



การศึกษาผลของไครโอจีนิกส์ที่มีต่อพฤติกรรมทางกลของวัสดุโลหะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาผลของโครโมจีนิกส์ที่มีต่อพฤติกรรมทางกลของวัสดุโลหะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

AN INVESTIGATION OF CRYOGENICS ON MECHANICAL BEHAVIOR OF STEEL
MATERIAL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (ENERGY ENGINEERING)
Department of MECHANICAL ENGINEERING
Academic Year 2023
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาผลของโครโมจีนิคส์ที่มีต่อพฤติกรรมทางกลของวัสดุโลหะ

โดย นายพงศกร เชื้อยงนิน

สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐวุฒิ ธาราวดี

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจรรย์เนียร)

พิจารณาเห็นชอบโดย ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. นิตยพงศ์ ไสภณพงศ์พิพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐวุฒิ ธาราวดี)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระนุช อินทะกัณฑ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพาพร คำแดง)



620920070 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ความเค้นคราก, กระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง, อบอ่อน, ไครโอจินิกส์,
ไนโตรเจนเหลว

นาย พงศกร เชียงฉิน: การศึกษาผลของไครโอจินิกส์ที่มีต่อพฤติกรรมทางกลของวัสดุโลหะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ธาราวดี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของไครโอจินิกส์ที่มีต่อพฤติกรรมทางกลของวัสดุโลหะ การทดลองนี้ใช้เหล็ก 5 ประเภท (เหล็ก SR24 เหล็ก SK4 เหล็ก S45C สแตนเลส AISI 304 และสแตนเลส AISI 201) เหล็กแต่ละประเภทถูกแช่ในไนโตรเจนเหลวและอบอ่อนที่สภาวะตามการทดสอบของการศึกษาก่อนหน้านี้ ได้แก่ สภาวะไม่ผ่านกระบวนการ, แช่ที่ 3 ชั่วโมง 2 รอบ , แช่ที่ 4 ชั่วโมง 2 รอบ , แช่ที่ 5 ชั่วโมง 2 รอบ , แช่ที่ 3 ชั่วโมง 2 รอบ อบอ่อนที่ 200 °C ที่ 2 ชั่วโมง , แช่ที่ 4 ชั่วโมง 2 รอบและอบอ่อนที่ 200 °C ที่ 2 ชั่วโมง , แช่ที่ 5 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนที่ 200 °C ที่ 2 ชั่วโมง จากผลการวิจัยพบว่ามีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ความเค้นครากของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ค่าความเค้นครากของ AISI 304 ที่ไม่ผ่านกระบวนการคือ 742.67 MPa ความเค้นครากของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ที่แช่ที่ 4 ชั่วโมง 2 รอบและอบอ่อนที่ 200°C คือ 835 MPa ค่าความเค้นครากเพิ่มขึ้น 12.4 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ผ่านกระบวนการ ค่าความเค้นครากของ AISI304 ที่ผ่านการอบอ่อนที่ 200°C 2 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 647 MPa ค่าความเค้นคราก ลดลง 12.8 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ผ่านกระบวนการ ค่าความเค้นครากของ AISI304 ที่มีการแช่ที่ 5 ชั่วโมง 2 รอบ คือ 456 MPa ค่าความเค้นครากลดลง 38.5 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ผ่านกระบวนการ ดังนั้นควรแช่ไว้ 4 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200°C จึงเหมาะกับสแตนเลส AISI304

620920070 : Major (ENERGY ENGINEERING)

Keyword : yield stress, deep cryogenic treatment, annealing, cryogenic, liquid nitrogen

MR. Pongsakon SIANGCHIN : An investigation of cryogenics on mechanical behavior of steel material Thesis advisor : Assistant Professor Dr. Nattawut Tharawadee

To study the effect of cryogenics on the mechanical behavior of steel, five types of steel (SR24 steel, SK4 steel, S45C steel, AISI 304 stainless steel, and AISI 201 stainless steel) were used in this experiment. Each type of steel was soaked in liquid nitrogen and annealed under conditions based on previous studies. The test conditions included: no treatment, soaked for 3 hours in 2 cycles, soaked for 4 hours in 2 cycles, soaked for 5 hours in 2 cycles, soaked for 3 hours in 2 cycles and annealed at 200°C for 2 hours, soaked for 4 hours in 2 cycles and annealed at 200°C for 2 hours, and soaked for 5 hours in 2 cycles and annealed at 200°C for 2 hours. Based on the results, various changes were observed, such as the yield stress of AISI 304 stainless steel. The yield stress of untreated AISI 304 was 835 MPa. The yield stress increased by 12.4% compared to the untreated condition. The yield stress of AISI 304 that was annealed at 200°C for 2 hours was 647 MPa, which was a decrease of 12.8% compared to the untreated condition. The yield stress of AISI 304 soaked for 5 hours in 2 cycles was 456 MPa, a decrease of 38.5% compared to the untreated condition. Therefore, soaking for 4 hours in 2 cycles and annealing at 200°C was found to be suitable for AISI 304 stainless steel.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ทั้งอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ในสาขาวิชา ที่ได้ให้ความรู้ คำชี้แจง รวมถึงชี้แนะข้อผิดพลาด และช่วยแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ และสถานที่ในการทดสอบสำหรับศึกษาวิจัยนี้

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้มอบความรักและกำลังใจให้ ตลอดการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

พงศกร เชียงฉิน



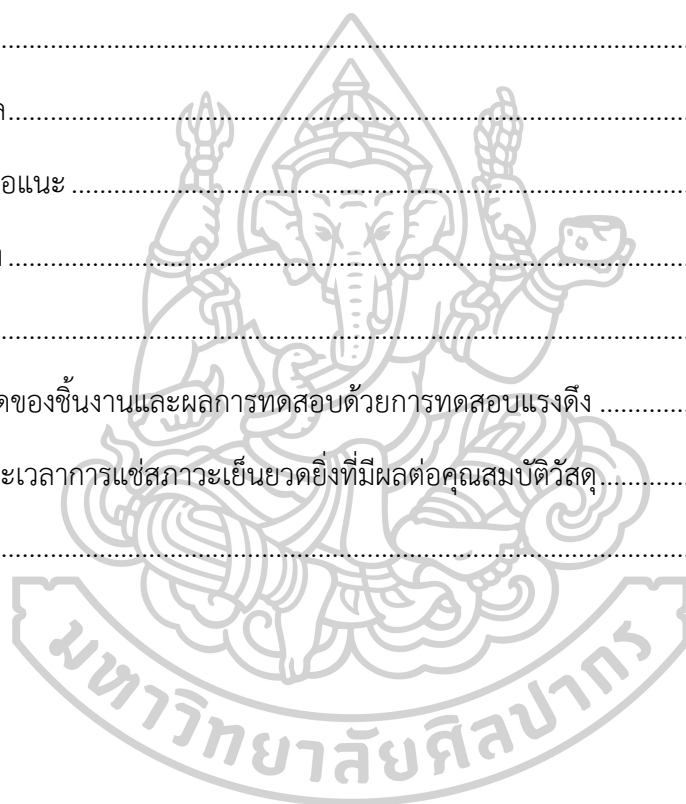
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2	3
2.1 ไครโอจินิกส์ (Cryogenic).....	4
2.2 ของไหลที่ใช้ในระบบไครโอจินิกส์.....	5
2.2.1 ไนโตรเจนเหลว (Nitrogen:N ₂).....	5
2.2.2 อาร์กอน (Argon:Ar).....	5
2.2.3 ฮีเลียม (Helium:He).....	5
2.2.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen:H ₂).....	5
2.3 การปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือด้วยการทำไครโอจินิกส์.....	6
2.3.1 การทำไครโอจินิกส์ (Cryogenic treatment).....	7
2.3.2 กระบวนการทำไครโอจินิกส์ที่ทำกับเหล็กกล้าเครื่องมือประกอบด้วย 5 ขั้นตอน	7

2.3.3 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล.....	9
2.4 คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ.....	11
2.4.1 คุณสมบัติของวัสดุและการทดสอบ.....	11
2.5 วัสดุวิศวกรรม.....	29
2.5.1 โลหะผสม(Alloy).....	29
2.5.2 การเกิดเฟสไดอะแกรมของเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์.....	29
2.5.3 การแยกประเภทเหล็กกล้า Plain – carbon ตามการเย็นตัวของเหล็ก.....	30
2.5.4 การแยกประเภทของเหล็กกล้า Plain – carbon ตามคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก.....	33
2.6 ชนิดและรายละเอียดของโลหะ.....	33
2.6.1 เหล็ก SR 24.....	33
2.6.2 เหล็ก SK 4.....	33
2.6.3 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304.....	33
2.6.4 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304L.....	34
2.6.5 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201.....	34
2.7 กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	34
2.7.1 หลักการทำงาน.....	34
2.7.2 ข้อมูลสำหรับการเตรียมส่งตัวอย่าง.....	35
2.8 กล้อง Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS).....	36
2.9 โลหะกลุ่มเหล็ก.....	47
2.9.1 การผลิตเหล็กกล้า.....	47
2.9.2 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	49
2.9.3 เหล็กกล้าผสม.....	58
2.9.4 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	67
2.9.5 เหล็กกล้าเครื่องมือ.....	68

2.9.6 เหล็กหล่อ.....	72
2.10 กระบวนการปรับปรุงสมบัติโลหะกลุ่มเหล็กด้วยกรรมวิธีทางความร้อน.....	75
2.9.1 การอบชุบแข็ง.....	77
2.9.2 การอบปกติ (Normalizing).....	78
2.9.3 การอบอ่อน (Soft annealing or Spheroidizing).....	80
2.9.4 การอบคืนรูปผลึก (Recrystallisation).....	81
2.9.5 การปลดความเค้น (Stress Relief).....	82
บทที่ 3.....	85
3.1 เครื่องมือสำหรับดำเนินการวิจัย.....	85
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการเย็นยวดยิ่ง.....	85
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	88
3.2 สถานที่ทำการวิจัย.....	89
3.3 ระยะเวลาการวิจัย.....	89
3.4 การวางแผนการวิจัย.....	90
3.4.1 แผนการดำเนินงาน.....	90
3.4.2 แผนการทดลอง.....	91
3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	98
3.5.1 การบันทึกผลการทดลอง.....	98
บทที่ 4.....	104
4.1 ผลอัตราการเย็นตัวและอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ขึ้นงานวัสดุ.....	104
4.2 ผลทดสอบของสภาวะเย็นยวดยิ่งที่มีต่อคุณสมบัติวัสดุ.....	104
4.2.1 การทดสอบระยะเวลาในการดำเนินการแช่วัสดุในสภาวะเย็นยวดยิ่ง.....	105
4.2.1 การทดสอบระยะเวลาในการดำเนินการแช่วัสดุในสภาวะเย็นยวดยิ่ง.....	105
4.3 โครงสร้างของเหล็กที่มีค่า Yield stress เปลี่ยนแปลง.....	123

4.3.1	โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304.....	123
4.3.2	โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 DCT 4 Hr Annealed.....	124
4.3.3	โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4	125
4.3.4	โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 3 Hr.....	126
4.3.5	โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 4 Hr.....	127
4.4	ผลการทดลองค่า Yield stress กับการบอบอ่อน	128
บทที่ 5	130
5.1	สรุปผล.....	130
5.2	ข้อเสนอแนะ	130
รายการอ้างอิง	131
ภาคผนวก	134
	รายละเอียดของชิ้นงานและผลการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง	135
	ผลของระยะเวลาการแช่สถานะเย็นยวดยิ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติวัสดุ.....	135
ประวัติผู้เขียน	156



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิและความดันของ ไนโตรเจนเหลว อาร์กอนเหลว ฮีเลียมเหลว และ ไฮโดรเจนเหลว	6
ตารางที่ 2.2 สมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือภายหลังการทำโครโอจีนิก [7].....	11
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ [19]	17
ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วน P/D2 [19].....	26
ตารางที่ 2.5 พฤติกรรมของธาตุผสมแต่ละชนิดในเหล็กกล้าที่ผ่านการอบอ่อน [19].....	61
ตารางที่ 2.6 ชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำมาตรฐาน SAE-AISI [19].....	63
ตารางที่ 2.7 ชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ [19].....	69
ตารางที่ 2.8 แสดงส่วนผสมทางเคมีหลักๆของเหล็กหล่อ [19]	73
ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติและสารประกอบของโลหะ	89
ตารางที่ 3.2 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย	90
ตารางที่ 3.3 จำนวนการทดลอง	97
ตารางที่ 3.4 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการ	98
ตารางที่ 3.5 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 3 ชั่วโมง	99
ตารางที่ 3.6 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 4 ชั่วโมง	99
ตารางที่ 3.7 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 5 ชั่วโมง	100
ตารางที่ 3.8 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	100
ตารางที่ 3.9 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	101

ตารางที่ 3.10 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 101



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ภาพจำลองอุณหภูมิ-เวลา ของการทำโครโอจีนิคส์ [13]	8
รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานร้อน CR7V (a) หลังชุบแข็ง (b) ชุบแข็งแล้ว แช่แข็งที่ -196 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (c) ชุบแข็งแล้วแช่แข็งที่ -196 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (d) ชุบแข็งแล้วแช่ที่ -196 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง [17]	10
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่าง ๆ [19]	12
รูปที่ 2.4 วิธีการทดสอบแรงดึง [19]	14
รูปที่ 2.5 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) แบบมีจุดคราก (Yield point) [19]	14
รูปที่ 2.6 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [19]	15
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก [19]	16
รูปที่ 2.8 เส้นโค้งความคืบ [19]	18
รูปที่ 2.9 Creep curve ที่ condition ต่างกัน [19]	19
รูปที่ 2.10 Modulus of toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b) [19]	20
รูปที่ 2.11 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod [19]	20
รูปที่ 2.12 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบและรอยบากร่อง [19]	21
รูปที่ 2.13 การแช่ชิ้นงานทดสอบในน้ำแข็งเพื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 0 องศา [19]	22
รูปที่ 2.14 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะ และแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก [19]	22
รูปที่ 2.15 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact transition temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ [19]	23
รูปที่ 2.16 ลักษณะรอยขาดเนื่องจากการล้าตัว [19]	24
รูปที่ 2.17 การทดสอบแบบ Brinell [19]	25
รูปที่ 2.18 วิธีการทดสอบแบบ Brinell [19]	25

รูปที่ 2.19 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชร Vickers hardness test [19]	27
รูปที่ 2.20 วิธีการทดสอบแบบ Rockwell hardness test [19].....	28
รูปที่ 2.21 เฟสไดอะแกรมของ เหล็ก และเหล็กคาร์ไบด์ [19]	30
รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของเหล็ก Eutectoid 0.8 เปอร์เซนต์ [19].....	31
รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กกล้า Hypoeutectoid plain – carbon มีปริมาณคาร์บอน 0.4 เปอร์เซนต์ [19]	32
รูปที่ 2.24 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis	36
รูปที่ 2.25 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS	37
รูปที่ 2.26 ตารางเหล็กที่ผ่านกระบวนการ DCT ในเงื่อนไขต่าง ๆ ของ M. Novelli, P.Bocher,T.Grosdidier(2018) [4]	39
รูปที่ 2.27 โครงสร้างที่ใช้การตรวจสอบด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยายเท่ากันจะได้ผลที่ต่างกันของ M. Novelli, P.Bocher,T.Grosdidier(2018) [4].....	39
รูปที่ 2.28 กราฟแสดงค่าความแข็งของ M. Novelli, P.Bocher,T.Grosdidier(2018) [4]	40
รูปที่ 2.29 แสดงตารางกระบวนการเตรียม deep cryogenic treatment ของXiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2].....	42
รูปที่ 2.30 ลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการ deep cryogenic treatment ของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]	43
รูปที่ 2.31 คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของตัวอย่างทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น Rockwell hardness, stress, yield ตัวอย่างที่ 9 ของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2].....	44
รูปที่ 2.32 กราฟที่แสดงไว้ทั้งสองต่อไปนี้และเมื่อทำการเทียบกันระหว่าง cutting force และ cutting speed เมื่อใช้การหล่อเย็นด้วย cryogenic และ flood coolant ของ S.Arun Kumar, V.G.Yoganath. Prasad Krishna (2018) [23].....	45
รูปที่ 2.33 กระบวนการถลุงสินแร่เหล็กโดยเตาหลอม [19]	48
รูปที่ 2.34 กระบวนการลดออกซิเจนโดย BOF [19].....	49
รูปที่ 2.35 เส้นโค้งการเย็นตัวของเหล็กบริสุทธิ์และการเปลี่ยนแปลงสภาพอัญรูป [19]	50
รูปที่ 2.36 แผนภาพเฟสของเหล็ก-คาร์บอน [19].....	51

รูปที่ 2.37 ภาพโครงสร้างจุลภาค (ก) ออสเทนไนต์ (500x) และ (ข) เฟอร์ไรต์ (500x) [19]	52
รูปที่ 2.38 ภาพโครงสร้างจุลภาค (ก) เพิร์ลไลต์(X 2,500) (ข) เหล็กหล่อสีขาว (เลเดบิวไรต์ทรานส์ฟอร์ม) [19].....	53
รูปที่ 2.39 ลักษณะการเกิดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กยูเทคตอยด์ [19].....	54
รูปที่ 2.40 (ก) กลไกการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์จากเฟสออสเทนไนต์ (ข) ทิศทางการขยายตัวของซีเมนไทต์และ เฟอร์ไรต์จากขอบเกรนออสเทนไนต์ [19]	55
รูปที่ 2.41 (ก) ขั้นตอนการเกิดโครงสร้างของเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ (ข) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ [19].....	55
รูปที่ 2.42 (ก) ขั้นตอนการเกิดโครงสร้างของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (ข) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ (1.4%C) [19].....	57
รูปที่ 2.43 อิทธิพลของธาตุผสมชนิดต่างๆ ที่ละลายในเฟอร์ไรต์แล้วมีผลต่อความแข็ง [19]	61
รูปที่ 2.44 ขอบข่ายงานกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำได้กับโลหะกลุ่มเหล็ก.....	76
รูปที่ 2.45 ลักษณะของแผนภูมิกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำได้กับโลหะ.....	77
รูปที่ 2.46 แผนภูมิการอบปกติ (Normalizing)[27]	79
รูปที่ 2.47 แผนภูมิการอบเพื่อให้ได้เกรนหยาบ[27].....	80
รูปที่ 2.48 แผนภูมิการอบอ่อน ก) สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ข) และ ค) สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน ปานกลาง และคาร์บอนสูง[27].....	81
รูปที่ 2.49 แผนภูมิการอบคืนรูปผลึก[27].....	82
รูปที่ 2.50 สมบัติของเหล็กกล้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ[27].....	83
รูปที่ 2.51 แผนภูมิการอบลดความเค้น[27].....	84
รูปที่ 2.52 อุณหภูมิของการอบวิธีต่างๆ ในแผนภาพสมดุล Fe-Fe ₃ C[27]	84
รูปที่ 3.1 ถังเก็บไนโตรเจนเหลว	85
รูปที่ 3.2 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ	86
รูปที่ 3.3 สายเทอร์โมคัปเปิล	86
รูปที่ 3.4 เต้าอบไฟฟ้า	87

รูปที่ 3.5 เครื่องเลื่อยสายพาน	87
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึง	88
รูปที่ 3.7 แสดงแผนงานวิจัยการหาคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแช่ที่ สภาวะเย็นยวดยิ่ง.....	90
รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	93
รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	94
รูปที่ 3.10 แสดงค่าและกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง	98
รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเงื่อนไขกลุ่มทดลองตัวอย่าง.....	103
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์ระยะยืดของชิ้นงานกลุ่มทดลอง ตัวอย่าง.....	103
รูปที่ 4.1 กราฟแสดง heating rate และ cooling rate ของการทดลอง.....	105
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า Yield stress ของสแตนเลส AISI 201 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	106
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า Ultimate stress ของสแตนเลส AISI 201 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	107
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของ AISI 201 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	108
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าของ Yield stress ของ AISI 304 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	109
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าของ Ultimate stress ของสแตนเลส AISI 304 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ	110
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของสแตนเลส AISI 304 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	111
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าของ Yield stress ของเหล็ก S45C ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	112
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าของ Ultimate stress ของ S45C ตามเงื่อนไขต่าง ๆ	113
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของเหล็ก S45C ตามเงื่อนไขต่าง ๆ	114
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าของ Yield stress ของเหล็ก SK4 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	115
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าของ Ultimate stress ของ SK4 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ	116
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของเหล็ก SK4 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	117
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าของ Yield stress ของเหล็ก SR 24 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ	118

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าของ Ultimate stress ของ SR 24 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ.....	119
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของเหล็ก SR 24 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ	120
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงลักษณะการเพิ่มขึ้น-ลดลงของ Yield Stress.....	121
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงลักษณะการเพิ่มขึ้น-ลดลงของ Yield Stress ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	122
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	123
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 ที่กำลังขยาย 500 เท่า	123
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 DCT 4 Hr Annealed ที่กำลังขยาย.....	124
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 DCT 4 Hr Annealed ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	124
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	125
รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	125
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 3 Hr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	126
รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 3 Hr ที่กำลังขยาย 500 เท่า	126
รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 4 Hr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	127
รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 4 Hr ที่กำลังขยาย 500 เท่า	127

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการนำสารที่ได้จากสภาพเย็นยวดยิ่ง (Cryogenic) หรือสารทำความเย็น (Cryogen) มาใช้กันอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็น ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมการผลิต อาหาร และอื่น ๆ อีกมากมาย ดังนั้นหากสามารถปรับปรุงเหล็กให้มีความทนทาน ความแข็งแรง หรือสามารถใช้ได้ยาวนานขึ้นกว่าเดิมจากการใช้สารทำความเย็นเพื่อปรับปรุงคุณภาพของเหล็กให้ดีขึ้นด้วยวิธีการแช่เหล็กลงในสารทำความเย็นซึ่งสารทำความเย็นที่ได้จากกระบวนการสภาพเย็นยวดยิ่งนั้นมีมากมายหลายอย่างแต่ส่วนใหญ่ที่ใช้ ไนโตรเจนเหลว ในกระบวนการต่าง ๆ เนื่องจากผลิตได้ง่ายและสามารถหาซื้อได้ง่าย[1]

การปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กนั้นได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการทดสอบไว้ จากงานวิจัยของ Xiao Liu et al. (2019) ได้ทำการทดสอบหาค่าความเค้นของเหล็กกล้าผสมซึ่งจากการทดสอบของตัวอย่างจากการนำเหล็กกล้าผสมไปแช่สถานะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 120 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงทั้งหมด 2 วัฏจักร ชิ้นงานที่ทดสอบมีค่าความเค้นเท่ากับ 1390 เมกะปาสคาล เพิ่มจากเดิม 2.15 เท่า ทำให้ทราบได้ว่าการใช้สารทำความเย็นสามารถทำให้เหล็กมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ [2]

จากงานวิจัยของ Keyvan Seyedi Niaki, Seyed Ebrahim Vahdat (2015) ได้ทำการแช่ 1.2542 tool steel ในไนโตรเจนเหลวโดยใช้กระบวนการที่เป็นขั้นตอนแล้วหลังจากนั้นก็นำ 1.2542 tool steel ไปทดสอบ Fatigue ปรากฏว่าหลังจากที่นำเหล็ก 1.2542 tool steel แช่ลงในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ -196 °C ผลที่ได้คือผลความเสียหายของหัว tool steel ลดลง [3]

จากงานวิจัยของ M. Novelli, P. Bocher, T. Grosdidier (2018) ได้ทำการทดลองแช่ Stainless steel ในไนโตรเจนเหลวในเงื่อนไขที่ต่างกันหลังจากนั้นนำ Stainless steel ที่ผ่านกระบวนการแล้วมาทดสอบโดยใช้ Ultrasonic เพื่อตรวจสอบความเรียบของผิว หลังการทดสอบ Stainless steel ที่แช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 3 นาที กับ 20 นาที และที่อุณหภูมิ -80 และ -130 °C ผลที่ได้คือความเรียบและความแข็งแรงที่ได้เพิ่มขึ้น 20-30 % [4]

ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้นำ เหล็กกล้า 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก SR 24 เหล็ก SK 4 เหล็ก S45C เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201 ที่ผ่านกระบวนการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่งมาทดสอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบแรงดึง (Tensile testing) เพื่อตรวจสอบค่าความแข็งแรงคราก (Yield stress) และระยะยืด (Elongation) และตรวจสอบผ่านกล้อง SEM

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับเหล็กหลังจากการแช่ด้วยสภาวะเย็นยวดยิ่ง ด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile testing) เพื่อตรวจสอบค่าความแข็งแรงคราก (Yield stress) และระยะยืด (Elongation) และตรวจสอบผ่านกล้อง SEM
2. ศึกษาชนิดของเหล็กที่เกิดผลกระทบจากกระบวนการแช่ด้วยสภาวะเย็นยวดยิ่ง 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก SR 24 เหล็ก SK 4 เหล็ก S45C เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ตัวแปรต้น

1.3.1.1 ศึกษาผลของชนิดของเหล็กที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกัน 5 ชนิด

- 1 เหล็ก SR 24
- 2 เหล็ก SK 4
- 3 เหล็ก S45C
- 4 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304
- 5 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201

1.3.1.2 กำหนดระยะเวลาในการแช่ไนโตรเจนเหลว 7 เงื่อนไข ดังนี้

- ไม่ผ่านกระบวนการ
- แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร
- แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร
- แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร
- แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

1.3.2 ตัวแปรตาม

1.3.2.1 ค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength)

1.3.2.2 ลักษณะโครงสร้างของเหล็ก 5 ชนิด ที่ผ่านกระบวนการแช่ด้วยสถานะเย็นยวดยิ่ง

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

1.3.3.1 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง ความยาว 300 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร

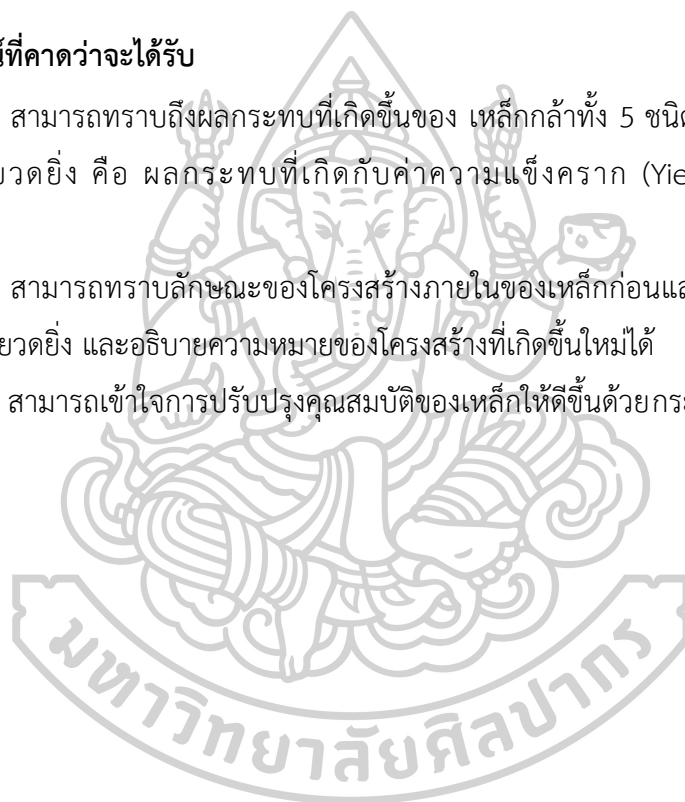
1.3.3.2 กำหนดค่าของความดันต่อตารางเซนติเมตรที่ 200 kgf/cm²

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นของ เหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด ที่ผ่านกระบวนการแช่สถานะเย็นยวดยิ่ง คือ ผลกระทบที่เกิดกับค่าความแข็งแรงคราก (Yield strength) ระยะยืด (Elongation)

1.4.2 สามารถทราบลักษณะของโครงสร้างภายในของเหล็กก่อนและหลังผ่านกระบวนการแช่สถานะเย็นยวดยิ่ง และอธิบายความหมายของโครงสร้างที่เกิดขึ้นใหม่ได้

1.4.2 สามารถเข้าใจการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กให้ดีขึ้นด้วยกระบวนการแช่ด้วยสถานะเย็นยวดยิ่ง



บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไครโอเจนิคส์ (Cryogenic)

ในความหมายของไครโอเจนิคส์ เป็นการทำความเย็นชนิดหนึ่ง แต่แตกต่างจากการทำความเย็นโดยทั่วไป กล่าวคือการทำความเย็นที่เราพบเห็นโดยทั่วไปอุณหภูมิจะลดต่ำลงไม่มาก เมื่อเทียบสถานะของการทำความเย็นแบบไครโอเจนิคส์ อุณหภูมิที่สามารถทำได้ต่ำกว่า $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$

สถานะในการทำความเย็นแบบไครโอเจนิคส์นั้น (ต่ำกว่า $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$) จะมีผลต่อโครงสร้างวัสดุอย่างมากยกตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อถูกอุณหภูมิต่ำมาก ๆ โครงสร้างภายในจะเปลี่ยนแปลงไปทำให้เหล็กกล้านั้นมีความเปราะ จนถึงมีการแตกร้าวในเนื้อวัสดุ

แนวทฤษฎีของไครโอเจนิคส์เริ่มต้นในช่วงทศวรรษ 1860 เป็นแนวความคิดลดอุณหภูมิของก๊าซให้มีความเย็นใกล้อุณหภูมิจุดวิกฤติ จนสถานะของก๊าซนั้นเป็นของเหลว ตัวอย่างก๊าซที่มีความคิดที่จะลดอุณหภูมิจากเป็นของเหลว เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน

ในปี 1877 ซาลเลทท์ (Caillet) นักวิทยาศาสตร์ประเทศฝรั่งเศส และ พิคเต็ต (Pictet) นักวิทยาศาสตร์ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ทั้งคู่ได้ร่วมกันทำให้ออกซิเจนเป็นของเหลวได้เป็นผลสำเร็จ งานของพวกเขาได้ทำการทดลองก๊าซออกซิเจน ศึกษาพฤติกรรมจุดเดือด และจุดหลอมเหลวของก๊าซออกซิเจน ศึกษาการทำความเย็น การแลกเปลี่ยนความร้อนของสาร

ในปี 1892 ดีวอร์ (Dewar) ได้พัฒนาถังเก็บบรรจุก๊าซที่มีความเย็นต่ำ ประกอบไปด้วย ฉนวนแก้วจำนวน 2 ชั้น ภายในเป็นสุญญากาศ ฉนวนภายในเคลือบด้วยเงิน ทำให้อุณหภูมิเย็นได้นานขึ้น ก๊าซที่เขาเก็บเป็นก๊าซฮีเลียมและไนโตรเจนเหลวมาป้องกันการแผ่รังสีความร้อน

ทฤษฎีการทำความเย็นโดยใช้อุปกรณ์ทางกล มี คาร์ล วอน ลินเด (Carl Von Linde) ในปี 1870 เขาได้เขียนหนังสือออกมา การใช้วิธีการทางกล ในการดึงเอาความร้อนออกจากสาร จนสารมีอุณหภูมิต่ำ โรงงานต้มเหล้าในออสเตรเรีย ได้นำการออกแบบความเย็นของเขามาใช้ในการผลิตเหล้า 11 ปี หลังจากนั้นก็มีโรงงานมากกว่า 1000 แห่ง นำอุปกรณ์ความเย็นที่เขาได้ออกแบบมาใช้ในโรงงาน ลินเดได้ทำการศึกษาอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับหลักการอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และงานของทอมสัน และจูล ในปี 1895 ลินเด ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ที่สามารถทำให้อากาศเป็นของเหลวได้ ซึ่งเป็นการเตรียมการเอาไว้ในการที่จะทำให้ออกซิเจนเป็นของเหลวต่อไป

กระบวนการในการทำให้เป็นของเหลวของลินเด ขึ้นอยู่กับก๊าซที่มีความดันสูง และผลของทอมสัน-จูล แต่เป็นที่น่าเสียดายที่ว่ากระบวนการนี้มีอัตราการสูญเสียพลังงานที่มากเกินไป

ในปี 1902 จอร์จ คลอด (Geoge Claude) นักวิทยาศาสตร์ของฝรั่งเศส ได้พัฒนาเครื่องอัดแบบลูกสูบ ที่ทำให้อากาศเป็นของเหลว โดยออกเป็นงานทางกล กระบวนการนี้ให้ประสิทธิภาพ

ทางด้านพลังงานมากกว่า และทำงานที่ความดันต่ำ อากาศที่เป็นของเหลวถูกสร้างขึ้นในกระบวนการนี้ ในภายหลังได้เป็นบริษัท แอร์โค (Airco)

2.2 ของไหลที่ใช้ในระบบโครโอจีนิกส์

2.2.1 ไนโตรเจนเหลว (Nitrogen: N_2)

ไนโตรเจนเหลวจัดว่าเป็นก๊าซเฉื่อย ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่กัดกร่อน มีความเย็นเยือกยิ่งและไม่ติดไฟ อัตราการขยายตัวของไนโตรเจนเหลว 1:694 ถ้าเกิดอุบัติเหตุรั่วไหลบริเวณนั้นจะเป็นจุดอัดออกซิเจน (การละลายของก๊าซออกซิเจนในอากาศจะต่ำกว่าระดับความจำเป็นในการหล่อเลี้ยงชีวิต) จะหายใจไม่ออก และถ้าบริเวณนั้นมีสิ่งมีชีวิตสิ่งมีชีวิตนั้นจะตายในที่สุด

2.2.2 อาร์กอน (Argon: Ar)

อาร์กอนเหลวจัดว่าเป็นก๊าซเฉื่อย ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่กัดกร่อน มีความเย็นเยือกยิ่งและไม่ติดไฟ อัตราการขยายตัวของไนโตรเจนเหลว 1 : 840 ถ้าเกิดอุบัติเหตุรั่วไหลบริเวณนั้นจะเป็นจุดอัดออกซิเจน (การละลายของก๊าซออกซิเจนในอากาศจะต่ำกว่าระดับความจำเป็นในการหล่อเลี้ยงชีวิต) จะหายใจไม่ออก และถ้าบริเวณนั้นมีสิ่งมีชีวิตสิ่งมีชีวิตนั้นจะตายในที่สุด

2.2.3 ฮีเลียม (Helium: He)

ฮีเลียมเหลวจัดว่าเป็นก๊าซเฉื่อย ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่กัดกร่อน มีความเย็นเยือกยิ่งและไม่ติดไฟ อัตราการขยายตัวของไนโตรเจนเหลว 1 : 700 ถ้าเกิดอุบัติเหตุรั่วไหลบริเวณนั้นจะเป็นจุดอัดออกซิเจน (การละลายของก๊าซออกซิเจนในอากาศจะต่ำกว่าระดับความจำเป็นในการหล่อเลี้ยงชีวิต) จะหายใจไม่ออก และถ้าบริเวณนั้นมีสิ่งมีชีวิตสิ่งมีชีวิตนั้นจะตายในที่สุด

2.2.4 ไฮโดรเจน (Hydrogen: H_2)

ไฮโดรเจนเหลวจัดว่าเป็นก๊าซเฉื่อย ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่กัดกร่อน มีความเย็นเยือกยิ่งและไม่ติดไฟ อัตราการขยายตัวของไนโตรเจนเหลว 1 : 700 ถ้าเกิดอุบัติเหตุรั่วไหลบริเวณนั้นจะเป็นจุดอัดออกซิเจน (การละลายของก๊าซออกซิเจนในอากาศจะต่ำกว่าระดับความจำเป็นในการหล่อเลี้ยงชีวิต) จะหายใจไม่ออก และถ้าบริเวณนั้นมีสิ่งมีชีวิตสิ่งมีชีวิตนั้นจะตายในที่สุด

ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิและความดันของ ไนโตรเจนเหลว อาร์กอนเหลว ฮีเลียมเหลว และ ไฮโดรเจนเหลว

	จุดเดือด			จุดเยือกแข็ง			อุณหภูมิวิกฤติ			ความดัน วิกฤติ Psia (atm)
	K	°F	°C	K	°F	°C	K	°F	°C	
N ₂	77.3	-320.5	-195.8	63.4	-320.5	-210.0	126.1	-232.4	-146.9	493 (33.5)
Ar	87.4	-297.6	-185.9	63.46	-308.9	-189.4	150.8	-188.4	-122.4	705 (48.0)
He	4.26	-452.1	-268.9	0.9	-458.0	-272.2	5.2	-450.3	-268.0	33.2(2.3)
H ₂	20.4	-423.0	-252.5	13.98	-431.4	-259.1	32.9	-399.9	-240.3	12.76 atm

2.3 การปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือด้วยการทำโครโอจีนิกส์

การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรง ความต้านทานการสึกหรอเพื่อให้เหมาะแก่การใช้งาน สามารถทำได้โดยกระบวนการทางความร้อน เช่น การชุบแข็งและการอบคืนตัว แต่อย่างไรก็ตาม ในศาสตร์ทางด้านโลหะวิทยานั้น มีการนำเอากรรมวิธีซึ่งอาศัยความเย็นหรือการแช่แข็ง (Cryogenic treatment) มาปรับปรุงสมบัติทางกลให้แก่โลหะ ทั้งชนิดโลหะที่เป็นโลหะกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็กอย่างโลหะผสมอลูมิเนียม แต่ที่มีการทำกันอย่างแพร่หลายนั้นจะเป็นการนำเอาวิธีการแช่แข็งมาปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะในกลุ่มเหล็ก โดยเฉพาะสมบัติด้านการสึกหรอหรือแม้แต่การปรับปรุงความสามารถในการกลึงไส

ตัวอย่างกลุ่มโลหะกลุ่มเหล็ก เช่น เหล็กประเภททำแบริ่ง (Bearing steels) กลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steels) โดยกระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้าเครื่องมือในกลุ่มความเร็วสูง (High speed tool steels) จะมีการนำเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผ่านการชุบเย็น (Quenching) ในตัวกลางเช่น ก๊าซ ไปเย็นตัวต่อจากอุณหภูมิห้องในตัวกลางที่เย็นจัดจนอุณหภูมิของเหล็กกล้าเครื่องมือที่นั้นลดลงจนถึงการแช่แข็ง แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้เป็นเวลานาน ก่อนที่จะนำมาอบคืนตัวแบบปกติ ซึ่งพบว่าเพิ่มความแข็งแรง ยืดอายุการใช้งานเครื่องมือตัด (Cutting tool) ออกไปได้ และยังทำให้เกรนของโลหะมีความละเอียดขึ้น[5]

2.3.1 การทำไครโอเจนิคส์ (Cryogenic treatment)

เทคโนโลยีการทำไครโอเจนิคส์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะในกลุ่มเหล็ก หมายถึง การทำให้โลหะนั้นเย็นจัดจนเกิดการแช่แข็งในบางครั้งอาจต่ำถึง $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วคงค้างไว้ที่อุณหภูมิเท่าเดิมเป็นเวลา 12-48 ชั่วโมง แล้วจึงค่อยๆให้ความร้อนเพื่ออบคืนตัวในสภาพที่เหมาะสมโดยมากกระบวนการนี้มักใช้กับวัสดุกลุ่มเครื่องมือ (Tool material) เช่น เหล็กกล้าเครื่องมือ เหล็กหล่อที่มีโครเมียมสูง กลุ่มกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติค เป็นต้น หลักการพื้นฐานของกระบวนการไครโอเจนิคส์นั้นจะเป็นการทำให้โลหะที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติเกิดการเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแช่แข็ง แล้วคงอุณหภูมินั้นไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง เรียกระยะเวลาดังกล่าวว่า เวลาในการแช่แข็ง จากนั้นจึงค่อยๆทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิห้อง ในกระบวนการนี้จะต้องมีการควบคุมอัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิต่ำนั้นไม่เร็วเกินไปเพราะงานอาจเกิดการแตกร้าวได้ แม้ในระหว่างการทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิห้องก็เช่นกัน ที่จะต้องไม่เร็วเกินไป มิเช่นนั้นอาจเกิดความเสียหายได้[6]

โดยทั่ว ๆ ไปนั้นการจำแนกการทำไครโอเจนิคส์จะจำแนกตามช่วงอุณหภูมิได้ 3 ช่วง [7, 8]

- การแช่เย็น การทำให้เย็นต่ำกว่าศูนย์องศา โดยอยู่ในช่วงที่มากกว่าเท่ากับ $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$
- การแช่แข็งแบบตื้น (Shallow cryogenic treatment) ซึ่งอาจจะเรียกอีกอย่างว่าการทำ sub-zero treatment มีช่วงอุณหภูมิการแช่แข็งระหว่าง -80 ถึง $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$
- การแช่แข็งแบบลึก (Deep cryogenic treatment) มีช่วงอุณหภูมิการแช่แข็งระหว่าง -160 ถึง $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$

การทำไครโอเจนิคส์ที่ทำกับโลหะกลุ่มเหล็กจะเป็นการแช่แข็งแบบลึกเนื่องจาก การที่โลหะถูกทำให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิต่ำมาก ๆ นั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับสารทำความเย็นที่ใช้ในการบวนการไครโอเจนิคส์สำหรับงานทางด้านโลหะนั้น ได้แก่ ไนโตรเจนเหลว (อุณหภูมิ หลอมเหลวอยู่ที่ $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ณ ความดันบรรยากาศ) และฮีเลียมเหลว (อุณหภูมิ $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$) โดยไนโตรเจนเหลวนั้น เมื่อบรรจุในถังที่มีความแข็งแรงและเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีก็สามารถส่งไปยังที่ต่าง ๆ ได้โดยมีความปลอดภัยสูงเนื่องจากไม่ติดไฟนอกจากนั้นยังเป็นสารที่มีราคาถูกกว่าฮีเลียมในทางด้านอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้ไนโตรเจนเหลวมากกว่าฮีเลียม[1, 9]

2.3.2 กระบวนการทำไครโอเจนิคส์ที่ทำกับเหล็กกล้าเครื่องมือประกอบด้วย 5 ขั้นตอน

การทำไครโอเจนิคส์เป็นการทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือที่ชุบแข็ง มีการเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิต่ำ แช่แข็ง คงค้างไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง แล้วจึงอบคืนตัวตามปกติ ดังนั้นจึงแบ่งขั้นตอนออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

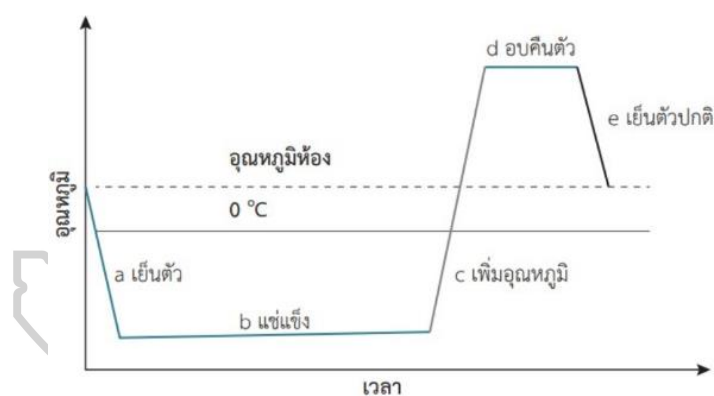
2.3.2.1 การเผาให้เป็นออสเตนไนต์ เป็นการเผาเหล็กกล้า เครื่องมือจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนโครงสร้าง เป็นออสเตนไนต์ ซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน $0.5\text{-}1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที คือขั้นตอนการเผาเพื่อชุบแข็ง

2.3.2.2 ทำให้เย็นตัวอย่างต่อเนื่องจากอุณหภูมิที่เผาให้เป็นออสเตนไนต์ จนถึงอุณหภูมิแช่แข็งด้วยอัตราเย็นตัว $1.5\text{-}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที

2.3.2.3 การแช่แข็งหรือการทำไครโอเจนิคส์ เป็นระยะเวลา $24\text{-}40$ ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ

2.3.2.4 ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการแช่แข็งจนถึงอุณหภูมิห้องด้วยอัตราให้ความร้อน $0.5\text{-}1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที

2.3.2.5 การอบคืนตัวอุณหภูมิการอบคืนตัวต้องต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทกตอยด์ที่ทำให้เหล็กกล้าเกิดการเปลี่ยนเฟส ช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัวโดยทั่วไปของเหล็กกล้าเครื่องมืออยู่ที่ประมาณ $450\text{-}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง [10-12]



รูปที่ 2.1 ภาพจำลองอุณหภูมิ-เวลา ของการทำไครโอเจนิคส์ [13]

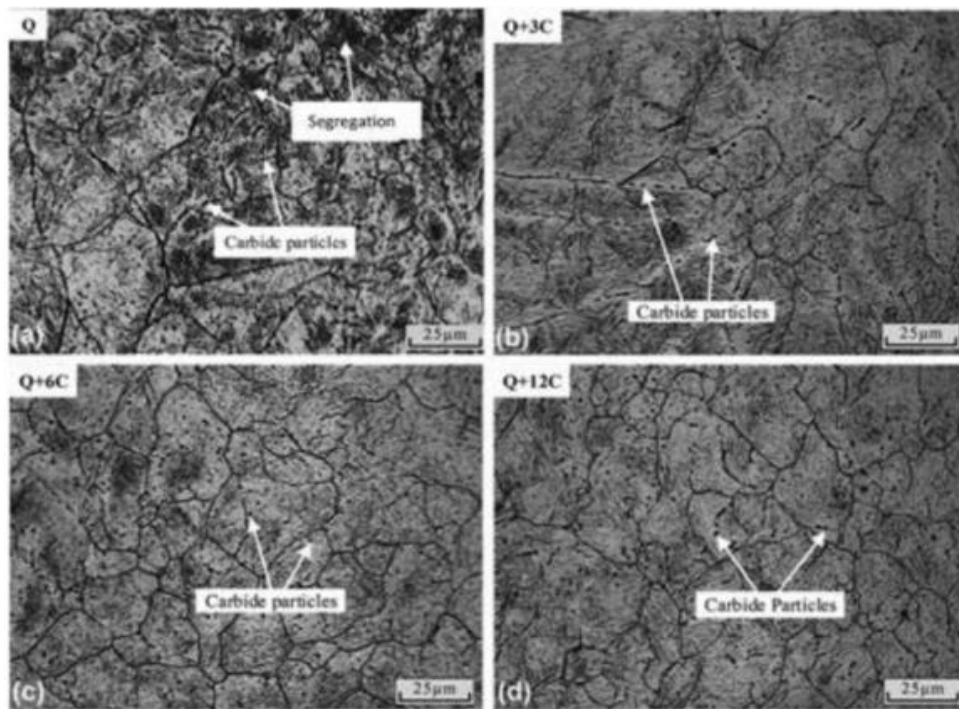
ในแผนภาพนี้จะแบ่งการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนออกเป็นช่วง ทั้งหมด 4 ช่วงด้วยกัน ในช่วง a เป็นช่วงการเย็นตัวต่อจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิการแช่แข็ง โดยที่ทำการชุบเย็นโดยใช้สารเคมีเช่น ไนโตรเจนเหลว ช่วง b เป็นช่วงของการแช่แข็งหรือไครโอเจนิคส์ โดยเป็นการให้เหล็กกล้าเครื่องมืออยู่ในตัวกลางที่เย็นจัด เป็นระยะเวลาตั้งแต่ $24\text{-}36$ ชั่วโมง จากนั้นในช่วง c จะเป็นช่วงที่ทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการแตกร้าว จนถึงช่วง d ที่เป็นช่วงของการอบคืนตัวและสุดท้ายช่วง e เป็นการเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง

การแช่แข็งเหล็กกล้าหรือการทำโครโอจีนิกส์เหล็กกล้าเครื่องมือ หลังจากการเผาอสเทนไนต์ในระหว่างการชุบแข็งจะช่วยให้ปริมาณอสเทนไนต์เหลือค้างลดลง เนื่องจากเหล็กกล้าเครื่องมือมีการเย็นตัวผ่านอุณหภูมิ สิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์หรืออุณหภูมิของมาร์เทนไซต์ เพราะเหล็กกล้าเครื่องมือซึ่งมีปริมาณธาตุผสมสูงนั้นอุณหภูมิของมาร์เทนไซต์มักจะต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นเมื่อถูกทำให้เย็นตัวต่อด้วยการทำโครโอจีนิกส์ ออสเทนไนต์จึงสามารถเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ได้มากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการใช้สารชุบทั่วไป เช่น ก๊าซที่ไม่อาจทำอุณหภูมิให้เย็นจัดได้ ผลของการที่เหล็กกล้าเครื่องมือผ่านการชุบแข็งมีปริมาณอสเทนไนต์เหลือค้างลดลงจะส่งผลทำให้เมื่ออบคืนตัวจะได้ปริมาณคาร์ไบด์ละเอียดหรือ Secondary Carbide ที่ตกผลึกมาก ส่งผลให้สมบัติทางกลที่โดยเฉพาะความต้านทานการสึกหรอดีขึ้นนั่นเอง โดยที่ความแข็งอาจจะไม่แตกต่างจากการชุบแข็งโดยไม่ทำโครโอจีนิกส์มากนัก ดังนั้นการทดลองเกี่ยวกับอุณหภูมิและระยะเวลาการแช่แข็งที่เหมาะสมกับเหล็กกล้าเครื่องมือประเภทต่าง ๆ โดยเฉพาะเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานขึ้นเย็นที่ต้องการเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคุณสมบัติความต้านทานการสึกหรอที่ดี [5, 14, 15]

ดังนั้นสิ่งที่สำคัญนอกเหนือจากเวลาในการแช่แข็งที่เหมาะสมแล้ว การควบคุมอัตราการเย็นตัวในระหว่างขั้นตอนการเย็นตัวจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิแช่แข็ง และอัตราการให้ความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่ออบคืนตัว ก็จัดว่าเป็นเรื่องสำคัญที่ควรจะต้องออกแบบให้เหมาะสม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วอาจทำให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้[16]

2.3.3 โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล

การทำโครโอจีนิกส์จะช่วยให้ปริมาณของอสเทนไนต์เหลือค้างลดลงและส่งผลต่อการตกผลึกของคาร์ไบด์ละเอียดในขณะที่ทำการอบขึ้นรูป ในรูปที่ 2.2 เป็นภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานความร้อนที่ผ่านการชุบแข็งและโครโอจีนิกส์ที่อุณหภูมิ -196°C เป็นระยะเวลาต่าง ๆ กันจากภาพถ่ายของเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็งในรูปที่ 2.2 (a) จะเห็นว่ามาร์เทนไซต์แบบหยาบและมีการกระจุกตัวของคาร์ไบด์ (Segregation) แต่เมื่อผ่านการทำโครโอจีนิกส์จะได้มาร์เทนไซต์ละเอียดและมีคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่ทั่วไปและมีปริมาณอสเทนไนต์ตกค้างลดลง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานร้อน CR7V (a) หลังชุบแข็ง (b) ชุบแข็งแล้ว แช่แข็งที่ -196°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (c) ชุบแข็งแล้วแช่แข็งที่ -196°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (d) ชุบแข็งแล้วแช่ที่ -196°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง [17]

ผลการทำโครโอจีนิคส์ที่มีต่อสมบัติทางกล ความต้านทานการสึกหรอเป็นสมบัติที่สำคัญกับการใช้งานที่มีการเคลื่อนที่สัมผัส เช่น เครื่องมือสำหรับงาน กลึงไส แบรึง เฟือง และอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าการทำโครโอจีนิคส์ช่วยให้สมบัติทางด้านความต้านทานการสึกหรอดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความแข็งนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยทั้งนี้เป็นผลของการที่คาร์ไบด์ละเอียดตกผลึกในเนื้อพื้นของเทมเปอร์มาร์เทนไซต์นอกเหนือจากความต้านทานการสึกหรอแล้วสมบัติอื่นเช่น ความทนทานการแตกหัก (Fracture toughness) ซึ่งเป็นสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์ไบด์และออสเทนไนต์ตกค้างโดยตรง ดังสมการของค่าวิกฤติ (Critical value) ของตัวประกอบความเข้มความเค้น (Stress intensity factor) เรียกว่า Fracture toughness[18]

ตารางที่ 2.2 สมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือภายหลังการทำโครโอจีนิก [7]

วัสดุ	การทดสอบ	ความต้านทานการสึกหรอ	ความแข็ง
AISI M2 (High speed tool steel)	Pin-on-disk	ไม่เปลี่ยนแปลง	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย
	แรงบิด	+343 % tool life	
	การสึกหรอบนผิวหลับ	+86.6 %	
AISI D3 (Cold worked)	Pin-on-disk	+174 %	เปลี่ยนแปลง เล็กน้อย

2.4 คุณสมบัติทางกลและการทดสอบวัสดุ

2.4.1 คุณสมบัติของวัสดุและการทดสอบ

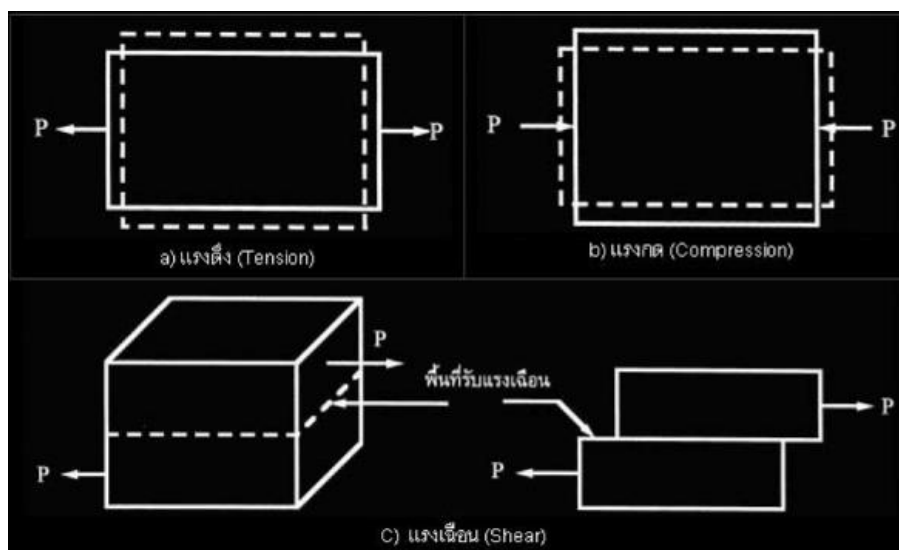
ในการพิจารณาเลือกวัสดุ เพื่อนำมาใช้งานในลักษณะต่าง ๆ จำเป็นจะต้องทราบถึงคุณสมบัติของวัสดุเพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมกับสภาพงานนั้น ๆ คุณสมบัติของวัสดุที่ต้องพิจารณา ได้แก่

- คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ ได้แก่ การกัดกร่อน ส่วนผสม และลักษณะโครงสร้างทางเคมีของส่วนผสมในวัสดุเป็นต้น
- คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties) เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ไม่เกี่ยวกับแรงที่มากระทำแต่เกี่ยวกับคุณภาพหรือคุณลักษณะของเนื้อวัสดุ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ การนำความร้อน สัมประสิทธิ์การขยายตัว ความหนาแน่น และความต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น
- คุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) เป็นคุณสมบัติเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ คุณสมบัติทางกลได้แก่ ความแข็งแรง ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว ความยืดหยุ่น ความเหนียว เป็นต้น

ในทางวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อจะเลือกใช้วัสดุใด ๆ ก็ตามสิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ คุณสมบัติเชิงกลของมันการที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใด ๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้นเป็นสิ่งสำคัญ

ความเค้น (Stress) หมายถึงแรงต้านภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่า เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านภายใน โดยทั่วไปความเค้นแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

- ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.3a



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของแรงกระทำชนิดต่าง ๆ [19]

- ความเค้นแรงอัด (Compressive stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.3b

- ความเค้นแรงเฉือน (Shear stress) ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากกระทำในทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนที่ผ่านจากกันดังรูปที่ 2.3c มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear force) ทหารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนาดเท่ากับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมกัน

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลงานจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

- การเปลี่ยนแปลงรูปแบบยืดหยุ่นหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic deformation or Elastic strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยังต่อเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุรูปร่างคงเดิมไว้ได้ ตัวอย่าง พวกยางยืด สปริง ถ้าเราดึงแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

- การเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic deformation or Plastic strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูก

เปลี่ยนไปนั้น โดยที่อะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิมวัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับแรงที่มากกระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic limit) แล้ววัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมแบบอิลาสติก (Elastic behavior) แต่ถ้าพิกัดความเค้นเกินพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic deformation) นอกจากความเครียดทั้งสองชนิดแล้ว ยังมีความเครียดอีกชนิดหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลิเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

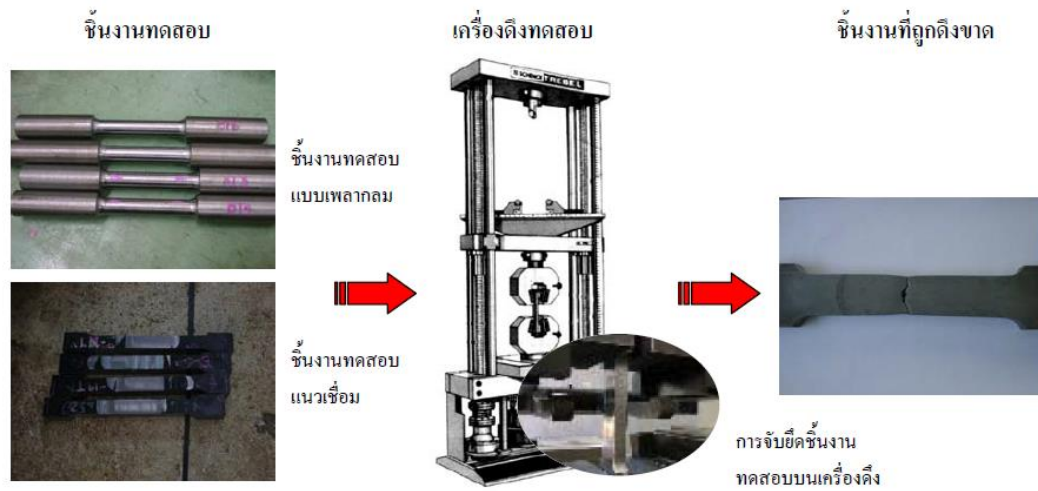
- แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากกระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

- แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือนค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain relationship)

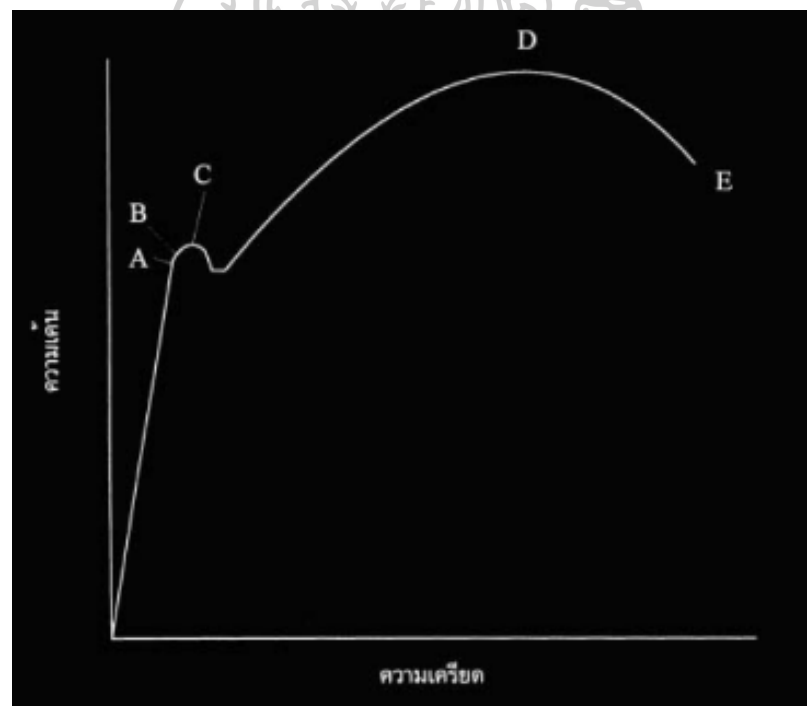
ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นหลัก โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูปที่ 2.4 การทดสอบแรงดึงนอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ ความเหนียวของวัสดุ (Brittleness and ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย

การทดสอบแรงดึง (Tension test)

วิธีการทดสอบนั้น จะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ และบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพล็อตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.5 ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานทดสอบมีต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ นั้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐาน ASTM (American society of testing and materials) BS (British standards) JIS (Japanese industrial standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นงานทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย



รูปที่ 2.4 วิธีการทดสอบแรงดึง [19]



