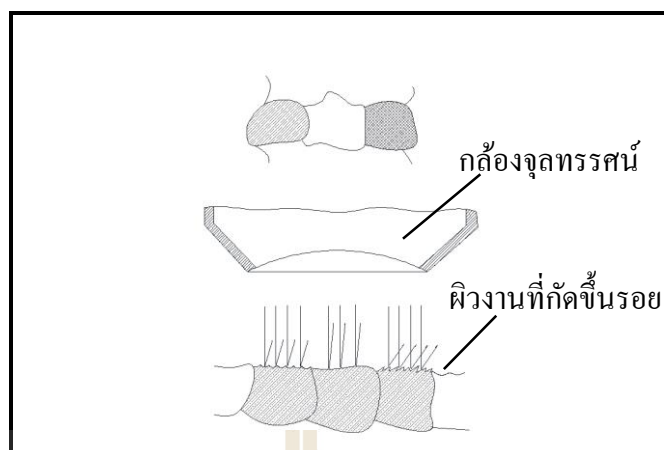
เมื่อ	d	:	ระยะห่างมอดกกระทบ
	θ	:	มุมตกกระทบ
	λ	:	ความยาวคลื่น

โดยกฎข้อนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้ารังสีเอ็กซ์ ตกกระทบบมีความยาวคลื่นที่คงที่แล้ว มุมของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นกับระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก เครื่องที่ใช้วิเคราะห์จะเรียกว่า เอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffraction) ที่มีหัวจับสัญญาณ (Detector) รังสีเอ็กซ์ เพื่อหาค่ามุมเลี้ยวเบนและความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา จากนั้นจะมีอุปกรณ์บันทึกที่ทำหน้าที่พล็อตความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาเทียบกับมุมที่เลี้ยวเบน 2θ แบบอัตโนมัติ

2.8.3 การศึกษาโครงสร้างของโลหะ (Metallography)

2.8.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

การศึกษาโครงสร้างของโลหะภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า OM โดยใช้แสงและระบบกำเนิดแสงเป็นพื้นฐาน สามารถตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคได้เฉพาะผิวโดยอาศัยการสะท้อนแสงสำหรับวัสดุทึบแสง หลักการของการศึกษาจะเริ่มต้นจากการเตรียมผิวของโลหะก่อนโดยการปรับระดับผิวให้เรียบ เริ่มตั้งแต่กระดาษทรายหยาบจนถึงกระดาษทรายละเอียด ขณะขัดจะใช้น้ำฉีดเพื่อทำความสะอาดเศษโลหะที่ติดกับกระดาษทรายและระบายความร้อน ขั้นตอนต่อไปก็ทำการขัดละเอียดด้วยจานหมุนหุ้มผ้าสักหลาดโดยมีน้ำผสมผงขัดที่ละเอียดมาก (0.3-0.5 ไมครอน) นี้คือน้ำสักหลาดอาจใช้ผงขัดที่เป็นอะลูมินาหรือโครเมียมออกไซด์ (ทรายโครเมียม) ขัดจนผิวโลหะเรียบเทียบเท่ากระจกเงา จากนั้นจึงไปผ่านการกัดผิว (Etching) บาง ๆ ด้วยสารละลายกรดเจือจางที่เหมาะสมทำให้สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาคได้ เนื่องจากโลหะประกอบด้วยเกรนขนาดเล็กจำนวนมาก ในแต่ละเกรนมีการจัดเรียงทิศทางแตกต่างกัน จึงมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างกัน ทำให้ถูกกัดผิวไม่เท่ากัน จึงทำให้เนื้อผิวของเกรนการสะท้อนแสงเกิดภาพของเกรนนั้น ๆ



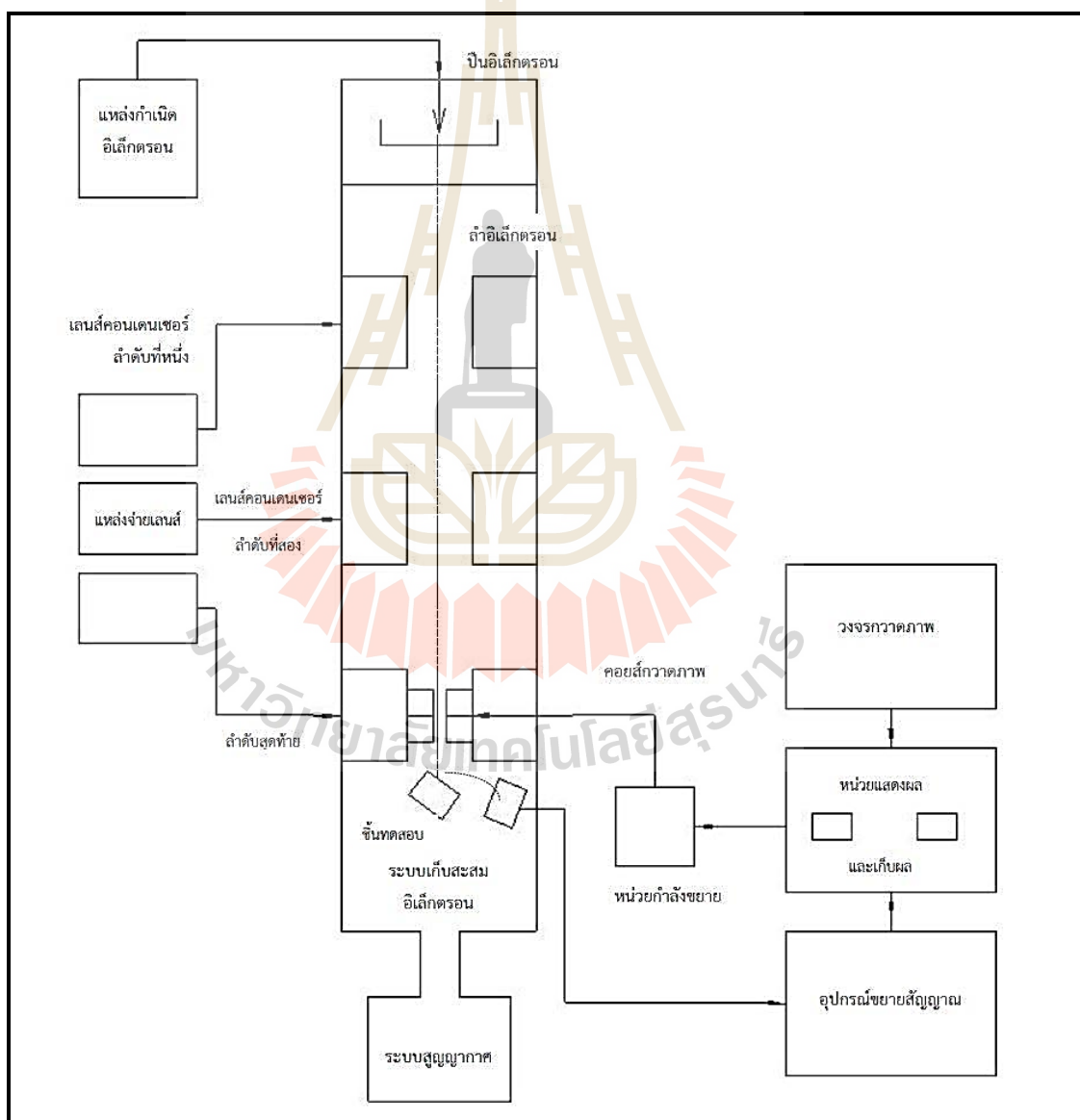
รูปที่ 2.6 ลักษณะการตกกระทบและแสงสะท้อนของแสงบนผิวชิ้นงาน

2.8.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

โดยวิธีการที่นิยมตรวจสอบลักษณะการแตกหักของโลหะนั้นใช้เทคนิค (Scanning Electron Microscope) หรือมักเรียกสั้นๆ ว่า SEM เป็นเทคนิคในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ใช้การกวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัสดุแล้วนำสัญญาณที่ได้ เช่น สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิและสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับไปสร้างเป็นสัญญาณภาพ เทคนิค SEM สามารถวัดวัตถุที่มีความชัดลึกได้มากกว่า และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทั้งนี้เพราะ SEM จะใช้สมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้นมาก ทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะได้สูงถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น EDS (Energy Dispersive Spectrometry) และ WDS (Wavelength Dispersive Spectrometry) เพื่อให้ข้อมูลทางเคมีได้อีกด้วย การตรวจสอบการกระจายตัวของเฟส การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวที่แตกหักของวัสดุ การตรวจสอบรูปร่างของเฟสต่าง ๆ ในชิ้นงาน เป็นต้น

หลักการการทำงานของเครื่อง SEM อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ในสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0-30 กิโลวัตต์ โดยทิศทางเคลื่อนที่จะควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า 2 ชุด หรือมากกว่านี้ก็ได้ ปริมาณของอิเล็กตรอนจะควบคุมโดยแอเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรกเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญสูงสุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์ของอิเล็กตรอน (Electron optics) เนื่องจากเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ “บีบ” ลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของ

วัตถุเป้าหมาย โดยมีคอยล์กวดภาพทำหน้าที่กวดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยมคล้ายกับการกวดภาพจอโทรทัศน์อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons; SE) จะให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่นำมาสร้างภาพ ส่วนอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back scattered electrons; BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับผสมทางเคมีสำหรับเอกซเรย์ (X-ray) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของธาตุองค์ประกอบเป็นสัญญาณที่ใช้ในเทคนิค EDS และ WDS เครื่อง SEM เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ความเสียหายของโลหะหรือวัสดุต่าง ๆ โดยเครื่อง SEM จะช่วยให้เราสามารถเห็นพื้นผิวของเกรนของโลหะได้อย่างชัดเจนว่าเกิดจากการแตกหักในลักษณะใด



รูปที่ 2.7 แผนภาพการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscope

2.8.4 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุต่อการกดให้เป็นรอยบุ๋ม (Indentation) การขีดหรือการขีดให้เป็นรอย (Scratching) การหาค่าความแข็งของวัสดุ อาศัยหลักการ 3 อย่างคือ

1. หาคความต้านทานต่อพลังงานการยืดหยุ่น (Elastic Hardness)
2. หาคความต้านทานต่อการตัดหรือขีดข่วน (Resistance to Cutting or Abrasion)
3. หาคความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอยบุ๋ม (Resistance to Indentation)

โดยจะอธิบายถึงวิธีการหาคความแข็งของวัสดุโดยการกดให้เป็นรอยบุ๋มเท่านั้น การหาคความแข็งโดยวิธีนี้เป็นการนำเอาวัสดุชนิดหนึ่งมากดบนผิววัสดุอีกชนิดหนึ่ง เพื่อให้เกิดรอยบุ๋มสามารถวัดค่าความแข็งได้จากความโตหรือความลึกของรอยกด

โดยปกติแล้วค่าความแข็งจากการชุบแข็งผิว แล้วจะมีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณผิวและค่าความแข็งลดลงตามความลึกเข้าไปในชิ้นงาน ดังนั้นการตรวจวัดคุณภาพงานชุบแข็งผิวจึงสนใจที่ค่าความแข็งผิว (Surface hardness or case hardness) และค่าความลึกผิวแข็ง (Case depth) ด้วย

ความแข็งผิว (Surface hardness or case hardness) คือ ค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานที่ได้จากการชุบแข็งผิว ส่วนค่าความลึกผิวแข็ง (Case depth) คือ ระยะทางจากผิวถึงบริเวณด้านในชิ้นงานที่มีค่าความแข็งลดลงจนถึงค่าตามเกณฑ์ที่พิจารณา โดยปกติแล้วการกำหนดค่าความลึกผิวแข็งตามเกณฑ์มี 2 แบบ ที่เรียกกันทั่วไปว่า ความลึกผิวแข็งทั้งหมด (Total case depth) และความลึกผิวแข็งที่มีประสิทธิภาพ (Effective case depth)

Total case depth คือ ระยะทางจากผิวถึงบริเวณหรือจุดแรกด้านในชิ้นงานที่มีความแข็งเท่ากับค่าความแข็งของชิ้นงานด้านในหรือใจกลางชิ้นงาน (Core hardness) โดยปกติแล้วการตรวจวัด Total case depth จะใช้วิธีการตรวจสอบโดยการเตรียมตัวอย่างทางโลหะวิทยา ได้แก่ การตัด ขัดหยาบ ขัดละเอียด และกัดกรน แล้วถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน โดยต้องสอบเทียบระยะจากการขยายของเลนส์และชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพต่าง ๆ ด้วยเพื่อที่จะกำหนดระยะจากภาพถ่ายได้

Effective case depth คือ ระยะทางจากผิวถึงบริเวณหรือจุดแรกด้านในชิ้นงานที่มีค่าความแข็งลดลงจนถึงค่าความแข็งตามเกณฑ์ เช่น กำหนดให้ 513 HV หรือ 50 HRC ค่าความแข็งที่ตำแหน่งลึกไปจากนี้ก็จะยังคงลดลงต่อไปจนถึงระยะ Total case depth นั้นเอง โดยเรียกค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์ว่า Effective case depth hardness การวัดค่า Effective case depth hardness นั้นส่วนใหญ่อาศัยเทคนิคการวัดความแข็งแบบ Micro-Vickers และ Knoop โดยต้องเลื่อนชิ้นงานเพื่อวัด

ความแข็งที่ระยะความลึกเข้าไปจากผิวต่าง ๆ กัน จนกระทั่งถึงระยะหนึ่งค่าความแข็งลดลงเท่ากับเกณฑ์เป็นตำแหน่งแรก

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนด Effective case depth อ้างอิงตาม SAE J423

<i>Carbon content</i> (wt.%)	<i>Effective case depth hardness</i>	
	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

หลักการทดสอบความแข็งแบบ Vickers

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ กระทำโดยใช้แรงกดอยู่ระหว่าง 1-200 กิโลกรัม กดผ่านหัวกดที่ทำด้วยเพชรรูปพีระมิด มีฐานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มุมรวมที่ปลายแหลมเท่ากับ 136 องศา นำไปกดบนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 10-30 นาที จากนั้นปลดแรงกดออก แล้วนำชิ้นงานไปวัดขนาดของรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าความแข็งจากสูตรสมการที่ 2.8

$$HV = \frac{1.854P}{D^2} \quad (2.8)$$

เมื่อ P = แรงหรือน้ำหนักกด
 D = ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุมรอยกด

การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness Test; HMV) การทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์เหมาะสำหรับทดสอบความแข็งชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและบาง ชิ้นงานที่ผ่านการชุบผิวแข็ง ชิ้นงานชุบเคลือบผิว เป็นต้น วิธีการทดสอบคล้ายคลึงกับแบบวิกเกอร์ คือ ใช้หัวกดทำด้วยเพชรรูปพีระมิด มีฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุม 136 องศา ส่วนน้ำหนักหรือแรงที่ใช้มีขนาดตั้งแต่ 15-3600 กรัม เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 5-45 นาที

ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ทราบได้จากการคำนวณจากสูตรคือ

$$H_{MV} = \frac{2P(\sin 136^\circ / 2)}{d^2} \quad (2.9)$$

เมื่อ P = น้ำหนักหรือแรงที่ใช้ทดสอบ
d = ค่าเฉลี่ยเส้นทแยงของรอยกด

2.8.5 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นการวัดความต้านทานของวัสดุ โดยให้แรงดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราคงที่ โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีกำหนดขนาดต่าง ๆ ไว้เป็นมาตรฐาน ไม่ว่าจะเป็ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของชิ้นงานทดสอบ และรัศมีของความโค้งบริเวณบ่าล๊อคเพื่อจับยึด ลักษณะรูปร่างก็เช่นกัน ในการทดสอบแรงดึงจะสามารถหาข้อมูลของแรงได้จากกราฟของการทดสอบแรงดึง ซึ่งกราฟระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมและความเครียดทางวิศวกรรม

ข้อมูลสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและแผนภาพความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม

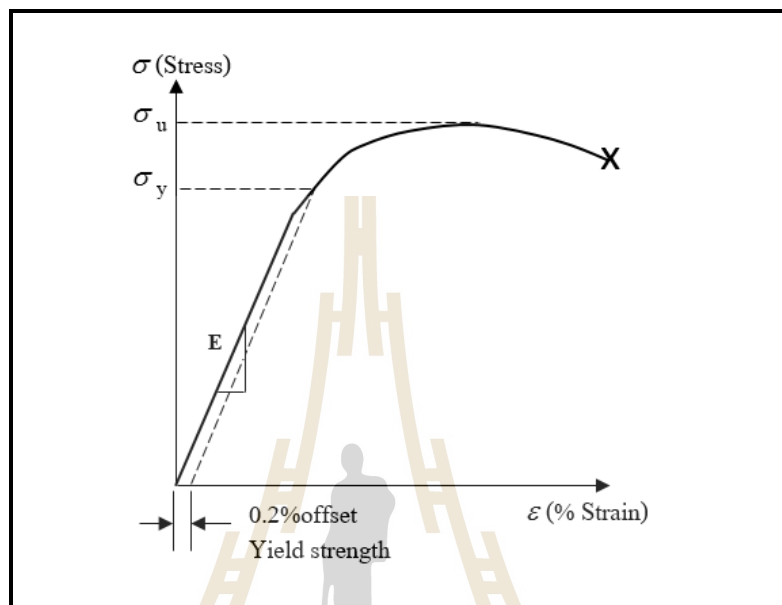
1. Yield strength ที่วัดได้จาก 0.2% offset
2. Ultimate tensile strength
3. Modulus of elasticity
4. Percent elongation at fracture
5. Percent reduction in area at fracture

Yield Strength เป็นค่าที่มีความสำคัญที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง เพราะมันเป็นค่าความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมที่สำคัญต่อการเปลี่ยนรูปที่จะเกิดขึ้นอย่างถาวร จาก Stress-Strain curve ไม่มีจุดที่แน่นอนที่แสดงให้เห็นถึงจุดที่ Elastic strain สิ้นสุด และ Plastic strain เริ่มต้น จึงได้เลือกเอา Yield strength เป็นความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสม เมื่อมีปริมาณ Plastic strain เกิดขึ้นใน Stress-Strain diagram

0.2% Yield strength นี้ อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า 0.2% offset yield strength การหา yield strength ให้ลากเส้นตรงขนานกับเส้น Stress-Strain diagram

Ultimate Tensile Strength เป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength; หรือ UTS) คือค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้ โดยพิจารณาจากกราฟ Engineering

Stress-Strain curve ความต้านทานแรงดึง ณ จุดนี้ ชิ้นงานทดสอบจะเริ่มเกิดคอคอด (Necking) ขึ้นที่ บริเวณความยาวเกจ และเมื่อผ่านจุดนี้ไป วัสดุจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อย ๆ จนเกิดการแตกหัก บางครั้งเราเรียกความเค้นแรงดึงนี้ว่า ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength; UTS)



รูปที่ 2.8 Engineering stress-strain diagram

มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E) คือการเปลี่ยนรูปของวัสดุในสภาวะนี้ เป็นการเปลี่ยนรูปที่ไม่ถาวร โดยมีค่าที่สำคัญอยู่ค่าหนึ่งเราเรียกว่า มอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) หรือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus) ใช้ E เป็นสัญลักษณ์ ค่าของ E นั้น เป็นค่าความชันของกราฟความเค้นกับความเครียดในช่วงสภาวะยืดหยุ่น ความสัมพันธ์ดังกล่าว เป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงขนาดและความเค้นของวัสดุในช่วงที่มีสภาวะยืดหยุ่นจะเป็นอัตราส่วนหรือสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.10)$$

ในกรณีที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเฉือน เราเรียกมอดูลัสของการเปลี่ยนรูปว่า มอดูลัสของการเฉือน (Modulus of rigidity) และใช้ G เป็นสัญลักษณ์ ค่าของ G สามารถหาได้จากสมการ

$$G = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s} \quad (2.11)$$

อัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio; μ) เป็นการหาอัตราส่วนระหว่างขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุในช่วงสภาวะยืดหยุ่นในแนวตั้งฉากกับแรงต่อแนวนอนกับแรง

เปอร์เซ็นต์การยืดตัวและการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (%Elongation (%EL) and %Reduction of Area (%RA)) การวัดความเหนียว (ductility) ของวัสดุ เป็นการวัดขนาดของการเปลี่ยนรูปว่าวัสดุมีการเปลี่ยนรูปไปได้มากน้อยเพียงใดเมื่อมีแรงมากระทำ วัสดุที่เปลี่ยนรูปไปได้มากโดยปราศจากการแตกหักแสดงว่า วัสดุนั้นมีความเหนียวมาก ค่าความเหนียวค่าหนึ่งของวัสดุที่นิยมใช้คือ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation, %EL หรือ %e) หาได้จากสมการที่ (2.12) ดังนี้

$$\%EL = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2.12)$$

เมื่อ %EL = เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
 L_f = ความยาวของชิ้นทดสอบหลังจากขาด
 L_0 = ความยาวเกจ

การวัดค่าความเหนียวอีกค่าหนึ่งที่นิยม คือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (%reduction of area) โดยหาได้จากสมการที่ (2.13)

$$\%RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \quad (2.13)$$

เมื่อ %RA = เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด
 A_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนทดสอบ
 A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังการแตกหัก

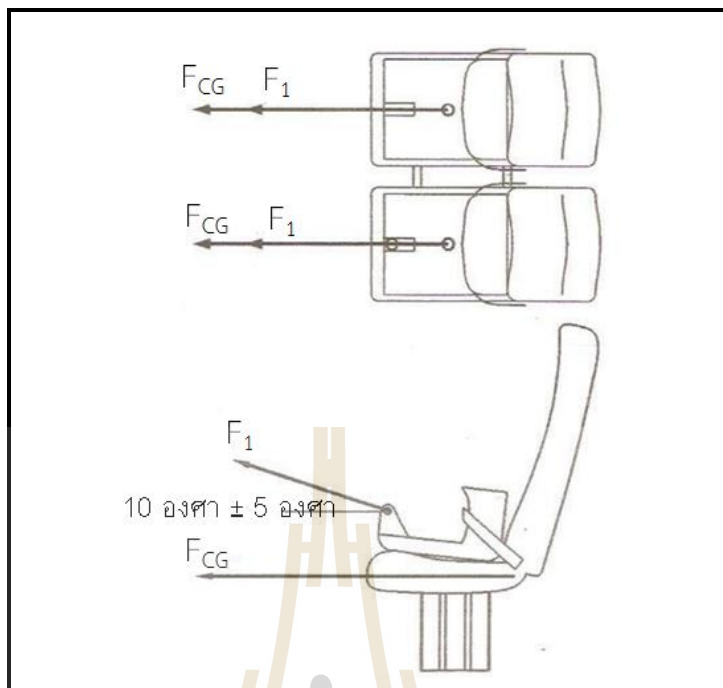
2.9 มาตรฐานการทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยตามข้อกำหนดของ ECE Regulation 14

คณะกรรมการเศรษฐกิจแห่งสหประชาชาติยุโรป (UN ECE: United Nation Economic Commission for Europe) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำหนดข้อกำหนดและมาตรฐาน ไม่ว่าจะเป็น ทางด้าน สิ่งแวดล้อม พลังงานทดแทน สภาพสังคมการเป็นอยู่ของประชากร และโดยเฉพาะข้อกำหนดและ มาตรฐานทางด้านยานพาหนะ เพื่อที่จะควบคุมให้ยานพาหนะมีความปลอดภัยและเป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดย ECE Regulation 14 เป็นข้อกำหนดที่ว่าด้วยหลักเกณฑ์ข้อกำหนด วิธีการ ทดสอบ และเกณฑ์การตัดสินหลังการทดสอบของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย ระบบยึดแบบไอโซฟิก และ ไอโซฟิกทอปเทเทอร์ ซึ่งในประเทศไทยนั้นก็ให้มีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ได้ กำหนด มอก.1467-2550 ซึ่งเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมจุดยึดเข็มขัดนิรภัย ระบบยึดแบบ ไอโซฟิก และ ไอโซฟิกทอปเทเทอร์ โดยได้อ้างอิงข้อมูลมาตรฐานจาก ECE Regulation 14 ซึ่งได้ จัดทำโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ) เพื่อมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างความเป็น ธรรมในการซื้อขาย และขจัดปัญหา อุปสรรคทางการค้าที่เกิดจากมาตรการด้านมาตรฐานและ คู่แข่งของผู้บริโภค

ECE R14 การทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยแบบรัดหน้าตัก (Lab belt) และเกณฑ์การตัดสิน ซึ่งเป็นรถยนต์โดยสารประเภทที่มีน้ำหนักเกิน 5 ตัน ซึ่งในการทดสอบดังกล่าวจะทำการทดสอบ แบบสถิติศาสตร์โดยได้มีวิธีการทดสอบดังนี้

2.9.1 เกณฑ์การทดสอบ

- 1) ปรับพนักพิงหลังให้ลึกลงตามที่ผู้ผลิตกำหนด หรือหากไม่ได้คุณลักษณะ ดังกล่าวแล้ว ให้ปรับอยู่ในตำแหน่งที่มุมพนักพิงหลังใกล้เคียงกับ 15 องศา เมื่อวัดจากแนวตั้ง
- 2) ให้แรง $F_1 = 7400 \pm 200$ นิวตัน สำหรับรถโดยสารที่มีน้ำหนักเกิน 5 ตัน ที่กระทำ ผ่านอุปกรณ์ดึงด้านล่างที่มีมุมเอียงกับแนวนอนเท่ากับ 10 ± 5 องศา ดังรูปที่ 2.9
- 3) สำหรับรถที่มีน้ำหนักเกิน 5 ตัน ให้แรง $F_{CG} = 6.6$ เท่าของน้ำหนักของที่นั่ง กระทำผ่านจุดศูนย์กลางที่ขนานกับแนวนอน
- 4) ให้แรงดึง F_1 และ F_{CG} พร้อมกันโดยเริ่มต้นร้อยละ 10 ของแรงดึงเป้าหมาย จากนั้นให้แรงดึงร้อยละ 100 ของแรงดึง ให้แรงดึงถึงแรงดึงเป้าหมายเร็วที่สุดโดยใช้เวลาไม่มากกว่า 60 วินาที



รูปที่ 2.9 ลักษณะของการทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยของโครงสร้างที่นั่งผู้โดยสารแบบที่นั่งคู่

2.9.2 เกณฑ์การตัดสิน

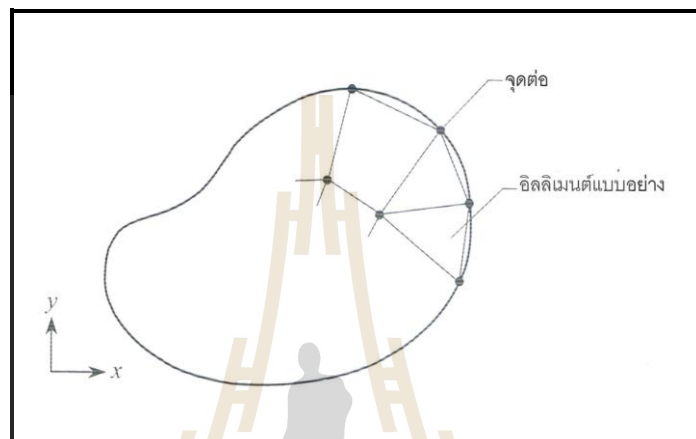
- 1) จุดยึดเข็มขัดนิรภัยต้องทนแรงได้ไม่น้อยกว่า 0.2 วินาทีต้องไม่เกิดความเสียหายใด ๆ ปรากฏที่โครงสร้างที่นั่งหรือจุดยึดที่นั่ง
- 2) ระบบปรับตำแหน่ง และระบบเลื่อนหรืออุปกรณ์ลื่น ในระหว่างการทดสอบการเสีรูปถาวรใด ๆ รวมถึงการแตกหักบางส่วน อาจเป็นที่ยอมรับได้ถ้าหากความเสียหายเหล่านี้ไม่เพิ่มความเสี่ยงของการบาดเจ็บในกรณีที่เกิดการชนและสามารถรองรับแรงตามที่กำหนดได้

2.10 ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เป็นการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อการคำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณ สำหรับปัญหาต่าง ๆ ในงานทางวิศวกรรม โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นจากการแบ่งรูปทรงของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Elements) เอลิเมนต์เหล่านี้เชื่อมต่อกันโดยจุดต่อ (Nodes) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าตัวแปรตาม (Dependent variables) ที่ต้องการ จากนั้นนำแต่ละเอลิเมนต์ย่อย ๆ รวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการรวมขนาดใหญ่ซึ่งอธิบายสถานะโดยรวมของปัญหานั้นได้

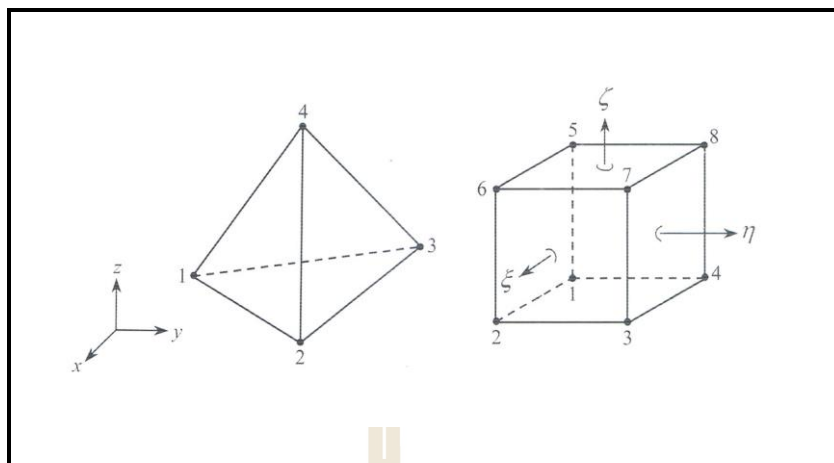
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นั้นประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์หาผลเฉลยออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแทนเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับลักษณะปัญหา ซึ่งขอบเขตดังกล่าวนั้นเป็นขอบเขตปัญหาทางชนิดต่าง ๆ เช่น ปัญหาการยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity problem) เป็นต้น แสดงในรูปแบบที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแบ่งรูปร่างของปัญหาทางด้านของแข็งออกเป็นเอลิเมนต์ต่าง ๆ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element interpolation function) ซึ่งมีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลเฉลยในการวิเคราะห์ปัญหาที่เราสนใจ ฟังก์ชันการเชื่อมต่อกำหนดโดยจำนวนจุดต่อ (Node) ในเอลิเมนต์ ซึ่งฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์มีหลายรูปแบบ เช่น 1 มิติ หรือ 2 มิติ รูปแบบของฟังก์ชันก็จะแตกต่างกันออกไป โดยที่จุดต่อ (Node) เป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่ทราบค่า ตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่ออาจเป็นค่าของการเสียรูป (Displacement) หากปัญหานั้นเป็นการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นในของแข็ง และหากในเอลิเมนต์มีจำนวนจุดต่อมากก็จะส่งผลให้เอลิเมนต์สร้างขอบเขตที่เหมือนใกล้เคียงกับปัญหาจริงมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element equations) ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์รูปสมการในแต่ละวิธีจะมีความยากง่ายแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ โดยการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ดังนี้

