

การศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน
ต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ

A STUDY OF THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT
PROCESSES ON THE ENDURANCE LIMIT OF MATERIAL

อรรถพล ไชยรา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน
ต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ



อรรถพล ไชยรา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำ ด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ A Study of the Influence of Heat Treatment Processes on the Endurance Limit of Material
ชื่อ - นามสกุล	นายอรรถพล ไชยรา
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล, Ph.D.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี, Ph.D.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ
ชื่อ – นามสกุล	นายอรรถพล ไชยรา
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในปัจจุบัน มีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าด้วยความร้อน เพื่อความสะดวกในการผลิตและปรับปรุงสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งาน เช่น การชุบแข็งหรือกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ

การศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุใช้กระบวนการทดสอบสมบัติของวัสดุเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด AISI 4140 ที่มีลักษณะต่างกัน 3 ชนิดคือ (1) วัสดุในสภาพจำหน่าย (2) วัสดุที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ และ (3) วัสดุที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง โดยการทดสอบใช้วิธีการทดสอบคือ การทดสอบแรงดึง การทดสอบความแข็ง การศึกษาโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความล้าแบบหมุนตัดแล้วนำผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบความล้าจากการสร้างแผนภาพ S-N Diagram เพื่อหาขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ

ผลการทดลองพบว่ากระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนนอกจากมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุแล้วยังมีอิทธิพลต่อสมบัติความล้าของวัสดุ ดังเห็นได้ว่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟมีค่า 316.17 N/mm^2 ส่วนวัสดุที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์มีขีดจำกัดความทนทาน 78.28 N/mm^2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุในสภาพจำหน่ายที่มีค่า 408.01 N/mm^2 ค่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจึงไม่สอดคล้องกับสมการประมาณค่า ($S'_e = 0.504 \sigma_u$) ซึ่งใช้ในการประมาณค่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุโดยทั่วไป

คำสำคัญ : การทดสอบความล้า การชุบแข็งและอบคืนไฟ การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์

Thesis Title	A Study of the Influence of Heat Treatment Processes on the Endurance Limit of Material
Name - Surname	Mr. Attapol Chaiyara
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sivakorn Anghong, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

At present, the use of heat treatment process of materials is necessary in a production of machine elements in order to ease the machining operation and to improve materials properties according to the applied condition. It is well understand that the heat treatment process affected mechanical properties such as tensile strength, hardness and ductility. However, the effect on fatigue properties has yet been understood. This research aims to study of the influence of heat treatment processes on the endurance limit of material.

The study was carried out by using AISI 4140 low alloy steel at different 3 conditions i.e. (1) commercially condition (2) annealed condition and (3) harden condition. A number of material testing techniques were used to examine properties of those materials such as tensile testing, hardness testing and microstructure testing. In addition, a rotary bending test was used to examine the fatigue property and plot S-N diagrams of materials.

The results of this study showed that the heat treatment processes not only affected on the mechanical properties and microstructure of the materials but also affected fatigue properties of the materials. The endurance limits of both heat treated materials were reduced dramatically. The endurance limit of commercially material was 408.01 N/mm^2 , the hardened and annealed materials were 316.17 N/mm^2 and 78.28 N/mm^2 respectively. The experimental results were indicated that an estimation equation ($S'_e = 0.504 \sigma_u$) could not be used to estimate the endurance limited of heat treated materials.

Keywords : fatigue test, endurance limit, hardening and tempering, full annealing

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือและคำแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ดร.สมศักดิ์ อิทธิโสภณกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จันทน์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า เพื่อให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนชี้แนวทางในการทำ วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณบาทหลวงอภิสิทธิ์ กฤษราลัมภ์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดจนค่าใช้จ่าย ต่างๆ ในการศึกษาระดับปริญญาโท ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ที่เปิดโอกาสให้ ศึกษาในระดับปริญญาโท ตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณอาจารย์ ชาญณรงค์ แก้วคำแสน แผนกวิชาเครื่องมือกลและเทคนิคการผลิต วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร ที่ให้ ความอนุเคราะห์สถานที่และใช้เครื่องทดสอบความแข็ง และให้คำแนะนำพร้อมทั้งให้ข้อคิดต่างๆ ที่ เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา คุณครู อาจารย์ ที่ให้ความรู้ รวมทั้ง ครอบครัว เพื่อน และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ที่เป็นกำลังใจและให้ความ ช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านเพื่อคิดค้น งานวิจัยอื่นๆ ไป

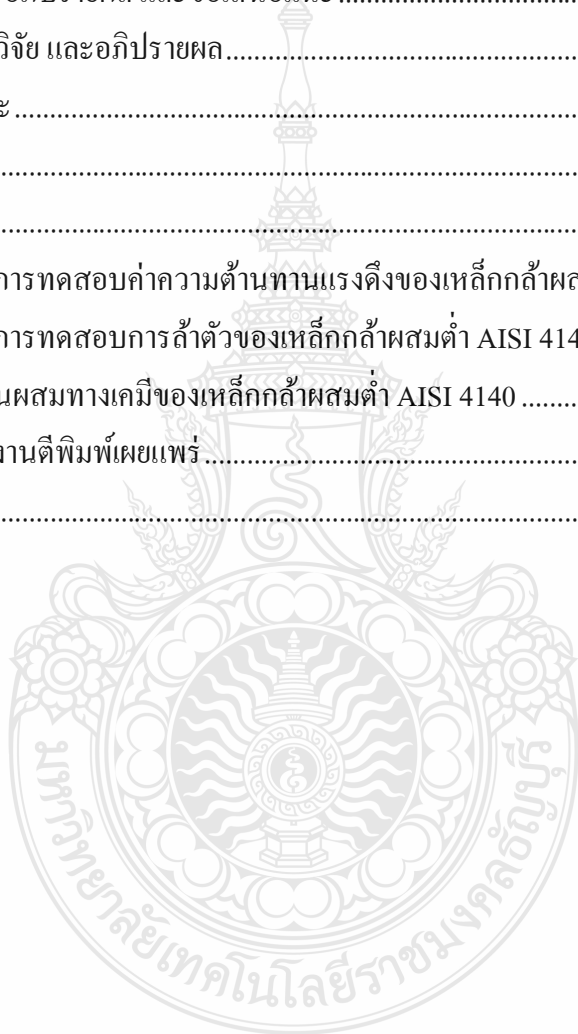
อรรถพล ไชยรา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.. ..	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 นิยามคำศัพท์.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3 ความล้าของวัสดุ.....	8
2.4 เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel)	13
2.5 กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment).....	16
2.6 การอบชุบเหล็กกล้าด้วยความร้อน	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	31
3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	38
4 ผลการดำเนินงานวิจัย	39
4.1 ผลการทดสอบการปรับปรุงสมบัติทางกล.....	39

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 ผลการทดสอบความล้า.....	45
4.3 การเปรียบเทียบขีดจำกัดความทนทานกับการประมาณค่าจากสมการ	46
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	47
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผลการวิจัย และอภิปรายผล.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
รายการอ้างอิง	51
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140.....	54
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการล้าตัวของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140.....	67
ภาคผนวก ค ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140	75
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	85



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ระยะเวลาในการเผาที่ความหนาต่างๆ กัน	25
3.1	การออกแบบกระบวนการทดลองสำหรับชิ้นทดสอบแรงดึงและความด้า.....	31
4.1	การเปรียบเทียบการทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการ	41
4.2	การเปรียบเทียบค่าความแข็งจากการทดสอบของวัสดุทั้ง 3 กระบวนการ.....	42
4.3	เปรียบเทียบขีดจำกัดความทนทานจากการทดสอบและจากการประมาณค่าจากสมการ	46

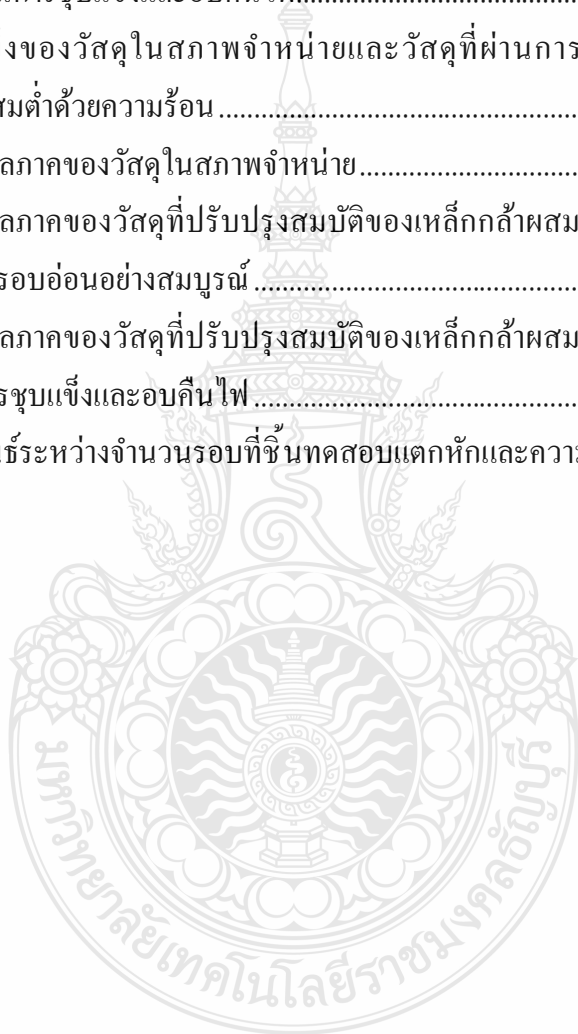


สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 สถิติการผลิตรถยนต์ของประเทศไทย.....	1
2.1 รอยแตกหักของเพลานี้เนื่องจากการล้า.....	8
2.2 รูปแบบของความเสียหายที่เกิดจากการล้า.....	9
2.3 ซึ้นทดสอบมาตรฐานที่ใช้กับเครื่องทดสอบแบบ R.R. Moore Rotating-Beam Machine	10
2.4 ความเค้นสลัป- จำนวนรอบการหมุน (S-N Diagram) ของเหล็กกล้า UNS G41300.....	10
2.5 จี๊ดจำกัดความทนทานเป็นฟังก์ชันของความต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุ.....	11
2.6 แผนภาพสมมูลเหล็กกับคาร์ไบด์.....	17
2.7 โครงสร้างของออสเตนไนท์.....	18
2.8 โครงสร้างเฟอร์ไรท์ของเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.02.....	18
2.9 โครงสร้างซีเมนต์ไวด์.....	19
2.10 โครงสร้างเฟิร์สไลท์.....	19
2.11 โครงสร้างของมาร์เทนไซต์ของเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 1.3.....	20
2.12 แผนภูมิ T.T.T. Diagram ของวัสดุ AISI 4140.....	21
2.13 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งของเหล็กกล้า.....	24
3.1 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8.....	30
3.2 ชิ้นงานทดสอบความล้าแบบหมุนตัดตามมาตรฐาน DIN 50113.....	31
3.3 เตาอบชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	32
3.4 ขั้นตอนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ของวัสดุ AISI 4140.....	32
3.5 ขั้นตอนการชุบแข็งและอบคืนไฟของวัสดุ AISI 4140.....	33
3.6 เครื่องขัดผิวโลหะ.....	34
3.7 กล้องจุลทรรศน์แบบ Optical Microscope.....	34
3.8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Tests.....	35
3.9 ตำแหน่งสุ่มกดบนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบทั้ง 3 ตำแหน่ง.....	35
3.10 เครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Universal Testing Machines.....	36
3.11 เครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัดชนิด Rotary Bending Machine Type UBM 200....	37
4.1 ค่าทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของวัสดุในสภาพจำหน่าย.....	39

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.2	ค่าทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์	40
4.3	ค่าทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ.....	40
4.4	ค่าความแข็งของวัสดุในสภาพจำหน่ายและวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของ เหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน	42
4.5	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุในสภาพจำหน่าย.....	43
4.6	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดย กระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์	44
4.7	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดย กระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ	44
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบแตกหักและความเค้น (S-N Diagram) .	45



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

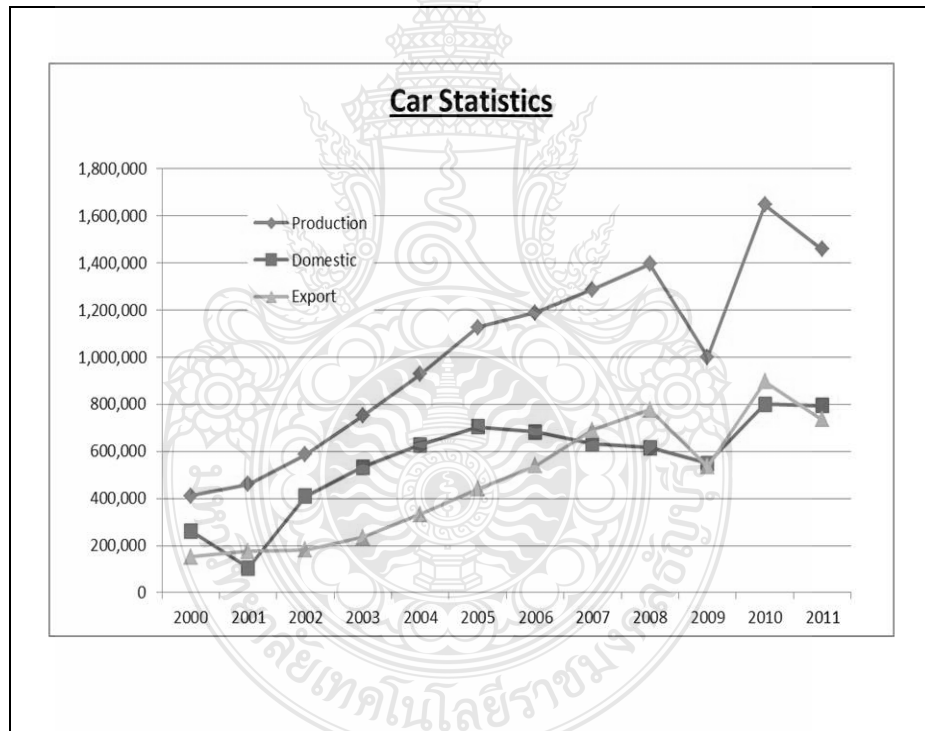
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Material
d	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ
G	น้ำหนักที่ใช้กดถ่วงชิ้นทดสอบ
K_a	แฟกเตอร์แก้ผิวงาน (Surface Finish Factor)
K_b	แฟกเตอร์แก้ขนาด (Size Factor)
K_c	แฟกเตอร์แก้การเปลี่ยนแปลงของความเค้นหนาแน่น
K_d	แฟกเตอร์แก้อุณหภูมิขณะใช้งาน
K_e	แฟกเตอร์แก้ระดับความเชื่อมั่น (Reliability Factor)
K_f	แฟกเตอร์แก้ค่าอิทธิพลอื่นๆ
L_p	จุดครากล่าง (Lower Yield Point)
P_s	แรงกระทำที่จุดคราก (Upper Yield Point)
P_u	ค่าความต้านทานแรงดึงประลัย (Ultimate Tensile Strength)
S_e	ขีดจำกัดความทนทานของชิ้นงานจริง
S'_e	ขีดจำกัดความทนทานจากการทดลอง
U_p	จุดครากบน (Upper Yield Point)
W	โมดูลัสภาคตัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi d^3/32$
σ_u	ค่าความต้านทานแรงดึง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทยนับว่าเป็นอุตสาหกรรมที่กำลังมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและต่อเนื่องมาหลายปี จนปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมยนต์จัดได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ และเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่สามารถนำเงินเข้าประเทศได้จำนวนมากในแต่ละปีดังจะเห็นได้จากภาพที่ 1.1 ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจำนวนรถยนต์ที่ส่งออกและขายในประเทศมีจำนวนใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 1.1 สถิติการผลิตรถยนต์ของประเทศไทย [1]

การเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมยานยนต์ดังกล่าวส่งผลให้มีความต้องการชิ้นส่วนยานยนต์เป็นจำนวนมาก นอกจากอัตราการขยายที่เพิ่มมากขึ้นบริษัทผู้ผลิตรถยนต์มีความต้องการที่จะสั่งซื้อชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตภายในประเทศเพื่อทดแทนการนำเข้าชิ้นส่วนที่มีราคาสูงจาก

ต่างประเทศ ดังนั้นอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ภายในประเทศจึงจำเป็นต้องพัฒนาศักยภาพในการผลิตชิ้นส่วนให้มีความรวดเร็วและมีคุณภาพดี ตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ เพื่อให้ชิ้นส่วนที่ผลิตมีความมั่นคงแข็งแรงและมีอายุการใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์

ชิ้นส่วนยานยนต์จำนวนมากเป็นชิ้นส่วนที่ทำมาจากเหล็กกล้าเช่น เฟืองต่างๆ เพลาข้อเหวี่ยง เพลาขับล้อ ก้านสูบ ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้เป็นชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาการใช้งานซึ่งมีแรงกระทำในลักษณะที่เป็นวัฏจักร หรือรับแรงผสม เช่นแรงดึง (Tension) แรงอัด (Compression) หรือแรงบิด (Torsion) ไปพร้อมๆ กันซึ่งเมื่อใช้ไปนานๆ ชิ้นส่วนที่รับภาระโหลดแบบวัฏจักรนี้อาจเกิดความล้าและทำให้เกิดการแตกร้าว หรือแตกหักเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป เพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าดังกล่าว ผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องเข้าใจพฤติกรรมของการเกิดความล้าในวัสดุและทราบขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ (Endurance Limit) ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนนั้นๆ

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุในกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำจะมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าโดยการใช้กรรมวิธีทางความร้อนได้แก่ การอบอ่อน (Annealing) การอบปกติ (Normalizing) การชุบแข็งและการอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) และการชุบผิวแข็ง (Surface Hardening) ซึ่งกรรมวิธีปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อนนี้ในบางครั้งเป็นกระบวนการที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่มีสมบัติทางกลที่เหมาะสมต่อการผลิตและการใช้งาน เช่น การชุบแข็งและการอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) เพื่อให้ได้ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียวหรือความยืดหยุ่น (Ductility) หรือผ่านการอบอ่อน (Annealing) เพื่อทำให้วัสดุสามารถนำไปตัดด้วยเครื่องมือตัดได้ง่ายขึ้น

ความเสียหายอันเนื่องมาจากความล้าของชิ้นส่วนยานยนต์ดังกล่าวสามารถป้องกันได้หากผู้ออกแบบเข้าใจอิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อนต่อพฤติกรรมการล้าตัวของวัสดุ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนจากกรรมวิธีการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) และการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) ของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140 ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของวัสดุภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ เป็นผลทำให้เกิดความล้าโดยทำการประเมินขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ (Endurance Limit) จากแผนภาพ S-N Diagram และวิเคราะห์ผลกระทบของกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อนต่อพฤติกรรมการเกิดความล้าของวัสดุเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานอื่นๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อหาขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ (Endurance Limit) ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนต่อพฤติกรรมการล้าตัวของวัสดุ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากเอกสารต่างๆ ประกอบกับการใช้การทดลองทางวิศวกรรมเพื่อหาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ใช้เหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140 ThyssenKrupp Materials [2] เป็นชิ้นงานในการทดลอง

1.3.2 ใช้ชิ้นทดสอบที่เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140 ในสภาพจำหน่าย (Commercial)

1.3.3 ใช้ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุด้วยร้อน 2 แบบคือ การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) และการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering)

1.3.4 ทำการทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุได้แก่ การทดสอบความแข็ง (HRC) ทดสอบแรงดึงและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1.3.5 ทำการทดสอบความล้าโดยใช้เครื่องทดสอบแบบ Rotating Bending Machine Type UMB 200 เพื่อทดสอบหาขีดจำกัดความทนทานของเหล็กกล้าผสม AISI 4140

1.3.6 การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) ใช้อุณหภูมิการอบชุบ 850°C และเผาแช่เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวภายในตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง

1.3.7 การชุบแข็ง (Hardening) ใช้อุณหภูมิการอบชุบ 850°C คงอุณหภูมิไว้ (Holding Time) 30 นาที จากนั้นทำการชุบแข็งอย่างรวดเร็วโดยใช้น้ำมันเป็นสารในการจุ่มชุบ ปล่อยให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำไปอบคืนไฟ (Tempering) ที่อุณหภูมิ 350°C คงอุณหภูมิไว้ (Holding Time) 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวภายในตัว

1.3.8 การทดสอบแรงดึงใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้นต่อกระบวนการทดลอง การวัดค่าความแข็งใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 5 ชิ้นต่อกระบวนการทดลองและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 1 ชิ้นต่อกระบวนการทดลอง

1.3.9 การทดสอบความล้าโดยเริ่มทดสอบความล้าที่ 80% ของความต้านทานแรงดึงและแต่ละระดับความเค้นจะใช้ชิ้นทดสอบ 5 ชิ้นแล้วลดระดับค่าความต้านทานแรงดึงทีละ 10% จนกระทั่งถึง

ระดับความเค้นที่ขึ้นทดสอบสามารถทนแรงกระทำ (ทนความล้า) โดยที่ขึ้นทดสอบไม่ขาดไว้ที่ 1,200,000 รอบก่อนที่ จึงหยุดทดสอบ

1.3.10 เปรียบเทียบขีดจำกัดความทนทานที่ได้จากการทดสอบและจากการประมาณค่าด้วยสมการ $S'_c = 0.504 \sigma_u$

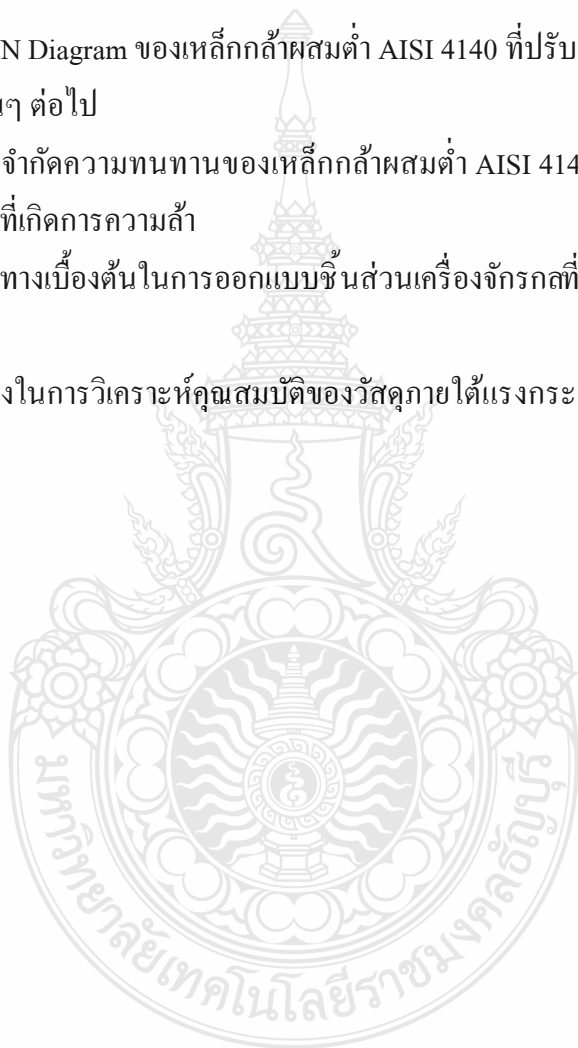
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้กราฟ S-N Diagram ของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140 ที่ปรับปรุงกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อประยุกต์ใช้งานอื่นๆ ต่อไป

1.4.2 ทราบค่าขีดจำกัดความทนทานของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนภายใต้การรับแรงที่เกิดการความล้า

1.4.3 ใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่เกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า

1.4.4 เป็นแนวทางในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุภายใต้แรงกระทำซึ่งอาจจะทำให้วัสดุเกิดการเสียหาย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันเหล็กกล้าผสมถูกนำไปใช้งานด้านอุตสาหกรรมการผลิตค่อนข้างมาก เช่น การผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ได้แก่ เพลาข้อเหวี่ยง เฟือง เพลาเครื่องจักร สกรู และน็อต เป็นต้น ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านี้ต้องการความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง ด้านทานต่อการสึกหรอ หรือ ด้านทานต่อความล้า ดังนั้นก่อนนำไปใช้งานต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน การอบชุบเหล็กกล้าจึงเป็นวิธีหนึ่งที่มีความสำคัญและใช้งานอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรม เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเหล็กและ โครงสร้างภายในของเหล็กให้มีความทนทานเหมาะสมต่ออายุการใช้งาน

2.1 นิยามคำศัพท์

กระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยด้วยความร้อน (Heat Treatment Process) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเหล็กโดยการเผาให้ร้อนแล้วนำไปทำให้เย็นตัวในอัตราที่แตกต่างกันทำให้ได้เหล็กที่มีสมบัติตามวัตถุประสงค์ เช่น มีความอ่อนตัวสามารถนำไปแปรรูปหรือขึ้นรูปได้สะดวก มีความแข็งแรงสูงทนทานต่อการเสียดสีมีความเหนียวสูงทนต่อแรงกระแทกและแรงบิดตัวได้ดี [3]

ความล้า (Fatigue) หมายถึงแรงที่กระทำต่อโลหะหรือวัสดุเหนียวเป็นจังหวะๆ หรือซ้ำๆ ซากๆ จนโลหะหรือวัสดุเหนียวนั้นๆ กลายสภาพไปเป็นโลหะหรือวัสดุเปราะในภายหลังลักษณะดังกล่าวเช่นนี้เราเรียกกันว่าเป็นการแตกหักแบบล้า (Fatigue Failure) [4]

ขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) หมายถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุที่อยู่ภายใต้แรงที่กระทำให้เกิดความล้า ซึ่งทดสอบจะอยู่ภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ หรือแรงแปรเปลี่ยนจำนวนหนึ่งขณะที่รอบของความเค้นจะถูกลบไปจนขึ้นทดสอบแตกหัก ค่าตามแนวแกนตั้งจะเป็นค่าของความต้านทานการล้าตัว ส่วนในแนวแกนนอนนั้นจะเรียกว่าจำนวนรอบที่เกิดความเสียหาย ค่าที่นำมาแสดงในไดอะแกรม (S-N Diagram) นั้นเป็นค่าที่ได้จากการทดลองของชิ้นทดสอบ ซึ่งเกิดจากการทดสอบในห้องทดลองเท่านั้นแต่ถ้าเป็นลักษณะของการใช้งานจริง ไดอะแกรมจะมีค่าแตกต่างกันแม้ว่าจะทำจากวัสดุชนิดเดียวกันก็ตามเส้นกราฟจะหักมุมจากแนวเอียงเป็นเส้นตรงในแนวระดับที่ $N = 10^6$ รอบ ซึ่ง ณ จุดนี้จะทำให้ค่าความแข็งแรงคงที่ระดับหนึ่ง เรียกว่า ขีดจำกัดความทนทาน [5]

การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) หมายถึงการลดความแข็งของเหล็กกล้าให้อ่อนตัวลง โดยการจัดระเบียบของโมเลกุลภายในเนื้อโลหะเสียใหม่ เพื่อให้สามารถกลึง ไส และเจาะได้ง่าย ส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปหรือการการหล่อมาแล้ว ทำให้เกิดความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ทำการกลึงไสได้ยาก [6]

การชุบแข็ง (Hardening) หมายถึงการเพิ่มความแข็งให้แก่เหล็กกล้าโดยการอบชุบหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเนื้อโลหะด้วยความร้อน [6]

การอบคืนไฟ (Tempering) หมายถึง การกระทำกับเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วโดยการอบให้ร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (เส้น A_{c1}) แล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ เพื่อลดความเครียดภายในลดความแข็งเพิ่มความเหนียว และทนต่อแรงดึงในชิ้นงาน[6]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Asi, Osman และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยก๊าซคาร์บูไรซ์ซิ่ง (Gas Carburizing) ที่อุณหภูมิสูงที่มีผลต่อความล้าโดยวิธีหมุนคดของวัสดุ SAE 8620 ซึ่งได้ทำการประเมินเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของแข็งผิวด้วยก๊าซคาร์บูไรซ์ซิ่งที่ช่วงอุณหภูมิ 940°C ทำการชุบผิว 3 ชั่วโมงและ 5 ชั่วโมง และทำการชุบผิวแข็งที่ช่วง 980°C ทำการชุบผิว 1 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมง พบว่าความหนาของชั้นแข็งผิว (Case Depth) ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิของก๊าซคาร์บูไรซ์ซิ่ง การกระจายตัวของออสเตนไนท์ที่เหลือค้าง (Retained Austenite) ของชั้นความลึกของแต่ละชั้นทดสอบพบว่าเปอร์เซ็นต์ของออสเตนไนท์ที่เหลือค้างจากผิวถึงแกนกลางของชิ้นทดสอบมีค่าลดลง และเมื่อทำการทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบแบบหมุนคดที่อุณหภูมิ 940°C ชุบผิว 3 ชั่วโมงมีค่าขีดจำกัดความล้า (Fatigue Limits) เท่ากับ 1195 MPa ชุบผิว 5 ชั่วโมงมีค่าขีดจำกัดความล้าเท่ากับ 1170 MPa ส่วนที่อุณหภูมิ 980°C ชุบผิว 1 ชั่วโมงมีค่าขีดจำกัดความล้าเท่ากับ 1035 MPa ชุบผิว 2 ชั่วโมงมีค่าขีดจำกัดความล้า เท่ากับ 940 MPa