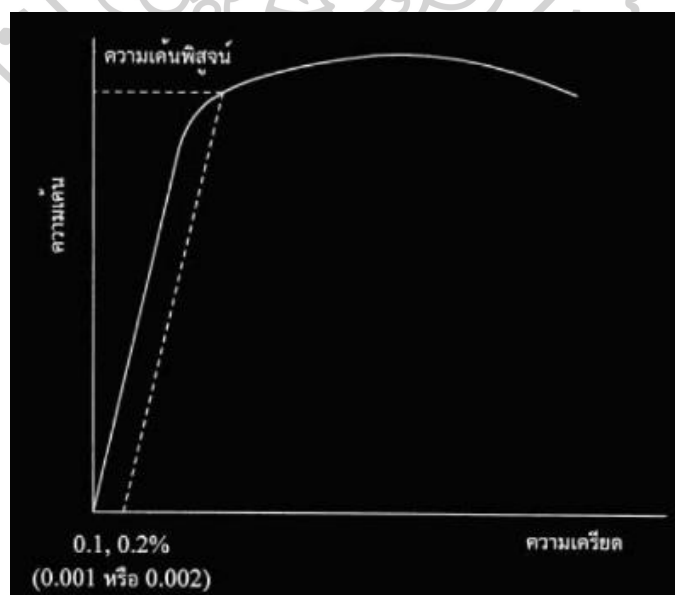
รูปที่ 2.5 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) แบบมีจุดคราก (Yield point) [19]

จากเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า เมื่อเริ่มดึงชิ้นงานทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นงานทดสอบจะค่อยๆยืดออกจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้เรียกว่าพิกัดสัดส่วน (Proportional limit) และ

ภายใต้พิภักต์สัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิภักต์สัดส่วน เส้นกราฟจะค่อยๆ โค้งออกจากเส้นตรงวัสดุหลายชนิดยังแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด B) เรียกว่าพิภักต์ยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent deformation or offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้แล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวงเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือ Yield strength ค่า Yield strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรรมมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

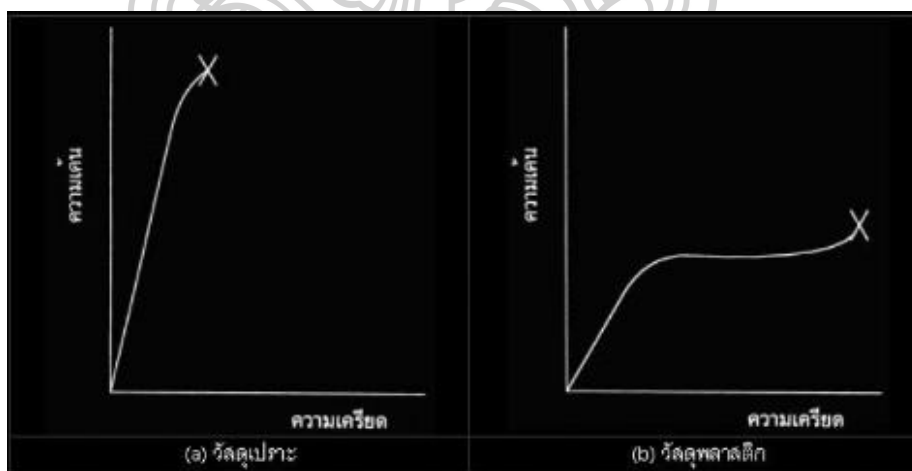
วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10-0.20 % ของความยาวกำหนดเดิม (Original gage length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางขวา ดังรูปที่ 2.6 ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2 offset ดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [19]

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อยๆเพิ่มอย่างช้า ๆ หรืออาจจะเป็นคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ค่านี้อาจใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วยคำว่า ความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไป จะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นั่นเอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture strength) จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไปพื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูปที่ 2.7 a ทำนองเดียวกันกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle material) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนในกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดการแตกหักโดยที่ต่อองการความเค้นสูงขึ้นไป ดังรูปที่ 2.7 b



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก [19]

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

-ความเหนียว (Ductility) ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ การยืดตัว (Percentage elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of area) ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %EI มากกว่าเพราะสะดวกในการวัดความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมันเป็นคือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%EI สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด และอื่น ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ (เพราะ Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้

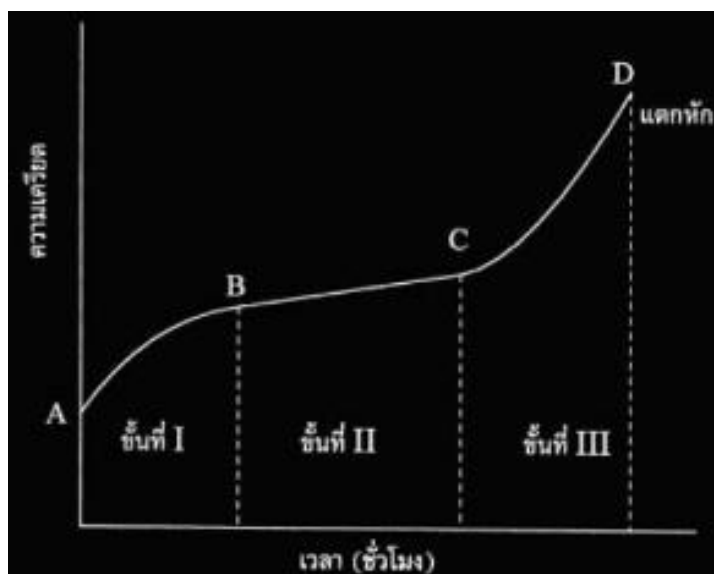
-Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้อิทธิพลของวัสดุที่มีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of elasticity E หรือ Young' Modulus หรือ Stiffness มักมีหน่วยเป็น ksi (1ksi=1000psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa ถ้าแรงที่มากกระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G) ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูงวัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอีลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอีลาสติกได้มาก ค่า E และ G มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ ตารางที่ 2.3 จะแสดงตัวอย่างค่า E และ G ของวัสดุต่าง ๆ

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าคงที่ E และ G ของวัสดุชนิดต่าง ๆ [19]

วัสดุ	Modulus of elasticity 10 ⁶ psi	Shear Modulus 10 ⁶ psi
Aluminium alloy	10.5	4.0
Copper	16.0	6.0
Steel (plain carbon and low alloy)	29.0	11.0
Stainless steel (18.8)	28.0	9.5
Titanium	17.0	6.5

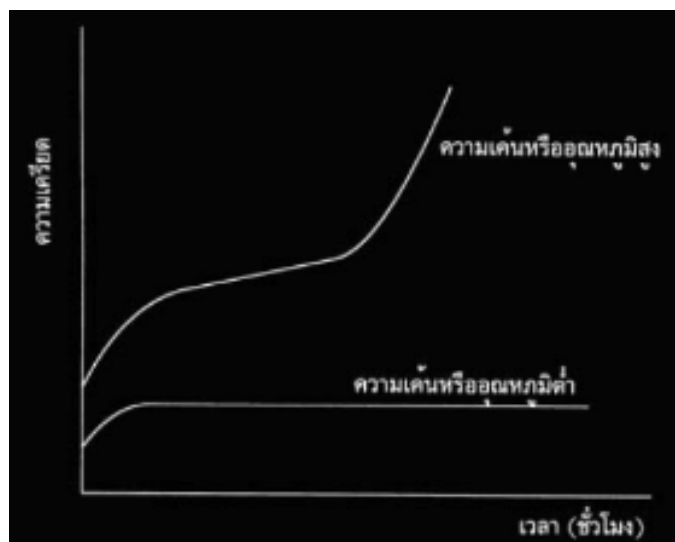
ความคืบ (Creep)

วัสดุส่วนใหญ่อยู่ภายใต้แรงที่มากกว่าพิคภัยยืดหยุ่น หากทิ้งไว้นาน ๆ แล้ว ก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหรือแบบพลาสติกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ด้วยปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่าความคืบ ปริมาณความคืบที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ปริมาณความเค้น อุณหภูมิ และเวลา หากเราให้สภาวะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอ ความคืบจะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เส้นโค้งความคืบ [19]

เมื่อเราใช้แรงกระทำคงที่จะเกิดความเครียด (OA) ขึ้นทันที ซึ่งค่าความเครียด OA นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและสภาวะที่ให้ (ปริมาณของแรงกระทำ ความเค้นและอุณหภูมิ) และจะมีความสัมพันธ์กับค่า Modulus of elasticity (E) ของวัสดุนั้น หลังจากนั้นวัสดุก็จะเริ่มเกิดความคืบในขั้นที่ I ซึ่งอัตราการเกิดความเครียดจะค่อยๆ ลดลง AB ในขั้นที่ II (BC) อัตราการเกิดความเครียดคงที่ และอัตราการ creep rate จากนั้นเมื่อถึงขั้นที่ III (CD) อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนวัสดุขาดหรือแตกออกจากกัน ที่จุด D การเกิดความคืบไม่จำเป็นจะต้องครบทั้ง 3 ขั้น ขึ้นอยู่กับสภาวะและเวลาที่ใช้ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 Creep curve ที่ condition ต่างกัน [19]

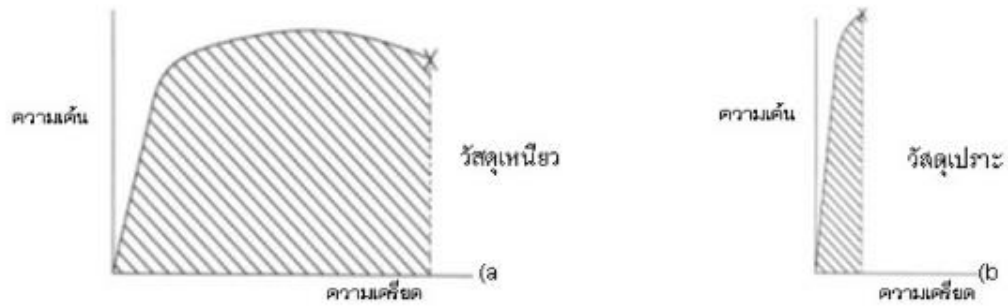
เส้นบน ถ้าเราให้แรงกระทำที่ทำให้เกิดความเค้นหรืออุณหภูมิสูงพอจะเกิดความคืบจนครบ 3 ชั้น แต่ส่วนล่างนั้นมีความเค้นหรืออุณหภูมิต่ำจะมีแค่ 2 ชั้น นั่นคือจะไม่เกิดการแตกหักขึ้น

ในกรณีของพวกโพลีเมอร์อาจเกิดความคืบขึ้นได้ แม้ที่อุณหภูมิห้อง แต่โลหะส่วนใหญ่และพวกเซรามิกจะไม่เกิดความคืบที่อุณหภูมิต่ำแต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงก็อาจเกิดได้ ดังนั้น การใช้พวกโลหะหรือเซรามิกที่อุณหภูมิสูงจะต้องนำคุณสมบัติในการเกิดความคืบมาพิจารณาด้วย

ความแกร่งหรือความเหนียว (Toughness)

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานบางประเภท วิศวกรจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ เพื่อประเมินโอกาสการแตกหักเสียหาย และความปลอดภัย ในขณะที่ใช้งานในสภาวะต่าง ๆ เช่น การใช้งานเหล็กกล้าทนสึกของรถดัมพ์ที่ต้องรับแรงกระแทกจากการบรรทุกหิน เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน หรือเหล็กสำหรับงานท่อความดันที่ใช้ในอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น

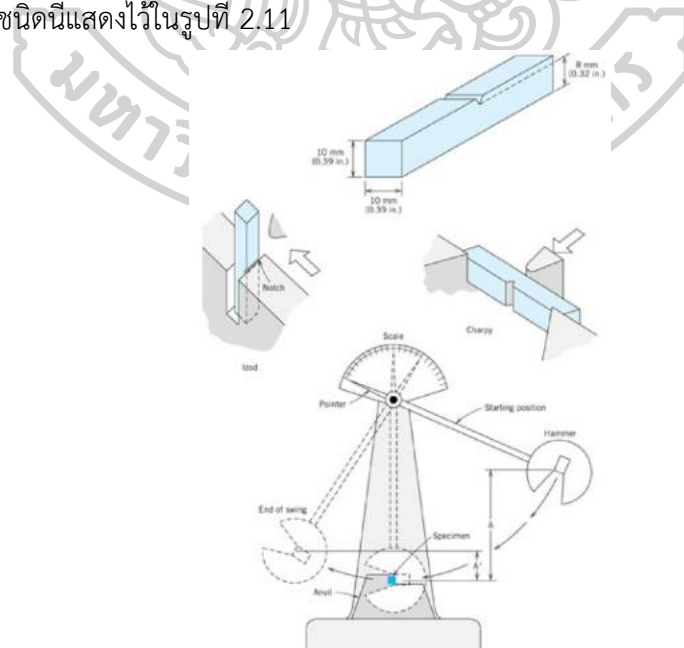
ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรามักจะประเมินค่าความเหนียวจาก Modulus of toughness ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น (σ) ความเครียด (ϵ) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งค่า Modulus of toughness นี้ จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย



รูปที่ 2.10 Modulus of toughness ของวัสดุเหนียว (a) และวัสดุเปราะ (b) [19]

วิธีการทดสอบความเหนียวที่นิยมใช้ คือ การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อทำการวัดค่า Impact energy, Impact transition temperature (ITT) และการศึกษาผิวรอยแตก (Fracture surface) ของวัสดุ โดยการตีชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน จนเกิดการแตกหัก จุดประสงค์ในการทำการทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรับแรงกระแทก (Dynamic load) ของวัสดุ

สำหรับค่าที่นิยมวัดมากที่สุดในการทดสอบแรงกระแทก คือ ค่า Impact energy ซึ่งเป็นพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงกระแทก (Dynamic impact force) จนเกิดการแตกหัก โดยมีวิธีการทดสอบมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ Charpy impact test และ Izod impact test เครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod [19]

วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกัน คือ จะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของตุ้มน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้) พลังงานที่กระแทกชิ้นงานทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่มีลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบชิ้นงานทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นงานทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือค่า Impact energy มีหน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ หรือ จูล

ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod ก็คือ การวางชิ้นงานทดสอบโดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ และให้ลูกตุ้มตกกระแทกที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและลูกตุ้มกระแทกกับด้านที่มีรอยบาก

ชิ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปรูกุญแจ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้



รูปที่ 2.12 ลักษณะของชิ้นงานทดสอบและรอยบากร่อง [19]

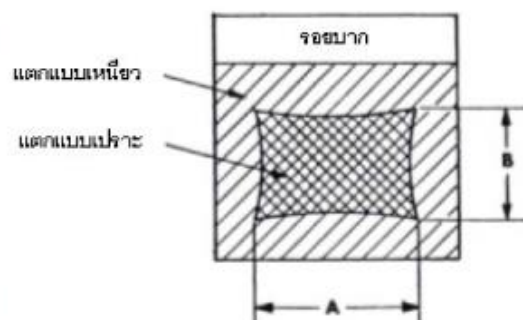
อุณหภูมิมีผลต่อความเหนียวอย่างมาก วัสดุเหนียวอาจเปลี่ยนเป็นวัสดุเปราะได้เมื่ออุณหภูมิต่ำลงถ้าเรานำค่า Impact energy มาพล็อตกับอุณหภูมิ เราจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าของ Impact energy ลดลงอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.13 ค่าอุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า Impact transition temperature (ITT) โดยค่า ITT นี้เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะ คือ เปลี่ยนจากวัสดุเหนียวที่มีพลังงานสูงมาเป็นวัสดุเปราะซึ่งมีพลังงานต่ำ



รูปที่ 2.13 การแช่ชิ้นงานทดสอบในน้ำแข็งเพื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 0 องศา [19]

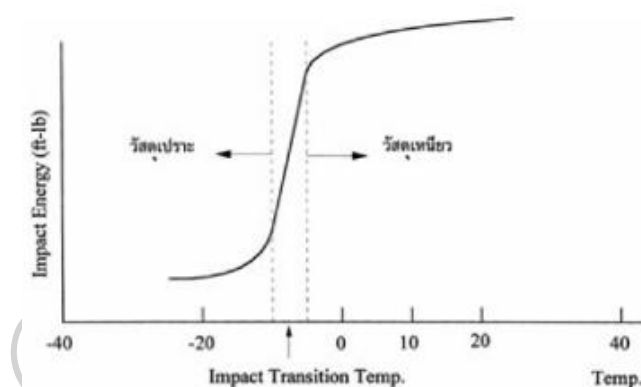
ค่า Impact energy จะไม่นำมาใช้โดยตรงในการออกแบบ แต่มันมีประโยชน์ที่จะใช้เป็นแนวทางในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะพวกเหล็กที่มีค่า ITT อยู่ใกล้กับอุณหภูมิห้อง เราจะต้องระมัดระวังไม่ใช้งานวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่า ITT ของมัน

โดยทั่วไปเราจะกำหนดค่า ITT เป็นค่าเดียว (ไม่ใช่ช่วงอุณหภูมิดังที่แสดงในรูปที่ 2.15) โดยวิธีการกำหนดค่า ITT มีอยู่หลายวิธี เช่น การตรวจสอบผิวรอยแตก (Fracture surface) ของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบแรงกระแทก หรือการกำหนดค่า ITT โดยใช้อุณหภูมิที่ผิวรอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีสัดส่วนของพื้นที่ที่เกิดการแตกเปราะ (Brittle fracture) กับพื้นที่ที่แสดงการแตกแบบเหนียว (Ductile fracture) เป็น 50:50 พอดี (ซึ่งเป็นชื่อเรียกเฉพาะว่า Fracture appearance transition temperature - FATT)



รูปที่ 2.14 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะ และแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก [19]

สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ กำหนดค่า Impact energy ค่าหนึ่งขึ้นมาเป็นเกณฑ์ โดยควรจะมีค่ามากกว่าพลังงานที่วัสดุจะได้รับระหว่างการใช้งาน ถ้าวัสดุได้ทดสอบแล้วมีค่า Impact energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ก็ถือว่าเป็นวัสดุเปราะซึ่งอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย จึงไม่ควรจะนำมาใช้งาน และกำหนดค่า ITT โดยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบได้ค่า Impact energy เท่ากับเกณฑ์ที่กำหนดพอดี (ITT ที่กำหนดโดยวิธีนี้เรียกว่า Ductility transition temperature) ค่าพลังงานแรงกระแทกที่ใช้เป็นเกณฑ์คือ 20 J สำหรับการทดสอบ Charpy V-Notch (ชิ้นงานมีรอยบากรูปตัววี) ดังนั้นวัสดุที่จะนำไปใช้งานจึงควรมีค่า Impact energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด หรืออาจใช้ค่า Ductility transition temperature ในการกำหนดสภาวะการใช้งาน คือ ควรจะใช้งานวัสดุในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า Ductility transition temperature



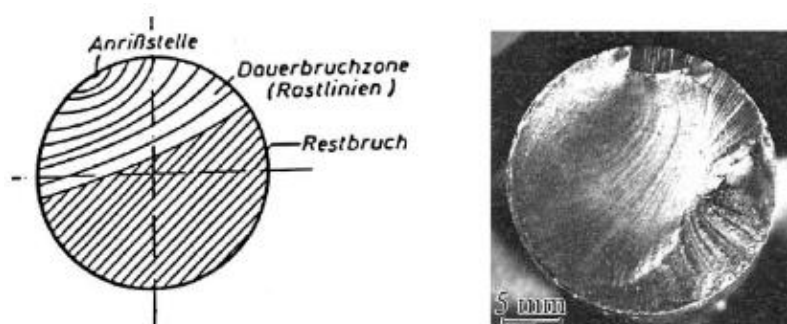
รูปที่ 2.15 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact transition temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ [19]

เนื่องจากแต่ละมาตรฐานการทดสอบ จะใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดและลักษณะรอยบากที่ต่างกันตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบก็ต่างกัน สำหรับมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย เลือกใช้ชิ้นงานที่มีรอยบากเป็นตัวยูจิก 5 มิลลิเมตร ขนาดชิ้นทดสอบเท่ากับ 10x10x50 มิลลิเมตร แต่สามารถใช้การทดสอบที่แตกต่างไปจากนี้ได้ และเขียนสัญลักษณ์แทนไว้ดังนี้

KU 30/3 คือ ทำการทดสอบโดยใช้พลังงานในการกระแทก 30 kg m และใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีรอยบากลึก 3 มิลลิเมตร

ความล้า (Fatigue) เมื่อวัสดุถูกแรงซึ่งต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength) มากกระทำกับไปกลับมาซ้ำ ๆ กันก็อาจเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดความล้าหรือ Fatigue ขึ้น ความล้าที่เกิดในวัสดุนี้ เป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่าง ๆ เพราะตลอดอายุ

การใช้งานของเครื่องจักร เช่น เครื่องยนต์ สวิตช์รีเลย์ และอื่น ๆ จะต้องเกิดความเค้นสลับมาเป็นล้านๆ ครั้ง ทำให้เกิดการล้าขึ้นในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมันได้ ขบวนการเกิดความล้าที่แท้จริงยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก แต่จากการศึกษาพบว่าความล้าจะเกิดเป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรกจะเกิดรอยแตกขึ้น เมื่อมีความเค้นรวมศูนย์ (Stress concentration) ในบริเวณนั้น และในระยะที่สองเมื่อมีความเค้นเข้าไปซ้ำมารอยแตกนี้จะโตขึ้นเรื่อย ๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด วัสดุจะแตกหักจากกัน



รูปที่ 2.16 ลักษณะรอยขาดเนื่องจากการล้าตัว [19]

ถ้าเรากำหนดจำนวนรอบของความเค้นที่ทำซ้ำไปซ้ำมาแล้ว (โดยปกติจะใช้ที่ค่า 10⁶ รอบ) ค่าความเค้นที่จะทำให้วัสดุแตกหักได้ที่จำนวนรอบของความเค้นรอบนั้น ๆ เราเรียกว่า Fatigue strength สำหรับโลหะโดยเฉพาะพวกเหล็ก จะมีค่าความเค้นอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งถ้าใช้ความเค้นต่ำกว่านี้แล้ว ไม่ว่าจะจำนวนรอบของแรงกระทำจะเป็นเท่าใด วัสดุจะไม่แตกออก ค่าความเค้นนี้เรียกว่า Endurance limit

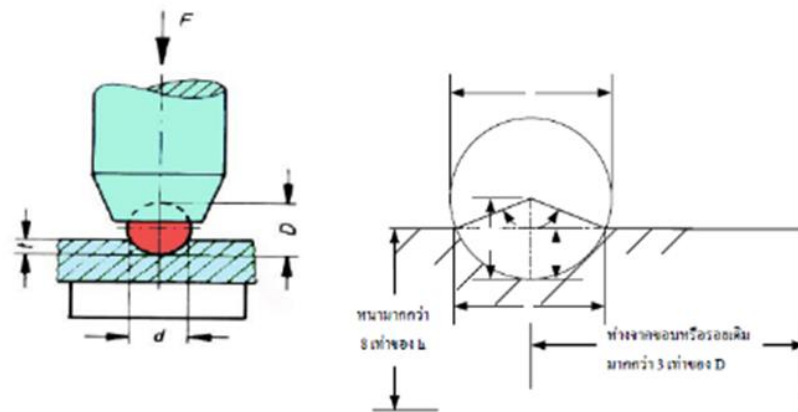
ความแข็ง (Hardness) คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสีและการกรึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีการทดสอบ ที่นิยมใช้ดังนี้

-Brinell hardness test (HB)

เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งลงบนผิวชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความแข็งได้ตามสูตร ดังนี้

$$H_B = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.1)$$

- โดยที่ H_B คือ ค่าความแข็งแบบ Brinell (kgf/mm²)
 P คือ แรงกด (kgf)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอลเหล็กกล้า (mm.)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด



รูปที่ 2.17 การทดสอบแบบ Brinell [19]



รูปที่ 2.18 วิธีการทดสอบแบบ Brinell [19]

แรงกดสำหรับการทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3000 kgf และลูกบอลเหล็กกล้าจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0-10 มิลลิเมตร โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็กหรือเหล็กกล้าและ 30 วินาที สำหรับโลหะนิ่ม (เช่น ตะกั่ว ดีบุก เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโลหะมีความแข็งที่แตกต่างกัน หากโลหะที่ใช้ทดสอบนิ่มและใช้แรงกดมาก จะมีผลทำให้ระยะหัวกดจมลงไปลึกมาก จนอาจเกินกว่าครึ่งลูก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็งผิดพลาดได้ หรือหากเลือกแรงกดน้อยไปเมื่อเทียบกับขนาดของลูกบอลเหล็กก็ทำให้การแปลผลทำได้ไม่แม่นยำเช่นกัน ดังนั้นการเลือกใช้แรงกด และขนาดของลูกบอลจะแตกต่างกันไปด้วย เพื่อป้องกันข้อบกพร่องที่จะพบได้ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ สามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วน P/D² ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วน P/D² [19]

โลหะ	ค่าความแข็งโดยประมาณ (HB)	อัตราส่วน P/D ²
เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ	มากกว่า 100	30
ทองแดง,ทองแดงผสม,อลูมิเนียมผสม	30-200	10
อะลูมิเนียม	15-100	5
ดีบุก,ดีบุกผสม,ตะกั่ว,ตะกั่วผสม	3-20	1

สำหรับการทดสอบเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือโลหะที่มีความแข็งสูงมาก ๆ จะไม่สามารถทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กชุบแข็งได้ จะต้องใช้ลูกบอลทั้งสเตนคาร์ไบด์ขนาด 2.45 มิลลิเมตร แทนซึ่งจะใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่แข็งตั้งแต่ 444 ถึง 627 HB

ข้อควรระวังสำหรับวัดความแข็งด้วยวิธีแบบ Brinell

- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบ เพื่อให้ได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่แน่นอน และผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม นอกจากนี้การเตรียมผิวต้องระวังอย่างมาก โดยหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) กรรมวิธีเย็น (cold working)

- ต้องระวังตำแหน่งการทดสอบโดยให้ระยะหัวกดอยู่ห่างจากขอบของแต่ละด้านของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล ระยะห่างของแต่ละรอยกดห่างกันอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางลูกบอล และชิ้นงานต้องมีความหนาอย่างน้อย 8 เท่าของความลึกของการกด

- ควรวัดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด 2 ครั้งในแนวตั้งฉากกันแล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปคำนวณหาความแข็งต่อไป

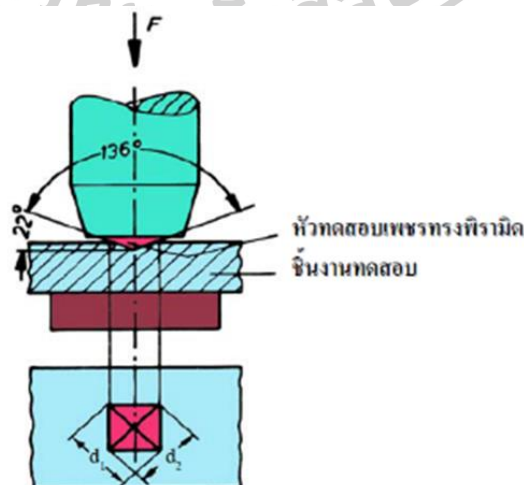
การวัดความแข็งแบบ Brinell มีข้อดี คือ ในการกด 1 ครั้ง จะครอบคลุมหลาย ๆ เฟสของชิ้นงานทำให้ได้ค่าความแข็งที่สม่ำเสมอซึ่งหากวัดด้วยวิธีที่ใช้หัวกดขนาดเล็กมาก อาจทำให้วัดได้เพียงเฟสเดียว ทำให้ค่าความแข็งที่ได้ไม่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งของทั้งวัสดุชิ้นนั้น แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ ชิ้นงานต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะวัดกับหัวกดได้ และไม่ควรวัดกับชิ้นงานที่มีรัศมีผิวโค้งน้อยกว่า 1 นิ้ว

-Vickers hardness test

เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136° (เป็นมุมที่มองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะนิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก ๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึง P/D² และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \quad (2.2)$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm²)
 P คือ แรงกด (kgf)
 d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d₁ และ d₂ เฉลี่ย (mm)



รูปที่ 2.19 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชร Vickers hardness test [19]

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ ได้แก่

- การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิดแต่ขึ้นงานนิ่มและใช้น้ำหนักกดมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหัวกดเพชรตอนคลายหัวกด

- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี oxide scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นงานทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (heating) หรือกรรมวิธีเย็น (cold working)

- ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้ตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุม ทั้งตามแนวแกน x และ y

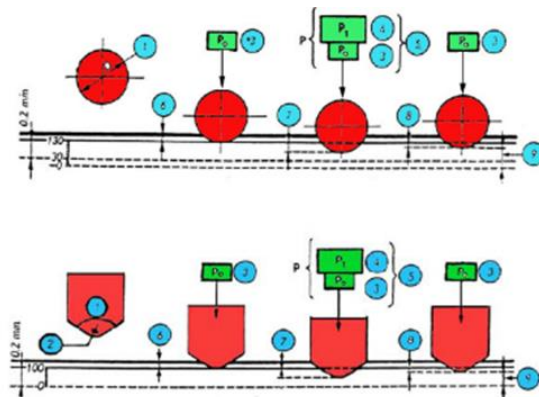
- ความหนาของชิ้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และ หลังการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชิ้นงานทดสอบ

- การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่าน

วิธีทดสอบนี้ไม่เป็นที่ยอมรับในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีการเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้เส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางได้

-Rockwell hardness test

การวัดความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจาก “ความลึก” ระยะกดที่ถูกหัวกดด้วยแรงคงที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบ Brinell และ Vicker ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด แรงที่ใช้กดมี 2 ส่วน คือ minor load และ major load



รูปที่ 2.20 วิธีการทดสอบแบบ Rockwell hardness test [19]

Minor load เป็นแรงที่ยืดหวักดลูกบอลเหล็กชุบแข็ง หรือหวักดเพชรไว้บนผิวโลหะที่จะวัดความแข็ง

Major load เป็นแรงที่มากกว่า minor load และกดลงภายหลังจากให้ minor load กับชิ้นงาน

สำหรับมาตรฐานความแข็งแบบ Rockwell มีอยู่ 15 สเกล (ไม่รวม superficial hard scale)

2.5 วัสดุวิศวกรรม

2.5.1 โลหะผสม(Alloy)

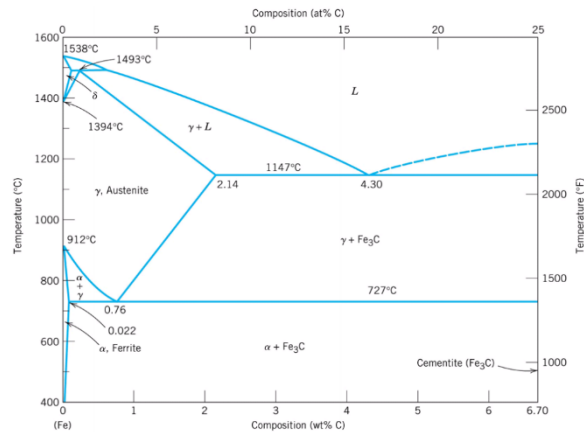
โลหะและโลหะอัลลอยด์มีสมบัติที่เป็นประโยชน์ต่องานทางด้าน วิศวกรรมเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานออกแบบทางด้านวิศวกรรม เหล็กและอัลลอยด์ของเหล็กโดยส่วนใหญ่คือเหล็กกล้าที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ถูกผลิตขึ้นมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของผลผลิตโลหะทั้งหมด เนื่องจากมีความแข็งแรง ความทนต่อแรงกระแทกและมีความเหนียวสูงนอกจากนี้ยังมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น ๆ

อัลลอยด์ของเหล็กจะถูกเรียกว่า Ferrous alloys ส่วนอัลลอยด์โลหะอื่น ๆ จะถูกเรียกว่า Nonferrous alloys โดยทั่วไปเหล็กกล้าประเภท (Plain – carbon) เป็นอัลลอยด์ที่ประกอบด้วยเหล็กและคาร์บอน ที่มีปริมาณไม่เกิน 1.2 เปอร์เซ็นต์ แต่ส่วนใหญ่เหล็กมักมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ เหล็กกล้าส่วนใหญ่จะผลิตขึ้นโดยการออกซิไดซ์คาร์บอน และสารเจือจางอื่น ๆ ที่มีอยู่ในเหล็กถลุงให้มีปริมาณตามต้องการ

2.5.2 การเกิดเฟสไดอะแกรมของเหล็ก - เหล็กคาร์ไบด์

โลหะผสมเหล็ก – คาร์บอนที่ประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 0.03 – 1.2 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีส 0.25 – 1.0 เปอร์เซ็นต์ และธาตุอื่น ๆ เล็กน้อย จะเรียกว่าเหล็กกล้าประเภท Plain – carbon (Plain – carbon steels) เมื่อโลหะผสมเหล็ก - คาร์บอนถูกทำให้เย็นลงอย่างช้า ๆ จะเกิดเฟสต่าง ๆ ขึ้นที่อุณหภูมิและสัดส่วนองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

ดังแสดงในเฟสของไดอะแกรมของ Fe -Fe₃C รูปที่ 2.21 เฟสไดอะแกรมนี้เป็นไดอะแกรมที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุลจริง เพราะสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์ (Fe₃C) ที่เรียกว่า cementite นี้สามารถสลายตัวไปเป็นเหล็กและคาร์บอน (แกรไฟต์) ได้ดังนั้นเราจึงอาจเรียกสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์นี้ว่า Metastable phase เฟสไดอะแกรมของ Fe -Fe₃C จะประกอบด้วย Ferrite, Austenite, Cementite และ Ferrit



รูปที่ 2.21 เฟสไดอะแกรมของ เหล็ก และเหล็กคาร์ไบด์ [19]

- Ferrite เฟสนี้เป็นสารละลายของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) โดยที่อะตอมของ คาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกแบบ Body centered cubic (BCC) คาร์บอนจะสามารถละลายใน Ferrite ได้เพียงเล็กน้อย กล่าวคือจะมีความสามารถในการละลาย Solid solubility สูงสุดเพียง 0.02 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส และความสามารถในการละลายจะลดลงเป็น 0.005 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

- Austenite เฟสนี้เป็นสารละลายแบบของแข็งแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) โดยที่อะตอมของ คาร์บอนจะแทรกตัวอยู่ในโครงผลึกของเหล็ก Austenite มีโครงสร้างผลึกแบบ Face centered cubic (FCC) จะมีความสามารถในการละลายคาร์บอนสูงกว่า แบบ Ferrite ความสามารถในการละลายของคาร์บอนใน Austenite จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.08 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 1148 องศาเซลเซียส และลดลงเป็น 0.8 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส

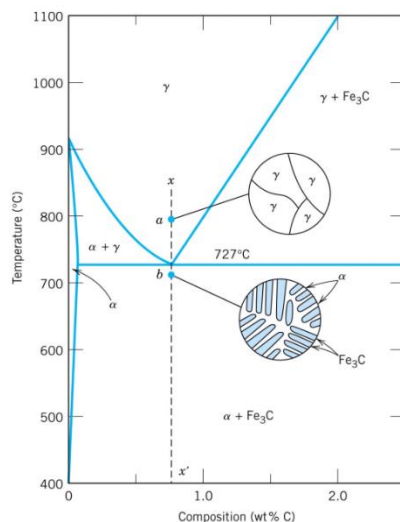
- Cementite สารประกอบ Intermetallic Fe_3C จะเรียกว่า Cementite สารประกอบ Cementite จะมีปริมาณคาร์บอน 6.67 เปอร์เซ็นต์ และเหล็ก 93.3 เปอร์เซ็นต์ Cementite จะมีคุณสมบัติแข็งแต่เปราะ

2.5.3 การแยกประเภทเหล็กกล้า Plain – carbon ตามการเย็นตัวของเหล็ก

2.5.3.1 เหล็กกล้าประเภท Eutectoid plain – carbon

ตัวอย่างเหล็กกล้าประเภท Eutectoid plain – carbon ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 0.8 เปอร์เซ็นต์ ถูกทำให้ร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส และให้คงที่ ณ อุณหภูมิ นั้นเป็นระยะเวลาที่พอเหมาะโครงสร้างของเหล็กกล้าจะเปลี่ยนเป็น Austenite ทั้งหมดซึ่งเรียกว่า

Austenitizing ถ้าเหล็กกล้า Eutectoid นี้ถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จนอยู่เหนืออุณหภูมิ Eutectoid เล็กน้อยโครงสร้างของมันจะยังคงเป็น Austenite

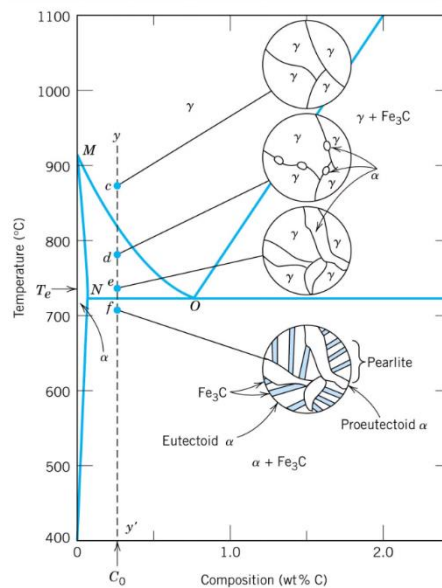


รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของเหล็ก Eutectoid 0.8 เปอร์เซ็นต์ [19]

จากจุด a เมื่อทำให้เย็นตัวลงอีกจนกระทั่งมีอุณหภูมิ ต่ำกว่า อุณหภูมิ Eutectoid เล็กน้อย แล้ว Austenite จะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นโครงสร้าง Lamellar ที่ประกอบด้วยเฟส Ferrite และ Cementite สลับกันดังรูปที่ 2.22

2.5.3.2 เหล็กกล้าประเภท Hypoeutectoid plain – carbon

ตัวอย่างเหล็กกล้าประเภท Hypoeutectoid plain – carbon มีปริมาณคาร์บอน 0.4 เปอร์เซ็นต์ (Hypoeutectoid steel) ถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ ประมาณ 900 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม โครงสร้างของตัวอย่างจะเปลี่ยนไปเป็น Austenite ทั้งหมด และเมื่อเหล็กกล้า ค่อยๆ ถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จนถึงจุด d หรือประมาณ 775 องศาเซลเซียส Proeutectoid ferrite จะค่อยๆ เกิดขึ้นเป็นนิวคลีไอเล็ก ๆ ที่บริเวณขอบเกรน Austenite ถ้าอัลลอยถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ต่อไปอีก จากอุณหภูมิ d ไปยัง e ปริมาณคาร์บอนใน Austenite ที่เหล็กอยู่จะเพิ่มขึ้นจาก 0.4 ไปเป็น 0.8 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเหล็กกล้าถูกทำให้เย็นตัวลงอีก ที่อุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส Austenite ที่เหล็กอยู่นั้นจะเปลี่ยนเป็น Pearlite โดยการเกิดปฏิกิริยา Eutectoid (Austenite ferrite + Cementite) เฟสของ Ferrite ที่อยู่ภายในเฟสของ Pearlite จะเรียกว่า Eutectoid ferrite เพื่อให้แตกต่างกับ Proeutectoid ferrite ที่เกิดครั้งแรกที่อุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กกล้า Hypoeutectoid plain – carbon มีปริมาณคาร์บอน 0.4 เปอร์เซ็นต์ [19]

2.5.3.3 เหล็กกล้าประเภท Hypoeutectoid plain – carbon

ตัวอย่างเหล็กกล้าประเภท Plain – carbon มี ปริมาณคาร์บอน 1.2 (Hypoeutectoid steel) ถูกให้ความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิ ประมาณ 950 องศาเซลเซียส ทั้งไว้ที่ระยะเวลาที่นานพอสมควร โครงสร้างของเหล็กกล้าจะเปลี่ยนไปเป็น Austenite หมด (จุด c ตามรูปที่ 2.23) และเมื่อเหล็กกล้าถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ จนถึงจุด d ตามรูปที่ 2.23 Proeutectoid cementite จะค่อยๆ เกิดขึ้นเป็นนิวคลีโอไอน์ และโตขึ้นบริเวณรอบ ๆ เกรน และเมื่อถูกทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ ต่อไปอีกจนถึงจุด e ตามรูปที่ 2.23 ซึ่งอยู่เหนืออุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส เพียงเล็กน้อย Proeutectoid cementite จะเกิดมากขึ้นขอบเขตของเกรน Austenite

ถ้าระบบเข้าใกล้สภาวะสมดุลและรักษาสภาวะสมดุลนั้นไว้โดยการทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ ปริมาณคาร์บอนที่เหลืออยู่ใน Austenite จะเปลี่ยนจาก 1.2 ไปเป็น 0.8 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีเหล็กกล้าถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิ ต่ำกว่า 723 องศาเซลเซียส เพียงเล็กน้อย Austenite ที่เหลืออยู่จะเปลี่ยนไปเป็น Pearlite โดยการเกิดปฏิกิริยา Eutectoid ดังแสดงที่จุด f ในรูปที่ 2.23 Cementite ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา Eutectoid จะเรียกว่า Eutectoid cementite เพื่อให้แตกต่างกับ Proeutectoid เฟสของ Cementite ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส และเช่นเดียวกันกับเฟส Ferrite ที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยา Eutectoid จะถูกเรียกว่า Eutectoid ferrite

2.5.4 การแยกประเภทของเหล็กกล้า Plain – carbon ตามคุณสมบัติเชิงกลของเหล็ก

เหล็กกล้า Plain – carbon ส่วนใหญ่จะถูกแยกประเภทโดยกำหนดตัวเลข 4 หลัก ตามหลักของ AISI – SAE (The American iron and steel institute – the society for automotive engineers) ตัวเลข 2 ตัวแรก คือ 10 ซึ่งหมายถึง เหล็กกล้าจำพวก Plain – carbon ส่วน 2 ตัวหลัง คือ ให้เอา 100 มาหาร แล้วจะได้ค่า ปริมาณร้อยละของคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็กกล้า เช่น AISI – SAE = 1030 หมายถึง เป็นเหล็กกล้า Plain – carbon ที่มีปริมาณ คาร์บอน 0.30 เปอร์เซ็นต์ เหล็กกล้า Plain – carbon ทั้งหมดมีธาตุ อลลอยด์แมงกานีส 0.03 – 0.95 เปอร์เซ็นต์

เพื่อเพิ่มความแข็งแรง นอกจากเหล็กกล้า Plain – carbon แล้วยังต้องมี ธาตุอื่น ๆ อีก เช่น กำมะถัน ฟอสฟอรัส ซิลิคอน เป็นต้น คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า Plain – carbon ในระบบ AISI – SAE บางชนิด

2.6 ชนิดและรายละเอียดของโลหะ

2.6.1 เหล็ก SR 24

เหล็ก SR 24 คือเหล็กเส้นกลมตาม มอก. 20-2559 มี 1 ชั้นคุณภาพคือ SR24 โดย SR ย่อมาจาก Standard Round Bar หรือก็คือมาตรฐานของเหล็กเส้นกลม ตัวเลข 24 หมายถึง ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก (Yield Strength) ไม่ต่ำกว่า 24 กก./ตร.มม.

2.6.2 เหล็ก SK 4

เหล็ก SK4 เป็นเหล็กกล้าใช้สำหรับทำเครื่องมือขึ้นรูปโลหะเป็นส่วนใหญ่ เช่น แบบหล่อโลหะ ในกระบวนการอัดฉีดโลหะร้อน (Die casting) แม่พิมพ์สำหรับตีขึ้นรูป หรือวัสดุต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงเหล็ก โลหะนอกกลุ่มกลุ่มเหล็ก และพลาสติก โดยเหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่น ๆ ในปริมาณที่สูง เพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง และเพื่อสร้างคาร์ไบด์ในการปรับปรุงคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ

2.6.3 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304

เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกนับว่าเป็นกลุ่มที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันมากที่สุด มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face-Centered Cubic) เหล็กกล้ากลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน แต่สามารถทำให้แข็งขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็น (Work Hardening) มีสมบัติที่ไม่ดูดติดแม่เหล็ก (Nonmagnetic) ในสภาพหลังผ่านการอบอ่อน (Annealed Condition) ยกเว้นในกรณีที่มีการขึ้นรูปเย็นอย่างรุนแรง (มีอัตราในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดในปริมาณสูง) ส่งผลให้เหล็กกล้ามีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และ

ไม่ได้บอบอ่อน หรืออาจเกิดจากการมีโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) อยู่ในโครงสร้างพื้นฐาน ออสเทนนิติกในปริมาณสูง ซึ่งมักเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ผ่านการหล่อและเชื่อม ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีสมบัติที่ดูดซับแม่เหล็กได้ [20, 21]

2.6.4 เพลลาเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304L

เพลลาเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติกนับว่าเป็นกลุ่มที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันมากที่สุด มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face-Centered Cubic) เหล็กกล้ากลุ่มนี้ไม่สามารถเพิ่มความแข็งได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน แต่สามารถทำให้แข็งขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็น (Work Hardening) มีสมบัติที่ไม่ดูดซับแม่เหล็ก (Nonmagnetic) ในสภาพหลังผ่านการอบอ่อน (Annealed Condition) ยกเว้นในกรณีที่มีการขึ้นรูปเย็นอย่างรุนแรง (มีอัตราในการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดในปริมาณสูง) ส่งผลให้เหล็กกล้ามีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และไม่ได้บอบอ่อน หรืออาจเกิดจากการมีโครงสร้างเดลต้าเฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) อยู่ในโครงสร้างพื้นฐาน ออสเทนนิติกในปริมาณสูงซึ่งมักเกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่ผ่านการหล่อและเชื่อม ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีสมบัติที่ดูดซับแม่เหล็กได้แต่มีการผสม ไนโตรเจนเข้าไปด้วยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงซึ่งต่างจาก เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 ที่ไม่มีการผสมไนโตรเจนลงไปด้วย [20, 21]

2.6.5 เพลลาเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201

สแตนเลสมีหลายตระกูลที่มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าของสหรัฐอเมริการะบุว่าสแตนเลสสามารถระบุเป็นตัวเลขได้เป็นเหล็กที่ใช้กันทั่วไปซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนที่ดีและการกลึงที่ดี และประสิทธิภาพการขัด ส่วนข้อแตกต่างของสแตนเลสแต่ละชนิดส่วนใหญ่จะเป็นองค์ประกอบของธาตุที่เป็นส่วนผสมของการผลิต และประสิทธิภาพทางกลก็ต่างกันไปเล็กน้อย [20, 21]

2.7 กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM)

2.7.1 หลักการทำงาน

ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างหรือลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งสามารถรองรับงานในการศึกษาโครงสร้างบน พื้นผิวของตัวอย่างทางชีวภาพ กายภาพ รวมถึงตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานได้ โดยการวัดสัญญาณ Secondary electron ที่หลุดจากผิวตัวอย่างจากการชนของ Primary electron ภายใต้สภาวะสุญญากาศ และแปลงเป็นสัญญาณภาพ ในการวิเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมี อิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวของชิ้นงานเกิดการ

กระเจิงกลับและเกิดสัญญาณเอ็กซ์เรย์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

2.7.2 ข้อมูลสำหรับการเตรียมส่งตัวอย่าง

2.7.2.1 ชนิดของรูปร่างลักษณะที่วิเคราะห์ได้: ลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างพื้นผิวภายนอก ขนาดรูปร่างที่สามารถวิเคราะห์ได้เป็นภาพสามมิติ

2.7.2.2 ชนิดของตัวอย่าง: เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต จุลินทรีย์น้ำเชื้อของสิ่งมีชีวิต ฟิล์มบาง ผง โลหะ พลาสติก เป็นต้น

2.7.2.3 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง: ของแข็ง เป็นแผ่นหรือเป็นผง ตัวอย่างต้องแห้ง ไม่มีความชื้น ไม่มีไอ ระเหย และไม่ปนเปื้อนสารจำพวกน้ำมัน

- ข้อมูลของตัวอย่างที่ต้องการ: ความเป็นพิษของตัวอย่างและสถานะการเก็บรักษา

2.7.2.4 ขนาดและปริมาณของตัวอย่าง

- เนื้อเยื่อขนาดประมาณ 1x1 cm

- ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่น ก้อน เส้น ควรมีขนาดไม่เกิน (กxขxส) 1x1x1 cm

- ผง ประมาณ 0.1 กรัม

- ภาพขณะบรรจุตัวอย่าง: ตามความเหมาะสมกับชนิดของตัวอย่าง

2.7.2.5 ระยะเวลาการออกผลนับจากวันรับตัวอย่าง: สามารถกำหนดได้หลังจากการนัดคิวดูกล้องแล้ว ระยะเวลา ในการดูขึ้นอยู่กับผู้รับบริการ เจ้าของชิ้นงานจะต้องมานั่งดูด้วยขณะที่เจ้าหน้าที่ประจำเครื่องทำการควบคุม และวิเคราะห์ เพื่อเลือกตำแหน่งหรือจุดที่ต้องการถ่ายภาพ และต้องบอกรายละเอียดที่ต้องการหรือขนาด กำลังขยายหรือมีภาพตัวอย่าง (ในขั้นตอนการติดตัวอย่าง) ต้องนำชิ้นงานหรือตัวอย่างมาส่งก่อนวันดูกล้อง อย่างน้อย 2 วันทำการ และหลังจากวิเคราะห์เรียบร้อยแล้วสามารถรับผลได้ที่

2.7.2.6 รายละเอียดเพิ่มเติม:

- ตัวอย่างประเภทสิ่งมีชีวิตเพื่อป้องกันตัวอย่างเสียหาย ควรโทรนัดเพื่อส่งตัวอย่างล่วงหน้า ซึ่งจะต้อง ใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างประมาณ 2 วัน - ตัวอย่างประเภทอื่น ๆ เช่น ผง ฟิล์ม ผลึก เป็นต้น ควรส่งตัวอย่างก่อนวันนัดสองกล้อง 2 วันทำการ และต้องทำการติดตัวอย่างลงบน stub ด้วยตนเอง

- ซีดจำกัดของเครื่องมือ: ตัวอย่างต้องแห้ง ไม่มีไขมันหรือไขมัน ไม่มีไอระเหย

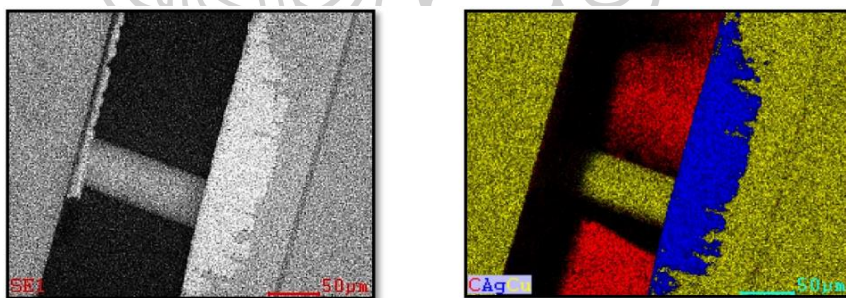
- กำลังขยายต่ำสุด 15 เท่า

- กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 50,000 เท่า (ขึ้นอยู่กับการนำไฟฟ้าของตัวอย่าง)

- ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณจะเทียบน้ำหนักค่าเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่พบตั้งแต่ 2 ธาตุขึ้นไป ผลการวิเคราะห์เป็นค่า %Wt และ %At

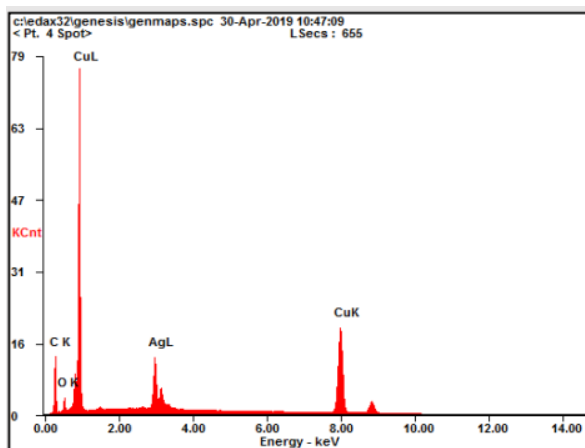
2.8 กล้อง Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีบทบาทสำคัญในปัจจุบันในการวิเคราะห์ธาตุทั้งทางด้านวัสดุศาสตร์ ด้านชีวภาพ ภายภาพ และ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็ก โดยหลักการของ EDS เมื่อตัวอย่างที่ต้องการศึกษาถูกชนด้วยลำแสงอิเล็กตรอนทำให้สามารถเกิดการแตก ตัวเป็นไอออน (Ionization) ด้วยการผลัดให้อิเล็กตรอนของตัวอย่างให้หลุดออกจากอะตอม ดังนั้นเพื่อเป็นการ รักษาเสถียรภาพอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นถัดไปจะลงเข้ามาแทนที่ และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งเรียกว่ารังสีเอกซ์แบบแคแรกเทอริสติก (Characteristic X-ray) โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ จากนั้นเมื่อรังสีเอกซ์เข้าสู่หัววัดชนิด Silicon drift detectors (SSD) หัววัดจะสร้างสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ และจะนำสัญญาณที่ได้ มาวิเคราะห์หาความสูงของสัญญาณ ส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินและรายงานผลเป็นค่าสเปกตรัม รังสีเอกซ์ต่อไป



รูปที่ 2.24 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping analysis

ซึ่งสเปกตรัม EDS ที่ได้นั้นจะแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแกน Y คือ จำนวนสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ ตรวจวัดได้และแกน X คือพลังงานของรังสีเอกซ์ใน หน่วยของ keV ซึ่งพีคที่เกิดขึ้นจะบ่งบอกถึงธาตุที่เป็น องค์ประกอบในตัวอย่างที่ต้องการศึกษา รูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS

นอกจากเทคนิค EDS จะสามารถวิเคราะห์ ธาตุในเชิงคุณภาพ (Qualitative element analysis) ว่าตัวอย่างที่ต้องการศึกษามีธาตุชนิดใดประกอบอยู่ ยังสามารถวิเคราะห์ธาตุในเชิงปริมาณ (Quantitative element analysis) ซึ่งสามารถบอก เปอร์เซ็นต์ ของธาตุที่วิเคราะห์ที่มีอยู่ได้เช่นกัน สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS สามารถวิเคราะห์ได้ 3 วิธี ดังนี้คือ

1. Point analysis เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำแสงของอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งบนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ
2. Line scan analysis เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดตามแนวบนตัวอย่างตรงตำแหน่งที่สนใจ ซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาขอบเขตของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง
3. Mapping analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนั้นๆ

จากการทดลองของ Keyvan Seyed Niaki, Seyed Ebrahim Vahdat(2015) เป็นการทดสอบความล้าของเหล็กที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเยือกยิ่ง การล้าเป็นเรื่องที่ธรรมดาสำหรับชิ้นส่วนทางวิศวกรรมดังนั้นผลของความล้าที่เกิดขึ้นกับ 1.2542 tool steel หลังผ่านกระบวนการ deep cryogenic treatment จึงมีความสำคัญ ในการศึกษาครั้งนี้จะมี 2 กลุ่มที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมความล้าที่เกิดขึ้น กลุ่มแรกใช้วิธีการ deep cryogenic treatment โดยการแช่ไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากผ่านกระบวนการชุบแข็งด้วยน้ำ ผลที่ได้ความล้ามีค่าที่ดีขึ้นเล็กน้อย ในตัวอย่างการทดลองมีความสัมพันธ์ที่ทำให้ความคงทนของเหล็กที่ใช้ทางด้านวิศวกรรมมีค่าลดลง

กระบวนการ cryogenic treatment เป็นกระบวนการที่คงที่และสามารถเพิ่มค่าความคงทนของอุปกรณ์ได้ แต่ก็เกิดขึ้นได้เพียงภายนอกหรือบริเวณผิวของวัสดุเท่านั้นดังนั้นจึงเลือกเหล็กที่มี

คาร์บอนในรูปแบบที่ 2 ที่นำมาทำการ tempering ที่อุณหภูมิต่ำเพราะคาร์บอนที่เกิดการแพร่กระจายนั้นไม่มีผลอะไรกับโครงสร้างการเปลี่ยนแปลงของ retained austenite ไปเป็น martensite ทั้งนี้แต่เปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปซึ่งปราศจากการแพร่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้าน bulk hardness และ wear resistance ส่วนผลการทดลองอื่นมีค่าที่ลดลง และก็ได้มีการนำเหล็กกล้าที่ใช้ในกระบวนการทางวิศวกรรมมาใช้ในการทดลองความล้าอีกหลายชนิด แต่ผลที่ได้ก็แตกต่างกันไปตามเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่มีในวัสดุชนิดนั้น ๆ และได้เตรียมขนาดของเหล็กที่ใช้ในการทดลองให้เท่ากับภาพต่อไปนี้เพื่อให้ใช้ได้กับชุดทดสอบที่เตรียมไว้ตามมาตรฐาน BS EN 10002-1 และ ASTM E606 standard [3]

จากการทดลองของ M. Novelli, P.Bocher,T.Grosdidier(2018) เรื่องผลกระทบที่เกิดจากการใช้อุณหภูมิของ Cryogenic เป็นผลดีต่อกระบวนการ Surface mechanical attrition treatment (SMAT) ในกรณีของ 304 L austenitic stainless steel ด้วยกระบวนการนี้จะเพิ่มจะเพิ่มความแข็งแรงของพื้นผิวได้ 20 – 30 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อผ่านกระบวนการ SMAT ในกรณีที่แตกต่างกันทำให้ได้ผลออกมาในหลายลักษณะไม่ว่าจะเป็นแรงเฉือนที่พื้นผิวหรือ Hertzian contact stress (กลศาสตร์การติดต่อหรือการศึกษาการเปลี่ยนรูปของของแข็งที่สัมผัสกันที่จุดหนึ่งหรือมากกว่า ความแตกต่างในกลศาสตร์การติดต่อคือระหว่างความเค้นที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวสัมผัส ความเค้นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างแนวพื้นผิว) การให้ความร้อนของการปะทะ และผิวของ martensite เมื่อทำการขยายในระดับ Nano จากกระบวนการที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่เกิดจาก Cryogenic ทำให้เหล็กเริ่มแข็งขึ้นแต่ความทนทานลดลงประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์

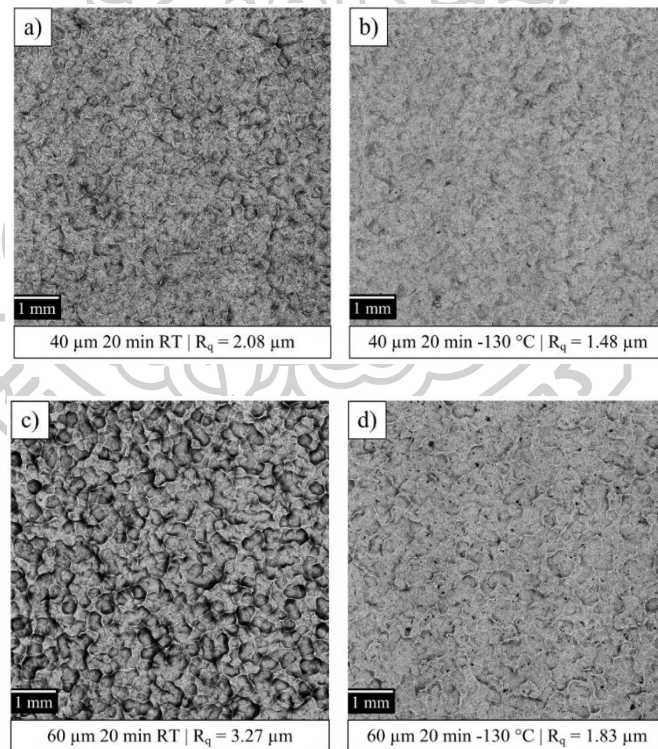
ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีกระบวนการที่ใช้ในการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุอยู่มากมาย ไม่ว่าจะเป็นการใช้กระบวนการการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกด้วยกระบวนการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการให้ความดันหรือ Equal Channeling Angular Pressing (Ecap) และอื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ ก็เป็นกระบวนการการเปลี่ยนรูปร่างลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุให้มีคุณสมบัติบางประการที่ดีขึ้นแต่ก็จะมีคุณสมบัติบางประการที่ลดลงเช่นกัน ซึ่งการจะทำการทดลองทางด้าน การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางด้านโครงสร้างภายในต้องทราบปริมาณของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเหล็กที่ใช้ในการทดลองและเพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนจึงต้องมีการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งมีกำลังการขยายที่แตกต่างกันไปด้วยตามชนิดของวัสดุ ซึ่งในการทดลองได้มีการใช้เหล็กที่ผ่านกระบวนการตามตารางต่อไปนี้

Processing parameters used for the USSP treatments.