- ก. วิธีการโดยตรง (Direct approach)
- ข. วิธีการแปรผัน (Variation approach)
- ค. วิธีถ่วงน้ำหนักตกค้าง (Method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ย่อย ๆ ที่ได้มาประกอบรวมกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวม (System of simultaneous equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (\text{element} - \text{equations}) \rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.13)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ลงในระบบสมการรวม (2.13) แล้วจึงแก้ระบบสมการรวมนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ (Nodal unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่พิจารณา

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่น ๆ ที่ต้องการต่อไปได้ เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียรูป (Displacement) ตามจุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้หาค่าความเครียดและความเค้นได้ตามลำดับ

2.11 ทฤษฎีความเสียหาย

ทฤษฎีความเสียหายถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ประเมินผลการวิเคราะห์และอธิบายความเสียหายของวัสดุ การเสียหายของวัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ การเสียหายแบบครากและการเสียหายแบบแตกหักหรือฉีกขาด (Cleavage) ซึ่งการเสียหายทั้งประเภทนี้นั้นมีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ซึ่งการครากนี้เป็นปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) นั่นก็คือโมเลกุลของวัสดุเกิดการเลื่อน (Slip) บนระนาบการเลื่อน (Slip plane) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุแต่ไม่เปลี่ยนแปลงขนาด การครากนั้นเป็นการเสียหายที่ต้องอาศัยเวลาซึ่งจะสังเกตได้ล่วงหน้า คือ วัสดุเกิดการแอ่น การยืดออก การเกิดคอคอด (Necking) แต่การเสียหายที่เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลถูกดึงแยกออกจากกันในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงดึงนั้นสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesive force) ของวัสดุเดียวกันได้นั้นจะเป็นการเสียหายอย่างกะทันหัน ซึ่งจะเป็นการแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) ซึ่งการเสียหายแบบนี้เราจะไม่สามารถมีโอกาที่จะสังเกตได้ล่วงหน้า เพราะเป็นการเสียหายที่พฤติกรรมของวัสดุยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic)

การเสียหายของชิ้นส่วนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วน โครงสร้าง หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ล้วนแล้วเป็นสาเหตุของความล้มเหลวของงานทางด้านวิศวกรรม ซึ่งความเสียหายนั้นจะมีตั้งแต่ทำให้เครื่องจักรนั้นทำงานไม่เต็มกำลัง และมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งอาจจะถึงอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ ในงานออกแบบทางวิศวกรรมนั้นผู้ออกแบบต้องพยายามออกแบบเพื่อไม่ให้เกิดการเสียหาย

ในสภาวะความเค้นในชิ้นส่วน โครงสร้าง หรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในขณะที่ได้รับภาระกระทำแบบแกนเดียว (Uniaxial force) นั้นเป็นสิ่งที่สามารถที่จะทำนายการเสียหายได้ง่าย แต่เมื่อชิ้นส่วนดังกล่าวนั้นมีลักษณะรูปร่างที่ซับซ้อน และมีทิศทางที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะทำให้การทำนายความเสียหายนั้นเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น เพราะในชิ้นส่วนดังกล่าวนี้มีความเค้นที่เกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งแกนหรืออาจจะอยู่ได้ในหลายสภาวะ ซึ่งอาจจะอยู่ในสภาวะความเค้นอัด ความเค้นดึง ความเค้นเฉือน ความเค้นดัด ความเค้นบิด รวมกันทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วนดังกล่าว ซึ่งลักษณะความเค้นดังกล่าวนี้จะเรียกว่าความเค้นผสม (Combined stress) ซึ่งถ้าหากว่า “ความเค้นรวมหรือความเค้นผสมที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนนั้นมีค่าที่สูงกว่าหรือเท่ากับความเค้นคราก

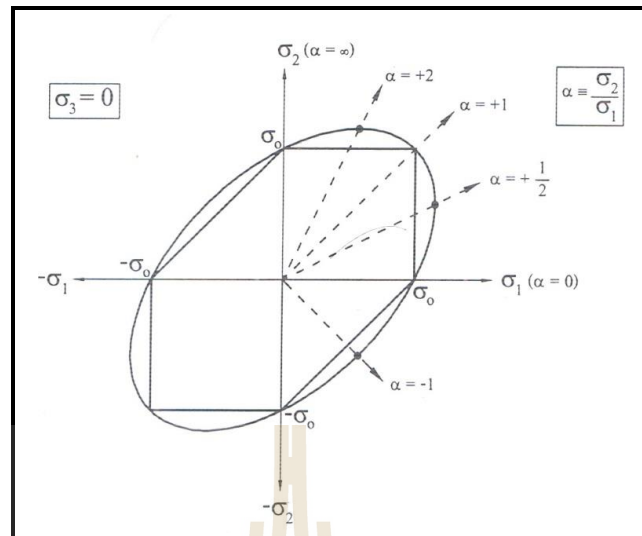
ของวัสดุ ขึ้นส่วนนั้นก็จะเริ่มการครากหรือการแตกหัก” โดยทฤษฎีการเสียหายที่นิยมใช้กันจะประกอบด้วย 6 ทฤษฎี คือ

1. ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principal stress theory)
2. ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress theory หรือ Tresca yield theory)
3. ทฤษฎีความเครียดสูงสุด (Maximum strain theory)
4. ทฤษฎีพลังงานความเครียดรวม (Total strain energy theory)
5. ทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion energy theory หรือ von Misses)
6. ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทงสี่ดรัส (Octahedral Shear Stress Criterion)

จากความเสียหายทั้งหมดได้มีการเปรียบเทียบทฤษฎีการเสียหาย ซึ่งพบว่าทฤษฎีความเสียหายที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่โลหะที่เป็นโลหะเหนียวคือ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด และทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทงสี่ดรัส หรือทฤษฎีพลังงานแปรรูป ซึ่งกรอบการแตกหักของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดนั้นจะอยู่ภายในกรอบของทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทงสี่ดรัสหรือทฤษฎีพลังงานแปรรูป ตามรูปที่ 2.12 และกรอบการแตกหักทั้งสองนั้นจะสัมผัสกันที่จุด $\sigma_1 = \pm\sigma_0$, $\sigma_2 = \pm\sigma_0$ และ $\sigma_3 = \pm\sigma_0$ ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทงสี่ดรัส จะให้ค่าแฟกเตอร์ความปลอดภัยสูงกว่าประมาณ 15% คือจากตามรูปที่ 2.12 สัดส่วนของระยะจากแกนของทรงกระบอกถึงกรอบการแตกหักของทั้งสองทฤษฎีคือ

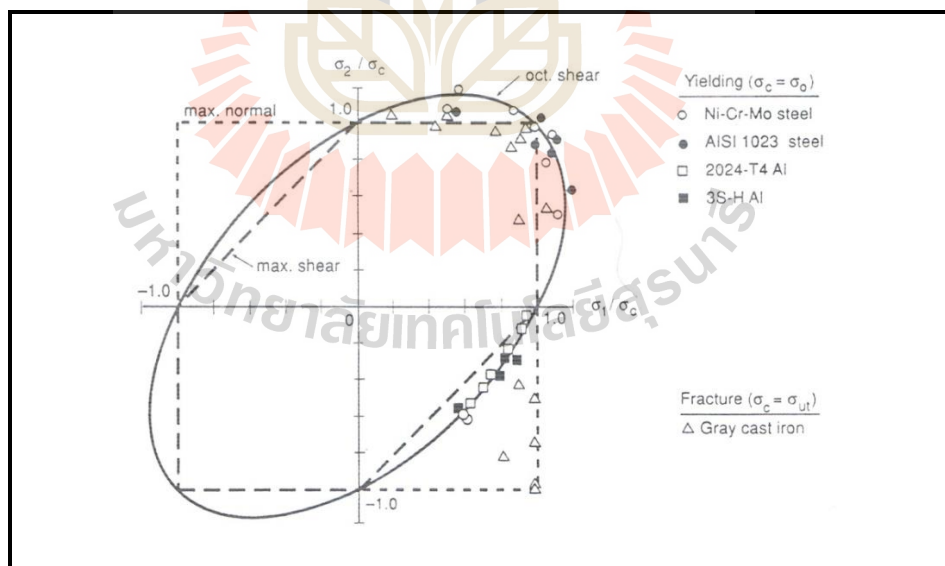
$$\frac{\sigma_0 \sqrt{2/3}}{\sigma_0 / \sqrt{2}} = 1.15 \text{ หรือ } 15\% \quad (2.14)$$

ส่วนกรณีของความเค้นระนาบ ($\sigma_3 = 0$) ตามรูปที่ 2.12 แนวของความเค้นเฉือนล้วนจะอยู่ในแนวที่สัดส่วนของ $\sigma_2 / \sigma_1 = -1$ ส่วนตำแหน่งที่ $\sigma_2 / \sigma_1 = 2$ ก็คือความเค้นเนื่องจากความดันภายในท่อผนังบางนั่นเอง



รูปที่ 2.12 โลคัสการแตกหักในสถานะความเค้นหลักสองมิติต่างๆ

อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบการแตกหักของวัสดุโลหะเหนียว เช่น เหล็ก พบว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทงะฮีดรัลหรือทฤษฎีพลังงานแปรรูป (von Mises) นั้นให้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด และทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทงะฮีดรัลหรือทฤษฎีพลังงานแปรรูป

แต่การคำนวณตัวเลขต่าง ๆ ตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดนั้นทำได้สะดวกกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทะเลอิดริลหรือทฤษฎีพลังงานแปรรูป (von Misses) แต่ถ้าต้องการวิเคราะห์ปัญหาอย่างละเอียดก็ควรจะใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกทะเลอิดริลหรือทฤษฎีพลังงานแปรรูป (von Misses) ส่วนกรณีของโลหะเปราะ เช่น เหล็กหล่อสีเทาควรใช้ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุดทำนายเป็นต้น

2.12 ปรีทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบชุบ

Reginald Umunakwe., et al. (2017) การศึกษาผลของการใช้เปลือกของกะลาปาล์มและเปลือกมะพร้าวในกระบวนการ Packed carburizing ที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีการเย็นตัวในน้ำ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยศึกษากระบวนการคาร์บูไรซิงที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ ซึ่งใช้วัสดุดิบแบบแห้งที่มีขนาดอนุภาค 150 μm นำมาผสมในองค์ประกอบสัดส่วนที่แตกต่างกัน ประกอบไปด้วย 7 ลักษณะ หลังจากนั้นทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 45 นาที พบว่าสมบัติการต้านทานแรงดึงและความแข็งที่ดีขึ้น

A. Arulbrittoraj., et al. (2016) การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบบของค่าสึกหรอและพฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กกล้า AISI 10140 พบว่าความลึกชั้นผิวแข็งเท่ากับ $393 \pm 23 \mu\text{m}$ ซึ่งมีความแข็งสูงสุด $423 \pm 18 \text{ HV}$ เกิดขึ้นบริเวณผิวนอกสุดของชิ้นทดสอบและ $220 \pm 15 \text{ HV}$ ที่บริเวณใจกลางชิ้นทดสอบ และจากการตรวจสอบประสิทธิภาพการสึกหรอด้วยการให้โหลดระยะทางเคลื่อนที่และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความต้านทานการสึกหรอและแรงเสียดทาน หลังจากการตรวจสอบพบว่าระยะทางการเคลื่อนที่ถูกกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ตามด้วยโหลดที่ใช้และอุณหภูมิ

Amarishkumar J., et al. (2015) กระบวนการทางความร้อนเป็นกระบวนการในการปรับเปลี่ยนสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางอย่างโดยการให้ความร้อนหรือการระบายความร้อนที่อุณหภูมิที่ต้องการ คาร์บอนจะถูกดูดกลืนในเหล็กโดยการอัดแน่นของถ่านหินตามความร้อนที่เหมาะสมและอุณหภูมิซึ่งทำที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 120 นาที ปล่อยให้เย็นตัวในน้ำมัน จากนั้นทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 200°C, 250°C, 300°C เป็นเวลา 90 นาที และทดสอบการสึกหรอได้การให้โหลดที่แตกต่างกัน 50 N, 150 N และ 250 N พบว่าหลังผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิงสามารถปรับปรุงสมบัติทางกล, การต้านทานการสึกหรอค่าความแข็งที่ดีขึ้น

Belete Kefarge Azmite., et al. (2015) การศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีของเครื่องมือทางการเกษตร วัตถุประสงค์หลักคือการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานต่อการขัดถูของอุปกรณ์เครื่องที่ใช้ในการทำเกษตร เพื่อให้

ลักษณะทางกลและการต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้น โดยใช้วิธีการทางวิศวกรรมการอบชุบด้วยวิธีการชุบแข็งผิวโดยกระบวนการคาร์บูไรซิงที่อัดแน่นด้วยถ่านหินจากไม้ โดยทดลองที่อุณหภูมิ 850°C, 900°C และ 950°C เป็นเวลา 1:50 น. ตามด้วยการปล่อยให้เย็นตัวด้วยน้ำ ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกลและการสึกหรอที่แตกต่างกันของเครื่องมือทำการเกษตรแบบต่าง ๆ เช่น การสึกหรอที่ขัดผิว, ความเหนียว, ความต้านทานแรงดึง, ความสึกหรอและความแข็ง ผลการทดสอบพบว่าอิทธิพลของกระบวนการคาร์บูไรซิงมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการทำการเกษตร สรุปได้ว่าการทำคาร์บูไรซิงที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 1:50 น. ให้ได้ผลดีที่สุด

Fatai Olufemi ARAMIDE., et al. (2010) การศึกษาสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการอบชุบแข็งผิวด้วยวิธีการ Packed carburizing โดยใช้ผงกระดูกในการทำคาร์บูไรซิงอุณหภูมิที่ในการอบชุบแข็งผิวต่าง ๆ 850°C, 900°C และ 950°C ระยะเวลา 15 นาที และ 30 นาที ปล่อยให้เย็นตัวในน้ำมัน หลังจากนั้นอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 550°C ทำการศึกษาความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานแรงกระทำของวัสดุหลังผ่านกระบวนการอบชุบแข็ง พบว่าอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการทำคาร์บูไรซิงมีอิทธิพลอย่างมาก ผลการทดลองสรุปได้ว่าขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการคาร์บูไรซิงที่อุณหภูมิ 950°C ระยะเวลา 15 นาที และอุณหภูมิ 850°C ระยะเวลา 30 นาที ให้ผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีมีความแข็งที่บริเวณผิวและยังคงความเหนียวภายในเนื้อวัสดุ

Natthakrit Suwanta., et al. (2013) ได้ศึกษาคุณสมบัติเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง พบว่ากระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิงสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสม ทั้งด้านความแข็งและการรับแรงดึงให้มีแนวโน้มสูงขึ้นกว่าการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงและแก๊สคาร์โบในทรายดิงในขณะที่ให้สมบัติด้านความเหนียวสูงกว่า ส่วนกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สคาร์บูไรซิงกับแก๊สซอพท์ในทรายดิง ช่วยให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความแข็งแรง ณ จุดครากในการรับแรงดึงสูงขึ้น แต่ทำให้เกิดโครงสร้างชั้นผิวขาวบางกว่าชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพท์ในทรายดิงเพียงอย่างเดียว

2.12.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Celalettin Yuce., et al (2014) ศึกษาการออกแบบ โครงสร้างที่นํ้าหนักเบาขึ้น เพื่อทำการวิเคราะห์และปรับปรุงให้โครงสร้างที่นํ้าหนักเบาขึ้นมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักที่เบาลง ซึ่งในการวิเคราะห์และปรับปรุงโครงสร้างที่นํ้าหนักเบาขึ้นได้เปลี่ยนวัสดุที่เป็น โครงสร้างหลักจากเดิม เป็นเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง (High Strength Steel) และลดความหนาของชิ้นส่วนดังกล่าวเพื่อหา

ขนาดที่เหมาะสมกับน้ำหนักที่ลดลงเปรียบเทียบกับความเค้นที่เกิดขึ้น พบว่าจากการทดลองดังกล่าวนี้สามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างที่นั่งยานยนต์ลงได้จากเดิม 20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้นำผลการปรับปรุงดังกล่าวมาสร้างเป็นโครงสร้างที่นั่งต้นแบบและทดสอบตามข้อกำหนดของ ECE R-14 เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกัน

Heo, U.; et al. (2011) ศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง ประกอบไปด้วย สลักยึด ชุดแท่นรางเลื่อนรอกที่นั่ง ทดสอบโดยใช้เงื่อนไขการทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย ECE R-14 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิเคราะห์แบบกึ่งสถิติศาสตร์ด้วยโปรแกรม LS-DYNA โดยทำการทดสอบจริงเทียบกับผลทดสอบทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการศึกษาพบว่า ผลการทดสอบจริงและการทดสอบทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกัน จึงพิสูจน์ได้ว่าการทดสอบด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความน่าเชื่อถือสามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติ และจากผลการวิเคราะห์การทดสอบโครงสร้างส่วนที่นั่งดังกล่าว มีความแข็งแรงผ่านเงื่อนไขข้อกำหนดดังที่ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน ECE R-14

Sung Jong Kang a., et al. (2000) ได้ศึกษาถึงการทดสอบที่นั่งเบาะยานยนต์โดยการกรองให้เหลือปัจจัยจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาความเสียหายของโครงสร้างที่นั่ง พบว่าการเสียหายของโครงสร้างเบาะที่นั่งรถยนต์นั้นจะเสียหายโดยตรงกับจุดที่รับแรงนั้นคือจุดยึดเข็มขัดนิรภัย นอกจากนี้ยังมีการออกแบบที่เรียบง่ายน้ำหนักเบาเพื่อลดต้นทุนวัสดุและต้นทุนการผลิต

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

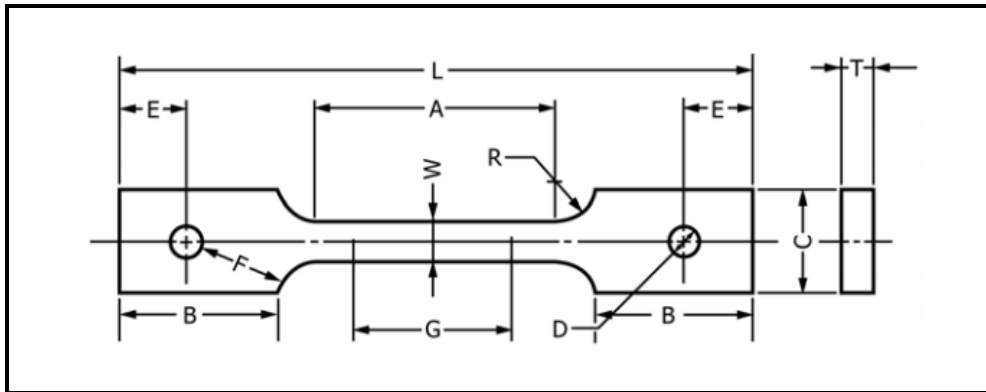
3.1 กล่าวนำ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สและนำวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงโดยการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส นำไปออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์สำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ ซึ่งงานวิจัยนี้มีความสนใจในการศึกษาความแข็งแรงของจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภย แบบ 2 จุดยึด โดยในการออกแบบจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภยจะอาศัยมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงตามเงื่อนไขข้อกำหนด ECE Regulation No.14 ว่าด้วยเรื่องของการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภยและ โครงสร้างที่นั่ง ซึ่งทำการวิเคราะห์ปัญหาโดยการใช้ระเบียบวิธีทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลอง โครงสร้างที่นั่งและชิ้นส่วนจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภยให้มีลักษณะใกล้เคียงกับงานจริงมากที่สุด และกำหนดเงื่อนไขการทดสอบให้ตรงกับเงื่อนไขที่ระบุไว้ใน ECE R-14 ซึ่งจะสามารถอธิบายอิทธิพลของวัสดุที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นส่วนจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภยและสามารถทำการออกแบบจุดยึดเชื่อมชนิดนิริภยให้เกิดความแข็งแรงสามารถใช้งานได้ต่อไปในอนาคต

3.2 การเตรียมชิ้นทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ชิ้นทดสอบเป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 ตามมาตรฐานของ AISI (American Iron and Steel Intitule) ซึ่งเป็นมาตรฐานของสถาบันเหล็กของสหรัฐอเมริกาแบ่งตามปริมาณคาร์บอน โดยปริมาณคาร์บอน 0.1% ชิ้นทดสอบประเภทแผ่นบางขนาดความหนา 3 mm

ลักษณะรูปร่างของชิ้นทดสอบอ้างอิง โดยมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) เป็นมาตรฐานของสมาคมวิชาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเป็นผู้กำหนดมาตรฐานขึ้นซึ่งเป็นที่นิยมใช้และเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ขนาดของชิ้นทดสอบตามมาตรฐานแรงดึงโลหะ คือ ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials



รูปที่ 3.1 ลักษณะชิ้นทดสอบแรงดิ่ง ASTM E8

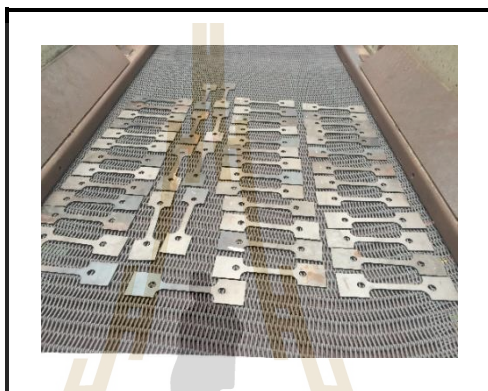
ตารางที่ 3.1 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแรงดิ่ง

ตัวแปร	ขนาด (mm)
ความยาวเกจ (G-Gage length)	50.0± 0.2
ความกว้าง (W-Width)	12.5 ± 0.2
ความหนา (T-Thickness)	3
รัศมีของส่วนโค้ง (R-Radius of fillet)	12.5
ความยาวทั้งหมด (L-Overall length)	200
ความยาวส่วนด้ามจับ (B-Length of grip section)	50
ความกว้างของส่วนด้ามจับ (C-Width of grip section)	20
ขนาดรู (D-Diameter of hole)	13
ความยาวจากรูถึงรัศมีโค้ง (F-Distance from hole to fillet)	13

3.3 การอบปกติชิ้นทดสอบ (Normalizing)

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ในการทดสอบ ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเหล็กกล้าด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ และผ่านการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางกล ทำให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดสูญเสียไป ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบทั้งความสม่ำเสมอความหนาแน่น และอาจเกิดความเครียดตกค้าง สิ่งที่เกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่ดีเหล่านี้สามารถทำให้หมดไปได้และปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการอบปกติให้กับชิ้นทดสอบก่อนการนำไปอบชุบแข็งผิวทางความร้อน เพื่อให้ชิ้นทดสอบมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

การอบปกติใช้วิธีอบให้ความร้อนกับชิ้นงานเหล็กจนมีอุณหภูมิสูงอยู่ในช่วงออสเทนไนท์ ทำการเผาที่อุณหภูมิอยู่เหนือเส้น A_3 ประมาณ $30-50^{\circ}\text{C}$ สำหรับเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ ที่ซึ่งไว้ที่ อุณหภูมินี้ประมาณ 30-60 นาทีต่อความหนาเฉลี่ย 25 mm จากนั้นนำชิ้นทดสอบออกจากเตาปล่อยให้เย็นในอากาศนิ่ง อัตราการเย็นตัวประมาณ $1-5^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ในการอบปกติเหล็กกล้า สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบ สำหรับชิ้นทดสอบ AISI 1010 ที่ใช้ในการทดสอบใช้อุณหภูมิ ในการอบปกติ 930°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเรียงชิ้นงานเข้าเตาอบปกติ

3.4 การพ่นทำความสะอาดผิวด้วยเม็ดโลหะ

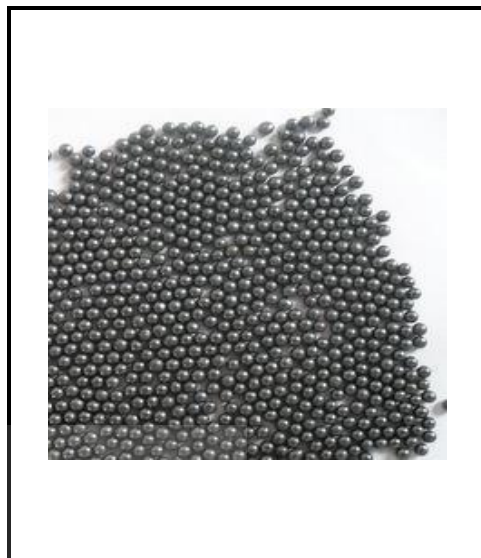
การทำความสะอาดผิวชิ้นทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการอบปกตินี้ใช้วิธีการพ่นด้วยเม็ดโลหะ ซึ่งเป็นวิธีการทำความสะอาดแบบแห้ง โดยการเลือกวัสดุในการพ่นทำความสะอาดเป็นสิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงทั้ง ขนาด รูปร่าง เนื่องจากจะมีผลต่อรายละเอียดพื้นผิวที่ต้องการหลังการพ่นทำความสะอาด วัสดุที่นิยมใช้ อย่างเช่น กรวดเหล็ก, เม็ดเหล็ก, ทราาย, แก้ว และสารพ่นชนิดอื่น ๆ

การพ่นทำความสะอาดหรือการทำความสะอาดผิวด้วยการยิงเม็ดโลหะ เป็นกระบวนการอัดเม็ดเหล็ก ให้กระทบโดนที่ผิวของชิ้นงาน ด้วยขนาดของเม็ดโลหะ และการกำหนดแรงอัดและความเร็วในการพ่นก็มีผลต่อการทำให้ชิ้นงานมีผิวที่สะอาดราบเรียบเช่นกัน

ชิ้นทดสอบหลังจากผ่านการอบปกติจะถูกนำมาทำความสะอาดผิว โดยการพ่นทำความสะอาดด้วยเม็ดโลหะกลม (Ball) ขนาด 0.3 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน 60 นาที ด้วยเครื่องยิงเม็ดโลหะ (Shot Blasting Machine) GROWELL รุ่น GW-10



รูปที่ 3.3 ลักษณะการเรียงชิ้นทดสอบภายใน
เครื่องยิงเม็ดโลหะ



รูปที่ 3.4 ลักษณะเม็ดโลหะกลม 3 mm

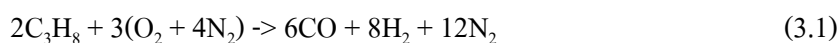
3.5 กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทำความสะอาดผิวแล้วจะนำมาชุบแข็งผิวโดยกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส (Gas surface hardening methods) ทั้งหมด 2 กระบวนการคือ

1. กระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (Gas Carburizing, CB)
2. กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ไนตรายดิงกับแก๊สคาร์บูไรซิง (Gas Soft-nitriding and Gas Carburizing, SN+CB)

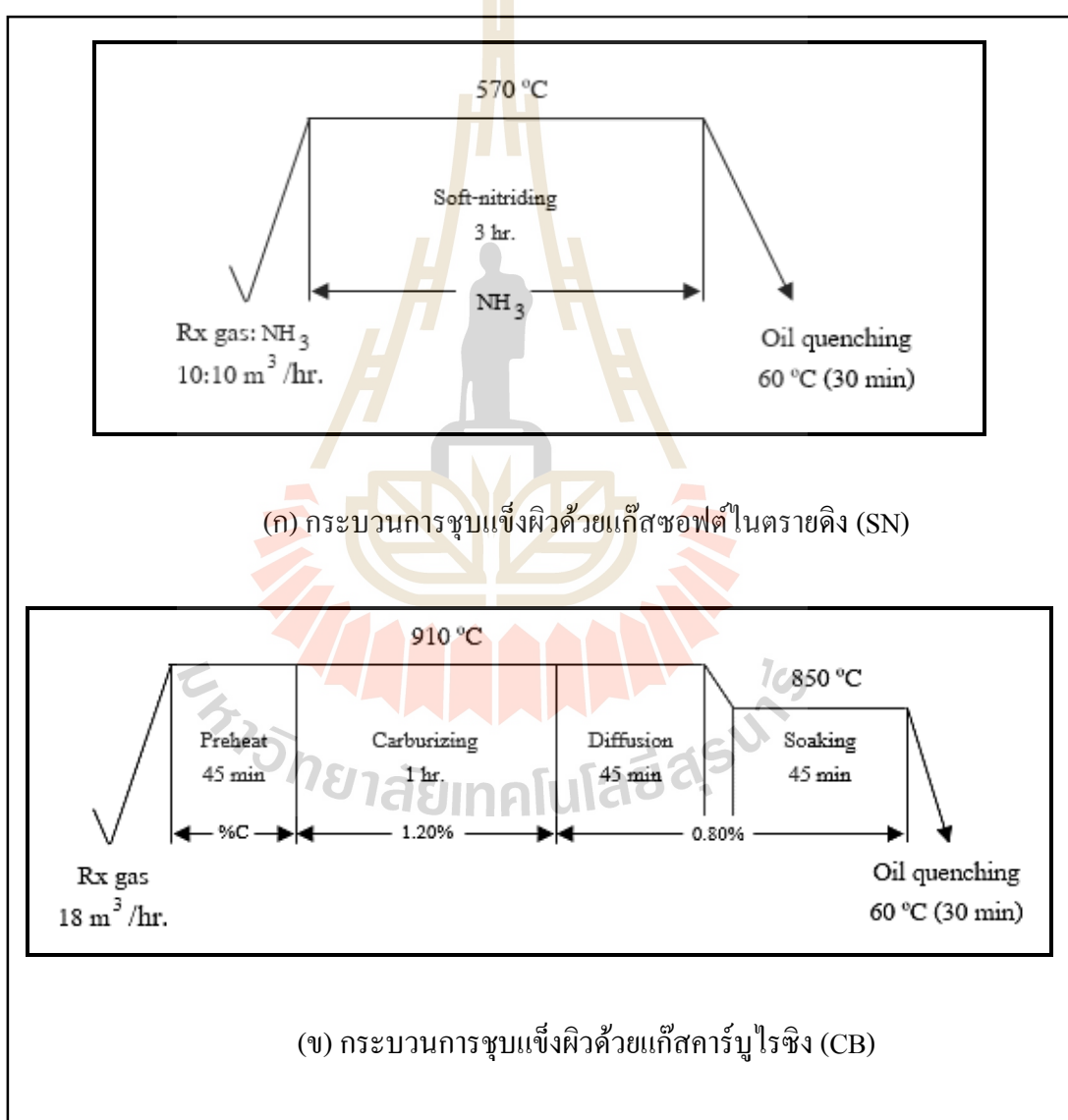
การชุบแข็งผิว เพื่อให้เหล็กมีความแข็งแรงบริเวณผิว ส่วนเนื้อเหล็กภายในผิวแข็งจนถึงใจกลางยังคงเป็น โครงสร้างวัสดุเดิมซึ่งมีความเหนียว การชุบแข็งผิวด้วยแก๊สเป็นการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีที่ผิวเหล็กด้วยการแพร่ซึม (Diffusion) ของธาตุคาร์บอน, ธาตุไนโตรเจน หรือธาตุอื่น ๆ