Farfan, S. และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการเสียหายของวัสดุผ่านการชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธีคาร์บูไรซ์ซิ่ง (Carburized) ในช่วงการล้าตัวที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำโดยได้ทำการทดลองวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น เฟือง และเพลลา ทำการชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธี Carburized เมื่อทำการทดสอบความล้าจากชิ้นทดสอบที่ช่วงความถี่ต่ำและสูงพบว่าชั้นความหนาของการชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธีคาร์บูไรซ์ซิ่งมีผลต่ออายุการล้าตัวและความแข็งแรงล้า และรอยแตกหักของชิ้นทดสอบจะเกิดร่วมกันสองรูปแบบ คือการแตกหักแบบเปราะที่ชั้นผิวแข็งและการแตกหักแบบ

เหนียวที่ผิวด้านในของชิ้นทดสอบ และในรูปแบบการแตกหักเริ่มต้นของการชุบแข็งผิวโดยกรรมวิธี Carburized จะถูกใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนสำหรับเฟืองและ

Celik, A. และ Karadeniz, S. [9] ได้ทำการศึกษาปรับปรุงความแข็งผิวของวัสดุ AISI 4140 โดยกระบวนการไอออนไนตรายหรือเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการพลาสมาไตรายที่มีผลต่อการล้าตัว โดยทำการแบ่งกลุ่มชิ้นทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Quenched and Tempered) และกลุ่มที่ผ่านการอบปกติ (Normalizing) ซึ่งชิ้นงานทั้งสองกลุ่มจะถูกทำไนตรายแบบพลาสมาหรือทำให้เกิดเป็นอนุภาคที่มีประจุขึ้นเรียกอีกอย่างว่าไอออนไนตราย โดยใช้อุณหภูมิระหว่าง 500°C - 600°C DIN 41Cr4 เป็นเวลา 1 - 12 ชั่วโมง ชิ้นงานจะถูกบรรจุไว้ในถังสุญญากาศโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2) 50% และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) 50% ทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้า เมื่อทำการทดสอบความล้าพบว่าความแข็งแรงจากการล้า (Fatigue Strength) จะเพิ่มขึ้นตามชั้นความหนาผิวแข็งของชิ้นทดสอบ (Case Depth) นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ชั้นผิว โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscopy) และทำการวิเคราะห์ผิวการแตกหักเริ่มต้นที่เกิดจากการล้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

Bayrak, Mustafa และคณะ [10] ได้ทำการวิเคราะห์หาสมบัติในการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) ของวัสดุ 2 ชนิด คือ วัสดุ DIN 41Cr4 และวัสดุ DIN 42CrMo4 ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการทำชิ้นส่วนยานยนต์โดยวัสดุ DIN 42CrMo4 จะเป็นที่นิยมใช้มากกว่าวัสดุ DIN 41Cr4 ในแง่สมบัติของวัสดุแต่ก็มีราคาสูงตามมาด้วย ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองโดยการให้ความร้อนกับชิ้นทดสอบจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็น Austenite ที่อุณหภูมิ 850°C แล้วทำการชุบแข็งด้วยน้ำมันที่มีอุณหภูมิ 90°C (อุณหภูมิการอุ่นน้ำมัน) และทำการอบคืนไฟ (Tempering) ที่อุณหภูมิ 450, 500, 550, 600 และ 650°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าสมบัติทางกลได้แก่ การวัดค่าความแข็ง (HRC) การทดสอบแรงดึง และทดสอบความล้าโดยการพิจารณาการแจกแจงแผนภาพในรูปแบบของสมการแบบเวย์บูล (Weibull Distributions) พบว่าวัสดุ DIN 42CrMo4 จะมีค่าความแข็งค่าการทดสอบแรงดึงที่สูงกว่าและมีอายุการล้าตัวนานกว่าวัสดุ DIN 41Cr4

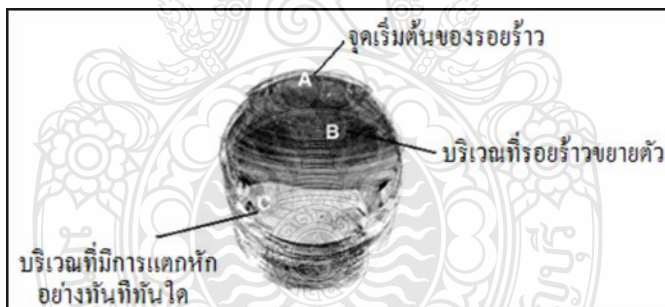
Sirin, Sule Yildiz. Sirin, Kahraman and Kaluc, Erdinc. [11] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการไอออนไนตรายที่มีผลต่อพฤติกรรมการล้าตัวของวัสดุ AISI 4340 การดัดแปลงผิวโดยเทคนิคโกลวดิสชาร์จ (Glow Discharge Surface) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองชุบแข็งผิวด้วยกระบวนการไอออนไนตรายที่อุณหภูมิ 500°C และ 540°C เป็นเวลา 2, 4, 8 และ 16 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ทำการชุบแข็งและอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 840°C อบคืนไฟที่ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงโดยการให้ความร้อนกับชิ้นทดสอบจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นโครงสร้าง

Austenite ที่อุณหภูมิ 840°C พบว่าความหนาของชั้นแข็งผิว (Case Depth) และความแข็งผิวของชั้นทดสอบ (Surface Hardness) ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิของการทำไอออนไนตรายเมื่อทำการทดสอบความล้าพบว่าที่อุณหภูมิ 540°C เวลาที่ใช้ในกระบวนการไอออนไนตราย 16 ชั่วโมงจะให้ค่าความแข็งแรงล้า (Fatigue Strength) มากที่สุดคือ 1024 MPa

2.3 ความล้าของวัสดุ

2.3.1 สาเหตุของความเสียหายเนื่องจากความล้า

ความเสียหายของเครื่องจักรกลเนื่องจากการล้า เริ่มต้นจากมีรอยแตกเล็กๆ ซึ่งอาจไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า รอยแตกนี้สามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ในกระบวนการผลิตหรืออาจเกิดขึ้นหลังจากที่มีความเครียดสลับในบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่น รอยแตกที่เกิดจากความล้ามักจะเริ่มต้นการแตกจากบริเวณที่มีรอยแตกจากการเกิดความเสียหายจากการล้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ การเกิดรอยแตก การขยายตัวของรอยแตก และการเกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด เนื่องจากความไม่เสถียรของการขนานตัวของรอยแตก ขั้นตอนแรกอาจจะอยู่ในช่วงสั้นๆ ขั้นตอนที่สองจะใช้เวลาเท่ากับอายุของชิ้นงาน และขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะเกิดขึ้นชั่วขณะเท่านั้น



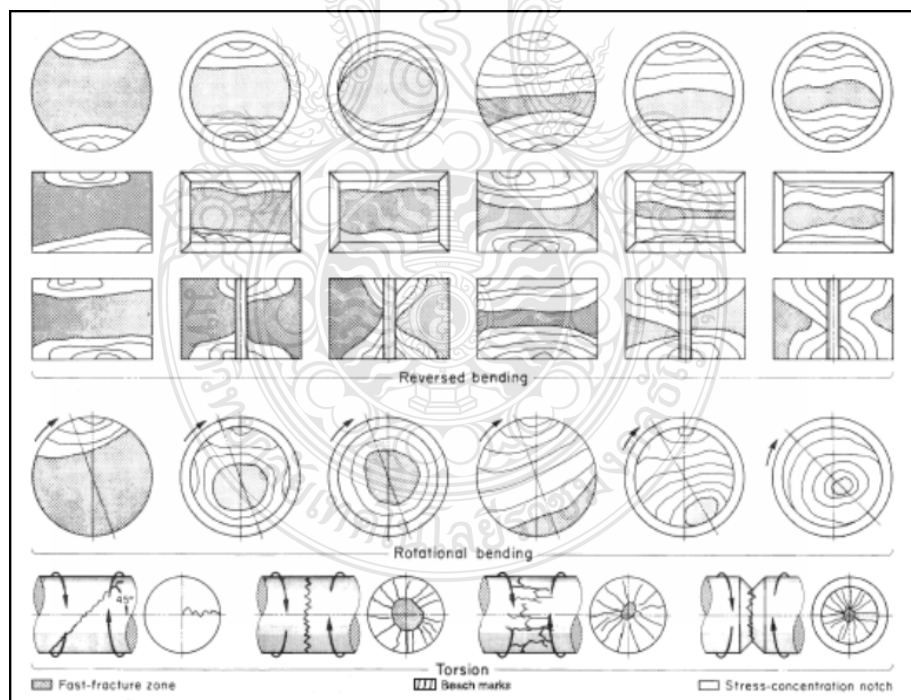
ภาพที่ 2.1 รอยแตกหักของเพลานี้เนื่องจากการล้า [12]

ขั้นที่ 1 การเริ่มเกิดรอยร้าวในโครงสร้างของเนื้อวัสดุเนื่องจากการใช้งานแบบวัฏจักรรอยร้าวนี้อาจจะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (บริเวณ A) ขั้นที่ 2 เมื่อมีแรงกระทำแบบวัฏจักรเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องค่าความเค้นหนาแน่นบริเวณรอยร้าวจะสูงขึ้นและเป็นสาเหตุทำให้รอยร้าวขยายตัวขึ้น ซึ่งจะเห็นเป็นรอยเหมือนคลื่นเรียกว่า “Bench-Marks” ในขั้นนี้ความเสียหายจะเกิดขึ้นอย่างช้า (บริเวณ B) และขั้นที่ 3 เมื่อวัสดุไม่สามารถรองรับโหลดได้อีกต่อไปจะเกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด สำหรับรูปแบบของความเสียหายในขั้นตอนนี้เรียกว่า “Chevron Lines” โดยมีทิศทางพุ่ง

นอกจากจุดที่เกิดรอยร้าวในครั้งแรกและมีลักษณะเหมือนกับความเสียหายของวัสดุเปราะ (บริเวณ C) ภาพที่ 2.2 แสดงให้เห็นรูปแบบของความเสียหายที่เกิดจากการล้า โดยแสดงพื้นผิวที่เสียหายในชิ้นงานรูปทรงต่างๆ และมีเงื่อนไขการรับโหลดและระดับของความเค้นหนาแน่นที่แตกต่างกัน ให้สังเกตว่าในกรณีของการหมุนคด (Rotational Bending) แม้แต่ทิศทางของการหมุนก็จะมีอิทธิพลต่อรูปแบบของความเสียหาย

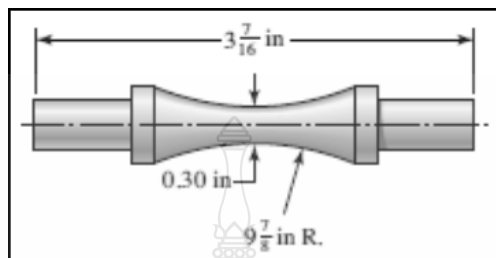
2.3.2 หลักการสร้างแผนภาพความเค้นสลับ - จำนวนรอบการหมุน (S-N Diagram) โดยวิธีหมุนคด

การทำงานของความเค้นสลับ - จำนวนรอบการหมุน ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความเค้นสลับ - จำนวนรอบการหมุนของวัสดุและจำได้ค่าขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) ซึ่งในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลได้กล่าวไว้ว่าในการหาความแข็งแรงของวัสดุที่อยู่ภายใต้แรงที่ทำให้เกิดความล้า (Fatigue Loads) ชิ้นทดสอบจะอยู่ภายใต้แรงที่กระทำซ้ำๆ (Repeated Force) หรือแรงที่แปรเปลี่ยน (Varying Force) จำนวนหนึ่งขณะที่รอบ (Cycle) ของความเค้นจะถูกลบไปจนชิ้นทดสอบจะแตกหัก



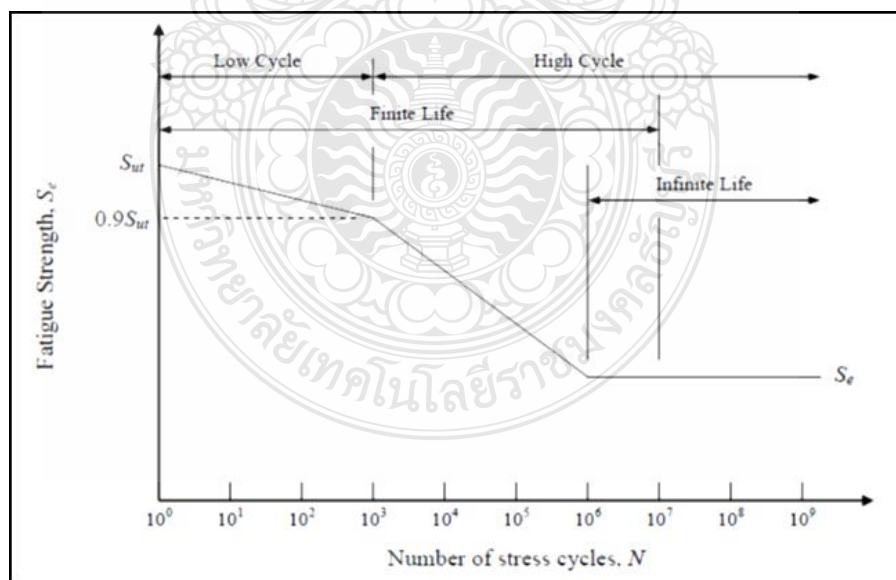
ภาพที่ 2.2 รูปแบบของความเสียหายที่เกิดจากการล้า

เครื่องที่ใช้ทดสอบความล้าที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ R.R Moore High-Speed Rotating-Beam Machine เครื่องทดสอบนี้จะยึดชิ้นทดสอบซึ่งอยู่ภายใต้ Pure Bending ด้วยแรงจำนวนหนึ่ง ลักษณะของชิ้นงานทดสอบจะแสดงไว้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ชิ้นทดสอบมาตรฐานที่ใช้กับเครื่องทดสอบแบบ R.R. Moore Rotating-Beam Machine [12]

สำหรับการทดสอบจะใช้แรงค้ำคงที่ (Constant Bending Load) แล้วทำการบันทึกจำนวนรอบที่หมุนที่ซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบแตกหักได้ การทดสอบครั้งแรกจะกระทำที่ค่าความเค้นค่อนข้างจะต่ำกว่าค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุ

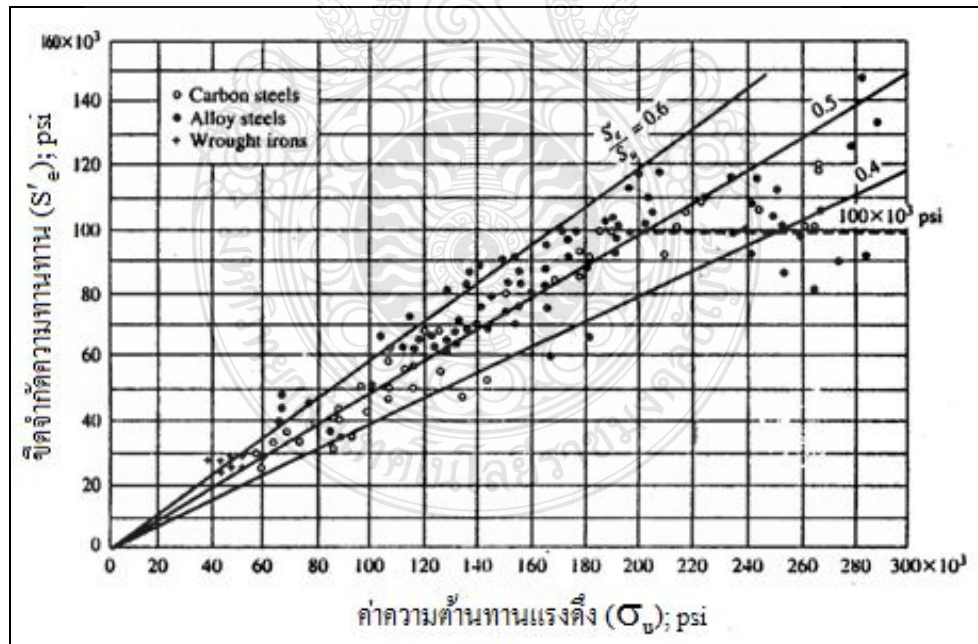


ภาพที่ 2.4 ความเค้นสลับ - จำนวนรอบการหมุน (S-N Diagram) ของเหล็กกล้า UNS G41300 [12]

ค่าตามแนวแกนตั้งในความเค้นสลับ - จำนวนรอบการหมุนจะเป็นค่าของความเค้นที่ทำให้เกิดความล้า ซึ่งค่าความแข็งแรงนี้จะถูกเรียกตามด้วยจำนวน N เสมอ ในกรณีที่การทดสอบใช้ชิ้นทดสอบและใช้ชิ้นงานจริงเป็นชิ้นส่วนทางกลแม้ว่าจะทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน แต่จะได้ค่าในความเค้นสลับจำนวนรอบการหมุนออกมาต่างกันจากกราฟในภาพที่ 2.4 เส้นกราฟจะหักมุมจากแนวเอียงเป็นแนวเส้นตรงในแนวระดับที่แนวระดับนี้จะให้ค่าความแข็งแรงคงที่ระดับหนึ่งเรียกว่าขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) หรือขีดจำกัดความล้า (Fatigue Limit) สำหรับวัสดุที่ไม่เป็นเหล็กหรือเหล็กกล้า (Nonferrous Metals and Alloys) กราฟจะไม่มีขีดจำกัดความทนทาน

2.3.3 ขีดจำกัดความทนทานและความต้านทานแรงดึง

การหาค่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุโดยการทดสอบความล้านี้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายมากโดยอายุของการล้าตัวจะขึ้นอยู่กับความต้านทานการแตกหักของวัสดุ ภายใต้การรับภาระดังนั้นเราจะต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานวัสดุล้ากับความทนทานในการล้าตัวจากภาพที่ 2.5 พบว่าขีดจำกัดความทนทาน (S'_e) จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 40 - 60 % ของค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) ซึ่งเป็นผลการวิจัยของวัสดุ 3 ชนิดได้แก่เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steels) เหล็กกล้าประสม (Alloy Steels) และ เหล็กเหนียว (Wrought Irons)



ภาพที่ 2.5 ขีดจำกัดความทนทานเป็นฟังก์ชันของความต้านแรงดึงสูงสุดของวัสดุ [5]

ข้อมูลจากการทดลองในภาพที่ 2.5 สำหรับวัสดุเหล็กเหนียวและเหล็กกล้าสามารถสรุปได้ว่าขีดจำกัดความทนทานจากการทดลอง (S'_e) จะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านแรงดึง (σ_u) ดังสมการต่อไปนี้ [12]

$$S'_e = \begin{cases} 0.504 \sigma_u & ; \sigma_u \leq 1460 \text{ MPa} \\ 740 \text{ MPa} & ; \sigma_u > 1460 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.1)$$

2.3.4 ค่าแฟกเตอร์แก้ไข ตัวประกอบ ขีดจำกัดความทนทานของชิ้นงานทางกล

ในการทดสอบความล้าจะต้องมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่จะนำไปทดสอบการล้าด้วยเครื่องทดสอบของ Moore และทำการทดสอบภายใต้สภาวะที่ควบคุมได้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่พิบัติการล้าในชิ้นงานจริงจะมีค่าเท่ากับพิบัติการล้าที่ได้จากการทดลองสิ่งที่ทำให้พิบัติการล้าในชิ้นงานจริงแตกต่างไปคือส่วนประกอบของวัสดุ กรรมวิธีการผลิต สภาวะแวดล้อมในการใช้งานหรือการออกแบบ เป็นต้น Martin ได้กำหนดแฟกเตอร์แก้ไขพิบัติการล้าที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจริง ดังนี้

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e \quad (2.2)$$

เมื่อ S_e คือ ขีดจำกัดความทนทานของชิ้นงานจริง

S'_e คือ ขีดจำกัดความทนทานจากการทดลอง

K_a คือ แฟกเตอร์แก้ไขผิวงาน (Surface Finish Factor)

K_b คือ แฟกเตอร์แก้ไขขนาด (Size Factor)

K_c คือ แฟกเตอร์แก้ไขการเปลี่ยนแปลงของความเค้นหนาแน่น

K_d คือ แฟกเตอร์แก้ไขอุณหภูมิขณะใช้งาน

K_e คือ แฟกเตอร์แก้ไขระดับความเชื่อมั่น (Reliability Factor)

K_f คือ แฟกเตอร์แก้ไขค่าอิทธิพลอื่นๆ

2.4 เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) [13]

เหล็กกล้าผสมคือ เหล็กที่ผสมธาตุต่างๆ นอกเหนือไปจากธาตุคาร์บอนและธาตุบางตัวที่คิดมาเนื่องจากกรรมวิธีการถลุง (แมงกานีส ซิลิกอน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส) การผสมธาตุต่างๆ ลงไปในเหล็กก็เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติหลายๆ ประการที่เหล็กคาร์บอนให้สมบัติเหล่านั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำไม่สามารถใช้งานได้ดี ถึงแม้ว่าการผสมธาตุต่างๆ ลงไปในเหล็กจะทำให้เหล็กมีราคาสูงขึ้นก็ตาม ความมุ่งหมายของการผสมธาตุดังกล่าวมีหลายประการคือ เพิ่มสมบัติด้านชุบแข็ง ปรับปรุงความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติ เพิ่มสมบัติต้านทานการสึกหรออันเนื่องมาจากการเสียดสีขณะใช้งานเพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทก และปรับปรุงสมบัติด้านแม่เหล็ก

ธาตุที่ผสมในเหล็กมีมากมายหลายธาตุซึ่งแต่ละธาตุจะให้ผลต่อเหล็กแตกต่างกันในการศึกษาบทบาทของธาตุเหล่านี้สามารถแยกออกเป็นกลุ่มเพื่อความสะดวกดังเช่น กลุ่มเพื่อเสถียรภาพของออสเตนไนท์ กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรท์ กลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ และกลุ่มรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ ธาตุบางอาจจะให้บทบาทอยู่ได้หลายกลุ่ม

กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเตนไนท์ได้แก่ ธาตุนิเกิล แมงกานีส และคาร์บอน จัดเป็นธาตุที่สำคัญในกลุ่มนี้เมื่อผสมอยู่ในเหล็กจะมีบทบาทขยายอาณาเขตของออสเตนไนท์โดยลดอุณหภูมิของเส้น A_3 ให้ต่ำลงและเพิ่มอุณหภูมิของเส้น A_4 (เส้นอุณหภูมิ 1492°C) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ให้สูงขึ้นเมื่อปริมาณของธาตุเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นเหล็กผสมจะมีโครงสร้างออสเตนไนท์ที่อุณหภูมิปกติถ้าปริมาณของธาตุที่ผสมมีมากพอธาตุในกลุ่มนี้จะมีระบบผลึกเป็น Face Centered Cubic ซึ่งละลายได้ดีในออสเตนไนท์

กลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรท์ธาตุที่สำคัญได้แก่ โครเมียม ซิลิกอน โมลิบดีนัม ทังสแตน และอะลูมิเนียม บทบาทของธาตุในกลุ่มนี้จะลดอุณหภูมิของเส้น A_4 แต่จะเพิ่มอุณหภูมิของเส้น A_3 ให้สูงขึ้นทำให้อาณาเขตของเฟอร์ไรท์กว้างขึ้นไปทางด้านอุณหภูมิสูงธาตุในกลุ่มนี้จะมีระบบผลึกเป็น Body Centered Cubic ซึ่งละลายได้ดีในเฟอร์ไรท์

กลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ได้แก่ ธาตุโครเมียม ทังสแตน โมลิบดีนัม วานาเดียม และนิโอเบียม ซึ่งธาตุหลายธาตุที่อยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรท์ธาตุดังกล่าวเมื่อผสมในเหล็กที่มีคาร์บอนจะเกิดการรวมตัวให้คาร์ไบด์ในลักษณะต่างๆ ซึ่งทำให้คุณสมบัติของเหล็กแตกต่างออกไปจะกล่าวถึงรายละเอียดภายหลัง

กลุ่มรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ธาตุที่สำคัญได้แก่ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และโครเมียม นอกจากธาตุทั้งสามแล้วธาตุทุกตัวที่อยู่ในกลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนสามารถรวมตัวกับไนโตรเจนให้ไนไตรด์ได้แต่ให้ผลทางด้านความแข็งแรงไม่อยู่ในเกณฑ์สูง

2.4.1 บทบาทของธาตุผสมที่มีต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า [14]

นิกเกิล (Ni) ทำให้เหล็กมีเกรนละเอียดขึ้นเพิ่มสมบัติในด้านการชุบแข็งในกับเหล็ก ลดอุณหภูมิการเปลี่ยนออสเทนไนท์ให้เป็นมาร์เทนไซต์ต่ำลงเหล็กที่ผสมนิกเกิลมากกว่า 3% จะสามารถสร้างโครงสร้างมาร์เทนไซต์ได้โดยการทำการอบปกติ (Normalizing) เพิ่มความแข็งแรงและความแข็งโดยไม่ทำให้ความเหนียวลดลง เพิ่มสมบัติทางด้านเชื่อม (Weld Ability) ให้กับเหล็กปรับปรุงสมบัติด้านทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ

แมงกานีส (Mn) ทำให้เหล็กมีเกรนละเอียดขึ้นคล้ายนิกเกิลเพิ่มสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กมีผลรุนแรงกว่านิกเกิล 2 เท่า เพิ่มความแข็งแรงและความแข็ง มีความเหนียวลดลง ข้อเสียของแมงกานีสทำให้เหล็กมีสมบัติเปราะไม่ทนต่อแรงกระแทกขณะใช้งานทำให้เกิดการขยายตัวเล็กน้อยและจะแตกร้าวได้ง่าย ทำให้เหล็กมีสมบัติไม่สม่ำเสมอขาดสมบัติทางด้านความเหนียว

โครเมียม (Cr) เพิ่มสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กรักษาความแข็งไว้ได้ ณ อุณหภูมิสูงเมื่อผสมโครเมียมปริมาณสูงจะช่วยให้เกิดสมบัติ Secondary Hardening และมีแนวโน้มที่จะเกิดการเปราะในขณะอบคืนไฟ (Temper Brittleness) แต่ไม่รุนแรงเท่าแมงกานีส

โมลิบดีนัม (Mo) มีผลเช่นเดียวกับโครเมียมคือ เพิ่มสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็ง ถ้าผสมไม่เกิน 1% ทนความร้อนได้ดีโดยไม่สูญเสียความแข็ง มีสมบัติ Secondary Hardening แต่ไม่มีผลทางด้านอบคืนไฟ สามารถรักษาความแข็งไว้ได้ดี ที่อุณหภูมิไม่เกิน 600°C เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน

วานาเดียม (V) ทำให้เหล็กมีเกรนละเอียดได้ดีมากเนื่องจากวานาเดียมคาร์ไบด์มีเสถียรภาพสูงไม่สลายตัวได้ง่าย รักษาความแข็งแรงไว้ได้ดี ณ อุณหภูมิสูง เพิ่มสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งเมื่อผสมวานาเดียมเกินกว่า 0.04% ให้คุณสมบัติทางด้าน Secondary Hardening ที่อุณหภูมิประมาณ 400°C - 700°C โดยไม่มีผลด้าน Temper Brittleness

ทังสเตน (W) ทำให้เหล็กมีความแข็งแรงสูงมีสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งแต่จะมีผลน้อยกว่าโมลิบดีนัมประมาณครึ่งหนึ่งรักษาความแข็งไว้ได้จนถึงสภาพร้อนแดง (Red Hardness) ให้ผลทางด้าน Secondary Hardening โดยไม่มีแนวโน้มทำให้เกิด Temper Brittleness

ไทเทเนียม (Ti) เป็นธาตุที่รวมตัวกับคาร์บอนได้ดีมากถ้าผสมไทเทเนียมในปริมาณสูงจะทำให้การชุบแข็งเหล็กด้วยวิธีธรรมดาไม่ได้ผล เพราะคาร์บอนจะถูกดึงไปรวมกับไทเทเนียมจนเกือบหมด เพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็งให้ผลทางด้าน Secondary Hardening น้อย