Shots Nature	Treatment condition						
	Diameter [mm]	Weight inserted [g]	Working distance [mm]	Frequency [kHz]	Amplitude [μ m]	Duration [min]	Temperature [$^{\circ}$ C]
100C6 steel	2	4.1	20	20	40	3	RT
					60	20	-80
							-130

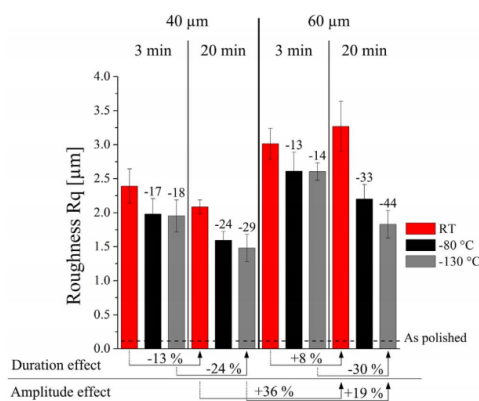
รูปที่ 2.26 ตารางเหล็กที่ผ่านกระบวนการ DCT ในเงื่อนไขต่าง ๆ ของ M. Novelli, P.Bocher,T.Grosdidier(2018) [4]

ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างที่ใช้การตรวจสอบด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM)ที่กำลังขยายเท่ากันจะได้ผลที่แตกต่างกัน ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.27 โครงสร้างที่ใช้การตรวจสอบด้วยวิธีการ Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยายเท่ากันจะได้ผลที่แตกต่างกันของ M. Novelli, P.Bocher,T.Grosdidier(2018) [4]

ซึ่งเมื่อได้ทำการผ่านกระบวนการการตรวจสอบโครงสร้างโดยผ่านกระบวนการ Scanning Electron Microscope (SEM) แล้วก็จะสามารถหาค่า R_q ได้และจะได้ผลของความทนทานออกมา (Roughness R_q) ตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้เป็นตัวกำหนดในการทดสอบจะออกมาเป็นกราฟดังนี้



รูปที่ 2.28 กราฟแสดงค่าความแข็งของ M. Novelli, P.Bocher, T.Grosdidier(2018) [4]

การกระจายตัวและธรรมชาติของ Martensite เป็นกระบวนการทดสอบรูปแบบหนึ่งที่มีมานานแล้วโดยใช้วิธีการ XRD Phase ในการแทรกเข้าไปเพื่อให้ได้ถึงลักษณะการกระจายตัวในรูปแบบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเมื่อมีการให้ความร้อนจนมีการเปลี่ยนคุณลักษณะบางประการไป

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ Martensitic และการแข็งของ Martensitic ใช้วิธีการเดียวกับการกระจายตัวของ Martensite โดยจะตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโดยการสลายพันธะโครงสร้างทางเคมีด้วยอนุภาคที่มีค่าน้อยไปจนถึงรังสีที่มีค่ามากเพื่อให้ได้ผลที่ชัดเจนมากที่สุด

สรุป โครงสร้างและความแข็งของเหล็ก เมื่อผ่านอุณหภูมิที่เป็น Cryogenic ใช้พลังงานน้อยและมีผลในกระบวนการทางกลน้อย

Stress จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับของ Martensitic อยู่ในช่วง 150-450 ไมโครเมตร

การเพิ่มขึ้นของ Martensitic ที่บริเวณใกล้ๆผิวจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 20-30 เปอร์เซ็นต์

คุณสมบัติของพื้นผิว

เมื่อผ่านการใช้อุณหภูมิใน Cryogenic จะเปลี่ยนคุณสมบัติของพื้นผิวไปโดยสามารถควบคุมได้อย่างอิสระเสรี

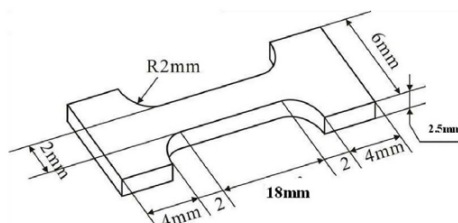
วัสดุที่ผ่านการใช้อุณหภูมิใน Cryogenic จะมีค่าความทนทานที่ผิวลดลงชัดเจนเด่นชัดตาม การทดสอบ แต่ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้น และค่าความทนทานปานกลางเมื่ออยู่ในช่วง 425 HV ถึง 560 HV

จากการทดลองของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) ในงานวิจัยนี้ alloy steel ที่เลือกมาจากการทดลองวัสดุในรูปแบบใหม่โดยใช้อุณหภูมิต่ำ ผลของเวลาของกระบวนการ deep cryogenic treatment และจำนวนรอบการพัฒนาของโครงสร้างทางกลหรือทางกายภาพ สามารถสังเกตและวิเคราะห์ได้ผ่าน alloy steel ที่เลือกมา จากผลการทดลองสามารถสรุปและแสดง โครงสร้างการเกิดของ tiny lath martensite หลังการชุบ และจะเกิด lamellar martensite และ retained austenite หลังจากผ่านกระบวนการ deep cryogenic treatment ในบางครั้ง retained austenite จะเกิดการเปลี่ยนเป็น tiny lath martensite ในขนาดเล็กจะมีการกระจายตัวของ M_6C carbides ตกตะกอนใน grain boundaries และพบ retained austenite เป็นฟิล์มเคลือบอยู่ หลังจากการเพ่งเวลาและจำนวนรอบของกระบวนการ deep cryogenic treatment กระบวนการ deep cryogenic treatment มีผลกระทบที่ชัดเจนทางด้านคุณสมบัติทางกลของวัสดุและเพิ่มขึ้นในช่วงแรกๆแต่จะมีค่าลดลงเมื่อผ่านเวลาและจำนวนรอบที่เคยทำได้มากที่สุดแล้วแต่ค่าการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกด้าน

ในปัจจุบันการพัฒนาและในทางด้านอุตสาหกรรมมีความต้องการวัสดุที่ผ่านกระบวนการเกี่ยวกับไนโตรเจนเหลวและออกซิเจนเหลวอย่างไรก็ตามการเปลี่ยนสภาพแก๊สให้เป็นไนโตรเจนเหลว และการขนส่งการเก็บรักษายังเป็นไปได้ยากเนื่องด้วยต้องการการเก็บรักษาในอุณหภูมิที่ต่ำมาก ๆ และยังเป็นที่ยืนยันดีว่ากระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กเป็นที่ใช้กัน อย่างแพร่หลายแต่หลังจากที่ค้นพบ cryogenic ที่ทำให้เพิ่มความแข็งแรงได้ก็ได้มีการนำมาทดลอง กันมากขึ้นโดยกระบวนการที่เกิดจากกระบวนการทาง cryogenic สามารถปรับได้ถึงโครงสร้าง ภายในทำให้การทดลองต้องมีหลากหลายในด้านการกำหนดเกี่ยวกับตัวแปรที่เป็นเวลาและจำนวน รอบในการทำให้แน่นดังตารางต่อไปนี้

Table 2
Heat treatment schedule.

Sequence	Treatment process
0#	Original sample
1#	Austenitise at 850 °C, 10% NaCl solution quenching
2#	First cycle DCT 30min + 200 °C×2 h tempering
3#	First cycle DCT 60min + 200 °C×2 h tempering
4#	First cycle DCT 90min + 200 °C×2 h tempering
5#	First cycle DCT 120min + 200 °C×2 h tempering
6#	Second cycles DCT 30min + 200 °C×2 h tempering
7#	Second cycles DCT 60min + 200 °C×2 h tempering
8#	Second cycles DCT 90min + 200 °C×2 h tempering
9#	Second cycles DCT 120min + 200 °C×2 h tempering
10#	Third cycles DCT 30min + 200 °C×2 h tempering
11#	Third cycles DCT 60min + 200 °C×2 h tempering
12#	Third cycles DCT 90min + 200 °C×2 h tempering
13#	Third cycles DCT 120min + 200 °C×2 h tempering



รูปที่ 2.29 แสดงตารางกระบวนการเตรียม deep cryogenic treatment ของXiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]

จากการทดลองทั้งหมดจะทำให้ทราบได้ว่าบริเวณผิวมีความแข็งแรงมากขึ้นที่ประมาณ 20-30%

จากผลการทดลองทั้งหมดทำให้ทราบได้ว่าจากตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองจะมีตัวอย่างที่ 9 ที่มีค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองทางกลแล้วมีค่ามากที่สุดจากการทดสอบ คือการทำ deep cryogenic treatment 2 รอบเป็นเวลา 120 นาที และอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง รูปต่อไปนี้จะแสดงลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการตามเงื่อนไข

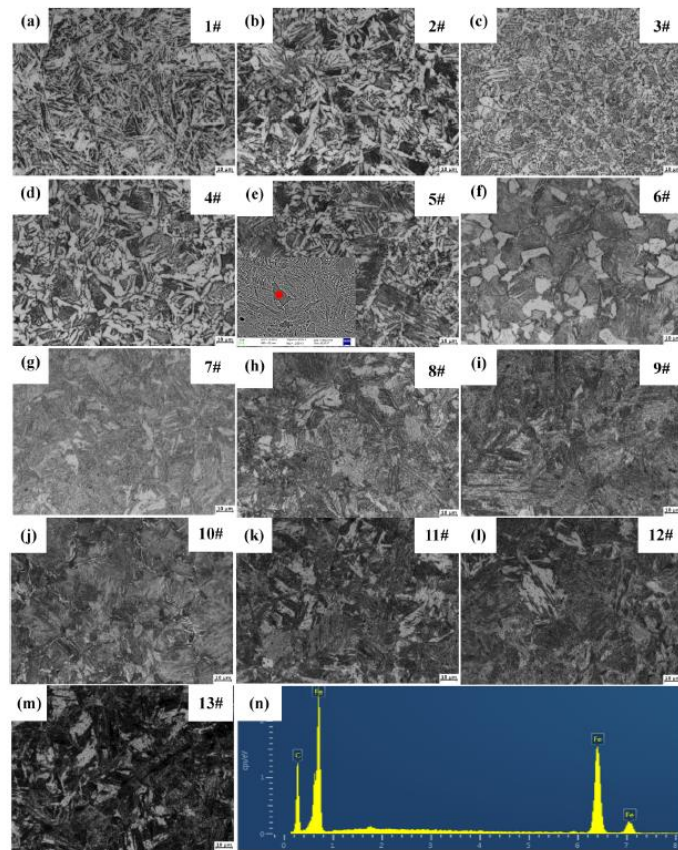


Fig. 3. The microstructure photographs and EDS results of samples tempered at 200 °C for 2 h after DCT for different time.

รูปที่ 2.30 ลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการ deep cryogenic treatment ของ
Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]

ผลการทดลองคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของตัวอย่างทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น Rockwell hardness, stress, yield ตัวอย่างที่ 9 จะมีค่าทุกอย่างที่ทดสอบมากที่สุดในทุกตัวอย่างที่ทดสอบดังกล่าวทั้ง 3 ต่อไปนี้

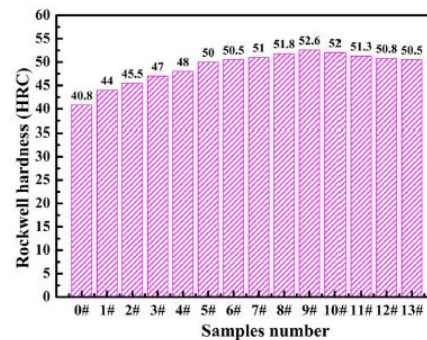
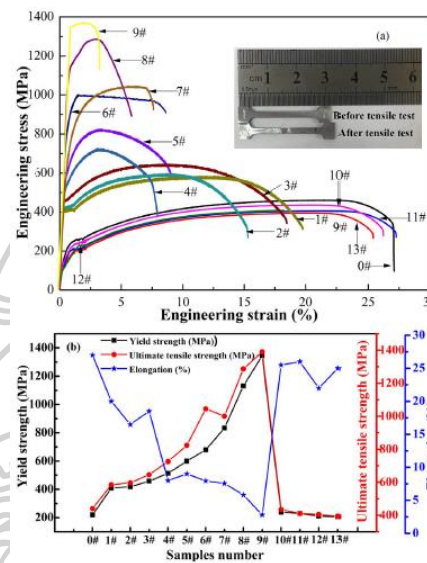


Fig. 5. The Rockwell hardness of all the samples.



รูปที่ 2.31 คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของตัวอย่างทั้งหมดไม่ว่าจะเป็น Rockwell hardness, stress, yield ตัวอย่างที่ 9 ของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]

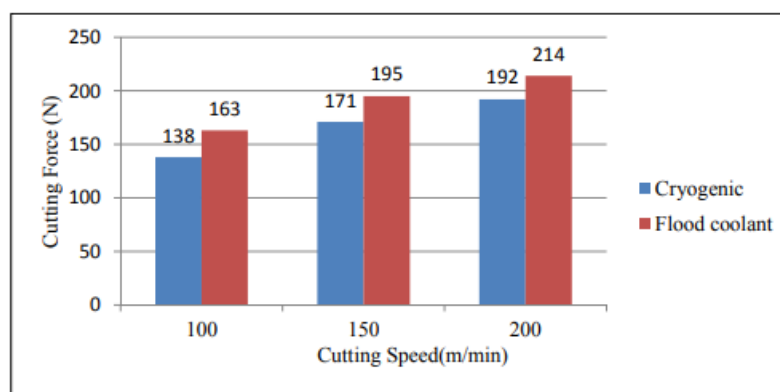
สรุป จากการทดลองทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษาแล้วจำนวนรอบและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ deep cryogenic treatment ส่งผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุที่ทดสอบทางกลและทางกายภาพ

จากการทดลองของ S.Arun Kumar, V.G.Yoganath. Prasad Krishna(2018) ความแข็งของหัวตัดที่ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมเป็นที่ต้องการอย่างมากไม่ว่าจะเป็นหัวตัดที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ PCBN หรือ ceramic อย่างไรก็ตามหัวตัดพวกนี้เป็นอุปกรณ์สิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไปหรือเสียหายแล้วไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ดังนั้นค่าความแข็งและการป้องกันการสั่นสะเทือนจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่ต้องมีดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ใช้ชนิดของหัวตัดเป็นชนิด coated carbide และได้มีการใช้สารจากกระบวนการ cryogenic เป็นตัวหล่อเย็นเพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนจึงใช้การหล่อเย็นแบบธรรมดา กับแบบหล่อให้ท่วมเพื่อทดสอบ tool life ความแข็งที่ผิว และกำลังการ

ผลิตผลที่ได้หลังจากการใช้สารที่ได้จากกระบวนการ cryogenic เป็นตัวหล่อเย็นทำให้ทราบได้ว่าความแข็งแรงของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นกำลังการผลิตและ tool life มีค่าเพิ่มขึ้นดังนั้นหากทำให้การหล่อเย็นที่เกิดจากสารที่อยู่ในอุณหภูมิ cryogenic ก็จะสามารถเพิ่มความคงทนของของหัวตัดแบบพิเศษได้[22]

การทดลองได้ออกแบบให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นมาตรฐาน AISI 4340 และ ASTM standard จึงได้ผลการทดสอบต่าง ๆ ที่ได้จากการหาสรุปออกมาได้เป็น test Setup ก่อนการทดลองในการทดสอบได้มีการใช้ liquid nitrogen ในการหล่อเย็นซึ่งได้เตรียมการทดลองไว้ซึ่งก่อนการทดลองต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผล

ผลที่ได้จากการทดลองทำให้เราทราบว่าการทำงานที่เราทำการปล่อยให้การหล่อเย็นเป็นแบบท่วมทำให้ค่า tool life มีค่ามากกว่าการใช้ cryogenic แต่เป็นการเทียบระหว่าง Flank Wear กับ tool life แต่กราฟระหว่าง tool life กับ cutting speed การที่ใช้ cryogenic นั้นค่าของ tool life มากกว่าดังกราฟที่แสดงไว้ทั้งสองต่อไปนี้และเมื่อทำการเทียบกันระหว่าง cutting force และ cutting speed เมื่อใช้การหล่อเย็นด้วย cryogenic และ flood coolant จะใช้แรงลดลงตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นเป็น 18.1 เปอร์เซ็นต์ 14.03 เปอร์เซ็นต์ 11.45 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.32 กราฟที่แสดงไว้ทั้งสองต่อไปนี้และเมื่อทำการเทียบกันระหว่าง cutting force และ cutting speed เมื่อใช้การหล่อเย็นด้วย cryogenic และ flood coolant ของ S.Arun Kumar, V.G.Yoganath. Prasad Krishna (2018) [23]

สรุป จากการทดลองทั้งหมดสามารถทำให้ทราบได้ว่าการใช้สารที่ได้จากกระบวนการ cryogenic นั้นสามารถลดแรงในการตั้งที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ได้และสามารถยืดระยะเวลาในการทำงานที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ได้ แต่มีบางด้านที่ลดลงบ้างดังนั้นหากใช้สารที่เกิดจากกระบวนการ cryogenic ก็จะทำให้เปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารทำความเย็นที่มีผลต่อ tool ชนิดต่าง ๆ ได้

จากหนังสือที่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ของ Sperling et al., (2006) ได้อธิบาย ว่าการอบคืนตัวจะทำการลดค่าความแข็งและความเค้นคงเหลือแต่การอบคืนตัวจะเพิ่มความเหนียว, ค่า ความแกร่งและยังทำให้ขนาดของวัสดุเสถียรมากขึ้น โดยพวกเขาได้สังเกตการลดลงของค่าความเค้นการ อัดของกระบวนการอบ-ชุบทั่วไป (Conventional heat treatment) ถึง 245MPa, การแช่สภาวะเย็น ยวดยิ่งแบบตื้น (Shallow Cryogenic Treatment) ถึง 145MPa และการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่งแบบลึก (Deep Cryogenic Treatment) ถึง 115 MPa ตามลำดับ โดยอิทธิพลของการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่งใน โครงสร้างจุลภาคของมาเทนไซต์ จะเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่อปริมาณความเค้นตกค้าง หลังจากการอบคืน 13 ตัว และมีงานวิจัยของ Darwin et al., (2008) การศึกษาของการอบคืนตัวมีส่วนช่วยในการต้านทานการ สึกหรือของแหวนลูกสูบ SR34 ถึง 2% และผลกระทบของระยะการอบคืนตัวไม่มีนัยสำคัญ โดยเหล็กที่ กระบวนการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่งมีความแข็งและความเปราะ เมื่อเทียบกับที่เหล็กไม่ผ่านกระบวนการ เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณมาเทนไซต์ โดยทั่วไป อุณหภูมิต่ำสุดของการอบคืนตัวอยู่ที่ 150 – 200 °C หลังจากผ่านกระบวนการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่งเพื่อลดค่าความเปราะคงค้างและความเค้น เนื่องจากอุณหภูมิหลังจากผ่านการอบอ่อน โดยแสดงดังรูปที่ 2.4 ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแช่สภาวะ เย็นยวดยิ่งซึ่งแสดงค่าความแข็งที่สูงขึ้นอย่างเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัวเมื่อเทียบกับการอบ-ชุบ ทั่วไปนี้เป็นเพราะการก่อตัวของ Phase มาเทนไซต์จาก Phase ออสเทนไนต์[15, 24]

การศึกษาเหล็ก AISI M2 ที่ผ่านกระบวนการแช่สภาวะความเย็นยวดยิ่งแบบลึก โดยงานวิจัยได้ ของ Leskovsek et al., (2006) ได้กล่าวว่ายัตราการสึกหรือของวัสดุลดลงที่ผ่านกระบวนการแช่สภาวะ เย็นยวดยิ่งแบบลึกกับการอบคืนตัวหนึ่งรอบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการอบคืนตัว ปริมาณการสึกหรือลดลง ประมาณ 62% เมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัว จาก 500 °C ถึง 600 °C Hardness, HRC Tempering Temperature After Tempering 200 °C 300 °C 455 °C 14 จากงานวิจัยของ Seah et al., (2003) ได้ใช้เครื่องมือตัดคาร์ไบด์ทั้งสแตน เพื่อใช้หาผลกระทบ ของกระบวนการแช่สภาวะ เย็นยวดยิ่งแบบตื้น และกระบวนการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่งแบบลึกตามด้วยการ อบคืนตัว ถึง 3 รอบ ในคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทางโลหะของทั้งสแตนคาร์ไบด์ โดยจำนวนรอบอื่นๆ จะแสดงในรูปที่ 2.5 โดยศึกษากระบวนการอบคืนตัวที่ การอบคืนตัว 2 รอบและ 3 รอบ จะถูกสังเกตได้ ว่ามีเพียงการอบคืนตัวเพียงหนึ่งรอบอาจทำให้ความเปราะส่งผลมากขึ้น ในขณะที่จำนวนรอบมากกว่า หนึ่งจะทำให้เครื่องมือแกร่งขึ้นและลดความเครียดเพื่อลดความเปราะเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของ เครื่องมือ [25, 26]

2.9 โลหะกลุ่มเหล็ก

โลหะที่ถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมอาจจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ โลหะกลุ่มเหล็ก และ โลหะนอกกลุ่มเหล็ก โลหะกลุ่มเหล็กยังจำแนกออกเป็นเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ ซึ่งมีความแตกต่างกันตรง ปริมาณของคาร์บอนในเนื้อเหล็ก โดยเหล็กกล้าจะมีปริมาณคาร์บอนที่ต่ำกว่าเหล็กหล่อ เหล็กกล้ายังจำแนก ออกเป็นโลหะผสมต่ำและโลหะผสมสูง ซึ่งอาศัยปริมาณส่วนผสมทางเคมีของธาตุผสมเป็นตัวจำแนก โลหะกลุ่มเหล็กจะมีปริมาณการใช้งานในอุตสาหกรรมโครงสร้างต่างๆ สูงมาก เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าสินแร่เหล็กที่ พบอยู่บนพื้นโลกนั้นมีปริมาณมาก กระบวนการผลิต สามารถตอบสนองในทางเศรษฐศาสตร์ และที่สำคัญเหล็กมีสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ กว้างขวาง ในเนื้อหาจะกล่าวถึงกระบวนการผลิตเหล็ก ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค สมบัติต่างๆ ตลอดจนชนิดและการใช้งานของโลหะ กลุ่มเหล็กที่เกี่ยวข้องในงานทางวิศวกรรม

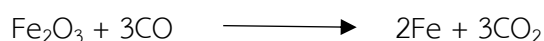
2.9.1 การผลิตเหล็กกล้า

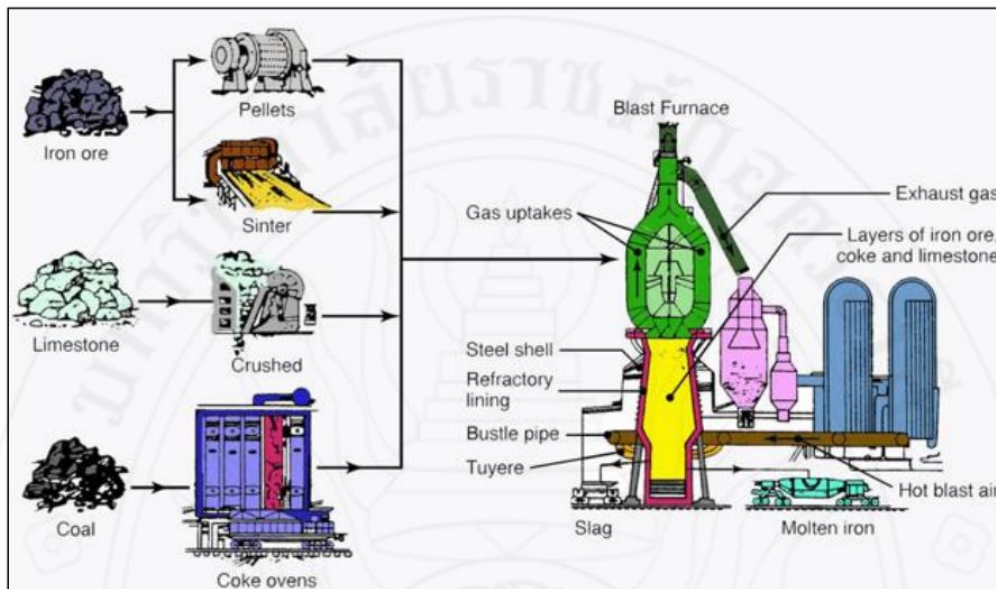
เหล็กที่พบอยู่บนพื้นโลกโดยมากแล้วจะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ ได้แก่ แร่เฮมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) และ แมกนีไทต์ (Magnetite; Fe_3O_4) การถลุงสินแร่เหล็กจะใช้เตาลม (Blast furnace) ดังแสดงในรูปที่ 2.33 โดยลักษณะของ เตาที่มีรูปทรงกระบอกสูง ภายในเตาจะบรรจุถ่านโค้กสินแร่เหล็ก และหินปูนเป็นชั้น ๆ สลับกันไป และใช้ลมร้อนเป่าเข้า บริเวณรอบข้างของเตาในส่วนล่าง ถ่านโค้กที่ ใส่เข้าไปจะทำให้ความร้อน และให้คาร์บอนที่จะเป็นตัวลดออกซิเจน ในสินแร่เหล็ก โดยคาร์บอนที่มีในถ่านโค้กจะรวมตัวกับออกซิเจนที่เป่าเข้าไปในรูปของลมร้อน เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นตัวลดออกซิเจนจากสินแร่เหล็ก ปฏิบัติการลดออกซิเจนแสดงดังสมการต่อไปนี้

ปฏิบัติการการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์



ปฏิบัติการการลดออกซิเจนในสินแร่เหล็ก

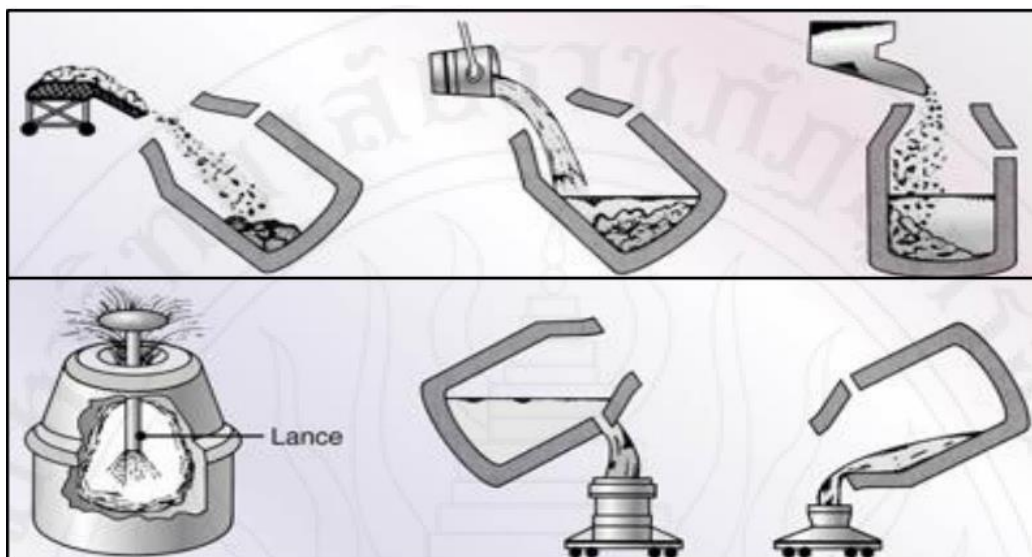




รูปที่ 2.33 กระบวนการถลุงสินแร่เหล็กโดยเตาลม [19]

หินปูนที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ (Flux) จับสิ่งเจือปนที่ติดมากับสินแร่เหล็ก กลายเป็นซีตะกรัน (Slag) ไหลออกทางด้านข้างส่วนล่างของเตา และถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ น้ำเหล็กที่ได้ จากการถลุงจะเรียกว่า เหล็กดิบ (Pig iron) ที่ยังคงมีปริมาณสารมลทินเจือปนอยู่มาก ยังไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้นจะต้องมีการทำให้น้ำเหล็กดิบมีความบริสุทธิ์ขึ้น โดยกระบวนการเตาเบสิกออกซิเจน (Basic Oxygen Furnace; BOF)

โดยปกติแล้ว น้ำเหล็กดิบที่ได้จะมีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 4 - 5% ซึ่งเกินมาตรฐานของเหล็กกล้าที่จะมี คาร์บอนอยู่ ในช่วง 0.06 - 2 % อีกทั้งน้ำเหล็กดิบยังมีส่วนผสมของธาตุอื่น เช่น ซิลิคอน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส และ แมงกานีส ในปริมาณสูง ดังนั้นจึงต้องมีการลดปริมาณธาตุผสมเหล่านี้ลง ตัวที่ใช้ลดธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ คือ ออกซิเจน น้ำเหล็กดิบที่ได้จากเตาลม ปริมาณ 200 ตัน จะถูกนำมาเทลงในเตา BOF และเติมเศษเหล็กลงไปอีก 90 ตันเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำเหล็ก (รูปที่ 2.33) จากนั้นจะทำการเติมฟลักซ์ (หินปูน) เพื่อทำหน้าที่ในการจับสาร มลทินและกลายเป็นซีตะกรันเพื่อเทออกได้สะดวก ขั้นตอนต่อไปจะทำการเป่าออกซิเจนบริสุทธิ์ลงไปในเตาโดย ใช้เวลาประมาณ 20 นาที ที่ความดันออกซิเจน 1,250 KPa ปริมาณ ธาตุคาร์บอนที่อยู่ในน้ำเหล็กจะถูกกลดลงโดย ออกซิเจนซึ่งหลุดออกมาในรูปของ CO และ CO₂ กระบวนการ BOF สามารถ ผลิตเหล็กได้ 250 ตัน โดยใช้เวลาเพียง 35-50 นาที



รูปที่ 2.34 กระบวนการหล่อออกซิเจนโดย BOF [19]

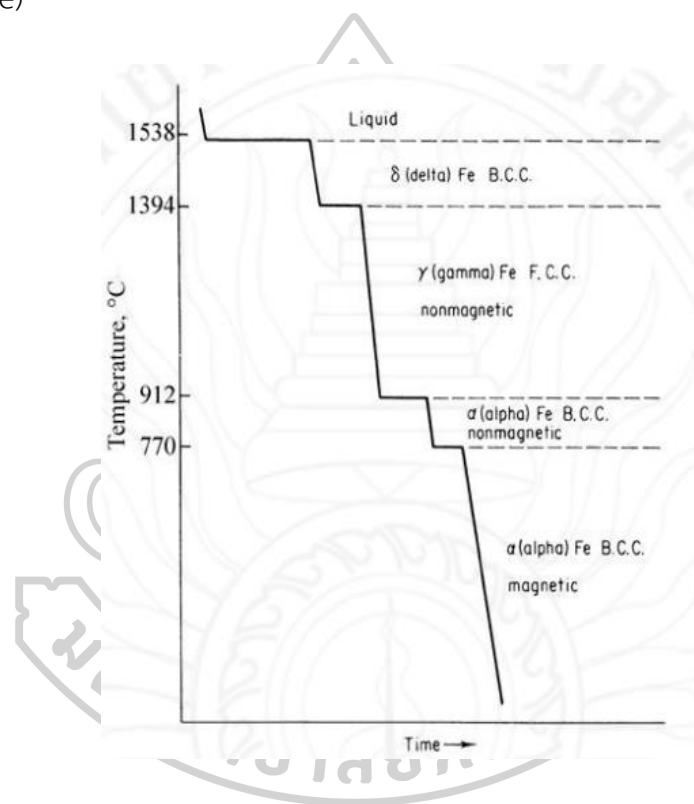
ขั้นตอนต่อจากกระบวนการ BOF คือการหล่ออินกอต (Ingot) หรือเหล็กแท่ง เพื่อให้มีขนาดที่สามารถลำเลียงหรือขนส่งได้สะดวก จากแท่งอินกอตจะถูกนำไปให้ความร้อนและผ่านกระบวนการรีดให้เป็นรูปทรงกึ่งสำเร็จที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมแบบต่าง ๆ และจะนำไปผ่านการแปรรูปขั้นสุดท้ายต่อไป การหล่อแท่งอินกอตจะทำการเทน้ำเหล็กลงแบบหล่อ โลหะที่มีลักษณะเป็นเทเปอร์ เพื่อให้ถอดออกจากแบบหล่อได้สะดวก

การแปรรูปให้เหล็กมีรูปทรงต่าง ๆ จะทำโดยการนำอินกอตหรือแท่งเหล็กมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $1,200^{\circ}\text{C}$ จากนั้นผ่านเข้าลูกกลิ้งเพื่อรีดร้อน จะได้เหล็กที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $150 \times 150 \text{ mm}$ เรียกว่า บิลเล็ต (Billet) หรือกรณีที่มีขนาดใหญ่กว่านี้จะเรียกว่า บลุ่ม (Bloom) และหากมีหน้าตัดเป็นผืนผ้าขนาด $150 \times 300 \text{ mm}$ หรือมากกว่า จะเรียกว่า สแล็บ (Slab) จากนั้นเหล็กเหล่านี้จะถูกนำไปแปรรูปโดยกระบวนการต่าง ๆ ต่อไป เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าไปใช้ในอุตสาหกรรม

2.9.2 เหล็กกล้าคาร์บอน

2.9.2.1 อัญรูปของเหล็ก เหล็กบริสุทธิ์จะมีสภาพอัญรูป (Allotropic) หรือมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกได้หลายรูปแบบ ดังรูปที่ 2.35 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวของเหล็กบริสุทธิ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงผลึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากการเย็นตัวของเหล็ก หลอมเหลวถึงอุณหภูมิ 538°C จะเริ่มเกิดการแข็งตัว โดยอะตอมของเหล็กจะรวมตัวกันเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC การแข็งตัว จะเกิดที่อุณหภูมิคงที่ เรียกชื่อเหล็กชนิดนี้ว่า เหล็กเดลตา (δ -iron) หรือเดลตาเฟอไรต์ (δ -ferrite) จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเย็นลงมาถึง $1,394^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงผลึกจาก BCC ไป เป็น FCC มีชื่อเรียกว่า

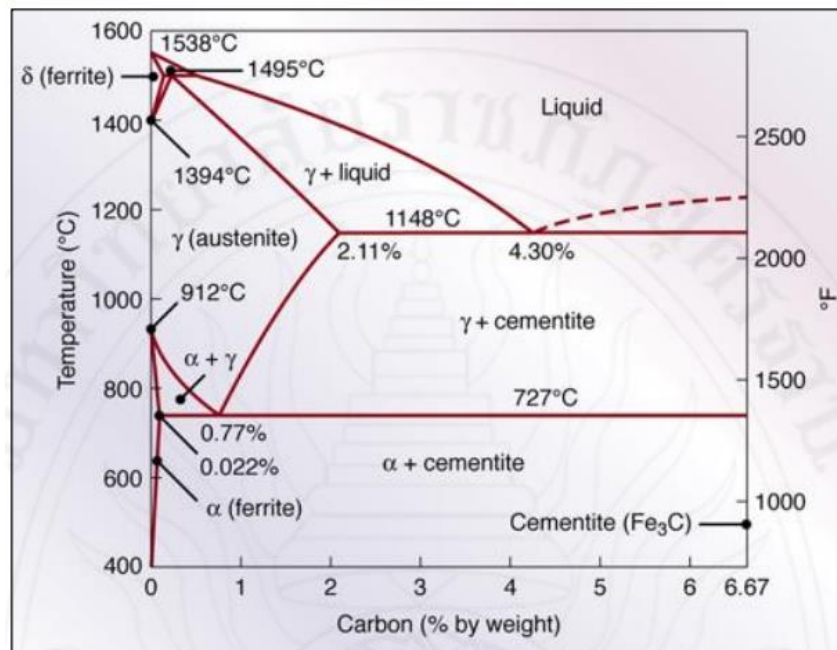
ออสเทนไนต์ (Austenite) หรือเหล็กแกมมา (γ -iron) การเปลี่ยนแปลงเฟสจะเกิดที่อุณหภูมิ คงที่ เช่นกัน ที่อุณหภูมิ 912 °C เหล็กแกมมาจะเปลี่ยนแปลงเฟสไปเป็น เหล็กเฟอร์ไรต์ หรือเหล็กแอลฟา (α -iron) ที่มีผลึกแบบ BCC เหมือนเหล็กเดลตา แต่ระยะห่างของอะตอมจะสั้นกว่า เพราะอยู่ที่ อุณหภูมิต่ำเหล็กบริสุทธิ์จะคงสภาพผลึกแบบ BCC จนถึงอุณหภูมิห้อง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ อีก แต่จะมีเพียงสภาพความเป็นแม่เหล็กเท่านั้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจากช่วงอุณหภูมิระหว่าง 912 – 770 °C เหล็กจะมีสภาพแม่เหล็ก ดูดไม่ติด (Non-magnetic) และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 770 °C เหล็กจะเปลี่ยนไปสู่สภาพที่แม่เหล็กดูดติด (Magnetic) เราเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิคูรี (Curie Temperature)



รูปที่ 2.35 เส้นโค้งการเย็นตัวของเหล็กบริสุทธิ์และการเปลี่ยนแปลงสภาพอัญรูป [19]

2.9.2.2 แผนภาพเฟสของเหล็ก-คาร์บอน แผนภาพเฟสระหว่างเหล็กกับคาร์บอนแสดงในรูปที่ 2.36 โดยปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในแผนภาพเฟสจะมี เพียง 6.67% เท่านั้นที่นำมาศึกษา ทั้งนี้เพราะปริมาณคาร์บอนสูงกว่นี้จะไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม อันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกลที่แข็ง และเปราะ ภายในแผนภาพเฟสจะมีทั้งเส้นทึบและเส้นประ โดยเส้นทึบจะเป็น การเปลี่ยนแปลงของเฟสในสภาวะกึ่งเสถียร (Metastable) ของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ (Fe-Fe₃C) ใช้ศึกษาเฟส ของเหล็กกล้า และเหล็กหล่อสีขาว ส่วนเส้นประจะเป็น การเปลี่ยนแปลงเฟสในสภาวะเสถียรของเหล็กกับ แกรไฟต์

(Fe-Graphite) ซึ่งเกิดจากการเย็นลงหรือร้อนขึ้นอย่างช้าๆ เฟสในสภาวะเสถียรใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กหล่อสีเทา ภายในแผนภาพเฟสประกอบไปด้วยเฟสและโครงสร้างที่ส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

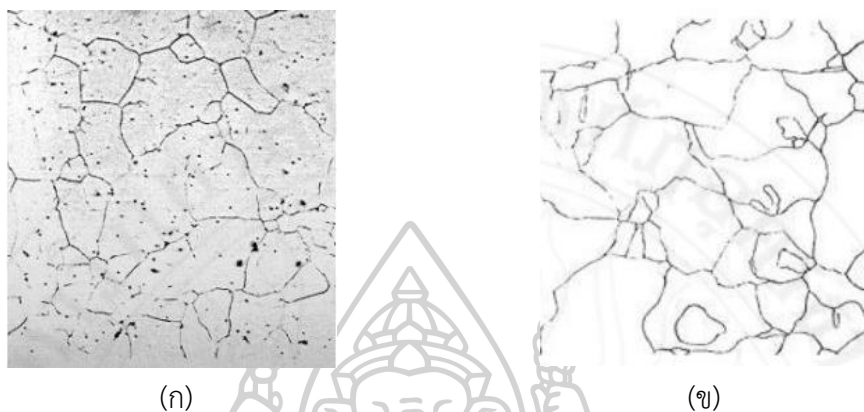


รูปที่ 2.36 แผนภาพเฟสของเหล็ก-คาร์บอน [19]

- เหล็กเดลตา (Delta Iron;) เหล็กชนิดนี้จะอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 1,394 - 1,538 °C มีสภาวะเป็นสารละลายของแข็ง โดยคาร์บอนจะละลายอยู่ได้สูงสุด 0.09 % ที่อุณหภูมิ 1,495 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติกเหล็กเดลตามีระบบผลึกแบบ BCC มีสภาพเป็นเฟอร์โรแมกเนติกและคงรูปได้ที่อุณหภูมิ สูงกว่า 1,394 °C เท่านั้น หากต่ำกว่านี้จะเปลี่ยนสภาพไปเป็นเหล็กแกมมา

- เหล็กแกมมา (Gamma Iron;) หรือออสเทนไนต์ (Austenite) เหล็กชนิดนี้มีสถานะเป็นสารละลายของแข็ง โดยคาร์บอนสามารถละลายได้สูงสุด 2.11% ที่อุณหภูมิ 1,148 °C คุณลักษณะทั่วไปจะอ่อน เหนียว แม่เหล็กดูดไม่ติด มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.37 (ก)

- เหล็กแอลฟา (Alpha Iron) หรือเฟอร์ไรต์ (Ferrite) มีสถานะเป็นสารละลายของแข็งคาร์บอน ละลายได้สูงสุด 0.0218% ที่อุณหภูมิ 727 °C มีผลึกแบบ BCC สมบัติอ่อนและเหนียว และไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กในช่วง 770 – 912 °C ลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.37 (ข)



รูปที่ 2.37 ภาพโครงสร้างจุลภาค (ก) ออสเทนไนต์ (500x) และ (ข) เฟอไรต์ (500x) [19]

- ซีเมนไทต์ (Cementite) หรือเหล็กคาร์ไบด์ (Iron Carbide) เป็นสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก มีสูตรทางเคมีคือ Fe_3C มีสมบัติที่แข็งและเปราะ ประกอบไปด้วยคาร์บอน 6.67% มีระบบผลึกแบบออร์โธรมบิก (Orthorhombic)

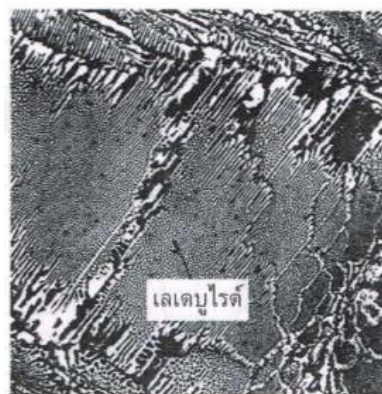
- เพิร์ลไลต์ (Pearlite) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากปฏิกิริยายูเทคตอยด์ ประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอไรต์สลับกับซีเมนไทต์เป็นชั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.38 (ก) ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวเรียกว่า ลามลลาเพิร์ลไลต์ (Lamella pearlite) โครงสร้างชนิดนี้จะมีความแข็งแรงสูง เพราะเกิดจากโครงสร้างที่อ่อนของเฟอไรต์สลับกับ โครงสร้างที่แข็งของซีเมนไทต์

- เลเดบูไรต์ (Ledeburite) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากปฏิกิริยายูเทคติก โดยมีส่วนผสมคาร์บอน 4.3 % ที่อุณหภูมิ $1,148\text{ }^{\circ}\text{C}$ ของเหลวเย็นตัวลงกลายเป็นของแข็ง 2 ชนิด คือ ออสเทนไนต์และซีเมนไทต์

- เลเดบูไรต์ทรานส์ฟอร์ม (Ledeburite Transformed) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพ ของออสเทนไนต์ในโครงสร้างยูเทคติกโดยออสเทนไนต์ดังกล่าวจะให้ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ กลายเป็นโครงสร้างเพิร์ลไลต์ดังนั้นโครงสร้างเลเดบูไรต์ทรานส์ฟอร์มจึงประกอบไปด้วยโครงสร้างของซีเมนไทต์และเพิร์ลไลต์ซึ่งโครงสร้างทั้งสองเป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อสีขาว (White cast iron) ดังแสดงในรูปที่ 2.38 (ข)



(ก)



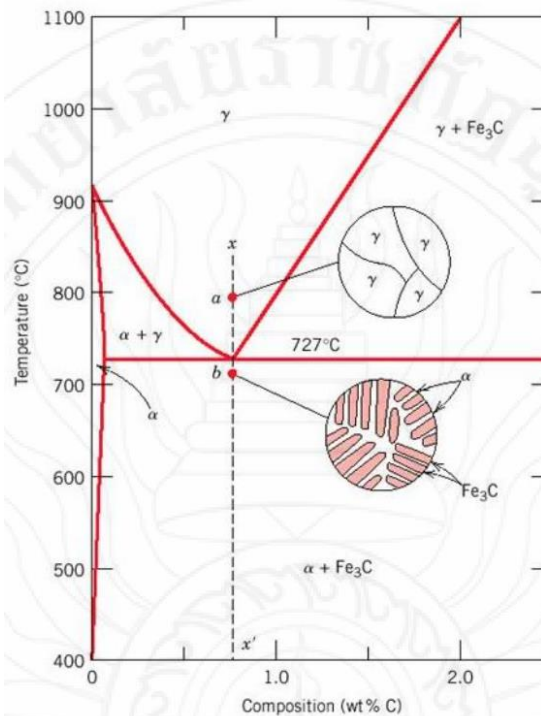
(ข)

รูปที่ 2.38 ภาพโครงสร้างจุลภาค (ก) เพิร์ลไลต์ (X 2,500) (ข) เหล็กหล่อสีขาว (เลเดบไรต์ทรานส์ฟอร์ม)
[19]

2.9.2.3 การเกิดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน

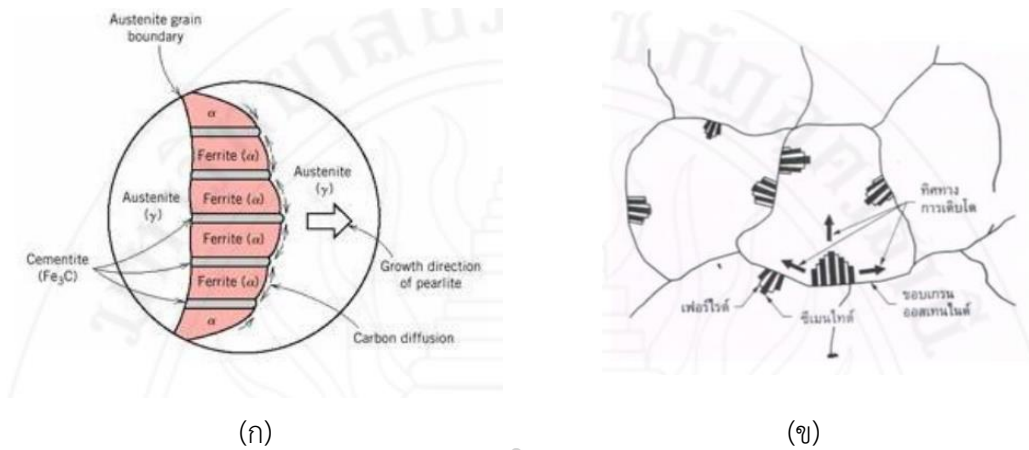
เหล็กกล้าคาร์บอนจะมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 2% โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก การเปลี่ยนแปลงของเฟสในสภาวะการเย็นตัวอย่างช้าๆ จะเกิดขึ้นเมื่อเฟสของ γ เย็นตัวผ่านขอบเขตของ α และ Fe_3C หากเราพิจารณาจากแผนภาพเฟส การเกิดโครงสร้างจุลภาค ของเหล็กกล้าจะแยกออกเป็น โครงสร้างของเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ โครงสร้างเหล็กยูเทคตอยด์ และโครงสร้างเหล็ก ไฮเปอร์ยูเทคตอยด์

- โครงสร้างเหล็กยูเทคตอยด์ ปริมาณคาร์บอนของเหล็กยูเทคตอยด์จะอยู่ที่ประมาณ 0.77% จากรูปที่ 2.38 ที่อุณหภูมิประมาณ $800^{\circ}C$ หรือจุด a จะมีเฟสเป็น γ จากนั้นเมื่อเกิดการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ลงมาตามเส้น xx' จนถึง อุณหภูมิ $727^{\circ}C$ จะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ขึ้น โดย γ จะแตกตัวให้ α และ Fe_3C ที่อุณหภูมิคงที่ ลักษณะโครงสร้างของยูเทคตอยด์จะเป็นแถบหรือชั้นสลับกันระหว่าง α เฟส γ และ Fe_3C โดยความหนาจะมีอัตราส่วนประมาณ 7 : 1 โครงสร้าง นี้มีชื่อเรียกว่า เพิร์ลไลต์ (Pearlite) ดังแสดงในรูปที่ 2.40 (ก) ทิศทางของชั้นระหว่าง α และ Fe_3C จะมีทิศทาง ไปในแนวเดียวกัน โดยชั้นของ α จะมีความหนากว่า โดยจะเห็นเป็นสีขาว และชั้นของ Fe_3C จะมีขนาดที่บาง มีสีดำโครงสร้าง เพิร์ลไลต์จะมีสมบัติทางกลอยู่ระหว่างความอ่อนเหนียวของเฟอไรต์และความแข็งเปราะของซีเมนไทต์



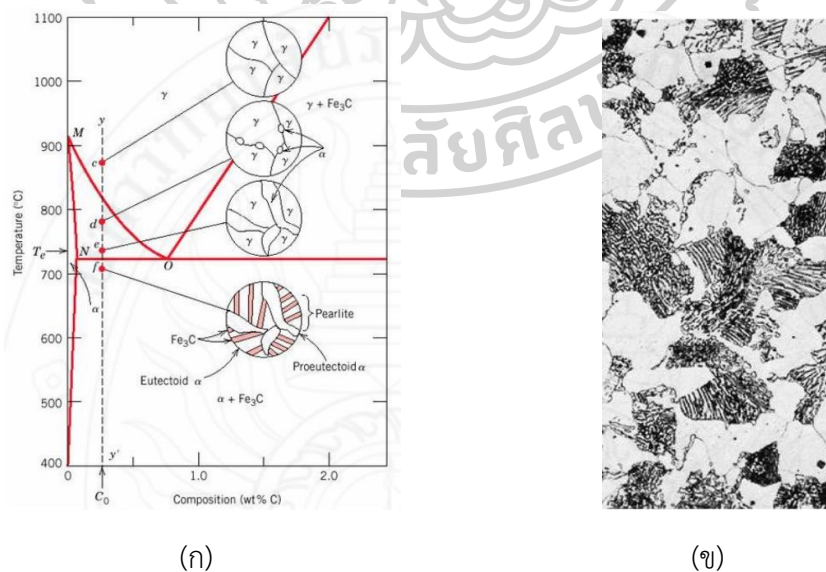
รูปที่ 2.39 ลักษณะการเกิดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กยูเทกตอยด์ [19]

การเกิดขึ้นของโครงสร้างระหว่างเฟอร์ไรต์ (0.0218% C) และซีเมนไทต์ (6.67% C) จะเกิดขึ้นจากการแพร่ของอะตอมคาร์บอน รูปที่ 2.40 (ก) แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของปฏิกิริยายูเทกตอยด์ จากรูปทิศทางการแพร่ของอะตอมคาร์บอนจะเป็นไปตามหัวลูกศรเล็ก ๆ อะตอมคาร์บอนจะแพร่จากเฟอร์ไรต์ซึ่งต้องการคาร์บอนเพียง 0.0218% ไปสู่ซีเมนไทต์ที่ต้องการคาร์บอนถึง 6.67% การเกิดจะเริ่มต้นจากการตกผลึกของ Fe_3C ที่บริเวณขอบเกรนของออสเทนไนต์ที่มีคาร์บอนอยู่ 0.77% และดึงคาร์บอนบริเวณใกล้เคียงให้มารวมตัวเป็นแผ่น หรือชั้นของ Fe_3C ทำให้ปริมาณคาร์บอนบริเวณใกล้เคียงลดลงอย่างรวดเร็ว จนเหลือปริมาณใกล้เคียง 0.0218% ซึ่งเป็นปริมาณที่ทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์ การเกิดแถบของซีเมนไทต์จะเกิดขึ้นหลาย ๆ จุดในเกรนของออสเทนไนต์ (รูปที่ 2.39 (ข)) และมีทิศการเข้าหาแกนกลางของเกรน เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาปลายของแถบซีเมนไทต์ และเฟอร์ไรต์จะมาชนกันในทิศทางที่แตกต่าง



รูปที่ 2.40 (ก) กลไกการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์จากเฟสออสเทนไนต์ (ข) ทิศทางการขยายตัวของซีเมนไต์และ เฟอร์ไรต์จากขอบเกรนออสเทนไนต์ [19]

- โครงสร้างเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์จะมีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.008 - 0.77% จากรูปที่ 2.41 (ก) ที่ส่วนผสม C_0 เหล็กมีการเย็นตัวตามเส้น yy' โดยที่จุด C เหล็กจะมีเฟสเป็น γ เมื่อ เย็นตัวช้า ๆ ลงมา ถึงจุด d จะเกิดโครงสร้างของ α ขึ้นบริเวณขอบเกรนของ γ และขยายตัวโตขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อ อุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง มาถึงเส้นอุณหภูมิยูเทคตอยด์หรือเส้น NO เฟส γ จะให้ปฏิกิริยายูเทคตอยด์เกิดเป็น โครงสร้างเพิร์ลไลต์ และเมื่อผ่าน อุณหภูมิยูเทคตอยด์ลงไปจนถึงอุณหภูมิห้อง เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์จะประกอบ ไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์



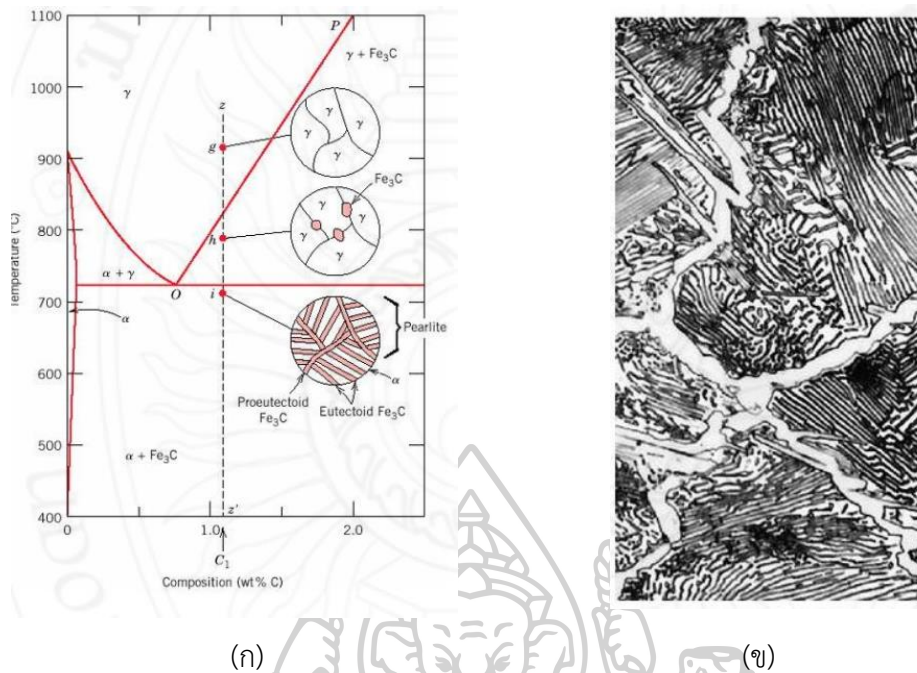
รูปที่ 2.41 (ก) ขั้นตอนการเกิดโครงสร้างของเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ (ข) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ [19]

ขณะมีการเย็นตัวผ่านขอบเขตของเฟส $\alpha + \gamma$ (MNO) ปริมาณของเฟสทั้งสองก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ปริมาณเฟสของ α จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งเราสามารถตรวจสอบได้โดยการลากเส้นไทจากจุด d ไป ตัดเส้น MO และจากจุด e ไปตัดเส้น MO จะเห็นว่าเส้นจากจุด e ไป MO จะยาวกว่าเส้นจากจุด ไป MO แสดงว่าปริมาณของเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ในขณะที่ปริมาณ α เพิ่มขึ้น ปริมาณของ γ ก็จะลดลง โดยจะสังเกตเห็นว่าเส้น MN จะเอียงเข้าใกล้จุด d และ e ปริมาณ α ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนใน γ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก α ต้องการคาร์บอนเพียง 0.0218% เท่านั้น ดังนั้นขณะที่ α ขยายตัว อะตอมของคาร์บอนจะถูกผลักออกมารวมกันในเนื้อของ γ มากขึ้น (เส้น MO ลาดลงไปทางขวา) และเมื่อถึงอุณหภูมิยูเทคตอยด์ ปริมาณคาร์บอนใน γ จะมีสูงถึง 0.77% ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนที่ให้ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ จึงเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้น และทำให้ได้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ ขณะมีการเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ โครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นก่อนหน้าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด และมีชื่อเรียกว่า โปรยูเทคตอยด์เฟอร์ไรต์ (Proeutectoid Ferrite) ส่วน เฟอร์ไรต์ที่เกิดจากปฏิกิริยายูเทคตอยด์ซึ่งอยู่ในโครงสร้างเฟอร์ไรต์จะเรียกว่า ยูเทคตอยด์เฟอร์ไรต์ (Eutectoid Ferrite)

- โครงสร้างเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์เหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์มีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.77 - 2.11% การเย็นตัวจากเฟส γ ที่ส่วนผสม C_1 ในรูปที่ 2.42 (ก) ตามเส้น zz' โดยที่จุด g จะมีเฟสเป็น γ และเย็น ตัวลงมาตัดเส้น OP ซึ่งเป็นเส้นขอบเขต Fe_3C จะเกิดการตกผลึกของโครงสร้าง Fe_3C ที่บริเวณขอบเกรนของ γ และขยายตัวโตขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิลดลง

เราสามารถตรวจสอบปริมาณ Fe_3C ได้จากการลากเส้นไทไปตัดเส้น PO เมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้เส้น PO ลาดเอียงลงมาทางซ้าย ทำให้เส้นยาวขึ้น ซึ่งก็คือปริมาณ Fe_3C ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง โครงสร้าง Fe_3C ที่ เกิดขึ้นมาก่อนนี้จะมี ชื่อเรียกว่า โปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ (Proeutectoid Cementite)

เนื่องจาก Fe_3C เป็นโครงสร้างที่ต้องการคาร์บอนสูงถึง 6.67% ดังนั้นขณะเย็นตัวและเกิดการขยายตัว อะตอมของคาร์บอนที่อยู่ใน γ จะถูกดึงออกมารวมตัวกันเป็น Fe_3C ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนใน γ ลดลง และเมื่อถึงอุณหภูมิยูเทคตอยด์ ปริมาณคาร์บอนใน γ ก็จะเหลือ 0.77% ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ให้ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ ก็จะเกิดปฏิกิริยาทันทีและกลายเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่ถูกล้อมรอบด้วยซีเมนต์ (ดังแสดงใน รูปที่ 2.42 (ข)) ซึ่งเป็นโครงสร้างของเหล็กที่มีคาร์บอน ผสมอยู่ 1 - 4% โครงสร้าง Fe_3C ที่ล้อมรอบโครงสร้าง เฟอร์ไรต์อยู่ลักษณะนี้เรียกว่า คาร์ไบด์แบบตาข่าย (Network Carbide) โดยจะมีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็ก คือ แข็งและเปราะ ทำให้มีความแข็งแรงต่ำ



รูปที่ 2.42 (ก) ขั้นตอนการเกิดโครงสร้างของเหล็กไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ (ข) โครงสร้างจุลภาคของเหล็กไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ (1.4% C) [19]

2.9.2.4 การจำแนกประเภทของเหล็กกล้าคาร์บอนจากปริมาณคาร์บอน

วิธีการจำแนกประเภทของเหล็กกล้าคาร์บอนนั้น มีหลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการจำแนกโดยกระบวนการผลิตประกอบไปด้วยเหล็กกล้าเบสเซเมอร์ (Bessemer) เหล็กกล้าโอเพนฮาร์ท (Open heart) เหล็กกล้าเตาไฟฟ้าและเหล็กกล้าเตาครุซีเบิล (Crucible) เป็นต้น เหล็กกล้ายังสามารถจำแนกตามลักษณะการใช้งาน ซึ่ง ประกอบไปด้วย เหล็กกล้าเครื่องจักรกล เหล็กสปริง เหล็กโครงสร้าง หรือเหล็กกล้าเครื่องมือ เป็นต้น การจำแนกชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนบางครั้งอาศัยปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่เป็นเกณฑ์การแบ่ง ได้แก่

- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะมีคาร์บอนต่ำกว่า 0.20% เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางมาก เช่น อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์จะใช้ทำชิ้นส่วนที่เป็นเหล็กแผ่นบางต่าง ๆ หรือเหล็กแผ่นขนาดใหญ่ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมทั่วไป เหล็กกล้าชนิดนี้จะมีความแข็งแรงน้อย เหนียว และแปรรูปได้ง่าย ใช้งบงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูง

- เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.20 - 0.50% เป็นกลุ่มที่มีความแข็งแรงสูง กว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำนิยมใช้เป็นชิ้นประกอบของเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น เพลาข้อเหวี่ยง และ ชิ้นส่วนข้อต่อต่าง ๆ

- เหล็กกล้าคาร์บอนสูง มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.5% มีความแข็งแรง แข็งแกร่ง และความแข็งสูง ใช้ทำสปริงและเครื่องมือคมตัดต่าง ๆ

2.9.2.5 การจำแนกประเภทของเหล็กกล้าคาร์บอนจากแผนภาพเฟส

ปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่เป็นตัวจำแนกประเภทของเหล็กออกเป็น 3 ประเภท โดยเมื่อดูจากแผนภาพเฟสเหล็ก กลุ่มแรกเป็นเหล็กบริสุทธิ์ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 0.008% และมีเฟสเป็นเฟอร์ไรต์ กลุ่มที่ 2 ปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.008 - 2.11% กลุ่มนี้เป็นเหล็กกล้า (Steel) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ เหล็กโรโปยูเทกตอยด์ (0.008 - 0.77%C) และเหล็กไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ (0.77 - 2.11%C) เหล็กไฮโปยูเทกตอยด์ประกอบไปด้วย โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ ส่วนเหล็กไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ โครงสร้างประกอบไปด้วยเฟิร์ลไลต์และซีเมนไทต์ ที่ปริมาณคาร์บอน 0.77% จะเรียกเหล็กชนิดนี้ว่า เหล็กกล้ายูเทกตอยด์ (Eutectoid steel) โดยมีโครงสร้างเป็นเฟิร์ลไลต์ 100% เหล็กกลุ่มที่ 3 มีปริมาณคาร์บอนตั้งแต่ 2.11% ขึ้นไป กลุ่มนี้จะเป็นเหล็กหล่อซึ่งที่ใช้งานโดยทั่ว ๆ ไป จะมีคาร์บอนไม่เกิน 4.5% หากมากกว่านี้จะมีสมบัติที่แข็งและเปราะ ไม่เหมาะกับการใช้งาน

2.9.3 เหล็กกล้าผสม

เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาที่ใช้อยู่ทั่ว ๆ ไปไม่มีความแข็งแรงค่อนข้างดีและราคาต่ำสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย อย่างไรก็ตามงานทางด้านวิศวกรรมจำนวนมากที่ต้องการสมบัติเฉพาะอย่าง ซึ่งเหล็กกล้า คาร์บอนทั่ว ๆ ไป ไม่สามารถทำได้ ขีดจำกัดของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาประกอบไปด้วย

- ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงที่สูงกว่า 100,000 psi โดยที่ฟิเนสส์ (Toughness) และความเหนียวไม่ลดลง
 - ชิ้นงานขนาดใหญ่ไม่สามารถชุบแข็งแล้วได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ตลอดชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถเพิ่มความ แข็งบริเวณที่ลึกๆ ได้
 - อัตราการเย็นตัวที่สูงมากในการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเพื่อให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้น จะทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอและแตกร้าวได้
 - เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาจะมีความต้านทานต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี
 - เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมน้อยมาก
 - เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ง่ายมาก
- จากข้อจำกัดข้างต้น จึงมีการผลิตเหล็กกล้าผสม (Alloy steel) ขึ้นมาเพื่อช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นซึ่งอาจจะมีราคาที่สูงกว่า แต่สมบัติต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้นก็ช่วยให้มีความคุ้มค่ามากกว่า ธาตุผสม

โดยทั่ว ๆ ไปที่ใช้เติมในเหล็กกล้าผสม ได้แก่ นิกเกิล (Ni), โครเมียม (Cr), โมลิบดีนัม (Mo), แมงกานีส (Mn), ซิลิคอน (Si) และ วาเนเดียม (V) เป็นต้น วัตถุประสงค์ของการเติมธาตุผสมต่าง ๆ เข้าไปได้แก่

- เพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) เพื่อทำให้ความลึกในการชุบแข็งสูงขึ้น
- คงความแข็งแรงและขนาดได้ดีที่อุณหภูมิสูง
- เพิ่มสมบัติทางกลทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง
- เพิ่มความทนทานการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ
- เพิ่มความสามารถพิเศษบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ความทนทานการเสียดสีและความล้าตัว

2.9.3.1 อิทธิพลของธาตุผสม

ธาตุผสมที่เติมเข้าไปในเหล็กกล้าจะมีอิทธิพลต่อเหล็กกล้าหลายอย่าง ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีอิทธิพลต่อออสเทนไนต์ กลุ่มที่มีอิทธิพลต่อเฟอร์ไรต์ และกลุ่มที่มีอิทธิพลต่อการเกิดคาร์ไบด์ โดยสองกลุ่มแรก จะส่งผลต่อแผนภาพเฟสของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์โดยตรง กลุ่มที่มีอิทธิพลต่อออสเทนไนต์ หรือเรียกอีกอย่างว่ากลุ่มเพิ่มเสถียรภาพออสเทนไนต์ ธาตุผสมในกลุ่มนี้เมื่อเติมเข้าไปแล้วจะทำให้พื้นที่ของออสเทนไนต์ในแผนภาพเฟสเพิ่มขึ้น ส่วนกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์จะทำให้พื้นที่ของออสเทนไนต์ลดลง และเพิ่ม พื้นที่ของเฟอร์ไรต์ให้มากขึ้น จาก การเพิ่มขึ้น และลดลงของออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ในแผนภาพเฟส ทำให้สามารถจำแนกลักษณะของแผนภาพเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมธาตุผสมเข้าไปออกเป็น 4 ชนิด โดยแต่ละชนิดมีคุณลักษณะดังนี้

ชนิดที่ 1 กลุ่มเปิดพื้นที่เฟสออสเทนไนต์ ธาตุผสมกลุ่มนี้ได้แก่ แมงกานีส (Mn), นิกเกิล (Ni), โคบอลต์ (Co), รูเทเนียม (Ru), ออสเมียม (Os), อิริเดียม (Ir) และรีทเทอร์ฟอรัเดียม (Rf) เป็นต้น พื้นที่ของเฟสออสเทนไนต์ที่อยู่ในขอบเขตของ $\alpha + \gamma$ จะถูกขยายให้ต่ำลงจนถึงอุณหภูมิห้อง และเลื่อนขอบเขตที่เป็นเฟสระหว่าง $\delta + \gamma$ ให้สูงขึ้น

ชนิดที่ 2 กลุ่มที่ขยายพื้นที่เฟสออสเทนไนต์ กลุ่มนี้จะคล้ายกลุ่มแรก แต่ไม่ถึงกับทำให้พื้นที่ของออสเทนไนต์เปิดออก เพียงแค่ขยายให้กว้างขึ้นเท่านั้น ธาตุผสมกลุ่มนี้ได้แก่ คาร์บอน (C), ไนโตรเจน (N), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn) และทอง (Au) พื้นที่ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ขยายกว้างมากนัก ตัวอย่างเช่น การเติมธาตุคาร์บอนและ ไนโตรเจนเข้าไปจะทำให้ขอบเขตของออสเทนไนต์ที่แสดงความสามารถในการละลายเป็นสารละลายของแข็งเพิ่ม เป็น 2.0% และ 2.8% ตามลำดับ

ชนิดที่ 3 กลุ่มที่ปิดพื้นที่ออสเทนไนต์ ธาตุผสมกลุ่มนี้จะทำให้พื้นที่ออสเทนไนต์เล็กลงมากจนเหลือ พื้นที่เป็นวงเล็ก ๆ ซึ่งบางครั้งเรียกว่า บ่วงแกมมา (Gamma loop) พื้นที่ของออสเทนไนต์ลดลงหมายความว่าพื้นที่ ของเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้น หรือธาตุกลุ่มนี้จะเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์นั่นเอง ธาตุเหล่านี้

ได้แก่ ซิลิคอน (Si), อะลูมิเนียม (Al), เบริลเลียม (Be) และฟอสฟอรัส (P) และรวมถึงกลุ่มที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ด้วย ดังเช่น โครเมียม (Cr), ไทเทเนียม (Ti), วาเนเดียม (V), โมลิบดีนัม (Mo) และทังสแตน (W) เป็นต้น

ชนิดที่ 4 กลุ่มที่ลดพื้นที่ออสเทนไนต์ กลุ่มนี้จะทำให้ขอบเขต α และ γ ถูกบีบให้แคบ ธาตุผสมที่ทำให้เกิดผลอย่างรุนแรงเช่นนี้ได้แก่ โบรอน (B) โดยเฉพาะเมื่อเติมลงไปพร้อมกับธาตุกลุ่มที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ ดังเช่น แทนทาลัม (Ta), เซอร์โคเนียม (Zr) และไนโอเนียม (Nb) เป็นต้น

พฤติกรรมการรวมตัวของธาตุผสมในเหล็กกล้าผสมแล้วเพิ่มเสถียรภาพเฟอร์ไรต์หรือออสเทนไนต์นั้น จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโครงสร้างผลึกของแต่ละธาตุ โดยธาตุผสมที่มีระบบผลึกแบบ BCC ก็จะเป็นตัวที่เพิ่ม เสถียรภาพให้เฟอร์ไรต์ ส่วนธาตุผสมที่มีระบบผลึกแบบ FCC ก็เพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนต์โดยอาศัยสภาพเฟสต่าง ๆ ที่มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิห้อง บางครั้งเราจะเรียกชื่อของเหล็กตามเฟสนั้นๆ เช่น เหล็กกล้าที่เติมนิกเกิลและแมงกานีสในปริมาณมาก แล้วทำให้เกิดเฟส ออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิห้อง เราจะเรียกเหล็กกลุ่มนี้ว่า เหล็กกล้าออสเทนนิติก (Austenitic steel) หรือเหล็กกล้าสแตนเลสออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) มีส่วนผสมของคาร์บอน 1% และโครเมียม 18% เป็นต้น และกรณีของเหล็กกล้าที่มีเฟสเฟอร์ไรต์ที่ อุณหภูมิห้อง เราก็จะเรียกว่า เหล็กกล้าเฟอร์ริติก (Ferritic steel) เป็นต้น

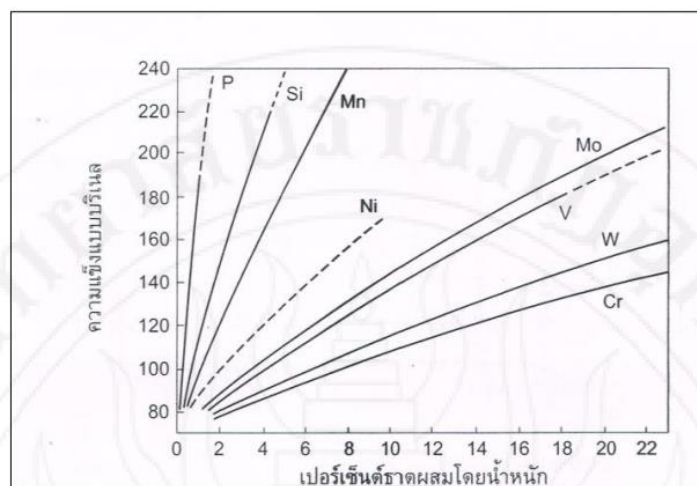
2.9.3.2 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อเฟอร์ไรต์

ธาตุผสมบางชนิดละลายได้ดีในเฟอร์ไรต์ ดังเช่น นิกเกิล (Ni), ซิลิคอน (Si), อะลูมิเนียม (Al), ทองแดง (Cu) และ โคบอลต์ (Co) เป็นต้น ส่วนธาตุบางชนิดสามารถละลายในเฟอร์ไรต์และรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ด้วย เช่น แมงกานีส (Mn), โครเมียม (Cr), ทังสแตน (W), โมลิบดีนัม (Mo), วาเนเดียม (V) และไทเทเนียม (Ti) ธาตุเหล่านี้จะละลาย ในเฟอร์ไรต์ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็ก หากปริมาณคาร์บอนมาก ก็มีแนวโน้มที่จะไปรวมตัว กับธาตุผสมแล้วเกิดเป็นคาร์ไบด์ได้มาก ดังตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็น พฤติกรรมของธาตุผสมแต่ละชนิดว่ามีแนวโน้มที่จะละลายในเฟอร์ไรต์หรือรวมตัวเป็นคาร์ไบด์และธาตุบางชนิดจะมีอิทธิพลทั้งสองแบบ โดยจะมากขึ้นเพียงใดให้สังเกตจากขนาดของหัวลูกศร

ตารางที่ 2.5 พฤติกรรมของธาตุผสมแต่ละชนิดในเหล็กกล้าที่ผ่านการอบอ่อน [19]

ธาตุผสม	กลุ่มที่ 1 ละลายในเฟอร์ไรต์	กลุ่มที่ 2 รวมตัวในคาร์ไบด์
นิกเกิล	Ni	
ซิลิคอน	Si	
อะลูมิเนียม	Al	
ทองแดง	Cu	
แมงกานีส	Mn	↔ Mn
โครเมียม	Cr	↔ Cr
ทังสเตน	W	↔ W
โมลิบดีนัม	Mo	↔ Mo
วานาเดียม	V	↔ V
ไทเทเนียม	Ti	↔ Ti

ธาตุผสมทุกชนิดที่ละลายในเฟอร์ไรต์จะเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้า ซึ่งเป็นผลมาจากหลักการ เพิ่มความแข็งแรงโดยสารละลาย ธาตุผสมที่เพิ่มความแข็งจากน้อยไปหามาก ได้แก่ โครเมียม (Cr), ทังสเตน (W), วานาเดียม (V), โมลิบดีนัม (Mo), นิกเกิล (Ni), แมงกานีส (Mn), ซิลิคอน (Si) และฟอสฟอรัส (P) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.43 ธาตุที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าผสมมากที่สุดคือแมงกานีสและซิลิคอน แต่ก็จะทำให้เปอร์เซ็นต์การยึดตัวลดลงเหมือนกัน



รูปที่ 2.43 อิทธิพลของธาตุผสมชนิดต่างๆ ที่ละลายในเฟอร์ไรต์แล้วมีผลต่อความแข็ง [19]

2.9.3.3 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อการเกิดคาร์ไบด์

ธาตุผสมที่เติมเข้าไปในเหล็กกล้าจะมีความสามารถในการรวมตัวกับคาร์บอนแล้วกลายเป็นคาร์ไบด์ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าธาตุผสมเหล่านั้นมีความไวในการรวมตัวกับคาร์บอน (affinity) มากน้อยเพียงใดอีกทั้งยังขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กด้วยโดยปกติแล้วธาตุผสมที่เติมลงไปเป็นเหล็กแล้วรวมตัว กับคาร์บอนให้คาร์ไบด์นั้นจำแนก ออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

- คาร์ไบด์เชิงซ้อน (Complex or Double Carbide) เกิดขึ้นจากธาตุผสมเข้าไปแทรกอยู่ในซีเมนไทต์ (Fe_3C) โดยอะตอมของธาตุผสมจะเข้าไปแทนที่อะตอมของเหล็กในซีเมนไทต์ ซึ่งเขียนเป็นสูตรดังนี้ $(Fe - M)_3C$ โดย M หมายถึง ธาตุผสมที่เติมเข้าไป เช่น $(Fe - Mn)_3C$, $(Fe - Mo)_3C$ และ $(Fe - Cr)_3C$ เป็นต้น

- คาร์ไบด์ชนิดพิเศษ (Special Carbide) เกิดขึ้นในกรณีที่มีการเติมธาตุผสมปริมาณมากและเหล็กมีปริมาณคาร์บอนมากด้วย จึงทำให้ธาตุผสมสามารถรวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ได้ คาร์ไบด์กลุ่มนี้จะมีเสถียรภาพสูงมากซึ่งอาจอยู่ในรูปของคาร์ไบด์เชิงเดี่ยว (Single carbide) ที่เขียนเป็นสัญลักษณ์ดังนี้ MC , M_2C , M_3C , M_6C , M_7C_3 และ $M_{23}C_6$ ตัวอย่างของคาร์ไบด์กลุ่มนี้ได้แก่ TiC , NbC และ Cr_7C_3 เป็นต้น บางกรณีอาจเกิดคาร์ไบด์เชิงซ้อนขึ้นได้ โดยซีเมนไทต์ เข้าไปแทรกอยู่ในคาร์ไบด์ของธาตุผสม ซึ่งอาจเขียนเป็นสูตรได้คือ $(M - Fe)_mC_n$ โดย m และ n หมายถึงจำนวนอะตอมของธาตุผสม ตัวอย่างของคาร์ไบด์ชนิดนี้ได้แก่ $(Cr \cdot Fe)_7C_3$, $(Mo \cdot Fe)_6C$ และ $(W \cdot Fe)_6C$ เป็นต้น

2.9.3.4 ชนิดของเหล็กกล้าผสม

การจำแนกชนิดของเหล็กกล้าผสมโดยอาศัยส่วนผสมทางเคมีเป็นเกณฑ์นั้น ดังแสดงตารางที่ 2.6 โดย มาตรฐานกล่าวเป็นของระบบ SAE - AISI และเนื่องจากเหล็กกล้าผสมที่มีใช้ในอุตสาหกรรมนั้นมีจำนวนมาก จึงเป็นเรื่องยากที่จะพูดถึงรายละเอียดทางด้านสมบัติและการใช้งานได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามเราพอจะสรุป อิทธิพลของธาตุผสมหลักที่เติมเข้าไปในเหล็กกล้าผสมแต่ละชนิดและการใช้งานต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.6 ชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำมาตรฐาน SAE-AISI [19]

รหัสตัวเลขและอักษร	ชนิดของเหล็กและปริมาณธาตุผสม (%)
เหล็กกล้าคาร์บอน	
10XX	คาร์บอนธรรมดา (Mn 1.0 สูงสุด)
11xx	ลัดซ์เฟอร์
12xx	ลัดซ์เฟอร์และฟอสฟอรัส
15xx	คาร์บอนธรรมดา (ปริมาณ Mn สูงสุด ๕ 1.00 - 1.65)
เหล็กแมงกานีส	
13xx	Mn 1.75
เหล็กนิกเกิล	
23xx	Ni 3.50
25xx	Ni 5.00
เหล็กนิกเกิล-โครเมียม	
31XX	Ni 1.25; Cr 0.65 และ 0.80
32xx	Ni 1.75; Cr 1.07
33xx	Ni 3.50; Cr 1.50 และ 1.57
34XX	Ni 3.00; Cr 0.77
เหล็กโมลิบดีนัม	
40XX	Mo 0.20 และ 0.25
44xx	Mo 0.40 และ 0.52
เหล็กโครเมียม-โมลิบดีนัม	
41xx	Cr 0.50, 0.80 และ 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25 และ 0.30
เหล็กนิกเกิล-โครเมียม-โมลิบดีนัม	
43xx	Ni 1.82; Cr 0.50 และ 0.80; Mo 0.25
43BVXX	Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12 และ 0.25; V 0.03 ต่ำสุด

(ต่อ) ตารางที่ 2.6 ชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำมาตรฐาน SAE-AISI [19]

รหัสตัวเลขและอักษร	ชนิดของเหล็กและปริมาณธาตุผสม (%)
เหล็กนิคเกิล-โครเมียม-โมลิบดีนัม	
47xx	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20 และ 0.35
81xx	Ni 0.30; Cr 0.40; Mo 0.12
86xx	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20
87xx	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25
88xx	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35

เหล็กแมงกานีส (Manganese steel, กลุ่ม 13xx) แมงกานีสปกติแล้วจะเป็นตัวที่ช่วยลดออกซิเจนใน กรรมวิธีผลิตเหล็กกล้า และเป็นตัวช่วยลดการแตกร้าวที่อุณหภูมิสูงขณะแปรรูปร้อน ที่เป็นผลมาจากซัลเฟอร์ที่อยู่ในเนื้อเหล็กรวม ตัวกับเหล็กเป็นเหล็กซัลไฟด์ (FeS) แล้วเกิดเป็นฟิล์มล้อมรอบผลึก ดังนั้นจึงมีการเติม แมงกานีสเข้าไปเพื่อรวมตัวกับซัลเฟอร์เป็นแมงกานีสซัลไฟด์ ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าเหล็กซัลไฟด์ จึงช่วยแก้ปัญหาการแตกร้าวที่อุณหภูมิสูงได้

เหล็กกล้าจะวัดเป็นเหล็กกล้าผสมแมงกานีสก็ต่อเมื่อมีแมงกานีสประมาณ 0.80% ขึ้นไปปกติแล้ว แมงกานีสจะเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้กับเหล็กแต่จะมีผลน้อยกว่า คาร์บอนแมงกานีสจะไม่รวมตัวกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ และช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งได้ปานกลางเท่านั้น แมงกานีสจะทำให้อุณหภูมิ และส่วนผลยูเทคตอยด์ลดต่ำลงคล้ายนิคเกิล แมงกานีสจะทำให้เกรนของเหล็กมีความละเอียดขึ้นทำให้มีที่ฟเนสส์ และความแข็งแรงสูงใช้ทำเฟืองข้อเหวี่ยงหรือเพลาส่งกำลัง หากเติมวาเนเดียมลงไปปานกลาง จะทำให้เหล็กแมงกานีสตีแปรรูปงานขึ้นใหญ่ๆ และให้เย็นตัวในอากาศภายหลังจากการอบนอร์มอลไลซ์ จะทำให้เหล็กชนิดนี้มีความแข็งแรง ณ จุดครากเหมือนกับเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาที่ผ่านการชุบแข็ง

หากเติมแมงกานีสมากกว่า 10% จะทำให้เกิดเฟสออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กฮาร์ดฟิลด์แมงกานีส (Hard field manganese steel) ที่มีแมงกานีส 12% เมื่อผ่านกระบวนการอบชุบแล้ว เหล็กชนิดนี้จะมีค่าความแข็งแรงและความเหนียวสูงมาก และยังทนทานต่อการเสียดสีอีกด้วย ซึ่งเป็นสมบัติที่เหมาะสมกับ การใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องการความทนการเสียดสีต่างๆ หากปล่อยให้โลหะผสมชนิดนี้เย็นตัวอย่างช้า ๆ จาก 955 °C ลงมา จะได้โครงสร้างที่ประกอบไปด้วยคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ล้อมรอบเกรนของออสเทนไนต์อยู่ ซึ่งโครงสร้างนี้จะมีค่าความแข็งแรงและความเหนียวต่ำ โดยความแข็งแรงสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 70,000 psi และ เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีเพียง 1% แต่เมื่อนำเหล็กกล้าผสมชนิดนี้ไปทำให้คาร์ไบด์สลายตัวและละลายเข้าไปในออสเทนไนต์ และจุ่มชุบลงมาจาก 1,010 °C จะได้โครงสร้างออสเทนไนต์อย่างเดียว และมีความแข็งแรงประมาณ 120,000

psi การยืดตัวเป็น 45% และความแข็ง 180 BHN จะเห็นได้ว่า ความแข็งแรงและความเหนียวสูงขึ้น ปกติแล้วจะนำเหล็กชนิดนี้ไปให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิประมาณ 260 °C เพื่อลดความเค้นที่เกิดจากการชุบให้น้อยลง ออสเทนไนต์ที่ได้จากการชุบนี้จะมีความแข็งไม่สูงนัก แต่เมื่อนำไปใช้งานแล้ว ได้รับแรงกระแทก จะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นถึง 500 BHN ซึ่งเป็นผลมาจากออสเทนไนต์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซด์เนื่องจากการใช้งาน (Work-hardening)

เหล็กนิเกิล (Nickel Steel, กลุ่ม 2xxx) นิเกิลที่ผสมในเหล็กกล้าจะไม่มีขีดจำกัดในการละลายเข้าไปในเหล็กแกมมา และขณะเดียวกันก็ละลายได้ในเฟอร์ไรต์ในปริมาณที่สูงด้วย ช่วยเพิ่มความแข็งแรง และทฟเนสส์ให้กับเฟอร์ไรต์ นิเกิลทำให้อุณหภูมิวิกฤตของเหล็กต่ำลง และขยายช่วงอุณหภูมิที่จะทำให้การอบชุบทำได้ดีขึ้น นิเกิลไม่รวมกับคาร์บอนเป็นคาร์ไบด์ซึ่งจะเป็นตัวที่ละลายเข้าไปในออสเทนไนต์ยาก ขณะที่ออสเทนไนต์ซึ่งนิเกิลช่วยลดส่วนผสมของคาร์บอน ในส่วนผสมยูเทคตอยด์ ทำให้เกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์ในปริมาณที่สูงขึ้นกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา อีกทั้งอุณหภูมิที่เกิดออสเทนไนต์นั้นต่ำกว่าปกติ ทำให้เพิร์ลไลต์มีความละเอียดกว่าเหล็กกล้าที่ไม่มีนิเกิลผสม ส่งผลให้เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ มีความแข็งแรง มีทฟเนสส์ การเปลี่ยนรูปในสภาวะพลาสติก และต้านทานการล้าตัวดี

เหล็กนิเกิลเหมาะที่จะใช้ทำเหล็กโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น โครงสร้างของแท่นรีดแปรรูปเหล็ก หรือโครงสร้างเครื่องจักรตีแปรรูป เป็นต้น เหล็กที่มีนิเกิลผสมอยู่ 3.5% (กลุ่ม 23xx) ซึ่งเป็นเหล็กกล้า ที่มีคาร์บอนต่ำจะนิยมนำไปทำคาร์โบไรเซอร์เพื่อนำไปทำเฟืองเกียร์ โบลต์ที่ทำข้อต่อ สตัด และคิงพิน เป็นต้น ส่วนกลุ่มที่มีนิเกิล 5% (กลุ่ม 25xx) จะมีทฟเนสส์สูง ใช้กับงานที่รับแรงหนักๆ เช่น เฟืองเกียร์ของรถบรรทุก ลูกเบี้ยวและข้อเหวี่ยง เป็นต้น นิเกิล จะมีผลในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็กกล้านี้ แต่จะมีผลมากในการเพิ่มทฟเนสส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำ ๆ

เหล็กโครเมียม (Chromium steel, กลุ่ม 5xxx) โครเมียมทำให้เกิดคาร์ไบด์แบบธรรมดา เช่น Cr_7C_3 , Cr_4C และคาร์ไบด์เชิงซ้อน $(FeCr_3)C$ คาร์ไบด์เหล่านี้จะมีความแข็งสูง ทนการเสียดสีดีมาก โครเมียมละลายในเหล็กแกมมาสูงถึง 13% และไม่มีขีดจำกัดในการละลายในเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้าผสมต่ำ โครเมียมที่ผสมอยู่มี แนวโน้มที่จะเป็นสารละลายซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง และทฟเนสส์ให้กับเฟอร์ไรต์ และหากมีโครเมียม มากกว่า 5% จะทำให้สมบัติต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูงดีขึ้นและทนการกัดกร่อนได้ดี

เหล็กนิเกิล-โครเมียม (Nickel-chromium steel, กลุ่ม 3xxx) เหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้จะมีสัดส่วน ระหว่างนิเกิลต่อโครเมียมประมาณ 2.5 : 1 โดยสมบัติของเหล็กกล้าผสมจะเป็นสมบัติร่วมระหว่างคุณลักษณะ ของธาตุผสมทั้งสองนิเกิลจะเพิ่มทฟเนสส์และความเหนียวให้กับเหล็ก ขณะเดียวกันกับที่โครเมียมจะให้ ความสามารถในการชุบแข็งและความทนทานการเสียดสี เหล็กกล้า

ผสมที่มีธาตุผสมมากกว่าสองชนิด โดยมากแล้วจะให้ความสามารถในการชุบแข็งดีกว่าการเติมธาตุผสมเพียงอย่างเดียว

เหล็กกล้าผสมนิกเกิล-โครเมียมคาร์บอนต่ำจะนิยมใช้ทำคาร์เบอร์โริง โดยโครเมียมจะช่วยเพิ่มความแข็งที่ผิว ขณะที่นิกเกิลจะเพิ่มทัพเนสส์ในแกนกลางของเหล็ก เหล็กกล้าผสมกลุ่ม 34xx ที่มีนิกเกิล 1.5% และ โครเมียม 0.60% จะใช้ทำเฟืองตัวหนอนและสลักลูกสูบ สำหรับงานหนักๆ เช่น เฟืองเกียร์ของเครื่องบิน เพลา และลูกเบี้ยว เหล็กที่ใช้จะผสมนิกเกิลถึง 3.5% และโครเมียม 1.5% เหล็กกล้าผสมนิกเกิล-โครเมียมคาร์บอนปานกลางจะนิยมใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตรถยนต์

เหล็กโมลิบดีนัม (Molybdenum steel, กลุ่ม 4xxx) โมลิบดีนัมจะมีขีดจำกัดในการละลายในออสเทนไนต์และ เฟอร์ไรต์ และเป็นธาตุที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ และมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการชุบแข็ง มีสมบัติ คล้ายโครเมียม คือเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง โมลิบดีนัมในเหล็กกล้าจะมีผลต่อการเกิดความเปราะเนื่องจากการทำเทเปอร์น้อยกว่าธาตุผสมตัวอื่น ๆ

เหล็กกล้าโมลิบดีนัมที่มีคาร์บอนต่ำนิยมใช้ทำคาร์เบอร์โริงสำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เช่น เพลาเฟือง ท้ายและชิ้นส่วนระบบส่งกำลัง โดยมากแล้วโมลิบดีนัม มักใช้ผสมร่วมกับนิกเกิลหรือโครเมียมเพื่อให้เหมาะกับการทำคาร์เบอร์โริง สำหรับงานที่ต้องการความทนทานการเสียดสีที่ผิวสูง โดยแกนกลางยังคงความเหนียวไว้อย่างดี

เหล็กโครเมียม-โมลิบดีนัม (Chromium-molybdenum steel, กลุ่ม 41xx) เหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้จะมีโครเมียม อยู่ระหว่าง 0.50 - 0.95% และโมลิบดีนัม 0.13 - 0.20% โดยโครเมียมช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งและความต้านทานการเสียดสีเหล็กที่ผสมโครเมียมและโมลิบดีนัมปริมาณน้อย จะช่วยให้ความสามารถในการชุบแข็งสูงขึ้นโดยสามารถชุบแข็งโดยน้ำมันได้แต่ถ้าชุบในน้ำมัน อาจเกิดการแตกร้าวดได้ เหล็กโครเมียม-โมลิบดีนัม มีสมบัติด้านการเชื่อมที่ดี มีความสามารถในการชุบแข็งดี เหมาะกับงานที่เป็นชิ้นส่วนเครื่องบิน เพลาเครื่องยนต์ และภาชนะที่รับแรงดัน เป็นต้น

เหล็กนิกเกิล-โครเมียม-โมลิบดีนัม (Nickel-chromium-molybdenum steel, กลุ่ม 43xx, 47xx, 8xxx, 93xx, 94xx, 97xx, 98xx) เหล็กกลุ่มนี้จะมีจุดเด่นของธาตุผสมแต่ละชนิดรวมกัน นิกเกิลกับโครเมียม สามารถรวมกันแล้วทำให้ มอดูลัสของความยืดหยุ่นสูง เพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง ทนแรงกระแทกและการล้าตัวดี และถ้าผสมโมลิบดีนัม ประมาณ 0.2% จะทำให้ความสามารถในการชุบแข็งสูงขึ้นอีก ลดความเปราะ เนื่องจากการทำเทเปอร์ อีกทั้งยังช่วยเพิ่ม ความสามารถในการกัดแต่งด้วย

เหล็กกลุ่ม 43xx เหมาะที่จะใช้ในงานที่รับภาระหนักหรือชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น เฟืองเกียร์ แต่ถ้าเป็นงานที่ต้องการความแข็งแรงน้อยลง จะใช้เหล็กกลุ่ม 8620 และ 8640 แต่ถ้าเป็นงานตีแปรรูปและ เพลาส่งกำลังที่ต้องการความแข็งแรงสูง จะใช้กลุ่ม 86xx เหล็กกล้าผสมกลุ่มนี้มีการใช้งานที่กว้างขวางมาก สำหรับงานที่ต้องการความ ทนทานการเสียดสีและการล้าตัว เช่น เฟืองส่ง

กำลัง เพลาและแบริ่ง นอกจากนั้นยังใช้ ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบินไม่ว่าจะเป็นส่วนปีกและ ลำตัวเครื่อง เป็นต้น

2.9.4 เหล็กกล้าไร้สนิม

ในปี 1913 แฮร์รี เบรียร์ลี (Harry Brearly) ทำการพัฒนาเหล็กกล้าผสมขึ้นมาชนิดหนึ่ง โดยมีปริมาณ คาร์บอน 0.35% และโครเมียม 14% (ปัจจุบันรู้จักในนามของเหล็กกล้าไร้สนิม 430) ด้วยความพยายามที่จะตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการกัดด้วยกรด เขาพบว่าสารเคมีต่าง ๆ ที่นำมาใช้นั้นไม่สามารถกัดโลหะผสมชนิดนี้ได้โดยง่าย ซึ่งเป็นปัญหามากในการทดลองของเขา ขณะเดียวกันเขาก็กลับใช้ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นโอกาสขึ้นมา โดยใช้ความยากในการที่จะกัดด้วยกรดของโลหะผสมชนิดนี้ทำเป็นวัสดุที่ทนทานการกัดกร่อน ซึ่งถูกนำมาใช้จนถึงปัจจุบันนี้ในนามของเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าสแตนเลส

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) หรือเหล็กกล้าสแตนเลส นิยมใช้กับงานที่ทนการกัดกร่อนจาก สารเคมีทั้งในสภาวะปกติหรือที่อุณหภูมิสูง ๆ เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของโครเมียมมากกว่า 12% โดยโครเมียมที่เติมเข้าไปนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากโครเมียมรวมตัว กับออกซิเจนกลายเป็นโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) มีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ (Thin film) ปิดผิวของเหล็กไว้ไม่ให้เหล็กทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นสนิมได้ ฟิล์มของโครเมียมออกไซด์นี้จะมีสมบัติเป็นแพสซีวิตี้ (Passivity) หรือเป็นแคโทดิก (Cathodic) มีลักษณะคล้าย เกราะป้องกันไม่ให้เนื้อเหล็กทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) แล้วเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้

ปริมาณของโครเมียมที่เติมเข้าไปในเหล็กจะต้องมีมากถึง 12% จึงจะทำให้เกิดแพสซีฟฟิล์ม (Passive film) ขึ้นมาได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องมีการเติมโครเมียมลงไปมากกว่า 12% (โดยทั่วไปใช้ 15-18%) ทั้งนี้เนื่องจากว่าโครเมียม มีความไวในการรวมกับคาร์บอนแล้วกลายเป็นคาร์ไบด์สูงกว่าเหล็ก ดังนั้นหากเติมโครเมียมเพียง 12% จะทำให้บางส่วน ไปรวมกับคาร์บอนแล้วทำให้โครเมียมมีปริมาณไม่เพียงพอจะทำให้เกิด แพสซีฟฟิล์มได้

เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้ากลุ่มนี้จะเป็นเฟอร์ไรต์ โดยทั่วไปจะมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.2% และมีโครเมียมระหว่าง 14 - 28% เหล็กในกลุ่มนี้ได้แก่ 405, 430, 442, 443 และ 446 สแตนเลสกลุ่มนี้ไม่สามารถชุบแข็งโดยกระบวนการอบชุบได้ แต่อาจเพิ่มความแข็งแรง โดยการแปรรูปเย็น ความแข็งแรงของเหล็กกล้ากลุ่มนี้จะดีมาก ความเหนียวปานกลาง และแม่เหล็กดูดติด

เหล็กกล้ากลุ่ม 430 และ 443 จะแปรรูปได้ง่ายเหมาะกับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี ส่วนกลุ่ม 442 จะใช้กับงานที่อุณหภูมิสูง กลุ่ม 406 จะมีความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่อาจเกิดความแข็งแรงขึ้น

จากการเย็นตัวใน อากาศขณะแปรรูป กลุ่ม 446 จะเป็นกลุ่มที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงที่สุด โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง

เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เหล็กกลุ่มนี้ได้แก่ โครม-นิกเกิล 300 และโครม-นิกเกิล-แมงกานีส 200 นิกเกิล ที่ผสมอยู่ในเหล็กกลุ่มนี้จะทำให้ออสเทนไนต์มีเสถียรภาพและเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง โดยทั้ง 2 กลุ่มนี้ไม่สามารถชุบแข็งได้และแม่เหล็กดูดไม่ติด หากต้องการเพิ่มความแข็งต้องใช้วิธีการแปรรูปเย็น

สแตนเลสกลุ่มนี้ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ 18-8 โครเมียม-นิกเกิล โดยจะมีเหล็ก 74% และคาร์บอนถึง 1% หากปริมาณของคาร์บอนต่ำกว่า 0.03% จะไม่มีคาร์ไบด์เกิดขึ้น โดยปกติแล้วสแตนเลสกลุ่มนี้จะทนทานการกัดกร่อนดีกว่ากลุ่มเฟอร์ริติกและมาร์เทนซิติก ถ้าหากมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 480 – 860 °C จะทำให้ โครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นที่ขอบเกรนโดยการตกผลึก ทำให้บริเวณรอบผลึกคาร์ไบด์มีปริมาณโครเมียมที่ต่ำลง และอาจเป็นสาเหตุของการกัดกร่อนที่เรียกว่า การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion)

2.9.5 เหล็กกล้าเครื่องมือ

เหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steel) เป็นเหล็กชนิดพิเศษที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ทำอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่าง ๆ โดยมากจะมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้แปรรูปหรือเพื่อตัดเฉือนวัสดุชนิดอื่น ๆ ดังนั้นเหล็กกล้าเครื่องมือจึงต้องมีสมบัติพิเศษทางด้านความแข็งสูง ความทนต่อแรงกระแทก หรือความแข็งที่อุณหภูมิสูงๆ เป็นต้น การจำแนกประเภท ของเหล็กกล้าเครื่องมือตามมาตรฐาน AISI โดยอาศัยกระบวนการชุบแข็ง การใช้งานและคุณลักษณะพิเศษ สามารถจำแนกได้ดังตารางที่ 2.7 โดยเหล็กแต่ละชนิดจะใช้ตัวอักษรแทนชนิดของเหล็ก

ตารางที่ 2.7 ชนิดของเหล็กกล้าเครื่องมือ [19]

กลุ่ม	สัญลักษณ์	ชนิด
เหล็กกล้าแปรรูปเย็น	W (ชุบแข็งด้วยน้ำ) O (ชุบแข็งด้วยน้ำมัน) A (ชุบแข็งด้วยอากาศ) D (คาร์บอนสูง, โครเมียมสูง)	W1, W2, W5 O1, O2, O6, O7 A2, A4, A6, A7, A8, A9, A10, A11 D2, D3, D4, D5, D7
เหล็กกล้าทนแรงกระแทก	S	S1, S2, S4, S5, S6, S7 H10-H19 กลุ่มโครเมียม
เหล็กกล้าแปรรูปร้อน	H	H20-H39 กลุ่มทั้งสแตน H40-H59 กลุ่ม โพลีตินัม

กลุ่ม	สัญลักษณ์	ชนิด
เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง	M	กลุ่มโพลีตินัม : M1, M2, M3-1, M3-2, M4, M6, M7, M10, M33, M34, M36, M41, M42, M46, M50
เหล็กกล้าแม่พิมพ์	T P	กลุ่มทั้งสแตน : T1, T4, T5, T6, T8, T15 เหล็กกล้าแม่พิมพ์ : P26, P20, P21
เหล็กกล้าพิเศษ	L	เหล็กกล้าพิเศษ : L2, L6

2.9.5.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ

เหล็กกล้าเครื่องมือที่นิยมใช้มาก ๆ จะมีอยู่ 5 กลุ่มคือ เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปเย็น (Cold work) เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปร้อน (Hot work) เหล็กกล้าเครื่องมือทนแรงกระแทก (Shock-resisting) เหล็กกล้าความเร็วสูง (High speed) และเหล็กกล้าแม่พิมพ์ (Mold steel) ทั้ง 5 กลุ่มมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันโดยในแต่ละกลุ่มจะมีกลุ่มย่อยแยกออกมาอีกต่างหาก เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปร้อนจะมีคาร์บอนผสมอยู่ปานกลาง และมีโลหะผสมที่ทนความร้อนสูงอยู่แตกต่างกันไป เช่น โครเมียม ทั้งสแตน และโพลีตินัม เป็นต้น เหล็กกล้าเครื่องมือทนแรงกระแทกจะมีคาร์บอนประมาณ 0.5% และมีธาตุผสมอื่นอีกเล็กน้อย เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงจะมีคาร์บอน ประมาณ 1% และมีทั้งสแตนเป็นธาตุผสมหลัก (กลุ่ม T) ส่วนกลุ่ม M จะมีโพลีตินัม เป็นธาตุผสมหลัก เหล็กกล้าเครื่องมือที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะมีคาร์บอนและธาตุผสมอื่นอยู่น้อย

2.9.5.2 ชนิดและการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือ

เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปเย็น : เกรดชุบแข็งด้วยน้ำเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่ม W เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ไม่มีคาร์ไบด์ชนิดพิเศษใด ๆ เหล็ก W2 จะมีวาเนเดียมผสมอยู่ด้วย เพื่อช่วยให้เกรนละเอียดและช่วยลดปัญหา เรื่องการแตกร้าวเนื่องจากการชุบแข็งด้วย เหล็ก W5 มีโครเมียมเล็กน้อย เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่ม W ทั้งหมดจะมีอัตราการเย็นตัวของอุณหภูมิวิกฤตสูง จึงต้องจุ่มชุบในน้ำเพื่อให้ การเย็นตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเหล็กกลุ่มนี้มีธาตุผสมน้อย ทำให้ราคาต่ำ แต่มักเกิดปัญหาเรื่องการแตกร้าวได้ง่าย เพราะการจุ่มชุบในน้ำ

เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปเย็น : เกรดชุบแข็งด้วยน้ำมัน เหล็กกล้าเครื่องมือเกรดนี้มี ความสามารถในการชุบแข็งค่อนข้างดี สามารถชุบแข็งด้วยน้ำมันที่ให้อัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าน้ำ เหล็กชนิด 01 และ 02 จะมีสมบัติที่คล้ายกัน เหล็ก 02 จะมีอุณหภูมิในการทำอสเทนไนต์ซึ่งที่ต่ำกว่า 01 เล็กน้อย ซึ่งมีข้อดีตรงที่ชิ้นงานจะเกิดการบิดงอเนื่องจากการจุ่มชุบน้อยกว่าเหล็กชนิด 06 จะมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.3% ที่จะเป็น แกรไฟต์อิสระเกิดขึ้นในแมทริกซ์มาร์เทนไซต์ ซึ่งนิยม เรียกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือแกรไฟติก (Gratitic tool steel) แกรไฟต์ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อ ลื่น ชนิดแข็งอย่างดีเมื่อโลหะต้องเสียดสีกัน ข้อดีอีกอย่างคือ แกรไฟต์ จะช่วยให้ทำการกัดแต่งเหล็ก ง่ายขึ้น เหล็กชนิด 07 จะมีทั้งสแตนผสมอยู่ด้วย เพื่อทำให้เกิดทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ทนทานการเสียดสี และทำให้เกิดความคมหากนำไปทำใบมีดตัด เหล็กทั้งหมดที่มีในกลุ่มนี้ชนิด 01 เป็นที่นิยม ใช้มากที่สุด

เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปเย็น : เกรดชุบแข็งด้วยอากาศ เหล็กชนิด A2 เป็นชนิดที่นิยมใช้ มากที่สุด โครเมียมและโมลิบดีนัมช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้ดีขึ้นและทำให้เกิดคาร์ไบด์ ชนิด A4 และ A6 จะมีแมงกานีสเป็นตัวช่วยให้สามารถชุบแข็งดีขึ้น และทำให้อุณหภูมิออสเทนไนต์ ซึ่งต่ำกว่าเกรดโครเมียมถึง 5% ชนิด A7 จะมีคาร์บอนส่วนเกินและวาเนเดียมที่ช่วยทำให้เกิดคาร์ ไบด์ที่ต้านทานการเสียดสีดี ชนิด A8 และ A9 จะมีคาร์บอนน้อยกว่าชนิดอื่นทั้งนี้เพื่อต้องการเพิ่ม ทัพเนสส์ให้สูงขึ้น ส่วน A9 จะเพิ่มวาเนเดียม 1% เพื่อเพิ่มอายุการสึกหรอ ชนิด A10 มีความคล้ายกับ 06 คือจะมีคาร์บอนส่วนเกินที่ทำให้เกิดแกรไฟต์ ส่วนชนิด A11 เป็น เหล็กที่ผลิตจากกรรมวิธีโลหะผง โดยมีวาเนเดียมที่10% เพื่อช่วยทำให้ความต้านทานการสึกหรอจากวาเนเดียม คาร์ไบด์สูงขึ้น

เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปเย็น : เกรดคาร์บอนและโครเมียมสูง เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่ม D นี้ บางชนิด ชุบแข็งด้วยอากาศบางชนิดชุบแข็งด้วยน้ำมันและส่วนผสมโดยทั่วไปจะมีโครเมียม 12% และคาร์บอนมากกว่า 1.5%ชนิด D2 นิยมใช้ทำเครื่องมือแปรรูปเย็นมากที่สุด ซึ่งสามารถชุบแข็งโดย อากาศ มีการบิดตัวน้อย แม้มีความหนาถึง 250 mm และเนื่องจากมีโครเมียมคาร์ไบด์ปริมาณสูง จึง ทนการเสียดสีได้ดีมาก ชนิด D3 จะมีคาร์บอนสูงทำให้มีคาร์ไบด์มากขึ้นอีก เหล็กชนิดนี้ต้องชุบแข็ง ด้วยน้ำมัน เหล็ก D4 มีคาร์บอนสูงกว่า D2 จึงทนการเสียดสีดีกว่า ส่วนเหล็ก D5 จะมีโคบอลต์ผสม

อยู่ เพื่อช่วยให้เกิดความต้านทานต่อการอ่อนตัวเนื่องจากการทำเทมเปอร์ เหล็ก D7 จะคล้าย A7 คือ มีธาตุที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์เม็ดใหญ่ บางครั้งเป็นชนิด VC ซึ่งจะมีความแข็งกว่า โครเมียมคาร์ไบด์ใน เหล็ก D2 เหล็กชนิดนี้ทนการเสียดสีดีเยี่ยมแต่กัดแต่งยาก

เหล็กกล้าเครื่องมือทนแรงกระแทก (Shock-resisting tool Steels) เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้จะมีคาร์บอนอยู่น้อย หากเปรียบเทียบกับกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปเย็น ค่าความแข็งของ เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้จะไม่สูงเท่ากลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปเย็น (58 HRC Max) แต่ ค่าที่พเนสส์จะสูงกว่ามาก ทั้งสแตนจะผสมเข้าไปในเหล็กชนิด S1 เพื่อเพิ่มความทนทานการเสียดสีให้ ดีขึ้น ชนิด S2, S4, S5 และ S6 จะมีซิลิคอนเป็นตัวเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง เหล็ก ทั้ง 4 ชนิด จะมีคุณลักษณะที่คล้ายกัน จะแตกต่างกันตรงลักษณะการทำให้เกิดความแข็งขึ้นเท่านั้น ชนิด S7 จะ แตกต่าง จากกลุ่ม S อื่น ๆ ปริมาณโครเมียมและโมลิบดีนัมที่มีสูงจะช่วยให้เหล็กชนิดนี้ชุบแข็งด้วย อากาศได้ที่ขนาดความหนาถึง 100 mm และเนื่องจากเหล็กชนิดนี้มีที่พเนสส์สูง และชุบแข็งได้ด้วย อากาศจึงทำให้นิยมนำมาทำแม่พิมพ์ฉีด (Injection mold) สมบัติที่เหล็กชนิด S มีน้อย คือ ความ ทนทานการเสียดสี ทั้งนี้เพราะไม่มีคาร์ไบด์และโครงสร้างที่แข็งเหมือนกลุ่ม เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรู ปเย็น แต่เหล็กชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อใช้สมบัติทางด้านที่พเนสส์เป็นปัจจัยหลัก

เหล็กกล้าเครื่องมือแปรรูปร้อน (Hot-work tool Steels) เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้จะ จำแนกออกเป็น กลุ่มย่อย โดยอาศัยธาตุผสมหลักเป็นเกณฑ์ ได้แก่ กลุ่มโมลิบดีนัม กลุ่มโครเมียม และกลุ่มทังสแตน การเติมธาตุผสมที่เป็นโลหะจำพวกทังไฟหรือทังความร้อนสูงดังเช่น ทั้งสแตน โมลิบดีนัม โครเมียมและวาเนเดียม จะช่วยทำให้เกิดคาร์ไบด์ขณะทำการทำเทเปอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ใน การยับยั้งการเกิดดิสโลเคชันและลดความอ่อนตัวที่เป็น ผลมาจากความร้อนโลหะผสมเหล่านี้ยังช่วย ทำให้เกิดเซคันดารีฮาร์ดเนนิงขณะทำการทำเทเปอร์อีกด้วย เหล็กกลุ่มโครเมียมจะต้านทานการอ่อนตัว เนื่องจากการทำเทเปอร์ที่อุณหภูมิสูงถึง 430 °C ส่วนกลุ่มทังสแตน และโมลิบดีนัมจะสูงถึง 620 °C ส่วนผสมทางเคมี ของ H10 และ H13 จะคล้ายกัน และมีการเพิ่มความแข็งและ คุณลักษณะอื่น ๆ ที่ คล้ายกับเหล็ก H14 และ H19 จะมีทังสแตนผสมอยู่สูง เพื่อเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิสูงและการ ทน การสึกกร่อนที่อุณหภูมิสูงด้วย นิยมใช้ทำแม่พิมพ์ตีแปรรูป เหล็ก H11 และ H13 เป็นที่นิยมใช้มาก ที่สุดในกลุ่มนี้ เหล็ก H11 นิยมใช้ทำโครงสร้างเครื่องมืองานร้อนต่าง ๆ และ H13 ใช้ทำเครื่องมืองาน ร้อนโดยทั่ว ๆ ไปไม่ว่าจะเป็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกหรือโลหะนอกกลุ่มเหล็ก แม่พิมพ์อัดแปรรูป เป็นต้น

เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High-speed tool Steels) เหล็กกลุ่มนี้จะใช้ทำเครื่องมือที่ ใช้ตัดเฉือน โลหะชนิดอื่นที่ความเร็วรอบสูงๆ จึงมีธาตุผสมต่าง ๆ ในปริมาณที่สูงกว่าเหล็กกล้า เครื่องมือชนิดอื่น ๆ สัญลักษณ์ของเหล็กจะใช้ธาตุผสมที่เป็นธาตุผสมหลักเป็นเกณฑ์ เช่น กลุ่มที่มี โมลิบดีนัมเป็นหลักจะเป็นกลุ่ม M ส่วนกลุ่ม ทังสแตนจะเป็นกลุ่ม T เป็นต้น คาร์บอนและโครเมียมที่ ผสมอยู่ช่วยให้ความสามารถในการชุบแข็งดีขึ้น วาเนเดียมที่มีปริมาณถึง 1% ช่วยให้เกรนละเอียด

หากมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดความเหนียวคาร์ไบด์ที่ทนการเสียดสีดี ทั้งสแตนช่วยยับยั้งการอ่อนตัวเนื่องจากอุณหภูมิสูง กลุ่ม M จะมีทั้งสแตนค่อนข้างสูง โคบอลต์ในกลุ่ม M42 และ T15 มีบทบาทในการป้องกันการอ่อนตัวที่ อุณหภูมิสูง ชนิด M1 โมลิบดีนัมเป็นธาตุผสมหลัก M2 จะมีคาร์บอน และ วาเนเดียมมากกว่าเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความทนทานการเสียดสี ชนิด M3-1 จะมีความสามารถในการเจียรไน สูงกว่า M2 และ M3-2 จะทนการเสียดสีดีกว่า M3-1 ชนิด M4 เป็นชนิดที่มีความทนทานการเสียดสีสูงที่สุดใน กลุ่ม M

เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงจะมีความแข็งสูงกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือทั่ว ๆ ไป (62-67 HRC) และจะมีคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดกระจายอยู่ทำให้ทนการเสียดสีดี อีกทั้งยังคงความแข็งได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 540 °C กลุ่ม M1, M2, M7 และ M42 ใช้ทำเครื่องมือเจาะกลุ่ม M50 เป็นกลุ่มธาตุผสมต่ำที่ใช้ทำลูกกลิ้งในแบร์ริง กลุ่ม T15 จะแปรรูปด้วยกรรมวิธี โลหะผง (PIM techniques)

เหล็กกล้าเครื่องมือทำแม่พิมพ์ (Mold Steel) เหล็กกลุ่มนี้ใช้ทำแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ต่าง ๆ เหล็ก ชนิด P6 จะมีคาร์บอนต่ำมากไม่สามารถชุบแข็งได้ปริมาณธาตุผสมต่ำทำให้มีความอ่อนและสามารถแปรรูป ที่มีรายละเอียดสูงได้ แล้วจากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการคาร์ไบไรซิง ชนิด P20 นิยมใช้มากในเหล็กกล้า เครื่องมือกลุ่มนี้ ปริมาณคาร์บอนและธาตุผสมสามารถทำให้เกิดความแข็งสูงถึง 30 HRC ตลอดทั้งชิ้นของงานที่หนา มาก ๆ ทำให้นิยมใช้ทำแม่พิมพ์ฉีดโลหะและพลาสติกขนาดใหญ่ ชนิด P21 สามารถชุบแข็งโดยทำให้เป็น สารละลายของแข็งที่มีความแข็ง 25 HRC จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการตกตะกอนจะได้ความแข็งถึง 40 HRC

เหล็กกล้าเครื่องมืองานพิเศษ (Special-purpose tool steel) เหล็กกล้าเครื่องมือชนิดนี้จะใช้ทำเครื่องมือตัดที่ต้องการความทนทานการเสียดสีและมีความเหนียวสูง เช่น แบร์ริง ลูกกลิ้ง แผ่น คัลซ์ต์ ลูกเบี้ยว ประแจ แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนสูง จะใช้ทำดอกสว่าน เครื่องมือทำเกลียว เป็นต้น

2.9.6 เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อ (Cast iron) เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่เหมือนเหล็กกล้าคาร์บอนแต่จะมีปริมาณที่มากกว่า โดยหากพิจารณาจากแผนภาพเฟสเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเหล็กหล่อจะอยู่ระหว่าง 2 - 6.67% แต่ในทางปฏิบัติแล้ว หากปริมาณคาร์บอนสูงเกินไปจะทำให้เหล็กหล่อเปราะมาก ๆ ดังนั้นเหล็กหล่อที่มีใช้ในอุตสาหกรรมจึงนิยม ให้มีคาร์บอนอยู่ระหว่าง 2.5 - 4% ธรรมชาติของเหล็กหล่อจะมีความเหนียวที่ต่ำมากไม่สามารถแปรรูปโดยการรีด การดึง หรือแปรรูปที่อุณหภูมิห้องได้ จึงนิยมแปรรูปโดยกระบวนการหล่อ ซึ่งมีข้อดีตรงสามารถทำให้มีรูปร่าง ที่ซับซ้อนได้ดี จากนั้นจึงทำการกัดแต่งเพื่อให้ได้ขนาดในต่อนท้าย และด้วยธรรมชาติของการแปรรูปของเหล็กชนิดนี้โดยการหล่อจึงเรียกว่า เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อสามารถจำแนกออกเป็น 6 ชนิด โดยอาศัยโครงสร้างจุลภาคและคุณลักษณะทางด้านกายภาพ และทางกล ได้แก่ เหล็กหล่อสีขาว (White cast iron) เหล็กหล่อสีเทา (Gray cast iron) เหล็กหล่อเหนียว (Ductile cast iron) เหล็กหล่อคอมแพ็คต์แกรไฟต์ (Compacted graphite cast iron) เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron) และเหล็กหล่อผสม (Alloy cast iron) คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กอาจอยู่ได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับปริมาณและอัตราการเย็นอีกทั้งธาตุผสมตัวอื่น ๆ ที่เติมเข้าไปด้วยคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กอาจอยู่ในรูปของสารประกอบที่เป็นเหล็กคาร์ไบด์ซีเมนไทต์หรืออยู่ในรูปคาร์บอนอิสระอย่างแกรไฟต์ (Graphite) ลักษณะรูปร่างและการกระจายตัวของคาร์บอนอิสระจะมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของเหล็กหล่ออย่างมาก เหล็กหล่อแต่ละชนิด จะมีลักษณะเฉพาะตัวดังนี้

เหล็กหล่อสีขาว : คาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กจะอยู่ในรูปของซีเมนไทต์ (Fe_3C)

เหล็กหล่อสีเทา : คาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กจะอยู่ในรูปของคาร์บอนอิสระหรือแกรไฟต์แบบเกล็ด (Graphite flakes)

เหล็กหล่อเหนียว : บางครั้งเรียกว่าเหล็กหล่อโมดูลาร์ (Modular cast iron) ลักษณะของคาร์บอนอิสระ หรือแกรไฟต์ที่มีอยู่จะมีรูปร่างกลม (Spheroid) จึงนิยมเรียกว่าเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

เหล็กหล่ออบเหนียว : เป็นการนำเหล็กหล่อสีขาวไปผ่านกระบวนการอบชุบให้คาร์บอนแยกตัวออกจาก ซีเมนไทต์มาเป็นคาร์บอนอิสระหรือแกรไฟต์ที่มีรูปร่างเกือบกลม

เหล็กหล่อคอมแพ็คต์แกรไฟต์ : บางครั้งเรียกว่าแกรไฟต์ตัวหนอนคาร์บอนอิสระที่อยู่ในเนื้อเหล็กจะมี ลักษณะคล้ายตัวหนอน ซึ่งทำให้เหล็กมีความเหนียวมากกว่าเหล็กหล่อสีเทา

เหล็กหล่อผสม : เป็นเหล็กหล่อที่เติมธาตุผสมอื่น ๆ ลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ที่ต้องการ เหล็กหล่อแต่ละชนิดจะมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.8 แสดงส่วนผสมทางเคมีหลักๆของเหล็กหล่อ [19]

ชนิดเหล็กหล่อ	เปอร์เซ็นต์				
	คาร์บอน	ซิลิคอน	แมงกานีส	ซัลเฟอร์	ฟอสฟอรัส
เหล็กหล่อสีขาว	1.8 - 3.6	0.5 - 1.9	0.25 - 0.8	0.06 - 0.2	0.06 - 0.2
เหล็กหล่ออบเหนียว	2.2 - 2.9	0.9 - 1.9	0.15 - 1.25	0.02 - 0.2	0.02 - 0.1
เหล็กหล่อสีเทา	2.5 - 4.0	1.0 - 3.0	0.2 - 1.0	0.02 - 0.25	0.05 - 1.0
เหล็กหล่อเหนียว	3.0 - 4.0	1.8 - 3.0	0.1 - 1.0	0.005 - 0.035	0.015 - 0.1

จากเหล็กหล่อชนิดต่าง ๆ ยังมีเหล็กหล่ออีกชนิดหนึ่งที่มีชื่อเรียกเฉพาะว่า เหล็กหล่อซิลล์ (Chilled cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่ผลิตให้เป็นเหล็กหล่อสีขาวเฉพาะที่โดยให้อัตราการเย็นตัวที่รวดเร็วขณะเหล็กหล่อเกิดการแข็งตัว ข้อแตกต่างของเหล็กหล่อสีขาวกับเหล็กหล่อซิลล์คือโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อซิลล์จะละเอียดกว่าเหล็กหล่อสีขาวและเกิดขึ้นบริเวณผิวส่วนที่ลึกเข้าไปจะเป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อสีขาวและเหล็กหล่อสีเทา พื้นที่ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างเหล็กหล่อสีขาวและสีเทาจะมีทั้งคาร์ไบต์และแกรไฟต์ผสมกันอยู่ เหล็กหล่อที่มีโครงสร้างนี้มีชื่อเรียกว่า เหล็กหล่อมอทเทิล (Mottled cast iron) ซึ่งทำให้มีสมบัติต่าง ๆ อยู่ ระหว่างเหล็กหล่อสีขาวและเหล็กหล่อสีเทา

2.9.6.1 เหล็ก เป็นวัสดุที่มีกำลังรับการรับแรงสูง มีความคงทนตลอดอายุการใช้งานหากมีการบำรุงรักษาที่ดี และมีรูปทรงมาตรฐานที่แม่นยำไม่เปลี่ยนแปลงง่าย จึงถูกนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ทำเป็นเครื่องมือกลกรรม เครื่องมือช่าง ใช้ในงานก่อสร้าง หรือใช้ในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

2.9.6.2 กระบวนการผลิตเหล็กที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ เป็นเหล็กผสมโดยจะมีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและจะมีส่วนผสมอื่น ๆ ที่ทำให้คุณสมบัติของเหล็กเป็นไปตามที่ต้องการเป็นองค์ประกอบย่อย เช่น

- คาร์บอน (C) ความหนาแน่น 1.9 kg/dm^3 จุดหลอมเหลว $3540 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นอโลหะ เป็นธาตุที่ได้มาจาก ถ่านหิน ถ่านโค้ก คาร์บอนนี้ผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก 2 ลักษณะ คือ ในสภาวะเหล็กคาร์ไบต์ (Fe_3C) และในสภาวะแกรไฟต์ คาร์บอนที่เจืออยู่ในเหล็กจะช่วยทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง หากมีมากจะทำให้เหล็กแข็งและเปราะ

- ซิลิคอน (Si) ความหนาแน่น 2.33 kg/dm^3 จุดหลอมเหลว $1420 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นอโลหะทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจนจะกลายเป็นซิลิกา (Silica = SiO_2) ซึ่งได้แก่ หิน ควอตซ์ ททราย เมื่อทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนในเนื้อเหล็ก จะกลายเป็นซิลิคอนคาร์ไบต์ (SiC) ซึ่งทำให้เหล็กแข็ง ถ้ามีมากจะทำให้เปราะหักง่าย เป็นตัวทำให้เกิดการแยกตัวของแกรไฟต์ได้

- แมงกานีส (Mn) ความหนาแน่น 7.47 kg/dm^3 จุดหลอมเหลว $1260 \text{ }^\circ\text{C}$ ทำจากหินสีน้ำตาล แมงกานีสไดออกไซด์ มีสีแดงเป็นวาว แข็ง และเปราะ ใช้เป็นสารดูดออกซิเจนออกจากน้ำเหล็ก (Deoxidizer) เป็นธาตุที่หน่วงเหนี่ยวไม่ให้เกิดการแยกตัวเป็นแกรไฟต์ แต่จะรวมตัวกับ กำมะถันและช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้กับเหล็กหล่อ

2.9.6.3 การแบ่งชนิดของเหล็กกล้า แบ่งประเภทเหล็กกล้าออกได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

- เหล็กกล้าคาร์บอน เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นหลักโดยจะมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไม่เกิน 1.7% จะมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วยเช่น ซิลิคอน, ฟอสฟอรัส, กำมะถัน และ แมงกานีสซึ่ง

ธาตุเหล่านี้ มีปริมาณน้อยมากจะติดมากับเนื้อเหล็กตั้งแต่เริ่มการผลิตเหล็กจากสินแร่โดยกรรมวิธีการผลิตของเหล็กกล้าคาร์บอนได้แก่ กรรมวิธี LD, กรรมวิธีโธมัส, กรรมวิธีเตากระทะ และ กรรมวิธีเบส เซเมอร์ เหล็กชนิดนี้เป็นวัสดุช่าง ชนิดเดียวที่มีคุณสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) และความอ่อนตัว (Ductility) ที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างมากตามปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในเหล็กทำให้เหมาะที่จะเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงาน

- เหล็กกล้าประสม เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ไม่เกิน 1.7% และยังมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กด้วยเช่น แมงกานีส, นิกเกิล, โครเมียม, วาเนเดียม, โมลิบดีนัม, โคบอลต์, ทังสเทน ฯลฯ การที่ ผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กนั้นก็เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่เหล็กคาร์บอนให้คุณสมบัติเหล่านั้น อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำไม่สามารถใช้งานได้ดี กรรมวิธีการผลิตเหล็กกล้าประสมสามารถผลิตได้จาก เตากระทะ, เตาไฟฟ้า และ เตาอินดักชัน เป็นต้น

- เหล็กกล้าเครื่องมือ เป็นเหล็กชนิดพิเศษที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ทำอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่าง ๆ โดยมากจะมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้แปรรูป หรือเพื่อตัดเฉือนวัสดุชนิดอื่น ๆ

- เหล็กกล้าประสมพิเศษ เป็นเหล็กกล้าประสมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานที่จะใช้เฉพาะอย่างหลายประเภท เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม จะมีธาตุที่ผสมอยู่เพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติต้านทานการเป็น สนิม คือ โครเมียม และจะต้องผสมโครเมียมให้สูงพอสมควร ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมนี้ก็คือเหล็กประสมสูงชนิดหนึ่ง

- เหล็กหล่อ เป็นเหล็กที่ผลิตจากเหล็กดิบสีเทา (Gray Pig Iron) ที่ได้จากเตาสู่ (Blast Furnace) มาหลอมหรือถลุงใหม่ในเตาคิวโปลา เตาแอร์เฟอร์เนส หรือเตาไฟฟ้า ถ้าพิจารณาจาก Iron-carbon Equilibrium Diagram แล้วจะเห็นว่าเหล็กหล่อก็มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 2% - 6.67% ส่วนเหล็กกล้ามีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.008% - 2% เท่านั้น แต่ทางปฏิบัติแล้วเหล็กหล่อก็มีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 2.5% - 4% ถ้ามีมากกว่านั้นจะขาดคุณสมบัติความความเหนียว (Ductility) จะเปราะและแตกหักง่ายเมื่อถูกแรงกระแทกปกติ

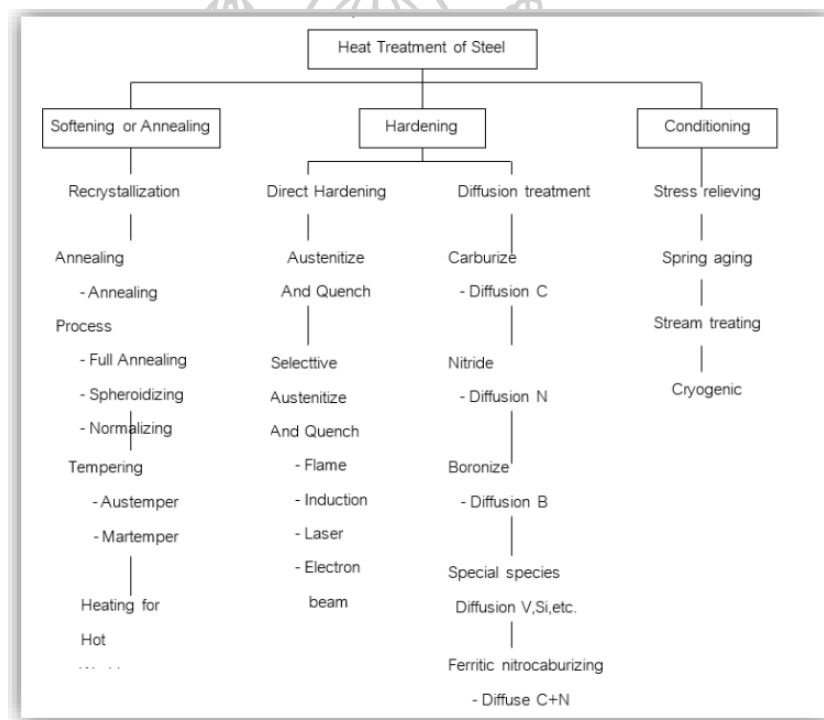
2.10 กระบวนการปรับปรุงสมบัติโลหะกลุ่มเหล็กด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

กรรมวิธีทางความร้อนที่ทำกับโลหะสามารถทำให้สมบัติทางกลของโลหะเปลี่ยนแปลงได้ หากกรรมวิธี ทางความร้อนกระทำกับโลหะได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะทำให้โลหะนั้นสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง มากขึ้น กรรมวิธีทางความร้อนที่ทำกับโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะการเย็นตัว และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ได้แก่ การอบอ่อน (Annealing) และการอบชุบเพิ่มความแข็ง (Hardening) สำหรับกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำกับโลหะกลุ่มเหล็ก

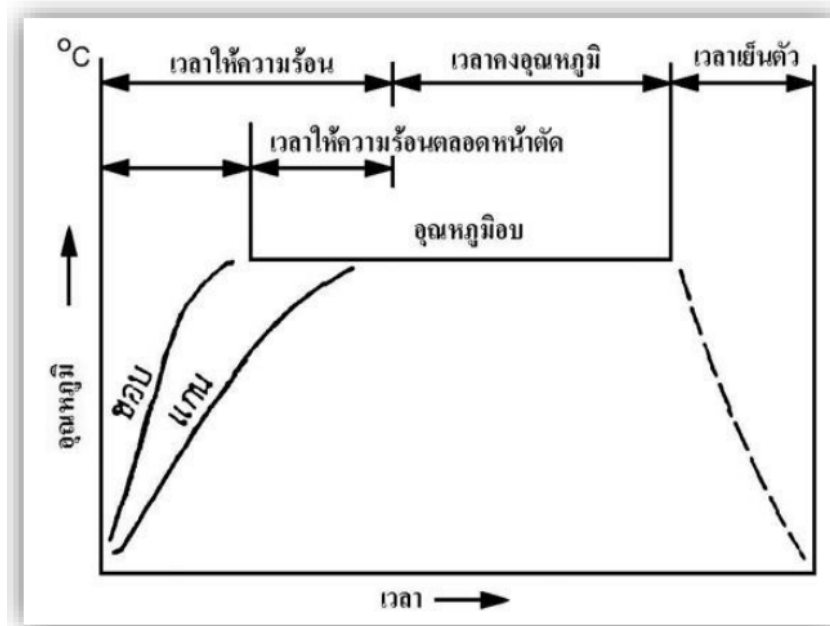
สามารถแบ่งกรรมวิธีปลีกย่อยได้อีกดังแสดงใน แผนรูปที่ 2.44 และ 2.45 รูปแบบของการปรับปรุงสมบัติของโลหะกลุ่มเหล็กด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

กรรมวิธีทางความร้อนที่ทำกับโลหะทุกชนิด จะประกอบด้วย

- การให้ความร้อน ซึ่งหมายถึงการให้ความร้อนที่ผิว
- การให้ความร้อนตลอดถึงแกนกลาง
- การคงอุณหภูมิ
- การเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.44 ขอบข่ายงานกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำกับโลหะกลุ่มเหล็ก



รูปที่ 2.45 ลักษณะของแผนภูมิกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำกับโลหะ

จากรูปที่ 2.45 เวลาของการให้ความร้อนที่ผิวหมายถึงเวลาที่เริ่มให้ความร้อนกับผิวชิ้นงาน จนถึง อุณหภูมิที่ต้องการ สำหรับในกรณีเวลาของการให้ความร้อนตลอดทั้งชิ้นงานหมายถึงช่วงเวลา ตั้งแต่ที่ ผิวชิ้นงานได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการจนกระทั่งแกนกลางของชิ้นงานได้รับอุณหภูมิ ที่ต้องการเช่นกัน และเวลาดังอุณหภูมิคือเวลาเริ่มตั้งแต่เมื่อแกนกลางถึงอุณหภูมิที่ต้องการ จนเริ่มมี การลดอุณหภูมิลง

2.9.1 การอบชุบแข็ง

การอบชุบเหล็ก หมายถึงกรรมวิธีทางความร้อนที่ให้เหล็กได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็น เวลานาน แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ การอบนี้มีผลทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

- ความเค้นลดลง
- ความเหนียวและความเหนียวแน่นเพิ่มขึ้น
- ทำให้เกิดโครงสร้างเฉพาะ เมื่อก้าวถึงการอบชุบเหล็กนั้น การอบชุบเหล็กเป็นวิธีการที่มี ขอบเขตกว้างที่สุด ซึ่งอาจแบ่งได้ ตามจุดประสงค์ของการอบได้ดังนี้
- การอบเพื่อที่จะกำจัด หรือลดความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างของเหล็ก เช่น การอบแพร์ (Diffusion Annealing) และ การอบปกติ (Normalizing)

- การอบเพื่อช่วยในการตัดเฉือนชิ้นงานได้ดีขึ้น เช่น การอบเพื่อให้ได้เกรนหยาบ การอบอ่อน และการอบคืนรูปผลึก (Recrystallization)

- การอบเพื่อที่จะกำจัดหรือเพื่อลดความเค้นภายใน เช่น การอบลดความเค้น (Stress relief)

- การอบเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เช่น การอบเหล็กหล่อขาวเพื่อให้คาร์บอนในเหล็กคาร์ไบด์เปลี่ยนเป็นแกรไฟต์ ในการทำความร้อนและการทำให้เย็นตัว จำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิที่ถูกต้อง ในการให้ความร้อนต่อชิ้นงานนั้น บริเวณขอบของชิ้นงานจะได้รับอุณหภูมิที่สูงกว่าบริเวณแกนกลาง เพราะความร้อนจะถ่ายเท เข้าสู่ภายในแกนกลาง การให้ความร้อนเร็วเกินไปอาจทำให้เกิดความแตกร้าวได้เพราะบริเวณผิวได้รับการขยายตัวอย่างมากและทำให้บริเวณแกนกลางได้รับแรงดึงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเกิดขึ้นได้ง่ายกับชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ หรือชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกันมาก อันตรายที่อาจเกิดการแตกร้าวจะยิ่งมีสูงขึ้น ถ้าการเป็นตัวนำความร้อนของเหล็กไม่ดี ในขณะที่ความสามารถในการขยายตัวของเหล็กดี นอกจากชิ้นงานมีความเค้นภายในสูงแล้ว ชิ้นงานอาจเกิดการแตกร้าวได้ง่ายเช่นกันระหว่างให้ความร้อน ซึ่งจะต้องทำการอบเพื่อลดความเค้น ในทำนองเดียวกันก็อาจเกิดการแตกร้าวได้ระหว่างการเย็นตัวของชิ้นงาน

การให้ความร้อนและการทำให้เย็นตัวของชิ้นงานต่างๆ ไป ควรจะทำให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างกัน ภายในให้น้อยที่สุด ซึ่งสามารถที่จะทำให้ความเค้นที่เกิดจากความร้อนมีน้อยลง ขณะเดียวกันจะทำให้การ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นงานเป็นไปในเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับปริมาตรที่ แตกต่างกันของเกรนแต่ละชนิด

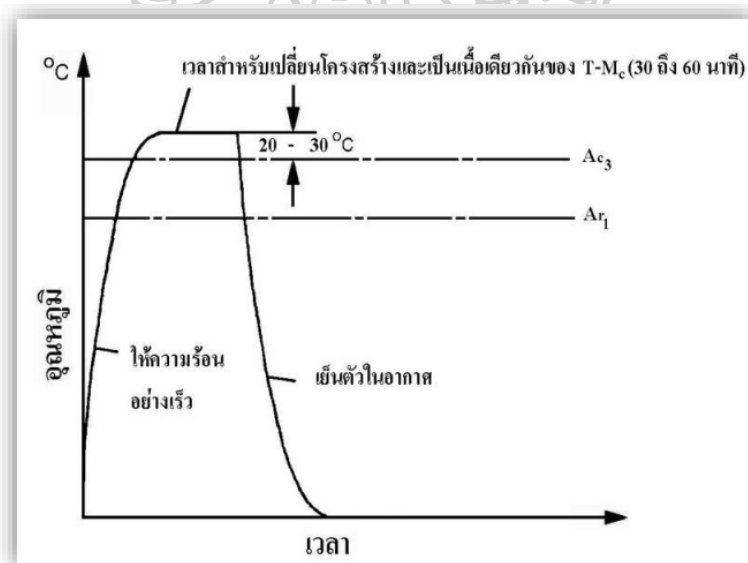
การใช้อุณหภูมิมอบที่สูง และการใช้เวลาในการอบนานเกินไป จะทำให้เกรนอสเตไนต์ที่ได้เป็น เกรนหยาบ ซึ่งส่วนมากแล้วจะเป็นผลเสีย เพราะเกรนใหม่ที่ได้หลังจากทำให้เย็นตัวส่วนใหญ่จะเป็นเกรนที่ หยาบมาก ซึ่งจะทำให้เปราะง่าย เหล็กที่มีเกรนหยาบสามารถทำให้เกรนมีขนาดเล็กลงได้ โดยการ อบปกติ (Normalization)[27]

2.9.2 การอบปกติ (Normalizing)

การอบวิธีนี้จะให้ความร้อนไปจนเหนือเส้นของการเปลี่ยนโครงสร้าง Ac_3 เล็กน้อยคือเหนือเส้น Ac_3 20-50°C สำหรับเหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์ ($C < 0.77\%$) และเหนือเส้น Ac_1 20-50°C สำหรับเหล็กกล้า ไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ($C < 0.77\%$) การเย็นตัวจะเป็นไปอย่างช้าๆ ในอากาศ การให้

ความร้อนแก่เหล็กจาก บริเวณ α ไปสู่บริเวณ γ และกลับกัน การเย็นตัวอย่างช้าๆ ของเหล็กจะทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของเหล็กขึ้นสองครั้ง และจะทำให้โครงสร้างของเหล็กละเอียดและสม่ำเสมอขึ้น ต่างจากโครงสร้างเดิม เช่น โครงสร้างจากการหล่อ การตี การชุบแข็ง เป็นต้น การเกิดเกรนที่ละเอียดขึ้นได้นั้นเนื่องมาจากมีแกนผลึก (Crystal nucleus) เกิดขึ้นใหม่เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากมีแนวเส้นผลึก (Crystal Line) จำนวนมาก ที่มีอยู่ใน เกรนเพอร์ไลต์ซึ่งจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ

จุดประสงค์ของการอบปกติ คือ การทำให้เกรนที่มีขนาดใหญ่กลายเป็นเกรนที่มีขนาดปกติ และทำให้สมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง การผลิตเหล็กกล้าหล่อ (Cast Steel) จำเป็นต้องมีการอบปกติ เพราะ หลังจากการแข็งตัวของเหล็กจะมีลักษณะหยาบ นอกจากนั้นชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ตีขึ้นรูป (Forging) ซึ่งได้รับ ความร้อนสูงเป็นเวลานานก็จะมีโอกาสมีเกรนที่หยาบได้เช่นกัน การอบแบบนี้ยังสามารถแก้การเป็นโครงสร้าง แบบเส้นบันทึได้ด้วย

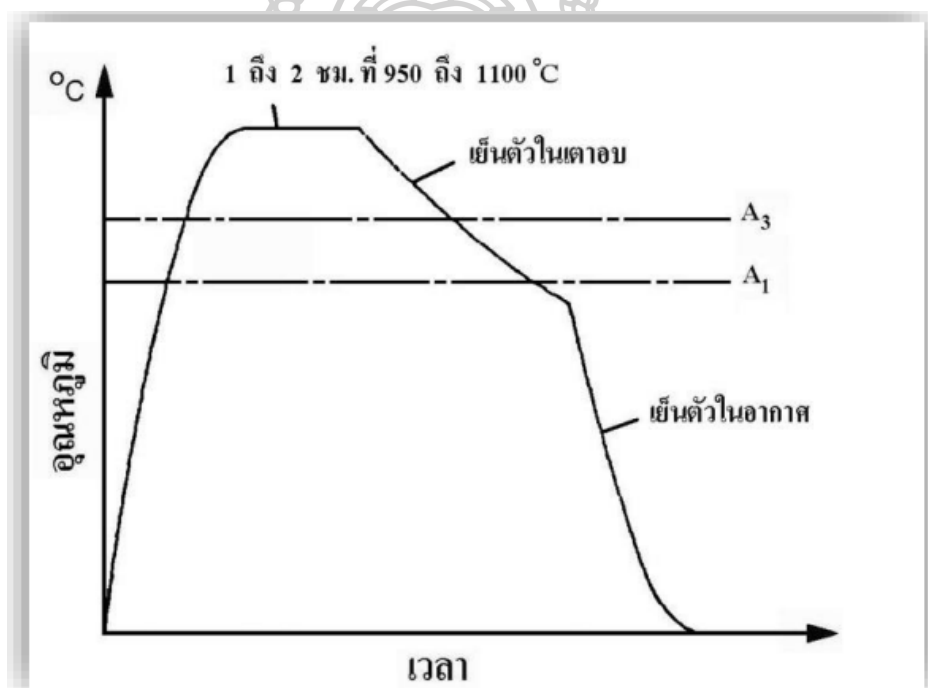


รูปที่ 2.46 แผนภูมิการอบปกติ (Normalizing)[27]

การอบปกติเหล็กกล้าที่มี $C > 0.77\%$ จะใช้อุณหภูมิในการอบเหนือเส้น Ac_1 เพราะถ้าใช้อุณหภูมิเหนือเส้น Ac_3 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิสูง จะทำให้ได้เกรนอสเตไนต์โต และเมื่อเหล็กเย็นตัวลง จะมีผลทำให้ซิเมนต์ไทรท์ที่เกิดขึ้น มีลักษณะเป็นตาข่าย ซึ่งจะมีผลให้สมบัติทางกลของเหล็กลดลง และยากที่จะอบแก้ไขด้วยวิธีอื่น

ข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ในการอบแบบนี้คือ การให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ หมายถึง ความร้อนไม่กระจายไปทั่วถึงทั้งชิ้นงาน ข้อผิดพลาดอีกอย่าง เช่น ความร้อนที่อบมากเกินไป หรืออบ นานเกินไป (ความร้อนที่ใช้เหมาะสมแล้วแต่ปล่อยทิ้งไว้นานเกินไป)

การอบเพื่อให้ได้เกรนหยาบ การอบเพื่อให้ได้เกรนหยาบ คือ การอบโดยใช้อุณหภูมิเหนือจุด เปลี่ยนโครงสร้าง A_{C_3} แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ จนถึงจุดเปลี่ยนโครงสร้างล่าง A_{C_1} และ หลังจากนั้น ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศปกติ การอบชนิดนี้เพื่อทำให้การตัดเฉือนชิ้นงานเป็นไปได้ง่าย และให้ได้ผิวของชิ้นงานที่ดี ส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำ และมีธาตุอื่นผสม เช่น Mn Cr ซึ่ง สามารถนำไปชุบแข็งได้โดยการเพิ่มคาร์บอนไปที่ผิว จึงทำให้ได้ผิวแข็งแต่บริเวณแกนกลางอ่อนและ เหนียว ซึ่งการตัดเฉือนเหล็กชนิดนี้จะได้ผิวที่ไม่ดี

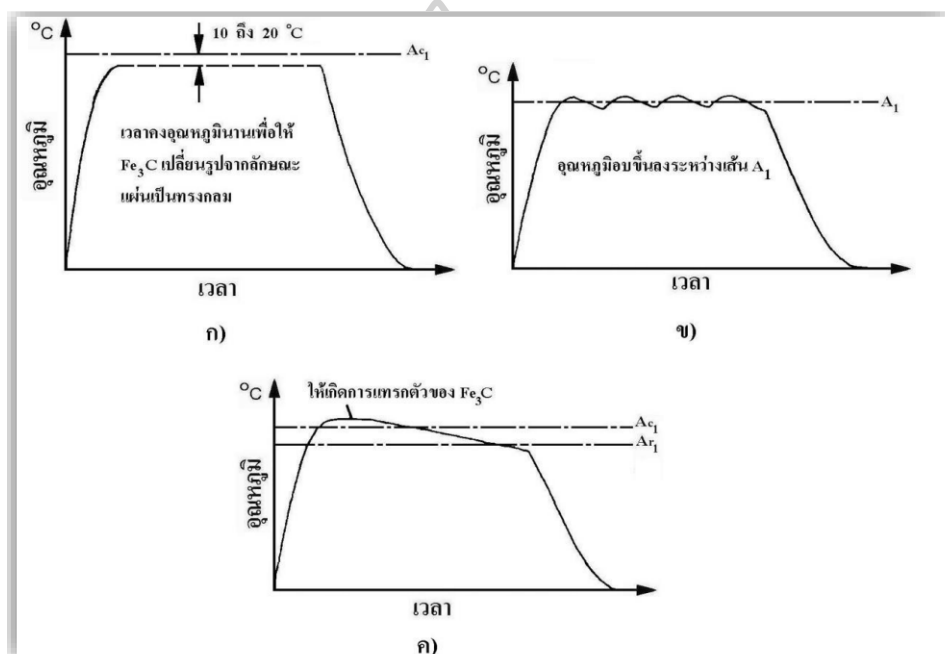


รูปที่ 2.47 แผนภูมิการอบเพื่อให้ได้เกรนหยาบ[27]

2.9.3 การอบอ่อน (Soft annealing or Spheroidizing)

การอบอ่อน คือ การอบที่อุณหภูมิใต้เส้นของการเปลี่ยนโครงสร้างล่าง A_{C_1} เล็กน้อย แล้วทำ ให้ เย็นตัวลงช้าๆ เพื่อที่จะให้เหล็กอ่อนตัวลง การอบวิธีนี้จะมีอิทธิพลต่อโครงสร้างเพอร์ไลต์ซึ่งมี ลักษณะเป็น เส้นๆ โดยจะทำให้ซีเมนไตท์ในเพอร์ไลต์เปลี่ยนเป็นลักษณะกลม นอกจากนี้ยังสามารถ

ทำให้คาร์บอนในเกรนมาร์เทนไซต์แยกตัวออกมาเป็นเหล็กคาร์ไบต์ได้ การที่เกรนเพอร์ไลต์ที่มีลักษณะเป็นเส้นเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้นั้น ต้องใช้เวลาในการอบหลายชั่วโมง การอบอ่อนจำเป็นมาก สำหรับชิ้นงานที่ทำจากเหล็กแผ่น เหล็กเส้น หรือเส้นลวด ซึ่งได้มาจากการรีดหรือดึง แล้วจำเป็นต้องนำเหล็กนั้นไปขึ้นรูปเย็นต่อไป หรือในกรณี เหล็กกล้าคาร์บอน $C > 0.5\%$ ได้รับความร้อนและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดเกรนมาร์เทนไซต์ และมีความจำเป็นต้องทำการตัดเฉือนอีก ซึ่งจะทำไม่ได้ถ้าไม่ทำการอบอ่อนเสียก่อน หรือในกรณีเหล็กหล่อสีเทาที่มีเกรนลิตีบรูไรต์ที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งมีความแข็งมากทำให้การตัดเฉือนทำได้ยาก จึงต้องมีการอบอ่อนเพื่อให้ สามารถตัดเฉือนได้[27]

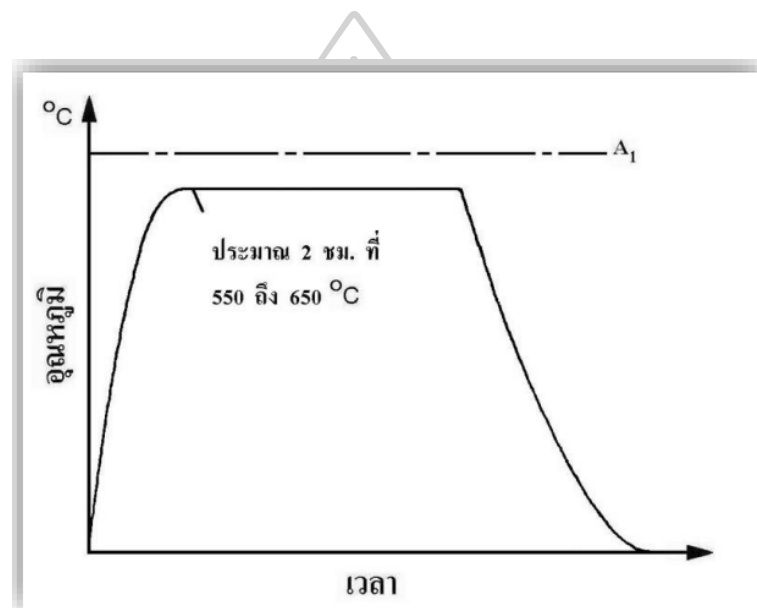


รูปที่ 2.48 แผนภูมิการอบอ่อน ก) สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ข) และ ค) สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน ปานกลาง และคาร์บอนสูง[27]

2.9.4 การอบคืนรูปผลึก (Recrystallisation)

การอบคืนรูปผลึก คือ การอบเพื่อช่วยให้เหล็กอ่อนตัวลง เพราะมีความแข็งเพิ่มขึ้นหลังจากมีการขึ้นรูปเย็น เช่น การขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) ซึ่งจะทำให้เหล็กสามารถทำการขึ้นรูปขึ้นรูปต่อไปได้ โดยที่เหล็กไม่เกิดการเสียหาย อุณหภูมิของการอบวิธีนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็ก และขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการขึ้นรูป ปกติก็จะอยู่ประมาณ 550-650°C เกรนที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็นจะเปลี่ยนรูปไปได้ตามแนวของการขึ้นรูป หลังจากผ่านการอบก็จะสามารถกลับสู่สภาพและขนาดเดิม รวมทั้งซีเมนต์ไคท์ก็จะกลับรูปเป็นทรงกลมอย่าง เดิมด้วย ซึ่งส่งผลให้การขึ้นรูปเย็นขึ้นรูปต่อไปสามารถทำได้สะดวกราบเท่าที่

อุณหภูมิไม่เกินเส้น Ac_1 แต่ถ้า ในชิ้นงานชิ้นหนึ่งมีสัดส่วนของการขึ้นรูปไม่เท่ากัน เช่น ในกรณีของการขึ้นรูปเหล็ก อาจจะทำให้เกิดเกรนหยابที่บริเวณที่มีสัดส่วนของการขึ้นรูปอยู่บริเวณจุดวิกฤตสำหรับเหล็กกล้าที่มี $C < 0.2\%$ จุดวิกฤตของสัดส่วนการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 5-20% จึงควรหลีกเลี่ยงการอบคืนรูปผลึกมาทำการอบปกติแทน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเกรนหยاب การอบคืนรูปผลึกนั้นมีข้อดีตรงที่ชิ้นงานไม่ค่อยเกิดการไหม้ที่ผิวและการเสียรูปทรงของชิ้นงานซึ่งการอบปกติจะมีโอกาสเกิดได้มากกว่า ในกรณีของเหล็กกล้าที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเลย เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิค วิธีเดียวที่จะทำให้เกรนกลับสู่สภาพเดิมได้ คือการอบคืนรูปผลึก[27]

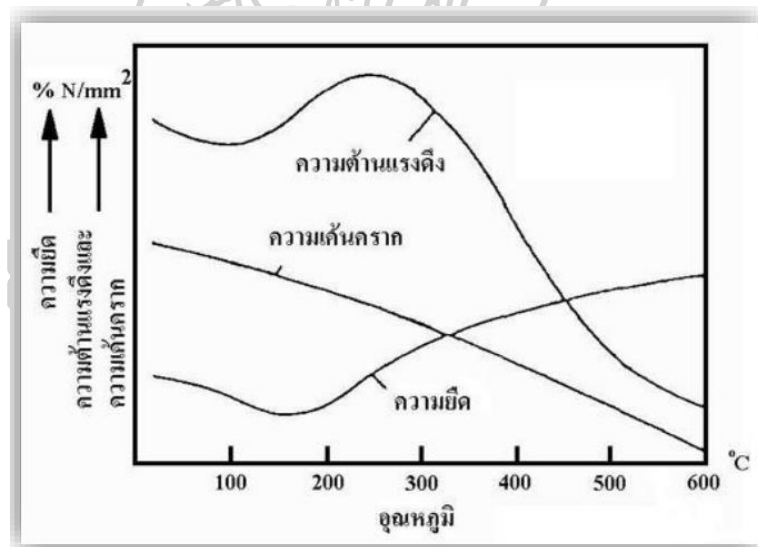


รูปที่ 2.49 แผนภูมิการอบคืนรูปผลึก[27]

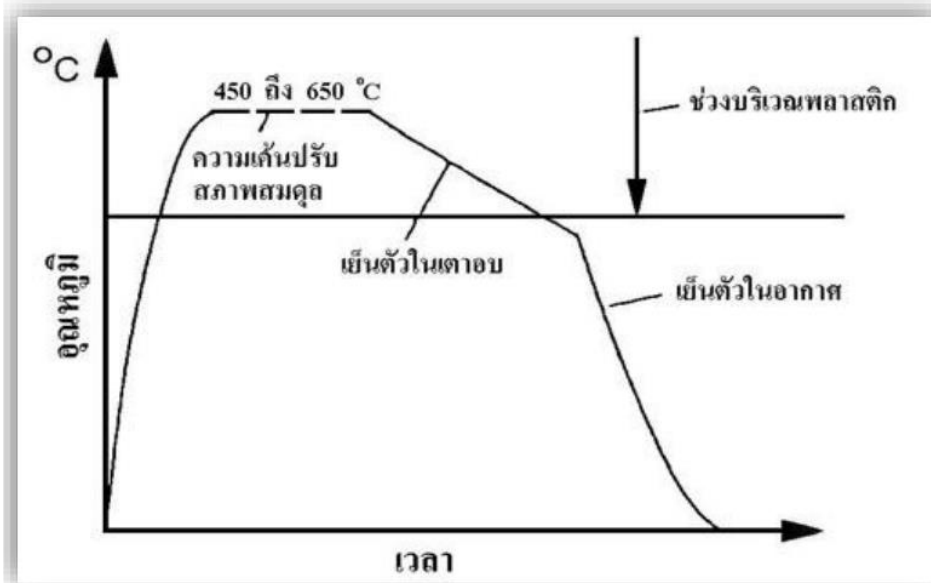
2.9.5 การปลดความเค้น (Stress Relief)

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแบบนี้จะอยู่ใต้เส้นของการเปลี่ยนโครงสร้าง Ac_1 ส่วนใหญ่จะต่ำกว่า 650°C และทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ เพื่อให้ความเค้นภายในเกิดการสมดุลย์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างอื่น การอบนี้สามารถกำจัดความเค้นที่อาจเกิดจากความร้อนหรือแรงกระทำเชิงกล เช่น ความเค้นที่เกิดจากการเชื่อม การขึ้นรูปเย็น การให้ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ หรือการเย็นตัวไม่สม่ำเสมอก็สามารถทำได้เช่นกัน ค่าความแข็งแรงของเหล็ก คือค่าความเค้นคราก และความต้านแรงดึงจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300°C ขึ้นไป ดังรูปที่ 7 จากการอบที่อุณหภูมิของการปลดความเค้นนี้ จะมีผลทำให้ค่าความเค้นครากลดต่ำลง และทำให้ความเค้นในตัวชิ้นงานลดลง เพราะความเค้น

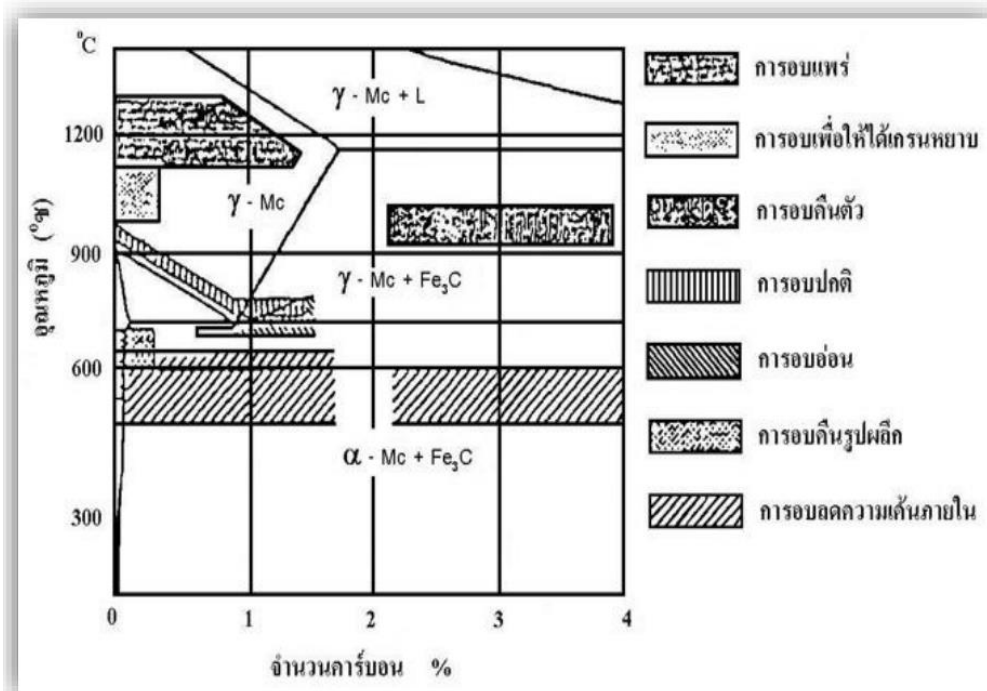
ภายในจะมีค่าสูงกว่าความเค้นครากและอยู่ในบริเวณ พลาสติก จึงมีการฟอร์มตัว (Deformation) แต่ความเค้นนี้ไม่สามารถลดลงจนถึงศูนย์ได้ เพราะอุณหภูมิที่อบ ไม่สามารถทำให้ความเค้นครากลดลงเหลือเท่ากับศูนย์ได้ การทำให้เย็นตัวลงจำเป็นต้องให้เย็นอย่างช้าๆ เพื่อให้อุณหภูมิตลอดทั้งหน้าตัดมีขนาดใกล้เคียงกัน มิเช่นนั้นอาจจะเกิดความเค้นภายในขึ้นอีกได้ การอบวิธีนี้ ต่างกับการอบอ่อนตรงที่เวลาคงอุณหภูมิของการอบแบบนี้ สั้นกว่าการอบอ่อนมาก ดังนั้นจึงไม่เกิดการเปลี่ยน รูปทรงของซีเมนไต์ นอกจากนั้นค่าความแข็งและค่าความต้านแรงดึงจะไม่ลดลง การอบด้วยวิธีนี้กับเหล็กซึ่ง ผ่านการชุบแข็ง และอบคืนตัว (Tempering) แล้วจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการ อบคืนตัวเพราะถ้าสูงเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งแรงของเหล็กลดต่ำลงอย่างมาก การอบลดความเค้นนี้ยังสามารถใช้ กำจัดความเค้นที่มีอยู่ในเหล็กหล่อได้ด้วย โดยใช้อุณหภูมิสำหรับเหล็กหล่อสีเทาแกรไฟต์แผ่น และแกรไฟต์ กลมโดยส่วนใหญ่จะเลือกใช้อุณหภูมิในการอบ 500-550°C และสำหรับเหล็กหล่อเจือดำใช้อุณหภูมิประมาณ 550-600°C และไม่ควรรใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้เพราะจะเป็นเหตุให้ค่าความต้านแรงดึงของเหล็กลดลงมาก[27]



รูปที่ 2.50 สมบัติของเหล็กกล้าขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ[27]



รูปที่ 2.51 แผนภูมิการอบลดความเค้น[27]



รูปที่ 2.52 อุณหภูมิของการอบวิธีต่างๆ ในแผนภาพสมดุล Fe-Fe₃C[27]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบเชิงกลที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการแช่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep cryogenic treatment) ซึ่งมีรายละเอียดการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือสำหรับดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยและการทดลองมีเครื่องมือสำหรับงานวิจัยแบ่งออกเป็น อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการเย็นยวดยิ่ง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการเย็นยวดยิ่ง

3.1.1.1 ถังเก็บไนโตรเจนเหลว (Dewar)

ถังเก็บไนโตรเจนเหลวรุ่น GP-20 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บไนโตรเจนเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -196°C โดยถังที่ใช้ในการเตรียมเหล็กกล้าอย่างน้อย 5 ชนิด มีขนาด 20 L สูง 650 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 409 mm ซึ่งจะมีกระบอกแช่ภายในที่มีขนาดสูง 276 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm ถังเก็บไนโตรเจนเหลวที่ใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ถังเก็บไนโตรเจนเหลว

3.1.1.2 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ

เครื่องบันทึกอุณหภูมิรุ่น midi LOGGER GL220 เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยบันทึกอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงที่มีความละเอียดทุกๆ 1 วินาที มีช่องสัญญาณ 10 ช่อง เชื่อมต่อ ใช้คู่กับเทอร์โมคัปเปิล type K สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าความแม่นยำ ± 0.002 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ตามที่ตั้งค่าไว้ เครื่องบันทึกอุณหภูมิที่ใช้งานแสดงดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ

3.1.1.3 สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

สายเทอร์โมคัปเปิล เป็นสายสำหรับวัดอุณหภูมิโดยสายเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้งานเป็นแบบ type K ซึ่งมีส่วนประกอบเป็น Chromel – alumel ซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้งาน โดยมีช่วงการวัดอุณหภูมิระหว่าง $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ สายเทอร์โมคัปเปิลแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สายเทอร์โมคัปเปิล

3.1.1.4 เตาอบไฟฟ้า (Muffle furnace)

เตาอบไฟฟ้า THAIBURNERRAFURNCE รุ่น 1200C EL T-22 เตาอบสามารถควบคุมระบบคอนโทรลการเผาอัตโนมัติ โดยการตั้งโปรแกรมเผาผ่านแผงควบคุม มีระบบเซฟตี้ที่สามารถป้องกันฟ้ารั่วหรือรั่ววงจรได้ ตั้งเวลาการเผาต่อเนื่องได้ และสามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 1600 °C ขนาดภายในเตา กว้าง 25 cm ยาว 25 cm สูง 35 cm เตาอบไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เตาอบไฟฟ้า

3.1.1.5 เครื่องเลื่อยสายพาน (Metal band saw)

เครื่องเลื่อยสายพาน รุ่น BS-128HDR ใช้ตัดเหล็กกลมและเหล็กเหลี่ยมที่มีขนาดตัด 5 นิ้ว และสามารถปรับองศาได้ที่ฐานใบมีด ปรับความเร็วในการตัดชิ้นงานได้ โดยมีมอเตอร์ขนาด 1/2 HP 110/220 V เครื่องเลื่อยสายพานแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องเลื่อยสายพาน

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine)

เครื่องทดสอบแรงดึงรุ่น Chun Yen โมเดล CY-6040A1 ขนาด 50 ตัน ตามมาตรฐาน (ISO 7500/1, JIS B7721 / B7733, DIN 5122, EN 1002-2, CNS 2111, 9471, 9470; GB 228-87; ASTM E4; BS1610; JJG 139-1999) ใช้ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) ซึ่งมีค่าความแม่นยำ $\pm 1\%$ ความเร็วในการทดสอบ 0-50 mm/min ซึ่งสามารถทดลองได้ทั้งแรงดึงและแรงกด จะแสดงผลการทดลองผ่านโปรแกรมผ่านหน้าจคอมพิวเตอร์ เครื่องทดสอบแรงดึงแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติและสารประกอบของโลหะ

Chemical Composition (%) ส่วนประกอบทางเคมีตาม มอก. ไม่เกินร้อยละ (โดยน้ำหนัก)								
ชั้นคุณภาพ Grade	คาร์บอน carbon	ซิลิกอน Silicon	แมงกานีส Manganese	ฟอสฟอรัส Phosphorus	กำมะถัน Sulphur	โครเมียม Chromium	นิกเกิล Nickel	ไนโตรเจน Nitrogen
เหล็ก SR 24	0.28	-	-	0.060	0.060	-	-	-
เหล็ก SK4	0.90- 1.00	0.15- 0.35	0.15-0.50	0.030	0.030	0.30	0.25	-
เหล็ก S45C	0.42- 0.48	0.15- 0.35	0.60-0.90	0.030	0.030	0.20	0.20	-
เหล็กกล้าไร้ สนิม ชนิด AISI 304	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	18.00- 20.00	8.00- 10.50	0.1
เหล็กกล้าไร้ สนิม ชนิด AISI 201	0.15	1.00	5.5-7.5	0.060	0.030	16.00- 18.00	3.5- 5.5	0.25

3.2 สถานที่ทำการวิจัย

อาคารปฏิบัติการสามชั้น ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

สำหรับระยะเวลางานวิจัย ช่วงแรกจะทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเย็นยวดยิ่ง (Cryogenic) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) และการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายในที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง ระยะเวลาในการดำเนินการตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2563 เริ่มทำการทดลองการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง ตั้งแต่เดือน ธันวาคม 2563 จนถึงเดือนกันยายน 2564 วิเคราะห์ผลการทดลองตั้งแต่เดือนตุลาคม 2564 เป็นต้นไป ซึ่งระยะเวลาในการดำเนินการวิจัยแสดงดังในตารางที่ 3.2

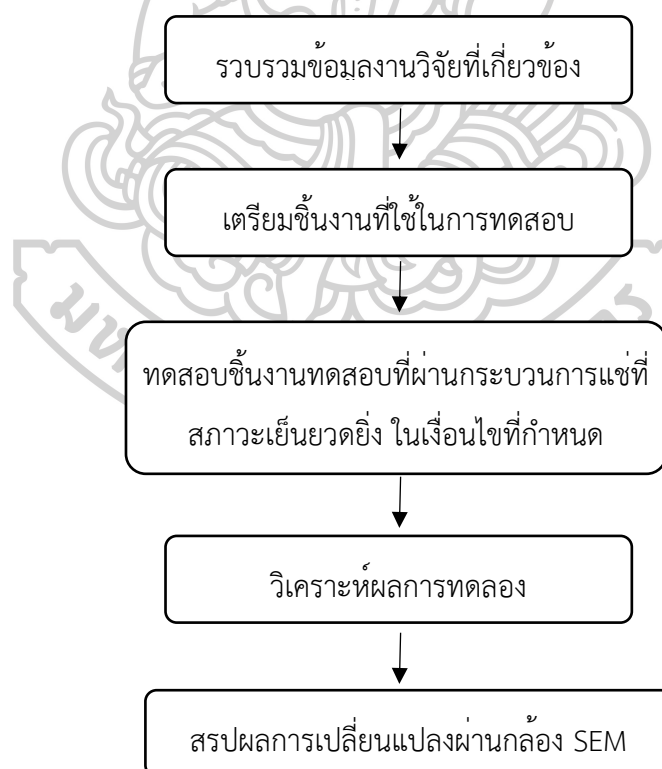
ตารางที่ 3.2 ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย

รายงานการดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลาของการดำเนินการวิจัย
- ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสภาวะเย็นยวดยิ่ง การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกล และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน	กันยายน - พฤศจิกายน 2563
- เริ่มทำการทดลองและเก็บผลการทดลอง	ธันวาคม - กันยายน 2564
- วิเคราะห์ผลการทดลอง	กันยายน - ตุลาคม 2564

3.4 การวางแผนการวิจัย

3.4.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการวิจัยในการศึกษานี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดสอบในเงื่อนไขต่าง ๆ และลักษณะโครงสร้างภายในดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงแผนงานวิจัยการหาคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง

จากรูปที่ 3.7 สามารถอธิบายแผนงานวิจัยได้ดังนี้

- ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะเย็นยวดยิ่ง (Cryogenics)

- เตรียมชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

ก. ชิ้นงานทดสอบแรงดึง เหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด ยาว 300 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm

- นำชิ้นงานทดสอบเข้าสู่กระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 7 เงื่อนไข เช่น

ก. ไม่ผ่านกระบวนการ

ข. แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร

ค. แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร

ง. แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร

จ. แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2

ชั่วโมง

ฉ. แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2

ชั่วโมง

ช. แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2

ชั่วโมง

- นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการในแต่ละเงื่อนไขไปทดสอบแรงดึง

- คำนวณค่าความเค้น ระยะยืด ค่าความเค้นแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ

ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ

- วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ค่าความเค้น ระยะยืด ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด เพื่อหาแนวโน้ม

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด ในแต่ละเงื่อนไขเพื่อศึกษา

กระบวนการที่ดีที่สุดในการทำกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง

3.4.2 แผนการทดลอง

แผนการทดลองนี้จะแบ่งเป็นในส่วนของการเตรียมชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง และขั้นตอนการทดสอบแรงดึง

3.4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- ชิ้นงานทดสอบแรงดึงใช้เหล็กกล้าเหล็กกล้าทั้ง 5 ชนิด มีลักษณะเป็นเพลากลมตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ความยาวชิ้นงาน 300 mm เตรียมชิ้นงานจำนวน 21 ชิ้น ต่อชนิดเหล็ก 1 ชนิด

- เงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้ จะเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งทั้งหมด 7 เงื่อนไขโดย

1. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 3 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว จำนวนการทดลอง 3 ครั้ง

2. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 4 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว จำนวนการทดลอง 3 ครั้ง

3. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 5 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว จำนวนการทดลอง 3 ครั้ง

4. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 3 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวนการทดลอง 3 ครั้ง

5. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 4 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวนการทดลอง 3 ครั้ง

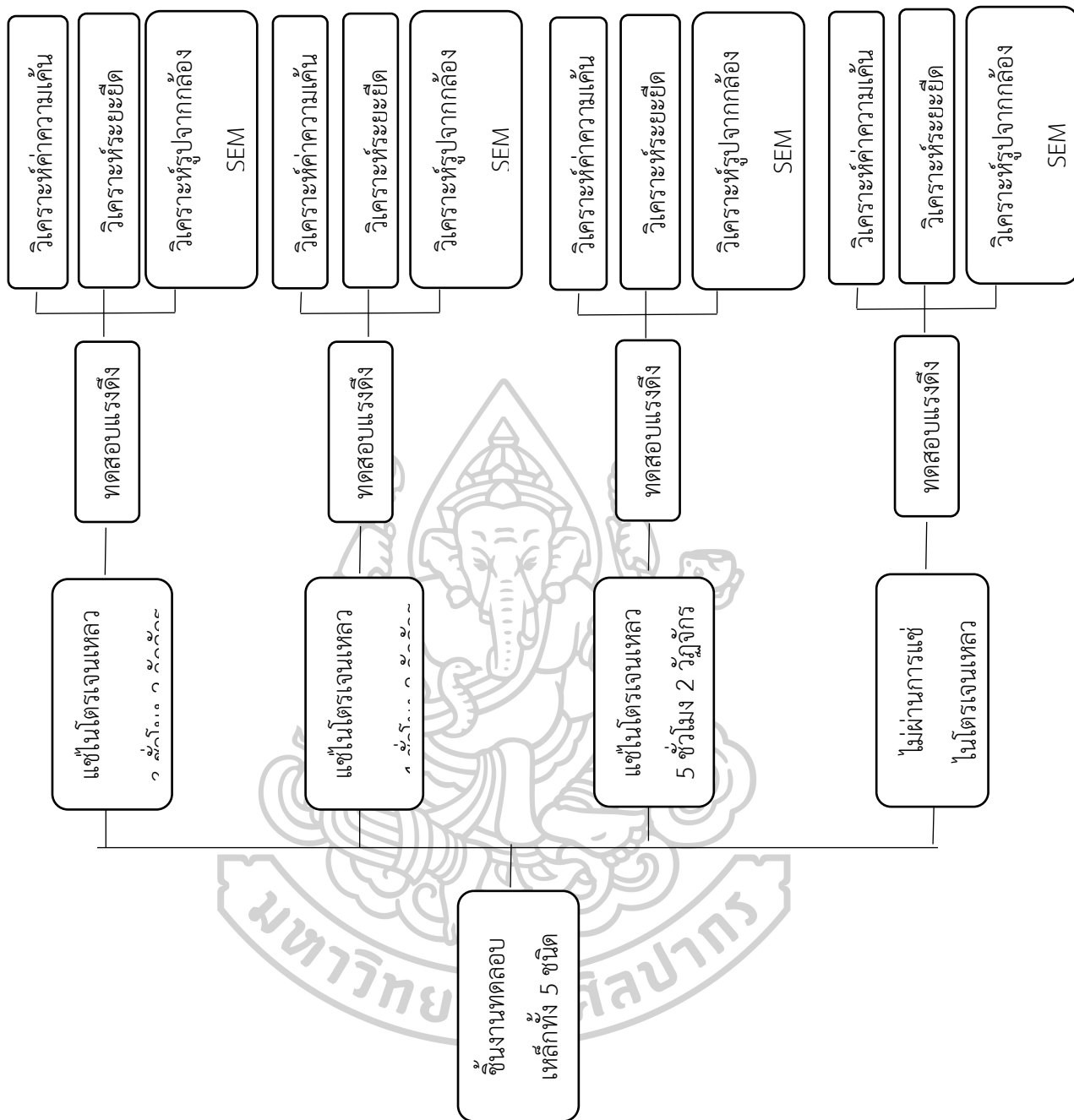
6. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 5 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จำนวนการทดลอง 3 ครั้ง

7. ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง จำนวนการทดลอง 3 ครั้ง

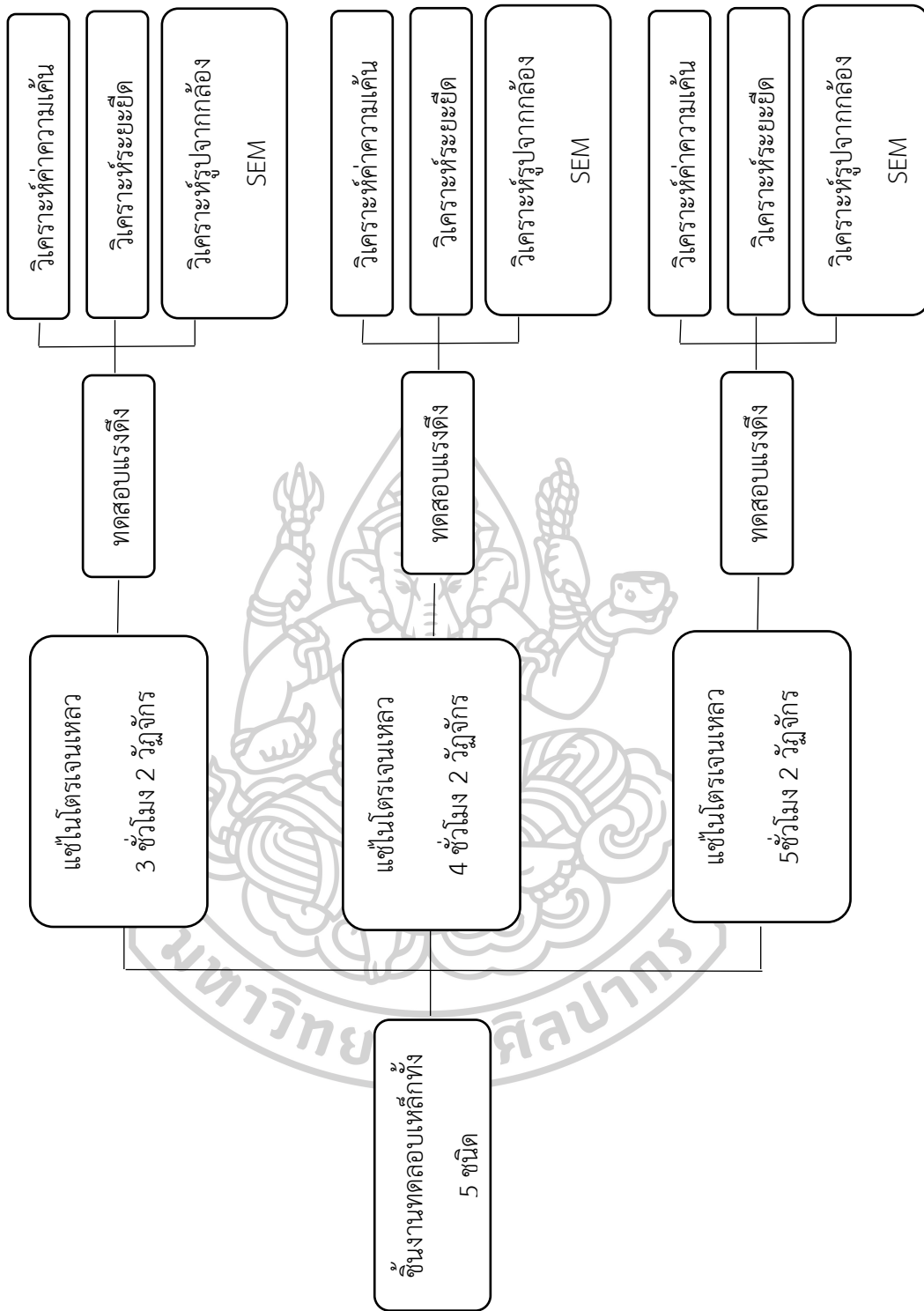
- หลังจากผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง ต้องพักให้ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการกลับไปอยู่ในอุณหภูมิบรรยากาศ

3.4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบจะเป็นการทดสอบแรงดึงตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยวิธีการในการดำเนินการจะแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 3.8 หลังจากการเตรียมชิ้นงานในแต่ละการทดสอบโดยงานวิจัยนี้มีเงื่อนไขของกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง 7 เงื่อนไข

1. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 3 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว
2. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 4 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว
3. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 5 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว
4. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 3 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 4 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่งเป็นเวลา 5 ชั่วโมงในไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
7. ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง

ในการแช่เหล็กทั้ง 5 ชนิดลงในถังไนโตรเจนเหลว จะต้องนำชิ้นงานทดสอบใส่ลงในกระบอกล้างก่อนนำลงถังไนโตรเจน โดยจะต้องนำสายเทอร์โมคัปเปิล type k มาติดกับชิ้นงานทดสอบ 1 ชิ้นงานในแต่ละรอบที่นำชิ้นงานทดสอบแช่ไนโตรเจนเหลว เพื่อหาอัตราการเย็นตัวที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดสอบ โดยปลายสายของเทอร์โมคัปเปิลอีกด้านจะต่อเข้ากับเครื่อง data logger เพื่อวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในทุก ๆ 1 วินาที หลังจากนั้นค่อย ๆ นำกระบอกล้างเข้าไปในถังไนโตรเจนเหลวเพื่อทำการลดอุณหภูมิ จนกระทั่งไม่มีไอขึ้นมาบนปากถังของไนโตรเจนเหลว หลังจากนั้นทำการแช่จนถึงอุณหภูมิที่กำหนด หลังจากครบกำหนดเวลา ต้องทิ้งให้ชิ้นงานทดสอบกลับคืนสู่อุณหภูมิบรรยากาศโดยสังเกตได้จากเครื่อง data logger ในส่วนของการอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะต้องทำการให้ความร้อนกับเตาอบไฟฟ้าที่ 200 °C ซึ่งก่อนที่จะนำชิ้นงานไปอบต้องติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล type k ที่ต่อเข้ากับเครื่อง data logger หลังจากนั้นก็นำไปอบในเตาอบไฟฟ้าเพื่อสังเกตอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 1 วินาทีหลังจากครบตามเงื่อนไขเวลาต้องทิ้งให้ชิ้นงานทดสอบกลับคืนสู่อุณหภูมิบรรยากาศ โดยในการทดสอบจะใช้การทดสอบดังต่อไปนี้

- การทดสอบแรงดึง

ก่อนการทดสอบแรงดึงจะต้องทำเครื่องหมายไว้ตรงกลางชิ้นงานทดสอบ และทำเครื่องหมายด้านละ 1.5 cm โดยนับจากจุดกึ่งกลางของชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปติดตั้งที่เครื่องทดสอบแรงดึง Chun Yen รุ่น CY-6040A1 โดยชิ้นงานจับที่บริเวณที่ทำเครื่องหมายออกจากจุดกึ่งกลางไว้ในตอนแรก หลังจากติดตั้งชิ้นงานทดสอบเสร็จ เปิดโปรแกรมทดสอบแรงดึงที่เครื่องคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นกดทดสอบชิ้นงานทดสอบจนขาดออกจากกัน แล้วบันทึกผลการทดลองนั้น ทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นและระยะยืดของชิ้นงาน ที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ

- การวิเคราะห์ผ่านกล้อง SEM



Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัญญาณและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงตัวอย่างจากการดึง โดย Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้เพิ่มเติม

โดยในแต่ละเงื่อนไขในการแข่งที่สภาวะเย็นยวดยิ่งและจำนวนชิ้นงานทดสอบจะแสดงดังตารางที่ 3.3



ตารางที่ 3.3 จำนวนการทดลอง

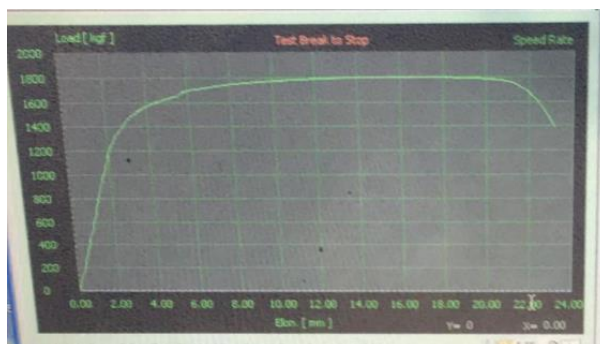
ระยะเวลาในการแช่ที่ สภาวะเย็นยวดยิ่ง (ไนโตรเจนเหลว)	ลักษณะและขนาดของ ชิ้นงานทดสอบ	รูปแบบการทดสอบ	จำนวนการ ทดลอง (ครั้ง)
ไม่ผ่านกระบวนการทดสอบ	เพลากลมตันยาว 280 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm	ทดสอบแรงดึง	3
		ส่องผ่านกล้อง SEM	3
3 ชั่วโมง	เพลากลมตันยาว 280 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm	ทดสอบแรงดึง	3
		ส่องผ่านกล้อง SEM	3
4 ชั่วโมง	เพลากลมตันยาว 280 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm	ทดสอบแรงดึง	3
		ส่องผ่านกล้อง SEM	3
5 ชั่วโมง	เพลากลมตันยาว 280 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm	ทดสอบแรงดึง	3
		ส่องผ่านกล้อง SEM	3
3 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	เพลากลมตันยาว 280 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm	ทดสอบแรงดึง	3
		ส่องผ่านกล้อง SEM	3
4 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	เพลากลมตันยาว 280 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm	ทดสอบแรงดึง	3
		ส่องผ่านกล้อง SEM	3
5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	เพลากลมตันยาว 280 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm	ทดสอบแรงดึง	3
		ส่องผ่านกล้อง SEM	3

จากตารางที่ 3.3 แสดงถึงจำนวนการทดสอบทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระยะเวลาในการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งจะมีชิ้นงานทดสอบ เงื่อนไขละ 6 ครั้ง แบ่งเป็นการทดลอง 2 รูปแบบ รูปแบบละ 3 ครั้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมีการทดลองทั้งหมด 42 ครั้ง

3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.5.1 การบันทึกผลการทดลอง

3.5.1.1 ทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.10 แสดงค่าและกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

จากรูปที่ 3.10 โดยในแกน y แสดงถึงแรงที่กระทำมีหน่วยเป็น kgf และในแกน x แสดงถึงระยะยืดมีหน่วยเป็น mm

ตารางที่ 3.4 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ไม่ผ่านกระบวนการ

การทดลองครั้งที่	ความยาวก่อนดึง (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	Yield Point (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1						
2						
3						
เฉลี่ย						

ตารางที่ 3.5 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง 3 ชั่วโมง

การทดลองครั้งที่	ความยาวก่อนดึง (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่หน้าตัด (m^2)	Yield Point (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1						
2						
3						
เฉลี่ย						

ตารางที่ 3.6 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง 4 ชั่วโมง

การทดลองครั้งที่	ความยาวก่อนดึง (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่หน้าตัด (m^2)	Yield Point (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1						
2						
3						
เฉลี่ย						

ตารางที่ 3.7 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง 5 ชั่วโมง

การทดลองครั้งที่	ความยาวก่อนดึง (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	Yield Point (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1						
2						
3						
เฉลี่ย						

ตารางที่ 3.8 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การทดลองครั้งที่	ความยาวก่อนดึง (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	Yield Point (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1						
2						
3						
เฉลี่ย						

ตารางที่ 3.9 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การทดลองครั้งที่	ความยาวก่อนดึง (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	Yield Point (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1						
2						
3						
เฉลี่ย						

ตารางที่ 3.10 แบบฟอร์มบันทึกผลการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

การทดลองครั้งที่	ความยาวก่อนดึง (m)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (m)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	Yield Point (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1						
2						
3						
เฉลี่ย						

จากตารางที่ 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 3.8, 3.9 และ 3.10 เป็นตารางบันทึกผลการทดลองที่ได้จากการวัดขนาดและการคำนวณในเงื่อนไข ไม่ผ่านกระบวนการ, ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 3 ชั่วโมง, ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 4 ชั่วโมง, ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 5 ชั่วโมง, ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง, ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง, ผ่านการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอบที่ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามลำดับโดยสามารถคำนวณค่าความเค้นได้ดังนี้

คำนวณพื้นที่หน้าตัด (Cross area)

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.1)$$

เมื่อ A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ (m^2)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัด (m)

คำนวณค่าความเค้น (Stress)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

เมื่อ σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสกาล (Pa)

P = แรงภายนอกที่มากระทำ (N)

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ (m^2)

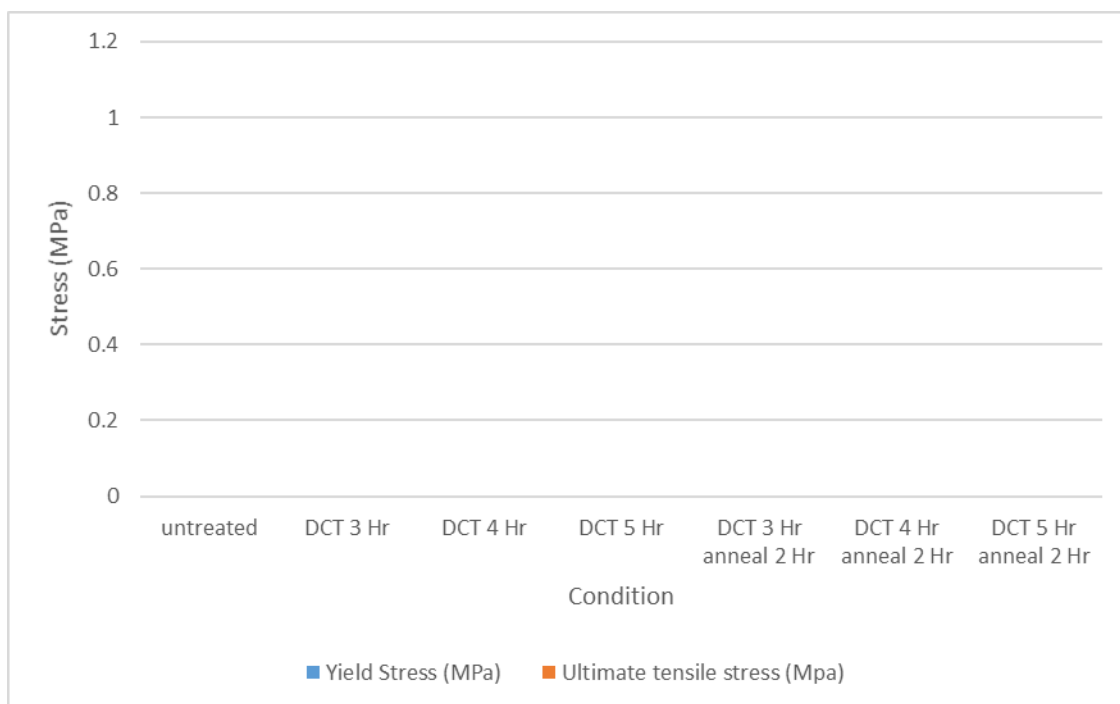
คำนวณระยะยืด (Elongation)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.3)$$

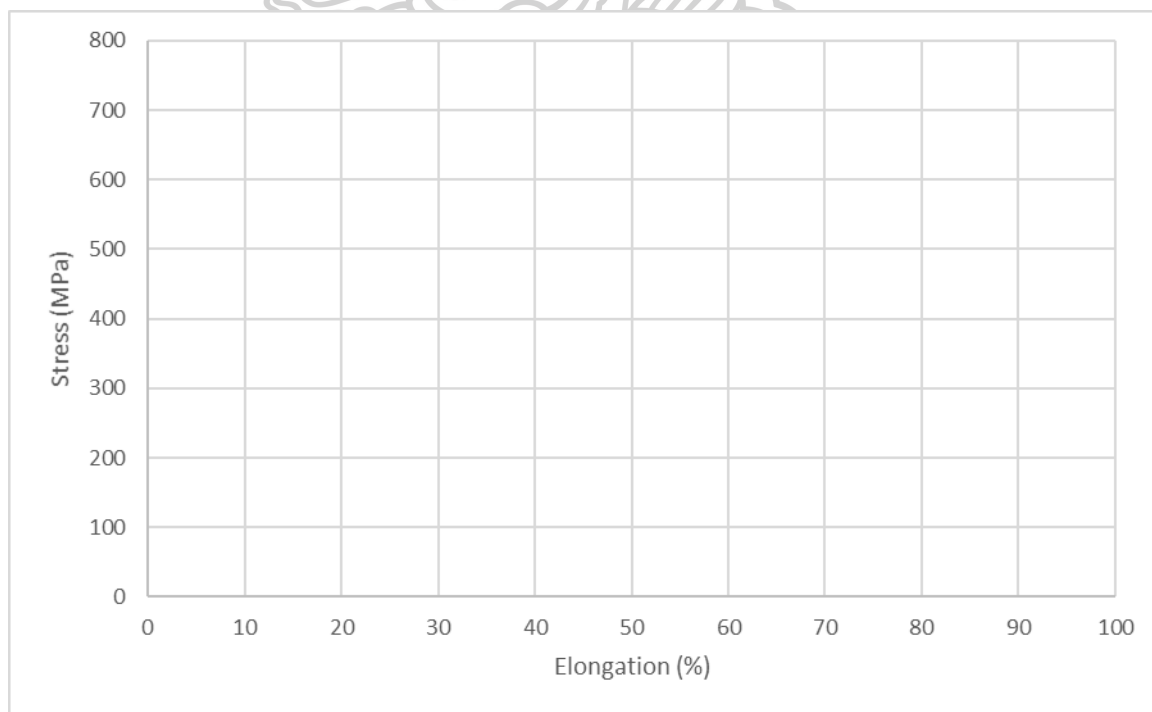
เมื่อ ε = ระยะยืด (Elongation) เปอร์เซ็นต์ความยืดที่ยืดออกจากความยาวเดิม (%)

ΔL = ความยาวชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นจากความยาวเดิม (m)

L = ความยาวชิ้นงานเดิมก่อนการทดสอบ (m)



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับแรงขึ้นไขกลุ่มทดลองตัวอย่าง



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์ระยะยืดของชิ้นงานกลุ่มทดลองตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการดำเนินการและอภิปรายผล

4.1 ผลอัตราการเย็นตัวและอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ชิ้นงานวัสดุ

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดกับชิ้นงานทดสอบนั้นส่งผลกับโครงสร้างระดับอนุภาค ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างระดับอนุภาคและยังมีผลต่อค่าคุณสมบัติเชิงกล จากการทดสอบหาผลของอัตราการเย็นตัวและอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ชิ้นงานทดสอบในกระบวนการจะสามารถสังเกตได้ว่า ความสัมพันธ์ของชิ้นงานและอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวในทางด้านอัตราการเย็นตัวจะลดลงอย่างรวดเร็วอย่างมาก โดยในงานวิจัยของ Das et al., (2010) ว่าอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวแล้ว อุณหภูมิชิ้นงานจะคงที่โดยได้ใช้ เหล็ก 815M17 จะมีอัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิห้องลงไปสู่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว (-196°C) เท่ากับ 4.57°C/s ผลของอัตราการเย็นตัวโดยใช้เหล็กกล้า 5 ชนิด อาทิ เหล็ก SR 24 เหล็ก SK 4 เหล็ก S45C เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 และเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201 เป็นชิ้นงานในการทดสอบเวลาที่ทำให้อัตราการเย็นตัว ใช้เวลาทั้งหมด 38 วินาทีหรือคิดเป็นอัตราการทำความเย็นของชิ้นงานเท่ากับ 6.47°C/s ความสัมพันธ์ชิ้นงานและอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมื่อปล่อยสู่อุณหภูมิห้องก็จะสูงขึ้นตามลำดับจนอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบเท่ากับอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งก่อนหน้านั้นชิ้นงานทดสอบจะมีอุณหภูมิชิ้นงานเท่ากับอุณหภูมิห้องและใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิชิ้นงานที่ 10°C/min เริ่มจับเวลาที่อุณหภูมิ 200°C หลังจากครบเวลาที่กำหนดจะปล่อยให้อุณหภูมิ ของชิ้นงานเย็นตัวลงให้เท่ากับอุณหภูมิห้องโดยในการทดลองจะทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีความร้อน ที่สะสมอยู่ในตัวชิ้นงานทดสอบ ก่อนจะนำมาทดสอบคุณสมบัติในลำดับต่อไป

4.2 ผลทดสอบของสภาวะเย็นยวดยิ่งที่มีต่อคุณสมบัติวัสดุ

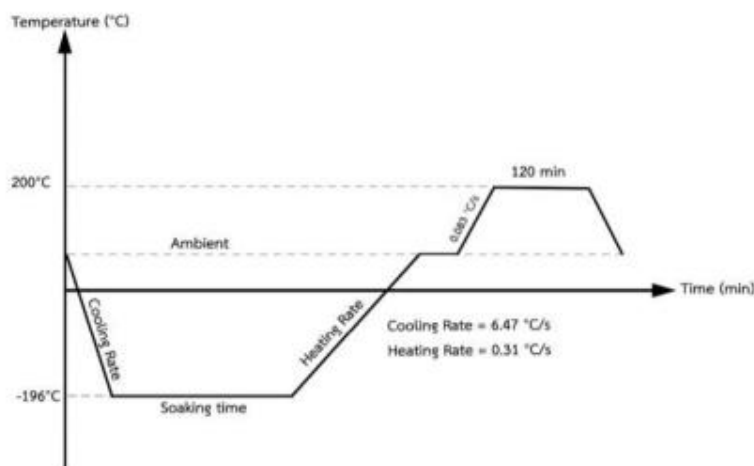
หลังจากการศึกษาปัจจัยและผลกระทบของสภาวะเย็นยวดยิ่งที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ วัสดุได้มีการทดสอบเพื่อรวบรวมข้อมูลที่เป็นต่อการทดสอบ มีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 การทดสอบระยะเวลาในการดำเนินการแช่วัสดุในสภาวะเย็นยวดยิ่ง

การทดสอบระยะเวลาในการดำเนินการได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้ ใช้วัสดุได้แก่ เหล็กกล้า 5 ชนิด อาทิ เหล็ก SR 24 เหล็ก SK 4 เหล็ก S45C เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 และ เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201 เป็นวัสดุในกระบวนการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่ง ซึ่งใช้เงื่อนไขในการแช่ไนโตรเจนเหลว ซึ่งแสดงผลการทดสอบ

4.2.1.1 ผลของระยะเวลาการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติวัสดุ

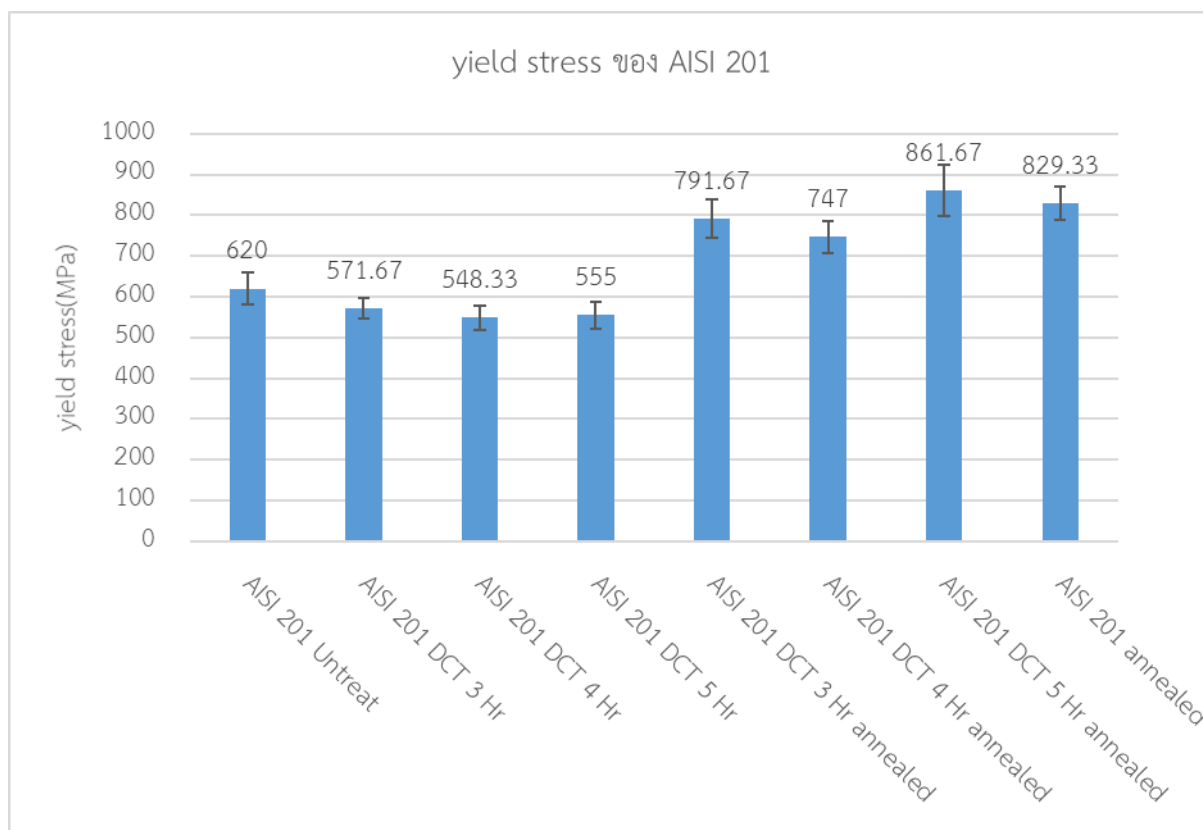
จากการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เหล็กกล้า 5 ชนิด อาทิ เหล็ก SR 24 เหล็ก SK 4 เหล็ก S45C เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201 เป็นวัสดุของชิ้นงานในกระบวนการทดสอบจะสามารถสังเกตได้ว่า ความสัมพันธ์ของค่า Yield Stress (YS) และระยะเวลาในการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่งของวัสดุมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก ในแต่ละเงื่อนไขดังแสดงในรูปที่ 4.1 ของการทดลอง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดง heating rate และ cooling rate ของการทดลอง

4.2.1 การทดสอบระยะเวลาในการดำเนินการแช่วัสดุในสภาวะเย็นยวดยิ่ง

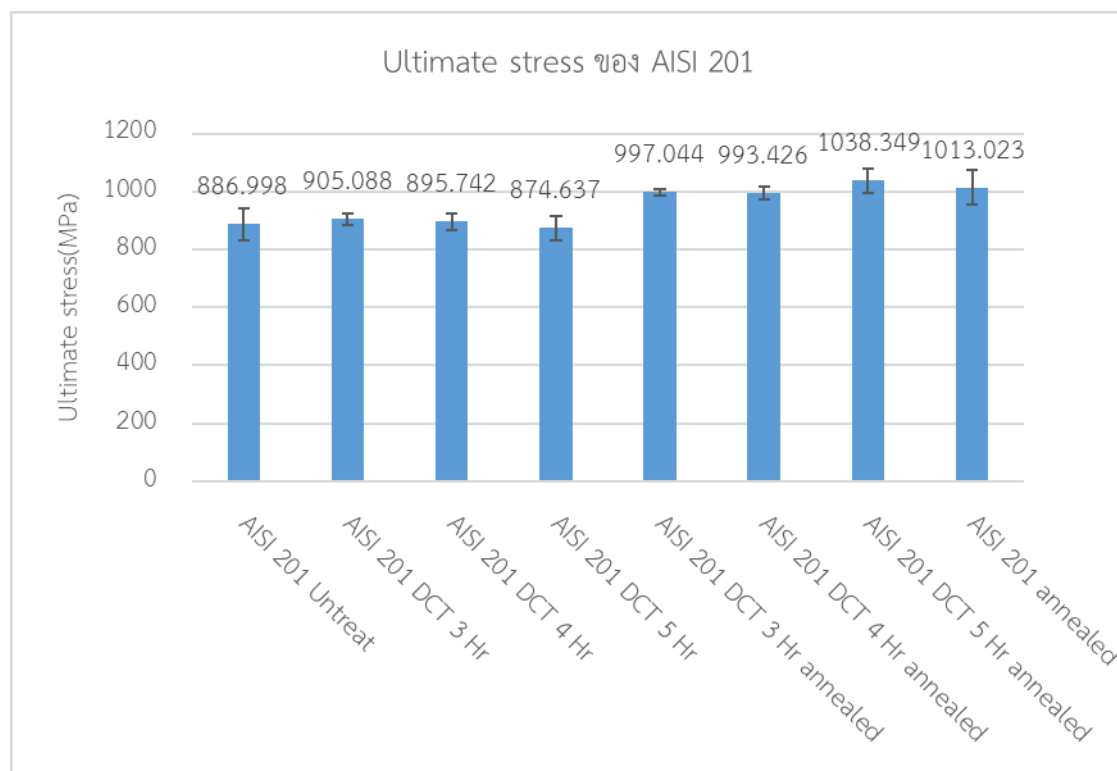
การทดสอบระยะเวลาในการดำเนินการได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้ ใช้วัสดุได้แก่ เหล็กกล้า 5 ชนิด อาทิ เหล็ก SR 24 เหล็ก SK 4 เหล็ก S45C เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 201 เป็นวัสดุในกระบวนการแช่สภาวะเย็นยวดยิ่ง ซึ่งใช้เงื่อนไขในการแช่ไนโตรเจนเหลว ซึ่งแสดงผลการทดสอบไว้ดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า Yield stress ของสแตนเลส AISI 201 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.2 ค่าของ Yield stress ในช่วงที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยิ่งยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 5 ชั่วโมง เป็นจำนวน 2 รอบ ค่าของ Yield stress ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการ (Untreat) แสดงได้ว่าโลหะผสมหรือสแตนเลสชนิด AISI 201 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยิ่งยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 5 ชั่วโมง เป็นจำนวน 2 รอบ แต่หากนำสแตนเลสชนิด AISI 201 ไปผ่านกระบวนการอบอ่อนแล้วค่าของ Yield stress มีการเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเทียบกับค่า Yield stress แบบปกติ ซึ่งตัวอย่างการทดลองที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยิ่งยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 5 ชั่วโมง เป็นจำนวน 2 รอบ แล้วนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ก็มีค่า Yield stress เพิ่มขึ้น แต่ก็ใกล้เคียงกับสแตนเลส AISI 201 ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนอย่างเดียว โดยที่สแตนเลสที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยิ่งยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ แล้วนำไปอบอ่อน มีค่ามากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการคิดเป็น 39 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับ

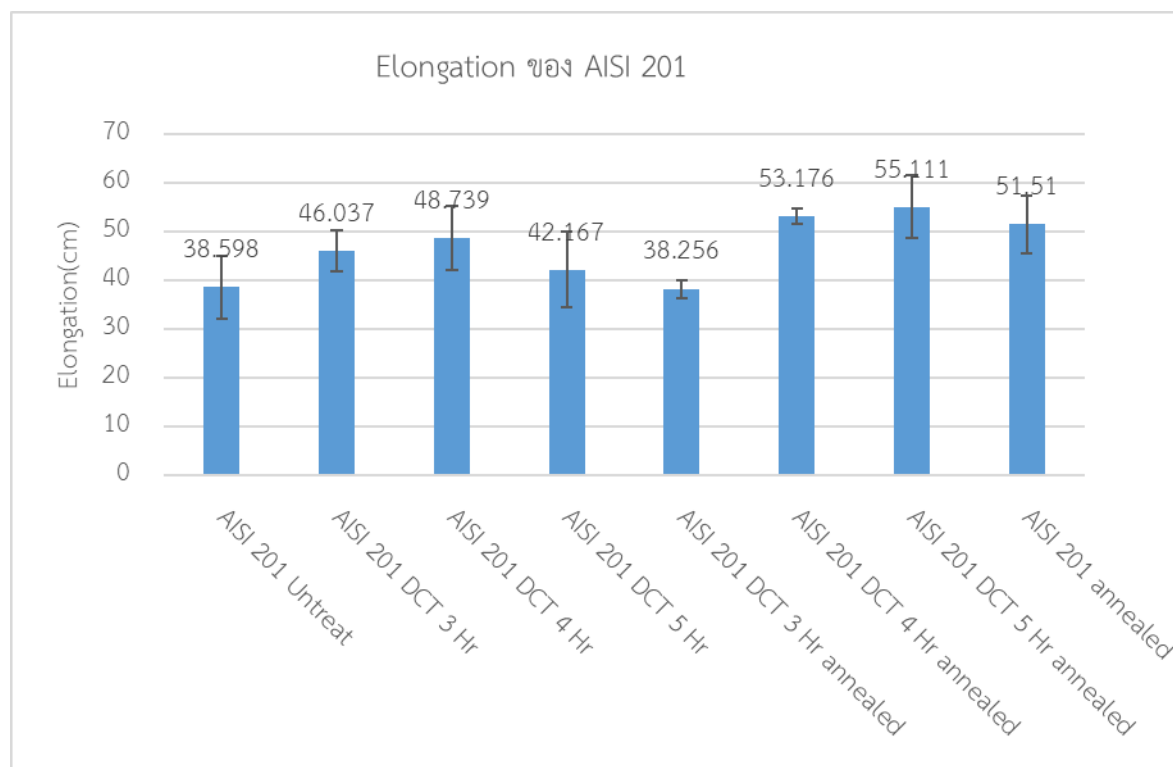
ตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการ และสแตนเลส AISI 201 ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนอย่าง เดียว มีค่ามากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการคิดเป็น 33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่างกัน 5 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า สแตนเลส AISI 201 เมื่อนำไปอบอ่อนแล้วก็สามารถแทนที่สแตนเลสที่ผ่าน กระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ได้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า Ultimate stress ของสแตนเลส AISI 201 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

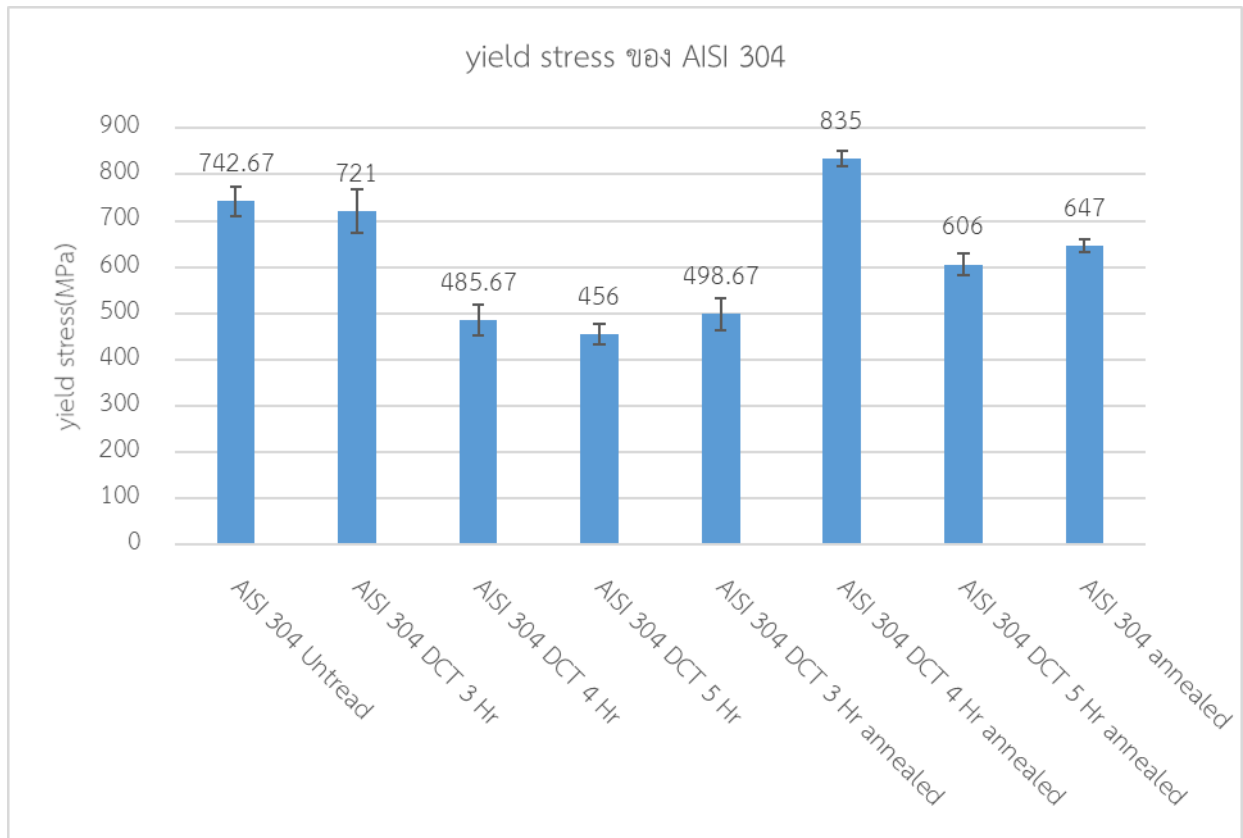
จากรูปที่ 4.3 ค่าของ Yield stress ในช่วงที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 5 ชั่วโมง เป็นจำนวน 2 รอบ ค่าของ Ultimate stress ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่าน กระบวนการ (Untreat) คล้ายกับค่าของ Yield stress ของสแตนเลส AISI 201 และค่าของ Ultimate stress ของสแตนเลส AISI 201 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 5 ชั่วโมง เป็นจำนวน 2 รอบ และ นำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าของ Ultimate stress เพิ่มขึ้น โดย ตัวอย่างการทดลองที่มีค่าของ Ultimate stress เพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ สแตนเลส AISI 201 ที่ผ่าน กระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง

จำนวน 2 รอบ และนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าของ Ultimate stress มากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการคิดเป็น 17 เปอร์เซ็นต์ และตัวอย่างการทดลองที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าของ Ultimate stress มากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการคิดเป็น 14 เปอร์เซ็นต์



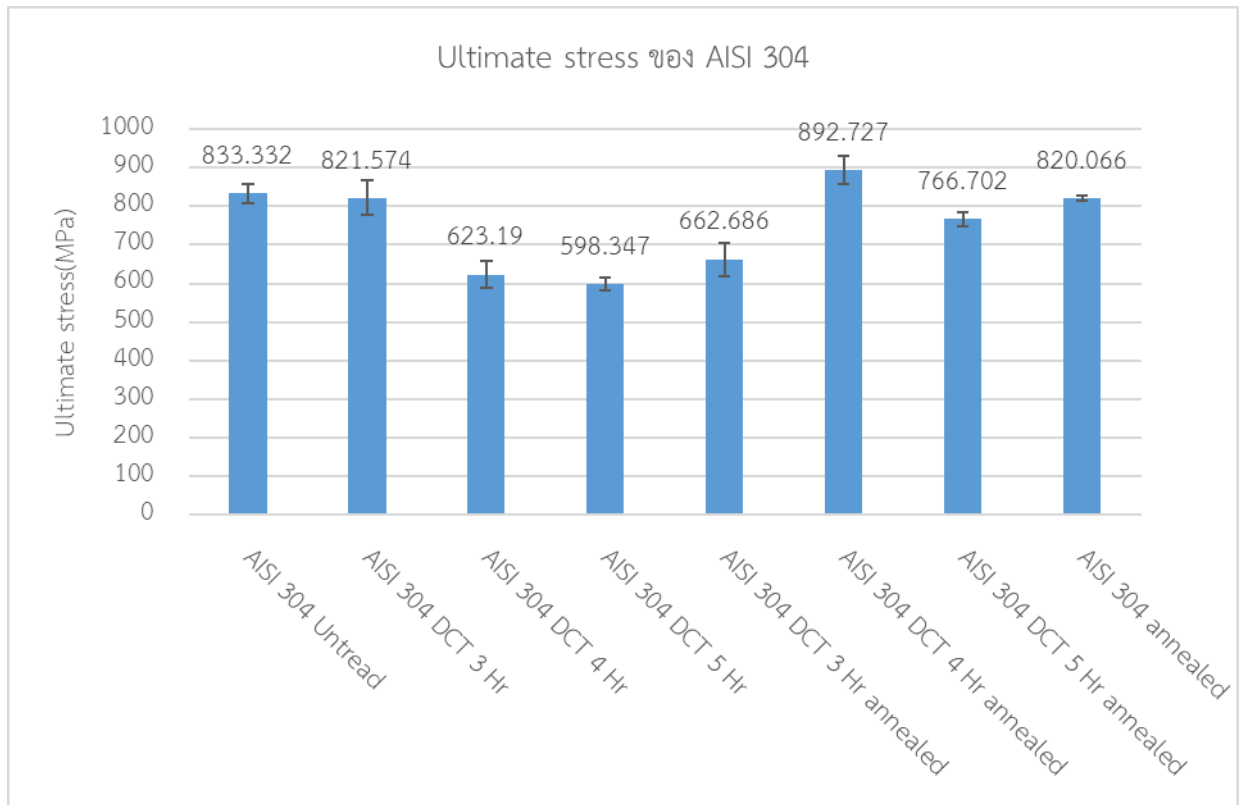
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของ AISI 201 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.4 ค่าของ Elongation มีค่าแปรผันมาก โดยที่ในแต่ละตัวอย่างการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างการทดลองที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) แต่ค่าที่มากที่สุดในตัวอย่างการทดลองคือที่ สแตนเลส AISI 201 ที่กระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ และนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าของ Elongation มากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง และไม่นำไปอบอ่อน คิดเป็น 42 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่ต่างจากสแตนเลส AISI 201 ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง และนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เมื่อเทียบกับสแตนเลสที่ไม่ผ่านกระบวนการค่าของ Elongation เพิ่มขึ้นคิดเป็น 33 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดลองคล้ายกับการทดลองของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]



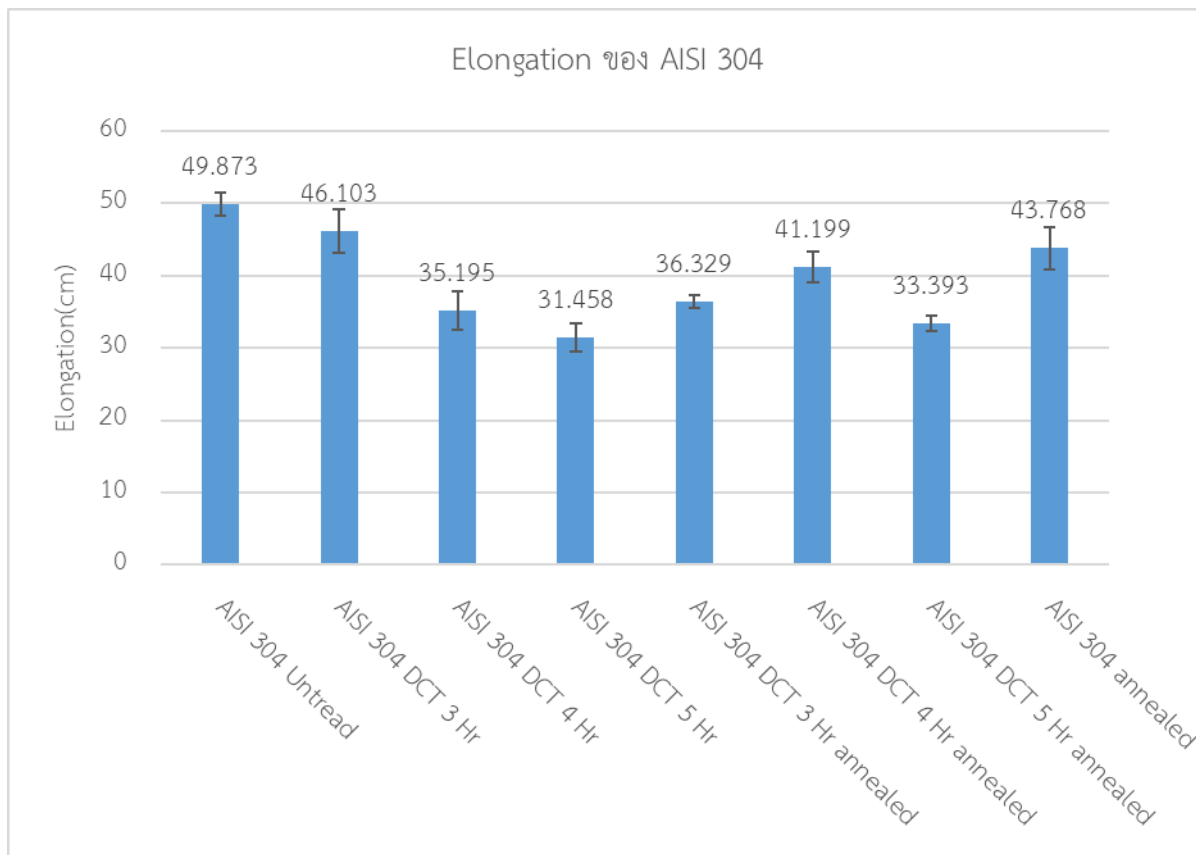
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าของ Yield stress ของ AISI 304 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.5 มีค่า Yield stress ที่แตกต่างกันชัดเจน โดยที่ค่า Yield stress ที่มีค่ามากที่สุด อยู่ที่ สแตนเลส AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะ 4 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ และนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่า Yield stress มากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) คิดเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่า สแตนเลส AISI 304 ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) แต่นำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง คิดเป็น 29 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตัวอย่างการทดลองของ สแตนเลส AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ มีค่าของ Yield stress น้อยกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่งอย่างคิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ซึ่งผลการทดลองคล้ายกับการทดลองของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]



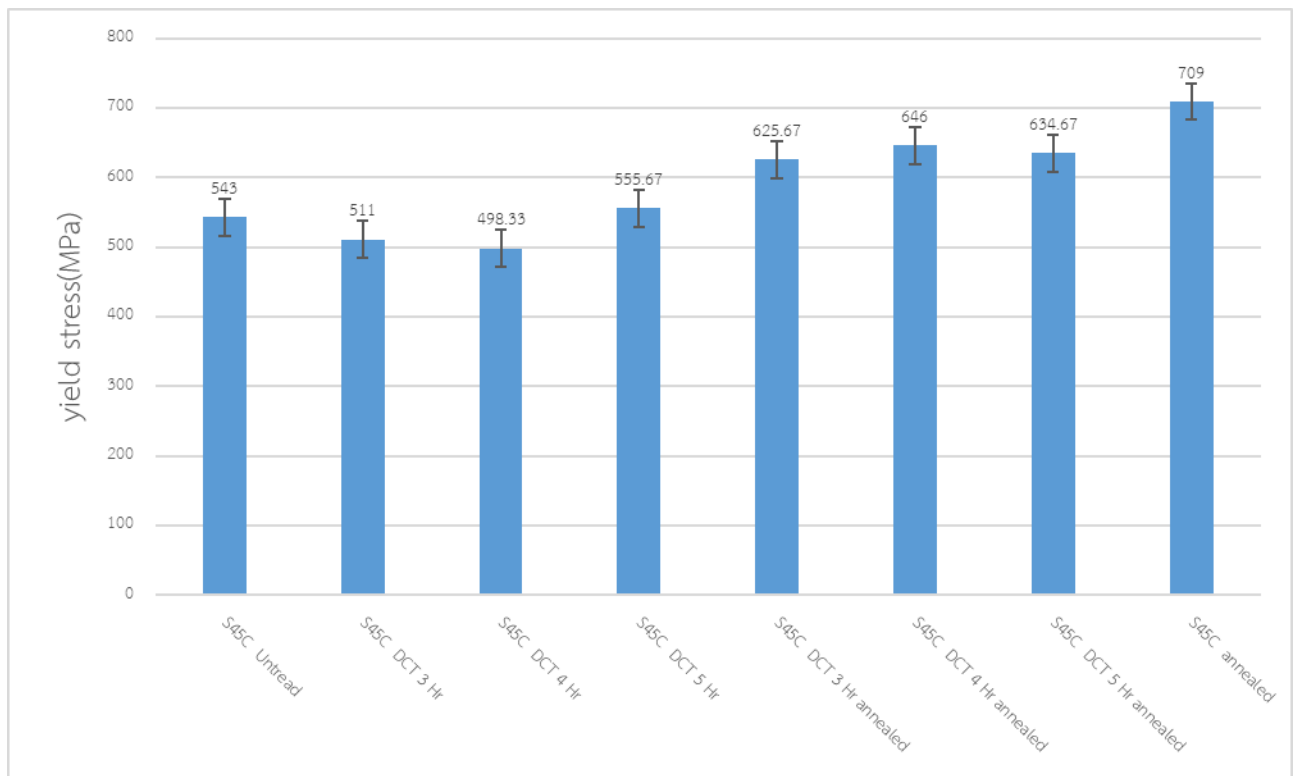
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าของ Ultimate stress ของสแตนเลส AISI 304 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.6 ค่าของ Ultimate stress มีลักษณะคล้ายกับค่าของ Yield stress แตกต่างกันในช่วงที่มีการอบอ่อน ซึ่งค่าของ Ultimate stress ที่มีค่ามากที่สุด คือ สแตนเลส AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเย็ดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ และนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเย็ดยิ่ง คิดเป็น 7 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเย็ดยิ่ง แต่นำไปอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง คิดเป็น 9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเย็ดยิ่ง และตัวอย่างการทดลองที่มีค่าของ Ultimate stress ที่น้อยที่สุดคือ สแตนเลส AISI 304 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเย็ดยิ่งเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ ซึ่งมีค่าของ Ultimate stress น้อยกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเย็ดยิ่งคิดเป็น 28 เปอร์เซ็นต์



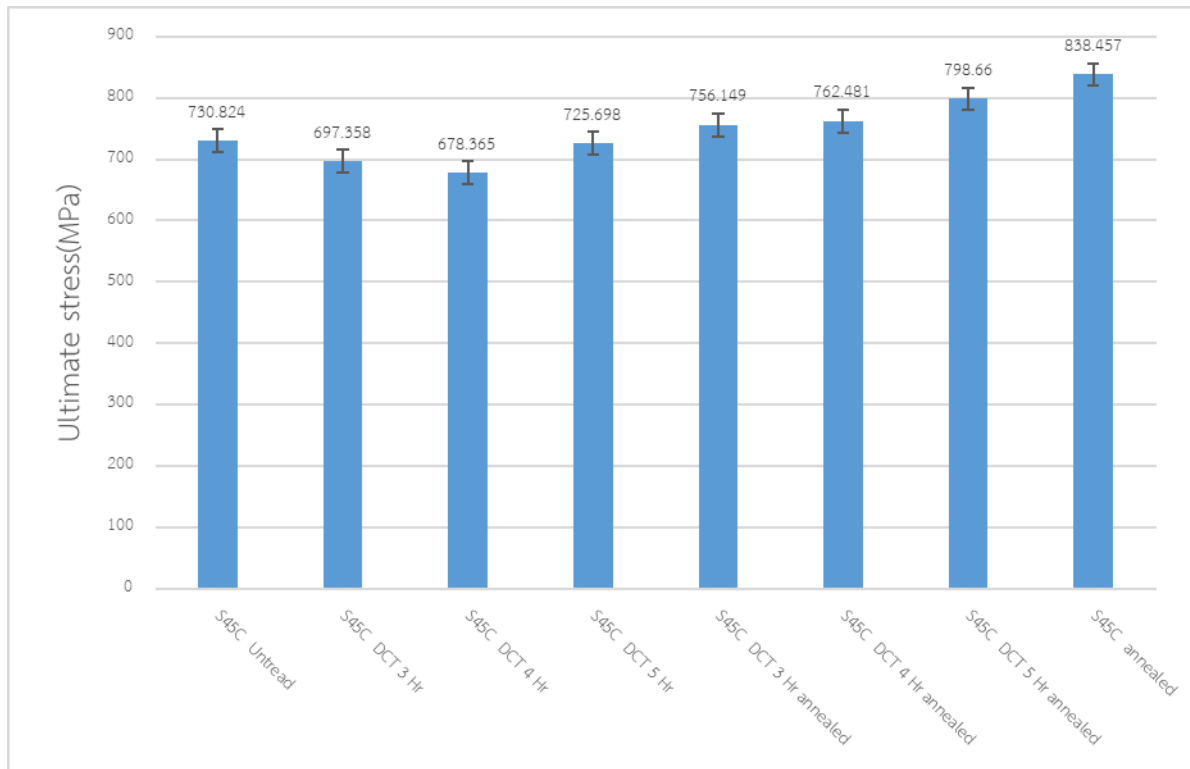
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของสแตนเลส AISI 304 ตามเงื่อนไขต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 ค่าของ Elongation จากตัวอย่างการทดลองมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยิ่งยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และ อบอ่อน หมายความว่า สแตนเลส AISI 304 มีค่าของ Elongation ที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งผลการทดลองคล้ายกับการทดลองของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]



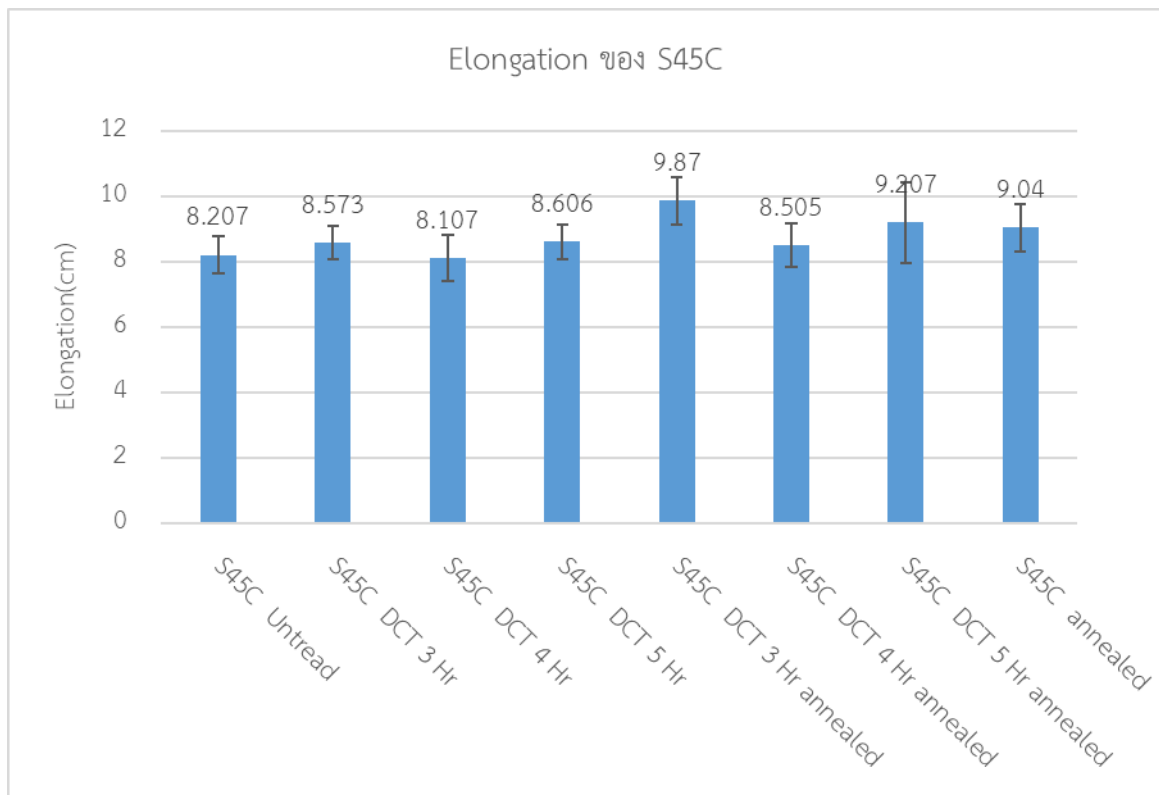
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าของ Yield stress ของเหล็ก S45C ตามเงื่อนไขต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 ค่าของ Yield stress จากตัวอย่างการทดลองทั้งหมดเหล็ก S45C ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่ามากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 19 เปอร์เซ็นต์ และเหล็ก S45C ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) แต่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เหล็ก S45C มีค่าของ Yield stress ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และ อบอ่อนด้วย ไม่ดีมากเมื่อเทียบกับการอบอ่อนเพียงอย่างเดียว



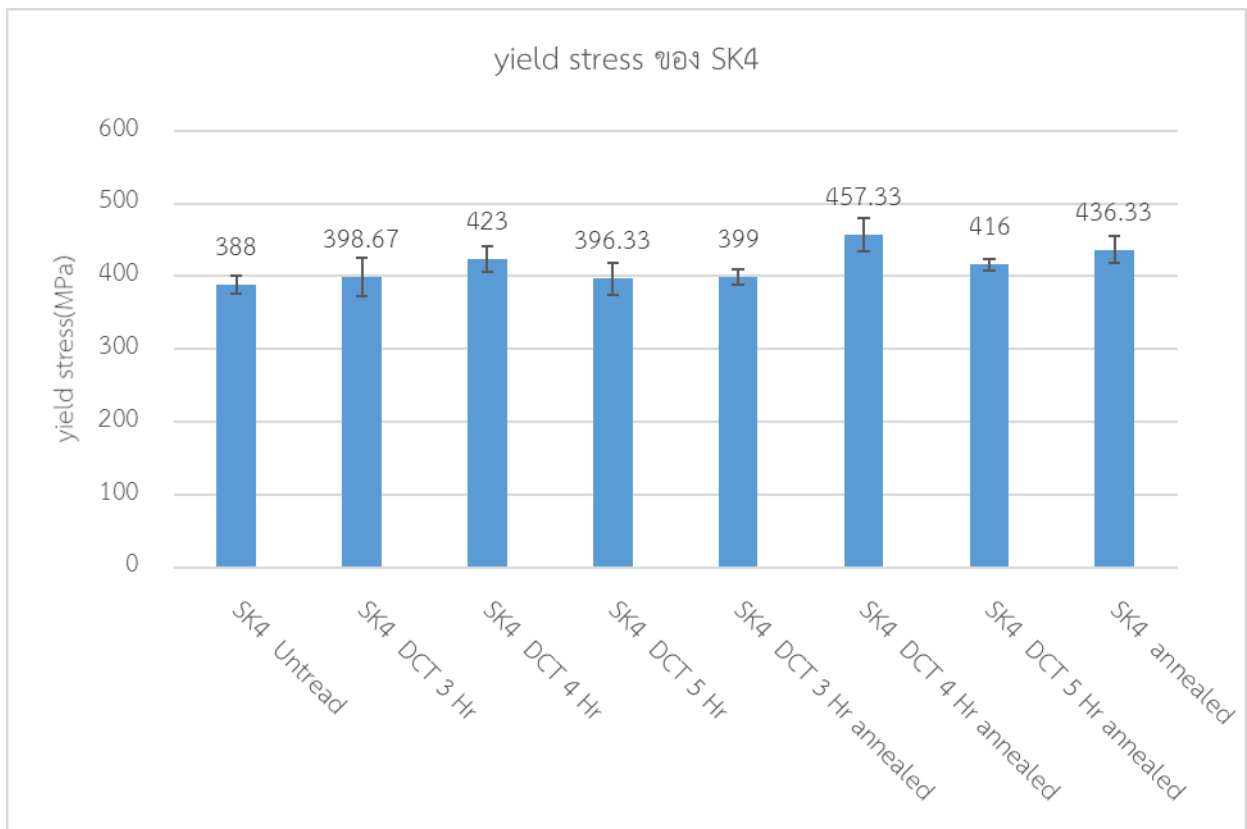
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าของ Ultimate stress ของ S45C ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 ค่าของ Ultimate stress จากตัวอย่างการทดลองของเหล็ก S45C ที่มีค่าของ Ultimate stress มากที่สุดคือเหล็ก S45C ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับ ตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตัวอย่างการทดลองที่ผ่านแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่มีค่ามากที่สุดคือ เหล็ก S45C ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง 2 รอบ และ อบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 9 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เหล็ก S45C มีค่าของ Ultimate stress ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และ อบอ่อนด้วย ไม่ดีมากเมื่อเทียบกับการอบอ่อนเพียงอย่างเดียว



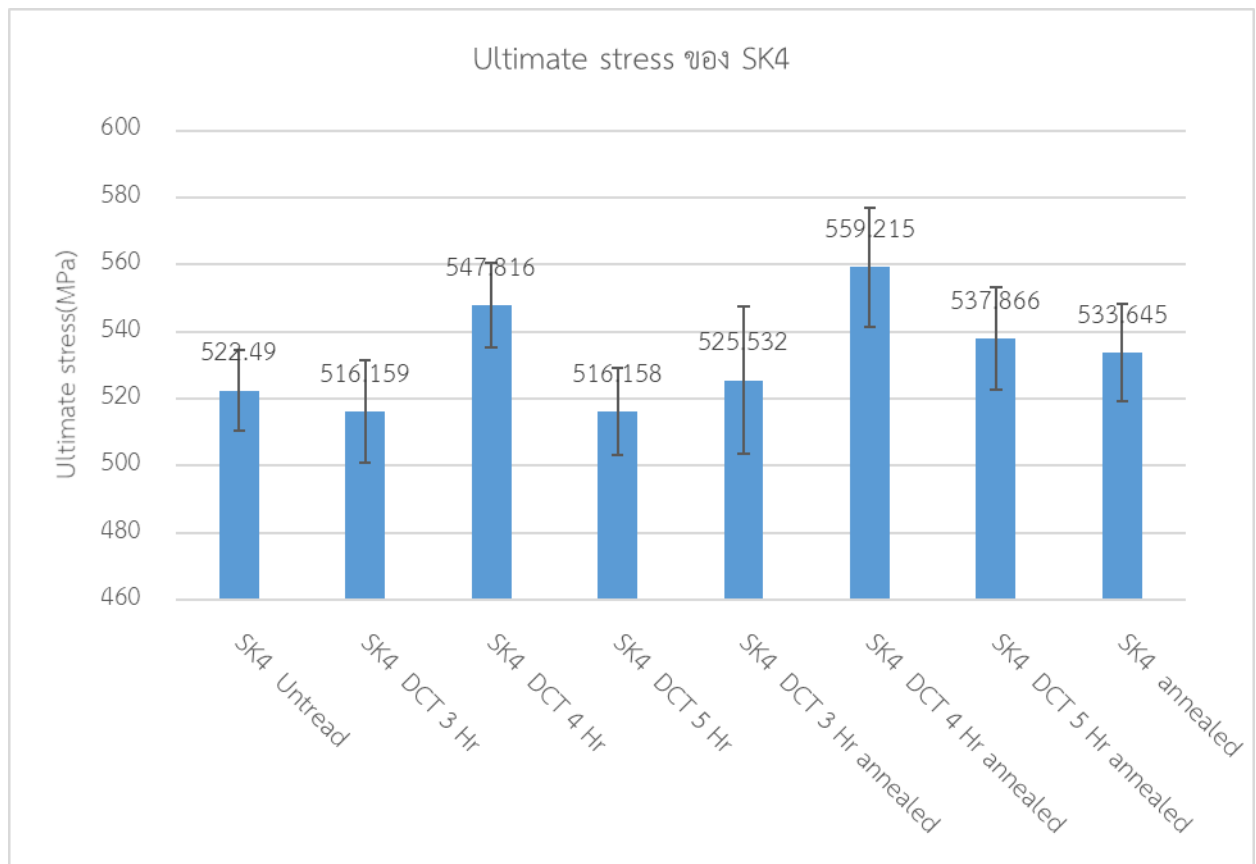
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของเหล็ก S45C ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.10 ค่าของ Elongation จากตัวอย่างการทดลองของเหล็ก S45C ที่มีค่ามากที่สุดคือเหล็ก S45C ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เหล็ก S45C จะมีค่าของ Elongation มากขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และอบอ่อนที่เหมาะสมซึ่งผลการทดลองคล้ายกับการทดลองของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]



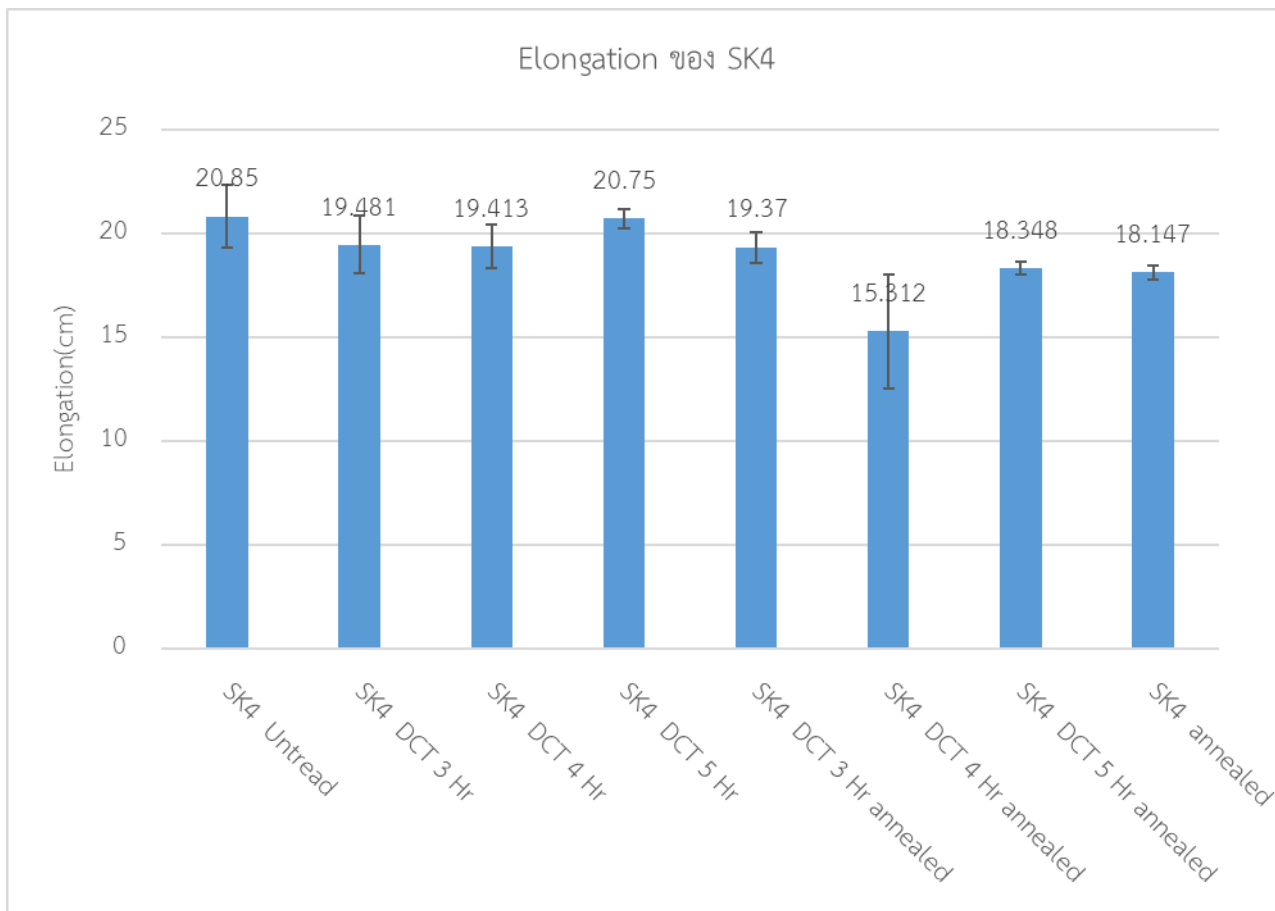
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าของ Yield stress ของเหล็ก SK4 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.11 ค่าของ Yield stress จากตัวอย่างการทดลองทั้งหมดเหล็ก SK4 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่ามากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 17 เปอร์เซ็นต์ และเหล็ก SK4 ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) แต่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่ามากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เหล็ก SK4 มีค่าของ Yield stress ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และ อบอ่อนด้วย ไม่ดีมากเมื่อเทียบกับการอบอ่อนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าของ Ultimate stress ของ SK4 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

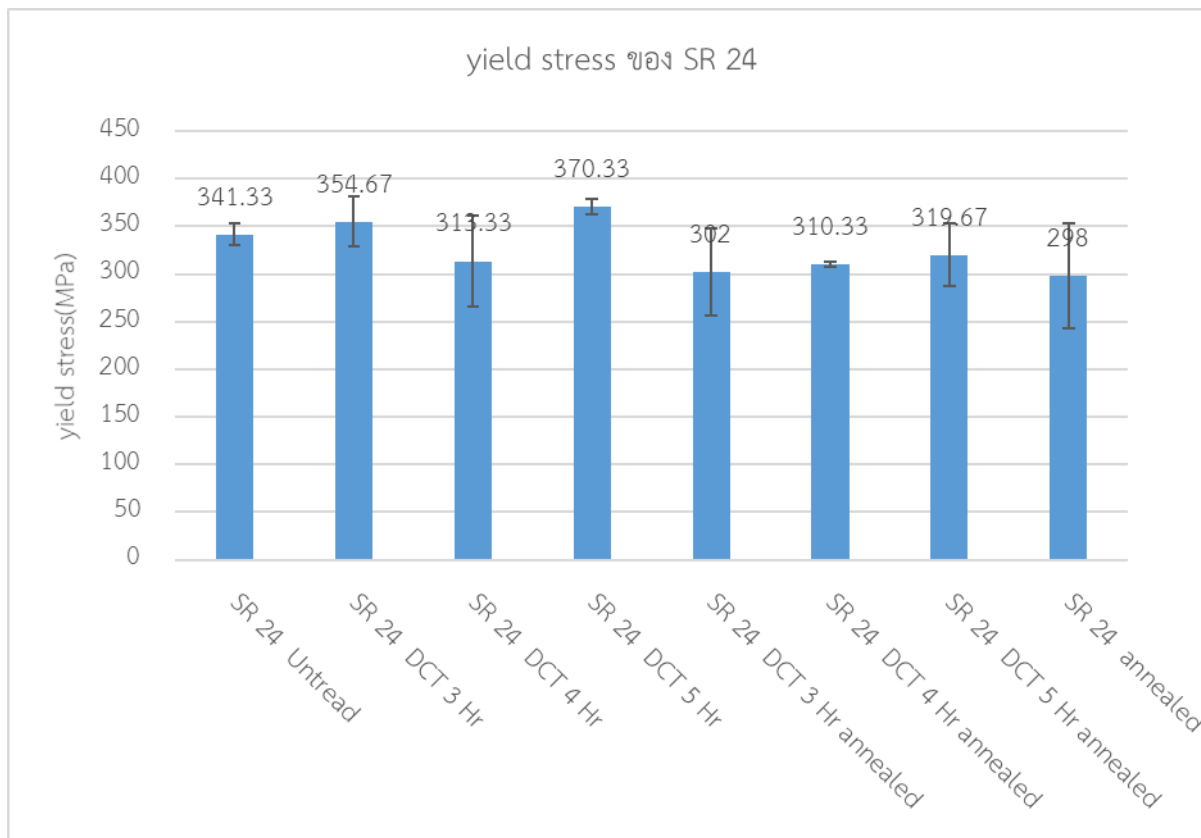
จากรูปที่ 4.12 ค่าของ Ultimate stress จากตัวอย่างการทดลองของเหล็ก SK4 ที่มีค่าของ Ultimate stress มากที่สุดคือเหล็ก SK4 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเยือกยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) 4 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเยือกยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 7 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากค่าของ Ultimate stress ของเหล็ก SK4 มีค่าต่างกันไม่มากทำให้การนำเหล็ก SK4 ไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของ Ultimate stress เนื่องจากเหล็ก SK4 มีค่าคาร์บอนที่สูงอยู่แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า Ultimate stress ได้ยากดังรูปที่ แสดงให้เห็น



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของเหล็ก SK4 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

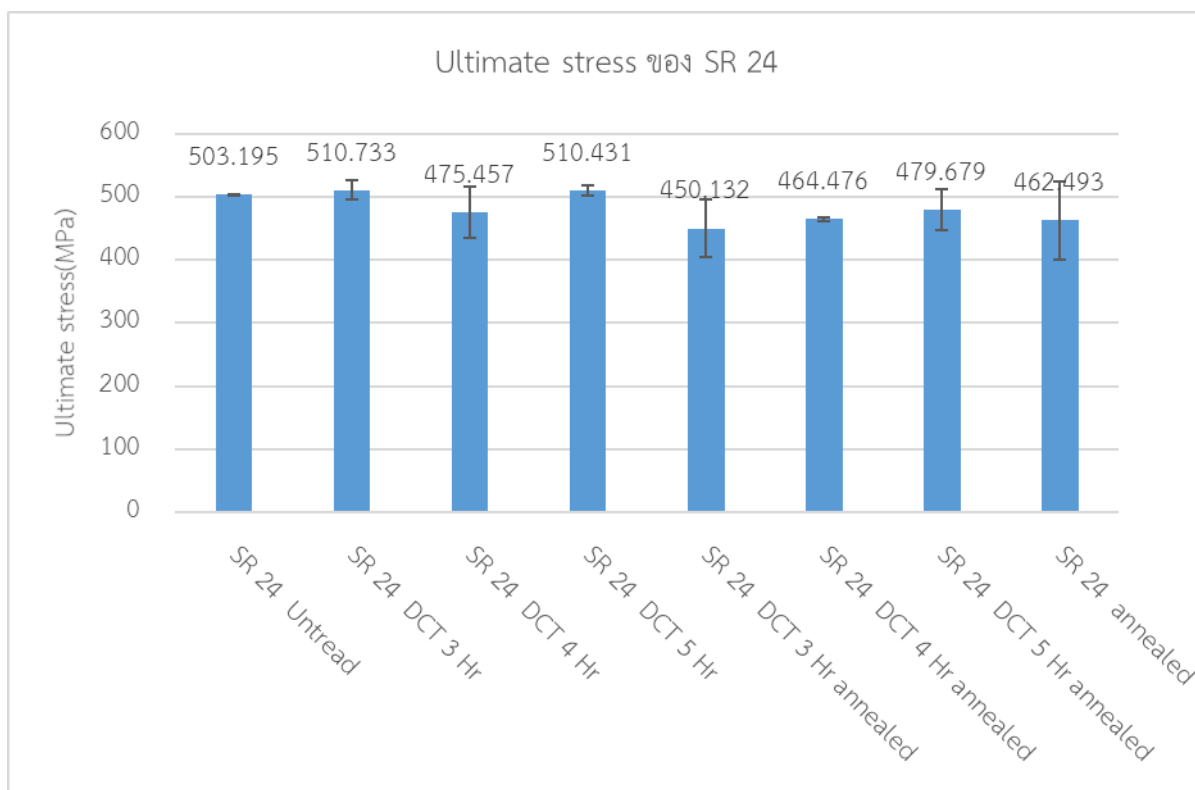
จากรูป 4.13 ค่าของ Elongation จากตัวอย่างการทดลองของเหล็ก SK4 ไม่มีตัวอย่างการทดลองที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และอบอ่อน ที่มีค่า Elongation มากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน แต่เมื่อนำเหล็ก SK4 ไปผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน ค่าของ Elongation มีค่าน้อยลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อนำเหล็ก SK4 ไปผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และอบอ่อน ค่าของ Elongation มีค่าน้อยลงมากกว่า ตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน อย่างเห็นได้ชัด จากตัวอย่างการทดลองของเหล็ก SK4 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) 4 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าของ Elongation น้อยกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่

สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 26 เปอร์เซ็นต์ซึ่งผลการทดลองคล้ายกับการทดลองของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) [2]



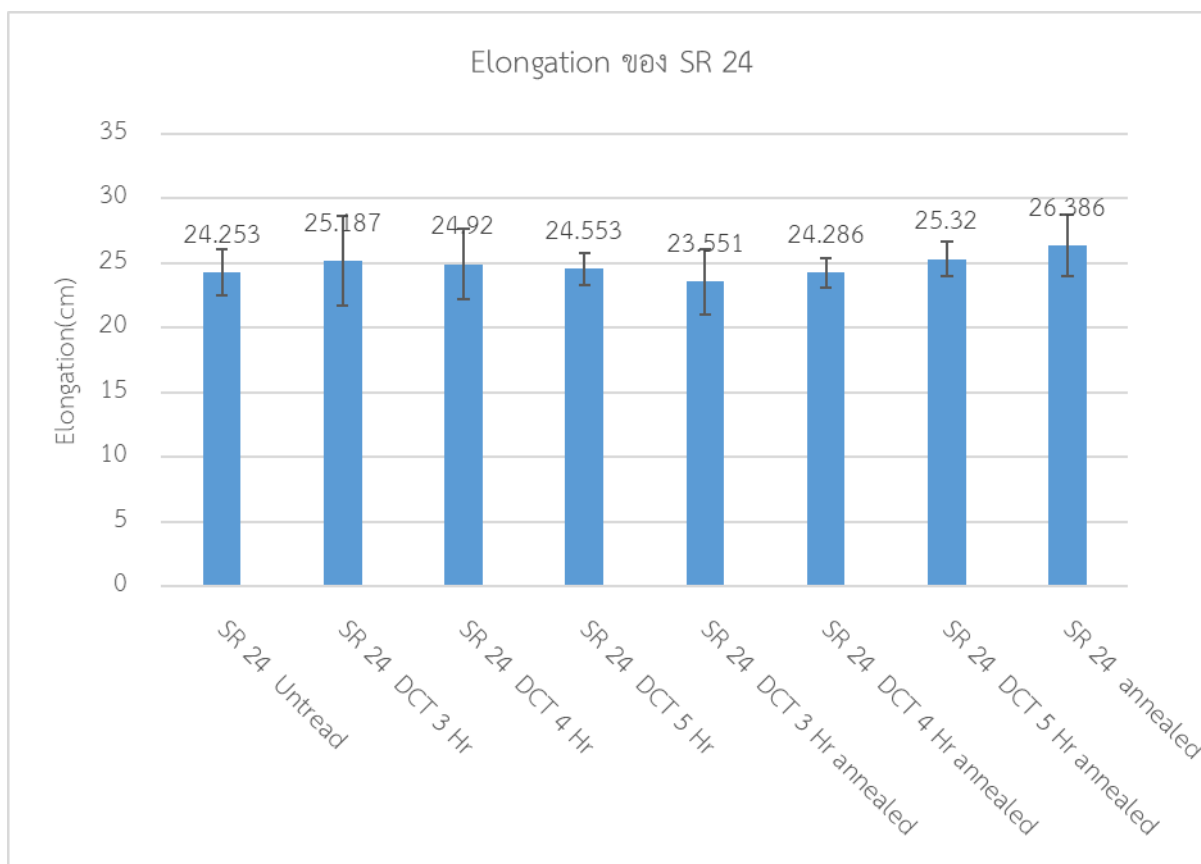
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าของ Yield stress ของเหล็ก SR 24 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.14 ค่าของ Yield stress จากตัวอย่างการทดลองทั้งหมดเหล็ก SR 24 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง 2 รอบ และไม่อบอ่อนที่มีค่ามากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 8 เปอร์เซ็นต์ และเหล็ก SR 24 ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) แต่อบอ่อนที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 13 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เหล็ก SR 24 มีค่าของ Yield stress ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน มีค่าของ Yield stress ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย



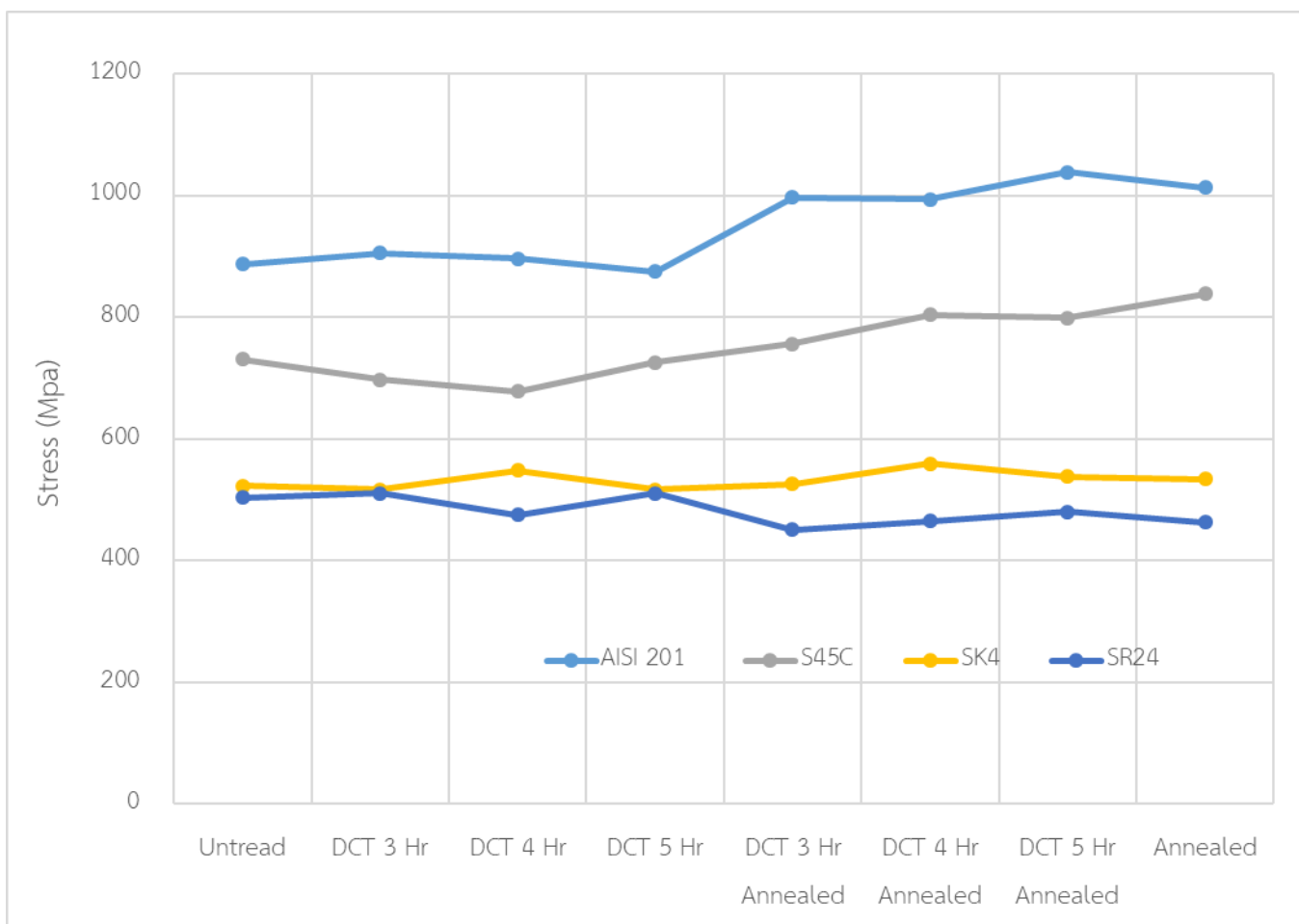
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าของ Ultimate stress ของ SR 24 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.15 ค่าของ Ultimate stress จากตัวอย่างการทดลองของเหล็ก SR 24 ที่มีค่าของ Ultimate stress มากที่สุดคือเหล็ก SR 24 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเยือกยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) 4 ชั่วโมง 2 รอบ และไม่อบอ่อน เมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สภาวะเย็นเยือกยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน คิดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากค่าของ Ultimate stress ของเหล็ก SR 24 มีค่าต่างกันไม่มากทำให้การนำเหล็ก SK4 ไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของ Ultimate stress เนื่องจากเหล็ก SR 24 มีค่าคาร์บอนที่ต่ำอยู่แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า Ultimate stress ได้ยากดังรูปที่ แสดงให้เห็น



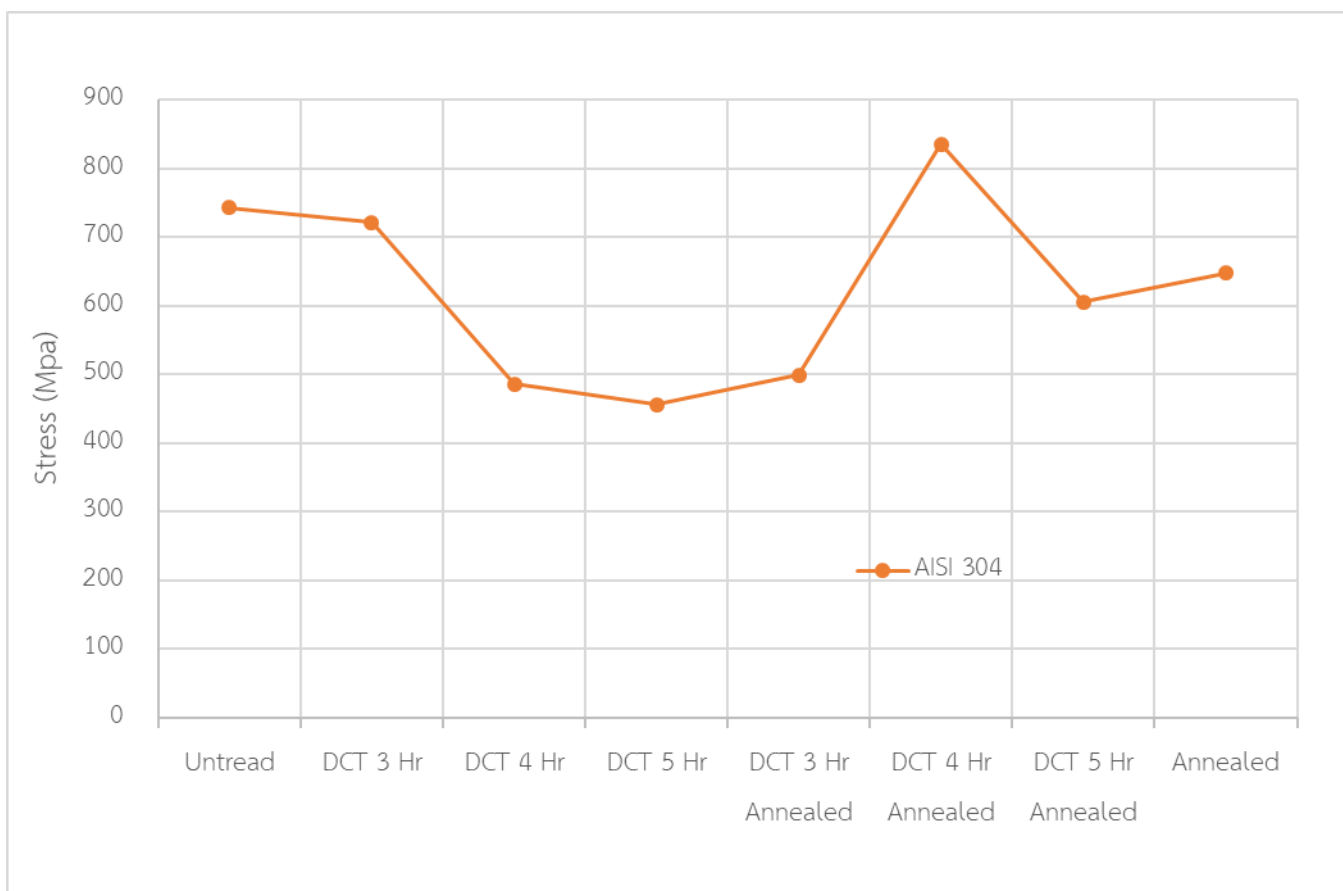
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าของ Elongation ของเหล็ก SR 24 ตามเงื่อนไขต่าง ๆ

จากรูป 4.16 ค่าของ Elongation จากตัวอย่างการทดลองของเหล็ก SR 24 ที่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และอบอ่อน ที่มีค่า Elongation มากกว่าตัวอย่างการทดลองที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อนไม่มาก แต่เมื่อนำเหล็ก SR 24 ไปผ่านกระบวนการอบอ่อนเพียงอย่างเดียวมีค่าของ Elongation มากกว่า ตัวอย่างเหล็ก SR 24 ที่ไม่ผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และไม่อบอ่อน ดังนั้นการนำเหล็ก SR 24 ไปผ่านกระบวนการแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่ง (Deep Cryogenic Treatment : DCT) และอบอ่อน เพิ่ม ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าของ Elongation มากนัก



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงลักษณะการเพิ่มขึ้น-ลดลงของ Yield Stress

จากรูปที่ 4.17 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าเหล็กที่มีปริมาณ คาร์บอน สูง(SK4),กลาง(S45C),ต่ำ (SR24) และเหล็กกล้าผสม(AISI 201)บางชนิด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ yield Stress มากนัก กล่าวคือการนำเหล็กที่มีคุณสมบัติตามเหล็กทั้ง 4 ชนิด ไปทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ Cryogenic Treatment นั้น ไม่ทำให้คุณสมบัติทางกลหรือค่า Yield Stress มีการเปลี่ยนแปลงได้[28]

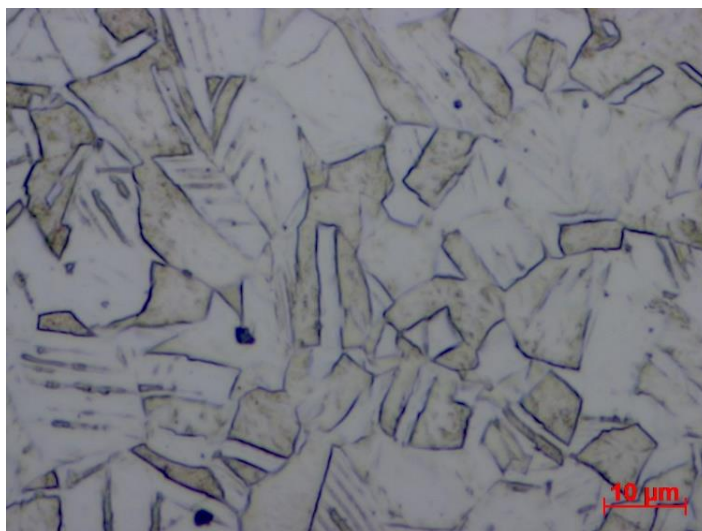


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงลักษณะการเพิ่มขึ้น-ลดลงของ Yield Stress ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

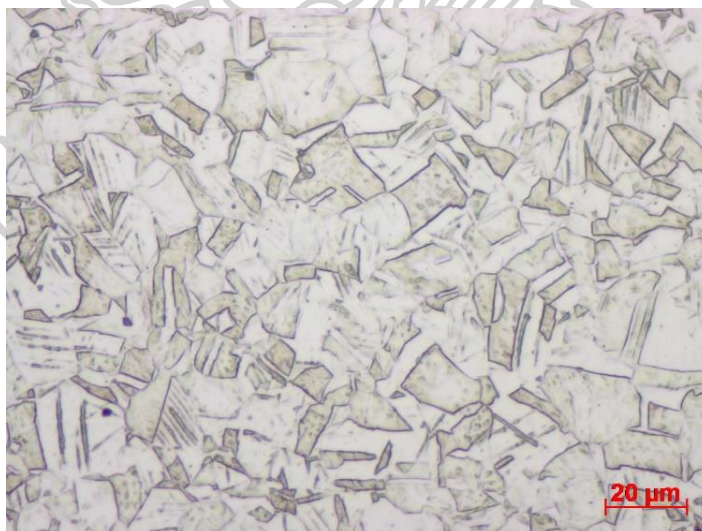
จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 การปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการ Cryogenic Treatment ของเหล็กหลายชนิด ทำให้ทราบได้ว่ายังมีเหล็กบางชนิด เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลหรือค่า Yield Stress อยู่บ้าง ทำให้ยังเกิดข้อสงสัยเกี่ยวกับงานวิจัยที่ใช้กระบวนการ Cryogenic Treatment ว่าหากสามารถหาระยะเวลาที่พอเหมาะของเหล็กแต่ละชนิดที่จะนำไปผ่านกระบวนการ Cryogenic Treatment ได้ จะสามารถทำให้เหล็กมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นได้หรือไม่[5]

4.3 โครงสร้างของเหล็กที่มีค่า Yield stress เปลี่ยนแปลง

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304



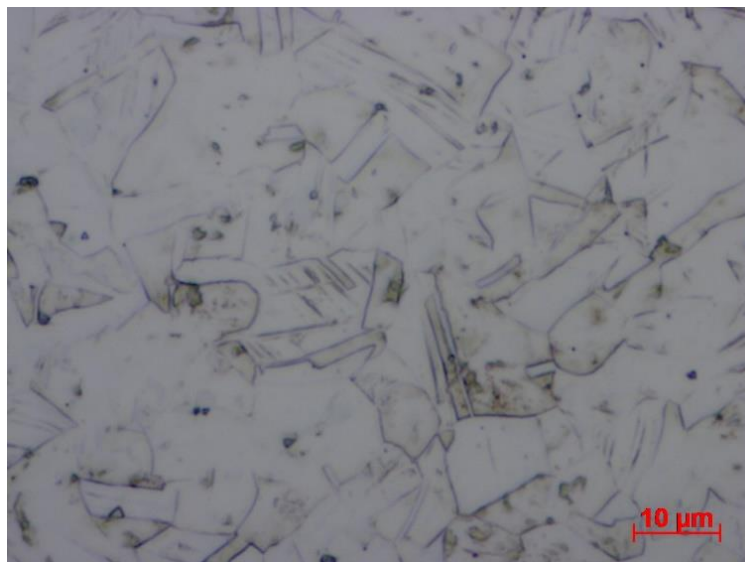
รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



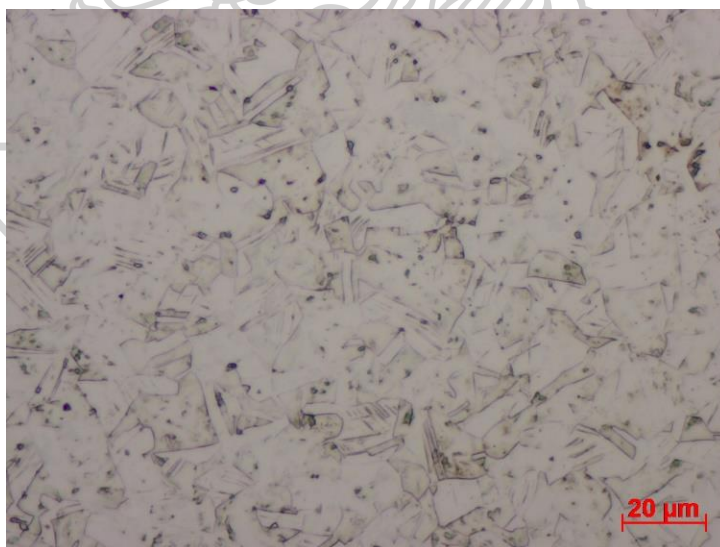
รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 เป็นโครงสร้างแบบ ออสเทนไนท์ (Austenite)

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 DCT 4 Hr Annealed



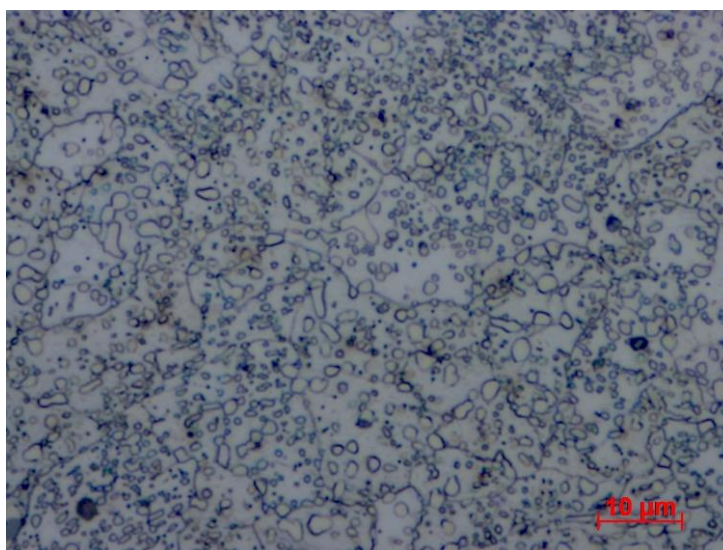
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 DCT 4 Hr Annealed ที่กำลังขยาย



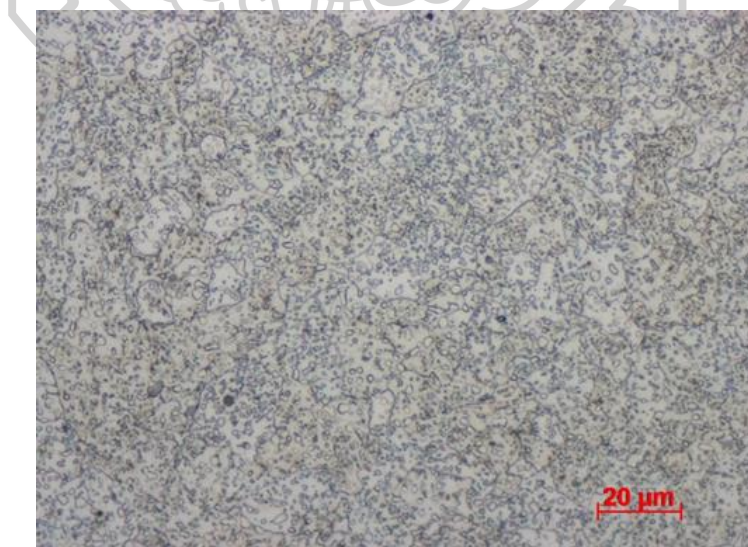
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 DCT 4 Hr Annealed ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงาน AISI 304 DCT 4 Hr Annealed เป็นโครงสร้างแบบ ออสเทนไนท์ (Austenite) และน่าจะมีโครเมียมคาร์ไบด์ (Chromium Carbide Precipitated) กระจายตัวแบบอิสระ (Random)

4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4



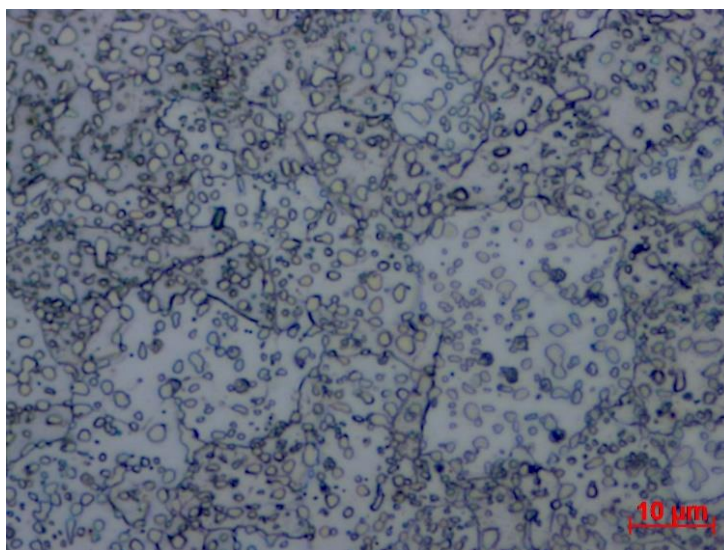
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



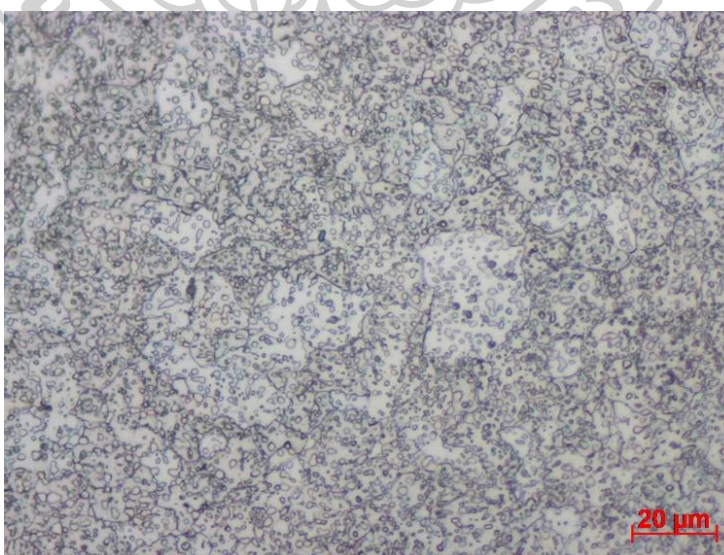
รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 คาร์ไบต์เม็ดกลมขนาดเล็ก (Spheroidal carbide, Fe_3C) กระจายตัว บางบริเวณกระจายเป็นกลุ่มและอนุภาคอัลลอยด์คาร์ไบด์ (Alloy carbide particle M_xC_y) กระจายตัวบนพื้นเฟอร์ไรท์

4.3.4 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 3 Hr



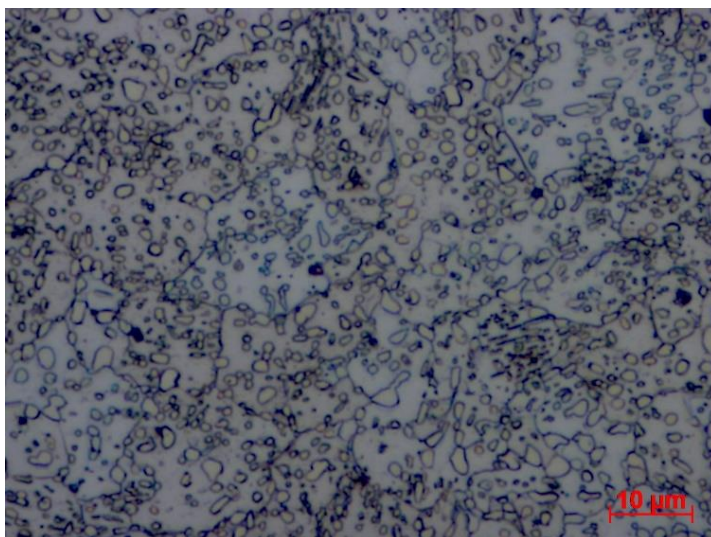
รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 3 Hr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



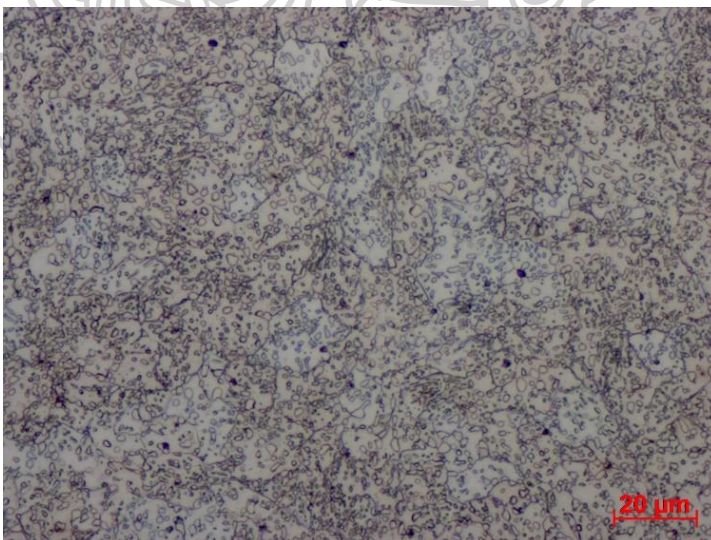
รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 3 Hr ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 คาร์ไบต์เม็ดกลมขนาดเล็ก (Spheroidal carbide, Fe_3C) กระจายตัว และอนุภาคอัลลอยด์คาร์ไบด์ (Alloy carbide particle M_xC_y) กระจายตัวบนพื้นเฟอร์ไรท์

4.3.5 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 4 Hr



รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 4 Hr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงาน SK4 DCT 4 Hr ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 คาร์ไบต์เม็ดกลมขนาดเล็ก (Spheroidal carbide, Fe_3C) กระจายตัว และอนุภาคอัลลอยด์คาร์ไบด์ (Alloy carbide particle M_xC_y) กระจายตัวบนพื้นเฟอร์ไรท์

4.4 ผลการทดลองค่า Yield stress กับการอบอ่อน

จากรูปที่ 4.2 การทดลองผลของ Yield stress ของเหล็ก AISI 201 จากการทดลองในเงื่อนไขที่แช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ มีความแตกต่างกันอย่างมากเมื่อเทียบกับเหล็ก AISI 201 ที่แช่ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง 2 รอบ และนำไปอบอ่อน โดยเมื่อนำเหล็กที่ผ่านการแช่ไปอบอ่อนหลักจากที่ผ่านกระบวนการแช่เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง จำนวน 2 รอบ มีค่าของ Yield stress มากกว่ากระบวนการแช่อย่างเดียวก่อนหน้านี้ อาจเกิดขึ้นมาจากกระบวนการระหว่างการอบอ่อนที่ทำให้ เกรนของเหล็กเกิดการคลายตัวและเกิดการจัดเรียงของเกรนมาแทนไซต์ใหม่จนทำให้มีค่าของ Yield stress มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ในการทดลองที่เงื่อนไขแช่ในไนโตรเจนเหลวที่ 3 ชั่วโมง 2 รอบ เมื่อนำไปเทียบกับเงื่อนไขแช่ในไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนด้วย เงื่อนไขที่มีการอบอ่อนด้วยก็มีค่าของ Yield stress ที่มากขึ้นด้วยเช่นเดียวกับเงื่อนไขก่อนหน้านี้ ดังนั้นจากผลการทดลองในรูปที่ อาจสรุปได้ว่า การนำเหล็กไปอบอ่อนหลังจากที่แช่ในไนโตรเจนเหลวอาจมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการจัดเรียงเกรนในมาแทนไซต์ใหม่ทำให้มีค่าของ Yield stress เพิ่มขึ้นตามไปด้วย [27]

จากรูปที่ 4.5 การทดลองของ Yield stress ของเหล็ก AISI 304 มีบางเงื่อนไขที่ปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็ก AISI 304 ทำให้ค่าของ Yield stress สามารถเพิ่มขึ้นได้ จากการทดลองสามารถสังเกตได้จากเงื่อนไขที่มีการแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง 2 รอบ เมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่แช่ในไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนด้วยมีค่าของ Yield stress ที่มากกว่าเหล็ก AISI 304 ที่แช่ในไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 รอบ ดังนั้นจากผลการทดลองในรูปที่ อาจสรุปได้ว่า การนำเหล็กไปอบอ่อนหลังจากที่แช่ในไนโตรเจนเหลวอาจมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการจัดเรียงเกรนในมาแทนไซต์ใหม่ทำให้มีค่าของ Yield stress เพิ่มขึ้นตามไปด้วย[27]

จากรูปที่ 4.8 การทดลองของ Yield stress ของเหล็ก S45C มีบางเงื่อนไขที่ปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็ก S45C ทำให้ค่าของ Yield stress สามารถเพิ่มขึ้นได้ จากการทดลองสามารถสังเกตได้จากเงื่อนไขที่มีการแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง 2 รอบ เมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่แช่ในไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนด้วยมีค่าของ Yield stress ที่มากกว่าเหล็ก AISI 304 ที่แช่ในไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 รอบ ดังนั้นจากผลการทดลองในรูปที่

4.8 อาจสรุปได้ว่า การนำเหล็กไปอบอ่อนหลังจากที่แช่ในไนโตรเจนเหลวอาจมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการจัดเรียงเกรนในมาเทนไซต์ใหม่ทำให้มีค่าของ Yield stress เพิ่มขึ้นตามไปด้วย[27]

จากรูปที่ 4.11 การทดลองของ Yield stress ของเหล็ก SK4 มีบางเงื่อนไขที่ปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็ก SK4 ทำให้ค่าของ Yield stress สามารถเพิ่มขึ้นได้แต่ไม่มากเท่าเหล็ก AISI 201 เหล็ก AISI 304 และเหล็ก S45c จากการทดลองสามารถสังเกตได้จากเงื่อนไขที่มีการแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง 2 รอบ เมื่อเทียบกับตัวอย่างการทดลองที่แช่ในไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 รอบ และอบอ่อนด้วยมีค่าของ Yield stress ที่มากกว่าเหล็ก SK4 ที่แช่ในไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 รอบ ดังนั้นจากผลการทดลองในรูปที่ อาจสรุปได้ว่า การนำเหล็กไปอบอ่อนหลังจากที่แช่ในไนโตรเจนเหลวอาจมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีการจัดเรียงเกรนในมาเทนไซต์ใหม่ทำให้มีค่าของ Yield stress เพิ่มขึ้นตามไปด้วย[27]



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการทดสอบทางกายภาพทำให้เราทราบได้ว่าระยะเวลาในการทำ Deep Cryogenic Treatment (DCT) นั้นมีผลต่อกายภาพของเหล็กทั้ง 5 ชนิดที่ต่างกัน ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) ซึ่งในการทดลองนั้นก็มีความของ yield stress ที่แตกต่างกันไปตามระยะเวลาในการทำ Deep Cryogenic Treatment (DCT) ซึ่งผลการทดลองที่มีผลคล้ายตามกับการทดลองของ Xiao Liu, Chunfang Zhao, Kang Zhao(2019) ได้แก่ AISI 304 และ S45C ส่วนเหล็กอีก 3 ชนิด ได้แก่ AISI 201 SK4 และ SR24 มีผลของค่า Yield stress ไม่คงที่ทำให้สรุปผลได้ยาก แต่จากการทดลองและการสังเกตผลทางด้าน Yield stress จะไม่ดีขึ้นอย่างที่หวัง แต่ก็มีค่าอื่นที่ดีขึ้น เช่น AISI201 มีค่า Elongation ที่ดีขึ้น ทำให้สรุปได้ว่าเหล็กแต่ละชนิดอาจใช้เวลาในการทำ Deep Cryogenic Treatment (DCT) ที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าการทดสอบทางกายภาพดีขึ้น ซึ่งจากโครงสร้างจุลภาคที่ส่องและนำมาเป็นตัวอย่างในการสรุปผลก็เห็นได้ชัดว่า เหล็กมีการจัดเรียงกันของโมเลกุลใหม่จากโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนไป เช่นเดียวกับการนำเหล็กไปแปรรูปในสายการให้ความร้อนเพื่อแปรรูป ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเหล็กแต่ละชนิดควรมีการใช้ระยะเวลาในการทำ Deep Cryogenic Treatment (DCT) ให้เหมาะสมกับเหล็กแต่ละชนิด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองทำให้ทราบได้ว่าระยะเวลาในการทำ Deep Cryogenic Treatment (DCT) มีผลกับเหล็กแต่ละชนิดไม่เหมือนกันและจากการทดลองก็มีช่องว่างหลายจุดดังนั้นจึงสรุปข้อเสนอแนะไว้ดังนี้

- การทดลองมีตัวแปรที่ต้องควบคุมมากเกินไปทำให้ผลออกมาสามารถสรุปได้เป็นแบบกว้าง ๆ
- จากการทดลองเป็นการใช้เพียงการแช่โดยตรง กล่าวคือตัวของเหล็กสัมผัสกับสาร Cryogen (Nitrogen (N₂)) โดยตรง หากทดสอบโดยการไม่สัมผัสกับสาร Cryogen อาจให้ผลที่ต่างกัน
- จากการนำเหล็กไปผ่านกระบวนการส่องด้วยกล้องเพื่อดูโครงสร้างจุลภาคก็ไม่ได้ให้ผลชัดเจนกับการทดลองมากนักรู้แค่มีการเปลี่ยนแปลงทางโมเลกุลแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อยหรืออาจไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลยก็ได้สาเหตุเพราะในกระบวนการขึ้นรูปการคุมลักษณะโครงสร้างภายในไม่สามารถควบคุมได้ทำให้อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่กระบวนการผลิตก็ได้

รายการอ้างอิง

- [1] S. D, R. I, A research review on deep cryogenic treatment of steels, *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 8 (2014) 169-184.
- [2] X. Liu, C. Zhao, K. Zhao, Microstructure evolution and mechanical/physical properties of 25# valve alloys steel subjected to deep cryogenic treatment, *Vacuum*, 160 (2019) 394-401.
- [3] K.S. Niaki, S.E. Vahdat, Fatigue Scatter of 1.2542 Tool Steel after Deep Cryogenic Treatment, *Materials Today: Proceedings*, 2 (2015) 1210-1215.
- [4] M. Novelli, P. Bocher, T. Grosdidier, Effect of cryogenic temperatures and processing parameters on gradient-structure of a stainless steel treated by ultrasonic surface mechanical attrition treatment, *Materials Characterization*, 139 (2018) 197-207.
- [5] A. Çiçek, I. Uygur, T. Kıvık, N. Özbek, Machinability of AISI 316 Austenitic Stainless Steel With Cryogenically Treated M35 High-Speed Steel Twist Drills, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134 (2012) 061003-061001.
- [6] M. Pérez, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, The Use of Cryogenic Thermal Treatments to Increase the Fracture Toughness of a Hot Work Tool Steel Used to Make Forging Dies, *Procedia Materials Science*, 3 (2014) 604-609.
- [7] P. Baldissera, C. Delprete, Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2 (2008) 1-11.
- [8] B. Li, T. Zhang, S. Zhang, Deep cryogenic treatment of carbide tool and its cutting performances in hard milling of AISI H13 steel, *Procedia CIRP*, 71 (2018) 35-40.
- [9] Vengatesh.M, <REVIEW ON CRYOGENIC TREATMENT OF STEELS.pdf>, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 03 (2016) 417-422.
- [10] B. Podgornik, I. Paulin, B. Zajec, S. Jacobson, V. Leskovšek, Deep cryogenic treatment of tool steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 229 (2016) 398-406.
- [11] S. Kumar, A review: Mechanical Properties of HSS Steel by deep Cryo- Treatment, 9 (2018) 200-210.
- [12] A. Oppenkowski, S. Weber, W. Theisen, Evaluation of factors influencing deep cryogenic treatment that affect the properties of tool steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (2010) 1949-1955.

- [13] D.V.A.K. Mr. Chitrang A. Dumasia, Mr. Kunal Sonar, A Review on the Effect of Cryogenic Treatment on Metals, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 04 (-2017) 2402-2406.
- [14] T. Slatter, R. Thornton, *Cryogenic Treatment of Engineering Materials*, in, 2016.
- [15] J.D. Darwin, D. Mohan Lal, G. Nagarajan, Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18% Cr martensitic stainless steel by Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, 195 (2008) 241-247.
- [16] A. Molinari, M. Pellizzari, S. Gialanella, G. Straffelini, K.H. Stiasny, Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 118 (2001) 350-355.
- [17] Y. Arslan, I. Uygur, A. Jazdzewska, The Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure and Mechanical Response of AISI D3 Tool Steel Punches, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137 (2015).
- [18] A. Akhbarizadeh, A. Shafyei, M. Golozar, Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel, *Materials & Design*, 30 (2009) 3259-3264.
- [19] ศ. ปุ่คระภาค, เอกสารประกอบการเรียนวิชา InE191 Engineering Material, (2559).
- [20] J. Johnson, B.K. Reck, T. Wang, T.E. Graedel, The energy benefit of stainless steel recycling, *Energy Policy*, 36 (2008) 181-192.
- [21] V.G. Gavriljuk, A.I. Tyshchenko, O.N. Razumov, Y.N. Petrov, B.D. Shanina, H. Berns, Corrosion-resistant analogue of Hadfield steel, *Materials Science and Engineering: A*, 420 (2006) 47-54.
- [22] B. Jerold, P.k. M, The Influence of Cryogenic Coolants in Machining of Ti-6Al-4V, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135 (2013).
- [23] S. Arun Kumar, V.G. Yoganath, P. Krishna, Machinability of Hardened Alloy Steel using Cryogenic Machining, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2018) 8159-8167.
- [24] L. Sperling, *Introduction to Physical Polymer Science*, Fourth Edition, 2006.
- [25] V. Leskovšek, M. Kalin, J. Vizintin, Influence of deep-cryogenic treatment on wear resistance of vacuum heat-treated HSS, *Vacuum*, 80 (2006) 507-518.

- [26] K. Seah, M. Rahman, K. Yong, Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide cutting tool inserts, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-journal of Engineering Manufacture - PROC INST MECH ENG B-J ENG MA, 217 (2003) 29-43.
- [27] ศ. โสภณกุล, <อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก.pdf>, (2555).
- [28] H. Li, W. Tong, J. Cui, H. Zhang, L. Chen, L. Zuo, The influence of deep cryogenic treatment on the properties of High-Vanadium Alloy Steel, Materials Science and Engineering: A, 662 (2016).





ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายละเอียดของชิ้นงานและผลการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง

รายละเอียดของชิ้นงานที่นำมาทดสอบแรงดึงในแต่ละเงื่อนไขนั้นประกอบไปด้วย

1. ความยาวชิ้นงานก่อนดึง
2. เส้นผ่านศูนย์กลาง
3. พื้นที่หน้าตัด
4. Yield Stress
5. Ultimate Tensile Stress
6. Elongation

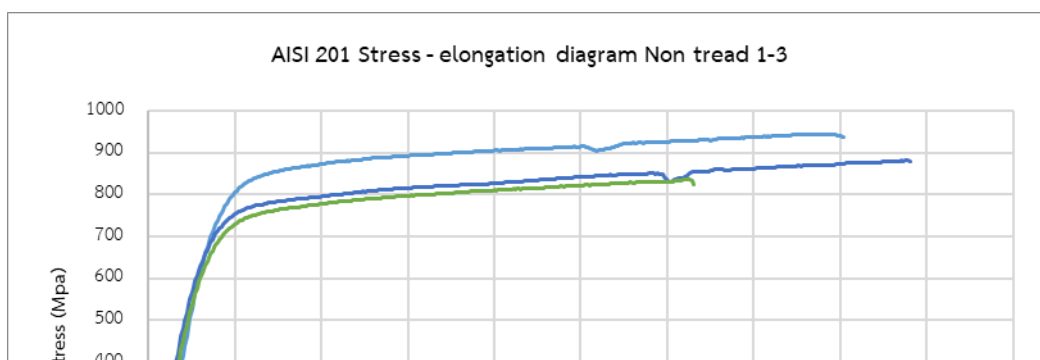
โดยในแต่ละเงื่อนไขนั้นจะมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง หรือ 3 ชิ้นงาน

ผลของระยะเวลาการแช่สถานะเย็นยวดยิ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติวัสดุ

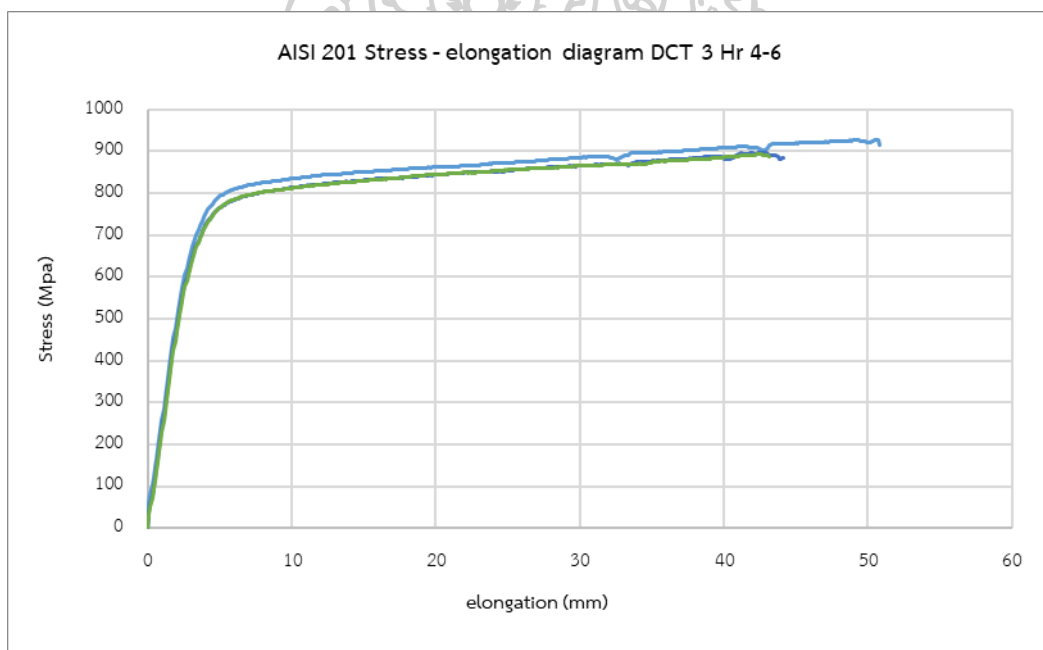
การแช่ที่สถานะเย็นยวดยิ่งนั้นประกอบไปด้วยเงื่อนไขดังนี้

- ไม่ผ่านกระบวนการ
- แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร
- แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร
- แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร
- แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร หลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

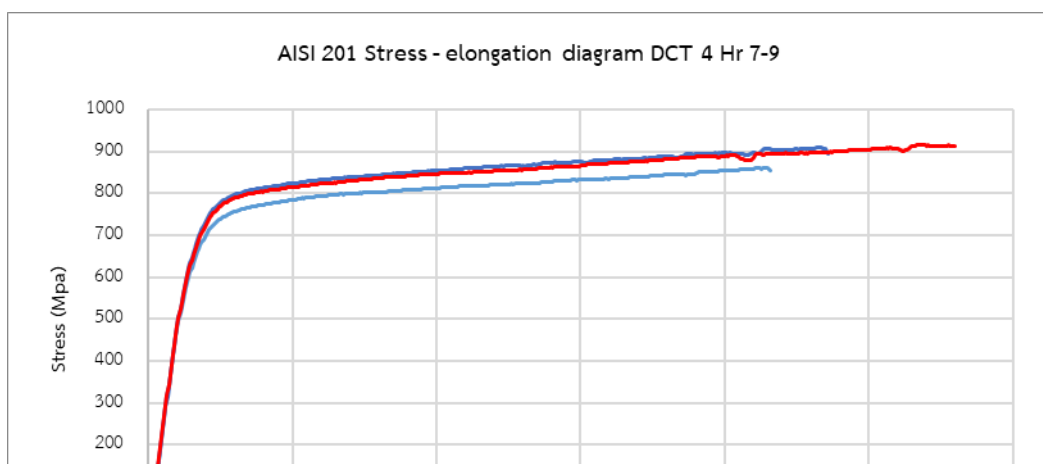
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 201



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 201
ไม่ผ่านกระบวนการ

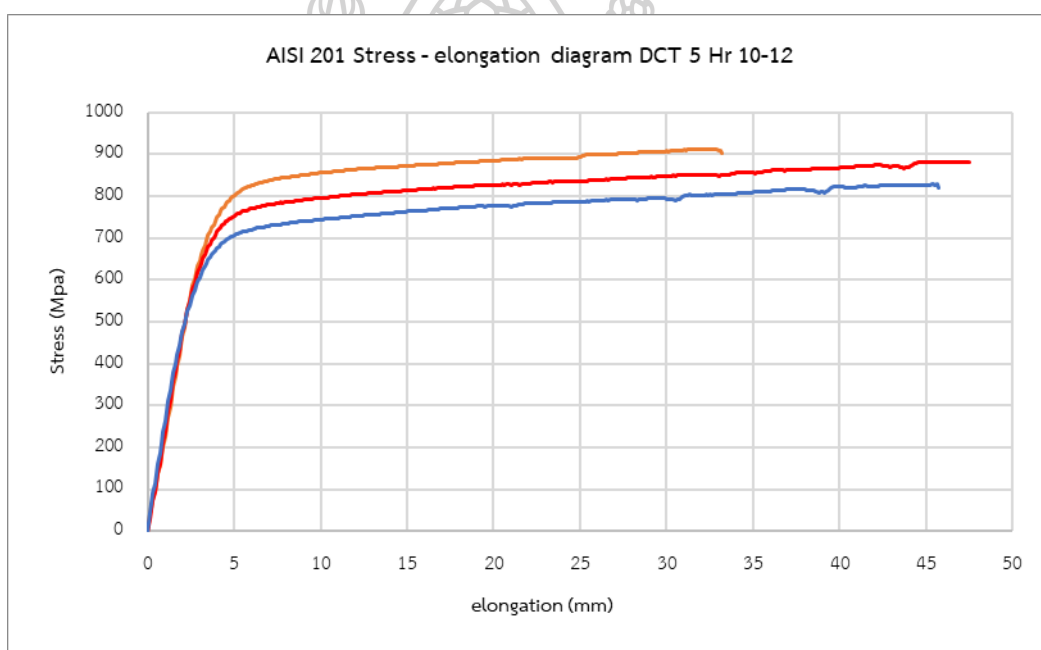


รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 201
แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



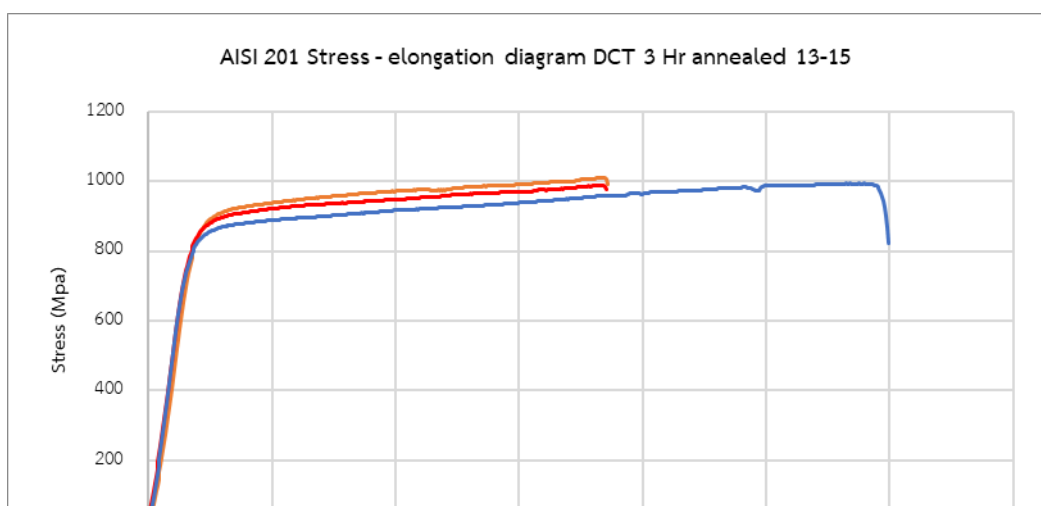
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 201

แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร

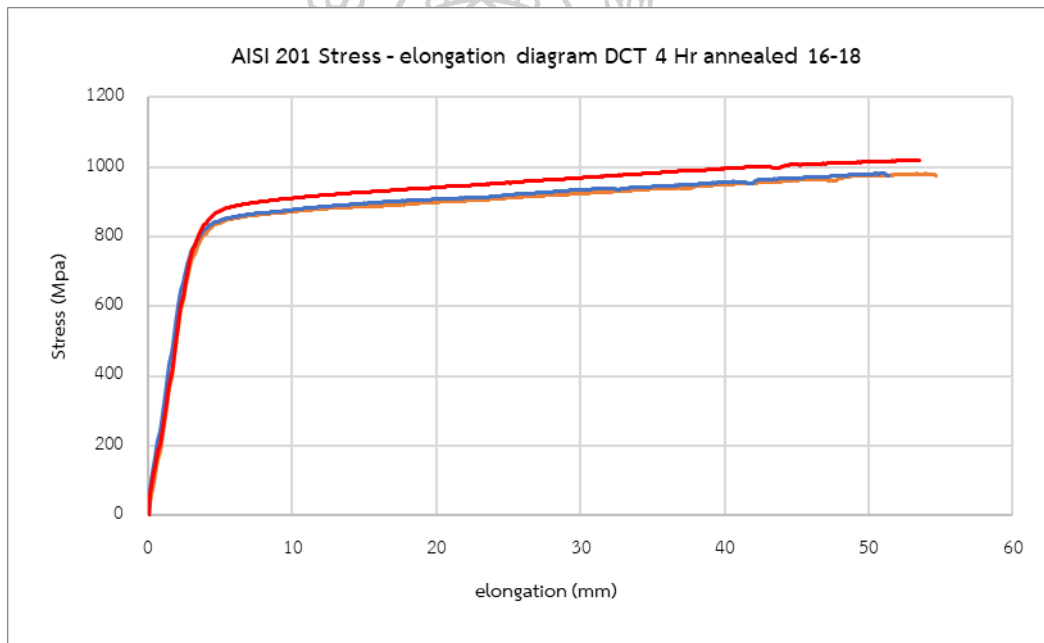


รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 201

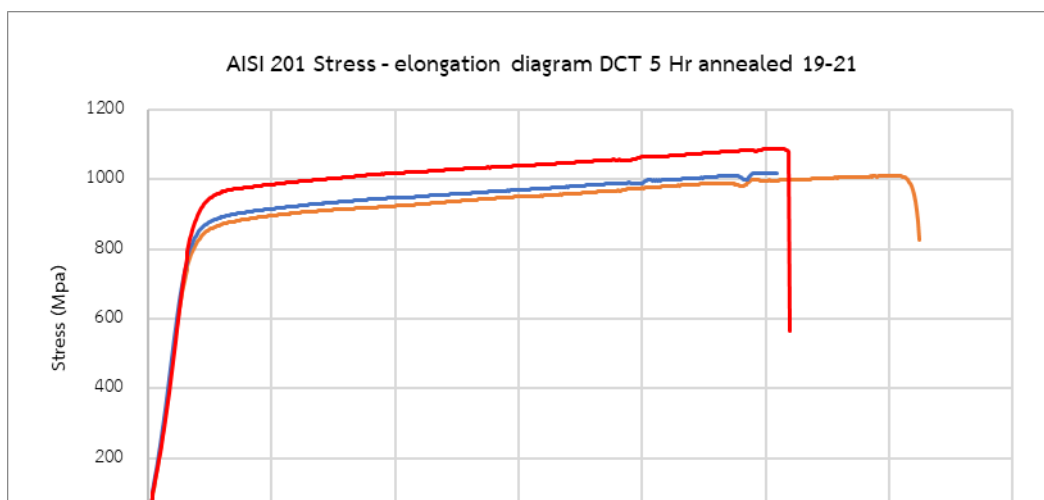
แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร

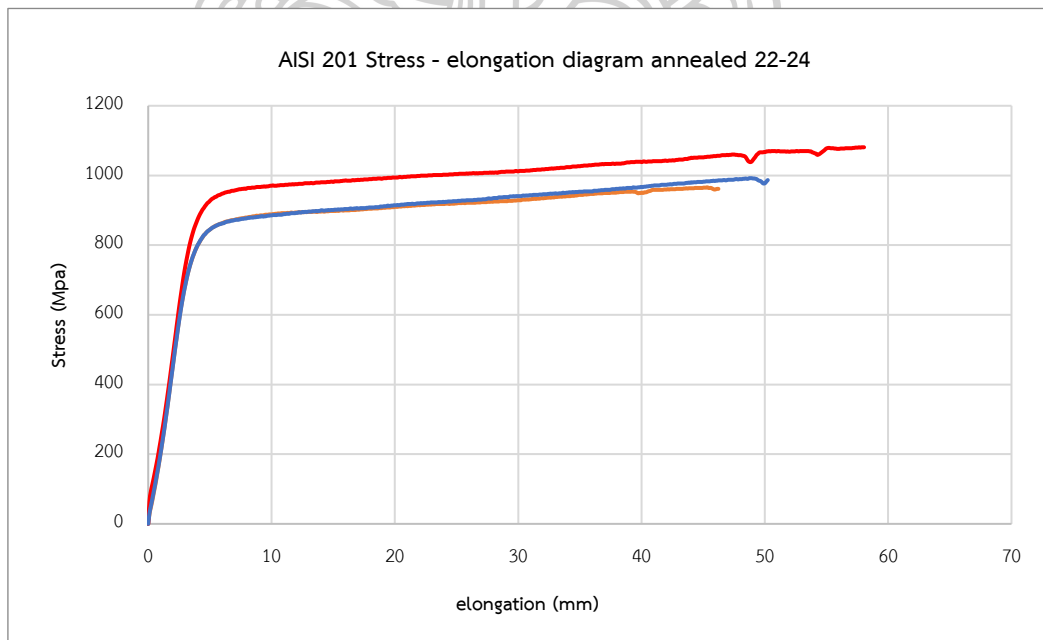
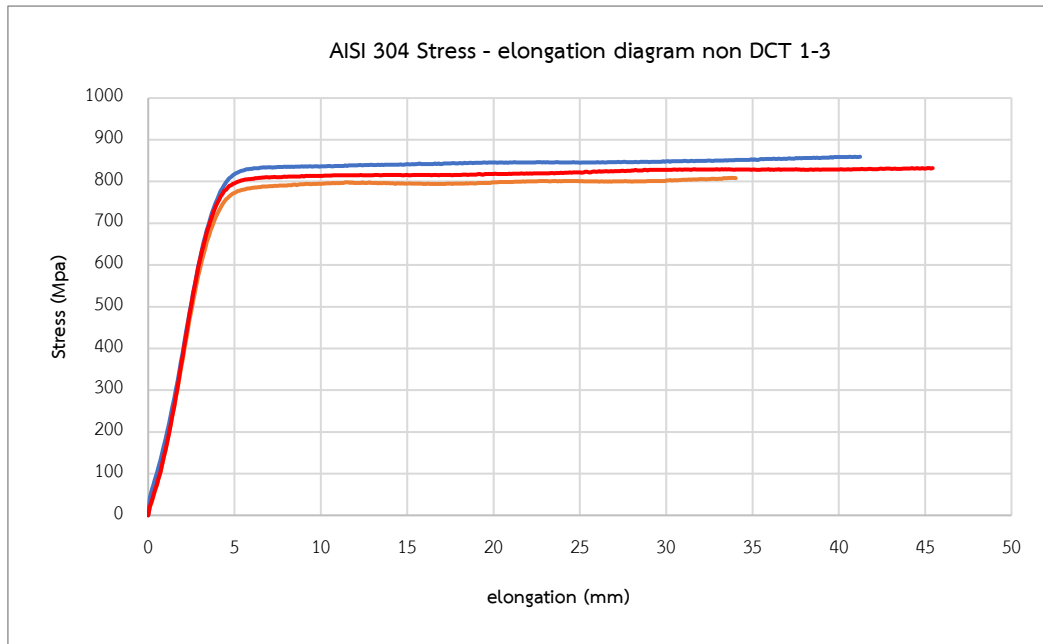


รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 201
 แซ่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



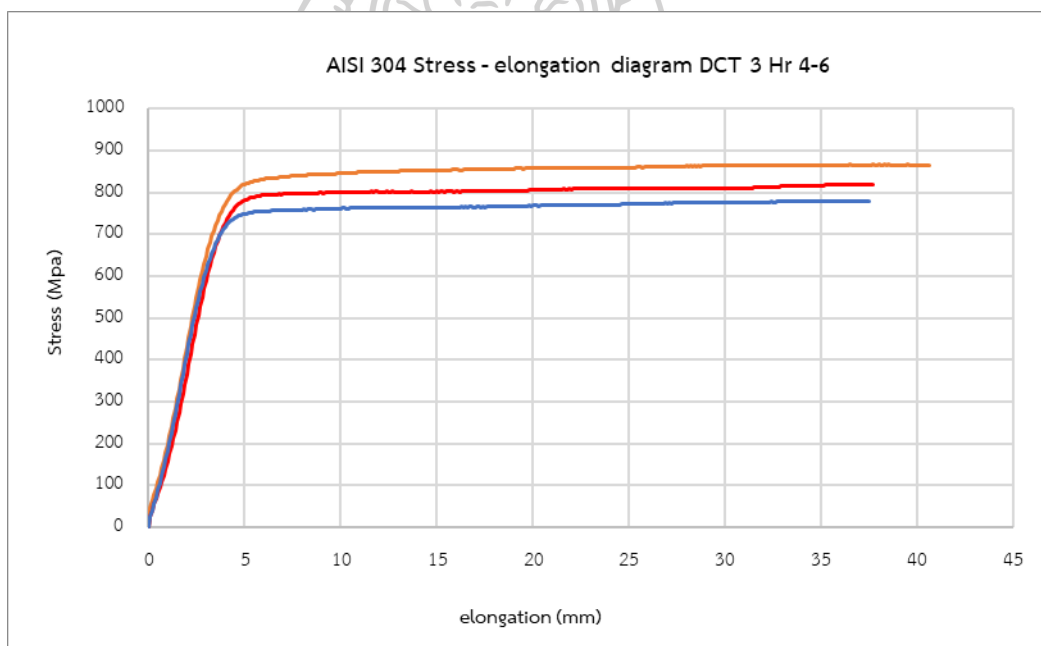
รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 201
 แซ่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง





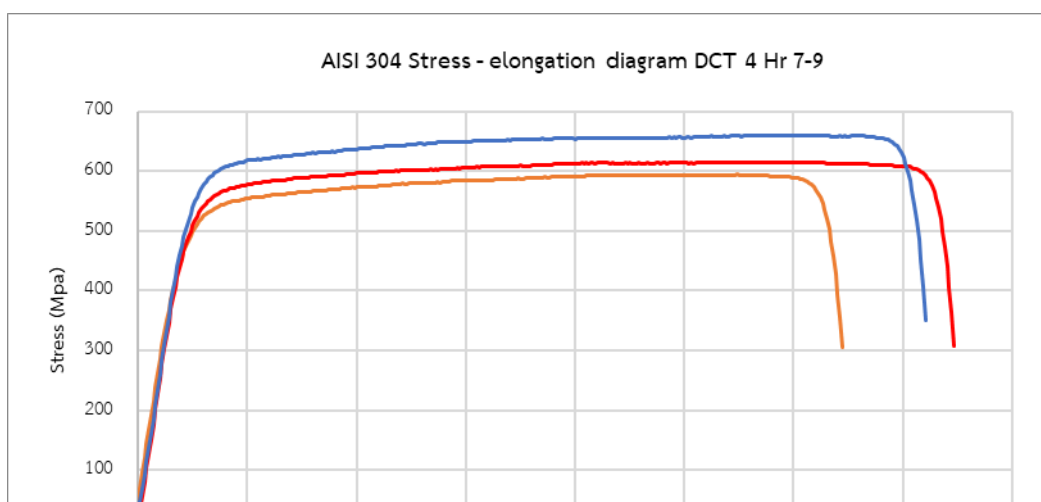
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 304

ไม่ผ่านกระบวนการ

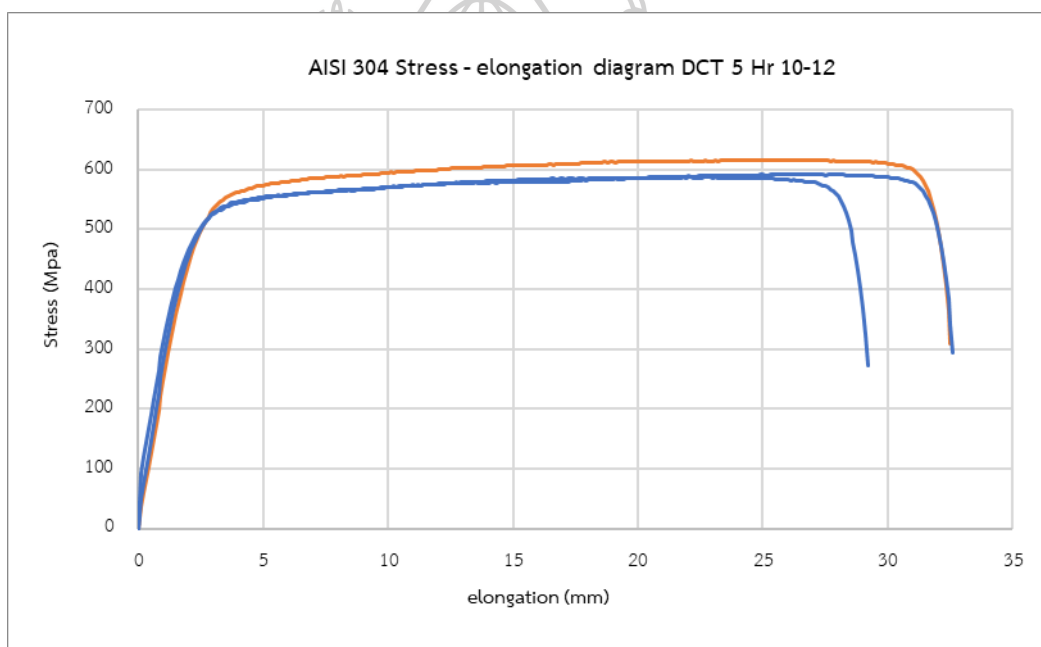


รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 304

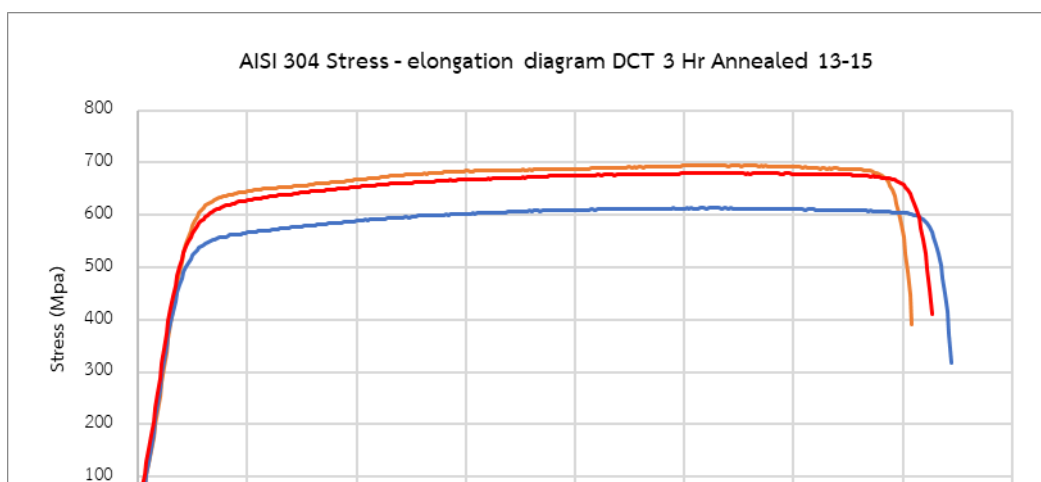
แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



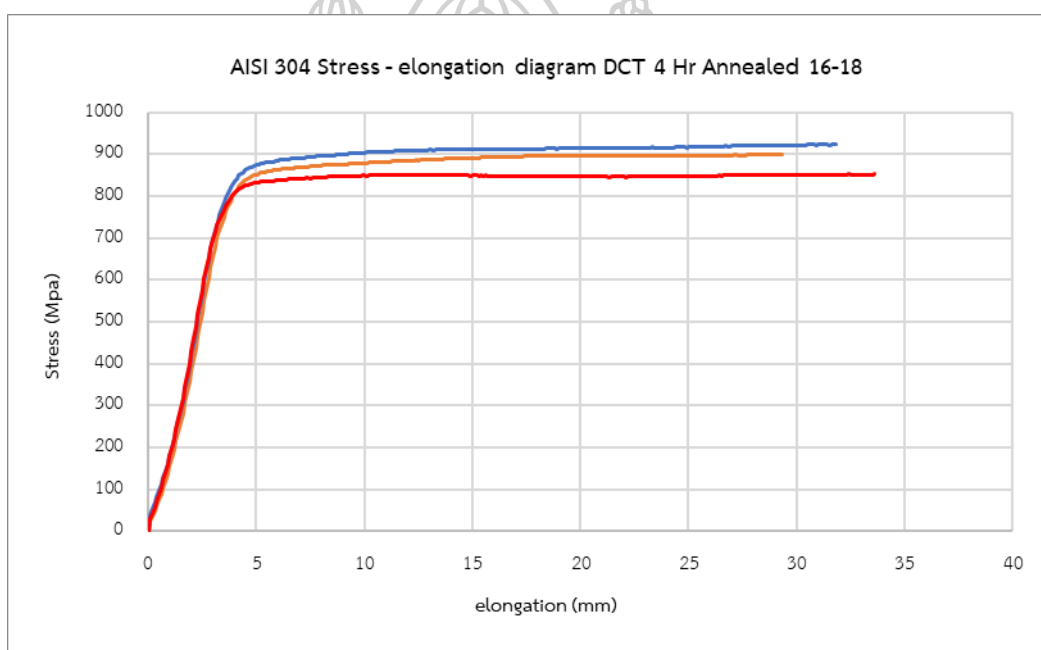
รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 304
แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



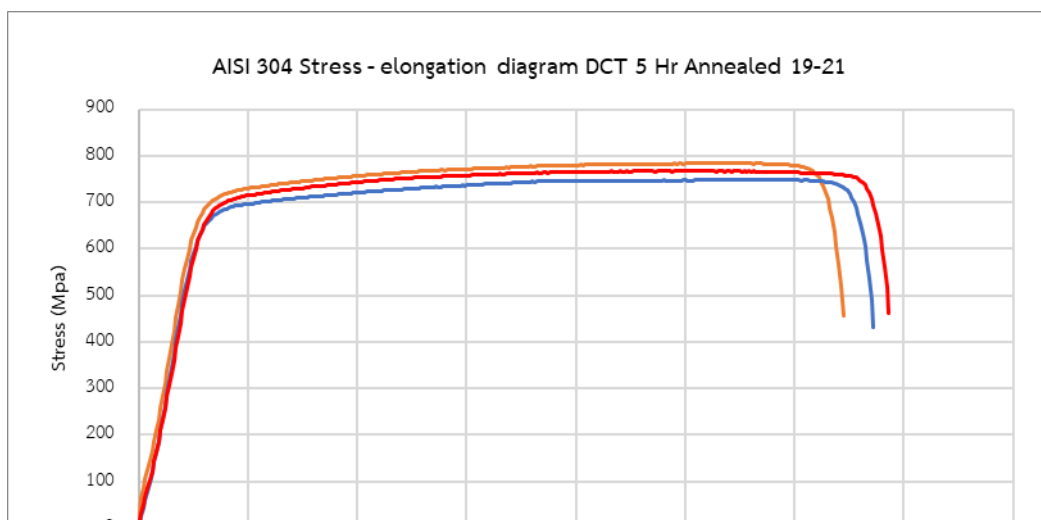
รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 304
แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



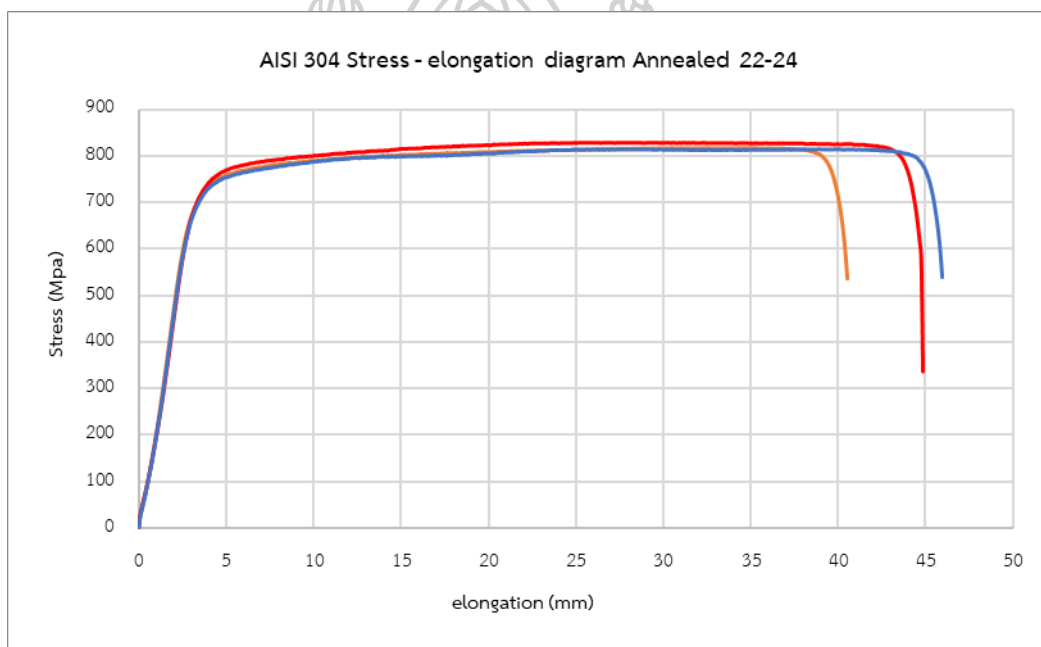
รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 304
 แซ่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 304
 แซ่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

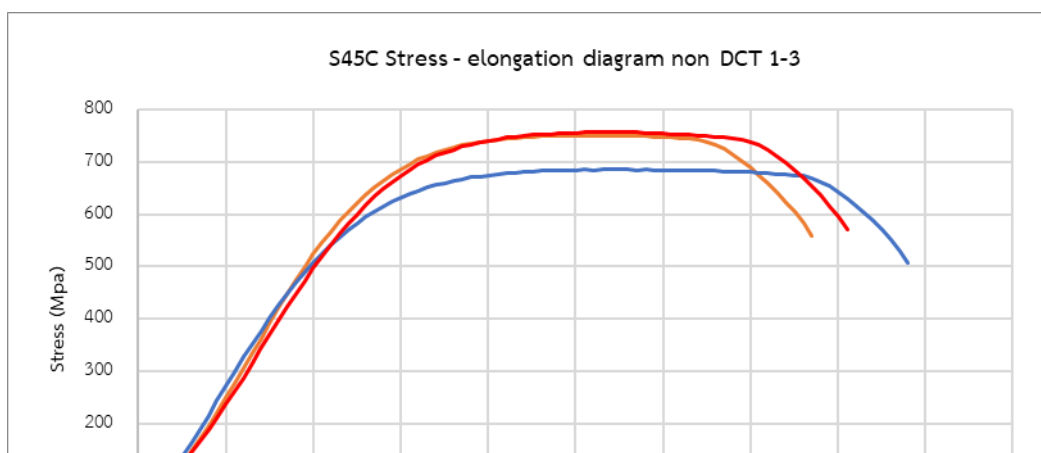


รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 304
 แซนิโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ AISI 304
 อบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

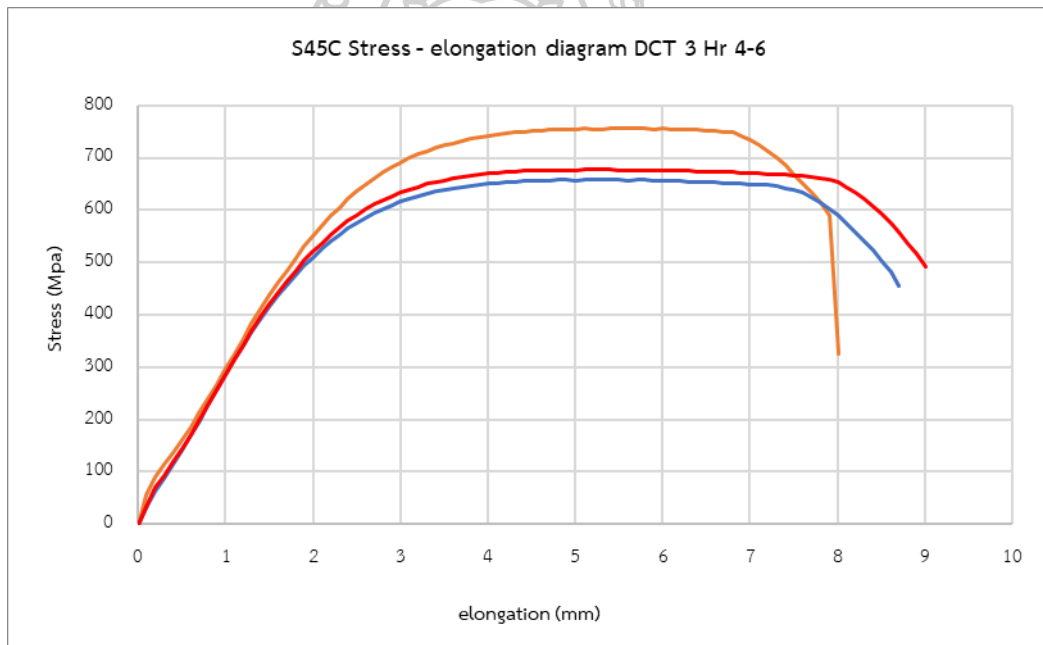
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C



รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C

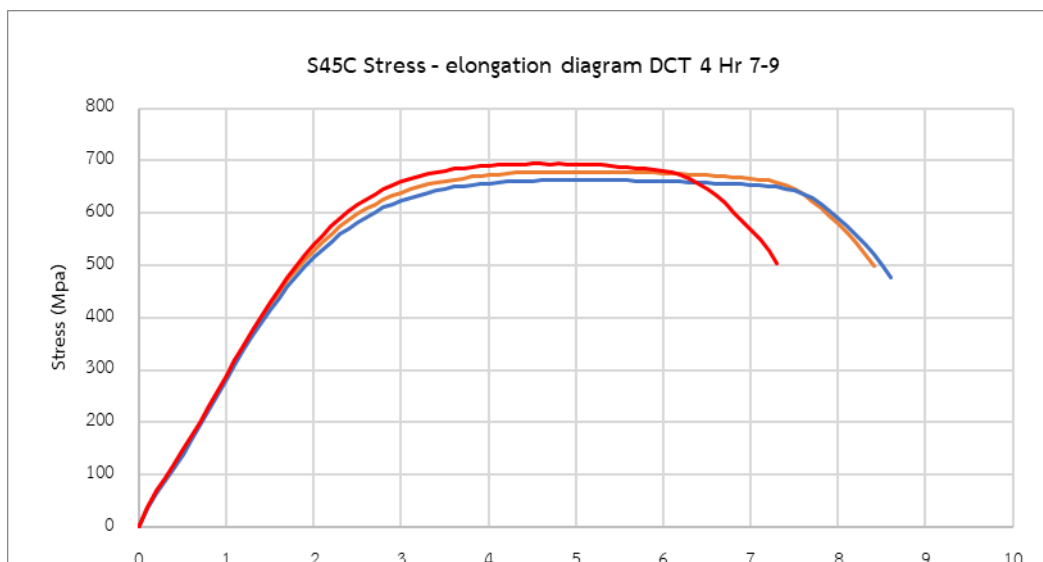


ไม่ผ่านกระบวนการ



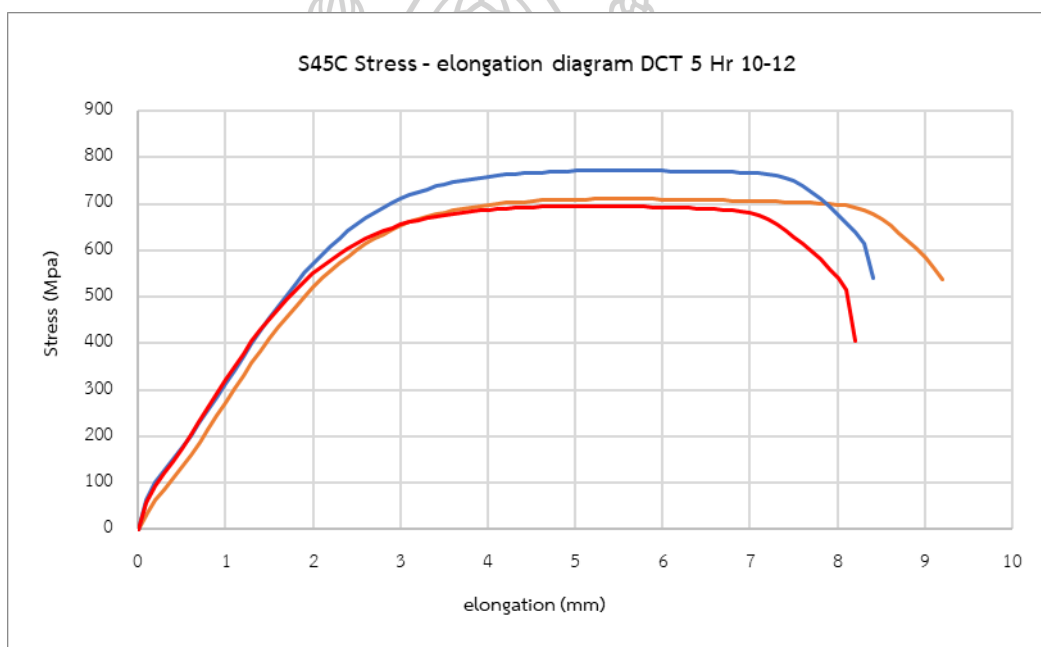
รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C

แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



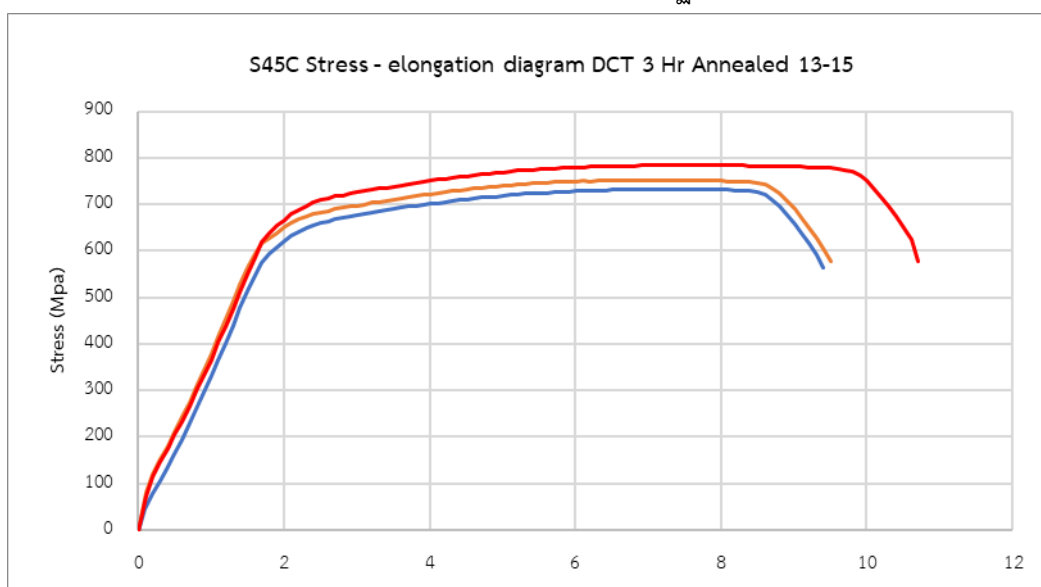
รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C

แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร

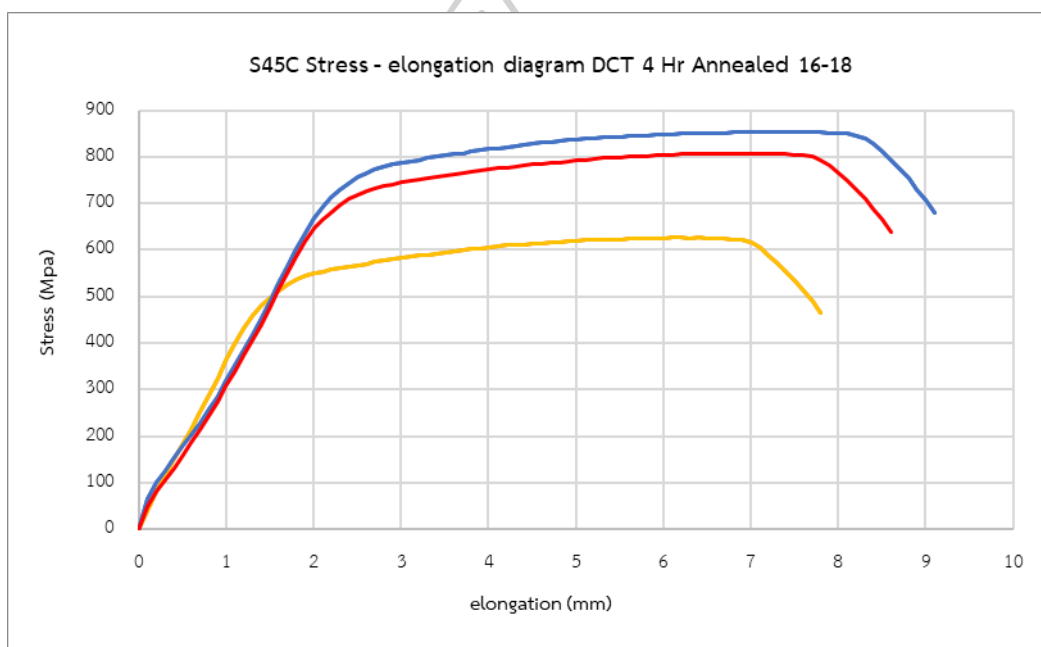


รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C

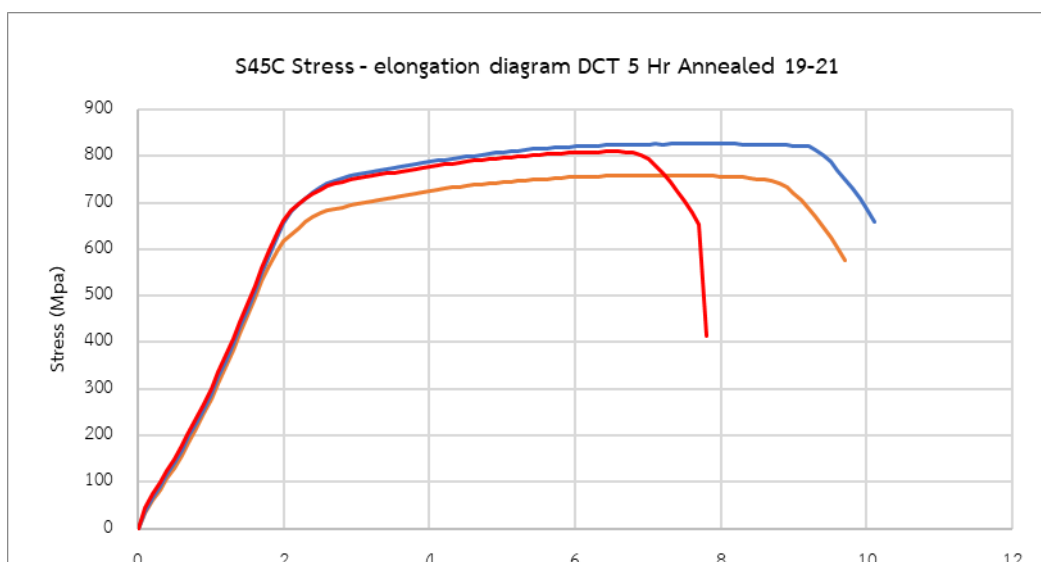
แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



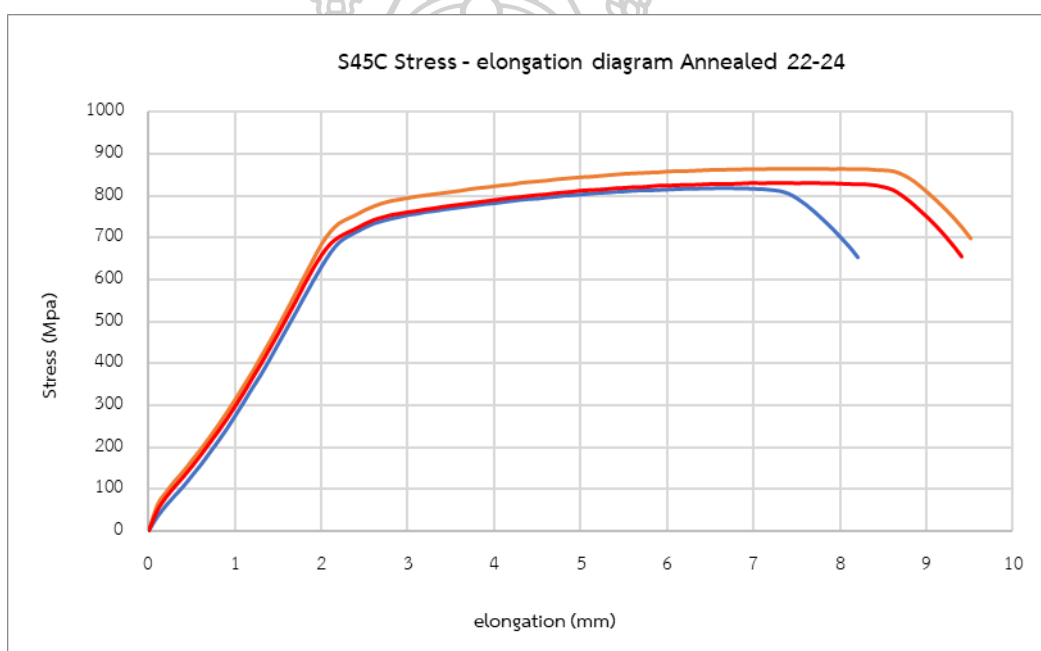
รูปที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C
 แซ่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C
 แซ่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

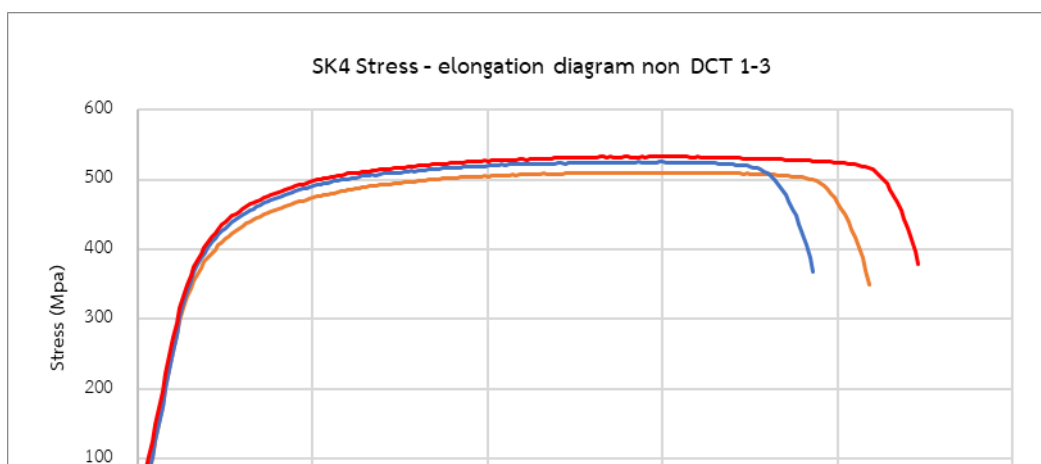


รูปที่ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C
 แซ่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



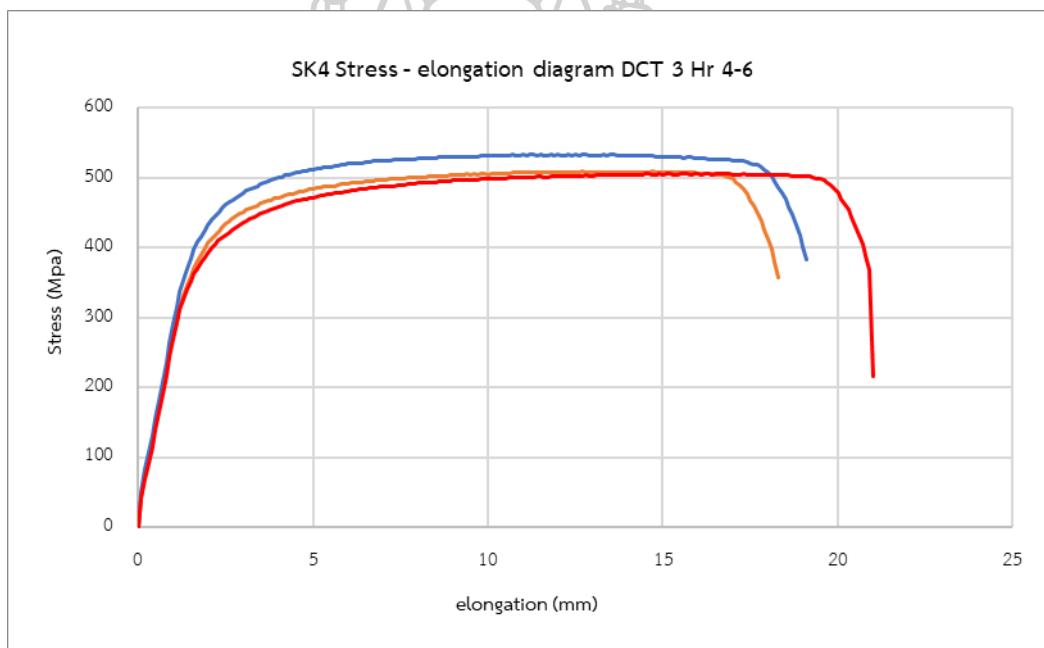
รูปที่ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ S45C
 อบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4



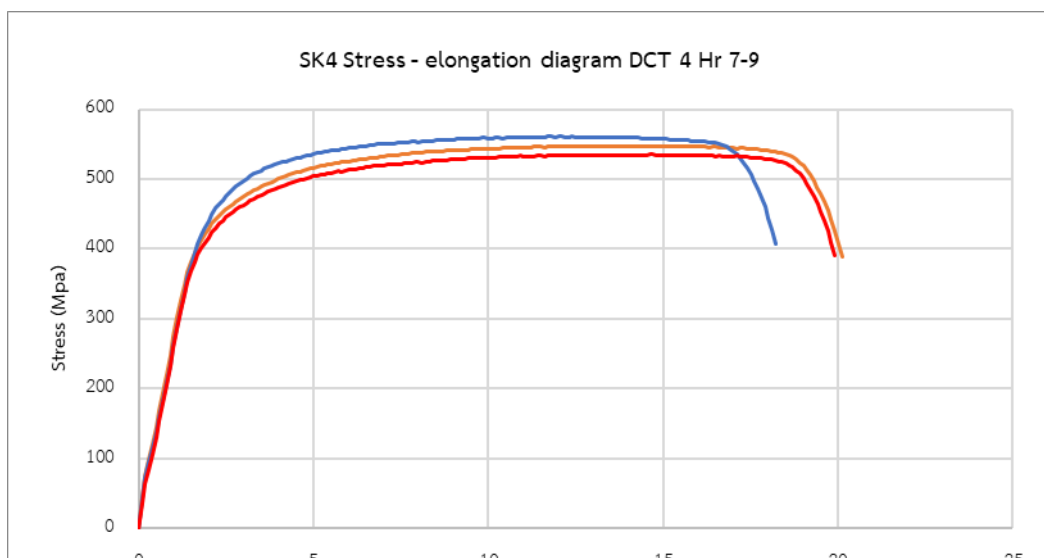
รูปที่ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4

ไม่ผ่านกระบวนการ



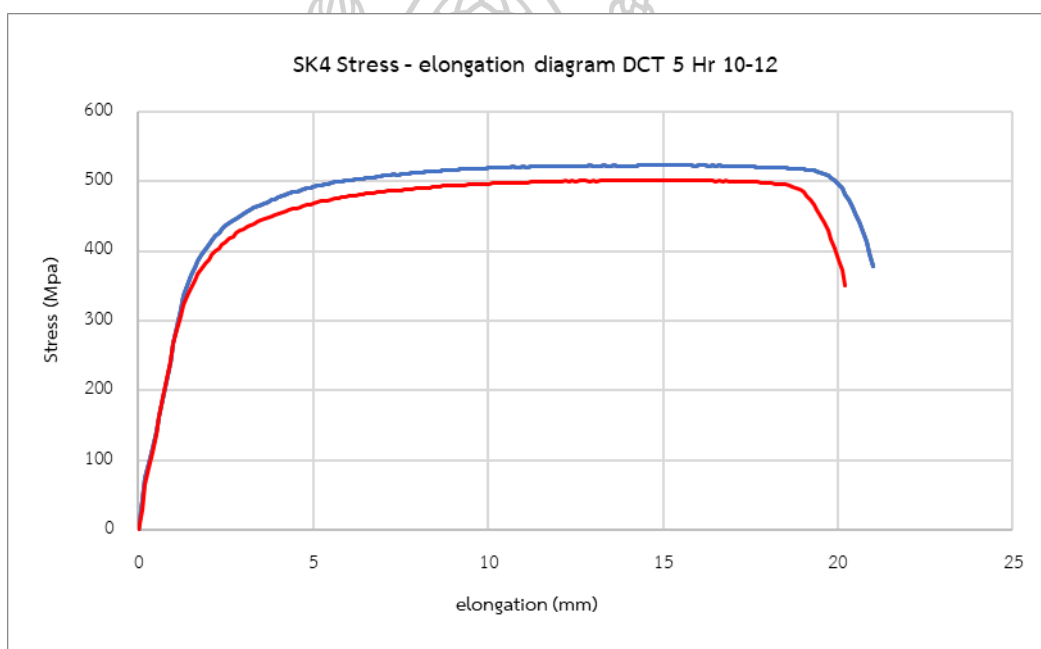
รูปที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4

แช่ไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



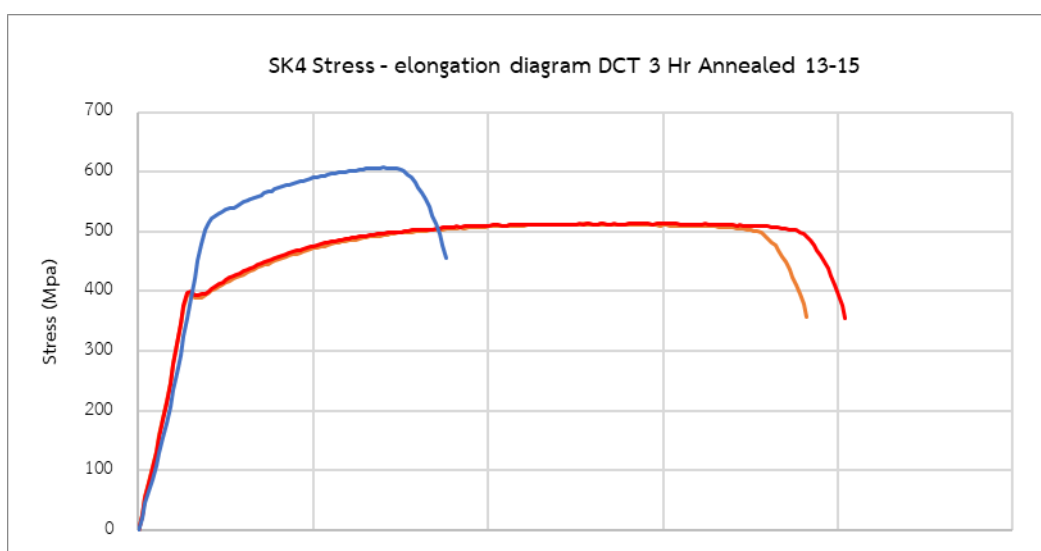
รูปที่ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4

แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร

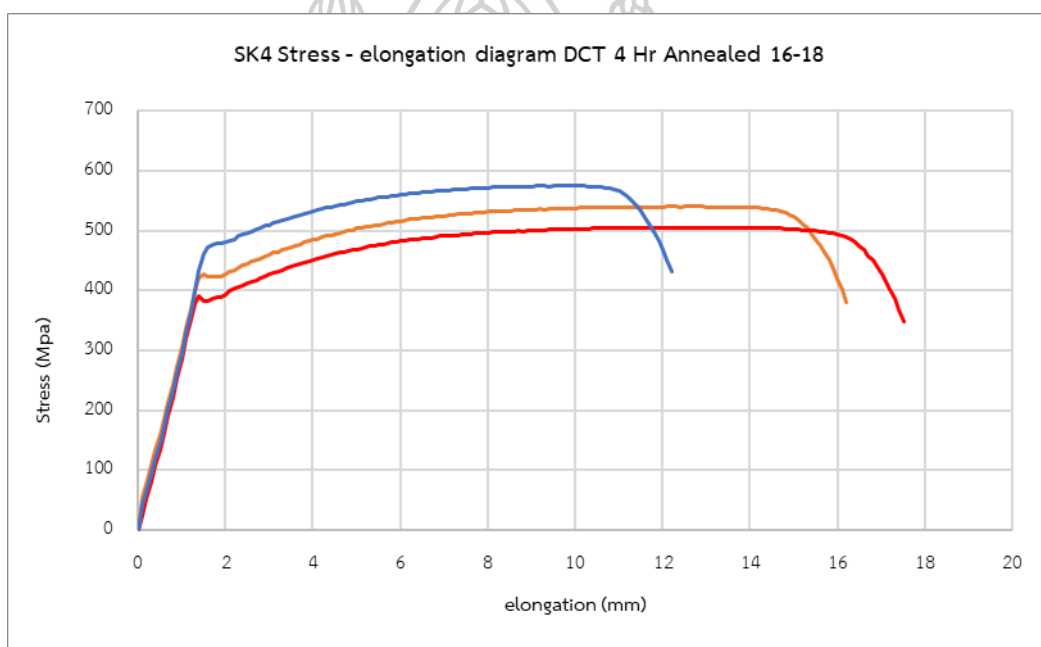


รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4

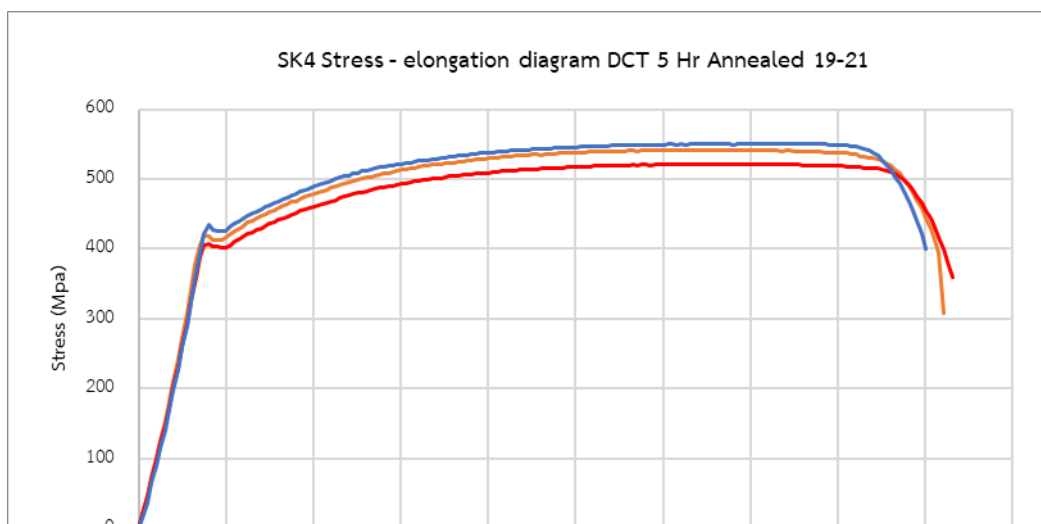
แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



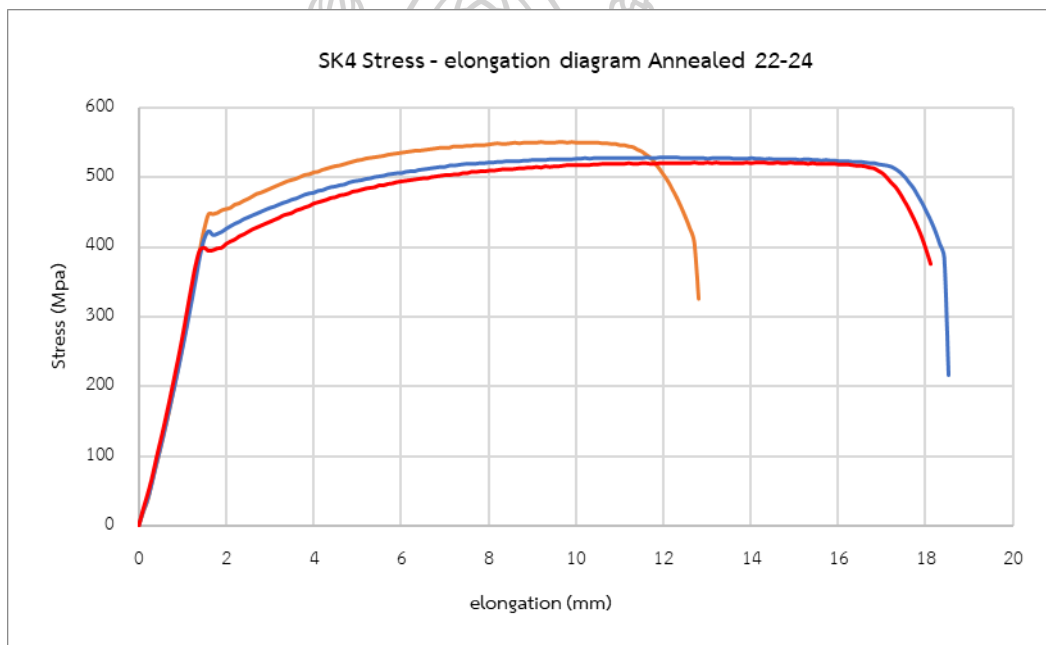
รูปที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4
 แซนิโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4
 แซนิโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

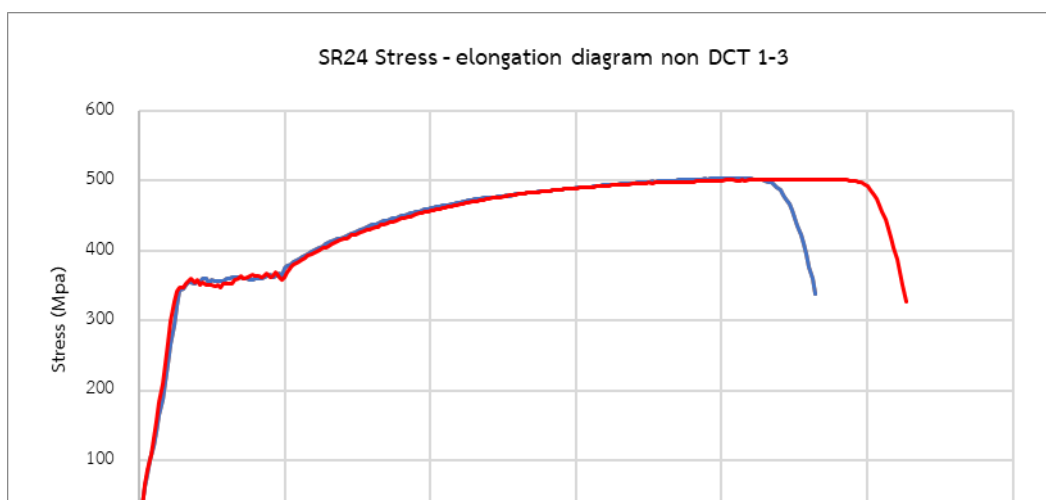


รูปที่ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4
 แซ่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



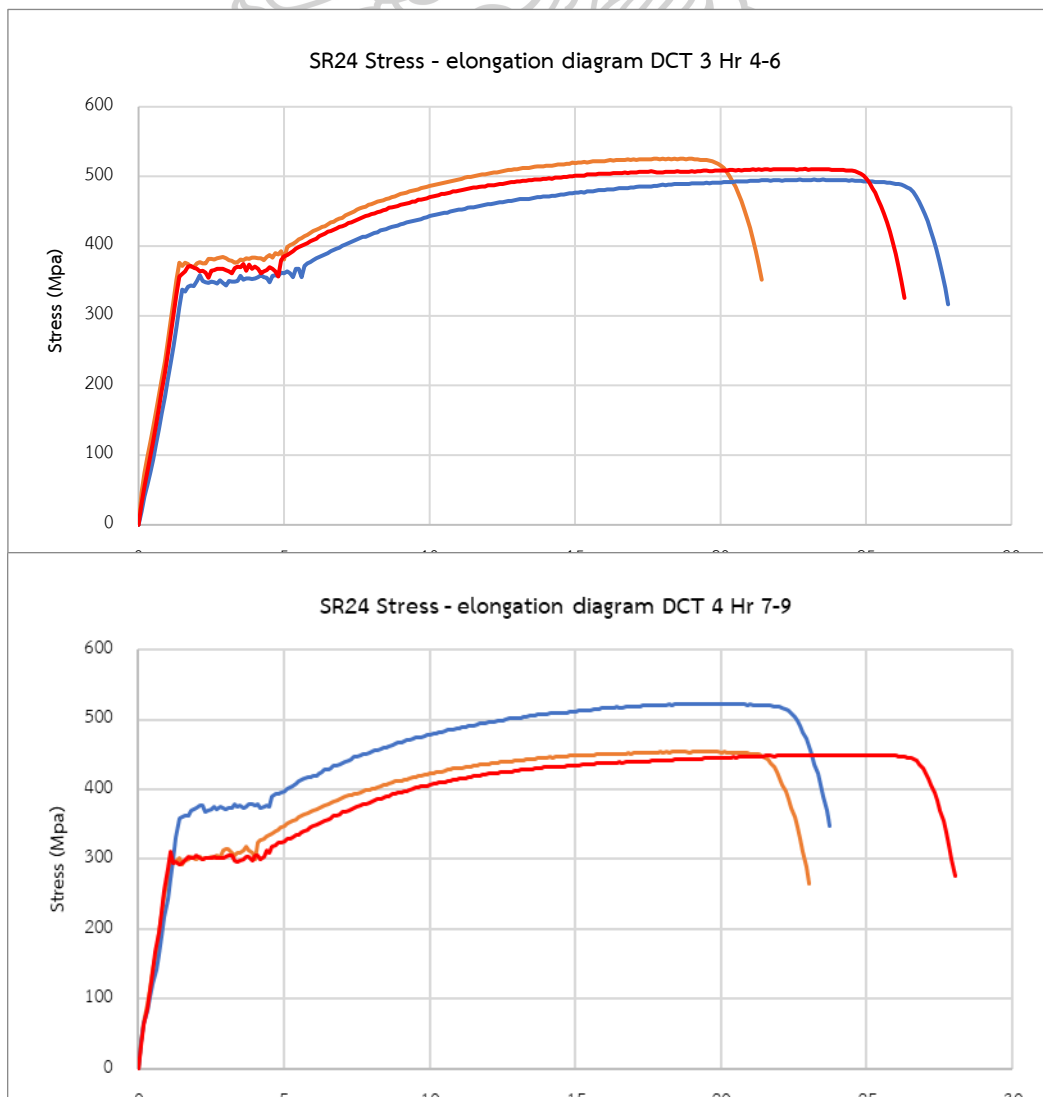
รูปที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SK4
 อบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SR24



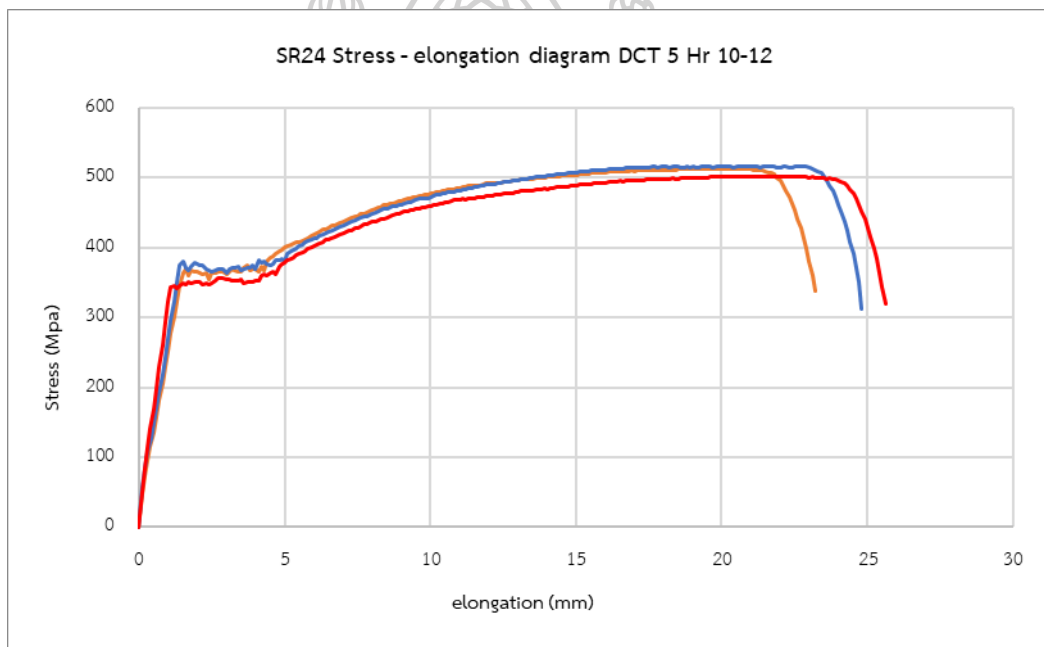
รูปที่ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SR24

ไม่ผ่านกระบวนการ



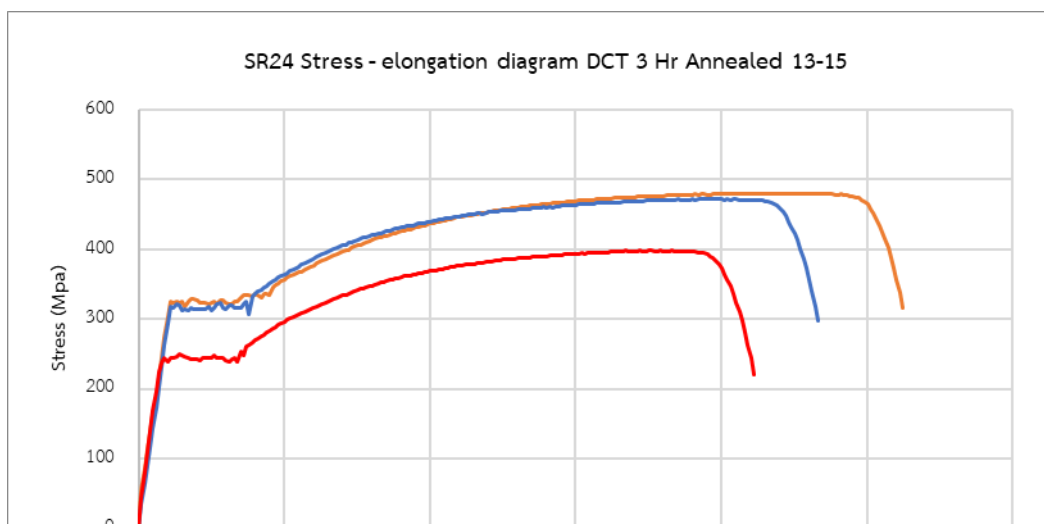
รูปที่ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SR24

แช่ไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักร

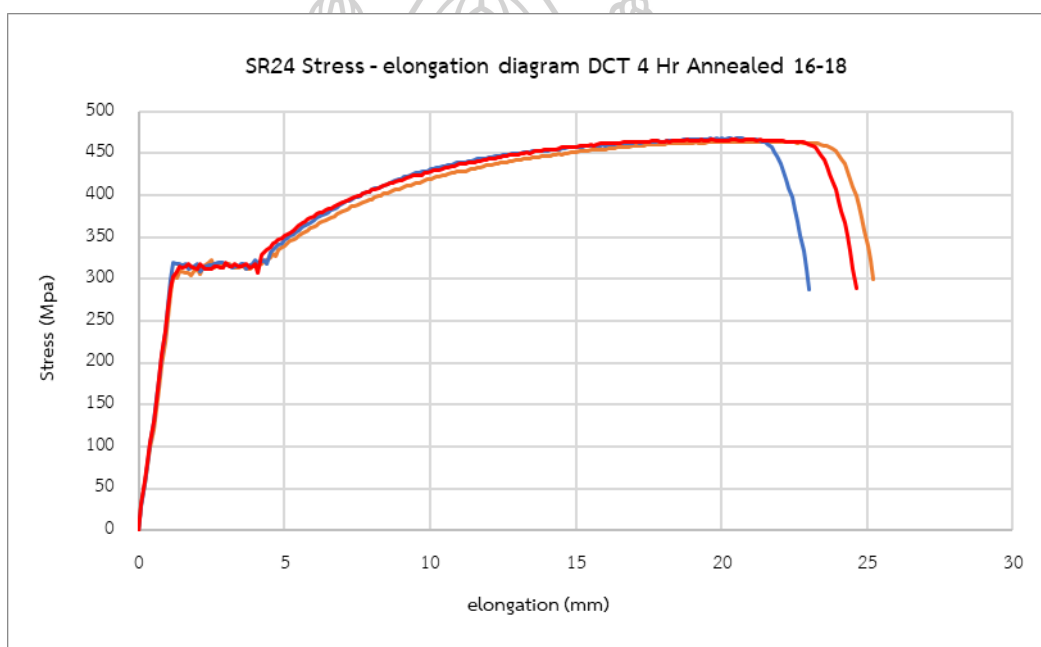


รูปที่ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SR24

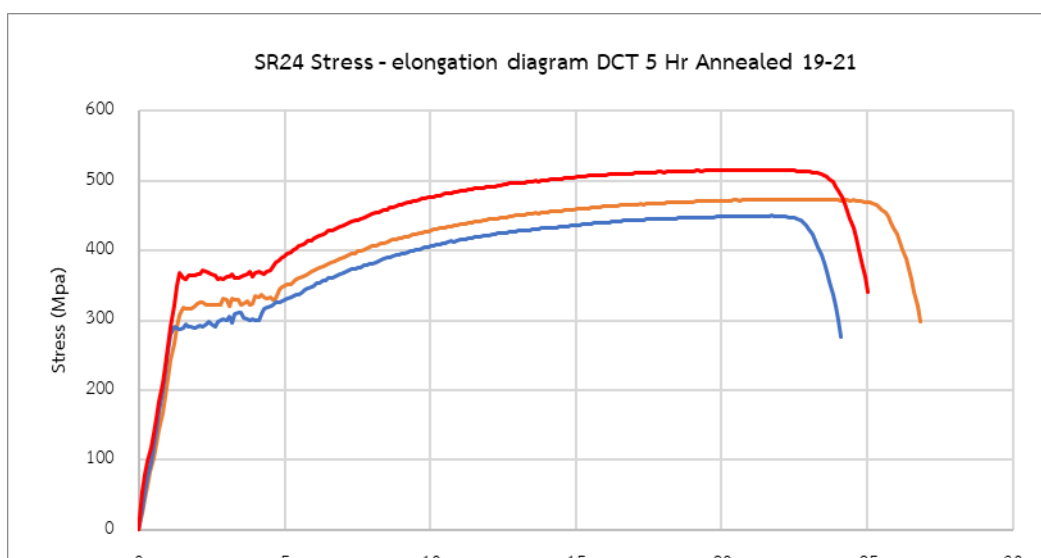
แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักร



รูปที่ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SR24
 แซไนโตรเจนเหลว 3 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SR24
 แซไนโตรเจนเหลว 4 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SR24
แช่ไนโตรเจนเหลว 5 ชั่วโมง 2 วัฏจักรหลังจากนั้นอบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Elongation ของ SR24
อบที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พงศกร เชียงฉิน
วัน เดือน ปี เกิด	29 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	บ้านโป่ง
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	43/3 หมู่ 9 ต. กรับใหญ่ อ. บ้านโป่ง จ.ราชบุรี