ตัวเพิ่มธาตุคาร์บอนในกระบวนการชุบแข็งผิว เรียกว่า อาร์เอ็กซ์แก๊ส (Rx gas) หรือ เอ็นโดเทอร์มิกแก๊ส (Endothermic gas) ที่ได้จากการแตกตัว (Clacking) จากแก๊สโพรเพน (C_3H_8) ในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก่อนนำไปใช้ในเตา โดยการทำปฏิกิริยาของโพรเพนกับอากาศที่อุณหภูมิ $40^\circ C$ ดังสมการที่ 3.1



ตัวเพิ่มธาตุไนโตรเจนในกระบวนการชุบแข็งผิวได้จากการใช้แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ในการทำปฏิกิริยาจะแตกตัวให้ไนโตรเจน (N) ในเตา

โดยในกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิงจะใช้ทั้งอาร์เอ็กซ์แก๊ส (Rx gas) และแก๊สแอมโมเนีย และในกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงใช้อาร์เอ็กซ์แก๊ส (Rx gas) อย่างเดียว แสดงรูปแบบกระบวนการชุบแข็งผิวที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 กระบวน ดังรูปที่ 3.5 (ก) กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนไตรดิง และ (ข) กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง กระบวนการชุบแข็งผิวนี้อ้างอิงจากบริษัทไทโตคอนเทออร์โม จำกัด



รูปที่ 3.5 รูปแบบการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

3.6 การอบคืนตัว (Tempering)

การอบคืนตัวเป็นการปรับโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ซึ่งในภายหลังกระบวนการชุบแข็งผิวจะไม่เหมาะที่นำวัสดุไปใช้งานทันที เนื่องจากมีความเครียดตกค้างสูงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส ความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอ หรืออาจจะเกิดการแตกร้าวในขณะที่ใช้งาน จึงต้องอบคืนตัวเพื่อเพิ่มความเหนียวและความแกร่งให้กับชิ้นทดสอบ ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนตัว เพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไปหรือเหลืออยู่น้อยที่สุด และในขณะเดียวกันจะทำให้มาร์เทนไซต์แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุล (Tempered martensite) ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนตัวและเวลาที่ใช้

การอบคืนตัวเป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_1 ภายหลังเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้ว จะปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ภายในอากาศ การเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์เหลือค้างไปสู่โครงสร้างกึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กัน ดังนี้

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิปานกลาง ($350-450^{\circ}\text{C}$) เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูงและคุณสมบัติทางด้านยืดหยุ่นสูง โครงสร้างของเหล็กจะใกล้เคียงกับเบนไนท์ หรือทรูสไตต์

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง ($500-650^{\circ}\text{C}$) เพื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไป และให้เหล็กมีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวสูง โดยมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงด้วย โครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็นเฟอไรต์ละเอียดใกล้เคียงกับโครงสร้างซอไบท์

ตารางที่ 3.2 การอบคืนตัวภายหลังกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

กระบวนการ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)
กระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB)	400, 500, 550	2
กระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพตี๋ในทรายคิง และกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB)	400, 500, 550	2

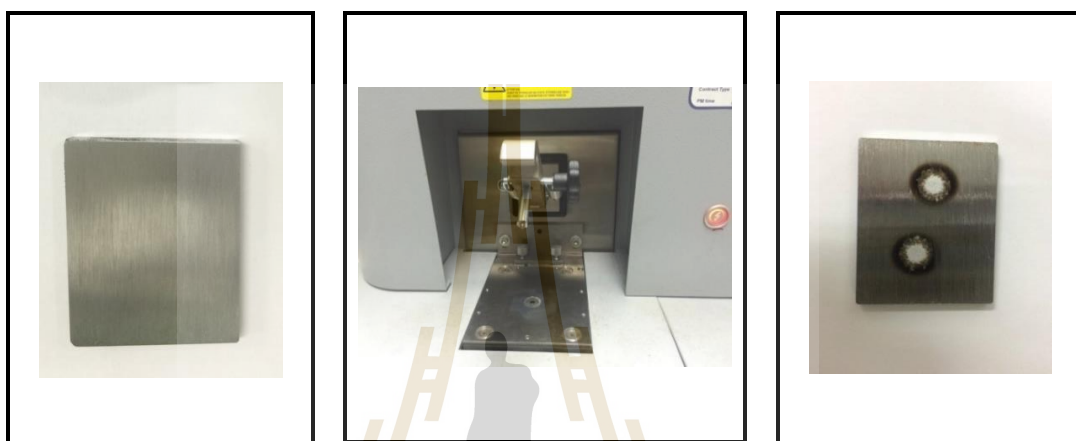
3.7 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติวัสดุ

3.7.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีหรือธาตุผสมที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบทั้งก่อนและหลังจากผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อน สามารถวิเคราะห์ได้โดยเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็งด้วยเครื่องมือ Spectrometer อาศัยหลักการทำให้สาร

เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นเพื่อให้สารที่จะวิเคราะห์นั้นเปล่งแสงหรือสเปกตรัมออกมา โดยใช้เครื่องมือ คือ Optical emission spectrometer (OES) ของ Thermo Scientific รุ่น ARL 3460 METALS ANALYZER

โดยก่อนการทดสอบต้องเตรียมผิวของชิ้นงานให้มีความสะอาดและราบเรียบ เพื่อผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 3.6 การ Spark emission spectrometer

3.7.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ เทคนิคพื้นฐานที่ใช้กันแพร่หลายในการตรวจสอบ จะอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ ได้ทั้งสารประกอบ ทำให้ Pattern ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณหรือ หาลำดับประกอบตัวอย่าง ที่เป็น Amorphous ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้ จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การตรวจสอบการจัดเรียงตัวของโครงสร้างหรือสารประกอบนั้น สามารถทำได้โดยการใช้เครื่อง XRD (X-ray diffraction) รุ่น D8 Advance โดยการเตรียมชิ้นทดสอบ จะนำชิ้นทดสอบบรรจุลงในอุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นทดสอบ เพื่อวางผิวหน้าของด้านที่ต้องการทดสอบให้ได้ระนาบ

จากนั้นนำเข้าเครื่อง XRD ในขั้นตอนที่เราสามารถที่จะกำหนดเวลาในการตรวจวัดความเข้มของรังสีเลี้ยวเบน ข้อมูลตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน จากมุม 35-85 องศา

เมื่อได้ผลจากการตรวจสอบขั้นทดสอบแล้ว นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EVA จะสามารถเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานที่เก็บรวบรวมไว้ ทำให้สามารถจำแนกชนิดของสารประกอบต่างๆ บนผิวขั้นทดสอบได้



รูปที่ 3.7 การติดตั้งขั้นทดสอบบนเครื่อง XRD

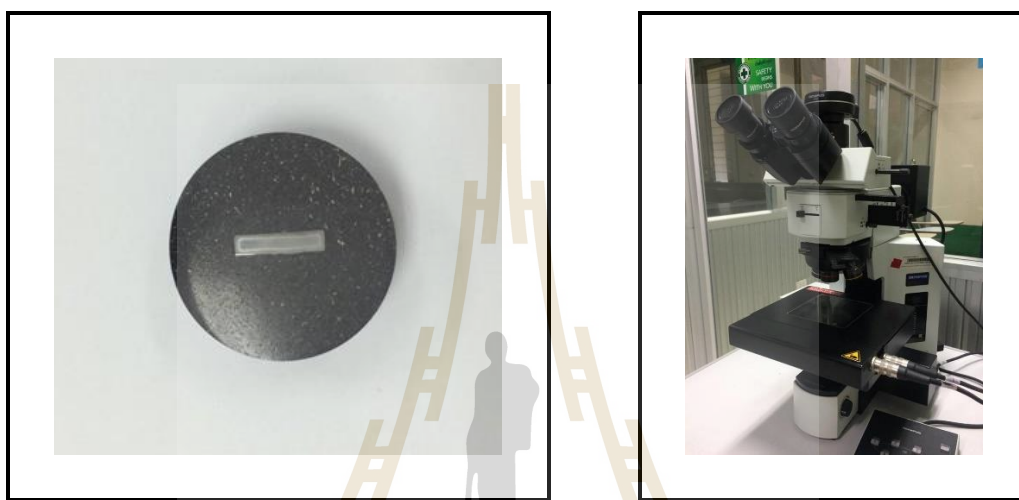
3.7.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ลักษณะ โครงสร้างขั้นทดสอบที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็ก สามารถใช้การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสง (Optical microscopes, OM) โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ตัดแบ่งครึ่งขั้นทดสอบด้วยเครื่องตัด (Cut off machine) มีการหล่อเย็นเพื่อป้องกันความร้อนที่เกิดจากการตัดขั้นทดสอบ ซึ่งความร้อนอาจส่งผลต่อค่าความแข็งของขั้นทดสอบได้
- 2) การอัดพลาสติก (Mounting) นำขั้นทดสอบอัดผงพลาสติก เพื่อให้ขั้นทดสอบมีขนาดและรูปทรงที่เหมาะสมกับการขัด ควรอัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ออบคืนไฟ
- 3) การเตรียมผิวหน้าขั้นทดสอบ ขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบมาก ๆ จนถึงกระดาษทรายที่มีความละเอียด ได้แก่เบอร์ 100, 180, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดที่มีน้ำผสมผงขัดอะลูมินา (0.3 ไมครอน) ขัดจนมีความเงาคล้ายกระจก

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

5) นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการเตรียมผิวอย่างเรียบร้อย ตรวจสอบ โครงสร้างและวัดขนาดของชั้นผิวขาวด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสง ยี่ห้อ Nikon measuring microscope รุ่น MM-400 และโปรแกรม NIS-Element D สำหรับการตรวจสอบ โครงสร้างของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.8 ลักษณะชิ้นทดสอบและเครื่อง Optical microscopes, OM

3.7.4 การวิเคราะห์ตรวจธาตุและสารประกอบ

จากการเดิมธาตุคาร์บอนในการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง และการเดิมธาตุไนโตรเจนและคาร์บอนในการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนไตรดิง และคาร์บูไรซิง สามารถตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวชิ้นทดสอบได้โดยการใช้เทคนิค Scanning electron microscopy, SEM ร่วมกับเทคนิค Energy dispersive X – ray spectroscopy, EDS แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของตัวเลขและกราฟ สามารถวิเคราะห์ปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุในชิ้นทดสอบ

วิเคราะห์โดยการส่องกราดตามแนวเส้น (Line scan analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนตามแนวนบนชิ้นทดสอบ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว เหมาะกับการหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

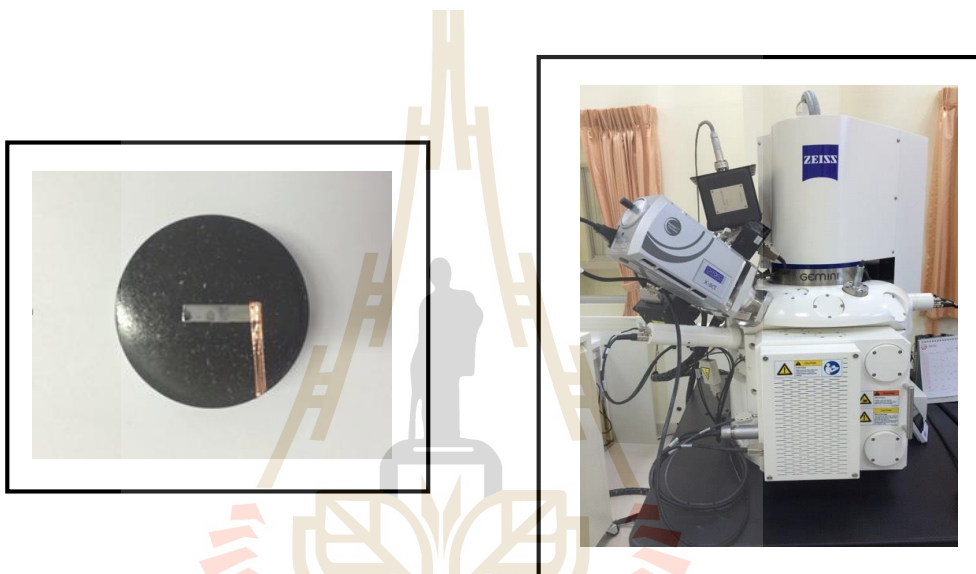
ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ

1) ตัดชิ้นงาน (Cutting) แบ่งครึ่งส่วนบริเวณที่จะตรวจสอบ ในขณะที่ตัดควรมีน้ำหล่อเย็น และใช้ความเร็วระดับต่ำเพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการไหม้

2) การอัดพลาสติก (Mounting) นำชิ้นทดสอบอัดผงพลาสติก เพื่อให้ชิ้นทดสอบมีขนาดและรูปทรงที่เหมาะสมกับการขัด ควรรัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้อบคืนไฟ

3) การขัด (Grinding) เริ่มต้นจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทราย เบอร์ 100, 180, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 โดยใช้เครื่องขัดที่มีน้ำไหลผ่าน ขัดให้ผิวหน้าที่ถูกตัดเป็นระนาบและราบเรียบ

4) ทำการวิเคราะห์ โดยเริ่มวัดจากบริเวณผิวผู้เข้าสู่ศูนย์กลางชิ้นทดสอบตามระยะการซึมลึกของธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจน



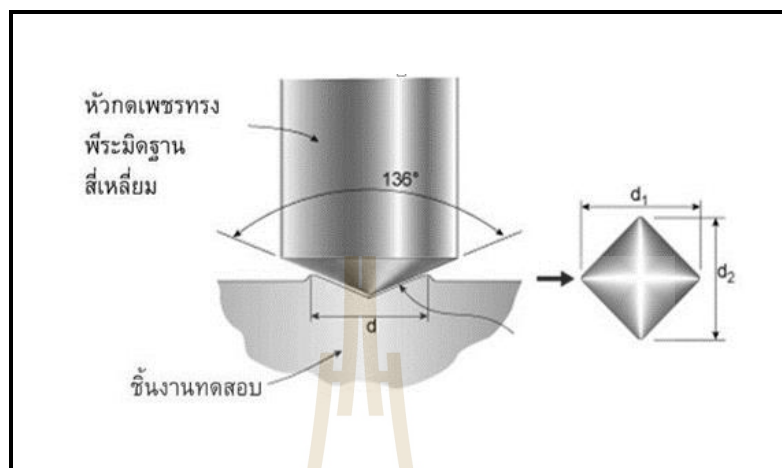
รูปที่ 3.9 ลักษณะชิ้นทดสอบและเครื่อง SEM และ EDS

3.7.5 การทดสอบค่าความแข็งและการซึมลึก

ค่าความแข็งของวัสดุเป็นสมบัติเชิงกลพื้นฐานที่ชี้ให้เห็นสมบัติโดยรวมของวัสดุจากการเพิ่มความแข็งให้กับผิวชิ้นทดสอบหรือการชุบแข็งผิวนั้น ความแข็งที่เพิ่มขึ้นบริเวณผิวจะต่างจากเนื้อวัสดุภายใน ทั้งนี้เกิดจากการซึมลึก (Case depth) ของธาตุผสมที่เติมเข้าไป ดังนั้นความแข็งที่เพิ่มขึ้นย่อมบ่งชี้ถึงการซึมลึกของธาตุผสมด้วยเช่นกัน

ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) หัวกดลักษณะหัวกดเพชร ซึ่งมีรูปร่างเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีมุมระหว่างผิวหน้าด้านตรงข้ามกันเท่ากับ 136 องศา แรงกดที่ใช้อยู่ระหว่าง 100 กรัม ใช้ระยะเวลาประมาณ 10 วินาที รอยที่กดขึ้นมีขนาดเล็กในระดับไมครอน จึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์ในการช่วยขยายภาพ ค่าความแข็งจะถูกคำนวณไว้แล้วที่ความยาวรอยกดและขนาดแรงกด ในรูปของตารางหรืออาจจะมีการแสดงค่าความแข็งด้วย

ระบบอัตโนมัติเป็นตัวเลขจากเครื่องทดสอบโดยตรง หน่วยความแข็งคือ HV หรือ VHN เครื่องที่ใช้ในครั้งนี้ คือ เครื่อง Micro Vickers Hardness Testing ยี่ห้อ Future-Tech



รูปที่ 3.10 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งและการชิมลึกผิวแข็ง

- 1) การตัดชิ้นทดสอบ (Cutting) แบ่งครึ่งส่วนบริเวณที่จะตรวจสอบ ในขณะที่ตัดควรมีน้ำหล่อเย็นและใช้ความเร็วระดับต่ำเพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการไหม้
- 2) การอัดพลาสติก (Mounting) นำชิ้นทดสอบอัดผงพลาสติก เพื่อให้ชิ้นทดสอบมีขนาดและรูปทรงที่เหมาะสมกับการขัด ควรอัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้อบคืนไฟ
- 3) การขัด (Grinding) เริ่มต้นจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทราย เบอร์ 100, 180, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 โดยใช้เครื่องขัดที่มีน้ำไหลผ่าน ขัดให้ผิวหน้าที่ถูกตัดเป็นระนาบและราบเรียบ
- 4) ทำความสะอาดผิวชิ้นทดสอบและเป่าลมร้อนให้แห้งสนิท
- 5) นำชิ้นทดสอบวางบนแท่นจัดชิ้นทดสอบ เครื่องวัดความแข็งเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยหลักการทำงาน คือ ให้หัวกดเคลื่อนที่ลงมาช้า ๆ จนสัมผัสกับชิ้นทดสอบ จึงค่อย ๆ เพิ่มแรงกดไปให้ถึง 100 กรัม เมื่อสิ้นสุดหัวกดที่เคลื่อนขึ้นไปยังตำแหน่งเริ่มต้น พบว่าชิ้นทดสอบเกิดรอยกดเป็นรูปทรงพีระมิด (Pyramidal) ขนาดเล็ก
- 6) ทำการวัดความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดโดยผู้ปฏิบัติงาน เครื่องวัดความแข็งจะทำการคำนวณหาค่าความแข็งจากความยาวเส้นทแยงมุมที่ผู้ปฏิบัติงานได้วัด โดยใช้สมการข้างล่างนี้นำมาคำนวณ

$$HV = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (3.2)$$

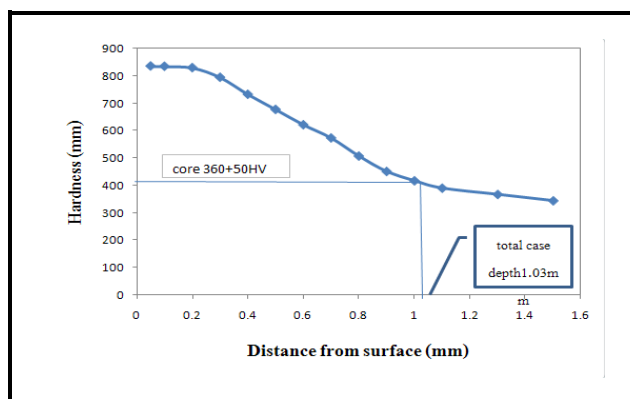
กำหนดให้

- HV คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส หน่วยเป็น H_v
 F คือ ค่าแรงที่ใช้กดใน หน่วยกิโลกรัม
 d คือ ความยาวของแนวทแยงของรอยกดในหน่วยมิลลิเมตร

ค่าความแข็งของชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิว จะมีค่าความแข็งสูงสุดที่บริเวณผิว และค่าความแข็งลดลงตามความลึกภายในชั้นทดสอบ ในการวัดค่าดังกล่าวจะวัดโดยค่าความลึกผิวแข็งทั้งหมด (Total case depth) คือ วัดจากระยะจากผิวนอกสุดถึงบริเวณใจกลางจุดแรกที่ค่าความแข็งคงที่ (Core hardness) หลังจากนั้นบวกค่าความแข็งเพิ่ม 50 HV ดังแสดงตามกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งจากผิวนอกสุดเข้าไปถึงใจกลางเนื้อชั้นทดสอบ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 รอยกดที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์ส



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับระยะการซึมลึก



รูปที่ 3.13 เครื่อง Micro Vickers Hardness Testing ของ Future-Tech

3.7.6 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบสมบัติวัสดุเชิงกลด้วยการให้แรงดึง เป็นการวัดความต้านทานแรงดึงของวัสดุด้วยการนำชิ้นทดสอบยึดออกตามแนวแกน โดยการให้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนวัสดุเกิดความเสียหาย

เครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) ยี่ห้อ Loyd 100 ขนาดโหลดเซลล์ 100 กิโลนิวตัน โดยกำหนดให้อัตราการยืดตัว 1 มิลลิเมตร/นาที เครื่องมือวัดการยืดตัว (Extensometer) ติดอยู่บนชิ้นงานทดสอบ เพื่อวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงความยาวเกจวัดการยืดตัวโดยใช้ Extensometer ยี่ห้อ Epsilon มีความยาวเกจ (Gauge Length) 50 มิลลิเมตร ดังแสดงรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ชั้นทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์ Extensometer
กับชั้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง

การวัดค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) ตามมาตรฐานการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ASTM E 132 อัตราส่วนปัวซองสามารถหาได้จากการวัดค่าความเครียดในแนวแกนแรงดึงและความเครียดแนวขวางกับแรงดึง ในงานวิจัยนี้ใช้เกจวัดความเครียดยี่ห้อ TML ชนิด FLA-1-11-1L มีค่าคงที่เกจ (Gauge Factor) $2.14 \pm 1\%$ มีค่าความต้านทานเกจ (Gauge Resistance) $120.3 \pm 0.5 \Omega$ และระยะเกจ (Gauge Length) 1 mm ซึ่งมีเครื่องขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูลและแปรผลยี่ห้อ KYOWA รุ่น EDX-10B และ EDX-11A การติดตั้งเกจวัดความเครียดในชิ้นงานทดสอบจะทำก่อนการทดสอบ 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่ากาาแห้งสนิทและยึดเกาะกับชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้ว ลักษณะการติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.15

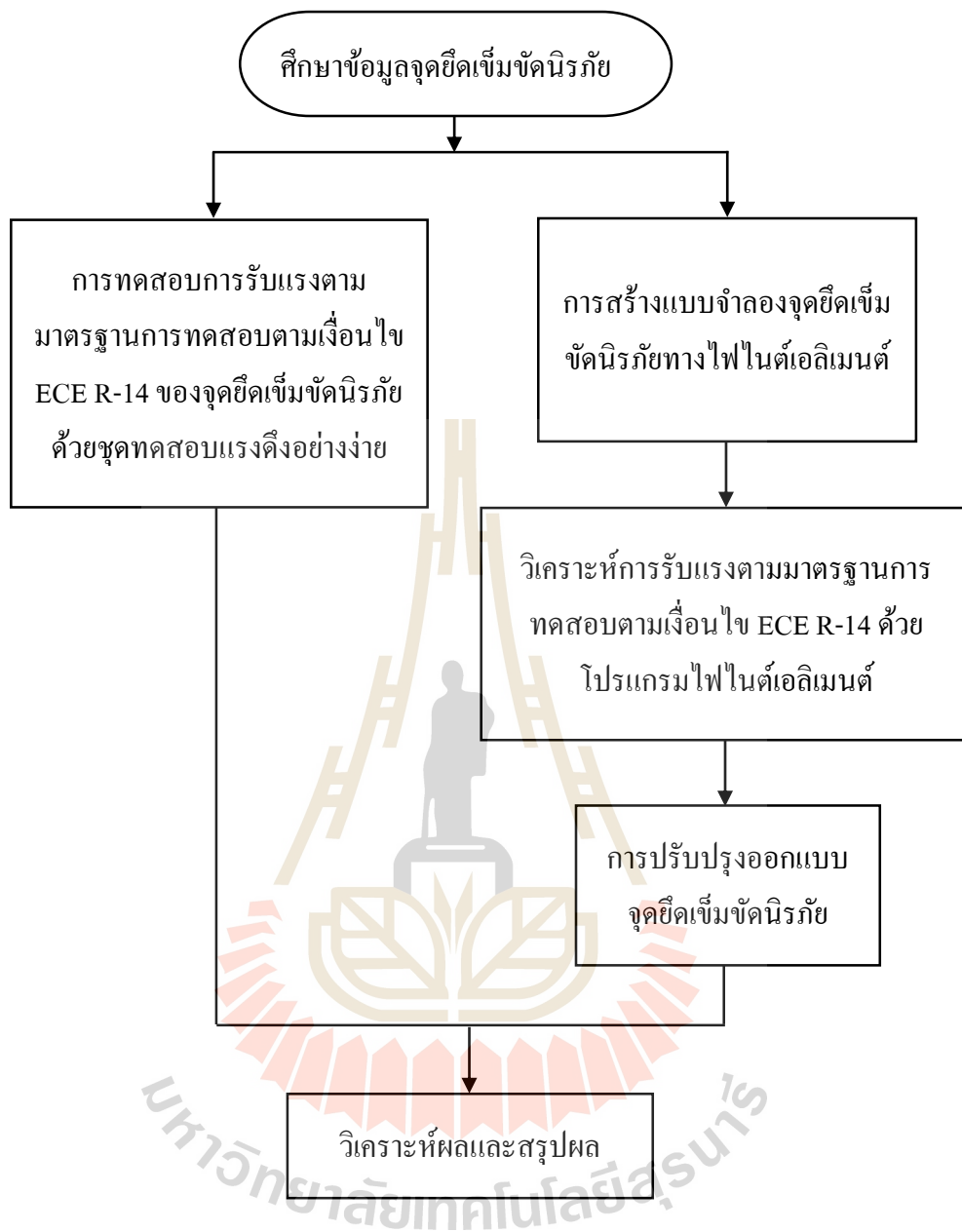


รูปที่ 3.15 ชั้นทดสอบและอุปกรณ์การติดตั้ง Strain Gauge กับชั้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงนั้นสามารถนำผลจากการทดสอบที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าสมบัติของวัสดุจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งสามารถหาค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength), ค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ทั้งหมดที่กล่าวมานี้สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve)

3.8 การวิเคราะห์และออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย เป็นการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยและโครงสร้างที่นั่ง ตามมาตรฐานการทดสอบและเกณฑ์การประเมินความปลอดภัยเงื่อนไขข้อกำหนด ECE R-14 พร้อมทั้งนำวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สมาทดลองใช้งานจริง โดยผ่านการวิเคราะห์ผลด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งนี้ยังมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยนำไปเทียบเคียงกับแนวโน้มผลการทดสอบจริงด้วยชุดทดสอบแรงดึงอย่างง่าย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.16

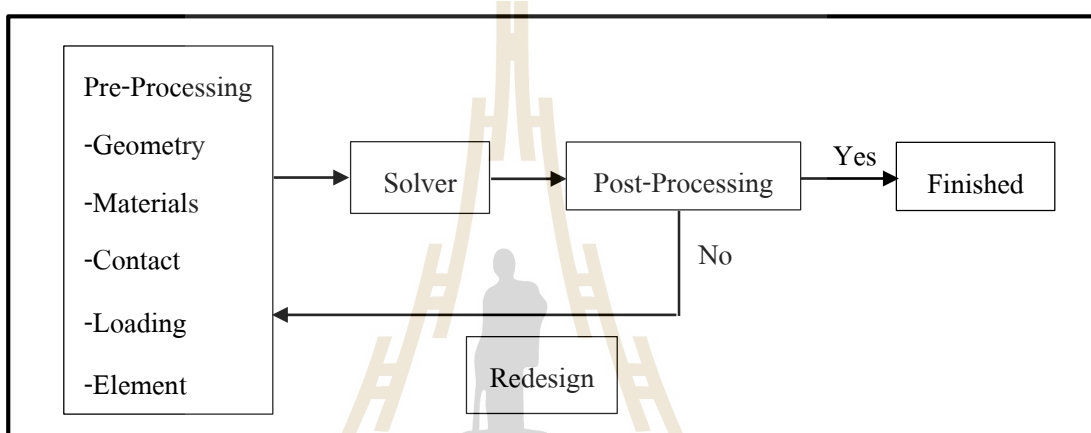


รูปที่ 3.16 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดเสริมชนิดนิกเกิ้ล

3.8.1 การวิเคราะห์และออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

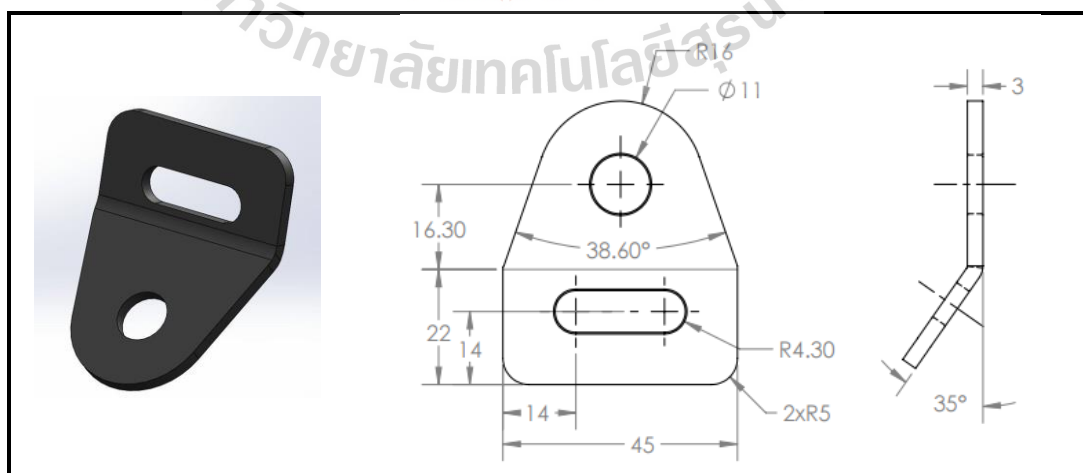
ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. ก่อนการประมวลผล (Pre-Processing)
2. หาผลเฉลย (Solver)
3. แสดงผลเฉลย (Post-Processing)
4. ออกแบบ (Redesign)



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

Geometry คือ การสร้างแบบจำลองโครงสร้างชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS (CAD Model) โดยมีความหนาเท่ากับ 3 mm ลักษณะตามรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ลักษณะรูปทรงและของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

Material คือ ขั้นตอนการกำหนดสมบัติวัสดุจะนำวัสดุหลังผ่านกระบวนการปรับปรุงวัสดุ โดยการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส ที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เอนกประสงค์ ผลการทดสอบวัสดุภายในห้องปฏิบัติการค่าที่ได้นั้นมีค่าความเค้นทางวิศวกรรม ซึ่งยังไม่ใช่ความเค้นจริง โดยคำนวณความเค้นพิจารณาแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้ววัสดุมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดเมื่อความเค้นในวัสดุสูงขึ้นจนถึงค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ดังนั้นการพิจารณาความเค้นโดยเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจึงเป็นค่าความเค้นที่แท้จริง ในทางปฏิบัติจึงมีการกำหนดค่าความเค้นจริง-ความเครียดจริงก่อน สามารถหาได้โดยสมการที่ (3.3) และ (3.4) และกำหนดสมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic elasticity)

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (3.3)$$

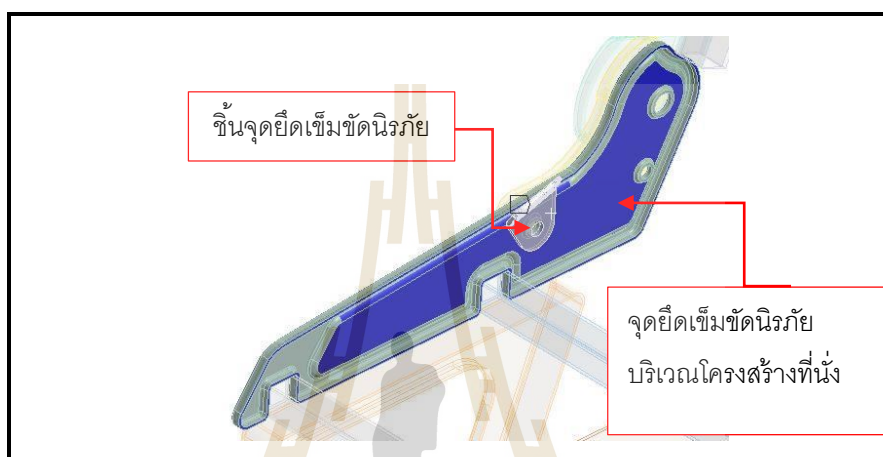
$$\sigma_t = \sigma_e (1 + \varepsilon_e) \quad (3.4)$$

กำหนดให้	ε_e	คือ	ความเครียดทางวิศวกรรม
	ε_t	คือ	ความเครียดจริง
	σ_e	คือ	ความเค้นทางวิศวกรรม
	σ_t	คือ	ความเค้นจริง

ตารางที่ 3.3 สมบัติของวัสดุที่ได้จากการคำนวณความเค้น-ความเครียดจริง

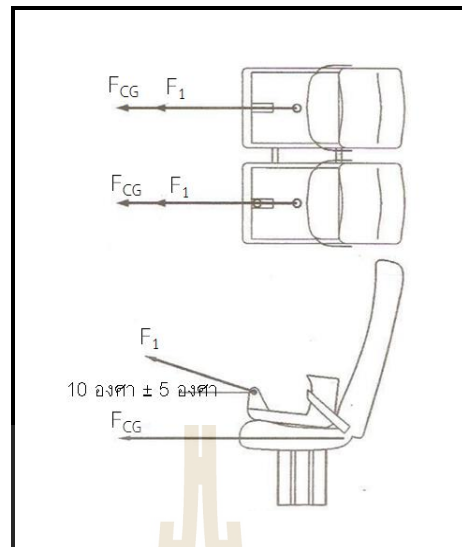
ประเภทวัสดุ	ความเค้นสูงสุด (σ_u) (MPa)	ความเค้นคราก (σ_y) (MPa)	มอดูลัสยืดหยุ่น (E) (GPa)	Tangent modulus (MPa)	%Elongation	อัตราส่วนปัวซอง (ν)
AISI 1010 (Normalizing)	362.9	192.9	-	399.0	42.23	0.31
CB-T400	619.4	438.1	172.1	4083.0	7.31	0.29
CB-T500	612.9	420.1	170.4	2866.9	9.04	0.30
CB-T550	480.7	309.7	174.6	1350.8	14.46	0.30
SN+CB-T400	733.6	602.8	165.9	4511.3	6.76	0.28
SN+CB-T500	558.2	424.1	174.1	2875.5	7.04	0.32
SN+CB-T550	514.4	350.1	171.2	2105.7	9.86	0.29

Contact คือ การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส การกำหนดพื้นที่สัมผัสระหว่างหน้าสัมผัสของแบบจำลองชิ้นทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยเข้ากับน็อตยึดกับตัวโครงสร้างที่นั่ง โดยใช้ขนาด 10 mm ได้กำหนดให้มีความใกล้เคียงกับการทดสอบจริงให้มากที่สุด โดยการกำหนดจุดยึดเป็นแบบตรึงแน่น (Fixed support) ระหว่างบริเวณตำแหน่งจุดยึดเข็มขัดนิรภัยของโครงสร้างที่นั่งกับชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย



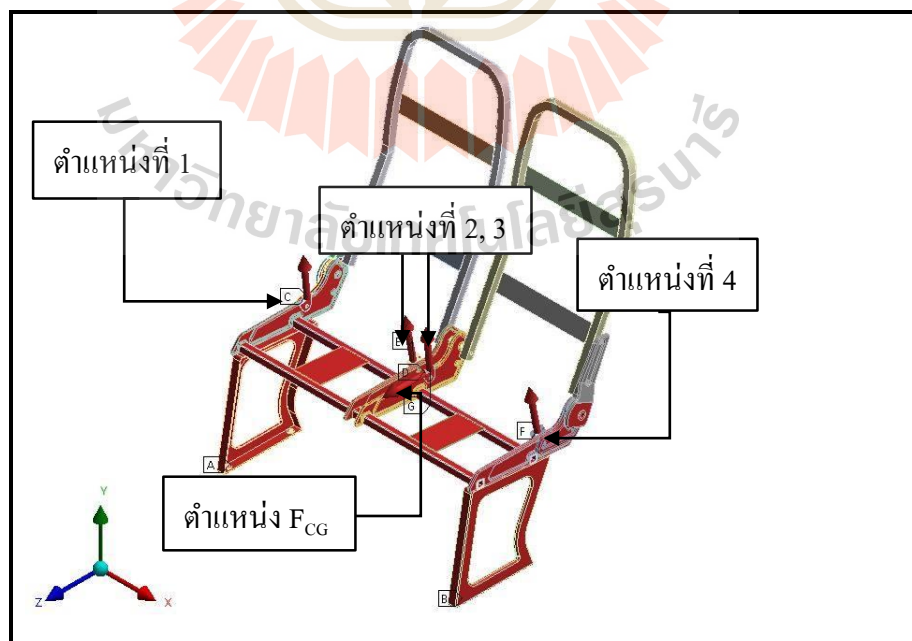
รูปที่ 3.19 ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสตำแหน่งของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

Loading คือ การกำหนดภาระกระทำ (Load) กำหนดตามเงื่อนไขข้อกำหนด ECE R-14 ข้อกำหนดระบุว่า ต้องให้แรง $F_1 = 7400 \pm 200$ นิวตัน และแรง $F_{CG} = 6.6$ เท่าของน้ำหนักของที่นั่ง และกระทำผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงขนานกับแนวนอน ในการกำหนดภาระแรงกระทำในแบบจำลองทางระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ได้ตั้งสมมติฐานว่า “แรงดึงของเข็มขัดนิรภัยระหว่างอุปกรณ์ดึงและจุดยึดเข็มขัดนิรภัยที่ตำแหน่งโครงสร้างที่นั่งเป็นแรงที่กระทำต่อจุดยึดเข็มขัดนิรภัยโดยตรง” ดังนั้นแรงที่กระทำต่อจุดยึดเข็มขัดนิรภัยในแต่ละจุดที่โครงสร้างที่นั่งค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรง F_1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3700 นิวตัน ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ภาระกระทำ (Load) โดยข้อกำหนดการทดสอบตามเงื่อนไข ECE R-14

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์จุดยึดเข็มขัดนิรภัยอย่างง่าย โดยไม่มีการพิจารณาโครงสร้างที่นั่ง จึงได้มีการกำหนดแรงในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ตามงานวิจัยก่อนหน้านี้ (พิตินันท์, 2558) ซึ่งในการกำหนดขนาดและทิศทางของแรงในแนวแกนเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะและรูปร่างของเบาะที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่

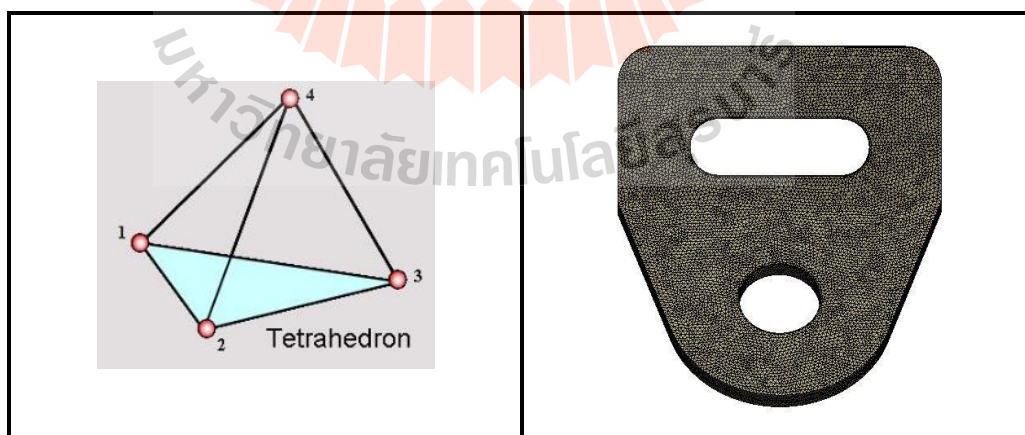


รูปที่ 3.21 ตำแหน่งจุดยึดเข็มขัดนิรภัยที่ให้ภาระแรง F_{belt} และแรง F_{CG}

ตารางที่ 3.4 ภาวะแรงกระทำที่กำหนดในแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

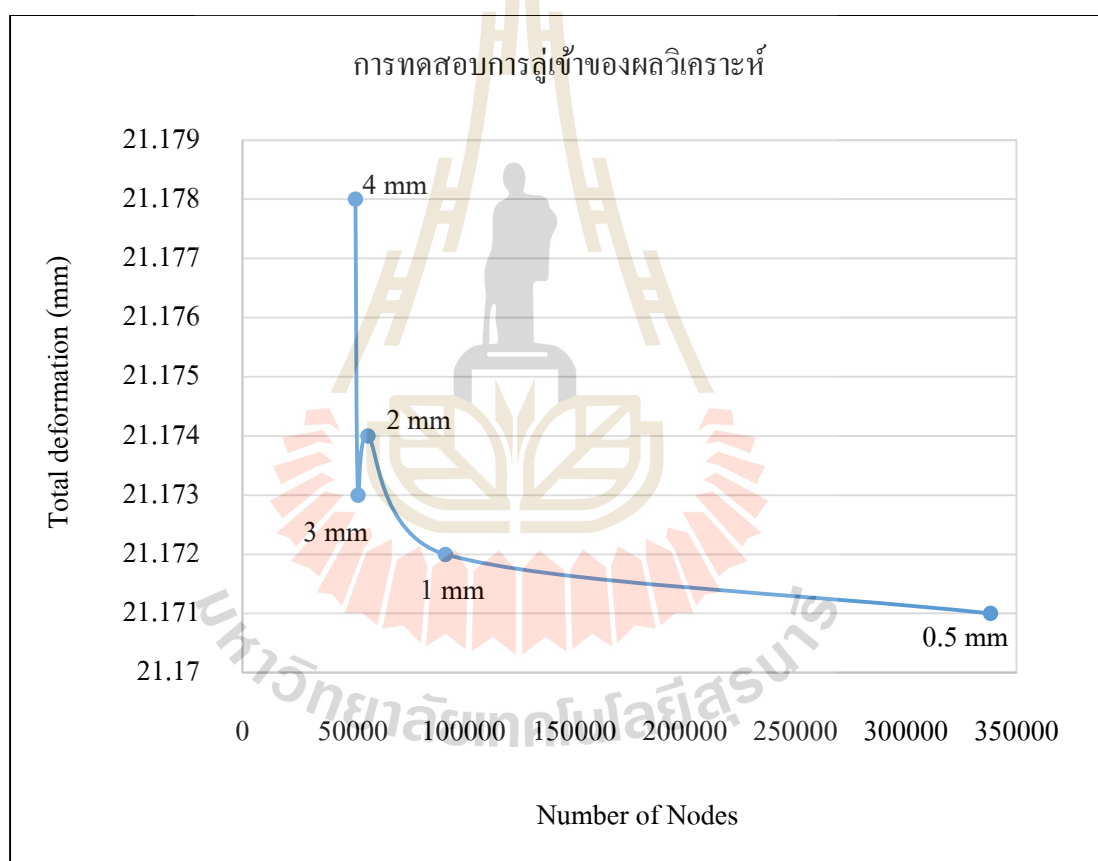
ตำแหน่ง	แรงในแนวแกน x (N)	แรงในแนวแกน y (N)	แรงในแนวแกน z (N)
แรงกระทำจุดยึดตำแหน่งที่ 1	199.06	3651.90	551.30
แรงกระทำจุดยึดตำแหน่งที่ 2	-199.06	3651.90	551.30
แรงกระทำจุดยึดตำแหน่งที่ 3	199.06	3651.90	551.30
แรงกระทำจุดยึดตำแหน่งที่ 4	-199.06	3651.90	551.30
แรง F_{CG}	0	0	1230.00

Element คือ การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ ซึ่งแบบจำลองจุดยึดเข็มขัดนิรภัยเป็นลักษณะที่ไม่ซับซ้อน สามารถสร้างแบบจำลองเป็นแบบโครงสร้าง กำหนดเอลิเมนต์ประเภท 3 มิติ แบบทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ (Tetrahedral element) ดังรูปที่ 3.22 โดยการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ (Element) เท่ากับ 0.5 mm ให้กับแบบจำลองชิ้นทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย การหาผลเฉลยของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นผู้เข้าสู่ผลเฉลยแม่นยำ โดยวิธีการลดขนาดของเอลิเมนต์ลงเรื่อย ๆ ซึ่งในแบบจำลองชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยมีจำนวน 367,949 เอลิเมนต์ 71,165 จุดต่อ

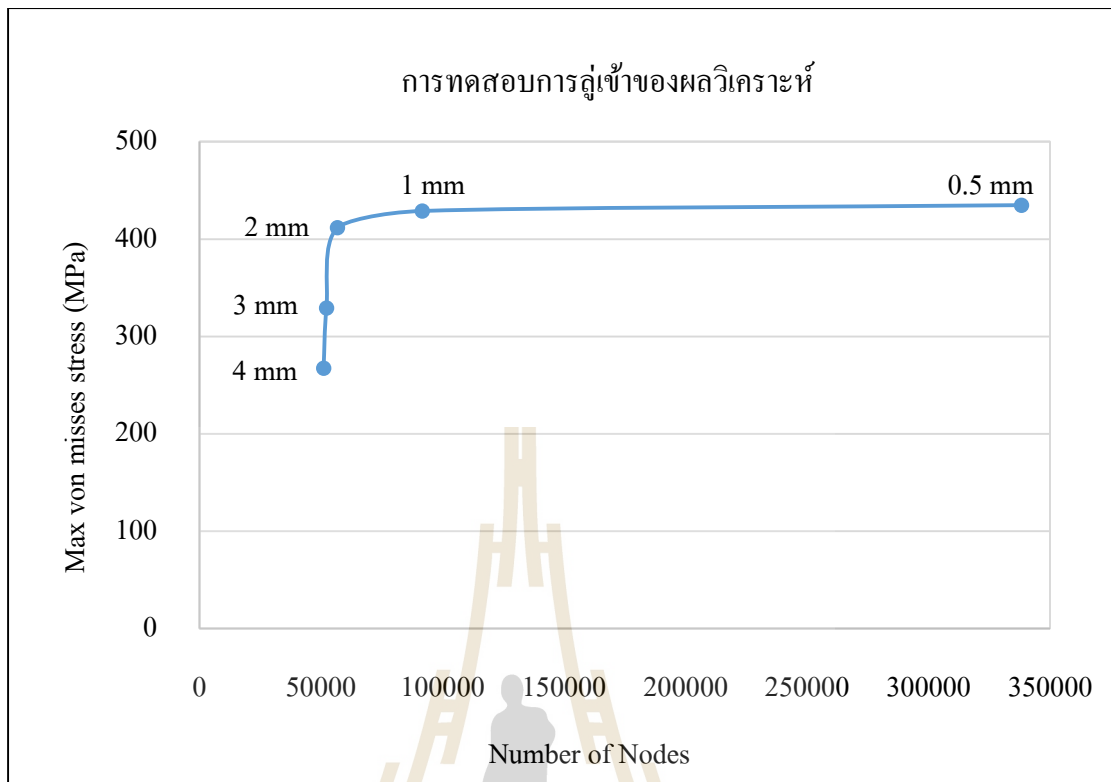


รูปที่ 3.22 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ

จากทฤษฎีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นถ้าขนาดของเอลิเมนต์มีขนาดเล็กลง ก็จะทำให้ผลเฉลยลู่เข้าสู่ผลเฉลยแม่นยำมากขึ้น ซึ่งหากปรับลดขนาดของเอลิเมนต์ให้เล็กลงเรื่อย ๆ จนผลเฉลยนั้นไม่มีความแตกต่างหรือมีความแตกต่างในแต่ละช่วงเอลิเมนต์ที่น้อยมาก ซึ่งหมายความว่าผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นลู่เข้าสู่ผลเฉลยแม่นยำตรง ในการทดลองนั้นได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และทำการลดขนาดของเอลิเมนต์ลงเรื่อย ๆ จนกว่าผลเฉลยของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะมีแนวโน้มคงที่และเริ่มเป็นเส้นตรง ในการทดสอบดังกล่าวจะพิจารณาค่าการเสียรูปสูงสุด (Maximum Displacement) และค่าความเค้นพอนมิสสูงสุด (Maximum von Mises stress) ดังรูปที่ 3.23 และรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 ผลการลู่เข้าของค่าการเสียรูปสูงสุดที่ได้ทำการทดสอบ

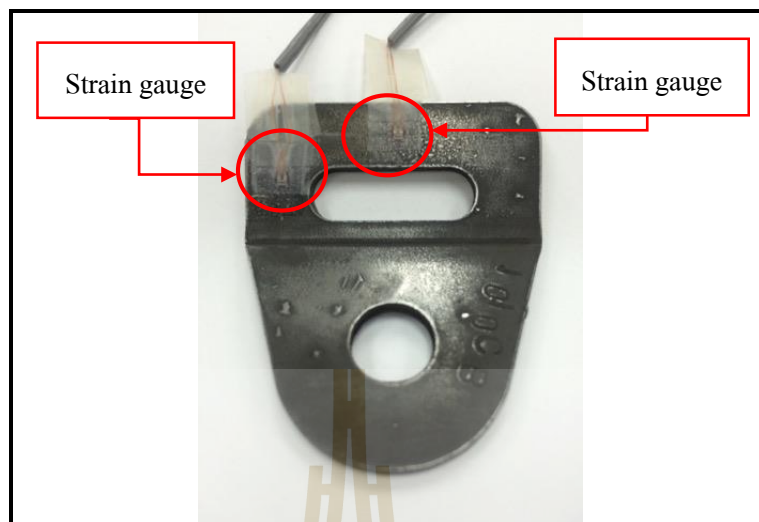


รูปที่ 3.24 ผลการลู่เข้าของค่าความเค้นพอนมิสเสสสูงสุดที่ได้ทำการทดสอบ

3.8.2 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองชุดทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยโดยการทดสอบผ่านเครื่องทดสอบแรงดึง เนื่องจากชุดทดสอบอย่างสมบูรณ์ของโครงสร้างที่นั่งของรถโดยสารจริงมีราคาค่อนข้างแพง ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ จึงเลือกใช้ชุดทดสอบอย่างง่ายผ่านเครื่องทดสอบแรงดึง ซึ่งทำการทดสอบเฉพาะชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยเท่านั้น โดยใช้ชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยซึ่งเป็นวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งผิว (CB-T500) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิธีการทดสอบมีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์เกจวัดความเครียด (Strain gauge) เข้ากับชิ้นทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยใช้เกจวัด (Strain gauge) ยี่ห้อ TML ชนิด FLA-03-11-1L มีค่าคงที่เกจ (Gauge factor) $2.35 \pm 3\%$ และมีค่าความต้านทานเกจ (Gauge resistance) $120.3 \pm 0.5 \Omega$ และระยะเกจ (Gauge length) 0.3 mm ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การติดเกจวัดความเครียด (Strain gauge) บริเวณชิ้นทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

2. ติดตั้งชุดทดสอบอย่างง่ายเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ INSTRON ขนาดโหลดเซลล์ 100 kN ซึ่งมีเครื่องขยายสัญญาณและบันทึกข้อมูลและแปรผล ยี่ห้อ KYOWA รุ่น EDX-10B และ EDX-11A แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การติดตั้งชุดทดสอบอย่างง่ายเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง

การตรวจสอบความถูกต้องของงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการรับแรงดึงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยใช้อุปกรณ์ชุดทดสอบอย่างง่าย ติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Universal Testing

Machine ของ INSTRON ขนาด 100 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ โดยแรงดังกล่าวนี้เป็นแรง $F_{belt} = 3700$ นิวตัน โดยข้อกำหนดของ ECE R-14 ได้กำหนดว่าต้องให้ภาระแรงกระทำจนถึงแรงเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้ภายใน 60 วินาที โดยวัดความเครียดเพื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบจริงกับค่าความเครียดจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ การเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยของการทดสอบจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การดำเนินงานวิจัยศึกษาการออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส โดยศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส 2 กระบวนการ คือ

1. การชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB)
2. การชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB)

โดยทั้งสองกระบวนการจะถูกนำมาอบคืนตัวภายหลังจากการชุบแข็งผิวที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 400°C, 500°C และ 550°C ซึ่งทำการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง โลหะวิทยาและวิเคราะห์สมบัติทางกลที่ส่งผลต่อวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังนำวัสดุหลังผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการชุบแข็งผิวมาประยุกต์ใช้ โดยนำมาวิเคราะห์และออกแบบชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงโดยการชุบแข็งผิวต่อไป ในการวิเคราะห์และออกแบบจะอาศัยเทคนิคด้านคอมพิวเตอร์ช่วย (Computer Aided Engineering) ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเงื่อนไขในการทดสอบจะอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ECE R-14 และนอกจากนี้จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการวิเคราะห์ด้วยการทดสอบจริง ซึ่งจะเป็นการสร้างแบบจำลองในการทดสอบจริงอย่างง่าย เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์นั่นเอง

การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างและวิเคราะห์สมบัติทางกล

- 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี
- 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก
- 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง
- 4.4 ผลค่าความแข็งและการซีมีลิก
- 4.5 ผลการทดสอบแรงดึง

การวิเคราะห์และออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่

- 4.6 ผลการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 (%wt, Balance Fe)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe
Standard ASTM	0.08-0.13	-	0.30-0.60	≤0.040	≤0.050	-	-	-	-	-	-	Bal.
AISI 1010	0.081	0.019	0.380	0.017	0.021	-	-	0.027	-	0.003	0.013	Bal.

ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส (%wt, Balance Fe)

Process	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Fe
CB	0.683	0.010	0.286	0.041	0.055	0.011	-	0.004	-	-	0.016	Bal.
SN+CB	0.898	0.026	0.384	0.009	0.076	0.000	-	0.021	-	-	0.036	Bal.

ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี จากตารางที่ 4.1 ชิ้นทดสอบ AISI 1010 ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ มีค่าองค์ประกอบทางเคมีในช่วงที่กำหนดตามมาตรฐานสถาบันเหล็กของสหรัฐอเมริกา และผลการตรวจสอบพบธาตุคาร์บอนซึ่งเป็นธาตุหลักมีค่า 0.081% C

จากตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบ AISI 1010 ที่ผ่าน กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตราย ดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) พบปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผิว 0.683% C และ 0.898% C ตามลำดับ จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่าปริมาณธาตุคาร์บอนที่บริเวณผิวชิ้นทดสอบมีปริมาณ คาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นทดสอบก่อนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส และในส่วนของธาตุอื่น ๆ หลังผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวยังคงมีปริมาณใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบก่อนการชุบแข็งผิว กล่าวได้ ว่าปริมาณของธาตุไม่เปลี่ยนแปลง

เนื่องจากในกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงนั้น มีการควบคุมบรรยากาศภายในเตาให้มีความสามารถแพร่ซึมของธาตุคาร์บอนได้ถึง 0.8 เปอร์เซ็นต์ จึงส่งผลให้ธาตุคาร์บอนที่ผิวชิ้น ทดสอบมีปริมาณเพิ่มขึ้น และในการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วม (SN+CB) จากอิทธิพลของการ ชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพต์ไนตรายดิง มีการเติมธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนอยู่ก่อนแล้ว เมื่อ ภายหลังทำการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง จึงส่งผลให้ในการตรวจสอบองค์ประกอบ ทางเคมีในกระบวนการร่วม (SN+CB) มีปริมาณธาตุคาร์บอนสูงกว่ากระบวนการชุบแข็งผิว ด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) เพียงอย่างเดียวนั่นเอง

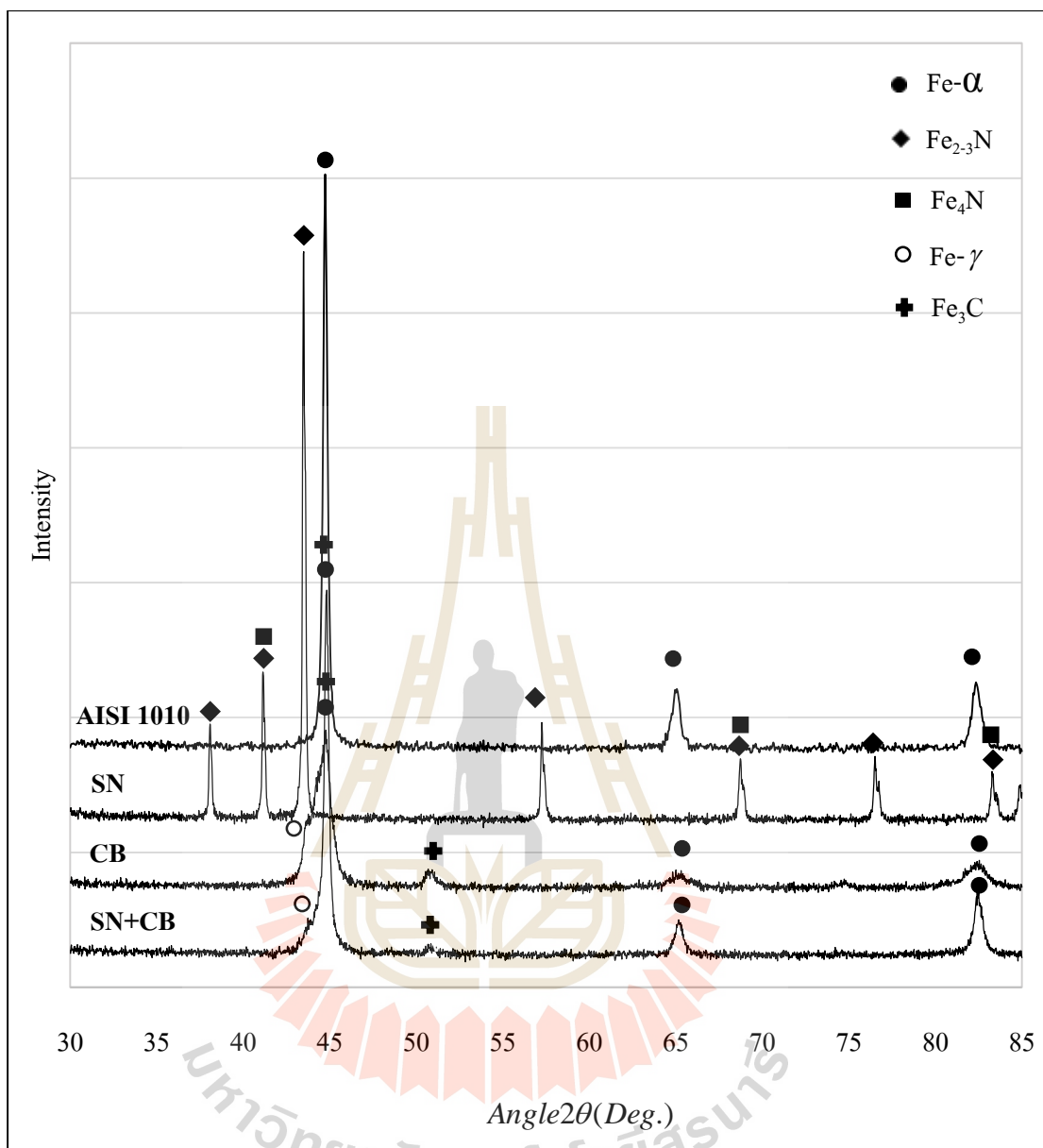
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย XRD ตรวจสอบบริเวณผิวของชิ้นทดสอบ พบว่าชิ้นทดสอบก่อนการชุบแข็งผิวซึ่งเป็นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 พบว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นเหล็กเฟอร์ไรท์หรือเหล็กแอลฟา (α) มีการวางตัวของอะตอมเป็นแบบ BCC (Base Centered Cubic)

จากผลการตรวจสอบพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายดิง (SN) พบโครงสร้างผลึกที่เป็นสารประกอบไนโตรเจน คือ $Fe_{2.3}N$ (ϵ) และ Fe_4N (γ') เนื่องจากการเติมธาตุไนโตรเจนและธาตุคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำประมาณ $570^{\circ}C$ จึงส่งผลให้เกิดชั้นสารประกอบไนโตรเจนหรือที่เรียกว่าชั้นผิวขาวบริเวณผิวของชิ้นทดสอบขึ้น

จากผลการตรวจสอบพบโครงสร้างผลึกภายหลังผ่านกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และโครงสร้างผลึกภายหลังผ่านกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) พบว่าโครงสร้างผลึกของทั้งสองกระบวนการมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน คือ โครงสร้างเหล็กแอลฟา (α) หรือมาร์เทนไซต์ (α') และเหล็กแกมมา (γ) หรือเหล็กออสเทนไนท์ (Austenite) มีการวางตัวของอะตอมเป็นแบบ FCC (Face Centered Cubic) โครงสร้างผลึกดังกล่าวเกิดจากการเย็นตัวในน้ำมันซึ่งเป็นการเย็นตัวในอัตราที่รวดเร็ว จึงส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์บางส่วนเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ไม่ทัน จึงเกิดเป็นออสเทนไนต์ที่เหลือค้าง ซึ่งในกระบวนการชุบแข็งผิวเราสามารถเรียกออสเทนไนต์ที่เหลือค้างนี้ว่า Retained Austenite

จากข้อมูลผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นได้ว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการทำการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) ไม่พบโครงสร้างผลึกที่เป็นชั้นสารประกอบไนโตรเจนหรือชั้นผิวขาวหลงเหลืออยู่ เนื่องจากภายหลังผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงซึ่งทำที่อุณหภูมิสูงประมาณ $910^{\circ}C$ อะตอมไนโตรเจนบริเวณชั้นผิวขาวพยายามแพร่ออกสู่บรรยากาศภายในเตาเพื่อให้เกิดความเสถียร และอะตอมไนโตรเจนบางส่วนที่ไม่สามารถแพร่เข้าสู่บรรยากาศได้ทันจะจับตัวกันกับอะตอมไนโตรเจนข้างเคียงเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) เกิดขึ้น เนื่องจากอะตอมของไนโตรเจนมีความเสถียรในสภาพที่เป็นแก๊ส เมื่อเจออุณหภูมิสูงประมาณ $910^{\circ}C$ จึงพร้อมที่จะเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สได้ทันที จึงส่งผลให้การทำการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) ไม่พบโครงสร้างผลึกที่เป็นสารประกอบชั้นผิวขาวหลงเหลืออยู่นั่นเอง (E.J Mittemeijer, 2013)

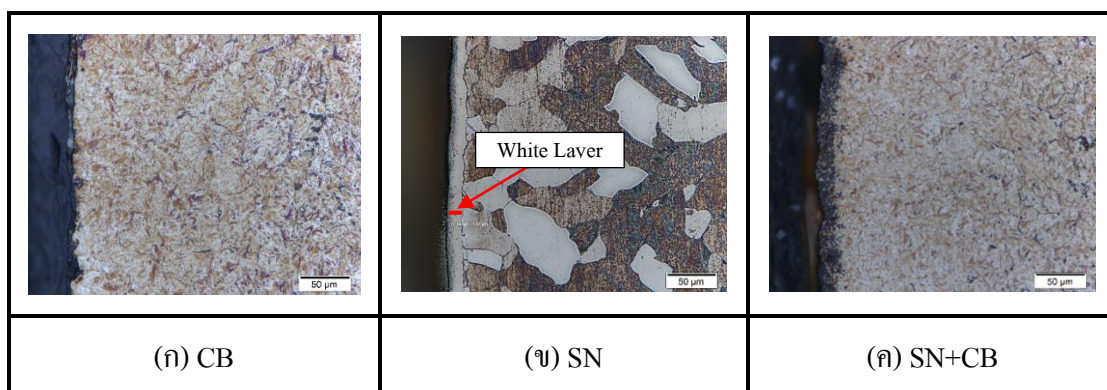


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของชิ้นทดสอบ

4.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

4.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) หรือ OM เป็นการศึกษาโครงสร้างจุลภาค สามารถตรวจสอบโครงสร้างบริเวณผิวของชิ้นทดสอบในระดับจุลภาค ซึ่งโครงสร้างชิ้นทดสอบ AISI 1010 ที่ผ่านกระบวนการอบปกติ มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเฟอร์ไรต์และโครงสร้างเพิร์ไลต์เกิดขึ้นตามขอบเกรนเล็กน้อยมีความหยาบเกรนสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นทดสอบ



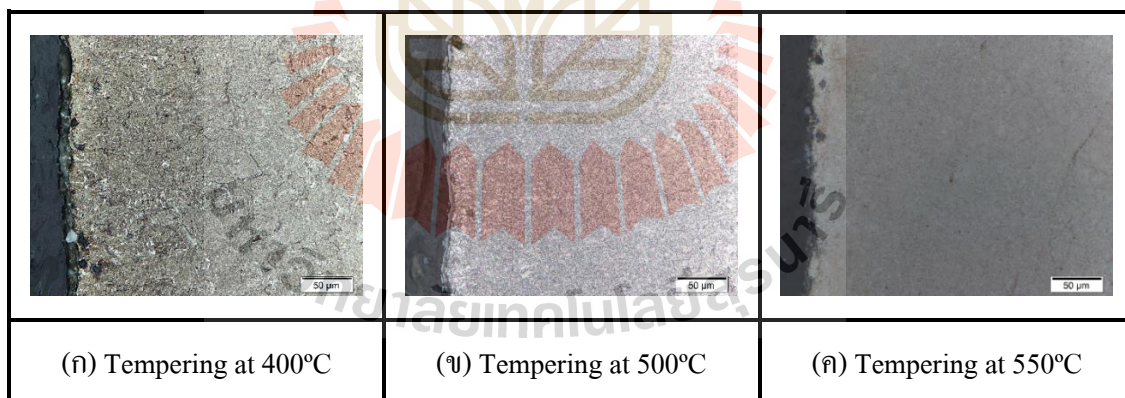
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของซิงค์ทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิว

จากรูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสงระดับจุลภาคของซิงค์ทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส พบว่าซิงค์ทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) ดังแสดงในรูป 4.2(ก) บริเวณผิวของซิงค์ทดสอบเกิดโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โครงสร้างออสเทนไนท์เหลือค้างและโครงสร้างเฟอไรต์ละเอียดปะปนในปริมาณเล็กน้อย โดยโครงสร้างเหล่านี้พบในบริเวณขอบผิวและภายใต้ชั้นผิวของซิงค์ทดสอบที่ระดับความลึกชั้นผิว และในบริเวณใจกลางซิงค์ทดสอบพบโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟอไรต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมก่อนการอบชุบแข็งผิว ลักษณะของโครงสร้างที่เกิดขึ้นดังกล่าวมาข้างต้น เนื่องจากซิงค์ทดสอบได้รับอิทธิพลของการแพร่อะตอมคาร์บอนเข้าสู่เนื้อซิงค์ทดสอบในกระบวนการอบชุบที่อุณหภูมิสูง (อุณหภูมิออสเทนไนท์) ซิงค์ทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สซอพต์ไนตรายดิง (SN) พบสารประกอบชั้นผิวขาว (White layer) เกิดขึ้นบริเวณขอบผิวของซิงค์ทดสอบประมาณ $15.59 \mu\text{m}$ และบริเวณใจกลางของซิงค์ทดสอบพบโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟอไรต์ซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมของซิงค์ทดสอบก่อนการอบชุบแข็งผิว และนอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการแพร่ซึมของอะตอมไนโตรเจนและอะตอมคาร์บอนในลักษณะสารละลายในสภาพของแข็ง (Solid solution) เป็นสารประกอบแบบแทรกที่ (Interstitial) ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์อีกด้วย ลักษณะดังรูป 4.2(ข) และในการอบชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) พบว่าโครงสร้างเกิดในลักษณะคล้ายคลึงกับการอบชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ค)

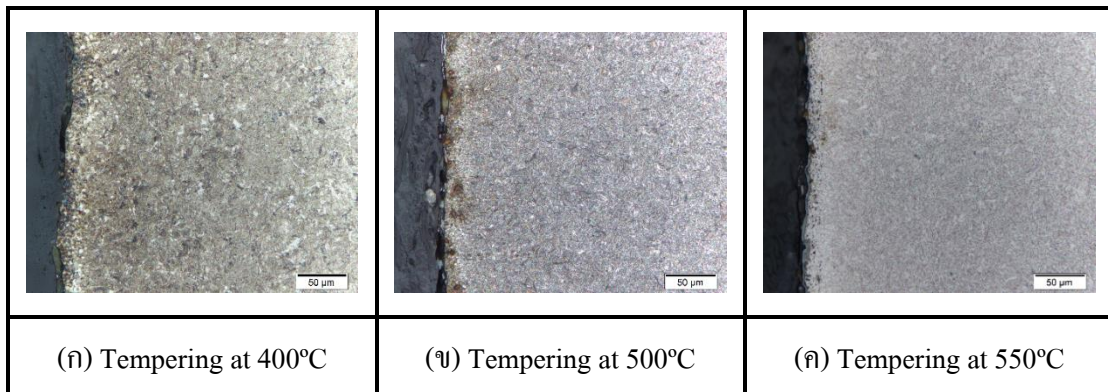
เนื่องจากภายหลังกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สเมื่อมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำมัน ซึ่งเป็นลักษณะการปล่อยให้เหล็กเย็นตัวจากช่วงอุณหภูมิออสเทนไนท์ จากการอัตราการเย็นตัววิกฤต โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โครงสร้างออสเทนไนท์เหลือ

ค้ำและพบโครงสร้างเฟอไรต์ละเอียด สามารถพิจารณาได้จากแผนภาพอัตราการเย็นตัววิกฤต (T.T.T diagram) (Walter H. Kohl, 1995) โครงสร้างมาร์เทนไซต์เกิดขึ้นเนื่องจากการละลายของอะตอมคาร์บอนในเหล็กออสเทนไนต์แบบแทรกที่ว่าง (Interstitial solid solution) ซึ่งในระบบ FCC ที่ว่างที่อะตอมคาร์บอนแทรกอยู่ได้จะเป็นบริเวณขอบของยูนิทเซลล์ ในขณะที่ทำให้ออสเทนไนต์เย็นตัวอย่างรวดเร็วอะตอมของคาร์บอนไม่มีเวลาที่จะแยกตัวออกมาได้ทันที จึงเป็นสาเหตุให้อะตอมของเหล็กตามแกน z ที่มีอะตอมคาร์บอนแทรกตัวอยู่หดตัวลงมาไม่ได้ ทำให้ผลึกเกิดการบิดเบี้ยว ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นระบบผลึกของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (มนัส สติรจินดา, 2543)

ในกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายคิง (SN) จากการเติมธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนในเหล็กโครงสร้างเฟอร์ไรต์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคตอยด์ จะทำให้เกิดสารประกอบแทรกที่ (Interstitial compound) ที่บริเวณผิวชั้นทดสอบ เรียกว่า ชั้นสารประกอบไนโตรเจนหรือสารประกอบชั้นผิวขาว (White layer) ได้แก่ $Fe_{2-3}N$ (ϵ) และ Fe_4N (γ') และเนื่องจากอะตอมของธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนเป็นอะตอมขนาดเล็กจึงสามารถแทรกตัวละลายในเหล็กเฟอร์ไรต์ได้ จึงทำให้เกิดสารละลายประเภทแทรกที่ (Interstitial solid solution) ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่บริเวณภายในชั้นผิวเนื้อวัสดุ (W.L. Chen, 2013)



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) ที่อุณหภูมิการอบคืบตัวต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่าง แก๊สซอพต์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) ที่อุณหภูมิการอบคืนตัวต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงภาพชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) ตามลำดับ ซึ่งมีการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 550°C จะเห็นว่าที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 400°C ของทั้ง 2 กระบวนการ พบโครงสร้างคล้ายเบนไนท์ โครงสร้างอสเทนไนท์เหลือค้างและโครงสร้างเฟอไรต์ที่มีความละเอียดในปริมาณเล็กน้อย เกิดขึ้นบริเวณผิวและภายใต้ผิวการซึมลึกของชั้นทดสอบ และอุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C และ 550°C จะพบโครงสร้างละเอียดลักษณะคล้ายโครงสร้างซอร์ไบท์และพบ โครงสร้างรีเทนอสเทนไนท์เล็กน้อย ซึ่งในแต่ละช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัวของทั้งกระบวนการคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว (CB) และกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) จะเกิดโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน

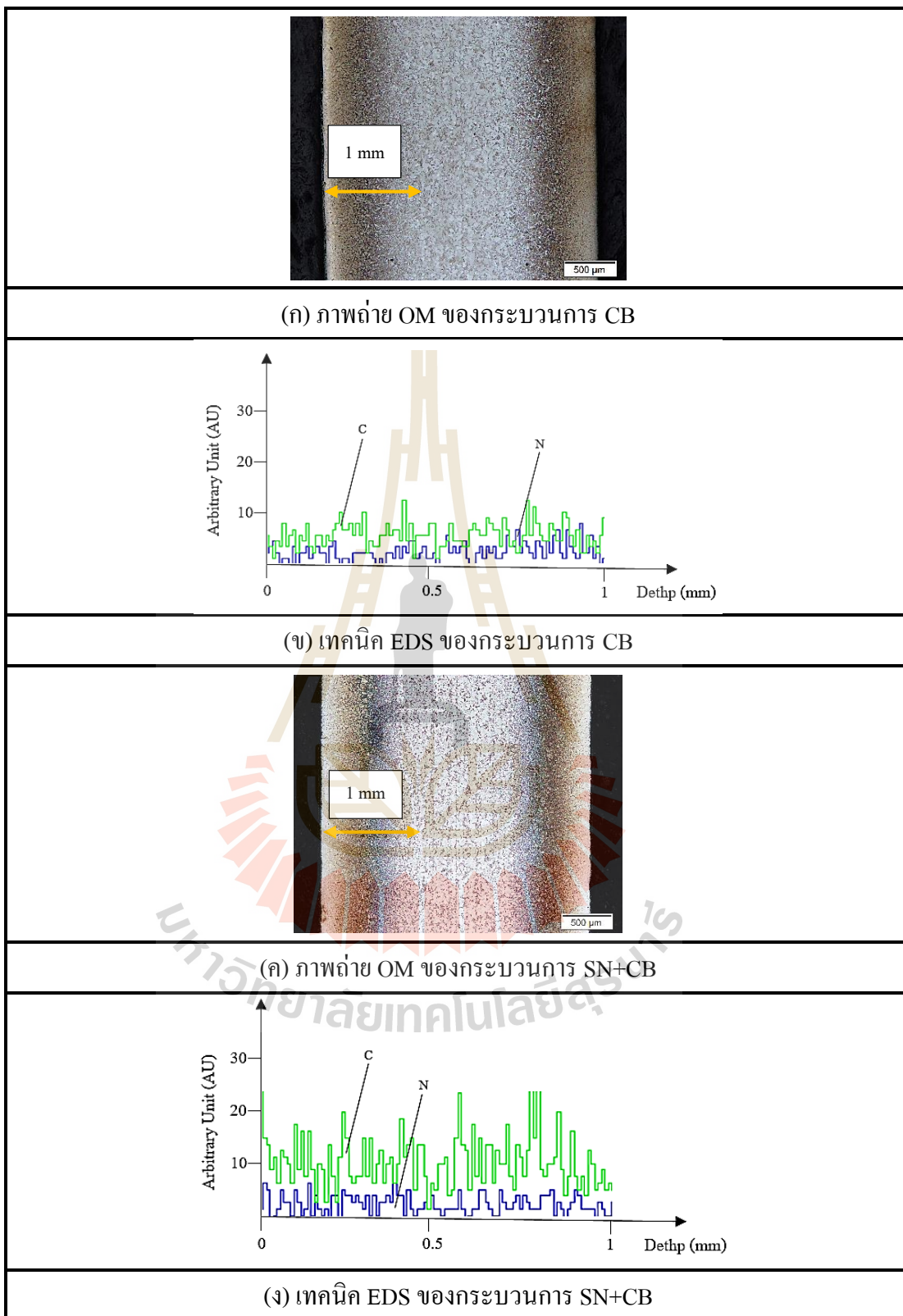
จากการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ต่ำกว่าเส้น A_1 แล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ จะทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ซึ่งที่อุณหภูมิ 400°C จะเกิดขึ้นในลักษณะคล้ายโครงสร้างเบนไนท์ เนื่องจากที่อุณหภูมินี้ โครงสร้างมาเทนไซต์จะกลับคืนสู่สถานะสมดุลเกิดโครงสร้างเฟอไรท์และโครงสร้างซิเมนต์ไต์ โดยให้กำเนิดเฟอไรท์ก่อน เมื่อเฟอไรท์ขยายตัวก็จะผลักอะตอมของคาร์บอนออกไปทางด้านข้าง ทำให้เกิดบริเวณที่มีคาร์บอนหนาแน่นตามบริเวณข้าง ๆ เฟอไรท์ และเมื่อปริมาณคาร์บอนสูงประมาณ 6.67% ก็จะเกิดเป็นแถบ ๆ ของซิเมนต์ไต์เกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง ซึ่งการเกิดขึ้นในลักษณะนี้นั้นเองจึงเรียกโครงสร้างนี้ว่าเบนไนท์ และลักษณะโครงสร้างคล้ายซอร์ไบท์ละเอียดที่เกิดขึ้นในช่วงการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500°C และ 550°C เกิดจากโครงสร้างมาเทนไซต์จะกลับคืนสู่สถานะสมดุลเกิดโครงสร้างเฟอไรท์และโครงสร้างซิเมนต์ไต์

โดยการให้กำเนิดนิวเคลียร์ของซีเมนต์ไวด์ขึ้นมาก่อนตามบริเวณรอบ ๆ เกรน เมื่อขยายตัวก็ดึงเอาอะตอมของคาร์บอนบริเวณรอบ ๆ เข้ามารวมตัวเพื่อขยายตัวทำให้บริเวณข้างเคียงกลายเป็นคาร์บอนต่ำ กลายเป็นจุดที่เกิดเฟอไรท์ขึ้นมาจากทั้งสองด้าน และเมื่อเกิดเฟอไรท์ขึ้นแล้ว จะเกิดการขยายตัวทำให้มีปริมาณคาร์บอนถูกผลักออกไปทำให้เกิดสภาพพร้อมที่จะเกิดซีเมนต์ขึ้นทั้งในบริเวณข้างเคียง จะสลับกันไปเรื่อย ๆ ลักษณะดังกล่าวจึงเรียกโครงสร้างนี้ว่าชอร์ไบท์ (มนัส สติรจินดา, 2543)

4.3.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS

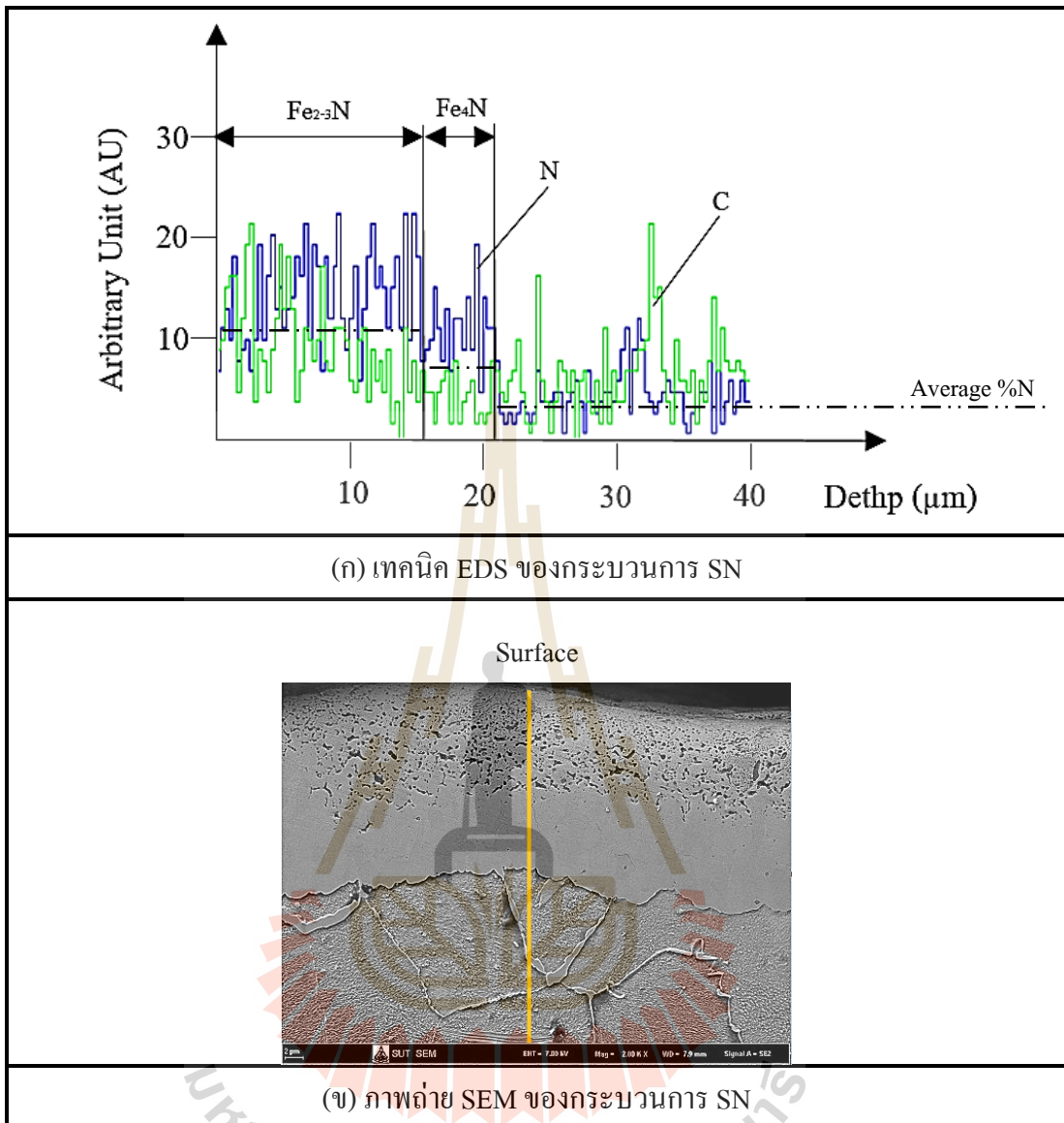
การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุนบนพื้นผิวซึ่งทดสอบได้โดยการใช้เทคนิค Scanning electron microscopy, SEM ร่วมกับเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของตัวเลขและกราฟ สามารถวิเคราะห์ปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุในชิ้นทดสอบ

จากการเติมธาตุคาร์บอนในการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และการเติมธาตุไนโตรเจนและธาตุคาร์บอนในการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) จากการวิเคราะห์โดยการส่องกราดตามแนวเส้น (Line scan analysis) ซึ่งเป็นการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว พบว่าในกระบวนการร่วม (SN+CB) ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ของธาตุคาร์บอนสูงกว่ากระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว (CB) เนื่องจากในกระบวนการร่วม (SN+CB) อิทธิพลของธาตุคาร์บอนที่เกิดสารละลายประเภทแทรกที่ (Interstitial solid solution) ในโครงสร้างเฟอไรท์จากกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง (SN) อยู่ก่อนแล้ว เมื่อผ่านการทำกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) ในภายหลัง จึงส่งผลให้กระบวนการร่วม (SN+CB) ตรวจพบธาตุคาร์บอนในปริมาณที่สูงกว่ากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) เพียงอย่างเดียวนั่นเอง และนอกจากนี้ยังพบว่าเข้มของรังสีเอกซ์ของธาตุไนโตรเจนของกระบวนการร่วม (SN+CB) มีค่าสูงกว่ากระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.5

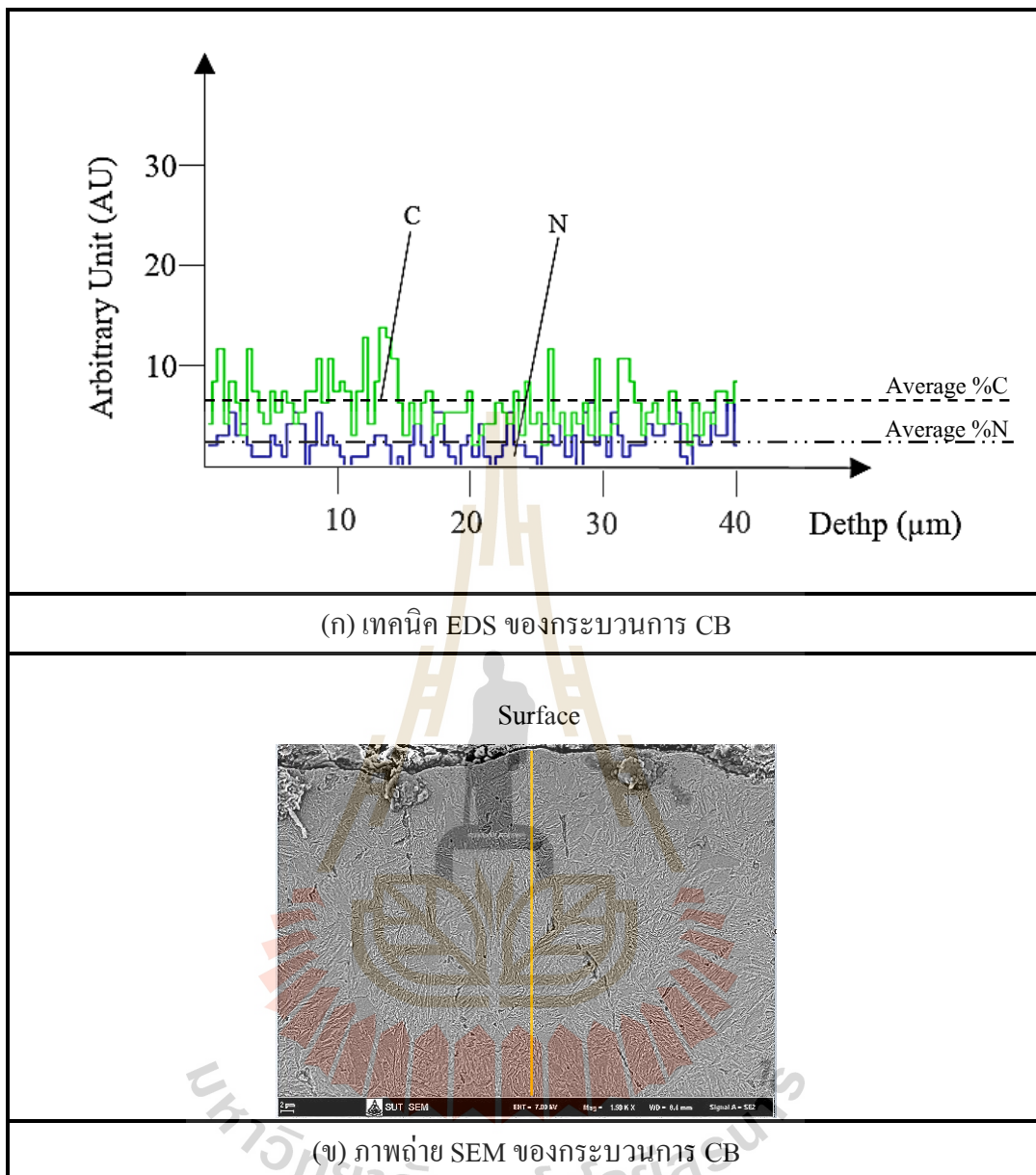


รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นทดสอบ
ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