มากและไม่มีแนวโน้มที่จะเกิด Temper Brittleness ไม่เปลี่ยนความแข็งแรงเลยขณะทำการอบคืนไฟที่อุณหภูมิสูง

ซิลิกอน (Si) เพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟอร์ไรต์โดยเฉพาะเพิ่มค่าความแข็งแรงที่จุดครากของเหล็กให้สูงขึ้น ไม่มีบทบาทเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง สมบัติทางด้านเชื่อมของเหล็กไม่ดีเมื่อผสมซิลิกอนสูงและไม่มีผลทั้ง Secondary Hardening และ Temper Brittleness

อะลูมิเนียม (Al) เพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟอร์ไรต์เพิ่มสมบัติด้านความสามารถในการชุบแข็งได้เล็กน้อยและไม่มีบทบาททางด้าน Secondary Hardening และ Temper Brittleness

โคบอลต์ (Co) เพิ่มความแข็งแรงให้กับเฟอร์ไรต์มีบทบาทลดความสามารถในการชุบแข็งมีสมบัติรักษาความแข็งแรงไว้ได้ดีที่อุณหภูมิสูงไม่มีผลด้าน Secondary Hardening และ Temper Brittleness (Red Hardness) เนื่องจากโคบอลต์มีราคาค่อนข้างสูงจึงไม่นิยมผสมโคบอลต์ยกเว้นแต่ในกรณีที่ต้องการเหล็กที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น เหล็กทำอุปกรณ์ตัดโลหะหรือทำแม่เหล็กถาวร

2.4.2 ชนิดของเหล็กกล้าผสม

เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมรวมกันน้อยกว่า 8% ธาตุที่ผสมอยู่คือ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม ปริมาณของธาตุที่ใช้ผสมแต่ละตัวจะไม่มากประมาณ 1 - 2% ผลจากการผสมทำให้เหล็กสามารถชุบแข็งได้ มีความแข็งแรงสูงเหมาะสำหรับการทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น เฟือง เพลาข้อเหวี่ยง เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะต้องใช้งานในสภาพชุบแข็งและอบอ่อนเสมอจึงจะมีความแข็งแรงสูง

เหล็กกล้าผสมสูง (High Alloy Steel) เหล็กประเภทนี้จะถูกปรับปรุงสมบัติสำหรับการใช้งานเฉพาะอย่างซึ่งก็จะมีธาตุผสมรวมกันมากกว่า 8% เหล็กกล้าทนความร้อนเหล็กกล้าทนการเสียดสี และเหล็กกล้าทนการกัดกร่อน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าเครื่องมือ ดังนี้

1) เหล็กกล้าสแตนเลส (Stainless Steel) หรือเรียกอีกอย่างว่าเหล็กกล้าไร้สนิมส่วนมากผลิตจากเตาไฟฟ้าเหล็กกล้ากลุ่มนี้ทนต่อการผุกร่อน หรือต้านการเป็นสนิมได้ดีธาตุที่มีบทบาทมากได้แก่โครเมียมที่ผสมเข้าไปในเนื้อเหล็กซึ่งจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางๆขึ้นที่ผิวของเหล็ก ฟิล์มนี้จะมีความแข็งแรงสูงโปร่งใสยึดติดกับผิวเหล็กได้ดี มีความหนาแน่นสูงและไม่มีรูพรุน นอกจากโครเมียมแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมยังมีธาตุอื่นผสมอยู่อีก เช่น โมลิบดีนัม นิกเกิล และแมงกานีส เป็นต้น

2) เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steel) เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุ โครเมียม โมลิบดีนัม นิกเกิล วาเนเดียม โคบอลต์และไทเทเนียม เกินกว่า 5% และมีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.8 - 2.2% ธาตุผสมเหล่านี้สามารถเพิ่มสมบัติพิเศษให้กับเหล็กกล้าเครื่องมือโดยเฉพาะเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง

ที่รักษาคมมีดตัดโลหะได้ดีถึงแม้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงจนผิวของคมตัดร้อนมีสีแดงสมบัตินี้เรียกว่า ความแข็งขณะร้อน เช่นดอกกัด (Endmill) มีดกลึง มีดไส เครื่องมือทำเกลียวใน (Tap) และเครื่องมือทำเกลียวนอก (Die) การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือลักษณะการใช้งานเหล็กเครื่องมือปริมาณของธาตุประสมและลักษณะการชุบแข็ง

2.4.3 สมบัติและการใช้งานวัสดุ AISI 4140

เป็นกลุ่มเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงที่มีโครเมียมและ โมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมสำคัญ ในการเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถในการชุบแข็ง ความต้านทานต่อการสึกหรอและความเหนียวแกร่งที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนผสมใกล้เคียงกัน และยังสามารถทำการชุบผิวแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงเฉพาะผิวได้ สามารถต้านทานการล้าตัว (Fatigue) ได้ดีชุบแข็งง่ายในสารชุบที่เป็นน้ำมันและสามารถชุบแข็งให้มีความแข็งได้สูงสุดถึง 60 HRC

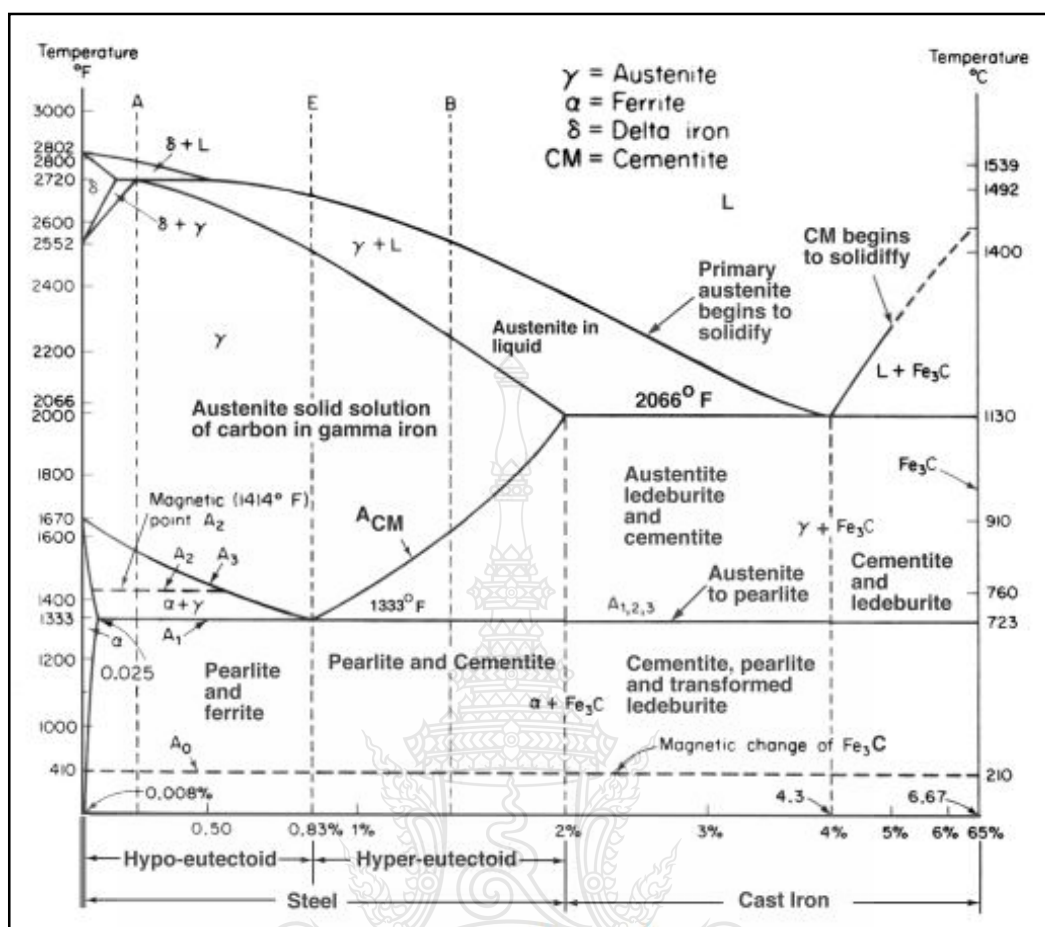
ลักษณะการใช้งานใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น เพลาข้อเหวี่ยง ข้อต่อก้านพวงมาลัยเพลาล้อ ก้านสูบ ชิ้นส่วนปั้มน้ำ เฟืองเครื่องจักรขนาดใหญ่ หน้างานประแจ ปากกาจับชิ้นงาน และยังมีใช้ทำชิ้นส่วนรถไฟเพลาเครื่องจักร เฟืองเครื่องจักรขนาดใหญ่ สกรูและน็อต รวมทั้งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูงอื่นๆ

2.5 กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

กรรมวิธีทางความร้อนเป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการปรับปรุง พัฒนา และควบคุมโครงสร้างของโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ทั้งนี้ก็เพราะว่ากรรมวิธีทางความร้อนมีวิธีการที่ไม่ยุ่งยากและโลหะที่ผ่านกรรมวิธีนี้จะไม่เสียรูป กรรมวิธีทางความร้อนเป็นการนำโลหะที่ต้องการปรับปรุงพัฒนาโครงสร้างไปอบให้ร้อนในระดับความร้อนต่างๆ กันหลังจากนั้นก็นำโลหะที่อบจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วไปทำให้เกิดความเย็นตัวด้วยตัวกลางที่ให้อัตราการเย็นตัวแตกต่างกันตามความต้องการ จุดประสงค์ของกรรมวิธีทางความร้อนนั้นถ้าพิจารณาจะเห็นได้ว่ามี 2 ประเภทด้วยกันกล่าวคือต้องการทำให้โลหะมีความแข็งเพิ่มขึ้นและต้องการทำให้โลหะอ่อนตัวลง จุดประสงค์ทั้ง 2 จะบรรลุผลได้นั้นจำเป็นต้องศึกษาลึกลงๆ ที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีทางความร้อนสิ่งนั้นได้แก่ แผนภูมิสมมูลของเหล็กคาร์ไบด์ตลอดจนแผนภูมิการเย็นตัวของโลหะได้แก่ แผนภูมิเวลาอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลง

2.5.1 แผนภูมิสมมูลเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ (Iron-Iron Carbide Diagram)

การทำกรรมวิธีทางความร้อนนั้นเราจำเป็นต้องศึกษาแผนภูมิสมมูลของเหล็กคาร์ไบด์โดยจะต้องศึกษาโครงสร้างจุลภาคต่างๆ ที่มีอยู่ในแผนภูมิสมมูล ซึ่งโครงสร้างต่างๆ นั้นมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 2.6 แผนภาพสมดุลเหล็กกับคาร์ไบด์ [15]

1) เหล็กเดลตา (Delta Iron) จากภาพที่ 2.6 พบโครงสร้างของเหล็กเดลตา (δ) เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ $1400^{\circ}\text{C} - 1539^{\circ}\text{C}$ โดยมีปริมาณคาร์บอนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.50 โดยจะอยู่ร่วมกับเหล็กหลอมเหลวส่วนเหล็กเดลตาที่มีคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.18 นั้นจะอยู่ร่วมกับโครงสร้างออสเทนไนท์และสุดท้ายเป็นเหล็กเดลตาที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.10 ในพื้นที่นี้จะมีเหล็กเดลตาอยู่เพียงโครงสร้างเดียวเท่านั้น เหล็กเดลตานั้นจะมีระบบผลึกเป็นแบบ BCC และมีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก นอกจากนี้เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิต่ำลงเหล็กเดลตาที่มีระบบผลึกแบบ BCC นั้นก็จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC

2) ออสเทนไนท์ (Austenite) หรือเหล็กแกมมา (γ) โครงสร้างเกิดขึ้นจากการละลายของคาร์บอนในเหล็กแกมมาโดยที่ปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มสูงสุดประมาณร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิ 1130°C มี

คุณสมบัติอ่อน เหนียว และไม่เป็นแม่เหล็ก (Non-Magnetic) เหมาะกับงานรีด (Rolling) งานอัด (Extrude) และงานตีขึ้นรูป (Forging)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของออสเทนไนท์ [16]

3) เฟอร์ไรท์ (Ferrite) หรือเหล็กแอลฟา (α) โครงสร้างเฟอร์ไรท์นี้จะมีระบบผลึกแบบ BCC (Body Centered Cubic) โครงสร้างจะประกอบด้วยเหล็กที่ค่อนข้างบริสุทธิ์คือจะมีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.025 ดังนั้นโครงสร้างนี้จึงไม่แข็งแรง อ่อน เหนียวและตีขึ้นรูปได้โดยง่ายแต่ถ้ามีโลหะชนิดอื่นๆ ผสมอยู่ เช่น โครเมียม และวานาเดียม เป็นต้น โลหะผสมดังกล่าวจะสามารถละลายเข้าไปในเฟอร์ไรท์ได้ ฉะนั้นในการพิจารณาโครงสร้างของเฟอร์ไรท์ของเหล็กชนิดนี้จะมีโครเมียมและวานาเดียมรวมอยู่



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างเฟอร์ไรท์ของเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.02 [16]

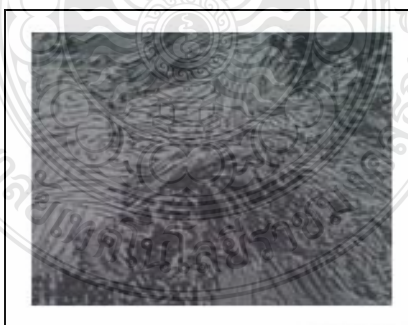
4) ซีเมนต์ไตต์ (Cementite) หรือเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) มีโครงสร้างที่แข็งและเปราะรับแรงดึงได้น้อยแต่สามารถรับความเค้นแรงอัดได้สูง โครงสร้างซีเมนต์ไตต์นี้ไม่ปรากฏเป็นโครงสร้าง

เดี่ยวแต่จะแทรกตัวอยู่กับโครงสร้างอื่นๆ เช่น ซีเมนต์ไต์ต์กับเฟอร์ไรท์ ซีเมนต์ไต์ต์กับเพิร์ลไลท์ และ ซีเมนต์ไต์ต์กับเลเดบิวไรต์ เป็นต้น โครงสร้างซีเมนต์ไต์ต์นี้จะมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 6.67 และมีระบบผลึกเป็นแบบ Orthorhombic จากภาพที่ 2.9 จะเห็นซีเมนต์ไต์ต์ตายสีขาวตามขอบเกรน และในโครงสร้างของเพิร์ลไลท์



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างซีเมนต์ไต์ต์ [16]

5) เพิร์ลไลท์ (Pearlite) โครงสร้างเพิร์ลไลท์นี้มีความหมายว่าไข่มุกทั้งนี้ก็เพราะว่าเพิร์ลไลท์เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงจะพบว่าโครงสร้างเป็นผิวมันคล้ายผิวของไข่มุก สำหรับโครงสร้างเพิร์ลไลท์จะมีความแข็งมากกว่าโครงสร้างออสเทนไนท์ และเกิดขึ้นสมบูรณ์ที่สุดที่จุดยูเท็คตอย์ (Eutectoid) ในช่วงอุณหภูมิ 723°C ที่ส่วนผสมของคาร์บอนร้อยละ 0.83 โครงสร้างเพิร์ลไลท์นี้เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรท์กับซีเมนต์ไต์ต์เรียงกันเป็นแถวสลับกันอย่างมีระเบียบ



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างเพิร์ลไลท์ [16]

6) มาร์เทนไซต์ (Martensite) โครงสร้างมาร์เทนไซต์นี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อทำการเผาเหล็กจนโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมดซึ่งในขณะที่เดียวกันอะตอมของคาร์บอนจะ

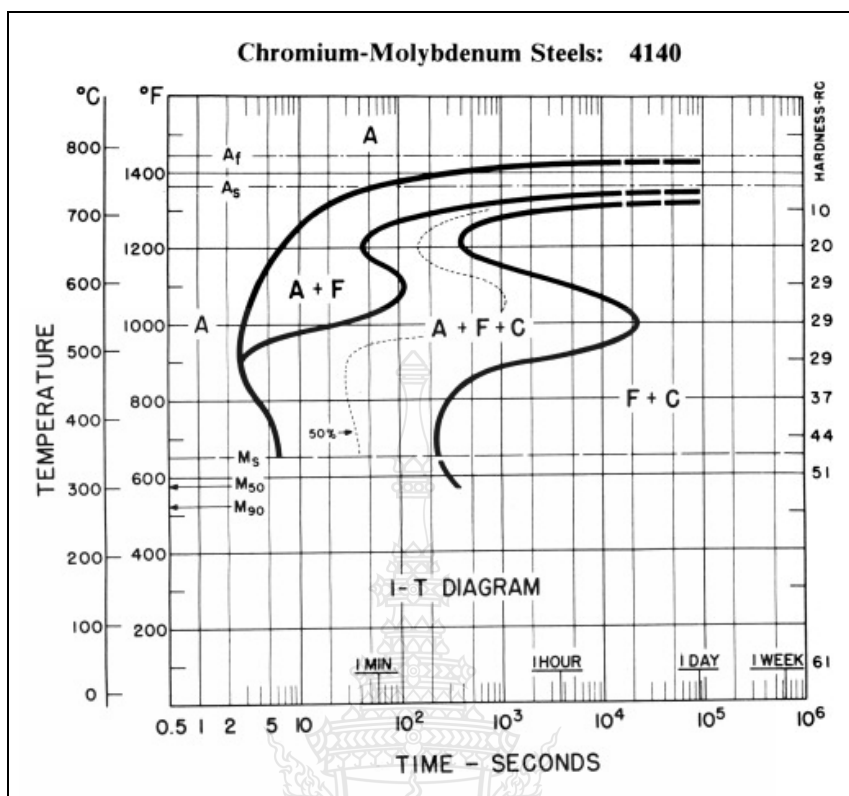
แทรกตัวอยู่กับหน่วยเซลล์ของเหล็ก จากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยชุบลงในตัวกลางใดๆ ซึ่งความเร็วในการชุบเพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้นจะต้องเร็วกว่าการชุบเพื่อให้เกิดโครงสร้างอื่นๆ ทั้งนี้ก็เพราะตำแหน่งที่เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้นจะอยู่ที่ส่วนล่างสุดของแผนภูมิ T.T.T. Diagram นอกจากนี้ตำแหน่งของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ยังอยู่ชิดกับเส้นอุณหภูมิของแผนภูมิอีกด้วย ดังนั้นการทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์จะต้องทำให้เกิดอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วจึงส่งผลให้เกิดการบิดตัวของระนาบในหน่วยเซลล์อันเนื่องจากมีอะตอมของคาร์บอนตกค้างในระนาบของหน่วยเซลล์นั้น การหดตัวกลับคืนสภาพของหน่วยเซลล์ที่มีคาร์บอนตกค้างอยู่จึงไม่สามารถทำได้ ส่วนระนาบหน่วยเซลล์อื่นๆ ที่ไม่มีคาร์บอนตกค้างอยู่ก็สามารถหดตัวกลับเข้าที่เดิมได้จากเหตุผลดังกล่าวความบิดเบี้ยวในแนวระนาบจึงเกิดขึ้นและด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์มีความแข็งสูงมากโดยจากมีความแข็งสูงถึง 69 HRC ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างของมาร์เทนไซต์ของเหล็กที่มีคาร์บอนผสมร้อยละ 1.3 [16]

2.5.2 แผนภูมิเวลา อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลง (Time Temperature Transformation Diagram แผนภูมิ T.T.T. Diagram)

แผนภูมินี้บางครั้งเรียกว่า แผนภูมิ T.T.T. Diagram เป็นแผนภูมิที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในขณะที่เหล็กนั้นถูกทำให้เย็นตัวภายในเวลาที่กำหนดไว้ จากแผนภูมิสมดุลเหล็กกับคาร์ไบด์จะพบว่าเส้น A_1 นั้นเป็นเส้นเริ่มการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เช่น เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์เมื่อถูกอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_1 เล็กน้อยเฟอไรต์จะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ สำหรับเฟอร์ไรต์นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนท์ก็เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหนือเส้น A_3



ภาพที่ 2.12 แผนภูมิ T.T.T. Diagram ของวัสดุ AISI 4140 [17]

แต่สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์เมื่อถูกอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_1 เล็กน้อย เฟิร์สไลต์จะเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์ ถ้าอบให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกจนอุณหภูมิเกินกว่าเส้น A_{CM} ซีเมนต์ไตต์ที่เหลืออยู่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนต์เช่นเดียวกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถ้าจะปรับปรุงโครงสร้างของเหล็กก็จะต้องอบเหล็กนั้นๆ ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนต์เสียก่อน และหลังจากนั้นจึงทำให้ออสเทนไนต์เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างอื่นๆ ตามที่เราต้องการซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้จะพบอยู่ในแผนภูมิ T.T.T. Diagram ดังภาพที่ 2.12

2.6 การอบชุบเหล็กกล้าด้วยความร้อน

การอบชุบเหล็กกล้าในที่นี้มีได้หมายถึงการชุบเหล็กให้แข็งเพียงอย่างเดียวแต่หมายถึงการใช้ความร้อนกระทำต่อเหล็กเพื่อเปลี่ยนสมบัติของเหล็กและโครงสร้างภายในของเหล็ก การอบชุบเหล็กที่สำคัญและใช้กันมากมีดังนี้

2.6.1 การชุบแข็ง (Hardening) คือการชุบเพื่อให้เหล็กมีความแข็งขึ้น ขั้นแรกจะต้องเผาเหล็กจากอุณหภูมิบรรยากาศให้ร้อนประมาณ $800^{\circ}\text{C} - 900^{\circ}\text{C}$ (ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็ก) ภายในเตาไฟฟ้าหรือ

เตาอบชุบอื่นๆ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้เมื่อเหล็กร้อนจนถึงอุณหภูมินี้ โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนท์ทั่วๆ ไปมักจะเผาให้อุณหภูมิของเหล็กร้อนเลยเส้น A_3 ไปประมาณ $50^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C}$ แต่จะไม่เผาเหล็กให้อุณหภูมิสูงเกินพิกัดนี้เพราะจะทำให้เกรนของเหล็กขยายโตตัวขึ้นซึ่งจะทำให้คุณภาพของเหล็กหลังจากการชุบเสียไปในทางปฏิบัติถ้าเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8% จะเผาให้อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_3 ประมาณ $50^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C}$ ถ้าเหล็กมีคาร์บอนสูงกว่า 0.8% จะเผาเพียงแค่อุณหภูมิเหนือเส้น A_1 ประมาณ $50^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C}$ เท่านั้นเหตุผลก็คือเพื่อต้องการรักษาซีเมนต์ไคต์ไว้ไม่ให้เปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนท์เพราะซีเมนต์ไคต์มีความแข็งสูงอยู่แล้ว เมื่อเผาเหล็กจนกลายเป็นออสเทนไนท์แล้วจะต้องทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงต่อความหนา 25 มิลลิเมตรเพื่อให้เหล็กร้อนทั่วถึงกันตลอดทั้งแท่งจากนั้นจึงจะนำเอาเหล็กออกจากเตาทำให้เย็นโดยรวดเร็วด้วยการจุ่มลงในน้ำ (Water Quench) หรือในน้ำมัน (Oil Quench) ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็นโดยรวดเร็วนี้ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนกลับไปเป็นเฟอร์ไรท์และเฟิร์ลไลท์ไม่ทันแต่จะให้โครงสร้างใหม่ที่มีความแข็งสูงเรียกว่ามาร์เทนไซต์ ถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วมาร์เทนไซต์ก็คือเหล็กเฟอร์ไรท์นั่นเองแต่เป็นเหล็กเฟอร์ไรท์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าสภาพสมดุลตาม Equilibrium Diagram ที่เป็นเช่นนี้เพราะอะตอมของคาร์บอนไม่มีเวลาพอที่จะเคลื่อนไหวยมารวมกันให้ซีเมนต์ไคต์ ดังนั้นความแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบจึงขึ้นอยู่กับสองสิ่ง คือ

1) ปริมาณธาตุคาร์บอนในเหล็กกล่าวคือถ้าในเหล็กมีธาตุคาร์บอนมาก โอกาสที่เหล็กจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ก็ยิ่งง่ายและให้ปริมาณของมาร์เทนไซต์มาก

2) อัตราความเร็วในการชุบ กล่าวคือถ้าทำให้เหล็กเย็นเร็วๆ โอกาสที่ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ก็มีมากในทางตรงกันข้ามถ้าปล่อยให้เหล็กเย็นช้าๆ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรท์กับซีเมนต์ไคต์หมดไม่เกิดมาร์เทนไซต์ เหล็กก็ไม่แข็ง

2.6.2 องค์ประกอบที่สำคัญในการชุบแข็ง

1) ปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญเพราะการที่ออสเทนไนท์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ ในลักษณะการชุบแข็งธรรมดาด้วยน้ำเหล็กควรมีคาร์บอนมากกว่า 0.3% ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่นๆ เช่น นิกเกิล โครเมียม และ โมลิบดีนัมจะเพียงทำหน้าที่ช่วยให้การชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น ความแข็งของมาร์เทนไซต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนดังตัวอย่างเช่น เหล็กคาร์บอน 0.35% สามารถชุบแข็งได้ความแข็งประมาณ 50 HRC ตรงกันข้ามเหล็ก 0.02%C 10%Cr ได้ความแข็งภายหลังการชุบแข็งเพียง 35 HRC

2) อุณหภูมิก่อนการชุบคืออุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ก่อนการชุบน้ำหรือน้ำมัน อุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์หมดเราจะชุบในน้ำหรือ

น้ำเกลือ น้ำค้าง ความแข็งที่ได้จะไม่สูงเท่าที่ควรเพราะมาร์เทนไซต์ที่ได้จะต้องมาจากออสเทนไนท์เท่านั้นและเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างโดยปราศจากการกำเนิดนิวเคลียสไม่เหมือนอย่างเช่นเฟอร์ไรท์หรือซีเมนต์ไคต์

3) อัตราการเย็นตัวเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอซึ่งจะปรากฏค่าว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) หมายถึงอัตราการเย็นตัวที่ออสเทนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์แต่ละได้เฟอร์ไรท์หรือซอร์ไบแทน

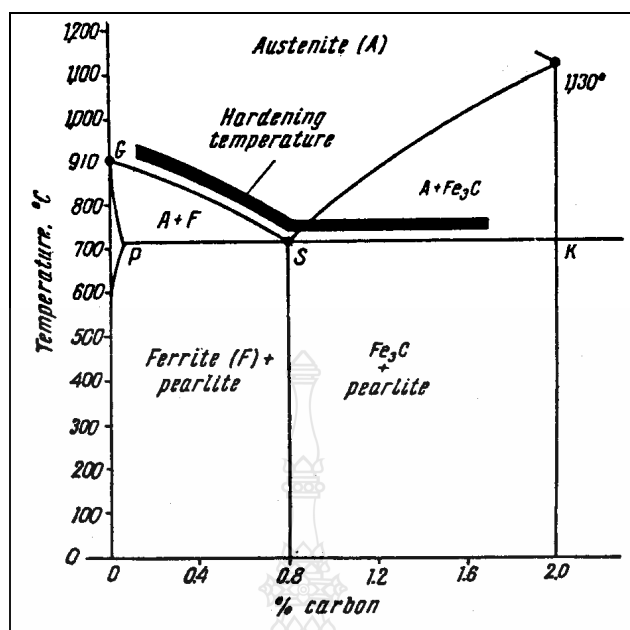
2.6.3 อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็ง (Hardening Temperature)

ในที่นี้จะขอแยกกล่าวถึงอุณหภูมิสำหรับการชุบแข็งเหล็กออกเป็น 2 กรณี คือ

1) เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์จะใช้อุณหภูมิสูงเหนือเส้น A_3 $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมินี้จะได้โครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ทั้งหมด ถ้าพิจารณาในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้และอยู่ในช่วง $A_1 - A_3$ จะปรากฏมีเฟอร์ไรท์เหลืออยู่บางส่วนถ้าทำการชุบที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้และเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์แต่เฟอร์ไรท์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงคงสภาพอยู่อย่างเดิมเหล็กภายหลังการชุบจะไม่ได้ความแข็งสูงเท่าที่ควร และบริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟอร์ไรท์จะเป็นบริเวณที่อ่อนขาดคุณสมบัติด้านทานต่อการเสียดสี

ในกรณีถ้าเผาที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_3 ไปมาก (Overheating) จะได้โครงสร้างออสเทนไนท์ที่มีเกรนโตภายหลังการชุบน้ำจะได้มาร์เทนไซต์ที่หยาบซึ่งจะทนแรงกระแทกได้น้อยลงอีกประการหนึ่งชิ้นงานในขณะที่ชุบน้ำจะเกิดการบิดงอหรือแตกง่ายได้ง่าย

2) เหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์จะใช้อุณหภูมิสูงเหนือเส้น A_1 ประมาณ $3^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ เท่านั้นจะเห็นว่าในช่วงของอุณหภูมินี้จะปรากฏโครงสร้างของโปยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์เหลืออยู่บางส่วนเท่านั้นที่ละลายตัวไปเป็นออสเทนไนท์และซีเมนต์ไคต์ที่เหลืออยู่จะกระจายกระจายทั่วไปในโครงสร้างของออสเทนไนท์เมื่อทำการชุบน้ำจะได้โครงสร้างของมาร์เทนไซต์โดยมีโปยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์แทรกอยู่ ซึ่งจะปรากฏเป็นผลดีในส่วนที่เหล็กจะมีความแข็งสูงและทนการเสียดสีในขณะที่ใช้งานดี ทั้งนี้เพราะ โปยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์มีความแข็งประมาณ 700-800 HB ซึ่งแข็งกว่ามาร์เทนไซต์ (650-700 HB) ประเด็นที่สำคัญคือจะต้องเลือกอุณหภูมิที่จำไม่เกิดโปยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์ในลักษณะต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ตามขอบเกรน



ภาพที่ 2.13 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งของเหล็กกล้า [18]

ในกรณีที่เผาอุณหภูมิเหนือเส้น A_{cm} จะไม่เกิดผลดีนอกจากต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นออสเทนไนต์จะขยายตัวให้เกรนโตเร็วมากจะทำให้ผลที่ได้ภายหลังการชุบไม่ดีเพราะจะได้มาร์เทนไซต์เกรนหยาบทนแรงกระแทกได้ไม่ดีและยังอาจเกิดการบิดงอและแตกร้าวได้ง่าย

2.6.4 อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะ (Heating Rate and Holding Time)

การกำหนดอัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์หลายประการเช่น ส่วนผสมของเหล็ก โครงสร้างเดิม ความเครียดเหลือค้าง รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่จะทำการชุบแข็ง ปกติเหล็กเมื่อบรรจุเข้าเตาเผาความร้อนที่เหล็กได้รับที่ผิวกับใจกลางจะไม่เท่ากันในตอนแรก เพราะกว่าความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อเหล็กเข้ามาถึงใจกลางย่อมต้องใช้เวลาการเผาในอัตราสูง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับใจกลางจะมีค่ามาก การบิดงอมีมากซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่ายโดยทั่วไปเราแบ่งอัตราการเผาไว้ 3 อัตราขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตา

อัตราการเผาช้าเป็นวิธีที่เริ่มต้น โดยบรรจุเหล็กเข้าเตาพร้อมๆ กับการให้ความร้อนแก่เตาเผาพร้อมๆ กันอุณหภูมิทั้งของเตาและชิ้นงานจะร้อนขึ้นในอัตราใกล้เคียงกันในลักษณะเช่นนี้ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวกับใจกลางของแท่งเหล็กมีน้อย การเผาในลักษณะเช่นนี้เหมาะสำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงมีความเครียดเหลือค้างมาจากการขึ้นรูป รูปร่างซับซ้อนและมีส่วนที่หนาและบางต่างกันมาก

อัตราการเผาสูงวิธีนี้จะเผาเตาให้มีอุณหภูมิเท่าที่ต้องการจากนั้นจึงบรรจุเหล็กเข้าเตา ภายหลังหรือในกรณีที่เตากำลังใช้งานอยู่เมื่อนำเอาเหล็กออกไปชุบหมดแล้วก็เริ่มบรรจุเหล็กชุดต่อไป ใหม่ ลักษณะเช่นนี้อัตราการเผาจะสูงอุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น แต่จะไปเท่ากันในระยะเวลาที่สั้นกว่าวิธีแรกการเผาในอัตราสูงเหมาะสำหรับงานชิ้นเล็กๆ รูปร่างไม่ ซับซ้อนและเป็นเหล็กคาร์บอนปานกลางจะใช้วิธีเอาเหล็กบรรจุไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิดบรรจุเข้าเตา จะช่วยลดอัตราการเผาลงได้อีกเพราะความร้อนจะผ่านหีบเข้าไปถึงใจกลางแท่งเหล็กจะช้าลง

อัตราการเผาที่สูงมากเป็นวิธีที่ไม่สู้จะนิยมใช้เพราะอัตราการเผาจะสูงอุณหภูมิระหว่างผิว กับใจกลางแท่งเหล็กจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น โดยวิธีการเผาให้อุณหภูมิในเตาสูงเกินกว่า อุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อบรรจุเหล็กเข้าเตาอุณหภูมิของเตาจะลดลงมาจนเท่ากับที่ต้องการพร้อมๆ กับ อุณหภูมิของชิ้นงานร้อนขึ้น เวลาที่ใช้จะสั้นกว่าทั้งสองวิธีแต่อุณหภูมิระหว่างใจกลางกับผิวเหล็กจะ แตกต่างกันอย่างมากอาจจะทำให้เกิดการบิดงอหรือชิ้นงานแตกร้าวได้ง่ายวิธีนี้เหมาะสำหรับงานขนาดเล็ก และรูปร่างง่ายๆ จำเป็นจะต้องบรรจุในหีบเหมือนวิธีที่สองเพื่อช่วยลดอัตราการเผาให้ช้าลง

ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาในการเผาที่ความหนาต่างๆ กัน [18]

Heating Times and Holding Time (et Working Temperatures) for Hardening Carbon and Structural Steels

Thickness or diameter of part. mm	Box furnaces (gas or oil-fired)		Salt baths	
	heating. min	holding. min	heating. min	holding. min
25	20	5	7	3
50	40	10	17	8
75	60	15	24	12
100	80	20	33	17
125	100	25	40	20
150	120	30	50	25
200	160	40	65	35

Not: Heating time for alloy steels should be increased from 25 to 50 percent.

สำหรับเวลาที่จะทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการ (Holding Time) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ออสเตนไนท์ที่สม่ำเสมอและให้อุณหภูมิทั้งบริเวณผิวและใจกลางเท่ากัน ไม่มีภูมิภาคที่ตายตัวขึ้นอยู่กับหลักในการปฏิบัติถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloys) ซึ่งคาร์ไบด์สลายตัวได้ง่ายจะใช้เวลาประมาณ 5 - 15 นาที ก็พอทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานด้วยแต่ถ้าเป็นเหล็กกล้าผสมปานกลางหรือสูงซึ่งคาร์ไบด์มีเสถียรภาพจะต้องใช้เวลาให้นานพอที่คาร์ไบด์จะสลายตัวหมด ซึ่งเวลาที่ใช้ควรเพิ่มขึ้นประมาณ 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ใช้เกณฑ์ปกติดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.6.5 ของเหลวสำหรับการชุบแข็ง

ของเหลวที่ใช้สำหรับการชุบแข็งที่ดีโดยหลักเกณฑ์ทั่วไปจะต้องให้อัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤติ ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ออสเตนไนท์แตกตัวไปเป็นเฟิร์ลไลต์ หรือโครงสร้างอื่นที่ไม่ใช่มาร์เทนไซต์และที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือควรจะให้อัตราการเย็นตัวที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงจากออสเตนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ซึ่งจะเป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200°C - 400°C ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเครียดภายในกับชิ้นเหล็กมากนักมิฉะนั้นจะทำให้เกิดการบิดงอหรือแตกร้าวขึ้นได้

1) ของเหลวสำหรับการชุบแข็งที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ น้ำ น้ำเกลือ น้ำด่าง น้ำมัน เกลือละลาย หรืออากาศ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะน้ำและน้ำมัน

ก. น้ำให้อัตราการเย็นตัวค่อนข้างต่ำในตอนต้นแต่จะให้ค่าอัตราการเย็นตัวสูงมากในช่วงอุณหภูมิ 400°C - 200°C นี้จะเป็นลักษณะที่ไม่ดีเพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์และจะมีการขยายตัวเล็กน้อยทำให้เกิดความเครียดได้มากอันจะเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอ และแตกร้าวได้ง่ายยังเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนสูงการชุบแข็งโดยการชุบน้ำจะทำให้ไม่ได้ดังเหตุผลที่กล่าวมา

ข. น้ำมันจัดเป็นของเหลวที่ให้คุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนต่ำให้อัตราการเย็นตัวสูงสุดประมาณ 200°C ต่อวินาทีซึ่งไม่สูงพอสำหรับการชุบเพื่อให้ได้มาร์เทนไซต์สำหรับเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กผสมต่ำยังเป็นงานชิ้นโตโอกาสได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะเป็นไปได้ยากน้ำมันจึงเหมาะสำหรับการชุบแข็งเหล็กที่มีส่วนผสมสูงออสเตนไนท์มีเสถียรภาพสูงและอัตราการเย็นตัววิกฤติต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ น้ำมันมีข้อดีอยู่ตรงที่ให้อัตราการเย็นตัวสม่ำเสมอไม่ทำให้เกิดความเครียดมากนัก การที่จะเพิ่มสมบัติการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมันสามารถทำได้โดยการเผาให้ร้อนประมาณ 50°C - 80°C น้ำมันจะใสทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นน้ำมันที่ใช้สำหรับการชุบแข็งจะต้องเป็นน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม (Mineral Oil) และมีจุดติดไฟประมาณ 160°C - 170°C

2) การถ่ายเทความร้อนที่ของเหลวชนิดมีจุดเดือดกลายเป็นไอสามารถแยกออกเป็น 3 ลักษณะที่ต่างกันเมื่อสัมผัสกับแท่งเหล็กที่ร้อน

ก. ชั้นแรกเมื่อจุ่มแท่งเหล็กลงไปของเหลวจะสัมผัสกับแท่งเหล็กที่ร้อนจัดของเหลวรอบๆ จะรับความร้อนสูงจนกลายเป็นไอหุ้มแท่งเหล็กไว้ในลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะช้า เพราะความร้อนต้องผ่านฟิล์มบางๆ ซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำความร้อนต่ำแต่จะเป็นอยู่ในระยะสั้นๆ เมื่อไอของของเหลวรวมตัวกันมากก็จะลอยขึ้นหรืออาจจะแตกออก

ข. ชั้นที่สองเมื่อฟิล์มบางๆ ของไอที่หุ้มแท่งเหล็กแตกออกของเหลวที่อยู่รอบนอกจะเข้าสัมผัสแท่งเหล็กในช่วงนี้ของเหลวรอบๆ ซึ่งได้รับความร้อนอยู่แล้วในชั้นแรก เมื่อเข้าสัมผัสก็จะรับความร้อนจำนวนมากจะเกิดการเดือดและกลายเป็นไอแต่ไม่มีโอกาสหุ้มแท่งเหล็กเหมือนในครั้งแรกทั้งนี้เพราะของเหลวอยู่ในสภาพเกิดการเดือดและกลายเป็นไอทำให้มีลักษณะเหมือนกับการกวนของเหลวมีโอกาสสัมผัสกับแท่งเหล็กอยู่ตลอดเวลา และถ่ายเทความร้อนได้ปริมาณมากยิ่งการเป็นไอเกิดขึ้นได้มากความร้อนจากแท่งเหล็กยิ่งถูกถ่ายเทออกมาได้มากเพราะของเหลวที่ว้าวไปมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงในชั้นนี้อัตราการเย็นตัวจะสูงมาก

ค. ชั้นที่สามเป็นชั้นที่มีอัตราการเย็นตัวช้าลงเมื่อความร้อนจากแท่งเหล็กน้อยลงอุณหภูมิของของเหลวเริ่มต่ำลงกว่าจุดเดือดความร้อนจะถูกถ่ายเทออกไปโดยการพาตัวของเหลวเพียงอย่างเดียวจึงทำให้อัตราการเย็นตัวลดต่ำลงจนถึงจุดที่อุณหภูมิเท่ากันทั้งแท่งเหล็กและของเหลว

2.6.6 การอบคืนไฟ (Tempering)

เหล็กภายหลังจากการชุบแข็งจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยมาร์เทนไซต์และออสเทนไนท์เหลือค้าง (Residual Austenite) ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนสูงจะมีโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไต์ต์ (Proeutectoid Cementite) กระจุกกระจายอยู่ทั่วไปนอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายในอันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูง สมบัติของเหล็กตามลักษณะที่กล่าวจะมีความแข็งสูงแต่จะขาดสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทกและความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอหรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะที่ใช้งาน ได้ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนไฟเพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไปหรือเหลืออยู่น้อยที่สุดและในขณะเดียวกันจะทำให้มาร์เทนไซต์แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุลย์ (Tempered Martensite) ซึ่งจะมีผลอย่างกว้างขวางต่อสมบัติของเหล็กดังเช่น ความแข็งจะลดลงแต่ความเหนียวจะกลับสูงขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนไฟและเวลาที่ใช้

การอบคืนไฟเป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_1 ภายหลังจากเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้วจะปล่อยให้เย็นช้าๆ ภายในเตาการเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซต์และออสเทนไนท์เหลือค้างไปสู่โครงสร้างที่สมดุลจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ กันดังนี้

อุณหภูมิช่วงแรก ($80^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$) โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ชนิดที่ใกล้จะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo Cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ 0.25% การคาร์ไบด์ชนิดเอฟซิลอน (E Carbide) มีสูตร Fe_2C หรือ Fe_2C_4 และมีคาร์บอนประมาณ 8.2% ทั้งคาร์ไบด์และเฟอร์ไรท์ (0.25% C) จะตกผลึกชนิดละเอียดและกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างสามารถศึกษาได้โดยกล้องขยายอิเล็กตรอนเท่านั้นการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งจะลดลงเล็กน้อยแต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมด

อุณหภูมิช่วงที่สอง ($200^{\circ}\text{C} - 280^{\circ}\text{C}$) โครงสร้างออสเทนไนท์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้ทันในขณะที่ชุบแข็ง (Retained Austenite) จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ (0.025% C) และ ซีเมนต์ไต์ (Fe_3C) ที่มีความละเอียดและกระจายโครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับเบนไนท์ ความแข็งแรงจะลดลงมาก แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิช่วงที่สาม ($300^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฟอร์ไรท์ (Pseudo Cubic) จะแตกตัวให้เฟอร์ไรท์ (Cubic) ที่มีคาร์บอน 0.025% และซีเมนต์ไต์ส่วนเอฟซิลอนคาร์ไบด์จะเปลี่ยนเป็นซีเมนต์ไต์ (Fe_3C) โครงสร้างที่จะได้จะยังอยู่ในลักษณะละเอียดและกระจายมีลักษณะคล้ายซอร์ไบท์

อุณหภูมิช่วงที่สี่ (สูงกว่า 500°C ขึ้นไปจนถึง A_1) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะปรับตัวเข้ากับสภาพสมดุลและมีการขยายตัวเองเฟอร์ไรท์และซีเมนต์ไต์โตขึ้นความแข็งแรงจะลดลงมากโดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำสเฟอไรไรด์ซึ่ง (Incomplete Annealing)

จากการทดลองอบคืนไฟเหล็ก Eutectoid (0.8% C) ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ปรากฏได้ความแข็งแรงลดลงจากความแข็งภายหลังการชุบแข็ง (64 HRC) อบคืนไฟอุณหภูมิช่วงแรก 1 ชั่วโมงได้ความแข็งแรง 60 – 64 HRC ช่วงที่สองได้ความแข็งแรง 40 – 60 HRC ช่วงที่สามความแข็งแรง 20 – 40 HRC และช่วงที่สี่เหลือความแข็งแรง 5 – 10 HRC

ในทางปฏิบัติแบ่งช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบคืนไฟออกเป็น 3 ช่วงคือ [18]

การอบคืนไฟที่อุณหภูมิต่ำ ($150^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายในและปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเหนียวโดยพยายามรักษาระดับความแข็งแรงไว้ในระดับใกล้เคียงกับ

ความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็งเวลาที่ใช้ประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

การอบคืนไฟที่อุณหภูมิปานกลาง ($350^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูงและมีคุณสมบัติทางด้านยืดหยุ่นสูงส่วนใหญ่ใช้สำหรับเหล็กทำแหวนสปริง โครงสร้างของเหล็กจะใกล้เคียงกับเบนไนท์หรือทรูสไตต์

การอบคืนไฟที่อุณหภูมิสูง ($500^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$) จะกระทำเมื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไปและเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวสูงโดยมีความแข็งอยู่ในเกณฑ์สูงด้วยโครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็นเฟิร์ลไลต์ละเอียดใกล้เคียงกับโครงสร้างซอร์ไบท์

2.6.7 การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) [6]

มีจุดประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความอ่อนตัวสูงทำให้สามารถตัดด้วยเครื่องมือตัดได้ง่ายอีกทั้งยังทำให้สมบัติความเป็นแม่เหล็กสม่ำเสมออีกด้วย วิธีการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์นี้ถ้าเป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำคือเป็นประเภทเหล็กไฮโปยูเทกตอยด์จะอบที่อุณหภูมิสูงเหนือเส้น A_3 ประมาณ $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ แต่ถ้าเป็นเหล็กประเภทที่มีคาร์บอนผสมอยู่มาก คือเหล็กไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ ก็อบที่เหนือเส้น A_1

เมื่ออบเหล็กถึงอุณหภูมิดังกล่าวแล้วเหล็กจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนท์และเนื่องจากการอบอ่อนชนิดนี้มีจุดประสงค์ที่ต้องการให้ชิ้นงานอ่อนตัวลงทั้งชิ้น ดังนั้นจึงต้องทำให้เหล็กทั้งชิ้นเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนท์ก่อนเวลาในการอบจึงขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน คือจะใช้เวลาในการอบประมาณ 30 - 60 นาทีต่อความหนาของชิ้นงาน 25 มิลลิเมตรและเมื่ออบชิ้นงานได้ตามต้องการแล้ว จึงปล่อยให้ชิ้นงานเย็นลงอย่างช้าๆ

ด้วยอัตราการเย็นตัวดังกล่าวจึงมักจะปล่อยให้ชิ้นงานนั้นเย็นตัวภายในเตาอบซึ่งเรียกว่า Furnace Cooled โครงสร้างที่ได้หลังจากการอบอ่อนคือ เฟิร์ลไลต์และเฟอร์ไรท์ถ้าเป็นเหล็กไฮโปยูเทกตอยด์ แต่จะเป็นเฟิร์ลไลต์และซีเมนไตต์ถ้าเป็นเหล็กไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ หรือถ้าเป็นเหล็กยูเทกตอยด์ภายหลังการอบก็จะได้เฟิร์ลไลต์แต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองครั้งนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย โดยเริ่มจากการเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง การดำเนินการทดลองโดยทำการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน 3 กระบวนการ ได้แก่ การทดสอบวัสดุในสภาพจำหน่าย (Commercial) การทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) และการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) ซึ่งการทดลองดังกล่าวมีการวางแผนวิเคราะห์โดยทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลตามขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

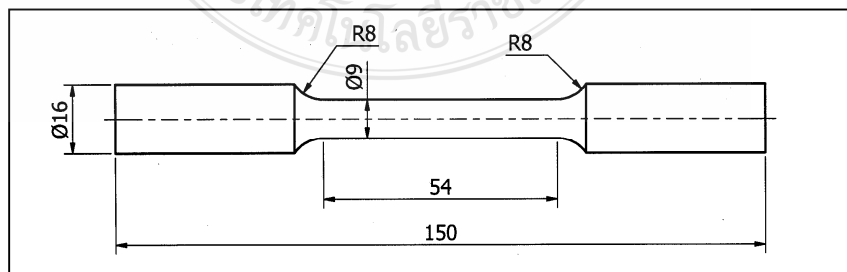
3.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

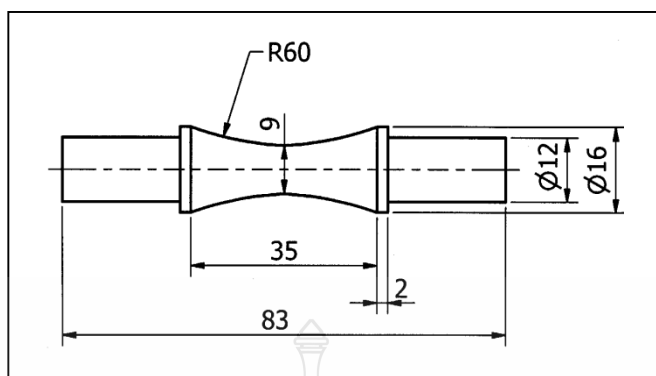
ใช้เหล็กเกรดตามมาตรฐาน AISI 4140 เป็นเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูงมีโครเมียม (Cr) และ โมลิบดีนัม (Mo) เป็นส่วนผสมสำคัญซึ่งใกล้เคียงกับเกรดเหล็กมาตรฐาน DIN 1.7225 / 42CrMo4 และ JIS SCM440

3.1.2 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ตัดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร ใช้ทำชิ้นงานทดสอบแรงดึง ดังภาพที่ 3.1 จำนวน 12 ชิ้น และตัดเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 83 มิลลิเมตร สำหรับใช้ทำชิ้นงานทดสอบความล้าดังภาพที่ 3.2 จำนวน 120 ชิ้น โดยใช้เครื่องกลึง CNC Lathe เป็นเครื่องจักรในการเตรียมชิ้นงานทดสอบซึ่งชิ้นงานจะมีขนาดผิวที่เหมือนกัน



ภาพที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 [19]



ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบความล้าแบบหมุนตัดตามมาตรฐาน DIN 50113 [20]

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 กระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน

การทดลองครั้งนี้ผู้จัดทำได้ออกแบบการทดลองโดยทำการแบ่งชิ้นทดสอบ ออกเป็น 3 กระบวนการ แต่ละกระบวนการทำการทดลองโดยทดสอบแรงดึง 3 ชิ้นและทดสอบความล้า 40 ชิ้น ดังตารางที่ 3.1

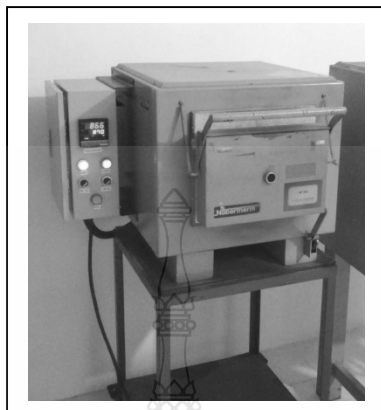
ตารางที่ 3.1 การออกแบบกระบวนการทดลองสำหรับชิ้นทดสอบแรงดึงและความล้า

กระบวนการทดลอง	กระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน		
	วัสดุในสภาพจำหน่าย	กระบวนการอบอ่อน อย่างสมบูรณ์	กระบวนการชุบแข็ง และอบคืนไฟ
การทดสอบแรงดึง	3	3	3
การทดสอบความล้า	40	40	40
รวม (ชิ้น)	43	43	43

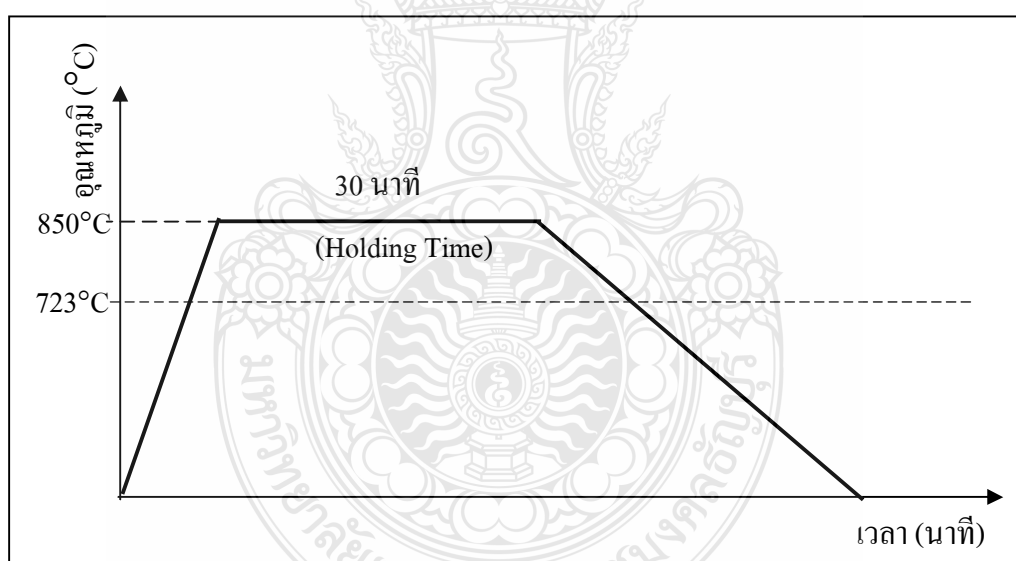
1) การปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ได้แก่ชิ้นทดสอบแรงดึง 3 ชิ้นและชิ้นทดสอบความล้า 40 ชิ้นมาทำการอบชุบด้วยความร้อนด้วยเตาอบชุบโลหะดังแสดงในภาพที่ 3.3 โดยตั้งค่าโปรแกรมของเตาอบชุบโลหะให้ร้อนขึ้นถึง 850°C [2] และคงอุณหภูมิไว้ (Holding Time) 30 นาที [14] ดังแสดงในภาพที่

3.4 จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำออกจากเตาเพื่อทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 3.3 เตาอบชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

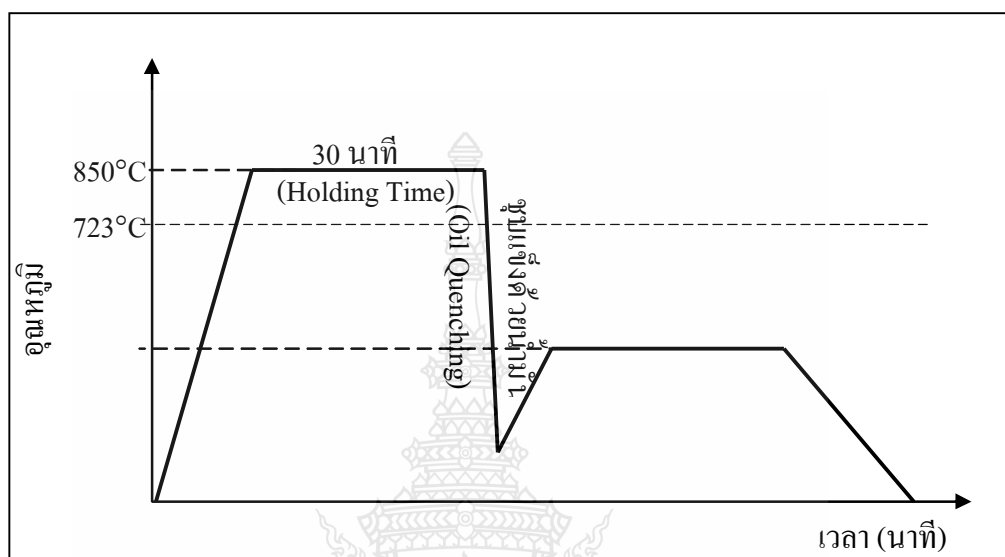


ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ของวัสดุ AISI 4140

2) การปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมคาร์บอนด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ

นำชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ได้แก่ ชิ้นทดสอบแรงดึง 3 ชิ้นและชิ้นทดสอบความล้า 40 ชิ้นทำการชุบแข็งโดยใช้อุณหภูมิในการอบชุบที่ 850°C [2] โดยใช้เตาอบชุบโลหะซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน

ของเครื่อง โดยทำการตั้งค่าโปรแกรมของเตาอบชุบโลหะให้ร้อนขึ้นถึง 850°C คงอุณหภูมิไว้ (Holding Time) 30 นาที [14] หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยใช้น้ำมันเป็นสารในการจุ่มชุบ ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการชุบแข็งและอบคืนไฟของวัสดุ AISI 4140

เมื่อเสร็จจากกระบวนการชุบแข็งแล้ว นำชิ้นทดสอบอบคืนไฟ (Tempering) อีกครั้งเพื่อลดความเครียดภายในเนื้อโลหะซึ่งกระบวนการนี้เลือกใช้อุณหภูมิการอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 350°C [18] คงอุณหภูมิไว้ (Holding Time) 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวภายในเตาอบถึงอุณหภูมิห้องจึงนำออกจากเตาได้ซึ่งแสดงในภาพที่ 3.5

3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เมื่อผ่านการชุบแข็งและทำการอบคืนไฟที่อุณหภูมิช่วงต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้แล้วนำชิ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูลักษณะโครงสร้างว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่โดยมีขั้นตอนดังนี้

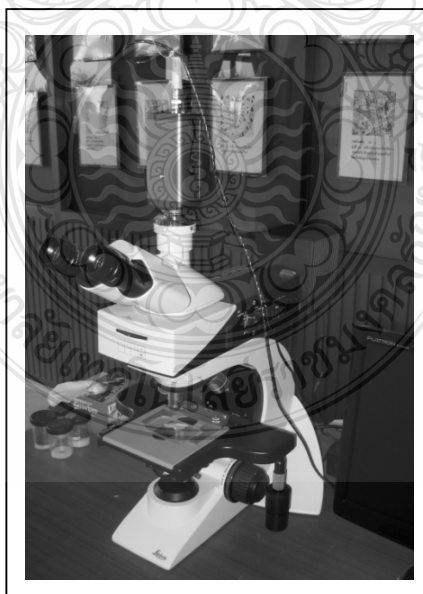
- 1) ทำการตัดแบ่งชิ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการที่ได้จากการทดลองให้มีขนาดความยาว 20 มิลลิเมตร โดยตัด 1 ชิ้น ต่อ 1 กระบวนการทดลอง
- 2) ขัดผิวหน้าตัดของชิ้นทดสอบให้เรียบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 400 และ 600 โดยใช้เครื่องขัดโลหะดังแสดงในภาพที่ 3.6 จนผิวเรียบไม่เป็นรอยขีดข่วนแล้วนำมาขัดด้วยผ้าสักหลาดจนผิวมันเงาเป็นกระจก แล้วทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น



ภาพที่ 3.6 เครื่องขัดผิวโลหะ

3) ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปกัดด้วยกรดไนตริก 5% ในภาชนะรองรับ หลังจากนั้นนำมาล้างผิวด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งและล้างด้วยแอลกอฮอล์ 100% เช็ดให้แห้ง

4) นำชิ้นงานที่กัดกรดแล้วมาตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ Optical Microscope (Leica DM2500M Microscope) ดังแสดงในภาพที่ 3.7 เพื่อให้ทราบว่าการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมด้วยความร้อนมีโครงสร้างของเหล็กตามที่ต้องการแล้วทำการเก็บข้อมูลโดยการถ่ายรูป



ภาพที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์แบบ Optical Microscope

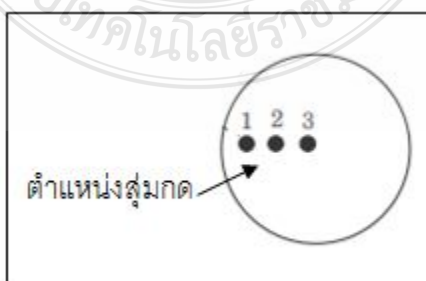
3.2.3 การทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ

นำชิ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนมาทำการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Tests (ESEWAY-675 ESETOUCH) ดังภาพที่ 3.8 ทำการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าชิ้นทดสอบการผ่านกระบวนการทางความร้อนมีความแข็งแตกต่างกันเท่าไรซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Tests

- 1) ทำการตัดแบ่งชิ้นงานที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 กระบวนการให้มีขนาดความยาว 15 มิลลิเมตร โดยตัด 3 ชิ้นทดสอบต่อ 1 กระบวนการทดลอง
- 2) ทำการขัดผิวหน้าตัดของชิ้นทดสอบให้เรียบด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 400 และ 600 ตามลำดับแล้วขัดผิวด้วยเครื่องขัดผิวโลหะดังภาพที่ 3.6 จนผิวเรียบไม่เป็นรอยจึงนำมาทดสอบความแข็งโดย 1 ชิ้นจะทำการสุ่มกด 3 ตำแหน่งดังภาพที่ 3.9 และทำการบันทึกค่า



ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งสุ่มกดบนพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบทั้ง 3 ตำแหน่ง

3.2.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบ

นำชิ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแบบ Universal Testing Machines ดังภาพที่ 3.10 แล้วบันทึกค่าต่างๆ เมื่อชิ้นงานขาด โดยทำการทดสอบกลุ่มละ 3 ชิ้น



ภาพที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึงแบบ Universal Testing Machines

หลังจากนั้นนำค่าแรงดึงเฉลี่ยที่ได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) เพื่อนำไปคำนวณหาน้ำหนักที่จะใช้ในการทดสอบความล้าดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$G = \frac{\sigma_u \times W}{1000 \times 9.81} \quad (3.1)$$

เมื่อ G = น้ำหนักที่ใช้กดถ่วงชิ้นทดสอบ (kg)
 σ_u = ค่าความต้านทานแรงดึง (N/mm^2)
 W = โมเมนต์สถิตตัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi d^3/32$ (mm^3)

3.2.5 การทดสอบการล้าตัวของวัสดุ

หลังจากที่ทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเพื่อหาน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบความล้าแล้วขั้นตอนต่อมาคือทำการทดสอบความล้าโดยเริ่มทดสอบความล้าที่ 80% ของความต้านทานแรงดึงและแต่ละระดับความล้าจะใช้ชิ้นทดสอบ 5 ชิ้นแล้วลดระดับค่าความต้านทานแรงดึงทีละ 10%

จนกระทั่งถึงระดับความเค้นที่ขึ้นทดสอบสามารถทนแรงกระทำ (ทนความล้า) โดยที่ขึ้นทดสอบไม่ขาดไว้ที่ 1,200,000 รอบต่อนาทีก็หยุดทดสอบซึ่งจะทำการทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 3 ประเภทการทดลองได้แก่การทดสอบวัสดุในสภาพจำนาย การทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) และการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) ตามลำดับโดยใช้เครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัดชนิด Rotary Bending Machine Type UBM 200 ดังภาพที่ 3.11 และมีขั้นตอนการทำงานของเครื่องทดสอบความล้า ดังนี้



ภาพที่ 3.11 เครื่องทดสอบความล้าแบบหมุนตัดชนิด Rotary Bending Machine Type UBM 200

- 1) ใส่ชุดจับยึดชิ้นทดสอบโดยหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยเครื่องมือที่มีเตรียมไว้
- 2) ใส่ชิ้นทดสอบใหม่เข้าที่ปล็อกยึดแล้วขันจับยึดให้แน่น
- 3) ปรับแรงลมประมาณ 0.1 บาร์จนชุด Load Bearing ลอยตัวด้วยแรงลม
- 4) แขนวน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1
- 5) ชั่งน้ำหนักลูกเหล็กมาตรฐานใส่ภาชนะที่จัดให้ไว้
- 6) ตั้งจำนวนรอบของมอเตอร์ประมาณ 80% ของค่าความเร็วที่ต้องการทดสอบโดยความเร็วที่ต้องการคือ 4,500 รอบต่อนาที
- 7) เปิดสวิทช์การทำงานของเครื่องทดสอบความล้าโดยมีตัวเลขบอกรอบการทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักเนื่องจากความล้า

8) เมื่อขึ้นทดสอบหมุนมาที่จำนวนรอบการทำงานค่าหนึ่งจะเกิดการแตกหักขึ้นส่งผลให้มอเตอร์หยุดหมุนให้บันทึกจำนวนรอบที่ได้จากการแตกหักของขึ้นทดสอบในตารางที่กำหนดไว้ (ภาคผนวก ข)

9) ทำการทดลองซ้ำจนกว่าจะได้ข้อมูลครบตามกำหนดของขึ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการ

3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากทำการศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุครบทั้ง 3 กระบวนการทดลองแล้วนำขึ้นทดสอบเหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์ผลดังนี้

3.3.1 นำขึ้นทดสอบที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนมาวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้ของแต่ละกระบวนการว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่

3.3.2 ทำการวัดค่าความแข็งเพื่อวิเคราะห์หาสมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140 ว่าความแข็งที่ได้จะส่งผลต่ออายุการใช้งานเมื่อมีความล้าเกิดขึ้น

3.3.3 ทำการทดสอบแรงดึงเพื่อวิเคราะห์ว่าการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนให้ค่าความต้านทานแรงดึงเท่าไรและนำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณหา n (G) เพื่อใช้ในการทดสอบความล้าด้วยเครื่องทดสอบชนิด Rotary Bending Machine Type UBM 200

3.3.4 ทำการทดสอบความล้าของวัสดุทั้งหมด 3 กระบวนการได้แก่การทดสอบวัสดุในสภาพจำหน่าย การทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์และการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟตามลำดับ

3.3.5 สร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบแตกหักและความเค้น (S-N Diagram) แสดงความสัมพันธ์โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (The Method of Least Squares) โดยใช้ความสัมพันธ์แบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential) ระหว่างค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบเกิดการแตกหัก (Cycle) และระดับค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) แปรเปลี่ยนที่วัสดุเกิดความล้าเพื่อหาขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) ของวัสดุ

3.3.6 นำค่าขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) เนื่องจากความล้าที่ได้ของแต่ละกระบวนการทดลองมาเปรียบเทียบวิเคราะห์ความเหมาะสมและสรุปผล

3.3.7 อธิบายอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนต่อสมบัติความล้าตัวของวัสดุ

บทที่ 4

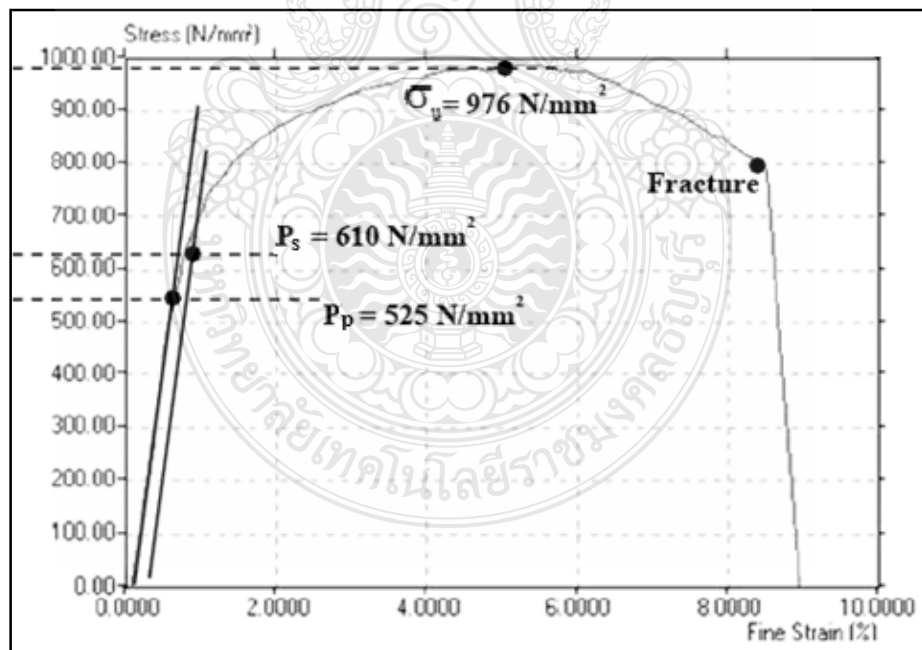
ผลการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาค ศึกษาสมบัติทางกลและหาขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) จากการศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุสามารถแบ่งผลการทดลองได้ดังนี้

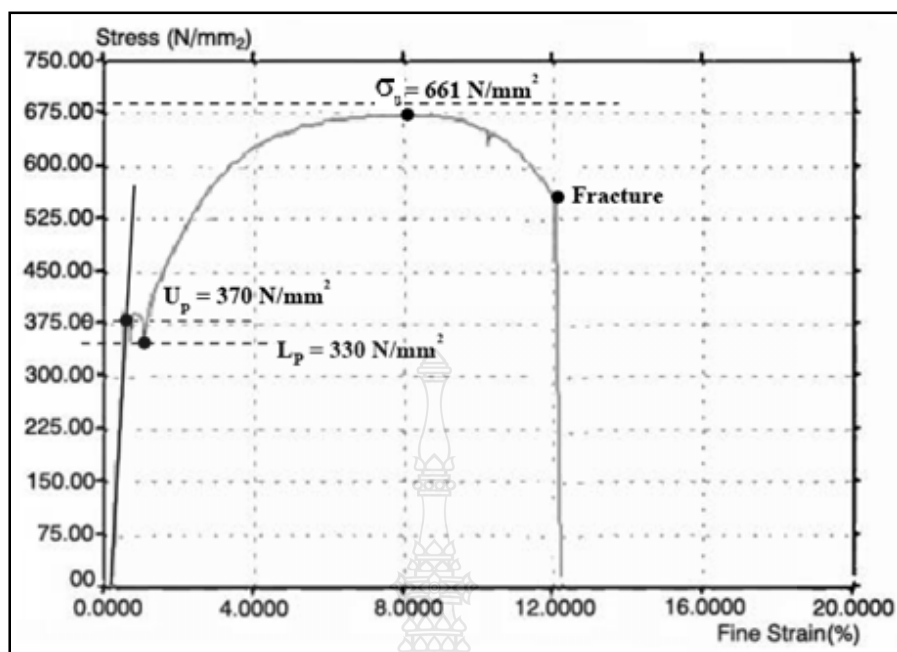
4.1 ผลการทดสอบการปรับปรุงสมบัติทางกล

4.1.1 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

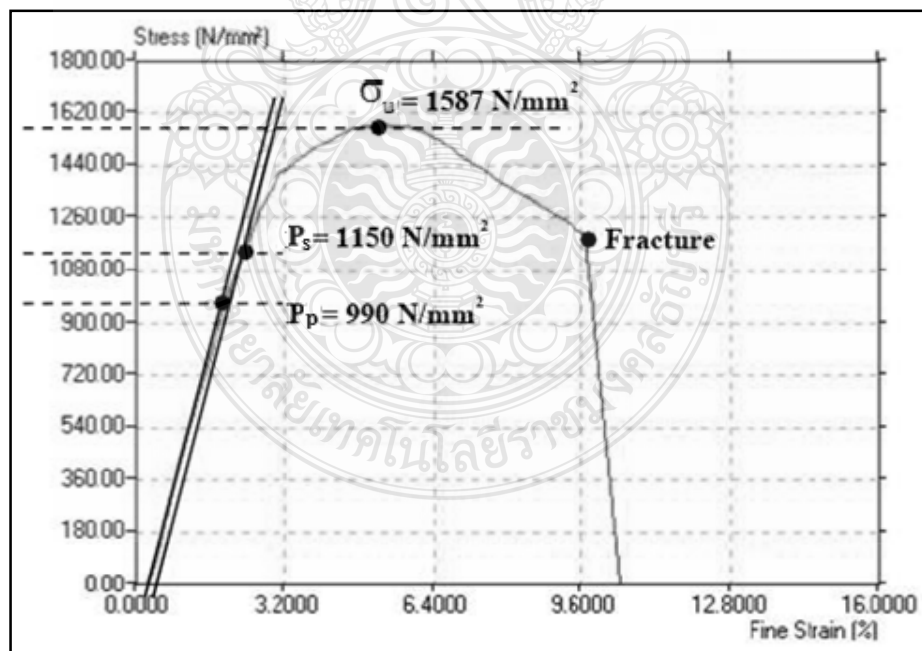
ทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8M เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบแตกหักกับค่าความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นกับขึ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการเพื่อใช้สร้างแผนภาพ S-N Diagram โดยอาศัยการทดสอบแรงดึงที่ได้จากข้อมูลจากภาคผนวก ก และสามารถสรุปเป็นกราฟแรงดึงเฉลี่ยดังแสดงในภาพที่ 4.1 - 4.3



ภาพที่ 4.1 ค่าทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของวัสดุในสภาพจำหน่าย



ภาพที่ 4.2 ค่าทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 4.3 ค่าทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ

จากภาพที่ 4.1 – 4.3 สามารถสรุปกราฟการทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของวัสดุในสภาพจำหน่าย และวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนเพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) ค่าความเค้นที่จุดครากและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%) ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

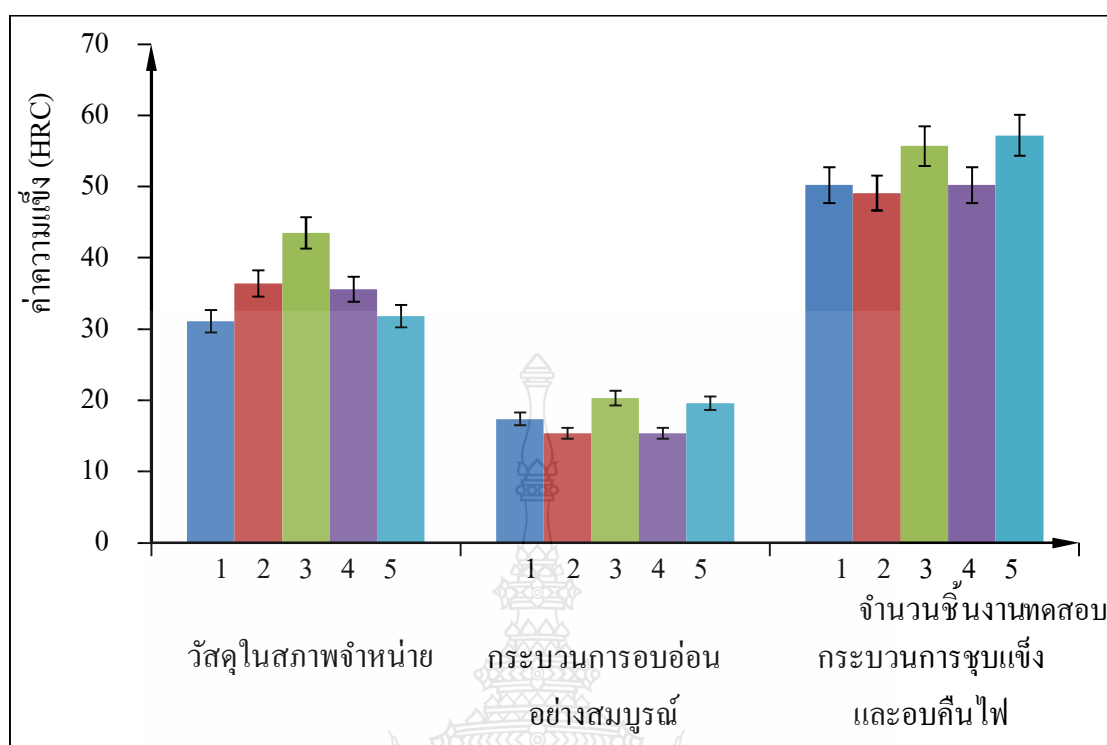
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการทดสอบแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการ

ประเภทการทดสอบ	ค่าความต้านทานแรงดึง, σ_u (N/mm ²)	ความเค้นจุดคราก (N/mm ²)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)
วัสดุในสภาพจำหน่าย	976	610	8
กระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์	661	370	12
กระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ	1587	1150	10

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุ AISI 4140 พบว่าวัสดุในสภาพจำหน่ายจากภาพที่ 4.1 มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 976 N/mm² เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์จากภาพที่ 4.2 วัสดุที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์จะมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยน้อยกว่าซึ่งมีค่าเท่ากับ 661 N/mm² และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟจากภาพที่ 4.3 ให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงขึ้นไปคือ 1587 N/mm² ซึ่งสมบัติทางกลดังกล่าวที่ได้ช่วยให้เราสามารถตัดสินใจเลือกใช้กระบวนการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนได้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

4.1.2 การทดสอบวัดค่าความแข็ง

นำชิ้นทดสอบทั้ง 3 กระบวนการคือ วัสดุในสภาพจำหน่ายและวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนตัดให้ได้ความยาว 20 มิลลิเมตร ทำการทดลอง 5 ชิ้นต่อ 1 กระบวนการทดลอง ทำการขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษทรายแล้วทำการทดสอบวัดค่าความแข็ง (HRC) จากเครื่องทดสอบความแข็ง Rockwell Hardness Tests (ESEWAY-675 ESETOUCH) โดย 1 ชิ้นทดสอบจะสุ่มกด 3 ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 3.9 ทำการทดสอบโดยใช้หัวทดสอบแบบกรวยเพชรใช้น้ำหนักแรงกด 150 กิโลกรัม (Major Load) จากนั้นนำผลการทดสอบเฉลี่ยในแต่ละตัวอย่างมานำเสนอด้วยกราฟแท่งเปรียบเทียบผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.4 และสรุปเป็นตารางที่ 4.2 เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมและสามารถเข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.4 ค่าความแข็งของวัสดุในสภาพจำหน่ายและวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าความแข็งจากการทดสอบของวัสดุทั้ง 3 กระบวนการ

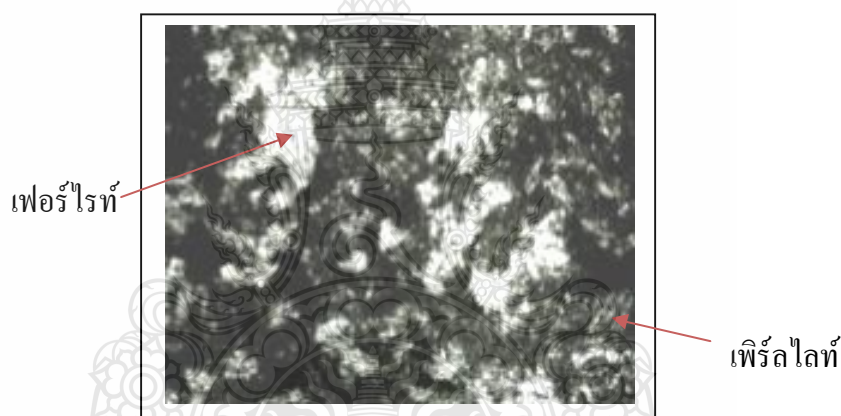
กระบวนการทดลอง	จำนวนครั้ง	ค่าความแข็ง (HRC)					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5		
วัสดุในสภาพจำหน่าย		31.10	36.40	43.50	35.60	31.80	35.68
กระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์		17.40	15.40	20.30	15.40	19.60	17.62
กระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ		50.20	49.10	55.70	50.20	57.20	52.48

จากตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ AISI 4140 โดยวัสดุในสภาพจำหน่ายมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 35.68 HRC เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์และกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟพบว่าวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์มีค่าความแข็งน้อยกว่าเดิมโดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 17.62 HRC คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ลดลง 49.38% เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุในสภาพจำหน่ายส่วน

วัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟจะมีค่าเพิ่มขึ้นคือมีค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุดถึง 52.48 HRC คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์มีค่าเพิ่มขึ้น 47.08% เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุในสภาพจำหน่าย

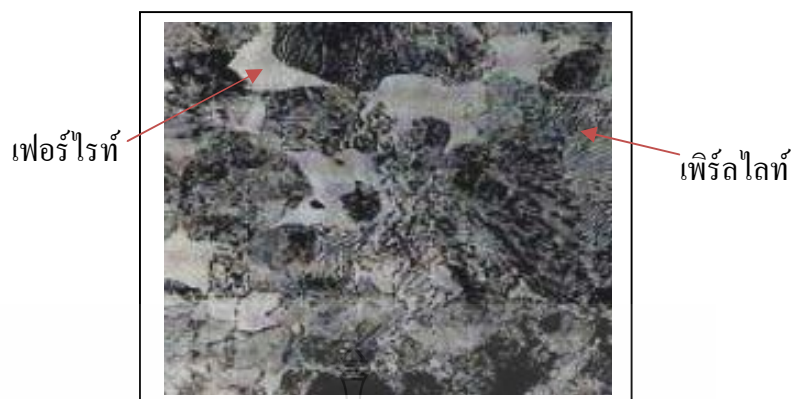
4.1.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมต่ำตามมาตรฐาน AISI 4140 พบว่าวัสดุในสภาพจำหน่ายมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรท์กับเพิร์ลไลท์ซึ่งโครงสร้างเพิร์ลไลท์ที่ได้มีปริมาณที่มากกว่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ขนาดเกรนของโครงสร้างเฟอร์ไรท์มีลักษณะพื้นเป็นสีขาวกระจายอยู่ทั่วทั้งโครงสร้างส่วนโครงสร้างเพิร์ลไลท์จะเห็นเป็นพื้นสีดำซึ่งประกอบด้วยผลึกของเฟอร์ไรท์กับซีเมนต์ไต์สลับเรียงกันและมีพื้นที่มากกว่าจึงทำให้โครงสร้างของเหล็กในสภาพจำหน่ายมีความแข็งซึ่งมีค่าเท่ากับ 35.68 HRC จากตารางที่ 4.2



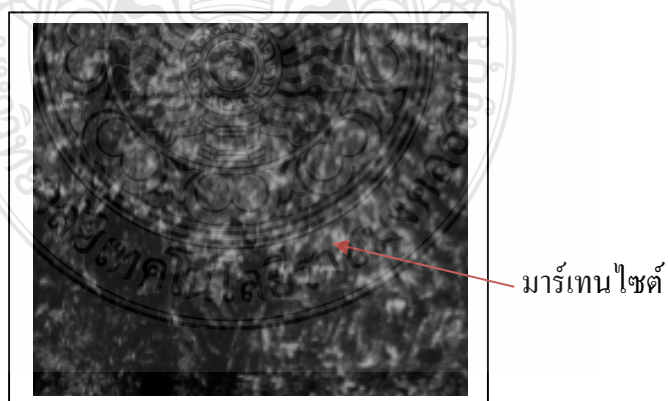
ภาพที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุในสภาพจำหน่าย

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (โดยเผาในเตาอบที่อุณหภูมิ 850°C แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตาอบอย่างช้าๆ) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของวัสดุยังคงเป็นโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรท์และเพิร์ลไลท์เหมือนเดิมแต่ปริมาณของโครงสร้างทั้งสองประเภทนั้นเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัดเจน กล่าวคือโครงสร้างเฟอร์ไรท์จะมีขนาดเกรนที่โตขึ้นและมีปริมาณเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณเพิร์ลไลท์มีปริมาณลดลงและมีขนาดเกรนหยาบแทรกในพื้นที่จำกัดเฉพาะส่วนดังแสดงในภาพที่ 4.6 ทำให้เหล็กที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์มีสมบัติอ่อนและเหนียวเมื่อดูจากเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ 12% จากตารางที่ 4.1 และค่าความแข็งเฉลี่ย 17.62 HRC จากตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์

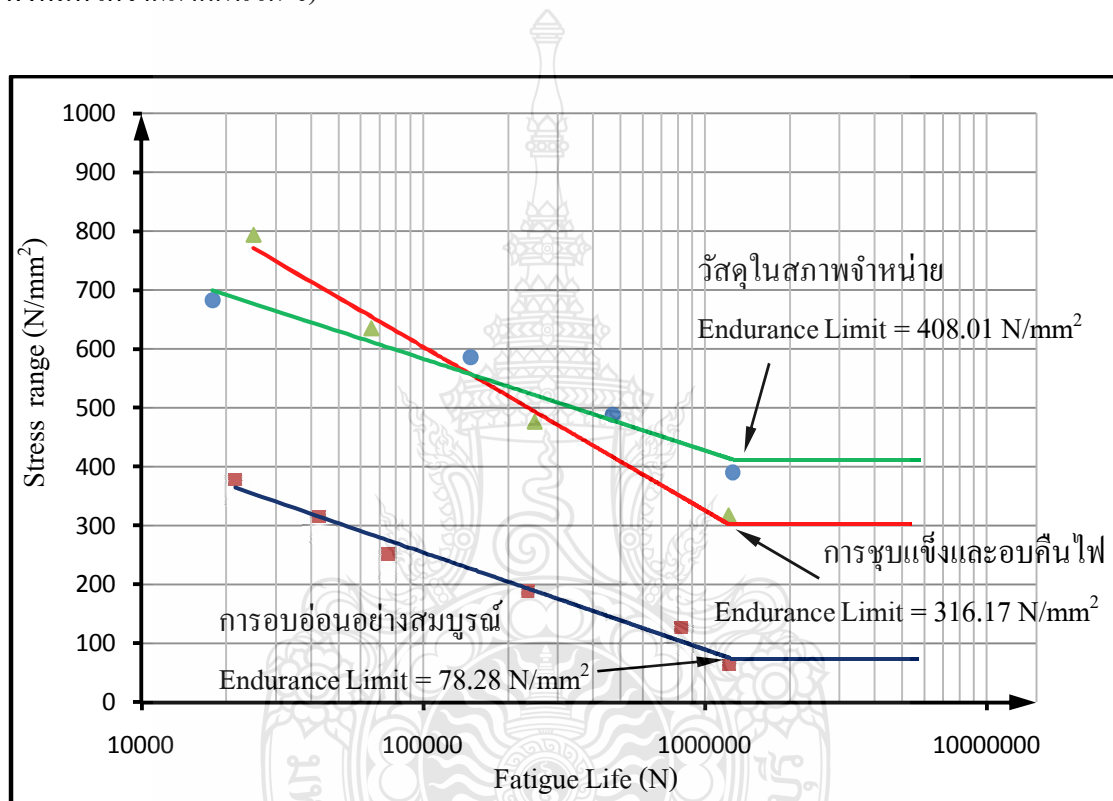
ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งที่ผ่านการเผาอบในเตาที่อุณหภูมิ 850°C แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการจุ่มในน้ำมันและอบคืนไฟที่อุณหภูมิ 350°C พบว่าโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเปลี่ยนไปจากเดิมที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรท์กับเพิร์ลไลท์ไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซด์ (ภาพที่ 4.7) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งถึง 52.48 HRC (ตารางที่ 4.2) และสามารถรับแรงดึงได้สูงถึง 1587 N/mm² (ตารางที่ 4.1) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุในสภาพจำหน่าย และวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ

4.2 ผลการทดสอบความล้า

ผลการทดสอบความล้าของวัสดุด้วยวิธีหมุนตัดและนำผลการทดสอบมาสร้างเป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นใช้งานและจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบแตกหัก (S-N Diagram) ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.8 โดยกำหนดให้แกน Y แทนด้วยค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (N/mm^2) และกำหนดให้แกน X คือ สเกล $\log X$ เขียนแทนด้วยจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบแตกหัก (N) (ดูข้อมูลทั้งหมดได้จากภาคผนวก ข)



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบแตกหักและความเค้น (S-N Diagram)

จากแผนภาพ S-N Diagram (ภาพที่ 4.8) ซึ่งแสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบแตกหักและความเค้นเฉลี่ยพบว่าวัสดุในสภาพจำหน่ายมีขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ (Endurance Limit) มากที่สุดคือ $408.01 N/mm^2$ ซึ่งมากกว่าวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟที่มีขีดจำกัดความทนทานของวัสดุเท่ากับ $316.17 N/mm^2$ เป็นผลมาจากวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งมากทำให้วัสดุมีความ

แข็งมากและเปราะเมื่อทำการทดสอบความล้าทำให้เกิดความเสียหายได้เร็วกว่าวัสดุในสภาพจำหน่าย ส่วนวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยอบอ่อนอย่างสมบูรณ์มีขีดจำกัดความทนทานน้อยที่สุดคือ 78.28 N/mm^2 ซึ่งมีสาเหตุมาจากวัสดุมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งต่ำเมื่อทดสอบความล้าทำให้วัสดุไม่สามารถรับแรงกระทำแบบซ้ำๆ ได้ดีทำให้เกิดความเสียหายได้ง่าย

4.3 การเปรียบเทียบขีดจำกัดความทนทานกับการประมาณค่าจากสมการ

ผลการเปรียบเทียบขีดจำกัดความทนทานที่ได้จากทดสอบทั้งสามกระบวนการกับการใช้การประมาณค่าขีดจำกัดความทนทานด้วยสมการที่ $S'_e = 0.504 \sigma_u$ จะมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบขีดจำกัดความทนทานจากการทดสอบและจากการประมาณค่าจากสมการ

กระบวนการทดสอบ ขีดจำกัดความทนทาน	วัสดุในสภาพ จำหน่าย	กระบวนการอบอ่อน อย่างสมบูรณ์	กระบวนการชุบแข็ง และอบคืนไฟ
ค่าความต้านทานแรงดึง, σ_u (N/mm^2)	976	661	1587
การประมาณค่าจากสมการ $S'_e = 0.504 \sigma_u$ (N/mm^2)	491.90	333.14	799.85
ขีดจำกัดความทนทาน จากการทดสอบ (N/mm^2)	408.01	78.28	316.17
เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน จากขีดจำกัดความทนทาน (%)	17.05	76.54	60.47

จากตารางที่ 4.3 พบว่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุทั้งสามกระบวนการที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าขีดจำกัดความทนทานที่คำนวณด้วยสมการ $S'_e = 0.504 \sigma_u$ ซึ่งวัสดุในสภาพจำหน่ายมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 17.05% แต่วัสดุที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงอย่างมีนัยสำคัญ การปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) และกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ

(Hardening and Tempering) มีขีดจำกัดความทนทานที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าจากการประมาณค่า ด้วยสมการและมีความคลาดเคลื่อนมากถึง 76.54% และ 60.47% ตามลำดับ

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองการศึกษานิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำ ด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดการล้าตัวของวัสดุ สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

จากผลการศึกษานิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อ ขีดจำกัดความทนทานของวัสดุพบว่าวัสดุตามมาตรฐาน AISI 4140 เมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุง สมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟหรืออบอ่อนอย่าง สมบูรณ์วัสดุจะมีสมบัติทางกลเปลี่ยนไป เช่น ผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงค่า ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุนั้นเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในตารางที่ 4.1 อัน เนื่องมาจากอิทธิพลของการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนในทำนองเดียวกันจาก ผลการทดสอบความแข็งพบว่ากระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนทั้ง สองแบบมีอิทธิพลต่อขนาดความแข็งของชิ้นงานอย่างมากดังแสดงในตารางที่ 4.2 และผลการ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคยังพบว่ากระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของวัสดุ

จากการทดสอบความล้าเพื่อหาขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ AISI 4140 พบว่าวัสดุใน สภาพจำหน่ายมีขีดจำกัดความทนทานมากที่สุดคือ 408.01 N/mm^2 เป็นผลมาจากวัสดุมีโครงสร้าง แบบเฟอร์ไรท์กับเพิร์ลไลท์ โดยโครงสร้างเฟอร์ไรท์มีพื้นที่เป็นสีขาวกระจายอยู่โดยรอบ ส่วน โครงสร้างเพิร์ลไลท์มีการเรียงตัวกันหนาแน่นและมีมากกว่าเฟอร์ไรท์จึงทำให้เหล็กมีความแข็งซึ่ง เห็นได้จากการทดสอบความแข็งที่มีค่าเฉลี่ย 35.68 HRC และการทดสอบแรงดึงที่ได้ค่าความต้านทาน แรงดึง 976 N/mm^2 ทำให้ชิ้นทดสอบสามารถรับแรงกระทำแบบซ้ำๆ ได้ดีในการทดสอบความล้า

วัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบ คืนไฟ (Hardening and Tempering) ถึงแม้จะมีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งมากที่สุดคือ 1587 N/mm^2 และ 52.4 HRC ก็ตามแต่เมื่อทำการทดสอบความล้ากลับพบว่ามีค่าขีดจำกัดความ ทนทานน้อยกว่าวัสดุในสภาพจำหน่าย คือ 316.17 N/mm^2 เป็นผลมาจากชิ้นทดสอบมีโครงสร้างแบบ มาร์เทนไซต์ซึ่งมีความแข็งมากผลที่ตามมาคือทำให้ชิ้นทดสอบมีความเปราะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรง กระทำแบบซ้ำๆ จึงทำให้ชิ้นทดสอบเกิดความเสียหายเร็วขึ้น

วัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่าง สมบูรณ์มีค่าขีดจำกัดความทนทานต่ำที่สุดเท่ากับ 78.28 N/mm^2 เป็นผลมาจากวัสดุมีโครงสร้างแบบ เฟอร์ไรท์กับเฟอไรต์ไลท์ ซึ่งโครงสร้างเฟอร์ไรท์มีขนาดเกรนโตและมีปริมาณเพิ่มขึ้นส่วน โครงสร้าง ของเฟอไรต์ไลท์เกิดเกรนหยาบเรียงกันอย่างเป็นระเบียบและมีน้อยกว่าโครงสร้างเฟอร์ไรท์ส่งผลให้ เหล็กมีความอ่อนตัวและมีความเหนียวเพิ่มขึ้นความแข็งที่ได้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.62 HRC และมีค่าความ ต้านทานแรงดึง 661 N/mm^2 ทำให้ชิ้นทดสอบมีสมบัติด้านความเหนียวและอ่อนจึงทำให้ไม่สามารถ รับแรงกระทำแบบซ้ำๆ ได้ส่งผลทำให้วัสดุมีอายุการใช้งานที่สั้นลง

ผลการเปรียบเทียบค่าขีดจำกัดความทนทานที่ได้จากการทดสอบและผลการที่ได้จากการ ประมาณค่าด้วยสมการ $S'_e = 0.504 \sigma_u$ มีความคลาดเคลื่อนสูงมาก และการใช้สมการประมาณค่า ขีดจำกัดความทนทานของวัสดุควรจำกัดอยู่เฉพาะกับวัสดุในสภาพจำหน่าย ส่วนวัสดุที่ผ่าน กระบวนการทางความร้อน เช่นกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟและกระบวนการอบอ่อนอย่าง สมบูรณ์ควรใช้วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดจำกัดความทนทานเท่านั้น



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาอิทธิพลการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนต่อขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ ซึ่งได้แบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ การทดสอบวัสดุในสภาพจำหน่าย การทดสอบวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ และการทดสอบวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ โดยทำการทดสอบแรงดึง วัดค่าความแข็ง ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทำการทดสอบความล้าเพื่อหาขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย และอภิปรายผล

จากการทดสอบวัสดุ AISI 4140 ทั้ง 3 กระบวนการเพื่อหาอิทธิพลของการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนปรากฏว่าวัสดุในสภาพจำหน่ายมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 976 N/mm^2 และมีความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 35.68 HRC โดยมีโครงสร้างจุลภาคแบบเฟอร์ไรท์กับเพิร์ลไลท์ เมื่อทดสอบความล้าพบว่ามีขีดจำกัดความทนทาน (Endurance Limit) มากที่สุดคือ 408.01 N/mm^2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการประมาณขีดจำกัดความทนทานด้วยสมการ $S'_e = 0.504 \sigma_u$ คือ 491.90 N/mm^2 หรือมีค่าความคาดเคลื่อนประมาณ 17.05% ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ส่วนวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering) เมื่อทำการทดสอบความล้าพบว่ามีขีดจำกัดความทนทานเท่ากับ 316.17 N/mm^2 ซึ่งต่ำกว่าค่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุในสภาพจำหน่ายทั้งๆ ที่ค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งและอบคืนไฟมีค่าสูงถึง 52.48 HRC และ 1587 N/mm^2 ตามลำดับและมีโครงสร้างจุลภาคแบบมาร์เทนไซต์จากการเปรียบเทียบขีดจำกัดความทนทานกับการประมาณค่าจากสมการจากตารางที่ 4.3 พบว่าขีดจำกัดความทนทานที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้โดยมีความคาดเคลื่อนถึง 60.47%

ผลการทดสอบวัสดุที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing) มีขีดจำกัดความทนทานเท่ากับ 78.28 N/mm^2 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุที่ใช้ในการทดสอบอีกสองประเภทโดยมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย

และค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 661 N/mm^2 และ 17.62 HRC ตามลำดับ และมีโครงสร้างจุลภาคแบบเฟอร์ไรท์กับเพิร์ลไลท์ เมื่อเปรียบเทียบขีดจำกัดความทนทานกับการประมาณค่าจากสมการจากตารางที่ 4.3 พบว่ามีค่าความคาดเคลื่อนมากถึง 76.54%

จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140 ด้วยความร้อนใช้ทำเพลาช้อเหวี่ยง เฟือง เพลาเครื่องจักร เป็นส่วนใหญ่ซึ่งผ่านกรรมวิธีการอบปกติ (Normalizing) ก่อนนำมาจำหน่าย จึงทำให้อายุการใช้งานสูงกว่ากระบวนการอบชุบแบบอื่นๆ นอกจากนี้ผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุโดยทั่วไปแล้วยังมีผลต่อสมบัติการล้าตัวของวัสดุเป็นอย่างมาก ดังนั้นการประมาณค่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุด้วยสมการ $S'_e = 0.504 \sigma_u$ ไม่สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อนได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองครั้งนี้ผู้ทำวิจัยมีข้อคิดเห็นและเสนอแนะเพื่อเป็นประโยชน์หรือเป็นแนวทางดังต่อไปนี้

- 5.2.1 ควรมีการทดสอบความล้ากับเหล็กกล้าผสมเกรดชนิดอื่นๆ
- 5.2.2 เพิ่มตัวแปรในการทดลองของการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนแบบอื่นๆ
- 5.2.3 ควรมีการศึกษการแตกหักของวัสดุที่เกิดจากความล้า

รายการอ้างอิง

- [1] The Thai Automotive Industry Association, **อุตสาหกรรมยานยนต์ไทย TAIA** (Online), 2553.
Available: <http://www.taia.or.th/thai/statisticdetail.aspx?id=2> (5 May 2013)
- [2] Machinery Steel 4140, **บริษัทไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด** (Online), Available:
<http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/4140.pdf> (8 January 2012)
- [3] ชลิตต์ มธุรสมนตรี และคณะ, **กระบวนการผลิต**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, 2543.
- [4] เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์ และจรงค์ศักดิ์ ศิริมัย, **โลหะวิทยาในงานอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: สกายบุ๊กส์, 2538. หน้า 73.
- [5] ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี, **การออกแบบเครื่องกลและชิ้นส่วนเครื่องจักร1**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2547. หน้า 176.
- [6] สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์, **โลหะวิทยาเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2553. หน้า 133 – 147.
- [7] Asi, Osman and others, (Abstract of “The effect of high temperature gas carburizing on bending fatigue strength of SAE 8620 steel,” **Materials and Design** (Electronic), Vol.30, 2009. pp. 1792-1797), Available: ScienceDirect (4 March 2012).
- [8] Farfan, S. and others, (Abstract of “High cycle fatigue low cycle fatigue and failure modes of a carburized steel,” **International Journal of Fatigue** (Electronic). Vol.26, 2004. pp. 673–678), Available: ScienceDirect (19 March 2012).
- [9] Celik, A. and Karadenizb, S., (Abstract of “Improvement of the fatigue strength of AISI 4140 steel by an ionitriding process,” **Surface and Coatings Technology** (Electronic). Vol.72, 1995. pp. 169-173), Available: ScienceDirect (19 March 2012).
- [10] Bayrak, Mustafa and others, (Abstract of “Analysis of Tempering Treatment on Material Properties of DIN 41Cr4 and DIN 42CrMo4 Steels,” **Materials Engineering and Performance** (Electronic). Vol.16, No.5, 2007. pp. 597-600), Available: ASM International (5 April 2012).

- [11] Sirin, Sule Yildiz. Sirin, Kahraman and Kaluc, Erdinc., (Abstract of “Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel,” **Materials Characterization** (Electronic), Vol.59, 2008. pp. 351–358), Available: ScienceDirect (19 March 2012).
- [12] Shigley, Joseph E. Mischke, Charles R. and Budynas, Richard G., **การออกแบบเครื่องจักรกล**. แปลโดย ภาณุฤทธิ์ ยุกตะทัต. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ที่อป, 2547. หน้า 305- 313.
- [13] มนัส สติรจินดา, **เหล็กกล้า**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2539. หน้า 28 – 29.
- [14] อนันต์ วงศ์กระจ่าง. **ออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล**. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 2533. หน้า 77 – 79.
- [15] Pollack, Herman W., **Material Science and Metallurgy**. 4thed. New Jersey: A Simom & Schuster Co., 1988.
- [16] ขวลิต เชียงกุล, **โลหะวิทยา**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547. หน้า 144 – 155.
- [17] Bailey, Neil S., Tan, Wenda. and Shin, Yung C., (Abstract of “Predictive modeling and experimental results for residual stresses in laser hardening of AISI 4140 steel by a high power diode lase,” **Surface and Coatings Technology** (Electronic), Vol.203, 2009. pp. 2003–2012), Available: ScienceDirect (5 April 2012).
- [18] มนัส สติรจินดา, **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2540. หน้า 72.
- [19] ASTM, “E8 Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials,” **Annual Book of ASTM Standards**, Vol. 3.01, 2004.
- [20] เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย, **การวิเคราะห์ความเสียหายทางโลหการ**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554. หน้า 294.

ภาคผนวก



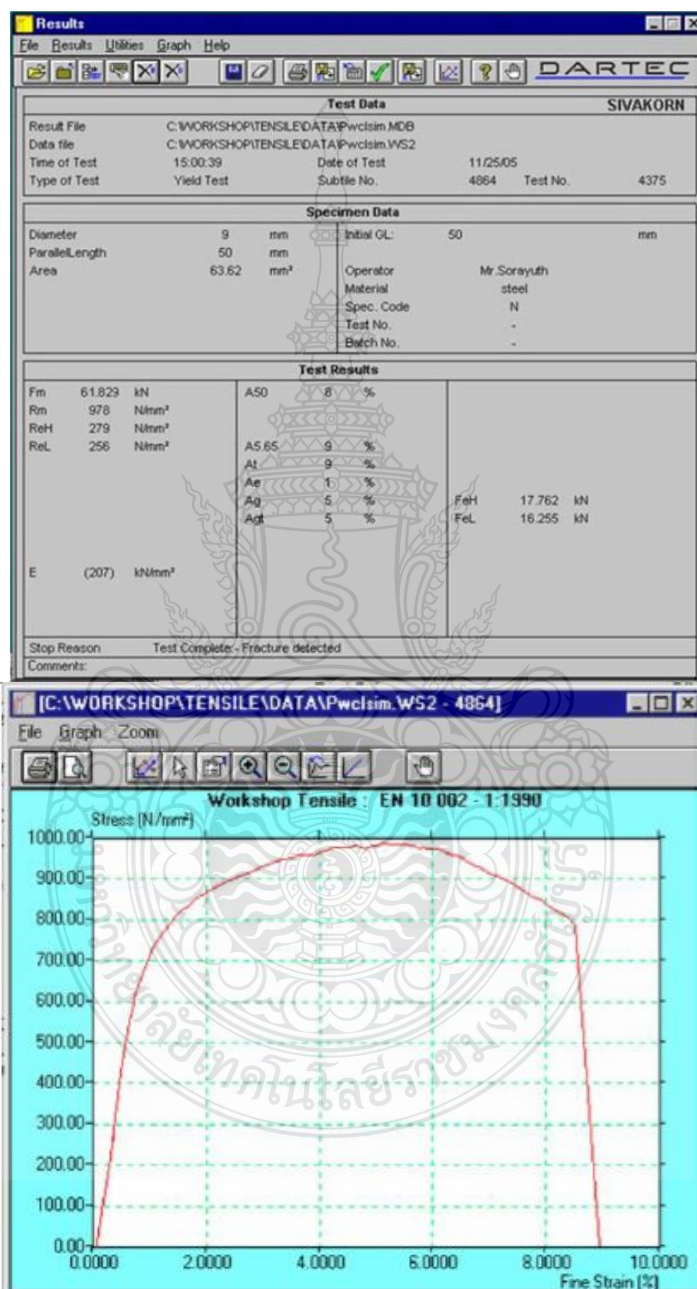


ภาคผนวก ก

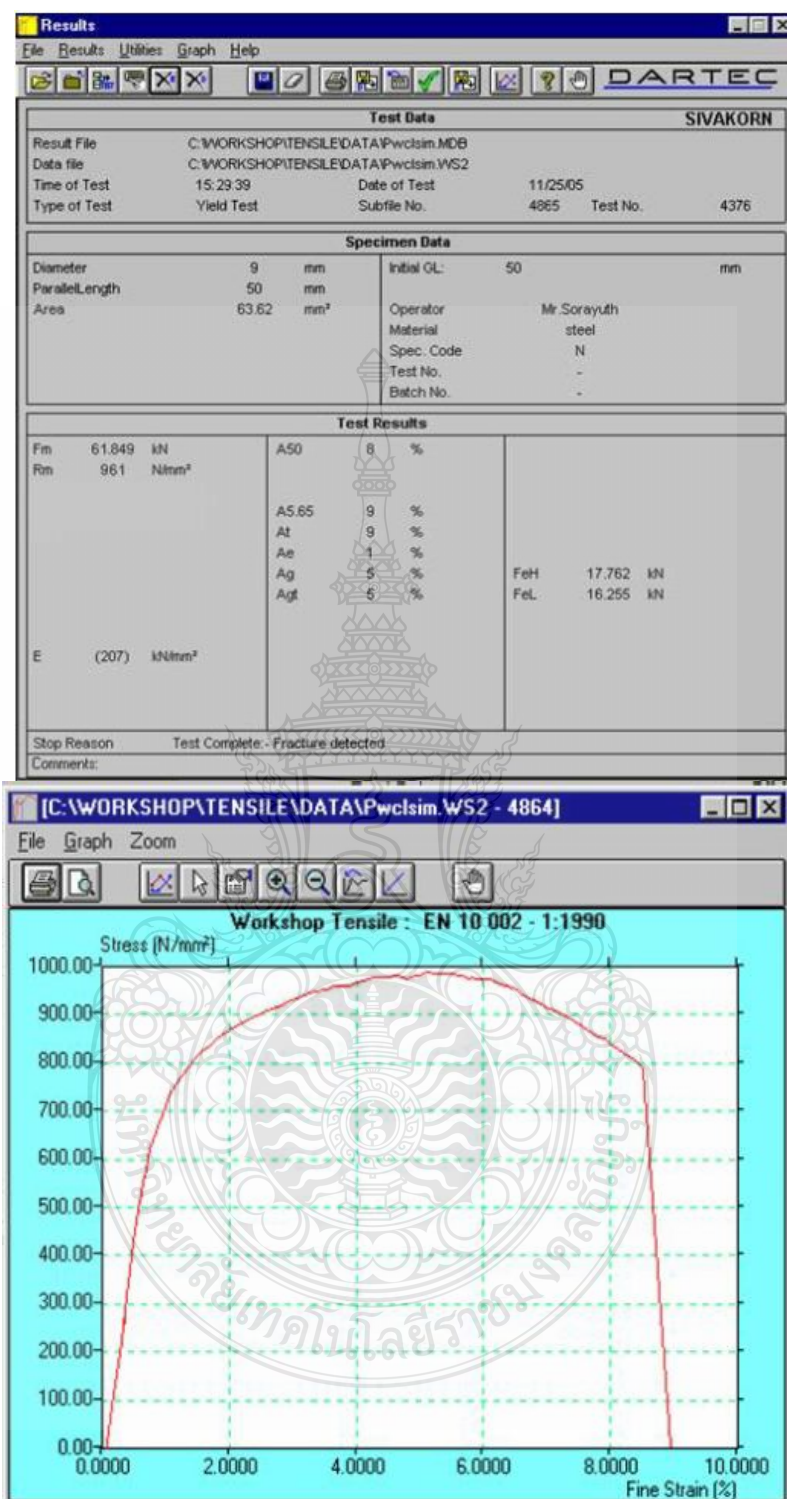
ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140

ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140

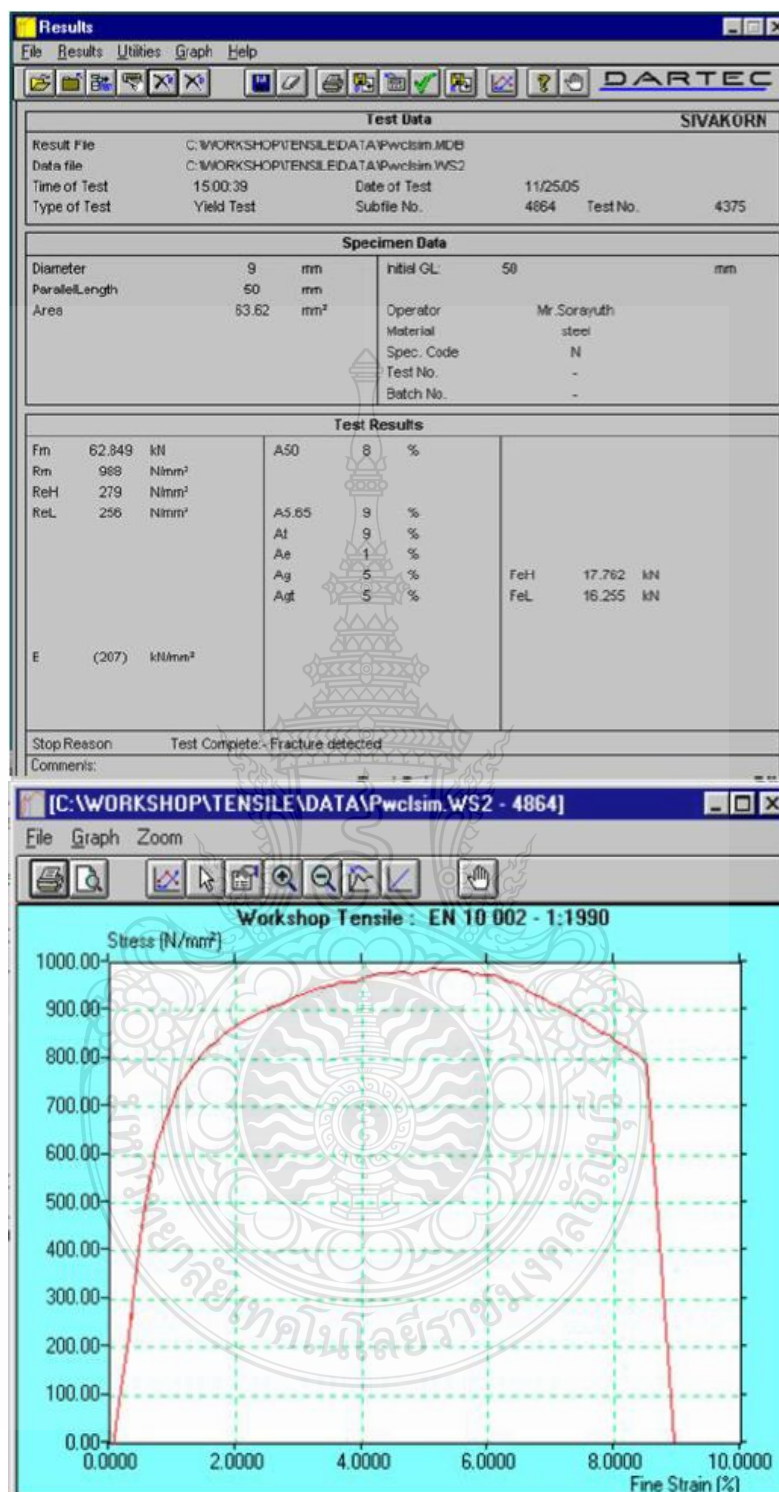
1. ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุในสภาพจำหน่วย



ภาพที่ ก.1 การทดสอบแรงดึงของวัสดุในสภาพจำหน่วย ชั้นที่ 1



ภาพที่ ก.2 การทดสอบแรงดึงของวัสดุในสภาพจำหน่าย ชั้นที่ 2



ภาพที่ ก.3 การทดสอบแรงดึงของวัสดุในสภาพจำนำย ชั้นที่ 3

จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุในสภาพจำหน่ายจำนวน 3 ชิ้นสามารถหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\text{ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย}(\sigma_u) = \frac{\text{ผลรวมค่าความต้านทานแรงดึง}}{\text{ผลรวมของจำนวนทดสอบแรงดึง}}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย}(\sigma_u) &= \frac{978 + 961 + 988}{3} \\ &= 976 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

นำค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (Tensile Strength) ที่คำนวณได้มาคำนวณหาน้ำหนักเพื่อใช้ในการทดสอบความล้าซึ่งจะทำการลดตมน้ำหนักของการทดสอบความล้าลดลงทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ (%) ของน้ำหนักที่คำนวณได้ จากสมการ

$$G = \frac{\sigma_u \times W}{1000 \times 9.81}$$

เมื่อ G = น้ำหนักที่ใช้กด่วงขึ้นทดสอบ (Kg)

W = โมเมนต์ภาคตัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi d^3/32$ (mm^3)

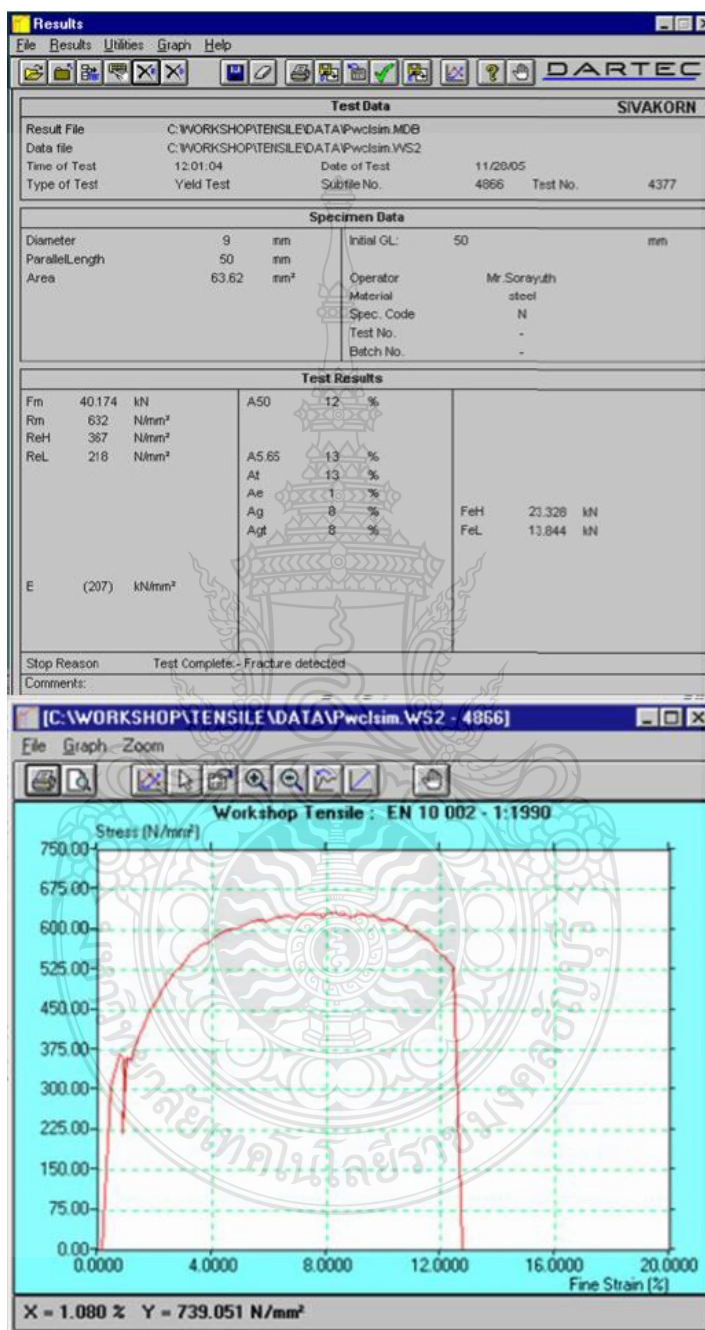
σ_u = ค่าความต้านทานแรงดึง (N/mm^2)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขึ้นทดสอบ (mm)

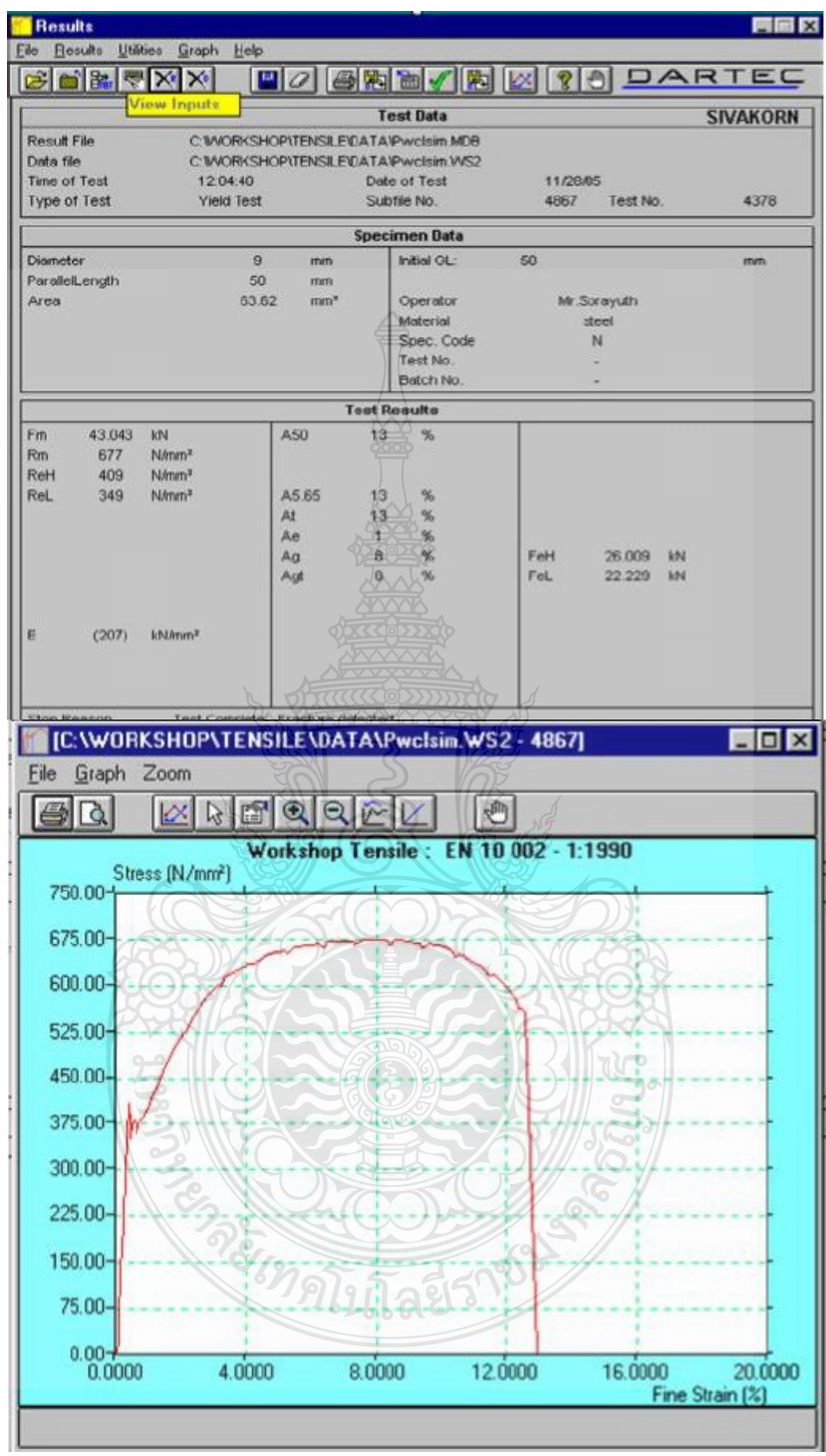
ตารางที่ ก.1 ค่าน้ำหนักที่ใช้สำหรับกด่วงขึ้นทดสอบความล้า

ค่าความเค้นในขึ้นทดสอบ (%)	น้ำหนักที่ใช้กด่วงขึ้นทดสอบ (Kg)
80%	5.69
70%	4.98
60%	4.27
50%	3.55
40%	2.84

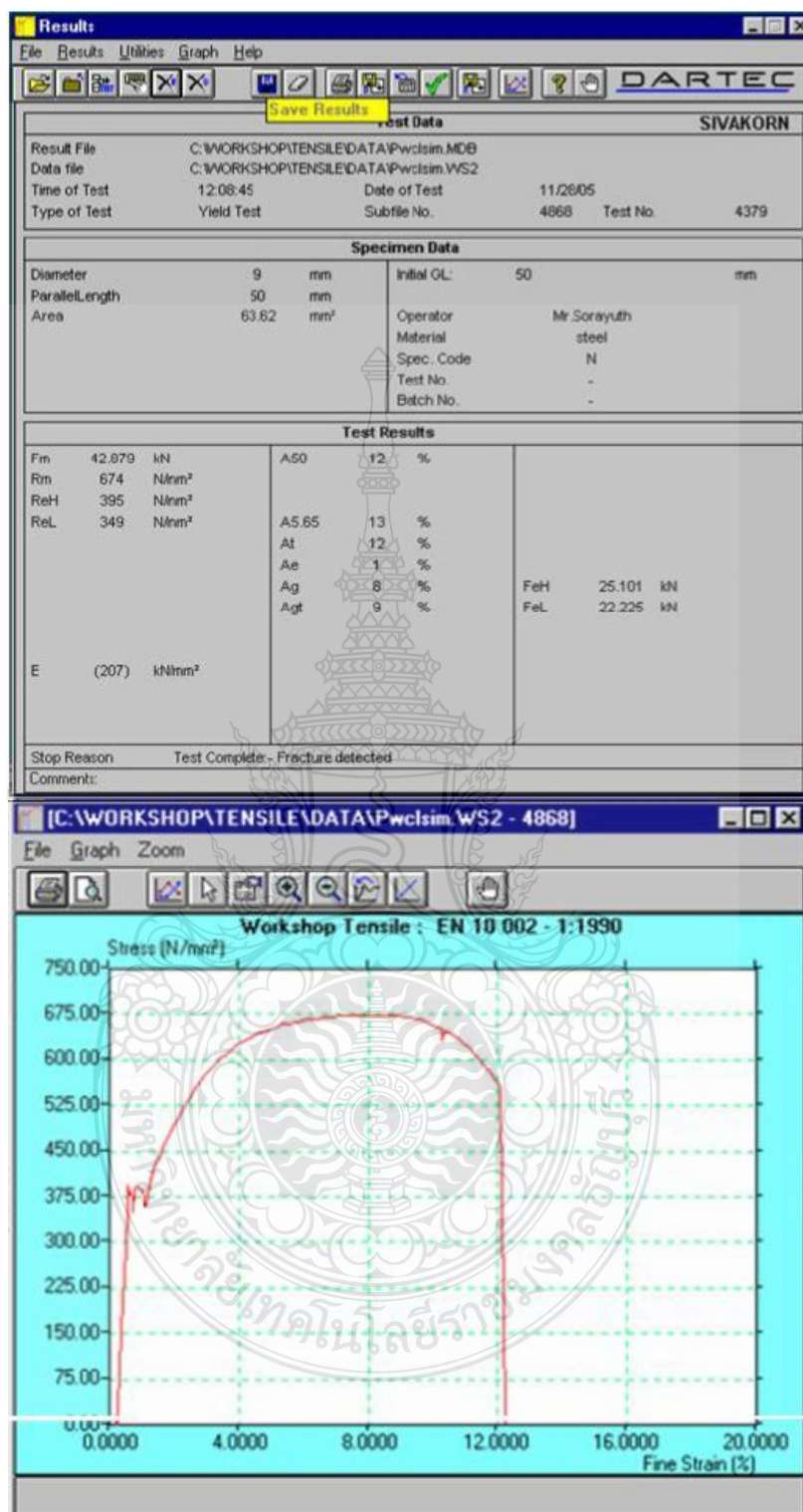
2. ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing)



ภาพที่ ก.4 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ ชิ้นที่ 1



ภาพที่ ก.5 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ ชั้นที่ 2



ภาพที่ ก.6 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ ชั้นที่ 3

จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ จำนวน 3 ชิ้นสามารถหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\text{ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย}(\sigma_u) = \frac{\text{ผลรวมค่าความต้านทานแรงดึง}}{\text{ผลรวมของจำนวนทดสอบแรงดึง}}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย}(\sigma_u) &= \frac{632 + 674 + 677}{3} \\ &= 661 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

นำค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (Tensile Strength) ที่คำนวณได้มาคำนวณหาน้ำหนักเพื่อใช้ในการทดสอบความล้าซึ่งจะทำการลดตมน้ำหนักของการทดสอบความล้าลดลงทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ (%) ของน้ำหนักที่คำนวณได้ จากสมการ

$$G = \frac{\sigma_u \times W}{1000 \times 9.81}$$

เมื่อ G = น้ำหนักที่ใช้กดถ่วงชิ้นทดสอบ (Kg)

W = โมเมนต์ภาคตัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi d^3/32$ (mm^3)

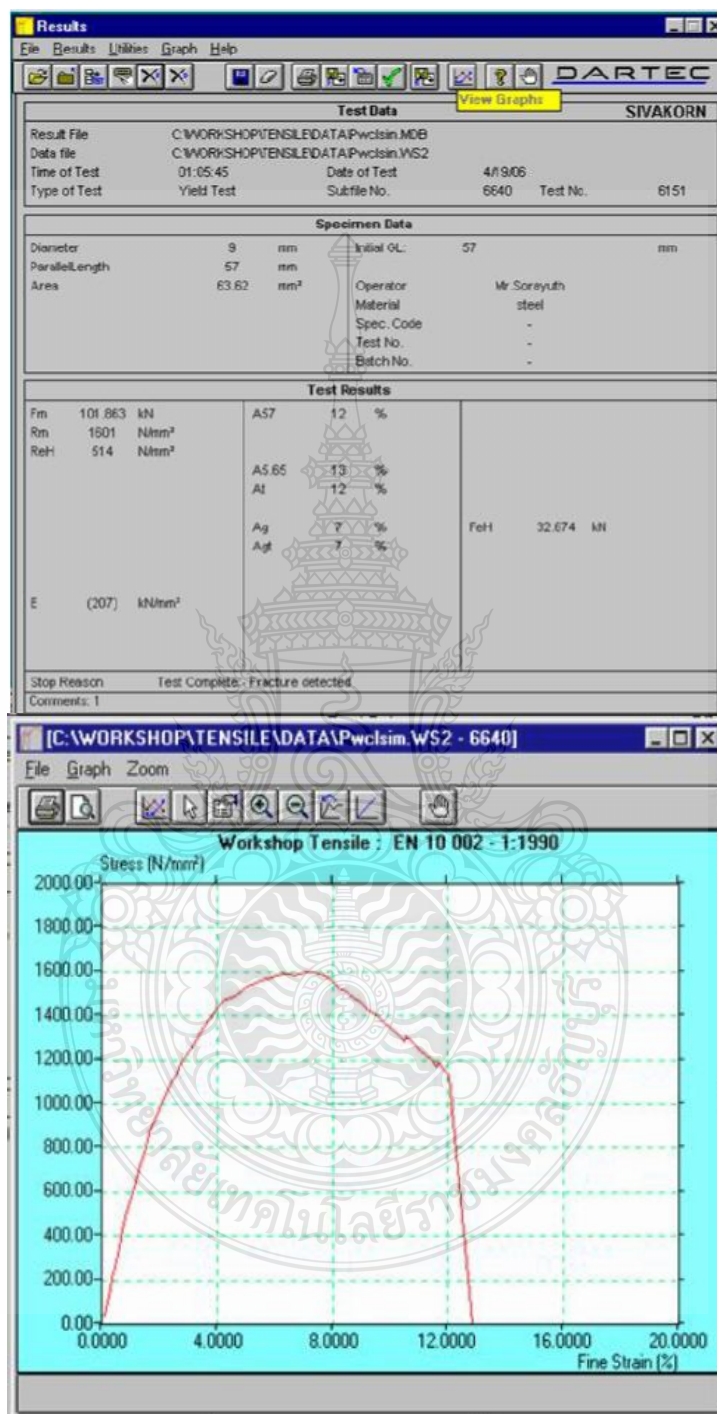
σ_u = ค่าความต้านทานแรงดึง (N/mm^2)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ (mm)

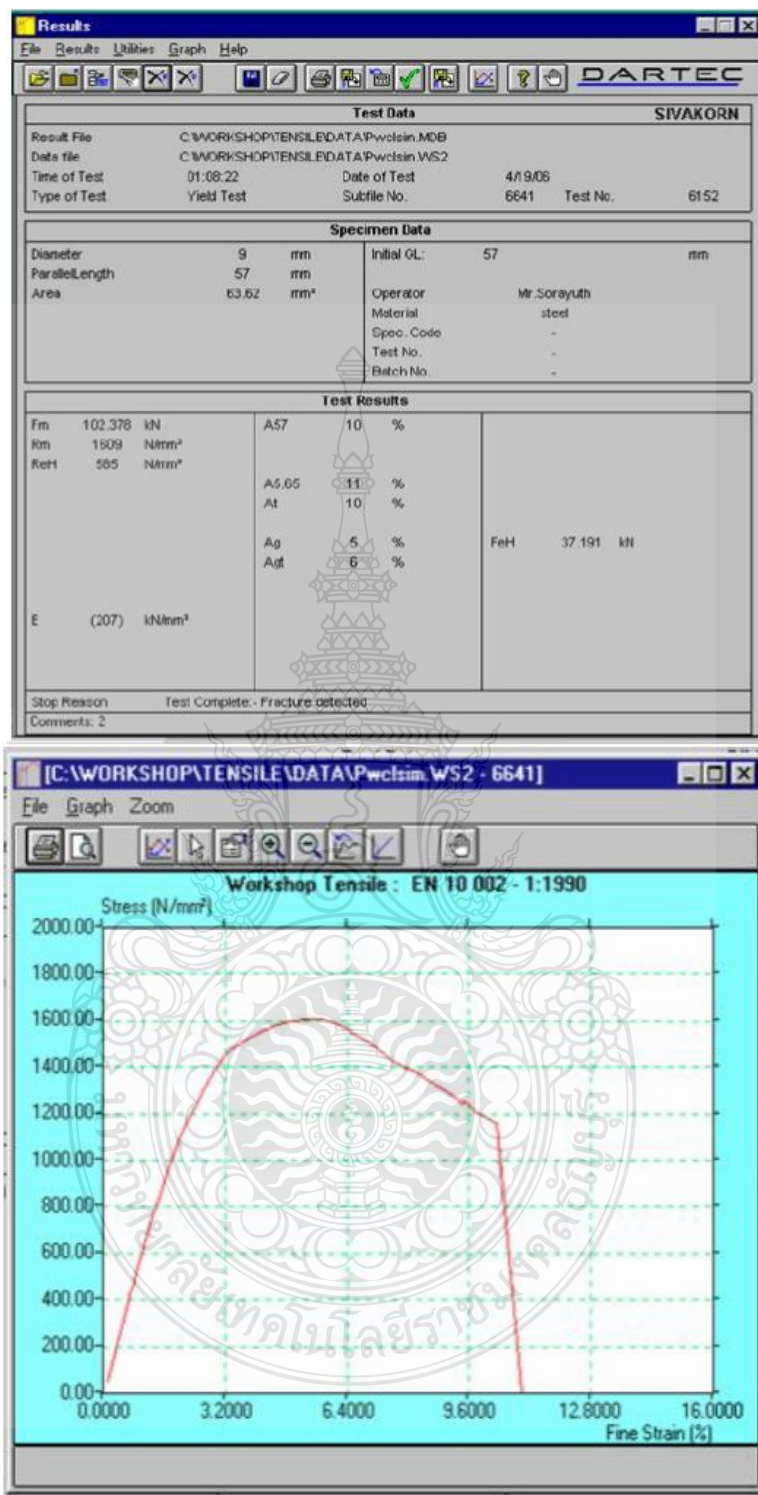
ตารางที่ ก.2 ค่าน้ำหนักที่ใช้สำหรับกดถ่วงชิ้นทดสอบความล้า

ค่าความเค้นในชิ้นทดสอบ (%)	น้ำหนักที่ใช้กดถ่วงชิ้นทดสอบ (Kg)
60%	2.89
50%	2.40
40%	1.92
30%	1.44
20%	0.96
10%	0.48

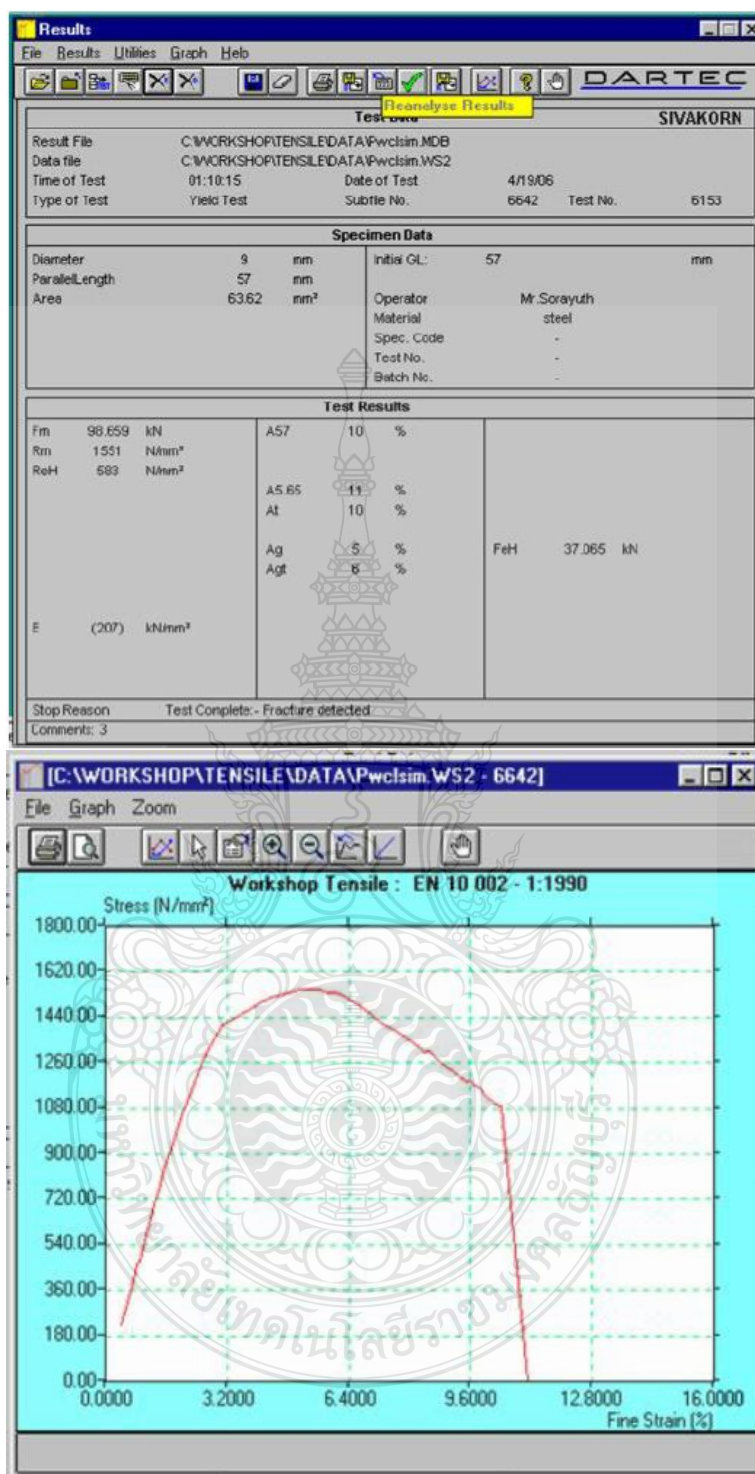
3. ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ (Hardening and Tempering)



ภาพที่ ก.7 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ ชิ้นที่ 1



ภาพที่ ก.8 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ ชั้นที่ 2



ภาพที่ ก.9 การทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ ชั้นที่ 3

จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ จำนวน 3 ชิ้นสามารถหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\text{ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย}(\sigma_u) = \frac{\text{ผลรวมค่าความต้านทานแรงดึง}}{\text{ผลรวมของจำนวนทดสอบแรงดึง}}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย}(\sigma_u) &= \frac{1601 + 1609 + 1551}{3} \\ &= 1587 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

นำค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (Tensile Strength) ที่คำนวณได้มาคำนวณหาน้ำหนักเพื่อใช้ในการทดสอบความล้าซึ่งจะทำการลดค่าน้ำหนักของการทดสอบความล้าลงทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ (%) ของน้ำหนักที่คำนวณได้ จากสมการ

$$G = \frac{\sigma_u \times W}{1000 \times 9.81}$$

เมื่อ G = น้ำหนักที่ใช้กด่วงชิ้นทดสอบ (Kg)

W = โมเมนต์สภาพตัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi d^3/32$ (mm^3)

σ_u = ค่าความต้านทานแรงดึง (N/mm^2)

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ (mm)

ตารางที่ ก.3 ค่าน้ำหนักที่ใช้สำหรับกด่วงชิ้นทดสอบความล้า

ค่าความเค้นในชิ้นทดสอบ (%)	น้ำหนักที่ใช้กด่วงชิ้นทดสอบ (Kg)
50%	5.78
40%	4.63
30%	3.47
20%	2.32
10%	1.58

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบการล้าตัวของเหล็กกล้าผสมต่ำ AISI 4140



ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบวัสดุในสภาพจำหน่าย

วัสดุ : AISI 4140		ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (σ_u) = 976 N/mm ²					
น้ำหนัก (%)	น้ำหนัก (Kg.)	จำนวนรอบที่ชั้นทดสอบขาด(N)					ค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบ
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
80%	5.69	5,880	5,540	6,910	6,350	5,810	6,098
70%	4.98	19,790	13,510	23,510	14,500	17,970	17,856
60%	3.27	117,180	137,430	158,240	171,160	152,250	147,252
50%	3.55	448,940	467,920	510,490	532,890	389,220	469,892
40%	2.84	1,351,230	1,279,230	1,407,920	930,770	1,002,410	1,254,312

ตารางที่ ข.2 ค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) และจำนวนรอบเฉลี่ย (N) ของการทดสอบวัสดุในสภาพจำหน่าย

% ค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u)	X(N)(รอบ)	Y(σ_u)(N/mm ²)
80%	6,098	780.80
70%	17,856	683.20
60%	147,252	585.60
50%	469,892	488.00
40%	1,254,312	390.40

ตารางที่ ข.3 การคำนวณการทดสอบวัสดุในสภาพจำหน่าย

X	Log X	Y	(log X) ²	Y ²	(log X)Y
6,098	3.79	780.80	14.33	609,649.64	2,955.47
17,856	4.25	683.20	18.08	466,762.24	2,904.82
147,252	5.17	585.60	26.71	342,927.36	3,026.42
469,892	5.67	488.00	32.17	238,144.00	2,767.94
1,254,312	6.10	390.40	37.38	152,412.16	2,380.82
รวม	24.98	2,928.00	128.48	1,809,894.40	14,035.46

นำค่าที่ได้จากตาราง ค.3 คำนวณหาค่า a และ b จากสมการ

$$b = \frac{n\sum(\log X) - \sum \log X \sum Y}{n\sum(\log X)^2 - (\sum \log X)^2}$$

$$= \frac{5(14,035.46) - (24.98)(2,928)}{5(128.48) - (24.98)^2}$$

$$= -161.10$$

และ

$$a = \frac{\sum Y}{n} - b \frac{\sum \log X}{n}$$

$$= \frac{2,928}{5} - (-161.10) \frac{24.98}{5}$$

$$= 1,390.46$$

ดังนั้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ $\log X$ ได้จากสมการ

$$Y_c = a + b \log X$$

$$= 1,390.46 + (-161.10) \log X$$

ตารางที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log X$ กับ Y ที่ช่วงระดับต่างๆ ของการทดสอบวัสดุในสภาพ
จำหน่าย

X	Y	$Y_c = 1390.46 + (-161.10) \log X$
6,098	780.80	780.66
17,856	683.20	705.49
147,252	585.60	557.88
469,892	488.00	476.70
1,254,312	390.40	408.01

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดย
กระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์ (Full Annealing)

วัสดุ : AISI 4140		ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (σ_u) = 661N/mm ²					
น้ำหนัก (%)	น้ำหนัก (Kg.)	จำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบขาด (N)					ค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบ
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
60%	2.89	19,760	21,210	17,650	23,760	25,170	21,510
50%	2.40	40,850	39,010	47,050	44,760	41,370	42,608
40%	1.92	75,060	80,600	69,660	72,750	77,430	75,100
30%	1.44	236,110	258,760	221,760	241,110	217,690	235,086
20%	0.96	823,900	791,750	817,950	853,470	821,460	821,706
10%	0.48	1,217,650	1,207,970	1,247,960	1,221,120	1,205,970	1,220,134

ตารางที่ ข.6 ค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) และจำนวนรอบเฉลี่ย (N) ของการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์

% ค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u)	X(N)(รอบ)	Y(σ_u)(N/mm ²)
60%	21,510	396.60
50%	42,608	330.50
40%	75,100	264.40
30%	235,086	198.30
20%	821,706	132.20
10%	1,220,134	66.10

ตารางที่ ข.7 การคำนวณการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อน โดย
กระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์

X	Log X	Y	(log X) ²	Y ²	(log X)Y
21,510	4.33	396.60	18.77	157,291.56	1,718.33
42,608	4.63	330.50	21.43	109,230.25	1,530.05
75,100	4.88	264.40	23.77	69,907.36	1,289.12
235,086	5.37	198.30	28.85	39,322.89	1,065.11
821,706	5.91	132.20	34.98	17,476.84	781.93
1,220,134	6.09	66.10	37.04	4,369.21	402.31
รวม	31.21	1,388.10	164.85	397,598.11	6,786.84

นำค่าที่ได้จากตาราง ข.7 คำนวณหาค่า a และ b จากสมการ

$$b = \frac{n\sum(\log X) - \sum \log X \sum Y}{n\sum(\log X)^2 - (\sum \log X)^2}$$

$$= \frac{6(6,786.84) - (31.21)(1,388.10)}{6(164.85) - (31.21)^2}$$

$$= -173.02$$

และ

$$a = \frac{\sum Y}{n} - b \frac{\sum \log X}{n}$$

$$= \frac{1,388.10}{6} - (-173.02) \frac{31.21}{6}$$

$$= 1,131.35$$

ดังนั้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ $\log X$ ได้จากสมการ

$$Y_e = a + b \log X$$

$$= 1131.35 + (-173.02)\log X$$

ตารางที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log X$ กับ Y ที่ระดับต่างๆ ของการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการอบอ่อนอย่างสมบูรณ์

X	Y	$Y_e = 1131.35 + (-173.02)\log X$
21,510	396.60	381.72
42,608	330.50	330.36
75,100	264.40	287.77
235,086	198.30	202.02
821,706	132.20	107.99
1,220,134	66.10	78.28

ตารางที่ ข.9 บันทึกผลการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ

วัสดุ : AISI 4140		ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (σ_u) = 1587 N/mm ²					ค่าเฉลี่ยของจำนวนรอบ
น้ำหนัก (%)	น้ำหนัก (Kg.)	จำนวนรอบที่ขึ้นทดสอบขาด(N)					
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	
50%	5.78	26,070	21,210	23,470	27,330	26,670	24,950
40%	4.63	64,480	67,970	61,290	65,360	67,750	65,370
30%	3.47	238,550	242,720	250,240	262,730	248,330	248,514
20%	2.32	1,211,710	1,207,200	1,178,320	1,259,810	1,203,950	1,212,198

ตารางที่ ข.10 ค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u) และจำนวนรอบเฉลี่ย (N) ของการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ

% ค่าความต้านทานแรงดึง (σ_u)	X(N)(รอบ)	Y(σ_u)(N/mm ²)
50%	24,950	793.50
40%	65,370	634.80
30%	248,514	476.10
20%	1,212,198	317.40

ตารางที่ ข.11 การคำนวณของการทดสอบที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ

X	Log X	Y	(log X) ²	Y ²	(log X)Y
24,950	4.40	793.50	19.36	629,642.25	3,489.08
65,370	4.82	634.80	23.23	402,971.04	3,056.80
248,514	5.40	476.10	29.16	226,671.21	2,568.73
1,212,198	6.08	317.40	36.97	100,742.76	1,930.93
รวม	20.69	2,221.80	108.72	1,360,027.26	11,045.53

นำค่าที่ได้จากตาราง ค.11 คำนวณหาค่า a และ b จากสมการ

$$b = \frac{n\sum(\log X) - \sum \log X \sum Y}{n\sum(\log X)^2 - (\sum \log X)^2}$$

$$= \frac{4(11,045.53) - (20.69)(2,221.80)}{4(108.72) - (20.69)^2}$$

$$= -298.23$$

และ

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{\sum Y}{n} - b \frac{\sum \log X}{n} \\
 &= \frac{2,221.80}{4} - (-262.63) \frac{20.69}{4} \\
 &= 1,913.90
 \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ log X ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 Y_c &= a + b \log X \\
 &= 1,913.90 + (-262.63) \log X
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง log X กับ Y ที่ช่วงระดับต่างๆ ของการทดสอบวัสดุที่ปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยความร้อนโดยกระบวนการชุบแข็งและอบคืนไฟ

X	Y	$Y_c = 1913.90 + (-262.63) \log X$
24,950	793.50	759.10
65,370	634.80	649.24
248,514	476.10	496.92
1212198	317.40	316.17

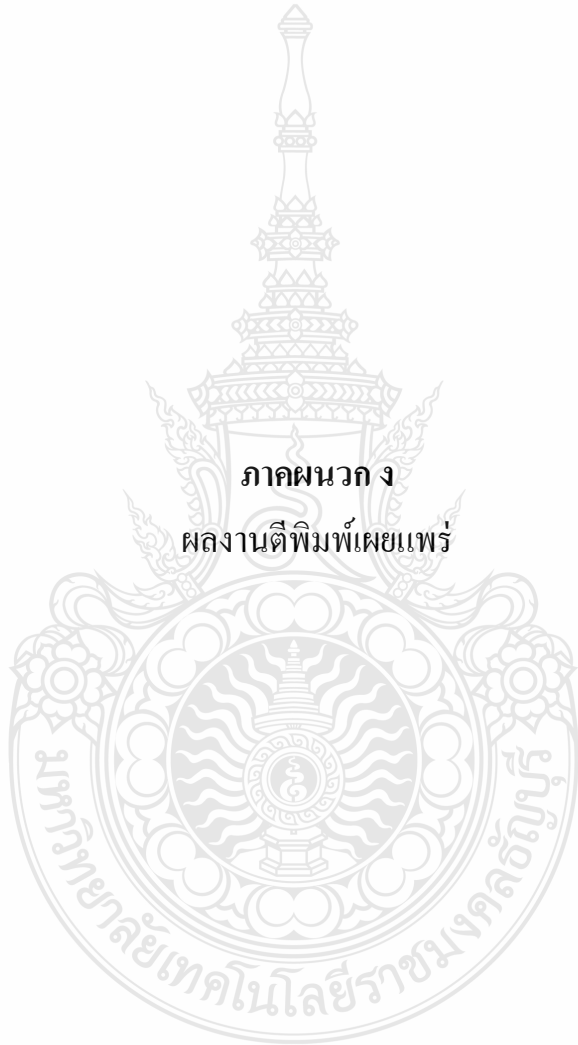


ตารางที่ ค.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กผสมต่ำ โดยเครื่อง Emission Spectrometer

ปริมาณแร่ธาตุเปรียบเทียบกับมาตรฐานเหล็กกล้าผสม มีส่วนผสมเท่ากับ AISI 4140							
Burn 1 (%)							
Fe 97.3925	C 0.4277	Si 0.1865	Mn 0.6746	P 0.0278	S 0.0177	Ni 0.0446	Cr 0.8553
Mo 0.1595	Cu 0.0493	V 0.0105	Ti 0.0052	Al 0.0245	W 0.1152	Co 0.0028	Sn 0.0050
Burn 2 (%)							
Fe 97.3712	C 0.4148	Si 0.1849	Mn 0.6859	P 0.0316	S 0.0158	Ni 0.0340	Cr 0.8766
Mo 0.1601	Cu 0.0519	V 0.0092	Ti 0.0045	Al 0.0235	W 0.1267	Co 0.0039	Sn 0.0055
Burn 3 (%)							
Fe 97.3843	C 0.4038	Si 0.1814	Mn 0.6805	P 0.0325	S 0.0159	Ni 0.0327	Cr 0.8774
Mo 0.1576	Cu 0.0513	V 0.0090	Ti 0.0044	Al 0.0230	W 0.1371	Co 0.0034	Sn 0.0056
Average (%)							
Fe 97.3826	C 0.4154	Si 0.1843	Mn 0.6803	P 0.0306	S 0.0164	Ni 0.0371	Cr 0.8698
Mo 0.1591	Cu 0.0508	V 0.0095	Ti 0.0047	Al 0.0237	W 0.1263	Co 0.0033	Sn 0.0054



ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





Department of Alternative
Energy Development and Efficiency
MINISTRY OF ENERGY

กำหนดการและบทความ



การประชุมสัมมนาวิชาการ
พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5
The 5th Thailand Renewable Energy For Community Conference

TREC-5

18 - 20 ธันวาคม 2555



จัดโดย สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน(แห่งประเทศไทย)
ณ สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

adiCET



การประชุมสัมมนาวิชาการ พลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ครั้งที่ 5

The 5th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-5)

18-20 December 2555

หน้าแรก	การลงทะเบียน	กำหนดการสำคัญ	สถานที่จัดงาน	ติดต่อเรา
เมนู				
Call For Papers				
ความเป็นมา				
สารจากประธาน				
คณะกรรมการ				
กำหนดการสำคัญ				
โปรแกรมการประชุม				
การลงทะเบียน				
การลงทะเบียน				
Social Program				
สถานที่จัดงาน				
สถานที่พักและการเดินทาง				
ผู้สนับสนุน				
ติดต่อเรา				

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

1. รศ.ดร.วัฒนพงศ์ รัชชวีเชียร
2. ศ.ดร.ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน
3. ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
4. ศ.ดร.จงจิตร ธีรฤพล
5. Prof. Dr. Joseph KHEDARI
6. รศ.ดร.นายทศ สงค์ธนาพิทักษ์
7. ผศ.ดร.สมชัย ธีรญาโรดม
8. ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสะอาด
9. คุณอำนวย ทองสกลิต
10. ผศ.ดร.เรืองเดช วงศ์หล้า

คณะกรรมการดำเนินงาน

ดร. วิรัชย์ ไรยนรินทร์	ประธาน
ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	รองประธาน
ดร. กฤษณวัฒน์ ภูมิภักดีพิชญ์	กรรมการ
ผศ.ดร. ตอพงษ์ ภิรัชชาติ	กรรมการ
ดร. สุนนมาลัย เนียมกลาง	กรรมการ
ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศรี	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายมหกรรม

ดร. ณัฐยา ตันตราพันธ์	ประธาน
ดร. กฤษณวัฒน์ ภูมิภักดีพิชญ์	รองประธาน
ดร. วิษระ วงศ์บุญโญ	กรรมการ
ดร. อณสรณ์ ธนารักษ์	กรรมการ
ดร. ประไพธาร์ ธนารักษ์	กรรมการ
ดร. รวีภา ยงประยูร	กรรมการ
นางสาวสิริสรณ์ สิทธิรินทร์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายจัดหารายได้และการลงทะเบียน

รศ.ดร. วัฒนพงศ์ รัชชวีเชียร	ประธาน
ดร. วิรัชย์ ไรยนรินทร์	รองประธาน
ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ	กรรมการ
ดร. สุนนมาลัย เนียมกลาง	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายสถานที่และยานพาหนะ

ดร. วิษวี หาญเมืองใจ	ประธาน
นายสุวิจักจณ์ ศรีแก้ว	รองประธาน
นายกฤษณะ ศิริปก	กรรมการ
นางปณิศา สัมสกล	กรรมการ
นายอานนท์ ผัดแปง	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์

ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศรี	ประธาน
ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	รองประธาน
ดร. สุนนมาลัย เนียมกลาง	กรรมการ
อ. เจนจิรา เขียมมดี	กรรมการ
นายภาณุพงษ์ อินตะวงศ์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการฝ่ายพิธีการและการต้อนรับ

ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศรี	ประธาน
อ. เจนจิรา เขียมมดี	รองประธาน
ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง	กรรมการ
ดร. ณัฐยา ตันตราพันธ์	กรรมการ
ดร. วิษวี หาญเมืองใจ	กรรมการ
นางปณิศา สัมสกล	กรรมการและเลขานุการ

สารบัญ

บทความ	หน้า
กลุ่มที่ 4 การประหยัดพลังงาน (EC) (ต่อ)	
EC011	346
<p>การทดสอบสมรรถนะของพัดลมเซนต์ฟลูออลเพื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณ โดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไทย สมพงษ์ คำแก้ว, คุณภุช กิติพร, บุญฤทธิ์ งามดาสี, บวรมี พ่างศรี</p>	
กลุ่ม 5 วัสดุศาสตร์เพื่อการพัฒนาพลังงานและการอนุรักษ์ (ME)	
ME001	353
<p>อิทธิพลของอุณหภูมิการอบคืนตัวที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140 อรรถพล ไชยรา, ศิวกร อ่างทอง</p>	
ME002	357
<p>การแยก 4-อะมิโนฟีโนลด้วยกระบวนการ Micellar-Enhanced Ultrafiltration (MEUF) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวผสม SDS/C12AB กนกพร ผ่องสวนอ้อย, อัมไพ ชนะไชย</p>	
ME003	364
<p>การวิเคราะห์แอมพลิจูดน้ำร้อนจากวัสดุโพลีเมอร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จิรพงษ์ พงษ์สิทธิ์ทอง, มนุศักดิ์ จานทอง, มานพ แฉ่มแพง, วรุณี อริยวิริยะพันธ์ พงศ์พิชญ์ ส่วนภูษา, จักรวาล บุญหวาน, นกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ์, พงษ์พิชญ์ เมืองเจริญ ศุภชาติ จงโพนบูลย์พัฒนาะ</p>	
ME004	376
<p>แผนรับความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทำจากวัสดุเทอร์โมพลาสติก : ผลของค่าการนำ ความร้อนและขนาดพื้นที่ดูดซับแสง ชัชชัย มีแก้ว, วรุณี อริยวิริยะพันธ์, มานพ แฉ่มแพง, พงศ์พิชญ์ ส่วนภูษา จักรวาล บุญหวาน, นกุล เอื้อพันธ์เศรษฐ์, พงษ์พิชญ์ เมืองเจริญ, ศุภชาติ จงโพนบูลย์พัฒนาะ</p>	
MF005	384
<p>การศึกษาลักษณะการไหลในการเชื่อมประกบแผ่นวัสดุแกนวิชา มนตรี การพัคดี, ศิริชัย ศัลลกุล</p>	
ME006	388
<p>การทำเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยอิเล็กโตรไลต์กึ่งของแข็ง สุรศักดิ์ แสนทวีสุข, กิตติชัย โสพันนา, เทพกร ลีลาแต้ม</p>	

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5
18-20 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

อิทธิพลของอุณหภูมิการอบคืนตัวที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140

Influence of Tempering Temperature on Mechanical Properties of AISI 4140 Steel

ดร.รณพล ไชยรา* ศิวกาน่า ส่างทอง

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทร 08-4428-5025 E-mail: attapol_chai@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบคืนตัวที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140 เพื่อศึกษาหาช่วงเวลาในการอบคืนตัวที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยทำการอบชุบขึ้นทดสอบที่ระดับอุณหภูมิ 850 °C ชุบแข็งด้วยน้ำมัน และทำการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ คือ 200 °C, 400 °C และ 600 °C ตามลำดับ ใช้เวลาในการอบคืนตัวแต่ละช่วงอุณหภูมิ 30 นาที หลังจากนั้นทำการทดสอบวัดค่าความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และหาอัตราการยืดตัว (Elongation) พบว่าที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 200 °C วัสดุ AISI 4140 มีค่าความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึง สูงสุด และมีอัตราการยืดตัวต่ำสุด ส่วนที่อุณหภูมิการอบคืนตัว 600 °C มีค่าความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึงต่ำสุด และมีอัตราการยืดตัว สูงสุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิการอบคืนตัวมีผลต่อการวัด ค่าความแข็งแรง และมีผลต่อการทดสอบแรงดึง เมื่อวัสดุมีค่าความแข็งแรงสูง การรับแรงดึงก็มีค่าสูงตามไปด้วยส่งผลทำให้มีอัตราการยืดตัวที่ต่ำ

คำสำคัญ : การอบคืนตัว, การชุบแข็ง, สมบัติทางกล

1. บทนำ

การผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล หรือการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ นับว่ามีบทบาทที่สำคัญมากในประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นฐานการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เหล่านี้เพื่อใช้ภายในประเทศ และส่งออกไปขายยังต่างประเทศ ส่วนใหญ่แล้วการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล หรือชิ้นส่วนรถยนต์ ต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เหล็กกล้าผสมเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานอย่าง กว้างขวางในงาน

อุตสาหกรรม เช่น เหลขาข้อเหวี่ยง ข้อต่อกันพวงมาลัย เฟลาล้อ ก้านสูบ เฟลาเครื่องจักร เพื่อง เครื่องจักรขนาดใหญ่ สกรูและน็อต [1] รวมทั้งชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูงอื่นๆ ซึ่งชิ้นส่วนต่างๆ เหล่านี้ส่วนใหญ่จะรับแรงกระทำในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่นรับแรงดึง แรงอัด แรงบิด หรือแรงกระแทก ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหาย เพื่อให้วัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งานหลังจากการกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) การอบคืนตัว (Tempering) เป็นวิธีหนึ่ง ของกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อช่วยลดความเครียดภายในชิ้นส่วน ลดการแตกร้าวหรือการมีตะกั่วในชิ้นตอนการชุบแข็ง ทำให้มีสมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้น และเหมาะต่อการใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษา อิทธิพลของอุณหภูมิการอบคืนตัวที่มีผลต่อ สมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140 โดยทำการทดสอบสมบัติทางกล เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติการอบคืนตัวที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้อุณหภูมิการอบคืนตัวที่ 200 °C, 400 °C และ 600 °C ตามลำดับ ทำการทดสอบความแข็งแรง ค่าความต้านทานแรงดึง และหาอัตราการยืดตัว เพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการ ประเมินขีดจำกัดความทนทานของวัสดุ (Endurance Limit) ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายอย่างฉับพลัน ภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ และเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานอื่นๆ ต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

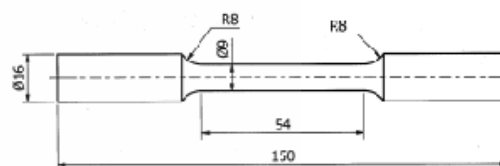
การ ชุบแข็งและการอบคืนตัวเหล็กกล้าผสม โดยทั่วไปแล้วจะไม่แตกต่างกันไป จากการชุบแข็ง และการอบคืนตัวที่กระทำกับเหล็กกล้าคาร์บอน [2] สิ่งที่แตกต่างกัน

ออกไปก็คืออุณหภูมิที่เผาก่อนการชุบ ของเหล็กที่ใช้ในการชุบและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัว ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของธาตุผสมเป็นสำคัญ อุณหภูมิที่เผาในช่วงที่เป็นออสเตนไนท์ก่อนการชุบ จำเป็นจะต้องเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อต้องการให้คาร์ไบด์ของธาตุผสมมีโอกาสละลายตัวในออสเตนไนท์ที่ได้มาก ยิ่งเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูงอุณหภูมิที่จะต้องสูงขึ้นไปอีก หรือไม่ก็ใช้เวลาในการเผานานออกไป เพราะถ้าเกิดมีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวอยู่มากจะทำให้ความสามารถในการชุบแข็งลดลง อาจจะไม่ได้เหล็กที่มีความแข็งสูงตามต้องการ เมื่อต้องเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติการควบคุมบรรยากาศภายในเตาจำเป็นจะต้องควบคุมให้ได้ผล เพื่อบังคับการลดปริมาณคาร์บอน (Decarburization) นอกจากนี้อัตราการเผาต้องให้เป็นไปโดยสม่ำเสมอ และช้ากว่าปกติ เพื่อบังคับการบิดตัวของชิ้นงาน ยิ่งในกรณีที่ชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อน จำเป็นต้องระวังมากขึ้น สิ่งที่จะต้องพิจารณาอีกประการหนึ่งคือ ช่วงเวลา (Holding time) ที่เผาเหล็กก่อนการชุบ จะต้องไม่ยาวนานจนเกินไป เพราะจะทำให้ธาตุผสมบางตัวที่รวมตัวกับคาร์บอนละลายตัวมากเกินไปจะทำให้ออสเตนไนท์ (matrix) มีธาตุผสมละลายอยู่ในอัตราสูง อาจจะทำให้ออสเตนไนท์ไม่เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้หมดในขณะที่ทำการชุบจะได้ออสเตนไนท์เหลือค้าง (retained austenite) อยู่จำนวนมาก ทำให้ความแข็งที่ได้จะต่ำกว่าที่ควร เหตุผลที่สำคัญก็คือธาตุผสมเกือบทุกตัวมีส่วนช่วยให้อุณหภูมิการเปลี่ยนออสเตนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ต่ำลง ยิ่งเหล็กกล้าผสมเป็นชนิดที่มีธาตุผสมสูง จำเป็นจะต้องพิจารณา ส่วนของเหล็กที่ใช้ในการชุบจะใช้ได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับธาตุที่ผสม เพราะธาตุที่ ผสมส่วนมากจะมีบทบาททำให้อัตราการเย็นตัววิกฤต (critical cooling rate) ต่ำลง เหล็กกล้าผสมบางชนิดอาจทำให้ได้เกินในอากาศ ก็จะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ ดังนั้นของเหล็กที่ใช้สำหรับชุบแข็งเหล็กกล้าผสมจะมีตั้งแต่ น้ำ น้ำมัน เกลือละลายจนถึงยาแก๊ส (เรียกเหล็กที่ใช้โครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยการปล่อยให้เย็นในอากาศว่าเหล็กชุบลม หรือ air hardening) เป็นต้น สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัว (Tempering) เป็นเรื่องที่จะต้องพิจารณาเพราะการอบคืนตัวกระทำ ได้หลายช่วงของอุณหภูมิตั้งเช่น การอบที่อุณหภูมิต่ำ (150°C - 250°C), การอบที่อุณหภูมิปานกลาง (350°C - 450°C) และการอบที่อุณหภูมิสูง (500°C - 650°C) [3] นอกจากนี้จะต้อง ศึกษาถึงลักษณะของธาตุผสมที่มีอยู่ในเหล็ก เพราะธาตุผสมที่อยู่ในกลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ จะมีผลต่อการอบคืน

ตัวมาก เช่น จะให้คุณสมบัติ ที่เรียกว่า Secondary hardening (ส่วนที่ทำให้ความแข็งกลับเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง)

3. วัสดุและวิธีการทดลอง

ใช้เหล็กเกรดมาตรฐาน AISI 4140 โดยมีโครเมียม (Cr) และโมลิบดีนัม (Mo) เป็นส่วนผสมสำคัญ ซึ่งใกล้เคียงกับเหล็กเกรดมาตรฐาน DIN 1.7225 / 42CrMo4 และ JIS SCM 440 ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึง CNC เพื่อทำชิ้นทดสอบแรงดึงโดยรูปร่างของชิ้นทดสอบถูกออกแบบตามมาตรฐาน ASTM E8 [4] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึง

และตัดชิ้นทดสอบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร เพื่อยึดเข้าความแข็ง ในงานวิจัยนี้ทำการชุบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 850°C เผาแช่เป็นเวลา 30 นาที (Holding Time) นำชิ้นทดสอบชุบแข็งในน้ำมัน (Quenching) แล้ว ทำการอบคืนตัวเพื่อลดความเครียดภายในเนื้อ วัสดุ AISI 4140 โดยแบ่งอุณหภูมิการอบคืนตัวเป็น 3 ช่วง คือ 200°C, 400°C และ 600°C ตามลำดับ ใช้เวลาในการอบคืนตัวแต่ละช่วงอุณหภูมิ 30 นาที เมื่อได้ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้ว ทำการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Micro hardness (Matsuzawa Model MXT 70) ดังแสดงในรูปที่ 2 ใช้หัวทดสอบแบบ Diamond แรงกด 150 kgf. เป็นเวลา 5 วินาที [5] ทำการทดสอบ 3 รอยกดต่อ 1 ชิ้นทดสอบ จำนวน 5 ชิ้นต่อช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัว



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบความแข็ง

หลังจากนั้นทำการทดสอบแรงดึงแบบ Universal Testing Machines (GOTECH Model GT 7001 LAC 50) ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อหา ค่า ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และหาอัตราการยืดตัว (Elongation) ใช้ชิ้นทดสอบ 5 ชิ้นต่อช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัว



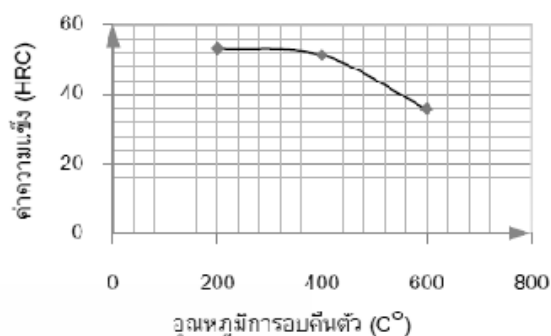
รูปที่ 3 เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบ Universal Testing Machines

4. ผลการทดลอง

ผลการตรวจสอบสมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140 โดยผ่านการอบคืนตัวที่ระดับอุณหภูมิ 200 °C, 400 °C และ 600 °C ได้ผลดังต่อไปนี้

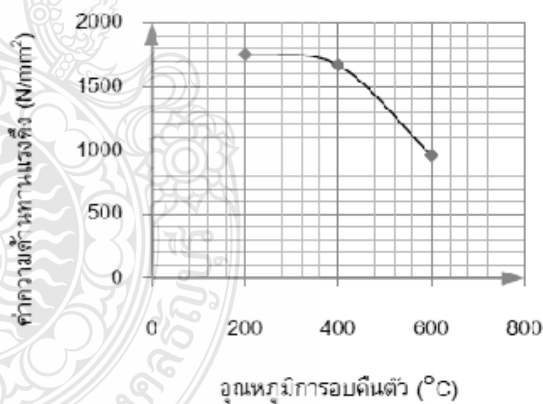
ตารางที่ 1. ค่าความแข็งของวัสดุ, ค่าความต้านทานแรงดึง และอัตราการยืดตัวของวัสดุ AISI 4140

อุณหภูมิการอบคืนตัว	200°C	400°C	600°C
ค่าความแข็งเฉลี่ย(HRC)	53.1	51.2	35.7
ค่าความต้านทานแรงดึง (N/mm ²)	1752.33	1867.98	960.70
อัตราการยืดตัว (%)	9.76	10.20	16.64

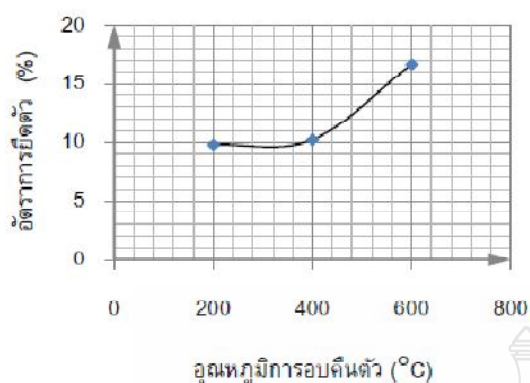


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและอุณหภูมิการอบคืนตัวของวัสดุ AISI 4140

จากรูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ระดับช่วงอุณหภูมิ 200°C – 600°C พบว่าความแข็งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวสูงขึ้น โดยช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200°C – 400°C ความแข็งจะค่อยๆ ลดลงทีละน้อย ซึ่งค่าความแข็งที่ได้ คือ 53.1 HRC และ 51.2 HRC ตามลำดับ ส่วนช่วงอุณหภูมิระหว่าง 400°C – 600°C ความแข็งจะลดลงรวดเร็ว โดยวัดค่าความแข็งได้ 35.7 HRC



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงและอุณหภูมิการอบคืนตัวของวัสดุ AISI 4140



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยืดตัวและอุณหภูมิการอบคืนตัวของวัสดุ AISI 4140

จากรูปที่ 5 - 6 จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงกับอุณหภูมิการอบคืนตัวที่ 200°C - 600°C ค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวสูงขึ้น ส่วนอัตราการยืดตัวจะมีผลตรงข้ามกับค่าความต้านทานแรงดึง คือเมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัวระหว่าง 200°C - 400°C จะมีค่าความต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกันคือ 1752.33 N/mm^2 และ 1687.98 N/mm^2 ตามลำดับ และมีอัตราการยืดตัวระหว่าง 9.76 % และ 10.20 % ตามลำดับ ส่วนช่วงอุณหภูมิระหว่าง 400°C - 600°C ค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 980.70 N/mm^2 และมีอัตราการยืดตัวเพิ่มขึ้นเป็น 16.64 %

5. สรุปผลการทดลอง

ผลทดลองงานวิจัยการศึกษานิธิพลของ อุณหภูมิการอบคืนตัวที่มีผลต่อ สมบัติทางกลของวัสดุ AISI 4140 สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ค่าความแข็ง จากการทดลองที่ ระดับช่วงอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ พบว่าความแข็งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวสูงขึ้น โดยช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200°C - 400°C ความแข็งจะค่อยๆลดลงทีละน้อยเป็นผลมาจากที่ช่วงอุณหภูมิ 400°C มีความแข็งกลับเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า Secondary hardening ส่วนช่วงอุณหภูมิระหว่าง 400°C - 600°C ความแข็งจะลดลงรวดเร็ว

5.2 สำหรับการทดสอบวัดค่าแรงดึงที่ช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัวที่ระดับต่างๆ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมี

ค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเดียวกับกับค่าความแข็ง โดยช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200°C - 400°C ค่าความต้านทานแรงดึง จะค่อยๆลดลงทีละน้อย ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 400°C - 600°C ค่าความต้านทานแรงดึง จะลดลงรวดเร็ว

5.3 ในส่วนของอัตราการยืดตัวของวัสดุ AISI 4140 พบว่าการยืดตัวของวัสดุจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นทีละน้อยที่อุณหภูมิระหว่าง 200°C - 400°C และจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 400°C - 600°C

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mustafa Bayrak., et al., "Analysis of Tempering Treatment on Material Properties of DIN 41Cr4 and DIN 42CrM04 Steels," Journal of Material Engineering and Performance, pp. 597-600, 2007.
- [2] มนัส สกธิจินดา , เหล็กกล้า , วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ, 2539
- [3] มนัส สกธิจินดา, วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก , วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ , 2540
- [4] ASTM : E8/E8M-09. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [5] มานพ ตันตระกูล, งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ , 2541

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายอรรถพล ไชยรา
วัน เดือน ปีเกิด	15 มีนาคม 2519
ที่อยู่	208 หมู่ที่ 17 ตำบลช้างมิ่ง อำเภอพรหมานิกม จังหวัดสกลนคร 47130
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2545	สำเร็จการศึกษาระดับอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2546 – ปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