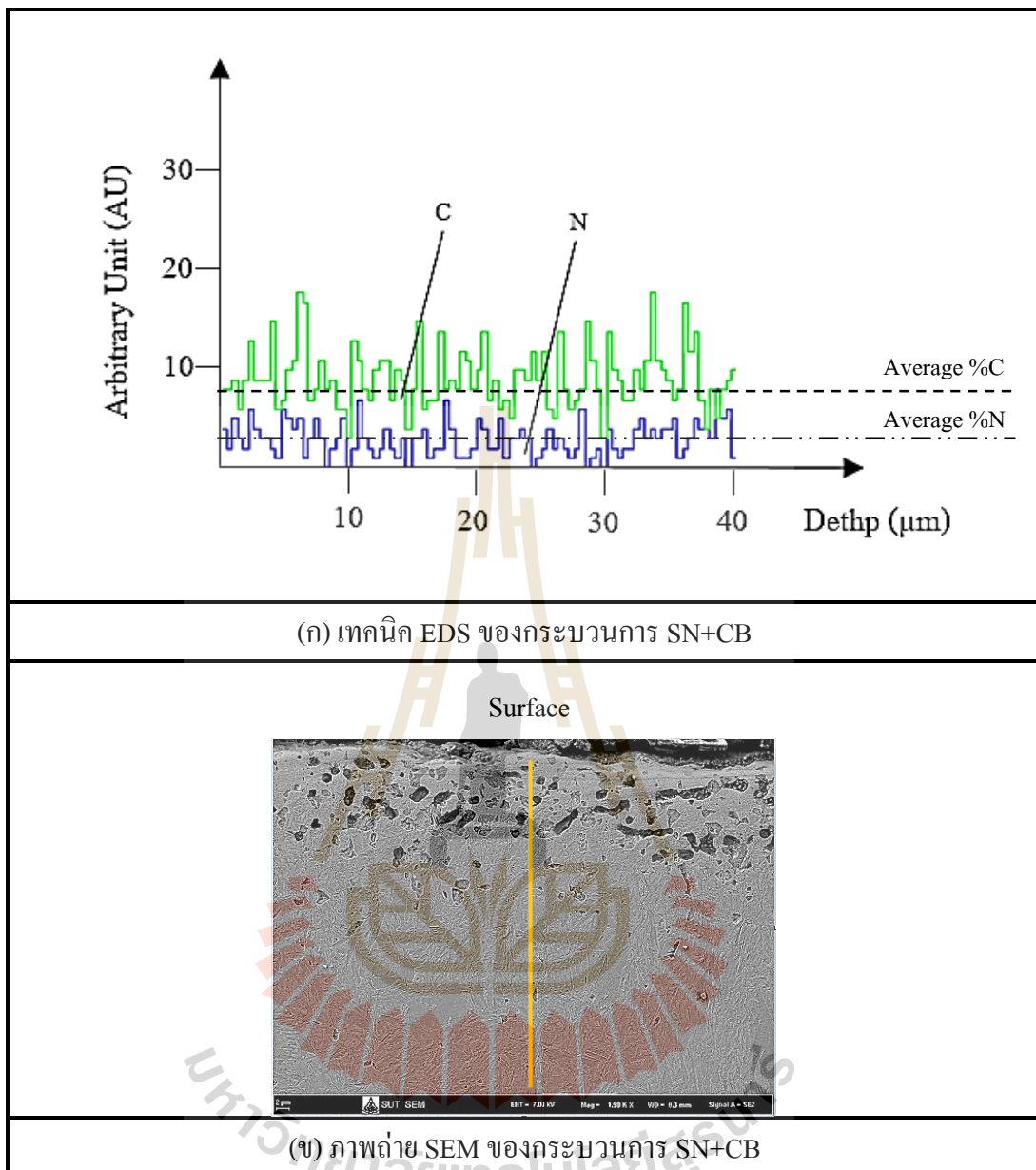
จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 คือการแสดงลักษณะการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค (EDS) ของชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส จากการตรวจสอบธาตุในกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอฟต์ในทรายคิง (SN) บริเวณที่เกิดชั้นผิวขาว (White layer) พบว่าความเข้มข้นของธาตุคาร์บอน (C) เฉลี่ยประมาณ 8% และธาตุไนโตรเจน (N) เฉลี่ยประมาณ 12% และบริเวณชั้นผิวขาวมีลักษณะคล้ายรูพรุน ดังรูปที่ 4.6(ก) เนื่องจากบริเวณชั้นผิวขาวมีอะตอมไนโตรเจนที่ค่อนข้างหนาแน่น จึงทำให้อะตอมไนโตรเจนข้างเคียงกันมีโอกาสจับตัวกันเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) ภายในเนื้อวัสดุบริเวณชั้นผิวขาว ซึ่งส่งผลให้เกิดผิวที่มีลักษณะคล้ายรูพรุนขึ้นนั่นเอง และในกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง พบความเข้มข้นของธาตุคาร์บอน (C) เฉลี่ยประมาณ 7% และความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน (N) เฉลี่ยประมาณ 2.5% ดังรูปที่ 4.7(ก) และในกระบวนการร่วม (SN+CB) นั้น พบความเข้มข้นของธาตุคาร์บอน (C) เฉลี่ยประมาณ 8% และความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน (N) เฉลี่ยประมาณ 3% ดังรูปที่ 4.8(ก) และพบว่าลักษณะผิวชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการร่วม (SN+CB) มีลักษณะรูพรุนขนาดใหญ่กว่ากระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายคิง (SN) เนื่องจากเมื่อนำชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการแก๊สซอฟต์ในทรายคิงซึ่งเป็นชิ้นทดสอบที่มีรูพรุนบริเวณชั้นผิวขาวอยู่แล้วมาทำกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงต่อที่อุณหภูมิ 900°C อะตอมไนโตรเจนที่มีความหนาแน่นบริเวณชั้นผิวขาวจะพยายามจับตัวกันกับอะตอมไนโตรเจนข้างเคียง ส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นนั่นเอง (E.J Mittemeijer, 2013)



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ในชั้นทดสอบหลังผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอพตีไนโตรรายดิง (SN)



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ในขั้นตอนสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บอนโรซิง (CB)



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ในขั้นตอนทดสอบหลังผ่านกระบวนการร่วมระหว่างการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สซอฟต์ไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไรซิง (SN+CB)

จากข้อมูลข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าในกระบวนการร่วม (SN+CB) เกิดการซึมลึกของธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนในปริมาณที่สูงกว่ากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บอนไรซิง (CB) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากอิทธิพลของธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนที่เกิดสารละลายประเภทแทรกที่ (Interstitial solid solution) ในโครงสร้างเฟอร์ไรท์จากกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนโตรเจน (SN) อยู่ก่อนแล้ว เมื่อผ่านการทำกระบวนการแก๊สคาร์บอนไรซิง (CB) ในภายหลัง จึงส่งผล

ให้กระบวนการร่วม (SN+CB) มีธาตุไนโตรเจนในปริมาณที่สูงกว่ากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) เพียงอย่างเดียวนั่นเอง

จากอิทธิพลของบริเวณผิวชั้นทดสอบมีสารประกอบไนโตรเจนเกิดขึ้น ได้แก่ $Fe_{2-3}N$ (โครงสร้าง ϵ) และ Fe_4N (โครงสร้าง γ') ในกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนไตรดิง (SN) เนื่องจากอะตอมของธาตุไนโตรเจนส่วนใหญ่จะจับตัวกับเหล็กเกิดเป็นสารประกอบเกิดขึ้นและมีธาตุไนโตรเจนบางส่วนแทรกตัวอยู่ในสถานะแก๊ส (N_2) ภายในชั้นโครงสร้างชั้นผิวขาว จึงส่งผลทำให้ผิวมีลักษณะคล้ายเกิดรูพรุน และเมื่อสารประกอบไนโตรเจนหรือชั้นผิวขาวได้รับอุณหภูมิสูงเพียงพอ จะทำให้อะตอมของธาตุไนโตรเจนกลายเป็นแก๊ส (N_2) เนื่องจากอะตอมของไนโตรเจนมีความเสถียรในสถานะแก๊ส เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงประมาณ $910^{\circ}C$ จึงพร้อมที่จะกลายสภาพเป็นแก๊สได้ทันที ดังนั้นในการทำกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) จึงไม่มีชั้นของสารประกอบชั้นผิวขาวหลงเหลืออยู่และส่งผลให้เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน (E.J Mittemeijer, 2013)

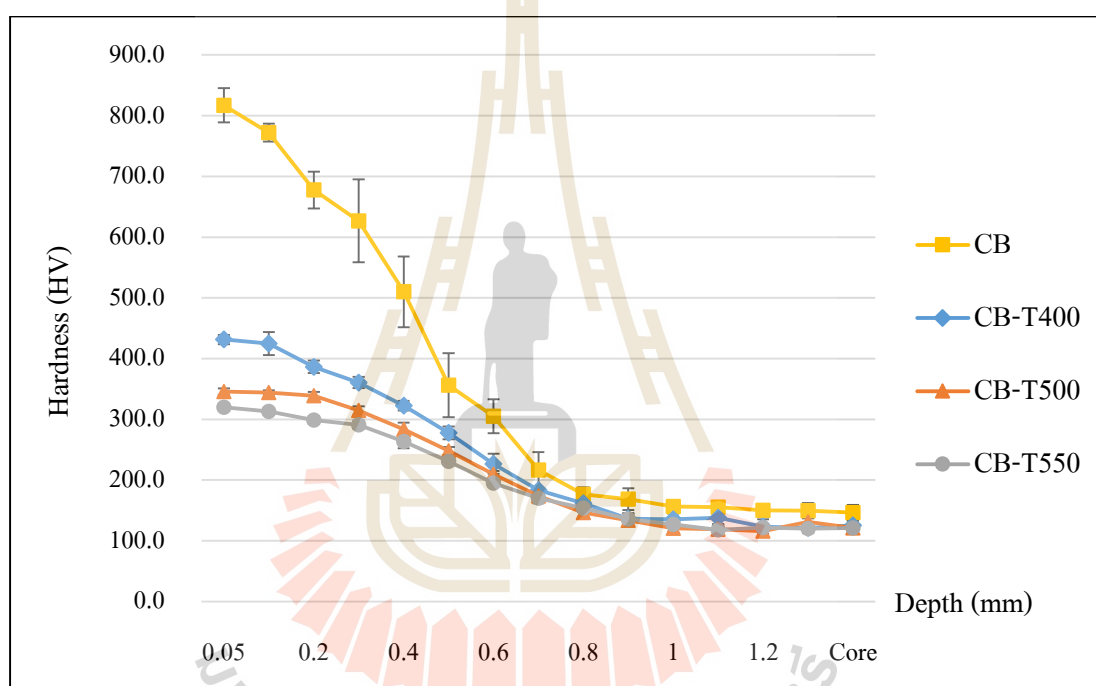
4.4. ผลการทดสอบค่าความแข็งและการซึมลึก

4.4.1 ผลการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง

ค่าความแข็งภายใต้ชั้นผิวถึงบริเวณใจกลางชั้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง ซึ่งมีชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบคืนตัวและชั้นทดสอบที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$, $500^{\circ}C$ และ $550^{\circ}C$ แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าค่าความแข็งผิวเริ่มต้นที่ตำแหน่งความลึกชั้นผิว 0.05 mm จนถึงใจกลางชั้นทดสอบ (Core) มีแนวโน้มลดลงตามระดับตำแหน่งชั้นผิวจากบริเวณผิวเข้าสู่ใจกลางชั้นทดสอบ ซึ่งในกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงนั้นเป็นการเติมคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง (อุณหภูมิออสเทนไนท์) โดยอาศัยหลักการแพร่ จึงทำให้บริเวณผิวมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและมีการซึมลึกของอะตอมคาร์บอนตามระดับตำแหน่งความลึกของชั้นผิวนอกจากนี้ยังพบว่าชั้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าความแข็งภายใต้ชั้นผิวน้อยกว่าชั้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว เนื่องจากชั้นทดสอบที่ผ่านการอบคืนตัวเกิดการคลายความเครียดในเนื้อชั้นทดสอบ ทำให้เพิ่มสมบัติด้านความเหนียว จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Paired t-test สามารถยืนยันได้ว่า ในกระบวนการอบคืนตัว $400^{\circ}C$ และ $500^{\circ}C$ ค่าความแข็งและการซึมลึกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และในกระบวนการอบคืนตัว $500^{\circ}C$ และ $550^{\circ}C$ ค่าความแข็งและการซึมลึกไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจากการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างกันพบว่าที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ จะมีค่าความแข็ง

และค่าการซึมลึกผิวที่สูงกว่า 500°C และ 550°C ตามลำดับ เนื่องจากการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400°C เกิดโครงสร้างคล้ายเบนไนท์ ซึ่งโครงสร้างเบนไนท์จะมีค่าความแข็งสูงกว่าโครงสร้างซอร์ไบท์ที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C และ 550°C นั้นเอง และจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C และ 550°C มีค่าความแข็งผิวและการซึมลึกผิวต่างกันเพียงเล็กน้อยหรือมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัวไม่ต่างกันมากนัก และจากทฤษฎีการอบคืนตัวกล่าวไว้ว่าที่อุณหภูมิการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 500-650°C เป็นการทำลายความเครียดให้หมดไปแต่ไม่ยังคงความแข็งไว้แน่นอน (มนัส สติรจินดา, 2543)

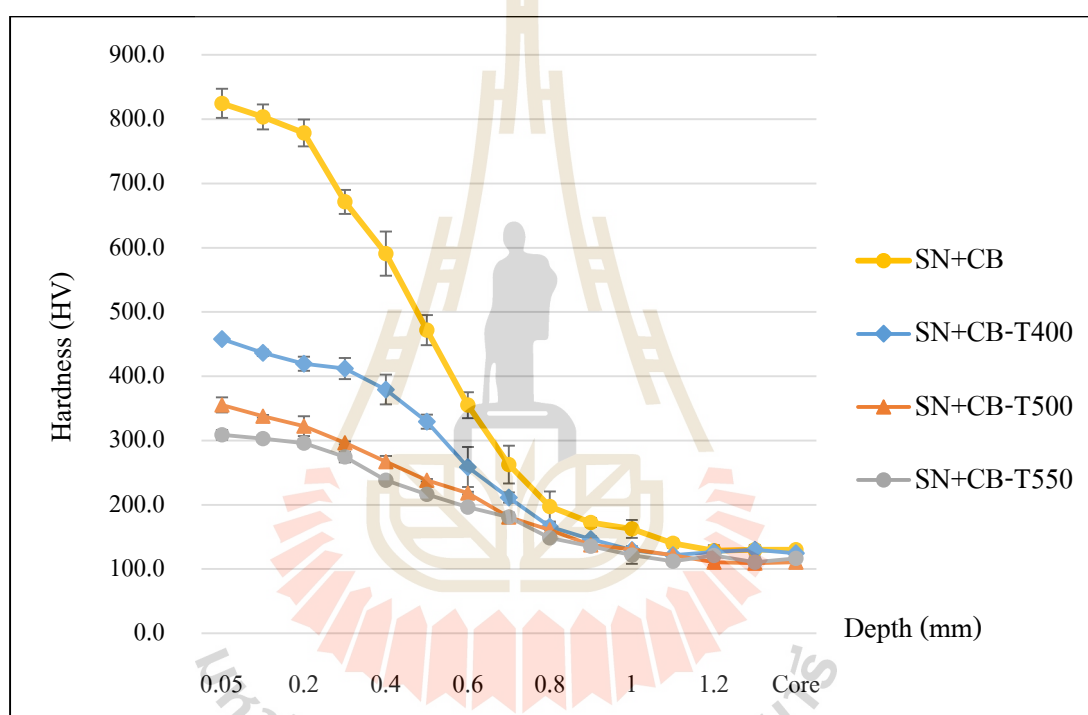


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งภายใต้ชั้นผิวที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB)

4.4.2 ผลการทดสอบความแข็งภายใต้ผิวที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง

ค่าความแข็งภายใต้ชั้นผิวถึงบริเวณใจกลางชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง ซึ่งมีชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบคืนตัวและชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 550°C แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าค่าความแข็งจนถึงใจกลางชิ้นทดสอบมีแนวโน้มลดลงตามระดับตำแหน่งความลึกชั้นผิวลู่

เข้าสู่ใจกลางของชิ้นทดสอบ เช่นเดียวกันกับชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติศาสตร์ด้วย Paired t-test สามารถยืนยันได้ว่า ในกระบวนการอบคืนตัว 400°C และ 500°C ค่าความแข็งและการซึมลึกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และในกระบวนการอบคืนตัว 500°C และ 550°C ค่าความแข็งและการซึมลึกไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95% จากอิทธิพลจากการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิ 400°C จะมีค่าความแข็งและค่าการซึมลึกผิวที่สูงกว่า 500°C และ 550°C ตามลำดับ เกิดแนวโน้มนั้นขึ้นเช่นเดียวกับการอบชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งภายใต้ชั้นผิวที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายคิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB)

เมื่อพิจารณากระบวนการชุบแข็งผิวทั้งสองกระบวนการ คือ กระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว (CB) ในรูปที่ 4.9 และกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายคิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) ในรูปที่ 4.10 พบว่ากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วม (SN+CB) มีค่าความแข็งภายใต้ชั้นผิวสูงกว่าการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Paired t-test สามารถยืนยันได้ว่า ในกระบวนการอบคืนตัวเดียวกันค่าความแข็งและการซึมลึกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น 95% เนื่องจาก

การเกิดสารละลายอะตอมคาร์บอนในสภาพสารละลายของแข็ง (Solid solution) ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์ จากกระบวนการแก๊สซอพต์ไนไตรดิง (SN) อยู่แล้ว และเมื่อนำชิ้นทดสอบมาทำการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) ในภายหลัง จึงส่งผลให้กระบวนการร่วม (SN+CB) มีความแข็งและการซึมลึกสูงกว่ำนั่นเอง

ตารางที่ 4.3 แสดงผลค่าความแข็งภายใต้ผิวที่ตำแหน่ง 0.1 มิลลิเมตรและค่าระยะการซึมลึก

Conditions	Hardness at 0.1 mm (HV)	Total case depth (mm)
AISI 1010-Normalizing	139	-
CB	772	0.78
SN+CB	804	0.82
CB-T400	425	0.70
CB-T500	344	0.68
CB-T550	313	0.65
SN+CB-T400	436	0.75
SN+CB-T500	338	0.70
SN+CB-T550	303	0.67

จากตารางที่ 4.3 พบว่าหลังจากนำเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 ผ่านกระบวนการอบปกติ (Normalizing) ได้ค่าความแข็ง 139 HV วัดที่ตำแหน่งความลึกภายใต้ผิว 0.1 mm และการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว (CB) และการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิงที่ไม่ผ่านการอบคืนตัว (SN+CB) ได้ค่าความแข็ง 772 HV และ 804 HV ตามลำดับ เมื่อนำชิ้นทดสอบผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิการอบคืนตัวเดียวกันค่าความแข็งของทั้งสองกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกัน

ค่าระยะการซึมลึกทั้งหมด (Total case depth) ได้จากค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงความสามารถในการชุบแข็งผิวหรือความสามารถในการแพร่ซึมของธาตุที่เติมลงไปน้ในชิ้นทดสอบ จากการวิเคราะห์ค่าความแข็ง พบว่าการชุบแข็งด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนไตรดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) ค่าระยะการซึมลึกสูงกว่าการชุบแข็งด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว (CB) เนื่องจากอิทธิพลของการเติมธาตุคาร์บอนการ

เกิดสารละลายอะตอมคาร์บอนในสภาพสารละลายของแข็ง (Solid solution) ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์ จากกระบวนการแก๊สซอฟต์ไนตรายดิง (SN) อยู่แล้ว และมาทำกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) ในภายหลัง จึงส่งผลให้กระบวนการร่วม (SN+CB) มีค่าการซึมลึกที่สูงกว่ากระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว (CB) นั้นเอง

4.5 การทดสอบแรงดึง

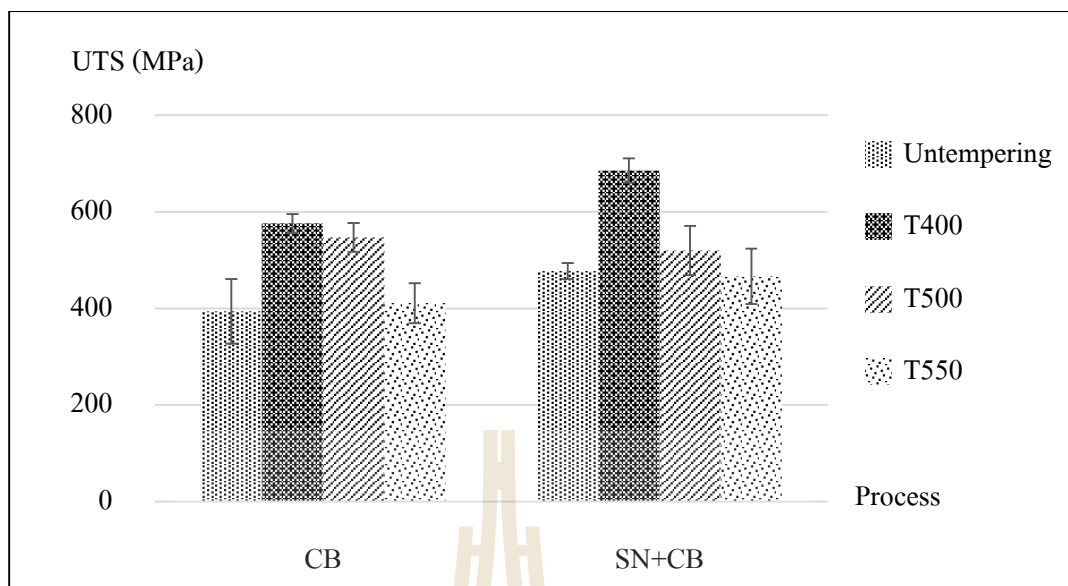
การทดสอบแรงดึงเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุโดยการให้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ สมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength), ค่าความเค้นจุดคราก (Yield strength), ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

4.5.1 การตรวจสอบการรับแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 ที่ผ่านกระบวนการอบปกติ ที่อุณหภูมิ 930°C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้ทำการเย็นตัวในอากาศ จากการวิเคราะห์ตรวจสอบสมบัติทางกลด้านการต้านทานแรงดึง พบว่าค่าสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานการทดสอบเหล็กกล้า ASTM และสมบัติที่สำคัญต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 4.4

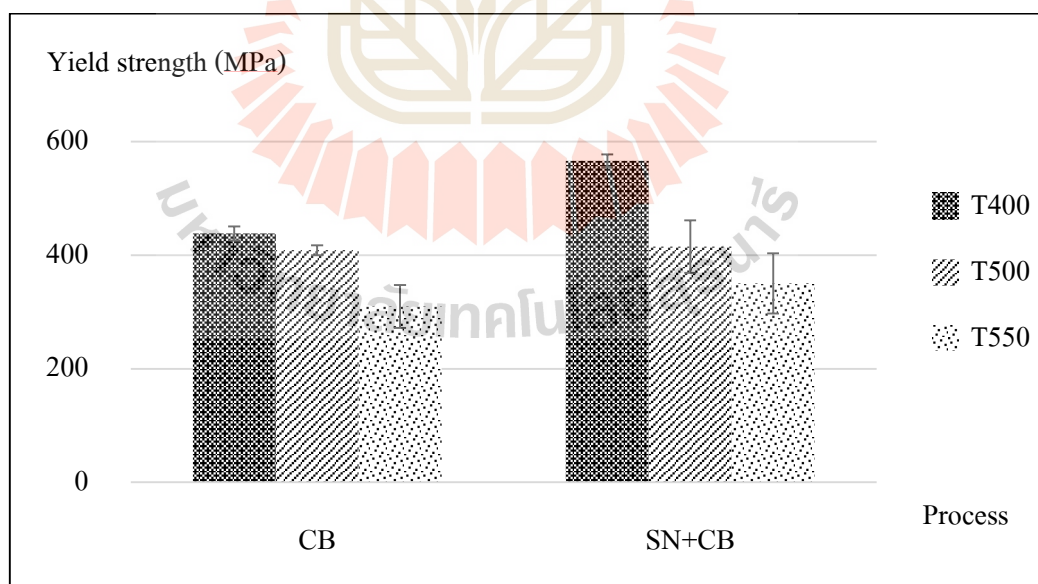
4.5.2 การตรวจสอบการรับแรงดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

จากการทดสอบแรงดึงพบว่าการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิงมีค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) รูปที่ 4.11 และค่าการต้านทานแรงดึงจุดคราก (Yield strength) รูปที่ 4.12 สูงกว่าการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว และพบว่าหลังผ่านกระบวนการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400°C จะมีค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าการต้านทานแรงดึงจุดครากสูงสุด และเมื่อทำให้อบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าการต้านทานแรงดึงจุดครากจะมีค่าลดลง



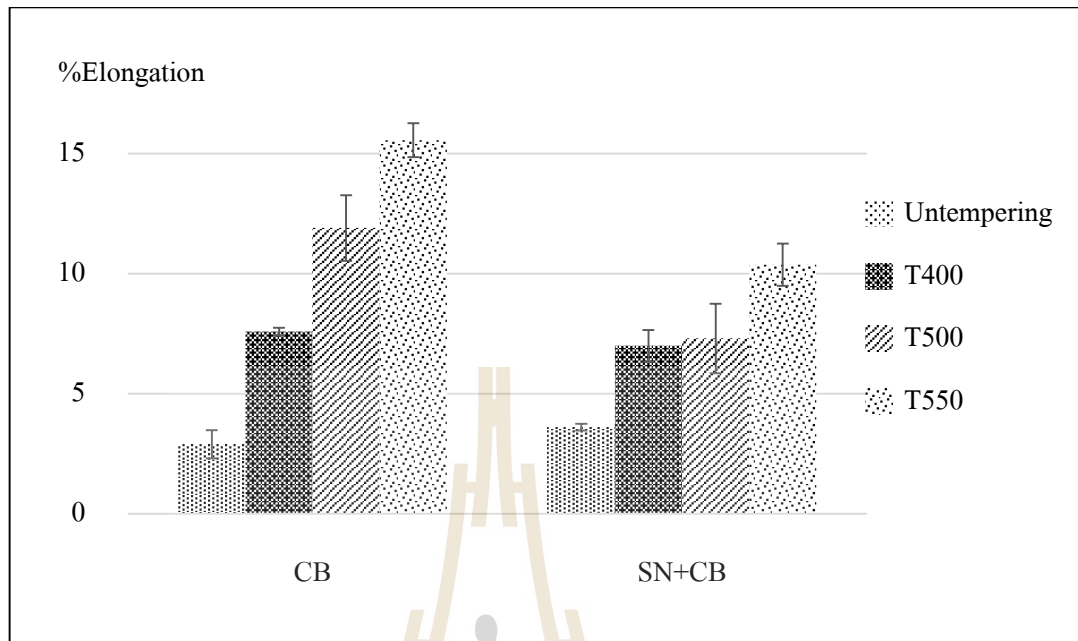
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ultimate tensile strength กับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

4.5.3 การตรวจสอบการรับแรงดึงจุดครากของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yield strength กับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

4.5.4 การตรวจสอบอัตราการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าทั้งการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์แวร์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิงระยะการยืดตัวของชิ้นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบคืนตัวจะทำให้ชิ้นทดสอบเกิดสมบัติด้านความเหนียวดีขึ้น ยิ่งอบคืนที่อุณหภูมิสูงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.4 สมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ประเภทวัสดุ	ความเค้น สูงสุด (σ_u) (MPa)	ความเค้น คราก (σ_y) (MPa)	มอดูลัส ยืดหยุ่น (E) (GPa)	%Elongation	อัตราส่วน ปัวซอง (ν)
AISI 1010 (Normalizing)	248.9	175.6	-	53.56	0.31
CB-T400	575.8	438.1	172.1	7.58	0.29
CB-T500	546.9	408.7	170.4	11.91	0.30
CB-T550	410.8	309.7	174.6	15.56	0.30
SN+CB-T400	685.7	566.3	165.9	6.99	0.28
SN+CB-T500	519.8	415.0	174.1	7.30	0.32
SN+CB-T550	466.3	350.2	171.2	10.37	0.29

เมื่อนำวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สของทั้งสองกระบวนการจะทำให้วัสดุมีค่าสมบัติการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น และจากผลการทดลองพบว่ากระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) เกิดแนวโน้มสมบัติการต้านทานแรงดึงสูงกว่ากระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีความสอดคล้องกับความแข็งและการซึมลึกของวัสดุ จากการได้รับอิทธิพลของสารละลายอะตอมคาร์บอนในสภาพสารละลายของแข็ง (Solid solution) ในโครงสร้างเฟอร์ไรท์ จากกระบวนการแก๊สซอพต์ไนตรายิ่ง (SN) อยู่แล้ว และมาทำกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) ในภายหลัง จึงทำให้ในกระบวนการร่วม (SN+CB) นั้น สามารถเพิ่มในการต้านทานแรงดึงได้ดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบคืนตัวยังส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากมาเทนไซต์ไปเป็นโครงสร้างเบนไนท์และโครงสร้างซอร์ไบต์ในกระบวนการอบคืนตัว จากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจึงส่งผลให้มีสมบัติการต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น (Donald R. Askeland, 1996)

จากการนำวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010 ผ่านการปรับปรุงวัสดุด้วยกระบวนการชุบแข็งผิว 2 กระบวนการ คือ กระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิง (CB) และกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ไนตรายิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) พบว่าทั้งสองกระบวนการส่งผลทำให้สมบัติวัสดุด้านความแข็งและด้านการต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น จากผลการ

ทดสอบจะเห็นได้ว่าอิทธิพลของการเติมธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนเป็นสาเหตุหลักทำให้สมบัติวัสดุดังกล่าวเพิ่มขึ้น

สำหรับการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายคิงและแก๊สคาร์บูไรซิง (SN+CB) จะได้ค่าสมบัติวัสดุหลังการปรับปรุงสูงกว่ากระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว (CB) เนื่องจากการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมนั้นมีการเติมธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนในกระบวนการแก๊สซอพต์ในทรายคิง (SN) เมื่อนำชิ้นทดสอบมาชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการคาร์บูไรซิง (CB) ในภายหลัง จึงทำให้ธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจนสูงกว่าการทำคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว จึงเป็นสาเหตุทำให้สมบัติวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วม (SN+CB) สูงกว่าวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว (CB) นั้นเอง

สมบัติวัสดุที่ปรับปรุงได้สามารถนำไปพิจารณาเลือกใช้งานวัสดุ จากสมบัติวัสดุที่ปรับปรุงได้ของทั้ง 2 กระบวนการนั้น หากพิจารณาจากสมบัติการต้านทานแรงดึง จะพบว่าผลการปรับปรุงของทั้ง 2 กระบวนการ ได้ผลที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาจากระยะเวลาในการอบชุบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ จะพบว่ากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงเพียงอย่างเดียว เหมาะแก่การนำไปใช้งานมากที่สุดและจากสมบัติวัสดุด้านการต้านแรงดึงที่ได้หลังการปรับปรุงนั้น จะพบว่าวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C เหมาะแก่การนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจากวัสดุที่ปรับปรุงได้มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นที่ใช้งานได้

4.6 ผลการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.6.1 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

ในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานความปลอดภัย UN ECE R-14 ซึ่งในการวิเคราะห์ผลจะอาศัยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ANSYS Workbench

จากเกณฑ์การยอมรับผลการทดสอบตามข้อกำหนดของ ECE R-14 นั้นจะพิจารณาเพียงแต่ความเสียหายที่เกิดขึ้นในจุดยึดเข็มขัดนิรภัย และการเสียรูปใด ๆ รวมไปถึงการเสียรูปอย่างถาวร ซึ่งเรียกได้ว่าการเสียหายแบบครากนั้นเป็นที่ยอมรับได้ ถ้าหากว่าจุดยึดเข็มขัดนิรภัยเกิดความเสียหายแบบฉีกขาดแล้วผลการทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยนั้นก็ไม่ผ่านตามข้อกำหนดของ ECE R-14 และการวิเคราะห์ความเสียหายของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยนั้นจะพิจารณาตามทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion energy) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ค่าความเค้นฟอนมิสเสส (von Misses Stress) ที่เกิดขึ้นบนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยจะเปรียบเทียบค่าความเค้นฟอนมิสเสส (von Misses Stress) และค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ (σ_U) ซึ่งเงื่อนไขเกณฑ์ในการพิจารณาความเสียหายของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังนี้

1. ค่าความเค้นฟอนมิสเสส (von Misses Stress) ที่เกิดขึ้นบนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยนั้นมีค่ามากกว่าค่าความเค้นคราก (σ_y) แต่ยังไม่เกินค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ (σ_U) นั้นจะนิยามความเสียหายได้ว่า “เกิดการเสียหายแบบคราก แต่ยังไม่เกิดการเสียหายแบบฉีกขาด” ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้
2. ค่าความเค้นฟอนมิสเสส (von Misses Stress) ที่เกิดขึ้นบนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยที่บริเวณตำแหน่งใด ๆ นั้นมีค่ามากกว่าค่าความเค้นคราก (σ_y) และมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ (σ_U) นั้นจะนิยามความเสียหายได้ว่า “เกิดการเสียหายแบบคราก และมีโอกาสที่จะเกิดการเสียหายแบบฉีกขาด” ในการวิเคราะห์นั้นไม่สามารถยอมรับได้

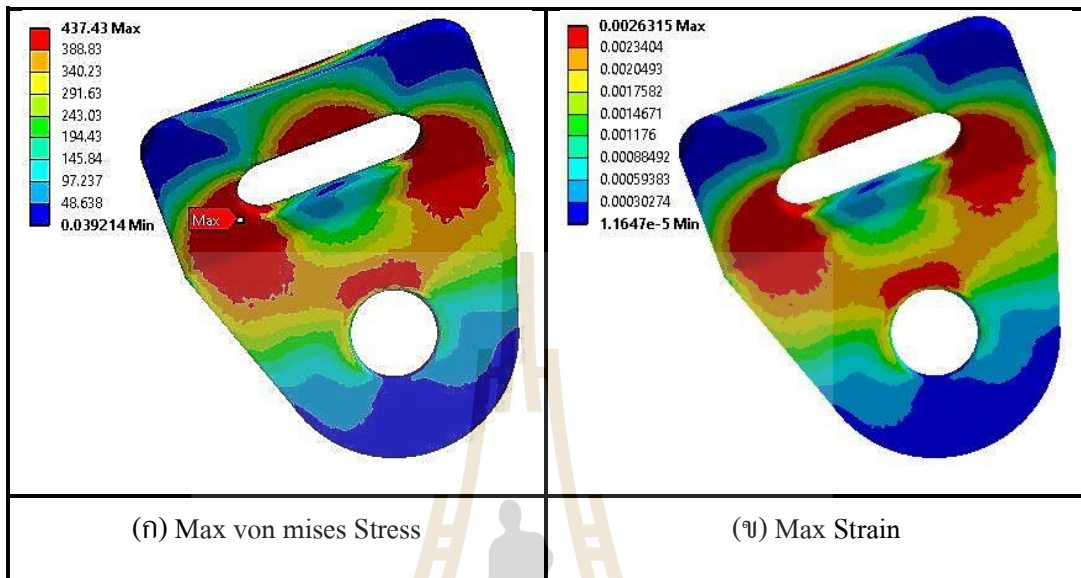
ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยจะต้องอาศัยการวิเคราะห์ร่วมกับโครงสร้างที่นิ่ง และนอกจากนี้จะนำวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติวัสดุด้วยกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส นำมาประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยลักษณะการแสดงผลวิเคราะห์จะแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ลักษณะจุดยึดเข็มขัดนิรภัยและโครงสร้างที่นั่ง

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยใช้วัสดุที่ผ่านการปรับปรุง ซึ่งพิจารณาการเลือกวัสดุจากข้อมูลในหัวข้อที่ 4.5.4 สามารถเลือกวัสดุที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงอุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C (CB-T500) เนื่องจากระยะเวลาในการอบชุบค่อนข้างสั้นและได้สมบัติวัสดุด้านการต้านทานแรงดึงที่ตีรวมถึงวัสดุมีความยืดหยุ่นเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานมากที่สุด และจากการนำวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงมาใช้งาน (CB-T500) พบว่าวัสดุที่นำมาใช้ในชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ ECE R-14 แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยมีค่าความเค้นฟอนมิสเสสสูงสุด (Maximum von Mises Stress) เท่ากับ 437.43 MPa ซึ่งต่ำกว่าค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ จึงถือว่าสามารถใช้งานได้ ซึ่งกล่าวได้ว่าจุดยึดเข็มขัดนิรภัยนั้นมีค่า

มากกว่าค่าความเค้นคราก (σ_y) แต่ยังไม่เกินค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุ (σ_u) จึงเกิดการเสียหายแบบคราก แต่ยังไม่เกิดการเสียหายแบบฉีกขาด ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ผ่านเงื่อนไขข้อกำหนด ECE R-14

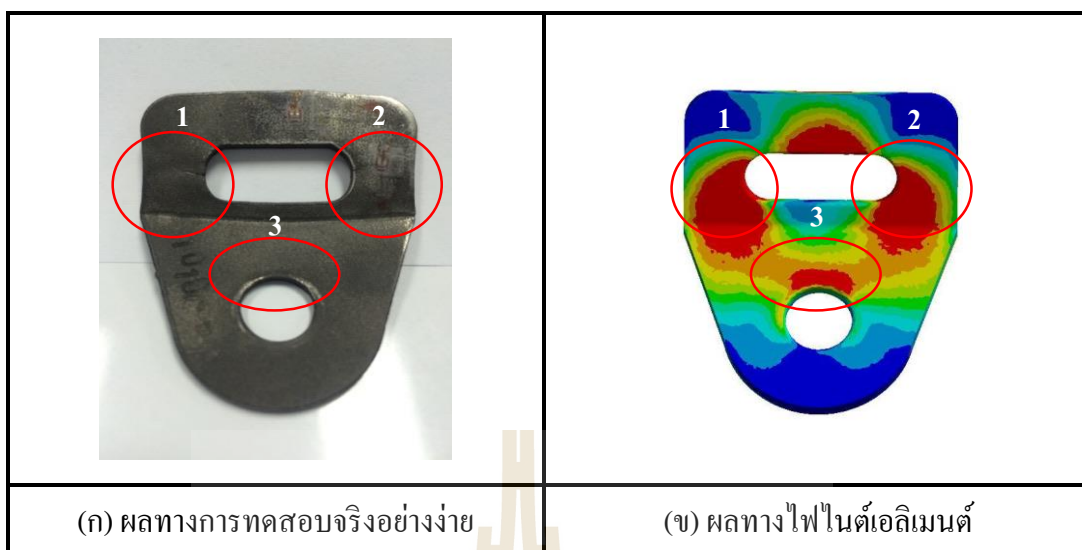


รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

4.6.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการทดสอบตามเงื่อนไข ECE R-14 มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำการสร้างแบบจำลองการทดสอบจริงอย่างง่ายเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปัญหา

จากการตรวจสอบความถูกต้องพบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดลักษณะการเสียรูปเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบจริงอย่างง่าย ซึ่งลักษณะการเสียรูปจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับแรงที่กระทำกับชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยบริเวณที่มีการเสียรูปมากที่สุดและเกิดขึ้นอันดับต้น ๆ จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ 1, 2 และ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



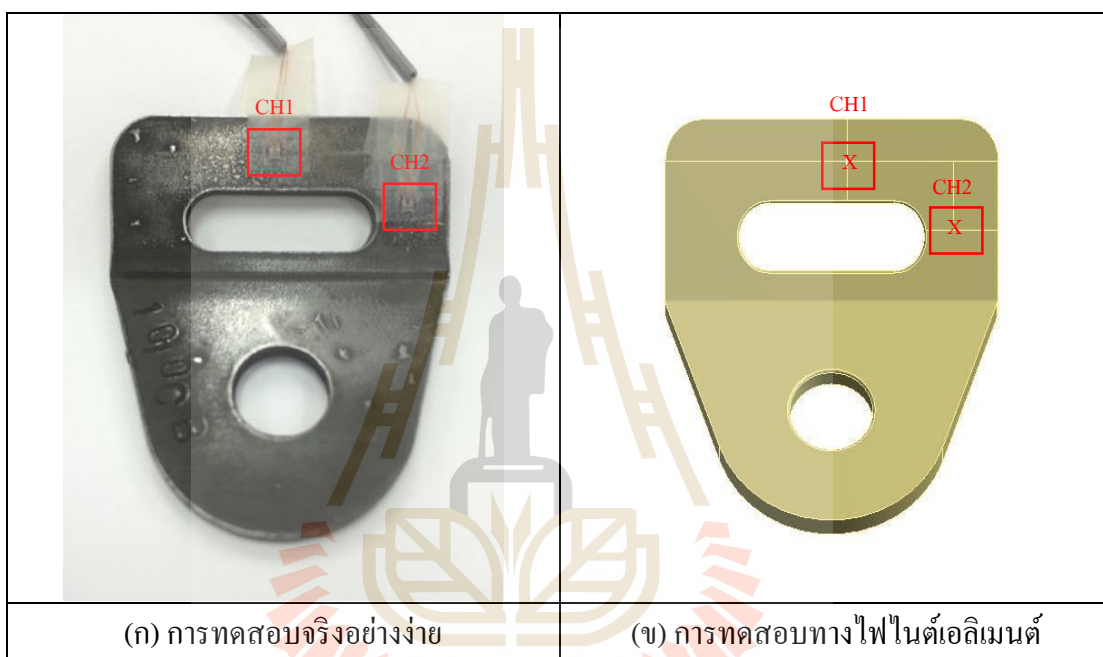
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยที่เกิดความเสียหาย

จากการตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยอาศัยการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดบริเวณผิวชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย เพื่อวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบจริง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงอย่างง่ายกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลจากการตรวจสอบพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุของทั้งสองวิธีการทดสอบมีแนวโน้มที่มีความสอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.16

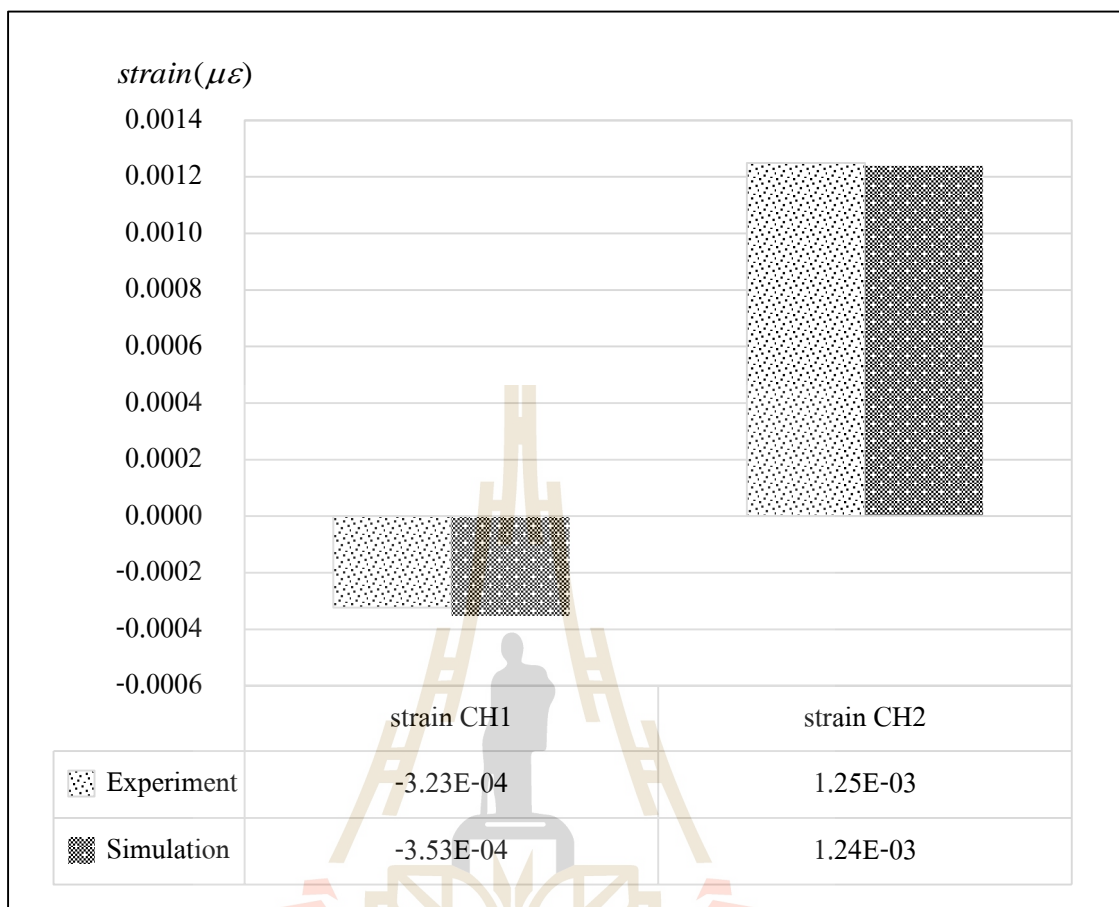
จากรูปที่ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบผลความเครียดระหว่างการทดสอบจริงอย่างง่ายกับการวิเคราะห์ผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะทำการวัดค่าความเครียดบริเวณ 2 ตำแหน่งในชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย ตำแหน่งในการวัดดังรูปที่ 4.17 พบว่าผลความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุที่ตำแหน่ง CH1 เกิดพฤติกรรมรับแรงกด (Compression) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมแนวโน้มการรับแรงของวิธีการทดสอบจริงอย่างง่ายกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าวสอดคล้องกัน ผลต่างระหว่างสองวิธีการทดสอบที่ตำแหน่ง CH1 เท่ากับ 9.33% และความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุที่ตำแหน่ง CH2 เกิดพฤติกรรมรับแรงดึง (Tension) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมแนวโน้มการรับแรงของวิธีการทดสอบจริงอย่างง่ายกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังกล่าวสอดคล้องกันเช่นกัน ผลต่างระหว่างสองวิธีการทดสอบที่ตำแหน่ง CH2 เท่ากับ 0.83%

จากผลการตรวจสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความเชื่อถือได้สูงและมีความแม่นยำที่สามารถยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งการทดสอบดังกล่าว

เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของเงื่อนไขขอบเขตของทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์จุดยึดเข็มขัดนิรภัย เนื่องจากการเลือกใช้ขนาดอิลิเมนต์ดังกล่าวนั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการและผลเฉลยนั้นเริ่มเข้าสู่ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดการแบ่งเอลิเมนต์รูปทรงสี่เหลี่ยม 4 จุดต่อ (Tetrahedral element) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลที่ใช้เวลาให้การประมวลผลสั้นและมีความถูกต้องสอดคล้องกับการทดสอบจริงอย่างง่ายอีกด้วย



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งในการวัดความเครียด



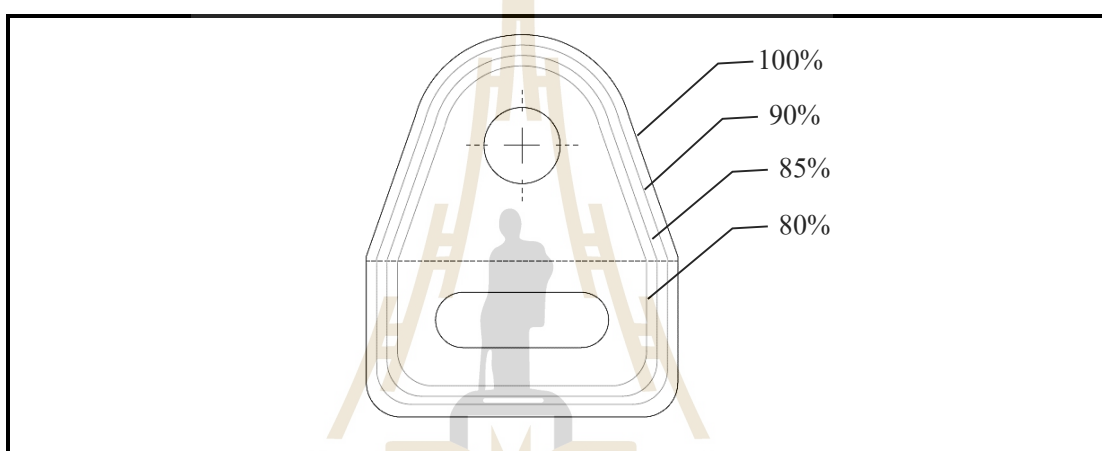
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของผลการทดสอบจริงอย่างง่ายและผลวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

4.6.3 การออกแบบชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย โดยการพิจารณานำวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส (CB-T500) มาประยุกต์ใช้งานในส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย พบว่าวัสดุชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยเกิดความแข็งแรงผ่านเงื่อนไขการทดสอบความปลอดภัยของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย ECE R-14 เราจึงพิจารณาที่จะนำชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยมาออกแบบเพื่อลดการใช้วัสดุ โดยเลือกพิจารณาปัจจัยขนาดของรูปร่างของชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย เพื่อลดการใช้งานวัสดุอย่างสูงและไม่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งรูปแบบในการออกแบบแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การออกแบบการทดสอบ

รูปแบบ	ความหนา (มิลลิเมตร)	ขนาดรูปร่าง Geometry Size (%)	ขนาดพื้นที่ Area (%)
1	3	100%	100.00
2		90%	81.01
3		85%	72.07
4		80%	60.26



รูปที่ 4.19 แสดงขนาดรูปร่างการออกแบบชิ้นงานจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

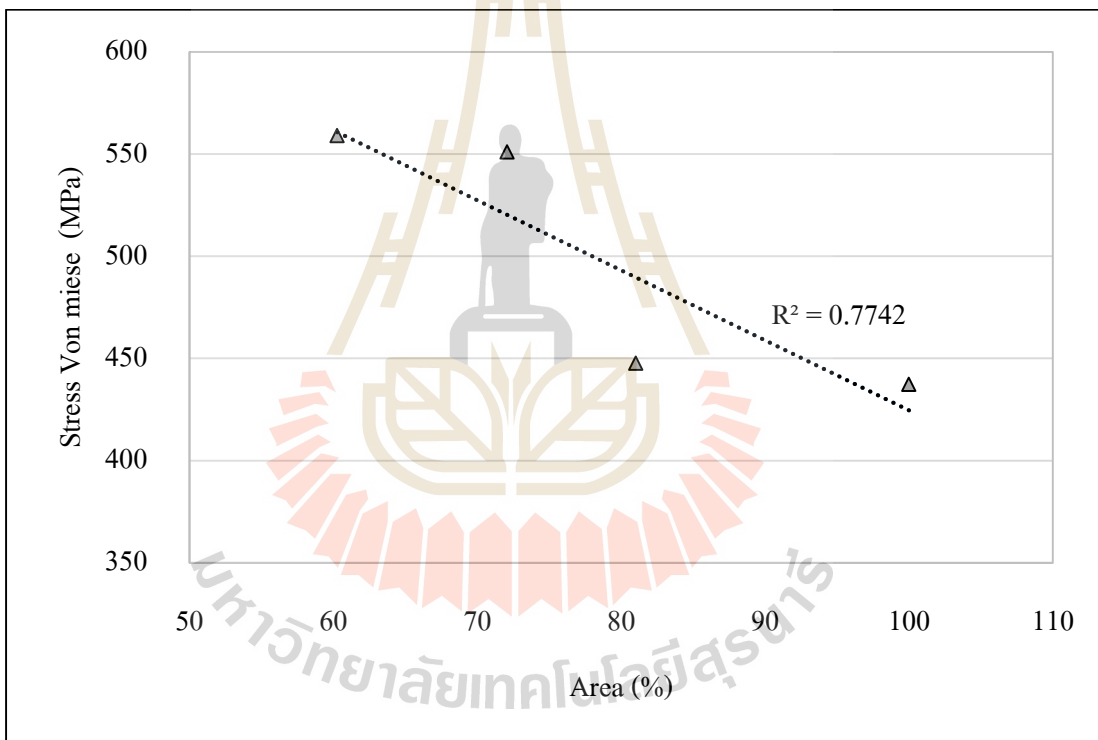
จากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อทำการลดขนาดรูปร่างลดลง พฤติกรรมการเกิดความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณหูทั้งสองข้างของชิ้นงานจุดยึดเข็มขัดนิรภัย และบริเวณเหนือจุดที่สวมนี้ถอดขึ้นไปเล็กน้อยก็ได้รับความเค้นสูงเช่นเดียว พฤติกรรมการได้รับความเครียดภายในเนื้อวัสดุก็เกิดในลักษณะที่สอดคล้องกันกับพฤติกรรมของความเค้น เนื่องจากเมื่อชิ้นงานจุดยึดเข็มขัดนิรภัยได้รับแรงกระทำที่มีลักษณะที่เป็นแบบภาระกรรมแรงดึง พฤติกรรมการเสียรูปจึงเป็นไปในทิศทางของแรงกระทำ และเนื่องด้วยบริเวณหูทั้งสองข้างเป็นส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุดของชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัย จึงส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดความเค้นและความเครียดสูงสุดนั่นเอง

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยตามเงื่อนไข ECE R-14

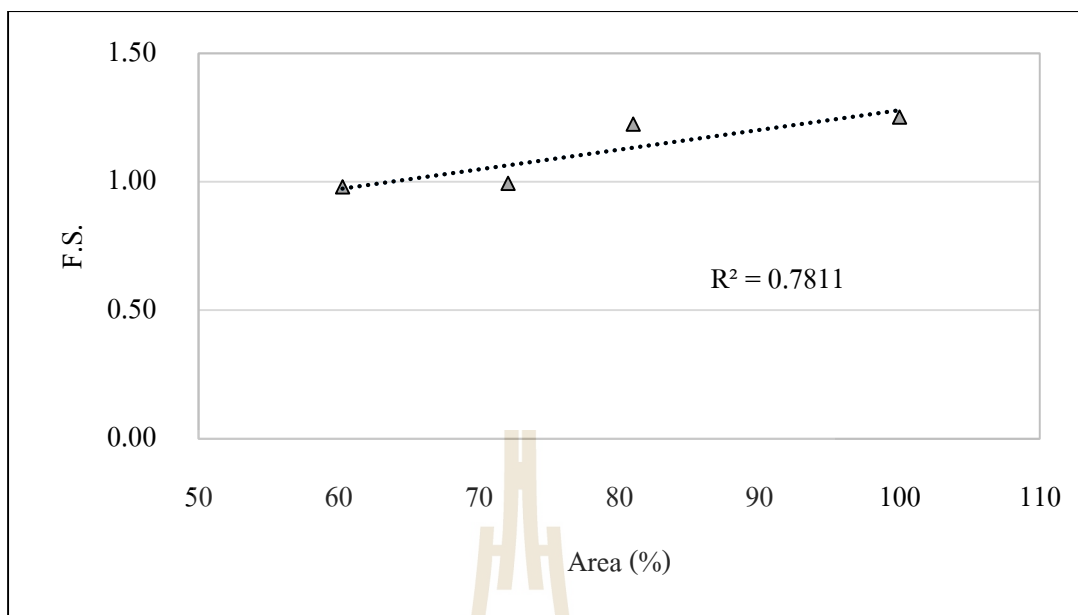
รูปแบบ	ลักษณะ	
	Stress von Misses (MPa)	Strain (mm/mm)
1	<p>437.43 Max 388.83 340.23 291.63 243.03 194.43 145.84 97.237 48.638 0.039214 Min</p>	<p>0.0026315 Max 0.0023404 0.0020493 0.0017582 0.0014671 0.001176 0.00088492 0.00059383 0.00030274 1.1647e-5 Min</p>
2	<p>447.3 Max 397.76 348.23 298.7 249.17 199.64 150.1 100.57 51.039 1.5071 Min</p>	<p>0.0026432 Max 0.0023509 0.0020585 0.0017661 0.0014737 0.0011813 0.0008896 0.00059658 0.0003042 1.1814e-5 Min</p>
3	<p>551.08 Max 489.96 428.65 367.73 306.61 245.5 184.38 123.27 62.152 1.0363 Min</p>	<p>0.0032674 Max 0.0029061 0.0025449 0.0021836 0.0018223 0.001461 0.0010997 0.00073844 0.00037716 1.5879e-5 Min</p>
4	<p>559.12 Max 497.37 435.61 373.86 312.11 250.35 188.6 126.84 65.087 3.3325 Min</p>	<p>0.0033016 Max 0.0029376 0.0025737 0.0022097 0.0018458 0.0014818 0.0011179 0.0007539 0.00038995 2.5992e-5 Min</p>

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัย

รูปแบบ	ความหนา (mm)	ขนาดรูปร่าง	Stress (von Misses) (MPa)	Strain (mm/mm)	FOS	ผลการ วิเคราะห์
1	3	100%	437.43	0.0026315	1.25	✓
2	3	90%	447.65	0.0026442	1.22	✓
3	3	85%	551.08	0.0032674	0.99	X
4	3	80%	559.12	0.0033016	0.98	X



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นฟอนมิสเสสกับขนาดพื้นที่จุดยึดเข็มขัดนิรภัย



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความปลอดภัยกับขนาดพื้นที่จุดยึดเข็มชนิดนิริภัย

จากผลการออกแบบโดยใช้วัสดุ CB-T500 พบว่าสามารถลดการใช้งานวัสดุบริเวณชิ้นส่วนจุดยึดเข็มชนิดนิริภัยลงได้ โดยใช้วัสดุที่มีความหนา 3 mm และสามารถลดขนาดพื้นที่ของชิ้นส่วนจุดยึดเข็มชนิดนิริภัยลงได้ 19% ซึ่งในการออกแบบนี้ค่าความปลอดภัยในการใช้งานเท่ากับ 1.22 จึงถือว่าสามารถใช้งานได้และผ่านเงื่อนไขข้อกำหนดตามมาตรฐานความปลอดภัย ECE R-14

การทดสอบจุดยึดเข็มชนิดนิริภัยของโครงสร้างที่นั่งผู้โดยสารของรถโดยสารขนาดตามข้อกำหนดของ ECE R-14 นั้นมีเกณฑ์การยอมรับผลการทดสอบได้ระบุไว้ดังนี้

1. จุดยึดเข็มชนิดนิริภัยต้องทนแรงได้ไม่น้อยกว่า 0.2 วินาทีที่ต้องไม่เกิดความเสียหายใดๆปรากฏที่โครงสร้างที่นั่งหรือจุดยึดที่นั่ง

2. ระบบปรับตำแหน่ง และระบบเลื่อนหรืออุปกรณ์ล้อค ในระหว่างการทดสอบการเสีรูปถาวร รวมถึงการแตกหักบางส่วน อาจเป็นที่ยอมรับได้ถ้าหากความเสียหายเหล่านี้ไม่เพิ่มความเสี่ยงของการบาดเจ็บในกรณีที่เกิดการชนและสามารถรองรับแรงตามที่กำหนดได้

ความมุ่งหวังนี้เพื่อประโยชน์ในการใช้งานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สต่อไปในอนาคตและออกแบบเพื่อลดการใช้งานวัสดุ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนจุดยึดเข็มชนิดนิริภัยและเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงผิวต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการดำเนินงานวิจัยการศึกษาออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส โดยมีวัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1010
2. เพื่อออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยโดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส
3. สามารถออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยที่มีความแข็งแรงผ่านมาตรฐานความปลอดภัยตามเงื่อนไขข้อกำหนด UN ECE R-14

สามารถนำกรรมวิธีการปรับปรุงสมบัติวัสดุโดยการชุบแข็งผิวไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความหลากหลายในการใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมยานยนต์ และสามารถนำผลการวิจัยไปใช้ต่อยอดหรือนำไปสู่การผลิตใช้งานได้ในอนาคต

5.1.1 อิทธิพลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส

อิทธิพลของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงและกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์ในทรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิง สามารถเพิ่มสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงและความแข็งของวัสดุ เนื่องจากอิทธิพลของการเติมธาตุคาร์บอนและธาตุไนโตรเจน ส่งผลให้สมบัติวัสดุดังกล่าวมีแนวโน้มสูงขึ้น และหลังจากขึ้นทดสอบผ่านการอบคืนตัวส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคและความแข็งมีความสม่ำเสมอ ทำให้ขึ้นทดสอบเหมาะแก่การนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น

จากผลการปรับปรุงวัสดุด้วยกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส จะสามารถวัสดุนำไปทดลองวิเคราะห์ใช้กับชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ โดยเลือกวัสดุที่ชุบแข็งผิวด้วยแก๊สคาร์บูไรซิงและผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 °C เนื่องจากมีสมบัติด้านการต้านทานแรงดึงที่ดี มีความยืดหยุ่น และใช้เวลาในกระบวนการอบชุบแข็งผิวที่สั้น จึงเหมาะแก่การนำไปทดลองใช้งานจริงมากที่สุด

5.1.2 การวิเคราะห์และออกแบบด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผ่านโปรแกรม ANSYS Workbench ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปโดยการวิเคราะห์ปัญหาความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยและโครงสร้างที่น้ำหนักใกล้เคียงกับการทดสอบจริงอย่างง่าย ซึ่งจากการนำวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งผิวมาใช้งานนั้น ส่งผลให้ชิ้นส่วนจุดยึดเข็มขัดนิรภัยเกิดความแข็งแรงมากขึ้นไม่เกิดความเสียหายและผ่านมาตรฐานการทดสอบตามเงื่อนไขข้อกำหนด ECE R-14

การออกแบบจุดยึดเข็มขัดนิรภัยโดยการเลือกใช้วัสดุที่ผ่านการชุบแข็งผิวด้วยแก๊ส โดยสามารถลดการใช้ขนาดพื้นที่จุดยึดเข็มขัดนิรภัยลงได้ 19% ซึ่งจุดยึดเข็มขัดนิรภัยไม่เกิดความเสียหายแบบฉีกขาด และผ่านมาตรฐานการทดสอบตามเงื่อนไขข้อกำหนด ECE R-14

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทำการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง สามารถปรับปรุงสมบัติวัสดุทั้งด้านความแข็งแรงและการต้านทานแรงดึงได้ดี แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาในกระบวนการอบชุบก็มากขึ้นไปด้วยเช่นกัน จึงควรพิจารณาตามความเหมาะสมกับการใช้งาน

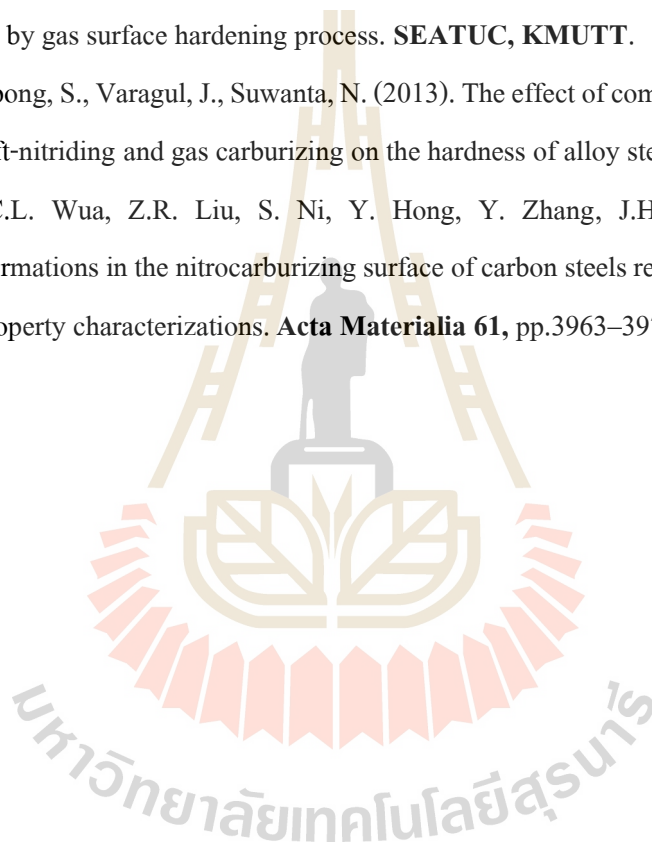
5.2.2 ในการวิเคราะห์ผลด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรวิเคราะห์ทั้งโครงสร้างที่นิ่งเพื่อความแม่นยำและใกล้เคียงกับปัญหาจริงมากที่สุด

รายการอ้างอิง

- มนัส สติรจินดา. (2543). เหล็กกล้า. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- มนัส สติรจินดา. (2543). วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- มานพ ดันตระบัณชิตย์. (2535). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ประชาชน จำกัด
- อิทธิพล เดี่ยวณิชย์. (2550). การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก. สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ณรงค์ศักดิ์ ชรรณโชติ. (2558). วัสดุวิศวกรรม กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2555). ไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิศวกรรม กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พระราชบัญญัติกรมการขนส่งทางบก.(2555). หลักเกณฑ์ วิธีการและเงื่อนไขการทดสอบจุดยึดเข็มขัดนิรภัย” กรมการขนส่งทางบก กรุงเทพมหานคร
- 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.
- ASM International. (2013). **ASM Handbook Volume 4A. Steel Heat Treating Fundamentals and Processes.** J. Dosselt and G.E Totten, editor.

- ASTM International. (2012). **Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials (E8/E8M-11)**. USA: ASM International.
- Amarishkumar J. Patel 1, Sunilkumar N. Chaudhari. (2015). Effect of Different Tempering Temperature and Different Load on Wear Behaviour and Mechanical Properties on Mild Steel. **Scientific Journal of Impact Factor (SJIF): 3.134**. Volume 2 e-ISSN (O): 2348-4470., p-ISSN (P): 2348-6406.
- A. Arulbrittoraj., P. Padmanabhan., M. Duraiselvam., R. Srinivasan and G. Ebenezer. (2016).The effect of sliding wear parameters on carburized AISI1040 steel. **Journal of Mechanical Science and Technology**.Vol.30 (4): pp. 825-1833.
- Belete Kefarge Azmite., and Adhena Ayaliew Werkneh. (2015).An experimental study on the mechanical characteristics of low alloy carbon steels for better performance of traditional farm implements in Ethiopia. **International Journal of Materials Science and Applications**. pp. 420-430.
- Celalettin Yuce., Fatih Karpat., Nurettin Yavuz and Gokhan sendeniz. (2014). A Case Study: Designing for Sustainability and Reliability in an Automotive Seat Structure. **Sustainability**. pp. 4608-4631
- Donald R. Askeland.,(1996). The Science and Engineering of Materials.**Great Britain at the Alden Press, Oxford.**
- Fatai Olufemi Aramide, Simeon Ademola Ibitoye. (2010). Pack Carburization of Mild Steel, using Pulverized Bone as Carburizer: Optimizing Process Parameters, **Journal of Practices and Technologies**ISSN pp: 1583-1078.
- George E. Totten. (2007). **Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies**, CRC Press, USA.
- Heo Uk, Sun-Kyu Kim, Myung-Jun Song, In-Young Yang, Kwang-Hee Im. (2011). Effectiveness Evaluation for Seat Parts by Seat Belt Anchorage Strength Analysis. **International journal of precision engineering and manufacturing**. Vol. 12, no. 6, pp. 1031-1034.
- Jauhari, I., Rozali, S., Masdek, N., and Hiroyuki, O., (2007). Surface properties and activation energy analysis for superplastic carburizing of duplex stainless steel. **Materials science and engineering A** 466 230-234.

- Reginald U. Obinna C. O., 1Chioma I. Madueke, and Daniel O. Komolafe. (2017). Effects of Carburization with Palm Kernel Shell/Coconut Shell Mixture on the Tensile Properties and Case Hardness of Low Carbon Steel **FUOYE Journal of Engineering and Technology**. Vol 2: pp. 2579-0617.
- Sung Jong Kang and B.K. Chun. (2000). An effective approach to prediction of the collapse mode in automotive seat structure. **Thin-Walled Structures**. Vol 37: pp. 113–125
- Siwadamrongpong, S., Khaenkam, S., Tachee, K., (2012). Corrosion resistance of low carbon steel treated by gas surface hardening process. **SEATUC, KMUTT**.
- Siwadamrongpong, S., Varagul, J., Suwanta, N. (2013). The effect of combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing on the hardness of alloy steels. **SEATUC**.
- W.L. Chen, C.L. Wua, Z.R. Liu, S. Ni, Y. Hong, Y. Zhang, J.H. Chen., (2013). Phase transformations in the nitrocarburizing surface of carbon steels revisited by microstructure and property characterizations. **Acta Materialia** 61, pp.3963–3972.





การวิเคราะห์ผลทางสถิติ แบบ Paired T-Test : ค่าความแข็งแรงภายใต้การซึมลึกของกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 400°C เทียบกับอุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C

Paired t-test and CI: CB-T400, CB-T500

Paired T for CB-T400 - CB-T500

	N	Mean	StDev	SE Mean
CB-T400	8	326.6	91.3	32.3
CB-T500	8	282.3	65.8	23.2
Difference	8	44.35	27.47	9.71

95% lower bound for mean difference: 25.95

T-test of mean difference = 20 (vs>20): T-Value=2.51 P-Value=0.020

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ แบบ Paired T-Test : ค่าความแข็งแรงภายใต้การซึมลึกของกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C เทียบกับอุณหภูมิการอบคืนตัว 550°C

Paired t-test and CI: CB-T500, CB-T550

Paired T for CB-T500 - CB-T550

	N	Mean	StDev	SE Mean
CB-T500	8	282.3	65.8	23.2
CB-T550	8	260.3	56.0	19.8
Difference	8	22.00	11.05	3.91

95% lower bound for mean difference: 14.60

T-test of mean difference = 20 (vs>20): T-Value=0.51 P-Value=0.312

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ แบบ Paired T-Test : ค่าความแข็งภายใต้การซึมลึกของกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิงที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 400°C เทียบกับอุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C

Paired t-test and CI: SN+CB-T400, SN+CB-T500

Paired T for SN+CB-T400 - SN+CB-T500

	N	Mean	StDev	SE Mean
SN+CB-T400	8	363.0	88.8	31.4
SN+CB-T500	8	277.0	61.6	21.8
Difference	8	86.0	32.3	11.4

95% lower bound for mean difference: 64.40

T-test of mean difference = 20 (vs>20): T-Value=5.78 P-Value=0.000

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ แบบ Paired T-Test : ค่าความแข็งภายใต้การซึมลึกของกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพท์ไนตรายดิงและแก๊สคาร์บูไรซิงที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C เทียบกับอุณหภูมิการอบคืนตัว 550°C

Paired t-test and CI: SN+CB-T500, SN+CB-T550

Paired T for SN+CB-T500 - SN+CB-T550

	N	Mean	StDev	SE Mean
SN+CB-T500	8	277.0	61.6	21.8
SN+CB-T550	8	251.7	50.6	17.9
Difference	8	25.25	13.12	4.64

95% lower bound for mean difference: 16.46

T-test of mean difference = 20 (vs>20): T-Value=1.13 P-Value=0.148

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ แบบ Paired T-Test : ค่าความแข็งภายใต้การซึมลึกที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 400°C ของกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิ่งเทียบกับกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิ่ง

Paired t-test and CI: CB-T400, SN+CB-T400

Paired T for CB-T400 - SN+CB-T400

	N	Mean	StDev	SE Mean
CB-T400	8	326.6	91.3	32.3
SN+CB-T400	8	363.0	88.8	31.4
Difference	8	-36.35	15.58	5.51

95% lower bound for mean difference: (-49.38, -23.33)

T-test of mean difference = 20 (vs≠20): T-Value=-10.23 P-Value=0.000

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ แบบ Paired T-Test : ค่าความแข็งภายใต้การซึมลึกที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 500°C ของกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิ่งเทียบกับกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอพต์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิ่ง

Paired t-test and CI: CB-T500, SN+CB-T500

Paired T for CB-T500 - SN+CB-T500

	N	Mean	StDev	SE Mean
CB-T500	8	282.3	65.8	23.2
SN+CB-T500	8	277.0	61.6	21.8
Difference	8	5.33	11.98	4.24

95% lower bound for mean difference: (-4.68, -15.35)

T-test of mean difference = 20 (vs≠20): T-Value=-3.46 P-Value=0.011

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ แบบ Paired T-Test : ค่าความแข็งภายใต้การซึมลึกที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 550°C ของกระบวนการแก๊สคาร์บูไรซิงเทียบกับกระบวนการร่วมระหว่างแก๊สซอฟต์ในทรายดิ่งและแก๊สคาร์บูไรซิง

Paired t-test and CI: CB-T550, SN+CB-T550

Paired T for CB-T550 - SN+CB-T550

	N	Mean	StDev	SE Mean
CB-T550	8	260.3	56.0	19.8
SN+CB-T550	8	251.7	50.6	17.9
Difference	8	8.58	11.26	3.98

95% lower bound for mean difference: (-0.83, 18.00)

T-test of mean difference = 20 (vs≠20): T-Value=-2.87 P-Value=0.024



ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Siwadamrongpong, S., Khuntongtun, S., and Damrongdee, P. (2017). **Mechanical properties of thin low carbon steel treated by combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing**. The 11th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 13-14 March 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam.



MECHANICAL PROPERTIES OF THIN LOW CARBON STEEL TREATED BY COMBINED PROCESSES BETWEEN GAS SOFT-NITRIDING AND GAS CARBURIZING

Pornpailin Damrongdee, Siriporn Khuntongtum, Somsak Siwadamropong (*)
 School of Manufacturing Engineering
 Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, Thailand
 * Email: somsaksi@sut.ac.th

ABSTRACT

Low carbon steel is material that is widely used in general industries. Low carbon steel usually has a relatively low strength compare to other types of steel. The gas surface hardening process is popular process to increase the strength of low carbon steel. In these study, AISI 1010 steel was used to treat by gas soft-nitriding and gas carburizing. The specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Then, the specimens were brought through the gas surface hardening which has 2 processes (1) Gas carburizing (CB), (2) combined processes between Gas soft-nitriding and Gas carburizing (SN+CB). After treatment processes, the specimen was tempered at 400 °C and 500 °C. From experimental results, ferrite and pearlite phase were found at the core, on the other hand, martensite phase was found at the specimen surface. The yield and ultimate tensile strengths were increased when the carburizing process time increased. The tensile strength of specimen treated by combined process (SN+CB) was higher than that treated by carburizing process (CB). Moreover, the tensile strength at tempering of 400 °C was higher than that of tempering of 500 °C.

KEYWORDS: Gas carburizing, Gas soft-nitriding, Low carbon steel, AISI 1010 steel, hardness.

1. INTRODUCTION

Low carbon steel in which the main constituent is carbon in the less than 0.2%wt. Thin low carbon steel is one of the most widely used material generation industry due to low cost and low carbon steel has ductility but low strength. Gas surface hardening process, can improve mechanical properties of low carbon steel such as gas carburizing and gas soft-nitriding because these processes can control atmosphere in furnace.

Normalizing heat treatment process is heating a steel above the critical temperature, holding for a period of time long enough for transformation to occur, and air cooling. Normalized heat treatment establishes a more uniform carbide size and distribution which facilitates later heat treatment operations and produces a more uniform final product.

Gas soft-nitriding that diffuses nitrogen into the surface of a metal to create a case-hardened surface. These processes are most commonly used on low-carbon, low-alloy steels. This is a heat treatment process, in which steel absorbs nitrogen to form a nitride that hardens the surface. This process diffuses nitrogen in the surface by adding ammonia gas in a nitrogen atmosphere and maintaining temperature at 550 to 600 °C. The resulting nitride hardens the surface.

Carburizing heat treatment is the introduction of carbon into the surface of steel. The gas carburizing process is well-known techniques that suitable for low carbon. Carburizing occurs when the steel is heated above the critical temperature in a carburizing furnace which contains more carbon than the steel contains.

Tempering is usually performed after hardening, to reduce some of the excess hardness, and is done by heating the metal to some temperature below the critical point for a certain period of time, then allowing it to cool in still air.

Suwanta, et al. (2013), 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 results signified that the combined processes, SN+CB, improve its properties the ultimate tensile strength and the smoother and lower variation of section harness, while the toughness was still acceptable.

The previous work Tachee, et al. (2011), investigated influence of gas surface hardness process on the corrosion

The 11th SEATUC Symposium

of low carbon steel. The AISI 1020 specimen was normalized by normalizing and shot blasting. Then the specimen was treated by gas soft-nitriding, gas carburizing, gas carbonitriding and the combined processes between gas soft-nitriding and carburizing process. It was found that the gas carburizing process yielded the good corrosion resistance compared to other process.

The present work is focused on the effects of gas carburizing process and combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing process on the mechanical properties of thin low carbon steel.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURES

In this study, the materials used thin low carbon steel AISI 1010 is thicknesses 3 mm, which the chemical composition of sample shown in Table1 and minimum requirement of mechanical properties are shown in Table3. Thin low carbon steel were cut according to ASTM E8 (Table2), which it has shape shown in Fig. 1.

Table1. Chemical composition of low carbon steel AISI 1010 (wt %)

Element in wt %	
C	0.0810
Si	0.0190
Mn	0.3800
P	0.0170
S	0.0210
Cr	0.0270
V	0.0030
Al	0.0130
Fe	Bal.

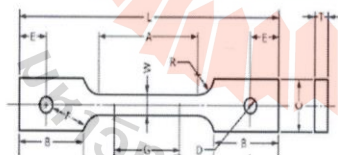


Fig. 1 Dimension for specimen follow ASTM E8

Table2. Dimension for specimen follow ASTM E8

Dimensions, (mm)	
G-Gauge length	50.0 ± 0.1
W-Width	12.5 ± 0.2
T-Thickness, max	16
R-Radius of fillet, mm	13
L-Overall length, mm	200
A-Length of reduced section, min	57
B-Length of grip section, approximate	50
C-Width of grip section, approximate	50
D-Diameter of hole for pin, min	13
E-Edge distance from pin, approximate	40
F-Distance from hole to fillet, min	13

Table3. Tensile properties of low carbon steel.

Steel type	Tensile	Yield	Elongation
	Stress [MPa]		[%]
AISI1010	230	180	49

The specimens were taken into normalizing process is defined at temperature 930 °C in 1 hour for the steel is changing as austenite phase and cooling it in the air. After that, surface of specimens was cleaned with shot blasting by using steel bell type 0.3 mm in 1 hour (ASM v5, 1987). Gas carburizing process is the addition nitrogen and carbon into atmosphere. Absorbs carbon time of carburizing process was varied. The treatment conditions of gas surface hardening process consist of Gas soft-nitriding (SN) shown in Fig.2, Gas carburizing condition1 (CB1) shown in Fig.3 and Gas carburizing condition2 (CB2) shown in Fig.4. From Table 4 are shown treatment conditions and various tempering (tempering was made after gas surface hardening process) at 400 °C and 500 °C in 1 hour and then cooled in air.

The specimens were tested tensile tests, it was carried out by a universal testing machine capability load 100 kN. Metallographic specimens to reveal the microstructure followed sequence the steps include sectioning, mounting, course grinding, fine grinding, etching and microscopic examination. In addition, the hardness measurement from surface to core of specimen was carried out by using micro-Vickers hardness at loading of 100 g in 10 seconds time.

Table 4 Treatment conditions of specimens by gas surface hardening process.

Code test	Treatment conditions	Tempering
CB1	Carburizing1	400
		500
CB2	Carburizing2	400
		500
SN+CB1	Soft-nitriding + Carburizing1	400
		500
SN+CB2	Soft-nitriding + Carburizing2	400
		500

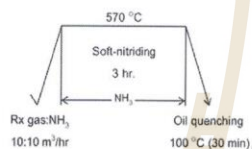


Fig. 2 Soft-nitriding process (SN)

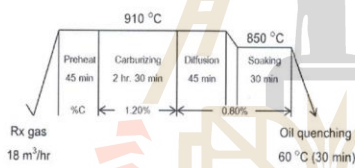


Fig. 3 carburizing condition1 (CB1) process

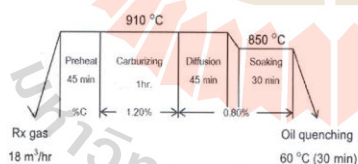


Fig. 4 Carburizing conditions2 (CB2) process

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig.5 show the hardness bar graph of specimens at different temperatures are expressed as the hardness versus process. The peak hardness at 400 °C is 488 Hv on the condition SN+CB1 and lowest hardness at 500 °C is 335 Hv on the condition CB2. Higher temperature will result into high ductility, but low strength and hardness. Low tempering temperatures will produce low ductility, but high strength and hardness. While, the time of treated processes on hardness less than.

The results of micro-hardness profile by cross-section after carburizing condition1 (CB1) process for 2 hr. 30 min is shown in Fig 6 and carburizing condition1 (CB2) process for 1 hr. is shown in Fig.7 Normally, the hardness curves are plotted between surface to core. Moreover, the illustration shows that at the lower temperature of tempering processes affect hardness increased. The hardness of CB and SN+CB processes are very similar at the same temperature. The comparison between condition1 and condition2 found that hardness of condition1 higher than hardness of condition2 because absorbs carbon time of carburizing condition1 process higher than absorbs carbon time of carburizing of condition2 process which can see total case depth of specimens (Fig.8).

In this study, the hardness of specimens treated by gas carburizing (CB) and combined processes was tested statistically and resulted that no significant different between such hardness with significant level of 0.05.

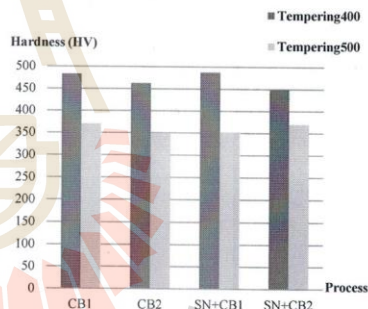


Fig. 5 Surface hardness of specimens AISI 1010

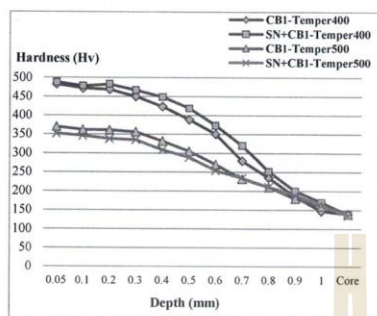


Fig. 6 Hardness of specimens AISI1010 on conditions 1

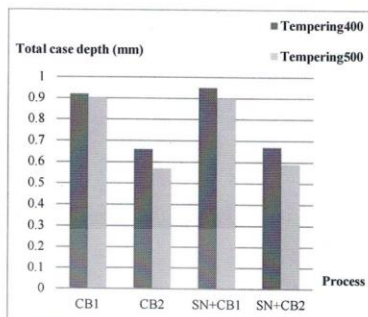


Fig. 8 Total case depth of specimens AISI 1010

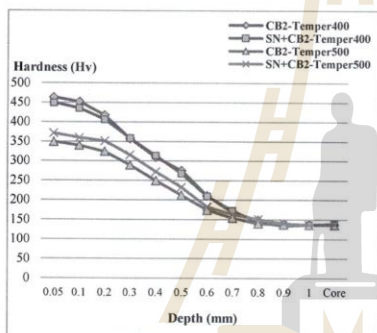


Fig. 7 Hardness of specimens AISI 1010 on conditions 2

Fig 9 and 10 show the optical microstructure of thin low carbon steel after gas surface hardening process effect on temperature tempering.

The microstructure of CB1 for 400 °C and 500 °C show in Fig 9 (a) and (b), respectively. The microstructure of CB1 at surface consists of martensite and some retained austenite while sub-surface consist of fine pearlite (dark) and martensite with lower carbon than surface and core consist of pro-eutectoid ferrite (white) and low carbon martensite. The microstructure of tempering process at 500 °C had grain sized is smaller than the tempering process at 400 °C. And the microstructure of SN+CB1 for 400 °C and 500 °C shown in Fig 9 (c) and (d) respectively. The microstructure of tempering process at 400 °C and 500 °C is composed of carbide, retain austenite and lath martensite.

The specimens CB2 of tempering process at 500 °C show in Fig. 10 (a) microstructure consist of ferrite and retain austenite but the microstructure at 400 °C show in Fig. 10 (b) included martensite and retain austenite.

The microstructure of SN+CB show in Fig. 9 (c, d) and Fig. 10 (c, d) depict the surface layer which has thicker of martensite case white layer and core is retain austenite for 400 °C the microstructure indicate resided of austenite and ferrite and grain boundary regions is cementite.

Table. 5 Mechanical properties of the specimens AISI1010 after surface hardening process

	Tempering 400 °C				Tempering 500 °C			
	CB1	SN+CB1	CB2	SN+CB2	CB1	SN+CB1	CB2	SN+CB2
Yield strength (MPa)	640	750	550	640	460	600	460	540
Ultimate Tensile (MPa)	749	866	680	730	552	686	560	610
%Elongation	3.28	4.16	5.70	4.10	12.12	5.54	14.50	5.40

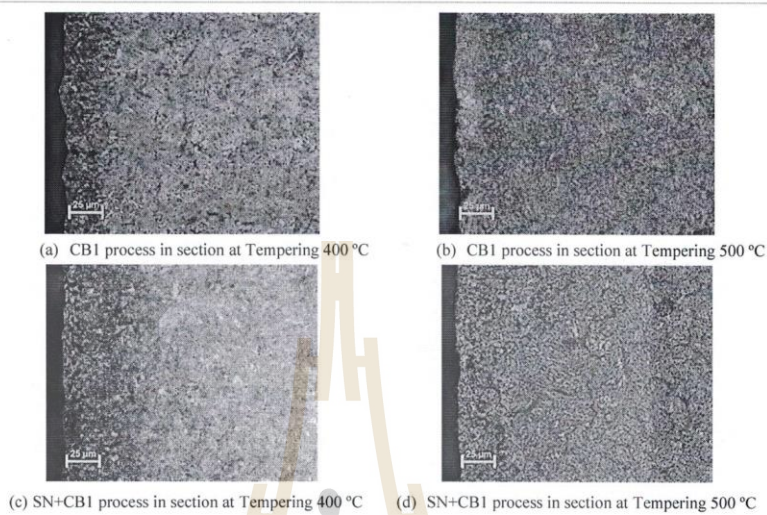


Fig. 9 Microstructure of (CB1) and (SN+CB1) Condition1



Fig. 10 Microstructure of (CB2) and (SN+CB2) Condition2

The tensile properties of thin low carbon steel with CB1, CB2, SN+CB1 and SN+CB2 are shown in Table 5. The tensile strength and yield strengths of SN+CB specimens are significantly higher than specimens of CB. The higher strength and lower elongation were affected by the formation of martensite, retain austenite, ferrite and pearlite within cases of SN+CB specimens.

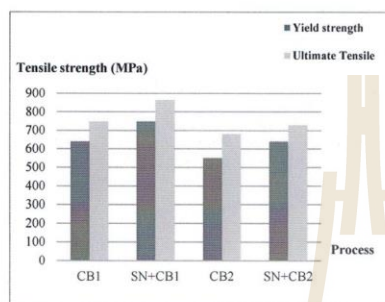


Fig. 11 Tensile test at Tempering 400 °C

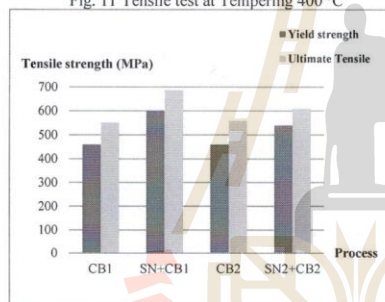


Fig. 12 Tensile test at Tempering 500 °C

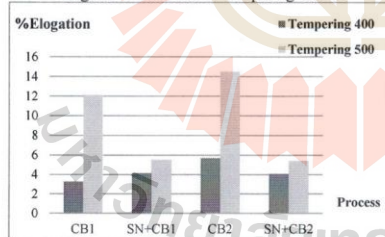


Fig. 13 The %Elongation of AISI 1010 after surface hardening process

4. CONCLUSIONS

The gas surface hardening process has effects on mechanical properties of thin low carbon steel AISI 1010 such as the increasing of hardness and tensile strength but remaining ductility. The carburizing (CB2) process yielded high strength, good ductility and shorter time than other gas surface hardening processes.

REFERENCES

ASM Handbook, Heat Treating, Material Park Ohio. ASM International, Vol. 4, 1987.
 ASM Handbook, Surface engineering, Material Park Ohio. ASM International, Vol. 5, 1987.
 ASM Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Material Park Ohio. ASM International, Vol. 5, 1987.
 Annual book of ASTM standard, Standard Test Process for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8/E8M-09, 2009.
 George E. Totten. Steel Heat Treatment Handbook: Metallurgy and Technologies, CRC Press, USA, 2007.
 Jauhari, I., Rozali, S., Masdek, N., and Hiroyuki, O., Surface properties and activation energy analysis for superplastic carburizing of duplex stainless steel., *Materials science and engineering A* 466 230-234, 2007.
 Fatai Olufemi Aramide, Simeon Ademola Ibitoye. Effects of carburization time and temperature on the mechanical properties of carburize M.S. using activated carbon as carburizer, *Material Research*, vol.12, No. 4, 483-487, 2009.
 Siwadamrongpong, S., Khaenkam, S., Tachee, K., Corrosion resistance of low carbon steel treated by gas surface hardening process. SEATUC, KMUTT, 2012.
 Siwadamrongpong, S., Varagul, J., Suwanta, N., The effect of combined processes between gas soft-nitriding and gas carburizing on the hardness of alloy steels. SEATUC, 2013.

PHOTOS AND INFORMATION



Pornpailin Damrongdee received the B.E. (2012) degree in Manufacturing Engineering for Suranaree University of Technology. She is studying in master degree, School of Manufacturing Engineering.

The 11th SEATUC Symposium

Siriporn Khuntongtum received the B.E (2007) degree in Material Engineering from King Mongkut 's University of Technology Thonburi, and M.E. (2009) degree in Material Engineering from Prince of Songkla University.

She is studying in Doctoral Degree, Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.



Somsak Siwadamrongpong received the B.E. (1995) degree in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) degree in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) degree in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology.

He is a Professor, Department of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Teahnology.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวพรไพลิน คำรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2532 เกิด ณ อำเภอสังขะ จังหวัดสุรินทร์ เริ่มการศึกษาในระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ณ โรงเรียนบ้านโพนชาย จังหวัดสุรินทร์ ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ณ โรงเรียนสังขะ จังหวัดสุรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต) เมื่อ พ.ศ. 2555 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ประสบการณ์การทำงาน

- สหกิจศึกษาในตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกรแผนก R&D ณ บริษัท วาลีโอ สยาม เทอร์มอลซิสเต็มส์ จำกัด จังหวัดชลบุรี (ระยะเวลา 4 เดือน พฤษภาคม-สิงหาคม พ.ศ. 2554)
- ปฏิบัติงานตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัย สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา (ระยะเวลา 2 ปี พ.ศ. 2555-2557)
- ฝึกงานในตำแหน่งนักศึกษาฝึกงานและทำงานวิจัยที่บริษัท ไทยโตเคนเทอร์โม จำกัด จังหวัดชลบุรี (ระยะเวลา 2 เดือน กรกฎาคม-สิงหาคม พ.ศ. 2559)
- เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมวิศวกรรมการผลิต (ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาในระดับมหาบัณฑิตศึกษา พ.ศ. 2558-2559)

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำความรู้ความเข้าใจในด้านการศึกษาคณะสมบัติของวัสดุเหล็กกล้า นำเสนอผลงานทางวิชาการในหัวข้อ MECHANICAL PROPERTIES OF THIN LOW CARBON STEEL TREATED BY COMBINED PROCESSES BETWEEN GAS SOFT-NITRIDING AND GAS CARBURIZING ในการสัมมนาวิชาการ South East Asian Technical University Consortium หรือ SEATUC ครั้งที่ 11 เมื่อ 13-14 มีนาคม 2560 ณ นครโฮจิมินห์ สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข.