

ผลของการอบคั้นตัวต่อสมบัติความแข็งและความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of tempering on toughness and hardness properties of AISI 410 martensitic
stainless steels



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering
Department of Metallurgical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2020
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการอบคืนตัวต่อสมบัติความแข็งและความแกร่งของ
	เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410
โดย	นายกิตติภูมิ สุวรรณพัชรกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

	.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
	(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		
	.....	ประธานกรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)	
	.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
	(ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)	
	.....	กรรมการ
	(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)	
	.....	กรรมการ
	(อาจารย์ ดร.นิธิ แสนอาจหาญ)	
	.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
	(ดร.เอกรัตน์ ไวยนิตย์)	

กิตติภักดิ์ สุวรรณพัชรกุล : ผลของการอบคืนตัวต่อสมบัติความแข็งและความแกร่งของ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410. (Effects of tempering on toughness and hardness properties of AISI 410 martensitic stainless steels) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ถูกอบให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ ที่อุณหภูมิ 980 °C จากนั้นเย็นตัวในน้ำมันและอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทดสอบค่าความแกร่งแบบชาร์ปีของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 25, -20, -50, -60 °C ตามมาตรฐาน ASTM E23 หลังการอบชิ้นงานให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์และการอบคืนตัว พบตะกอนของคาร์ไบด์ในโครงสร้างจุลภาค การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 °C ให้ค่าความแข็งสูงที่สุดเนื่องจากการตกตะกอนคาร์ไบด์ทุติยภูมิ การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C ให้ค่าความแข็งต่ำสุด เนื่องจากการตกตะกอนของคาร์ไบด์ซึ่งมีสมบัติเปราะที่บริเวณขอบเกรน ทำให้ความแข็งของเนื้อพื้นลดลงเนื่องจากการลดปริมาณคาร์บอนที่ละลายอยู่ในเนื้อพื้น ค่าความแกร่งจะแปรผกผันกับค่าความแข็ง ลักษณะรอยแตกที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 °C เป็นการแตกผ่ากลางเกรน ในทางกลับกันลักษณะรอยแตกที่ผิวของชิ้นงานหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นการแตกตามขอบเกรน จากผลการทดลองสามารถเลือกขั้นตอนการชุบแข็งและการอบคืนตัวที่เหมาะสมของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้ค่าความแกร่งได้ตามมาตรฐาน ASTM E23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6170115821 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD: AISI 410, Tempering, Impact energy, Low temperature, Carbide

Kittipat Suwanpatcharakul : Effects of tempering on toughness and hardness properties of AISI 410 martensitic stainless steels. Advisor: Prof. GOBBOON LOTHONGKUM, Dr.Ing.

AISI 410 martensitic stainless-steel specimens were austenitized at 980 °C then oil quenched and tempered at 300, 400, 500 and 650 °C for 1 hour. The impact energy of the specimens was measured at 25, -20, -50, -60 °C according to the ASTM E23. After austenitizing and tempering, the microstructures of specimens showed carbide precipitate. Tempering at 500 °C resulted in the highest hardness due to secondary carbide precipitates or secondary hardening. Tempering at 650 °C resulted in the lowest hardness due to brittle carbide precipitation at the grain boundary, which soften matrix by decreasing the solute carbon content. The change in impact energy is inversely proportional to the hardness values. The impact surface of specimens tempered at 300, 400 and 500 °C revealed transgranular fracture. On the other hand, the impact surface of the specimen tempered at 650 °C revealed intergranular fracture. From experimental results, the appropriate hardening and tempering procedure of AISI 410 for low temperatures applications can be chosen to achieve the toughness according to ASTM E23.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Student's Signature

Academic Year: 2020 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ที่ได้กรุณาให้
ข้อเสนอแนะ แนวคิด ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด จน
วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อ. ดร. นิธิ แสนอาจหาญ สำหรับคำแนะนำ การช่วยเหลือและข้อคิดเห็นที่
เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ โรงเรียนกษัตริย์ราชวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม
มาร์เทนไซต์เกรด 410 และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญ
พระชนมายุครบ 72 พรรษา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวที่สนับสนุนในด้านต่างๆด้วยดี
ตลอดจนสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัย
ด้วยดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กิตติภัฏ สุวรรณพัชรกุล

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 บริหารศน์วรรณกรรม.....	7
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	7
2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์.....	7
2.3 การอบคืนตัว.....	9
2.4 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสมบัติระหว่างเหนียวและเปราะ.....	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	18
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	18

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	18
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	22
4.1 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410	22
4.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับและชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็ง	23
4.3 ตรวจสอบวัดความแข็งร็อกเวล (Rockwell hardness) ชิ้นงานที่ได้รับและชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบ แข็ง	30
4.4 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C	31
4.5 ตรวจสอบวัดความแข็งร็อกเวล (Rockwell hardness) ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืน ตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C	33
4.6 ผลการตรวจวัดค่าความแกร่ง	36
4.7 ตรวจสอบลักษณะรอยแตก (Fracture) หลังทำการทดสอบความแกร่ง	40
4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ก่อนและหลังการอบ คืนตัวด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)	49
4.9 ปริมาณออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) ในชิ้นงานหลังการอบคืนตัว	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	55
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก	63
ประวัติผู้เขียน	83

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1-1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานสลักหินที่เสียหาย (wt.-%).....	3
ตารางที่ 1-2 ความแข็งของชิ้นงานสลักที่เสียหาย (ภาคผนวก ข).....	4
ตารางที่ 4-1 ส่วนผสมเคมีของชิ้นงานที่ได้รับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (wt.-%).....	22
ตารางที่ 4-2 มาตรฐานส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ (wt.-%) [14].....	22
ตารางที่ 4-3 ความแข็งของชิ้นงานที่ได้รับ ชิ้นงานอบอ่อนใต้อุณหภูมิวิกฤต และชิ้นงานหลังการอบชุบแข็ง (ภาคผนวก จ).....	30
ตารางที่ 4-4 ความแข็งของชิ้นงานที่ได้รับ หลังการอบชุบแข็ง และ ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C (ภาคผนวก จ).....	35
ตารางที่ 4-5 ความแกร่งของชิ้นงานหลังอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300-650 °C ที่อุณหภูมิห้อง (ภาคผนวก ฉ).....	39
ตารางที่ 5-1 ประเภทของคาร์ไบด์ที่พบหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C.....	55

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 กลไกเทอร์ไบน์ประกอบด้วยเอ็กซ์แพนเดอร์ (Expander) และคอมเพรสเซอร์ (Compressor) [1].....	1
รูปที่ 1.2 Inlet Guide Vane (IGV) ประกอบด้วย (ก) สลัก ที่ยึดด้วย (ข) สลักพิน [2].....	2
รูปที่ 1.3 ลักษณะความเสียหายของ (ก) สลักและ (ข) สลักพิน [2].....	3
รูปที่ 1.4 โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์และรอยแตก ของสลักที่เสียหายหลังผ่านการใช้งาน [2].....	3
รูปที่ 2.1 เส้นกราฟการอบคืนตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ผสมโครเมียม 12% คาร์บอน 0.14% (มวล) เมื่อ T = อุณหภูมิ (°C) และ t = เวลาการอบคืนตัว 1-100 ชั่วโมง [10].....	10
รูปที่ 2.2 แสดงรอยแตกหักของเรือส่งสินค้าในช่วงยุคสงครามโลกครั้งที่ 2 [12]	11
รูปที่ 2.3 จุดกึ่งกลางของอุณหภูมิทรานซิชั่นของกราฟพลังงานการกระแทกกับอุณหภูมิต่างๆ [13].	12
รูปที่ 2.4 ค่าความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ [6]	13
รูปที่ 2.5 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ที่มีโครเมียมผสม 12% หลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ [14].....	14
รูปที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวต่อค่าความแข็งและความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่ผสมธาตุโมลิบดีนัม (Mo) [15].....	15
รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวต่อค่าความแข็งและเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 และเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ผสมธาตุนิเกิล (Ni) [16].....	16
รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวต่อค่าอุณหภูมิ DBTT ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ CA-15 ซิลิกอนต่ำ ที่อุณหภูมิตดสอบต่างๆ [17].....	17
รูปที่ 3.1 ขนาดมาตรฐานชิ้นงานทดสอบความแกร่ง ASTM E23 [19]	20
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (ก) และชิ้นงานผ่านการอบชุบแข็ง (ข) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) กัดด้วยสารละลายวิลเลล่า (Vilella's reagent) เวลา 10-15 วินาที... 23	23

รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (ก) และ ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็ง (ข) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	24
รูปที่ 4.3 แผนภูมิสมดุลเฟส (Phase Diagram) ของ Cr-Fe-C ที่ C 0.10% [21, 22]	25
รูปที่ 4.4 Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram ของเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนไซต์เกรด 410 [25].....	26
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (ก) กับชิ้นงานอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต (ข) กัดด้วยสารละลายวิลเลล่า (Vilella's reagent) เวลา 10-15 วินาที.....	27
รูปที่ 4.6 ประเภทของการเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ตามปริมาณคาร์บอน [26]	28
รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ Lath martensite (ก) และ Plate martensite (ข) [26].	29
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 (ก) 400 (ข) 500 (ค) และ 650 °C (ง) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กัดชิ้นงานด้วยสารละลายวิลเลล่า (Vilella's reagent) เวลา 10-15 วินาที.....	31
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 (ก) 400 (ข) 500 (ค) และ 650 °C (ง) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	32
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งของชิ้นงานมาร์เทนไซต์เกรด 410 หลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C).....	33
รูปที่ 4.11 ค่าความแกร่งของชิ้นงานที่ได้รับ หลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C)	36
รูปที่ 4.12 ค่าความแกร่งชิ้นงานที่ได้รับ หลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ที่อุณหภูมิทดสอบ 25, -20, -50 และ -60 °C ตามลำดับ.....	36
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความแกร่งของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ณ อุณหภูมิห้อง.....	37
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าความแกร่งที่อุณหภูมิทดสอบที่ 25, -20, -50 และ -60 °C ของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C.....	38
รูปที่ 4.15 ลักษณะรอยแตกหลังทดสอบความแกร่งของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 (ก) 400 (ข) 500 (ค) และ 650 °C (ง).....	40
รูปที่ 4.16 ลักษณะรอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียว [31].....	41

รูปที่ 4.17 ภาพจำลองการแตกแบบผ่ากลางเกรน (ซ้าย) และขอบเกรน (ขวา) [32].....	42
รูปที่ 4.18 ลักษณะรอยแตกแบบผ่ากลางเกรน (ซ้าย) และ ขอบเกรน (ขวา) [33].....	42
รูปที่ 4.19 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 °C หลังทดสอบความแกร่งที่อุณหภูมิ 25 (ก),-20 (ข), -50 (ค) และ -60 °C (ง).....	43
รูปที่ 4.20 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 °C หลังทดสอบความแกร่งที่อุณหภูมิ 25 (ก),-20 (ข), -50 (ค) และ -60 °C (ง).....	44
รูปที่ 4.21 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 °C หลังทดสอบความแกร่งที่อุณหภูมิ 25 (ก),-20 (ข), -50 (ค) และ -60 °C (ง).....	45
รูปที่ 4.22 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C หลังทดสอบความแกร่งที่อุณหภูมิ 25 (ก),-20 (ข), -50 (ค) และ -60 °C (ง).....	46
รูปที่ 4.23 ลักษณะรอยแตกแบบเหนียวบริเวณขอบชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C ณ อุณหภูมิทดสอบ 25 °C	47
รูปที่ 4.24 กลไกการเกิดรอยแตกแบบเหนียว [30].....	48
รูปที่ 4.25 ตัวอย่างลักษณะรอยแตกแบบเหนียว ที่มีอนุภาคหรือสารฝังในอยู่ในหลุม [30].....	48
รูปที่ 4.26 แสดงหลักการทำงานตามสมการ Bragg's law [34].....	49
รูปที่ 4.27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานที่ได้รับ (As-received) หลังการอบชุบแข็ง (H-980) และชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 (T-300), 400 (T-400), 500 (T-500) และ 650 (T-650) °C	50
รูปที่ 4.28 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในระนาบ (110) บริเวณมุม 44.6 องศา ของเหล็กกล้า ไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410.....	51
รูปที่ 4.29 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในระนาบ (200) บริเวณมุม 64.7 องศา ของเหล็กกล้า ไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410.....	52
รูปที่ 4.30 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในระนาบ (211) บริเวณมุม 82.2 องศา ของเหล็กกล้า ไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410.....	52
รูปที่ 4.31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 °C หลังทดสอบการกระแทกที่อุณหภูมิ 25 °C และ -60 °C.....	53

รูปที่ 4.32 แสดงผลของปริมาณคาร์บอนต่อปริมาณออสเทนิตต์ตกค้าง โดย G.R. SPEICH และ W.C. LESLIE [39] (ซ้าย) และ ASM: Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist [40] (ขวา)..... 54

รูปที่ 5.1 ผลของโครงสร้างจุลภาคต่อค่าพลังงานการกระแทกที่อุณหภูมิต่างๆ [41] 57

รูปที่ 5.2 ค่าพลังงานการกระแทกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์เกรด 304L (ก) และ 316L (ข) [42] 57

รูปที่ 5.3 ความแกร่งของชิ้นงานโครงสร้างจุลภาค BCC (SS410) และ FCC (SS316L)..... 58

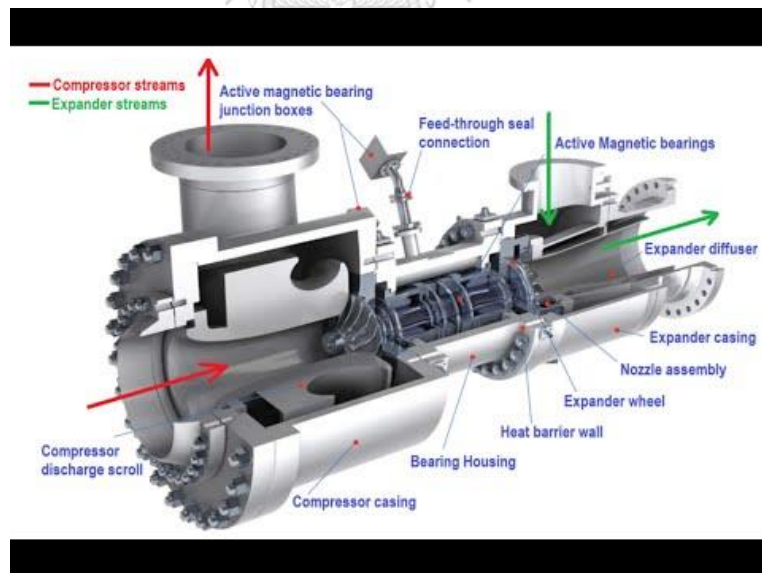


บทที่ 1

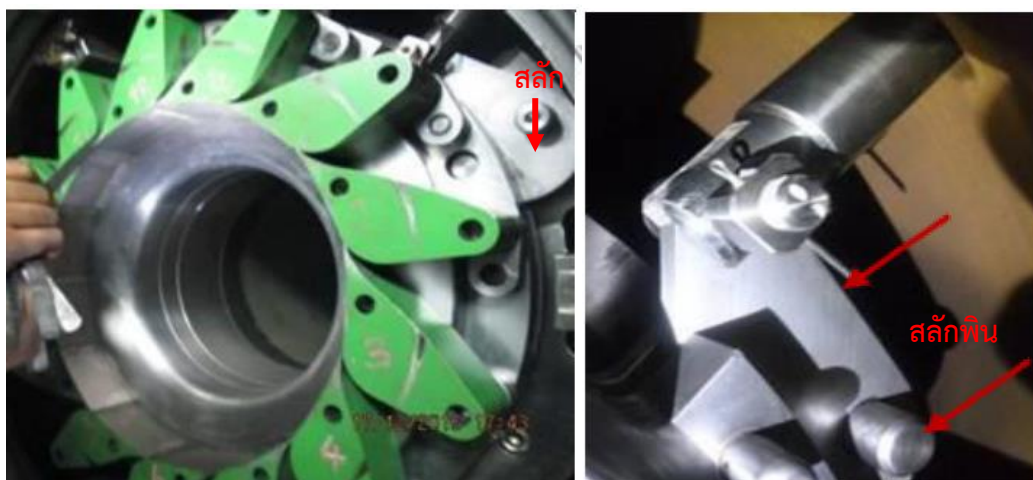
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โรงแยกก๊าซธรรมชาติขนาดย่อมใช้อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซธรรมชาติด้วยกลไกเทอร์โบไบน (Turboexpander) เข้าระบบแยกก๊าซ แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ในรูปที่ 1.1 เพื่อลดแรงดันและอุณหภูมิของก๊าซธรรมชาติด้วยกลไกการขยายตัวของก๊าซธรรมชาติ ทำให้เกิดงานไปหมุนเทอร์โบไบน และส่งกำลังไปหมุนเครื่องคอมเพรสเซอร์อีกชุดหนึ่งเพื่ออัดก๊าซที่ส่งขาย (Sales gas) ไปยังลูกค้า ชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซธรรมชาตินี้มี Inlet Guide Vane (IGV) ประกอบด้วย สลัก (Lever) ที่ยึดด้วย สลักพิน (Lever pin) แสดงในรูปที่ 1.2 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ขยับสลักสี่เหลี่ยมให้ปิด-เปิด เพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซธรรมชาติเข้าอุปกรณ์เครื่องขยายก๊าซธรรมชาติด้วยกลไกเทอร์โบไบน ความดันและอุณหภูมิของก๊าซธรรมชาติเข้าและขาออกมีค่า 51.9 BARG, -19.1 °C และ 23.5 BARG, -50.7 °C ตามลำดับ



รูปที่ 1.1 กลไกเทอร์โบไบนประกอบด้วยเอ็กซ์แพนเดอร์ (Expander) และคอมเพรสเซอร์ (Compressor) [1]



(ก) สลัก

(ข) สลักพิน

รูปที่ 1.2 Inlet Guide Vane (IGV) ประกอบด้วย (ก) สลัก ที่ยึดด้วย (ข) สลักพิน [2]

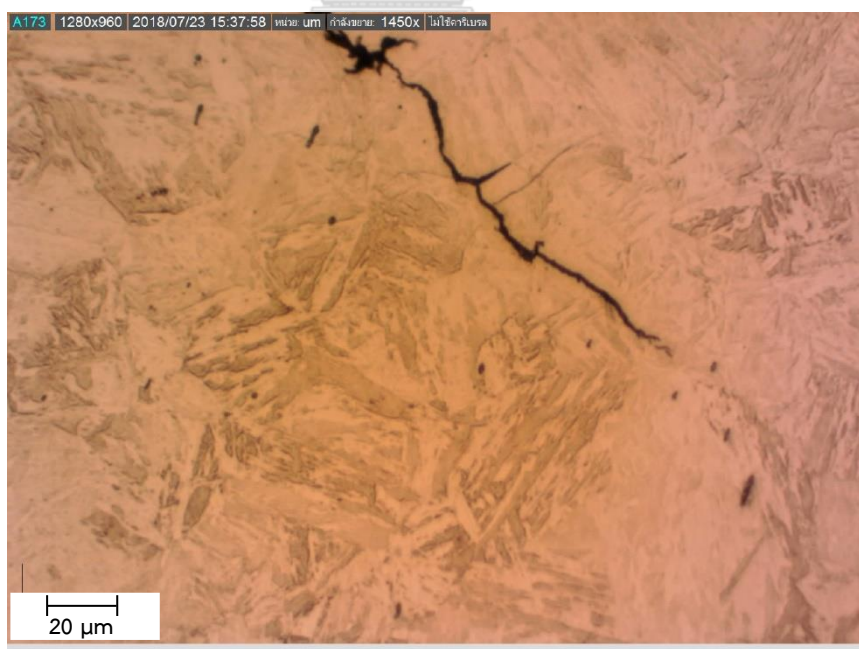
ที่อัตราการไหลต่ำกว่าค่าออกแบบ เกิดความเสียหายของสลักและสลักพิน หลังจากการซ่อมบำรุงและใช้งานประมาณ 1 ปี พบว่า สลักและสลักพินเกิดความเสียหายอีก แสดงในรูปที่ 1.3 เมื่อตรวจสอบส่วนผสมเคมีของสลักพินที่เสียหายโดยในที่นี้จะขอเรียกว่าสลักต้นแบบ (ภาคผนวก ก) พบว่าสลักทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ตามผลในตารางที่ 1-1 วัดค่าความแข็ง (Hardness) ของสลักและสลักพิน ได้ผลตามตารางที่ 1-2 (ภาคผนวก ข) เมื่อตัดตัวอย่างตามหลักการทางโลหวิทยา (Metallography) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์เป็นองค์ประกอบหลักและมีรอยแตกจากการใช้งานตามในรูปที่ 1.4 โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ย 54.40 ± 2.17 HRC จัดเป็นค่าระดับกลางตามมาตรฐาน ASTM E18 และ ISO 6508-2:2015 [3, 4] แต่มีค่าเกินค่ากำหนด (36 HRC) ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหลักในการทำให้สลักและสลักพินเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 1.3 ลักษณะความเสียหายของ (ก) สลักและ (ข) สลักพิน [2]

ตารางที่ 1-1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานสลักพินที่เสียหาย (wt.-%)

ธาตุ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
สลักต้นแบบ	0.148	0.340	0.486	0.017	0.007	11.780	0.137	0.300	Bal.



รูปที่ 1.4 โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์และรอยแตก ของสลักที่เสียหายหลังผ่านการใช้งาน [2]

ตารางที่ 1-2 ความแข็งของชิ้นงานสลักที่เสียหาย (ภาคผนวก ข)

ตัวอย่าง	ความแข็ง	ระดับ [3, 4]
สลักต้นแบบ	53.20 ± 2.05 HRC (150 kgf)	ปานกลาง

จากปัญหาข้างต้นทางผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาไว้ดังนี้

ทางเลือกที่ 1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ที่เป็นชิ้นส่วนจะต้องมีสมบัติทางกลผสมผสานกันของค่าความแข็งแรง (Strength) ความแข็ง (Hardness) ค่าความแกร่ง (Toughness) รวมทั้งความสามารถต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion resistance) ที่เหมาะสมเพื่อการใช้งานที่ยาวนาน การที่จะได้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติกลที่เหมาะสมนั้น เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์จะต้องผ่านการอบชุบแข็ง (Hardening) ที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ที่แข็งและผ่านการอบคืนตัว (Tempering) ในช่วงอุณหภูมิ 300-550 °C เพื่อให้ความแข็งลดลงและมีสมบัติทางกลเหมาะสมตามต้องการ กระบวนการอบที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 °C และเย็นตัวอย่างเร็วสามารถเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการอบชุบแข็ง เป็นกระบวนการทำให้โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์เพราะคาร์บอนไม่สามารถแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์มารวมตัวกับเหล็กเป็นเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) หรือซีเมนไต์ [5] โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์จึงมีปริมาณคาร์บอนสูงและค่าความแข็งสูงแต่ค่าความแกร่งต่ำ ไม่เหมาะแก่การใช้งาน จึงต้องทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าการอบชุบแข็งเพื่อลดค่าความแข็งและเพิ่มค่าความแกร่ง [6] โดยโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์จะเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์และเหล็กคาร์ไบด์ตามสภาวะการเปลี่ยนแปลงสมดุล [5] (รายละเอียดดูในหัวข้อ 4.2)

ทางเลือกที่ 2 การใช้งานสลักและสลักพิน จะใช้งานที่อุณหภูมิ -19.1 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ (cryogenic temperature) การทดลองวัดค่าสมบัติทางกลที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์นั้นทำได้ยาก ต้องมีเครื่องมือเฉพาะทางควบคุมอุณหภูมิ [7] จึงเสนอแนวทางการจัดหาเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดอื่นทดแทนเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 การพิจารณาสมบัติกลที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์เปรียบเทียบกับระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 และเหล็กเกรดอื่น โดยต้องมีค่าสมบัติทางกล เช่น ความแข็งที่อุณหภูมิห้องไม่เกิน 36 HRC และความแกร่งที่อุณหภูมิประมาณ -20 °C ควรมีค่าใกล้เคียงค่าที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์อาจจะ

เหมาะสมในการนำมาใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ [8] แต่มีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ค่อนข้างมาก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

1.2.2. ศึกษาผลของการอบคืนตัวต่อสมบัติความแข็งและความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

1.2.3. ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบคืนตัวต่อความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่อุณหภูมิตดสอบ 25, -20, -50 และ -60 °C

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1. ศึกษาโครงสร้างจุลภาค ก่อนและหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope: OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

1.3.2. ศึกษาค่าความแข็งก่อนและหลังการอบคืนตัว (ที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C) ด้วยเครื่องวัดความแข็งชนิดร็อกเวล (Rockwell hardness tester)

1.3.3. ศึกษาส่วนผสมเคมีด้วยเทคนิค Optical Emission Spectroscopy (OES)

1.3.4. ศึกษาค่าความแกร่งหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ด้วยการทดสอบแรงกระแทก (Impact testing) ที่อุณหภูมิตดสอบ 25, -20, -50 และ -60 °C ตามมาตรฐาน ASTM E23 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials) [9]

1.3.5. ศึกษาโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. ทราบโครงสร้างจุลภาค ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

1.4.2. ทราบและเข้าใจถึงผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

1.4.3. สามารถนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้และแก้ไขปัญหาที่เสียหายจากการใช้งานได้



บทที่ 2

ปรีทรรศน์วรรณกรรม

2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กเป็นวัสดุที่สำคัญในอุตสาหกรรม โดยเหล็กที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) เหล็กกล้าคาร์บอนยังคงถูกกัดกร่อนได้ง่ายในบรรยากาศที่มีก๊าซออกซิเจนและน้ำ เป็นองค์ประกอบ แต่ในทางวิศวกรรมอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ เราสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้หลากหลายวิธี เช่น การทาสี การทำแคโทดิก (Cathodic protection) เป็นต้น แต่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ปกติ เช่น ความเข้มข้นของสารเคมีสูง อุณหภูมิสูง หรือสถานที่ที่มีความเป็นกรดสูง การป้องกันที่กล่าวมาข้างต้นอาจไม่ใช่ตัวเลือกที่เหมาะสมในสภาพแวดล้อมที่ไม่ปกติ ดังนั้นต้องใช้เหล็กที่มีการพัฒนาสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ก็คือเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) [10]

เหล็กกล้าไร้สนิมคือ เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม (Cr) ตั้งแต่ประมาณ 11% ขึ้นไปและธาตุคาร์บอน (C) น้อยกว่า 1% ปริมาณธาตุโครเมียมในเหล็กจะช่วยลดอัตราการกัดกร่อนให้น้อยลง เนื่องจากธาตุโครเมียมจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ การที่มีฟิล์มของโครเมียมออกไซด์จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนในบรรยากาศหรือสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนไม่รุนแรง เราสามารถแบ่งเหล็กกล้าไร้สนิมออกเป็น 5 ประเภทตามโครงสร้างจุลภาคดังนี้ 1. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ (Martensitic stainless steel) 2. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรต์ (Ferritic stainless steel) 3. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ (Austenitic stainless steel) 4. เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel) และ 5. เหล็กกล้าไร้สนิมพีเอช (PH stainless steel) [10]

2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างจุลภาคหลักเป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่อยู่ในแผนภูมิสมดุล (Phase diagram) แต่เป็นโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิสูง การที่มีอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์เปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ตามหลักการของเบน (Bain distortion) โดยโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์เป็นโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็ง จึงสามารถเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิม การที่เหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งแรงเป็นผลดีต่อการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงสูงแต่ในทาง

กลับกันการที่มีความแข็งสูงจะเป็นการลดความแกร่ง เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก ดังนี้ [10]

2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ไม่มีนิเกิลผสม

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ที่มีคาร์บอนผสมประมาณ 0.10-0.55% และโครเมียมประมาณ 12-15% เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ในกลุ่มนี้ได้แก่ AISI 403, 410, 416, 420 เป็นต้น ซึ่งนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์กลุ่มนี้หลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว โดยเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์กลุ่มนี้นิยมนำไปใช้ทำเครื่องจักร เครื่องมือตัด [10]

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ที่ผสมโครเมียมประมาณ 16% และมีนิเกิลผสม

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ที่พัฒนามาจากกลุ่ม 2.2.1 โดยการเพิ่มโครเมียมเป็น 16% เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน การที่เพิ่มโครเมียมจะทำให้การอบเป็นโครงสร้างจุลภาคออสเทนไตมากยิ่งขึ้นเนื่องจากโครเมียมเป็นตัวทำให้โครงสร้างจุลภาคแอลฟาของเหล็กเสถียร (Ferrite stabilizer) จึงต้องทำการเติมนิกเกิลประมาณ 2-4% เนื่องจากนิกเกิลเป็นตัวทำให้โครงสร้างจุลภาคแกมมาเสถียร (Austenite stabilizer) เพื่อที่จะทำให้การอบเป็นโครงสร้างจุลภาคออสเทนไตง่ายขึ้น ภายหลังจากอบชุบแข็งนอกจากมีโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์แล้ว ยังมีโครงสร้างจุลภาคออสเทนไตบางส่วน (Retained austenite) หลงเหลืออยู่ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์กลุ่มนี้นิยมใช้งานในวิศวกรรมเครื่องกล อุตสาหกรรมการบิน อุตสาหกรรมเดินเรือ เป็นต้น [10]

2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์กลุ่มพิเศษผสมโครเมียม 12%

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์กลุ่มนี้มีโครเมียม 12% แต่มีการเพิ่มธาตุ วาเนเดียม (V) โมลิบดีนัม (Mo) ทังสเตน (W) ซิลิคอน (Si) ไนโอเบียม (Nb) ไททาเนียม (Ti) เป็นต้น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลเช่น ความแกร่ง ความคืบ (Creep) ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง นิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์กลุ่มนี้ทำชิ้นส่วนเครื่องยนต์กังหันแก๊ส (Gas turbine) หม้อกำเนิดไอน้ำ (Boiler) และวิศวกรรมอากาศยาน [10]

2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์กลุ่มเพิ่มความแข็งแรงโดยทำให้เกิดการตกตะกอนสารประกอบ

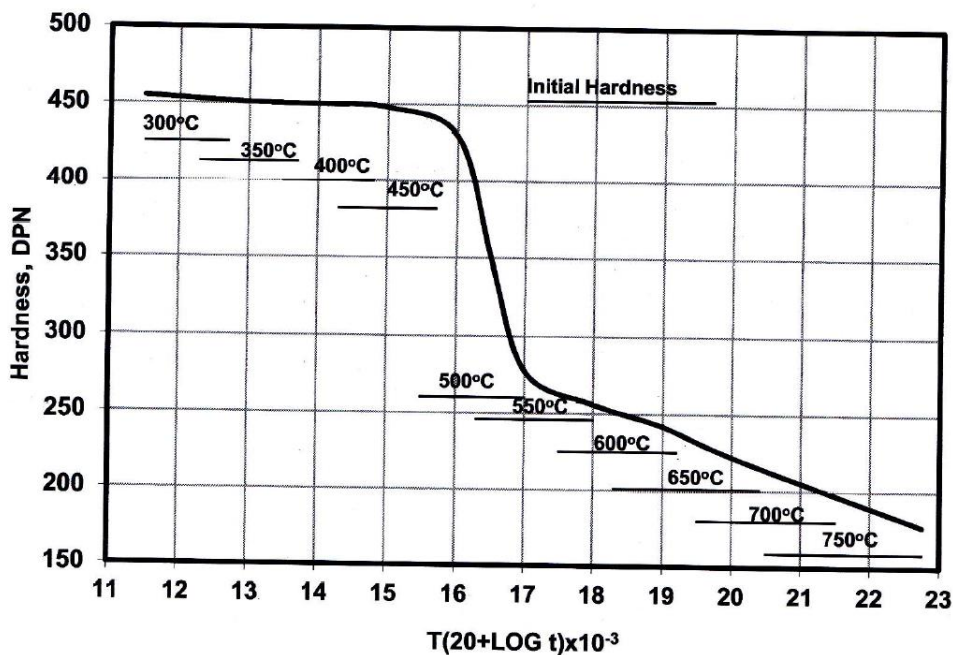
เหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งตกตะกอนหรือเหล็กกล้าไร้สนิมพีเอช เป็นชื่อย่อ เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบให้เกิดตะกอนสารประกอบในโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์หรือออสเทนไต เพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงสูงมาก การเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้สูงขึ้นนั้นเพื่อการใช้งานที่

ต้องการความแข็งแรงสูงเป็นพิเศษโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะแบ่งเกรดเหล็กกล้าไร้สนิมพีเอช ออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก คือ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์พีเอช เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์พีเอช และเหล็กกล้าไร้สนิมกึ่งออสเทนไนต์พีเอช [10]

2.3 การอบคืนตัว

ภายหลังจากอบชุบแข็ง โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์จะมีลักษณะแข็งมากแต่เปราะ จนทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงต้องนำไปอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เป็นโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ เพื่อเพิ่มความเหนียวและความแกร่งแต่ลดความแข็ง เรียกรวมวิธีทางความร้อนนี้ว่า การอบคืนตัว จะทำให้คาร์บอนแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ ได้มากยิ่งขึ้น ทำให้โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์กลายเป็นโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ [10, 11]

หลังการอบชุบแข็ง อาจมีตะกอนของซีเมนไทต์ ขนาดเล็ก ทำให้ความแข็งลดลงเล็กน้อย ในช่วงอุณหภูมิ 300-350 °C เพราะมีการเพิ่มจำนวนของซีเมนไทต์ บริเวณช่วงอุณหภูมิ 400-450 °C ความแข็งเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่ 450 °C เนื่องจากมีการเพิ่มความแข็งทุติยภูมิ (Secondary hardening) โดยเกิดการตกตะกอนของ M_2X , M_3C และ M_7C_3 เป็นตัวเพิ่มความแข็งทุติยภูมิ ถ้าการอบคืนตัวมากกว่า 500 °C จะเกิดตะกอน $M_{23}C_6$ ที่บริเวณขอบเกรนซึ่งเกิดจากการรวมตัวของตะกอน M_7C_3 ทำให้ค่าความแข็งลดลง ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นกราฟการอบคืนตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ผสมโครเมียม 12% คาร์บอน 0.14% (มวล) เมื่อ T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และ t = เวลาการอบคืนตัว 1-100 ชั่วโมง [10]

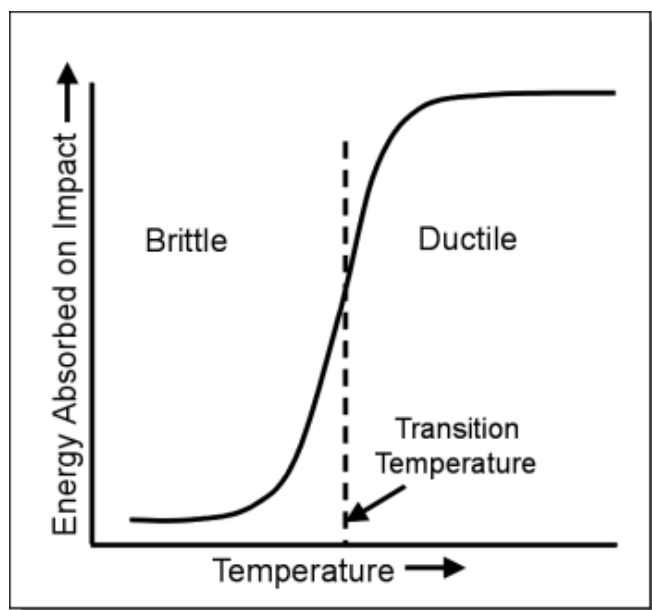
2.4 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสมบัติระหว่างเหนียวและเปราะ

ในช่วงยุคสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการสนใจการแตกหักแบบเปราะของเรือส่งสินค้าและรถถัง T-2 โดยเรือส่งสินค้า 1,289 ลำ จาก 4,694 ลำ พบปัญหาการแตกหักที่รุนแรงตามรูปที่ 2.2 บริเวณแผ่นเหล็กของเรือที่เริ่มเกิดรอยแตกจะมีค่าพลังงานการกระแทกต่ำที่อุณหภูมิแตกหัก (Failure temperature) จากเหตุการณ์นี้ได้นำไปสู่แนวคิด หลักการของอุณหภูมิทรานซิชัน (Transition temperature) [12]



รูปที่ 2.2 แสดงรอยแตกหักของเรือส่งสินค้าในช่วงยุคสงครามโลกครั้งที่ 2 [12]

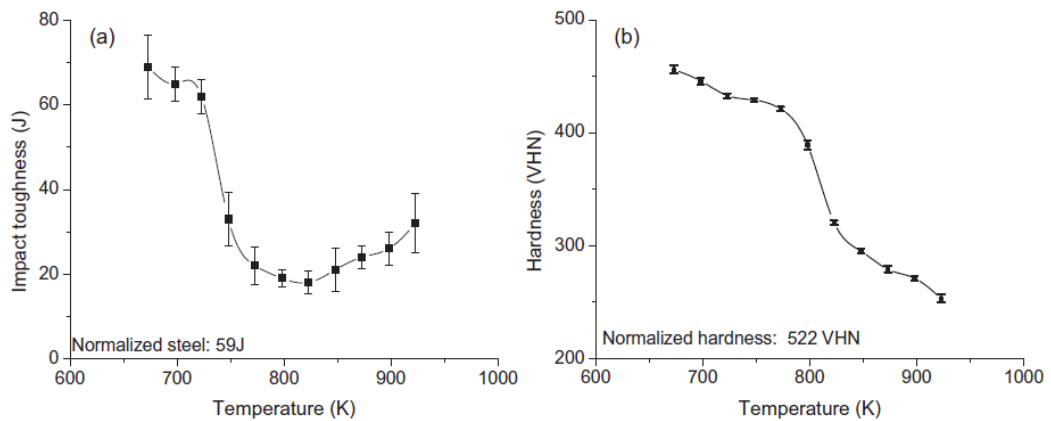
ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสมบัติระหว่างเหนียวและเปราะ (Ductile to Brittle Transition Temperature, DBTT) จะเป็นค่าที่ความแข็งแรงลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือเป็นจุดกึ่งกลางของกราฟ อุณหภูมิกับค่า Impact Energy ในรูปที่ 2.3 อุณหภูมิที่เหนือจุดกึ่งกลางนี้ชิ้นงานจะเกิดการแตกหักแบบเหนียว แต่ในขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดกึ่งกลางชิ้นงานจะเกิดการแตกหักแบบเปราะ ซึ่งอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสมบัติระหว่างเหนียวและเปราะส่วนใหญ่จะถูกศึกษาผ่านวิธีการทดสอบแรงกระแทก (Impact testing) [12]



รูปที่ 2.3 จุดกึ่งกลางของอุณหภูมิทรานซิชันของกราฟพลังงานการกระแทกกับอุณหภูมิต่างๆ [13]

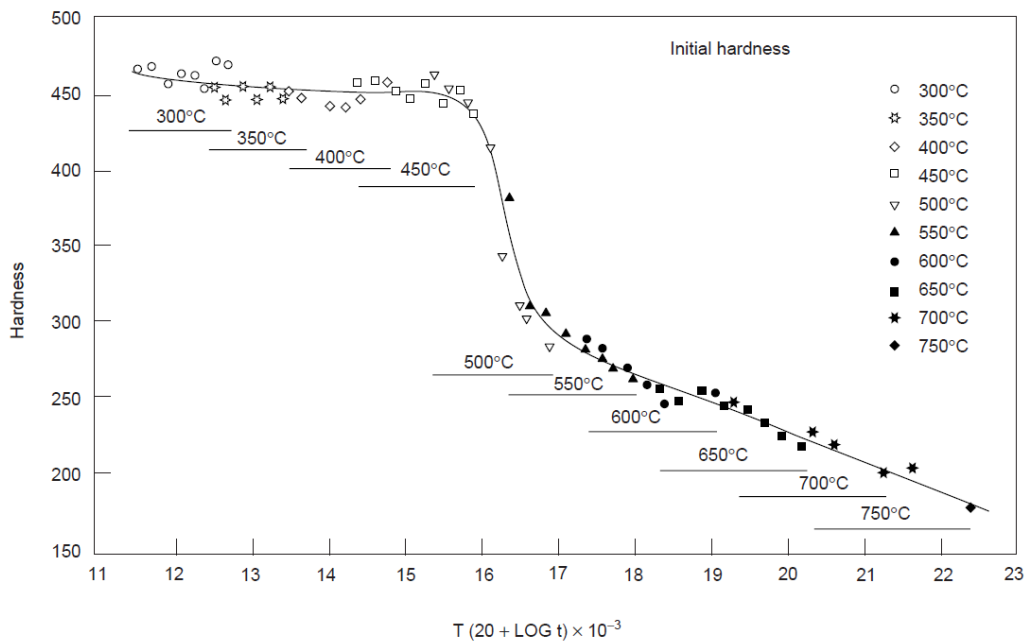
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G. Chakraborty และคณะ [6] ศึกษาผลของการอบคืนตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ในช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัวที่ 400-550 °C ค่าความแข็งมีค่าลดลงแต่ความแกร่งมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการลดความหนาแน่นดิสโลเคชัน (Dislocation density) ของโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์และมีการแพร่ธาตุคาร์บอนออกจากโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ ในช่วงอุณหภูมิ 450-525 °C จะเกิด Fe_2C เป็นคาร์ไบด์หลักที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 550 °C บริเวณขอบเกรนจะมี $M_{23}C_6$ เกิดขึ้น และอุณหภูมิการอบคืนตัวที่สูงขึ้นนั้นจะยังคงมีคาร์ไบด์ $M_{23}C_6$ ที่ขอบเกรนอยู่ แต่ไม่มีคาร์ไบด์ที่เนื้อพื้น (Matrix) เกิดขึ้น ส่งผลให้เนื้อพื้นอ่อนตัว (Softening) ทำให้เหล็กมีความแกร่งเพิ่มขึ้นแต่ความแข็งลดลง โดยจะแสดงค่าความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ตามรูปที่ 2.4



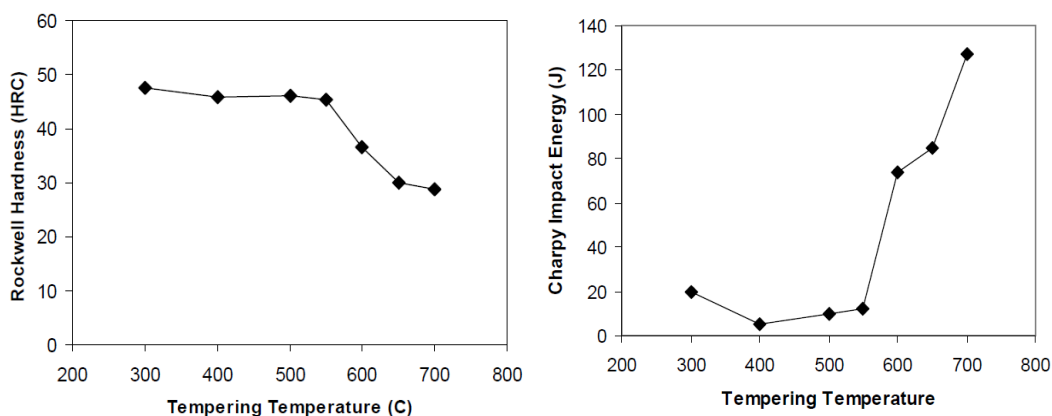
รูปที่ 2.4 ค่าความแกร่งและความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ [6]

M. McGuire [14] ได้ศึกษาผลของการอบคืนตัวต่อความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ พบว่าที่อุณหภูมิการอบคืนระหว่าง 150-400 °C จะมีการคลายความเครียดเกิดขึ้น (Stress relief) ซึ่งจะมีการโตอย่างช้าๆของอนุภาคซีเมนไทต์ละเอียดและส่งผลให้มีการลดจำนวนคาร์บอนในสารละลายของแข็ง (Solid solution) ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง ที่อุณหภูมิ 400 °C จะเกิดตะกอนของ M_2X และ M_7C_3 โดยการเปลี่ยนแปลงจาก M_3C เป็น M_7C_3 เป็นผลทำให้เกิด การแข็งตัวแบบทุติยภูมิ ที่อุณหภูมิ 500 °C คาร์ไบต์หยาบ $M_{23}C_6$ และ M_7C_3 เริ่มโตที่ขอบเกรน (Grain boundary) และที่อุณหภูมิ 550 °C ขึ้นไปพบว่าโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิเหล่านี้คือการสูญเสียคาร์บอนจากสารละลายของแข็ง เป็นผลทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์มีความแข็งลดลงและมีความแกร่งมากขึ้นโดยจะแสดงค่าความแข็งที่ลดลงหลังผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ที่มีโครเมียม 12% หลังตามรูปที่ 2.5



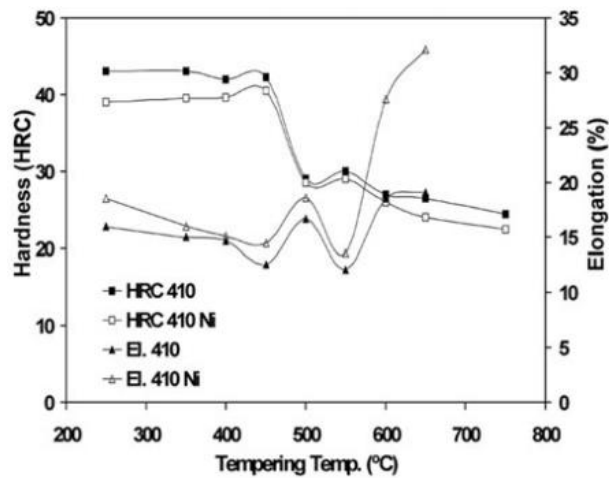
รูปที่ 2.5 ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ที่มีโครเมียมผสม 12% หลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ [14]

E. Mabruhi และคณะ [15] พบว่าการอบคืนตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่เติมธาตุโมลิบดีนัม (Mo) ลงไป ในช่วงอุณหภูมิ 400-550 °C มีความแข็งค่อนข้างคงที่เนื่องจากการแข็งตัวแบบทุติยภูมิ โดยมีตะกอนคาร์ไบด์ของ M_7C หรือ $M_{23}C_6$ เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิมากกว่า 550 °C อนุภาคของคาร์ไบด์ที่เสถียรเหล่านี้จะรวมตัวกันทำให้ความแข็งมีค่าลดลงเนื่องจากการลดปริมาณคาร์บอนในเนื้อพื้น และที่อุณหภูมิของการอบคืนตัวสูงขึ้นทำให้ค่าความแข็งมีค่าลดลงแต่ค่าความแกร่งมีค่าสูงขึ้นเป็นผลจากโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์กลายเป็นเฟร์ไรต์ รวมทั้งเป็นผลของการรวมตัวของคาร์ไบด์และโครงสร้างจุลภาคเฟร์ไรต์อาจเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิสูงตามสมดุลอุณหพลศาสตร์ โดยจะแสดงค่าความแข็งและความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่ผสมธาตุโมลิบดีนัมหลังผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามรูปที่ 2.6



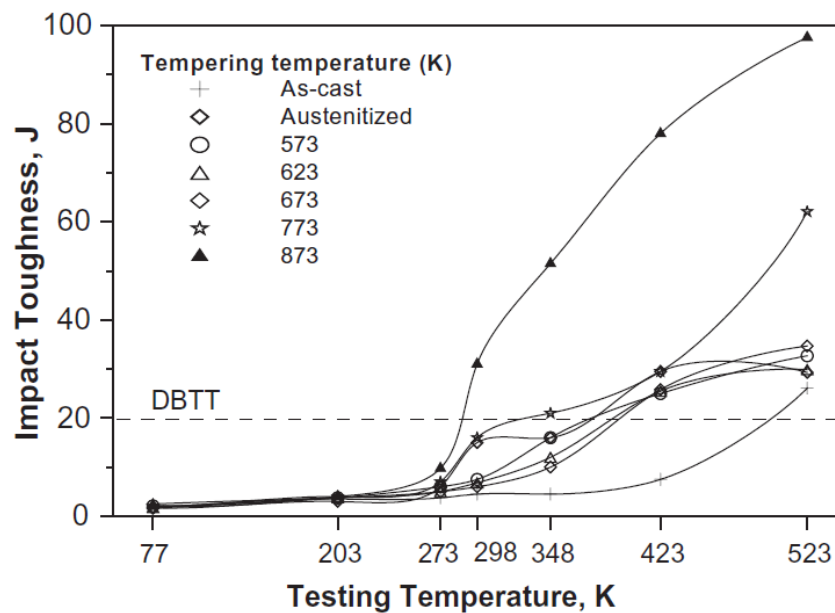
รูปที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวต่อค่าความแข็งและความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่ผสมธาตุโมลิบดีนัม (Mo) [15]

M. Mirzaee และคณะ [16] ได้ศึกษาการเย็นตัว (quenching) และการอบคืนตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 พบว่าที่อุณหภูมิการอบคืนตัวสูงขึ้นทำให้ความแข็งลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงขึ้น (Elongation) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณความเหนียวของโลหะ สามารถทำได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ที่อุณหภูมิ 450 °C เกิดการสลายตัวของโครงสร้างออสเทนไนต์และมีการเกิดคาร์ไบด์ปฐมภูมิ (Primary carbide) ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง ที่อุณหภูมิสูงคาร์ไบด์ปฐมภูมิจะสลายตัวทำให้ความแข็งลดลงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 550 °C จะมีการสร้างคาร์ไบด์ที่เสถียรคือ M_7C หรือ $M_{23}C_6$ ขึ้นทำให้ความแข็งมีค่าสูงขึ้นและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคาร์บอนจะแพร่ออกจากเนื้อพื้นไปสร้างคาร์ไบด์ M_7C หรือ $M_{23}C_6$ ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนในเนื้อพื้นลดลงทำให้ความแข็งมีค่าลดต่ำลงแต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าสูงขึ้น ค่าความแข็งและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 และเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ผสมธาตุนิกเกิล (Ni) และผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวต่อค่าความแข็งและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนไซต์เกรด 410 และเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ผสมธาตุนิเกิล (Ni) [16]

C. Hsu และคณะ [17] ได้แสดงผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวต่อค่าอุณหภูมิ DBTT ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ CA-15 ซิลิกอนต่ำ หลังการอบให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนต์ (Austenitizing) ที่อุณหภูมิ 1010 °C และการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าค่าความแกร่งหลังทดสอบที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง (25-250 °C) มีแนวโน้มในทางเดียวกัน และชิ้นงานที่ผ่านการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าอุณหภูมิ DBTT ต่ำกว่าตัวอย่างที่ได้รับมา (As-cast) นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการอบคืนตัวยิ่งสูงความสามารถในการลดค่าอุณหภูมิ DBTT ยิ่งดีขึ้น ส่งผลให้ความแกร่งที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าที่สูงขึ้น โดยจะแสดงผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวต่อค่าอุณหภูมิ DBTT ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ CA-15 ซิลิกอนต่ำตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวต่อค่าอุณหภูมิ DBTT ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ CA-15 ซิลิกอนต่ำ ที่อุณหภูมิตดสอบต่างๆ [17]

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามที่ได้นำเสนอพบว่าอุณหภูมิการอบคืนตัวหลัง 500 °C ค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 จะมีค่าลดลงแต่ความแกร่งมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าค่าอุณหภูมิ DBTT มีค่าต่ำลง และเป็นผลดีเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการอบคืนตัว จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการทำวิจัยเพื่อลดความแข็ง เพิ่มความแกร่งและลดค่าอุณหภูมิ DBTT ให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 เพื่อช่วยลดความเสี่ยงจากการแตกหักขณะใช้งาน เป็นการยืดอายุการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ให้ยาวนานยิ่งขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

- เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร และยาว 50 เซนติเมตร

- สารละลายวิลเลลล่า (Vilella's reagent) [18] ประกอบด้วย กรดพิคริก (Picric Acid) 1 g กรดเกลือ (HCl) 5 ml และ เอทานอล (Ethanol) 95 ml

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมืออบชุบความร้อน

- เตอบไฟฟ้า Model: Carbolite AAF 1100

3.2.2 เครื่องมือเตรียมผิวชิ้นงาน

- กระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 และ 2000

- ผงเพชรขนาด 3 และ 1 ไมโครเมตร

- ผ้าสักหลาดสำหรับขัดมัน

- เครื่องขัดผิวชิ้นงาน

3.2.3 เครื่องมือในการทดลองและวิเคราะห์

- เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (Optical Emission Spectrometer: OES) Spectrolab Model: Lavm12

- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope: OM)

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) Hitachi Model: SU3900

- เครื่องวัดความแข็งชนิดร็อกเวล (Rockwell hardness tester) Model: ZHR 8150 LK

-เครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact testing) Zwick/Roell Model: RKP450

-เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) Bruker Model: D8 advance

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

นำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ทรงกระบอกตามหัวข้อ 3.1 มาตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร สำหรับทดสอบโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และโครงสร้างผลึก สำหรับชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกจะตัดให้มีขนาด กว้าง 12 มิลลิเมตร สูง 12 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E23 [9]

3.3.1 ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

นำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ทรงกระบอกตามหัวข้อ 3.3 มาวิเคราะห์ปริมาณธาตุและธาตุผสม โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (Optical Emission Spectrometer: OES)

3.3.2 การอบชุบแข็งและการอบคืนตัว

นำเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ขนาดตามหัวข้อ 3.3 อบที่อุณหภูมิ 980 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในน้ำมัน จากนั้นนำไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

3.3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.3.3.1 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ก่อนการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว

-นำชิ้นงานก่อนการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว มาทำการขัดผิวหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 และ 2000

-นำชิ้นงานหลังการขัดหยาบมาขัดผิวมันด้วยผงเพชรขนาด 3 และ 1 ไมโครเมตร ตามลำดับ ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

-กัดผิวด้วยสารละลายอวิเลลล่า และล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

-ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิค

-ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.3.2 เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 หลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว

-ทำตามหัวข้อ 3.3.3.1

3.3.4 การตรวจสอบความแข็ง

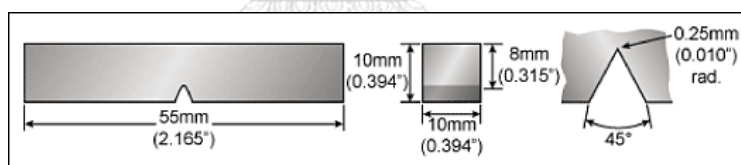
-เตรียมชิ้นงานตามหัวข้อ 3.3.3.1 และ 3.3.3.2

-ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบ แบบ Rockwell scale B (HRB)

-ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบ แบบ Rockwell scale C (HRC)

3.3.5 การตรวจสอบความแกร่งและลักษณะรอยแตก

นำชิ้นงานขนาด กว้าง 12 มิลลิเมตร สูง 12 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร จากหัวข้อ 3.3 ที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว ตามหัวข้อ 3.3.2 แล้วนำมาตัดให้มีขนาด กว้าง 10 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM E23 [9] แสดงตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดมาตรฐานชิ้นงานทดสอบความแกร่ง ASTM E23 [19]

3.3.5.1 ทดสอบความแกร่งด้วยเครื่องทดสอบการกระแทก

-นำชิ้นงานขนาดตามมาตรฐาน ASTM E23 ทดสอบความแกร่งด้วยเครื่องทดสอบการกระแทกที่อุณหภูมิ 25, -20, -50 และ -60 °C

3.3.5.2 ตรวจสอบลักษณะรอยแตก

-นำชิ้นงานหลังการทดสอบการกระแทกไปตรวจสอบลักษณะรอยแตกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.6 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.3.6.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึก

-นำชิ้นงานก่อนและหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว มาทำการขัดผิวหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 และ 2000

-นำชิ้นงานหลังการขัดหยาบมาขัดผิวมันด้วยผงเพชรขนาด 3 และ 1 ไมโครเมตร ตามลำดับ ล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

-กัดผิวด้วยสารละลายวิเลลล่า และล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอล

-ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิค

-ตรวจสอบโครงสร้างผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.3.6.2 วิเคราะห์ปริมาณออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite)

-เตรียมตัวอย่างเหมือนหัวข้อ 3.3.6.1

-ตรวจสอบปริมาณออสเทนไนต์ตกค้าง ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามมาตรฐาน ASTM E975 [20]

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

นำชิ้นงานจากหัวข้อ 3.3.1 มาทดสอบวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค OES ได้ผลตามตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ส่วนผสมเคมีของชิ้นงานที่ได้รับวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (wt.-%)

ธาตุ ชิ้นงานที่ ได้รับ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
	0.125	0.416	0.386	0.022	0.018	12.117	0.011	0.421	Bal.

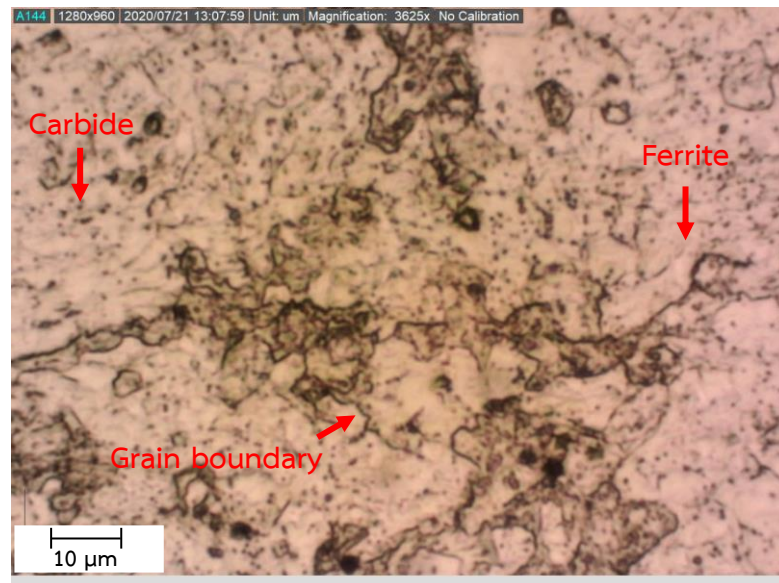
จากการเปรียบเทียบส่วนผสมเคมีของชิ้นงานที่ได้รับมาที่แสดงในตารางที่ 4-1 กับมาตรฐานส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 [14] ตามตารางที่ 4-2 พบว่าส่วนผสมเคมีใกล้เคียงกัน แสดงว่าชิ้นงานที่ได้รับมาเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

ตารางที่ 4-2 มาตรฐานส่วนผสมเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ (wt.-%) [14]

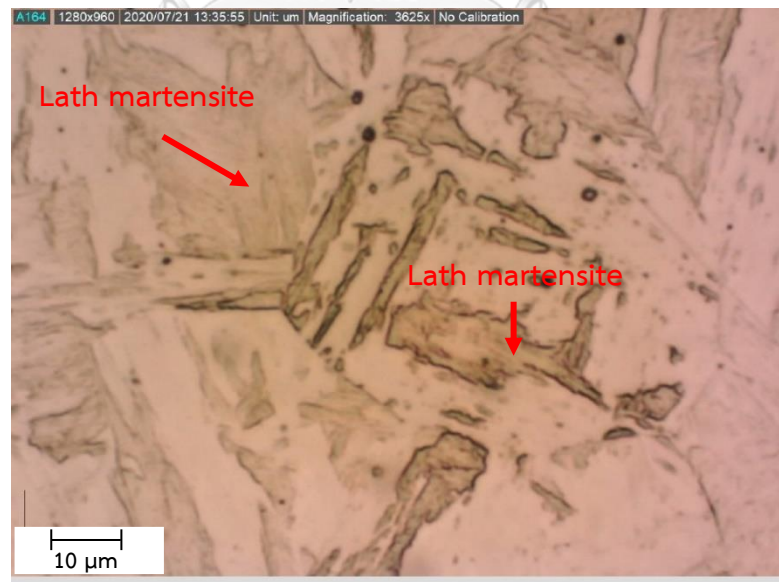
C	Mn	Si	Cr	S	Fe
0.15 Max	1.00 Max	1.00 Max	11.50 - 13.50	0.03 Max	Bal.

4.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับและชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็ง

นำชิ้นงานก่อนการอบคืนตัวจากหัวข้อ 3.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงได้ภาพแสดงในรูปที่ 4.1 และด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ภาพตามรูปที่ 4.2

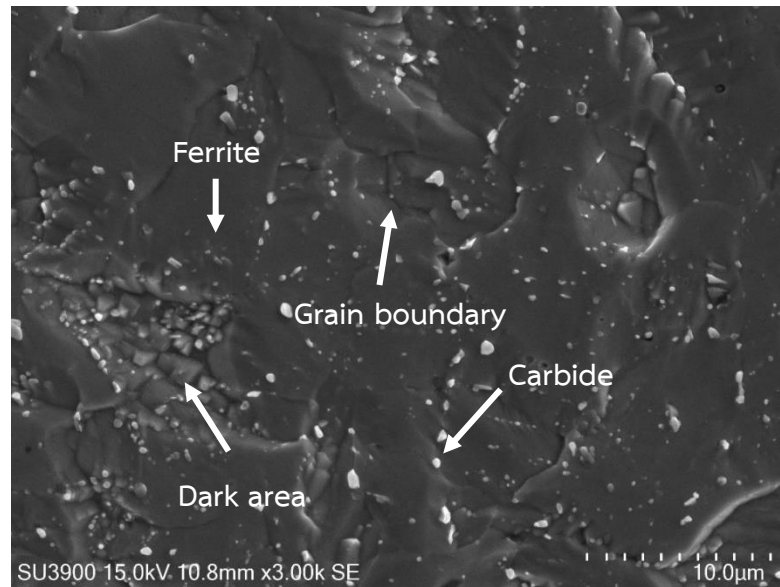


(ก) ชิ้นงานที่ได้รับ

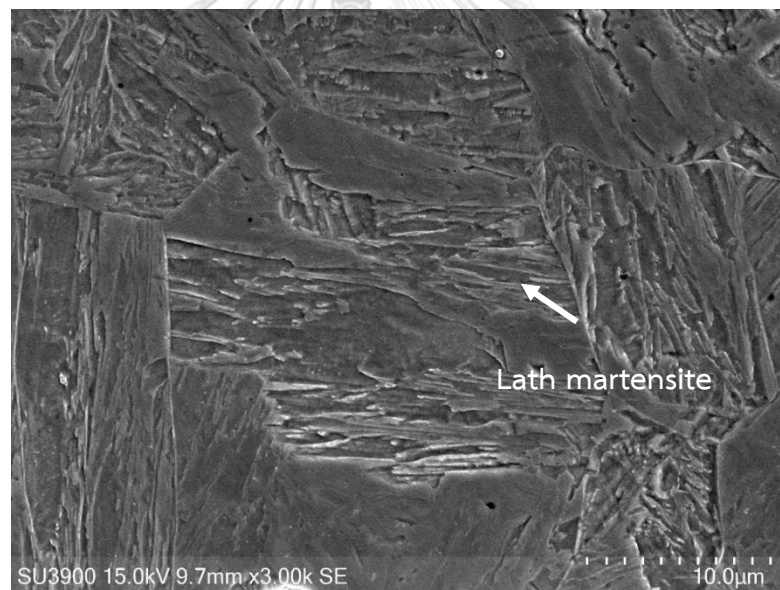


(ข) ชิ้นงานผ่านการอบชุบแข็ง

รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (ก) และชิ้นงานผ่านการอบชุบแข็ง (ข) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) กัดด้วยสารละลายวิเลลล่า (Vilella's reagent) เวลา 10-15 วินาที



(ก) ชิ้นงานที่ได้รับ

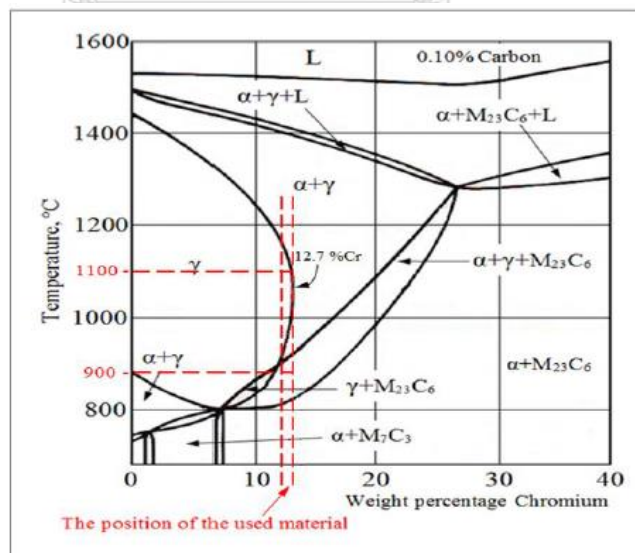


(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็ง

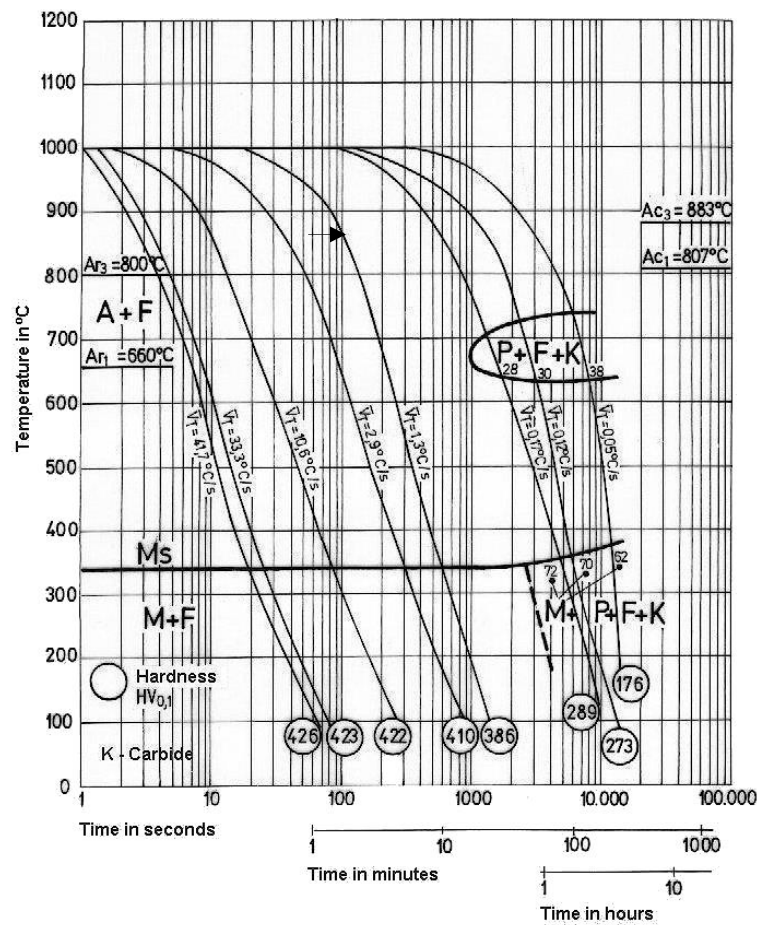
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (ก) และ ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็ง (ข) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของชิ้นงานที่ได้รับ พบว่ามี ขอบเกรน โครงสร้างจุลภาคเฟร์ไรต์ (α) และโลหะคาร์ไบด์ ($M_{23}C_6$) ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 (ก) นอกจากนี้ยังพบบริเวณสี

เข้ม (Dark area) เป็นผลจากการกัดกรดลึก (Deep etch) ทำให้บางบริเวณที่ถูกกัดแล้วเนื้อพื้นไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณชิ้นงานที่ต่ำหรือลึกลงไปจะเป็นบริเวณสีเข้ม แสดงให้เห็นชัดเจนในรูปภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนตามแบบส่องกราด ตามรูปที่ 4.2 (ก) ชิ้นงานมีปริมาณธาตุคาร์บอน (C) 0.125% จากแผนภูมิสมดุลเฟส (Phase diagram) ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ในรูปที่ 4.3 [21, 22] ชิ้นงานนี้อาจผ่านการอบอ่อน (Annealing) เนื่องจากการอบอ่อนมีวัตถุประสงค์หลักในการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าให้มีความสม่ำเสมอและลดความแข็งของชิ้นงานลงหรือเพิ่มความเหนียวของชิ้นงานให้สูงขึ้น มักจะใช้กับเหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น จนกระทั่งมีลักษณะเกรนยาวหรือขนาดเกรนไม่สม่ำเสมอ เพื่อที่จะนำไปขึ้นรูปเย็นต่อไปได้โดยไม่เกิดการแตก [23] ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและความแข็งตามเอกสารงานวิจัยอื่นพบว่าชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 อาจผ่านการอบอ่อนใต้อุณหภูมิวิกฤต หรือการอบอ่อนกระบวนการ (sub-critical annealing or process annealing) [5, 24] โดยการอบอ่อนใต้อุณหภูมิวิกฤต จะเกิดการตกผลึกของเกรนเฟอร์ไรต์ใหม่ (Recrystallization of ferrite) เกรนที่เกิดขึ้นใหม่นี้ไม่มีความเครียดสะสมอยู่จึงทำให้มีความเหนียวและพร้อมที่จะผ่านการขึ้นรูปเย็นต่อไปได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนใต้อุณหภูมิวิกฤต ก็คือช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ A_1 ตามรูปที่ 4.4 ประมาณ 25-75 °C โดยให้เวลานานเพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกผลึกของเกรนเฟอร์ไรต์ใหม่ได้ทั้งหมด หลังจากนั้นให้เย็นตัวในอากาศ [23]



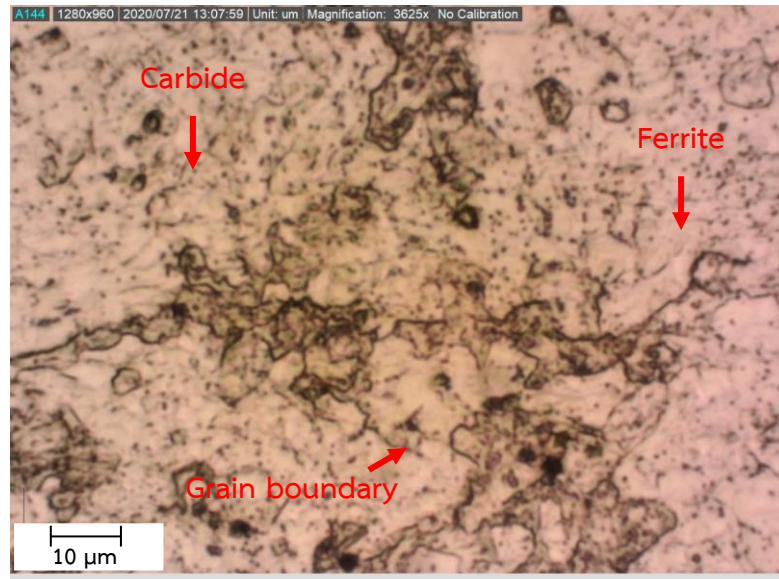
รูปที่ 4.3 แผนภูมิสมดุลเฟส (Phase Diagram) ของ Cr-Fe-C ที่ C 0.10% [21, 22]



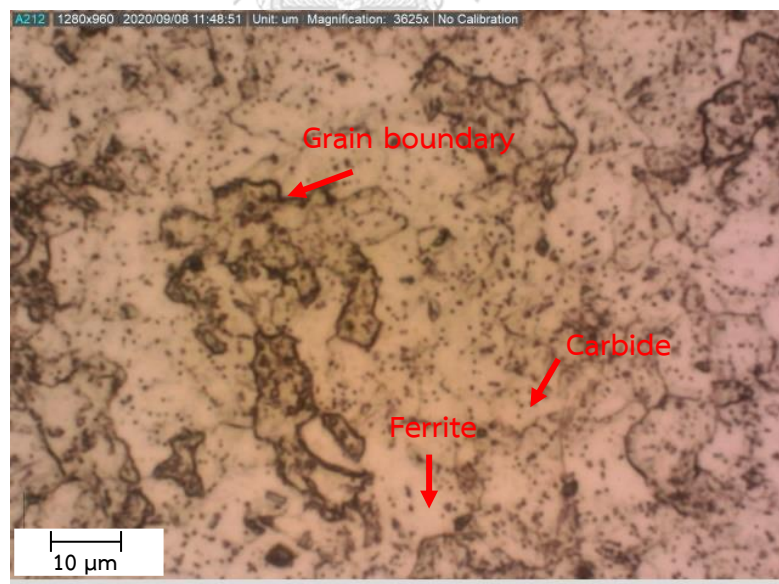
รูปที่ 4.4 Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram ของเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนไซต์เกรด 410 [25]

จากการคาดการณ์ว่าชิ้นงานที่ได้รับอบผ่านการอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต จึงได้นำชิ้นงานที่ได้รับไปทดสอบ อบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต เมื่อศึกษาเอกสารงานวิจัยพบว่า การอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤตของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 จะอบที่อุณหภูมิประมาณ 760 °C และเย็นตัวในอากาศ [5, 24] และขนาดชิ้นงานที่มีขนาดไม่เกินครึ่งนิ้ว จะใช้เวลาอบอยู่ที่ 1 ชั่วโมง [5] เมื่อนำชิ้นงานหลังผ่านการอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต ไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและความแข็งเพื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ได้รับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต มีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ ตามรูปที่ 4.5 คือ พบโครงสร้างจุลภาคเฟร์ไรต์ ขอบเกรนและคาร์ไบด์ จากผลทดสอบความแข็งในหัวข้อ 4.3 ชิ้นงานที่ได้รับกับชิ้นงานที่อบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต มีค่าเท่ากันคืออยู่ที่ 94 HRB จากผลที่สอดคล้องกันของโครงสร้างจุลภาคและความ

แข็ง จึงสามารถยืนยันได้ว่าชิ้นงานที่ได้รับคือ เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่ผ่านการอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต



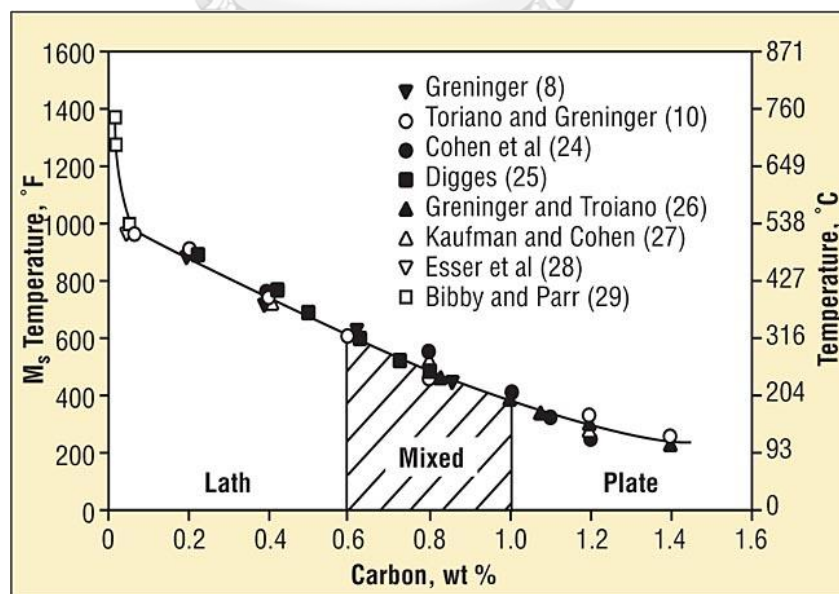
(ก) ชิ้นงานที่ได้รับ



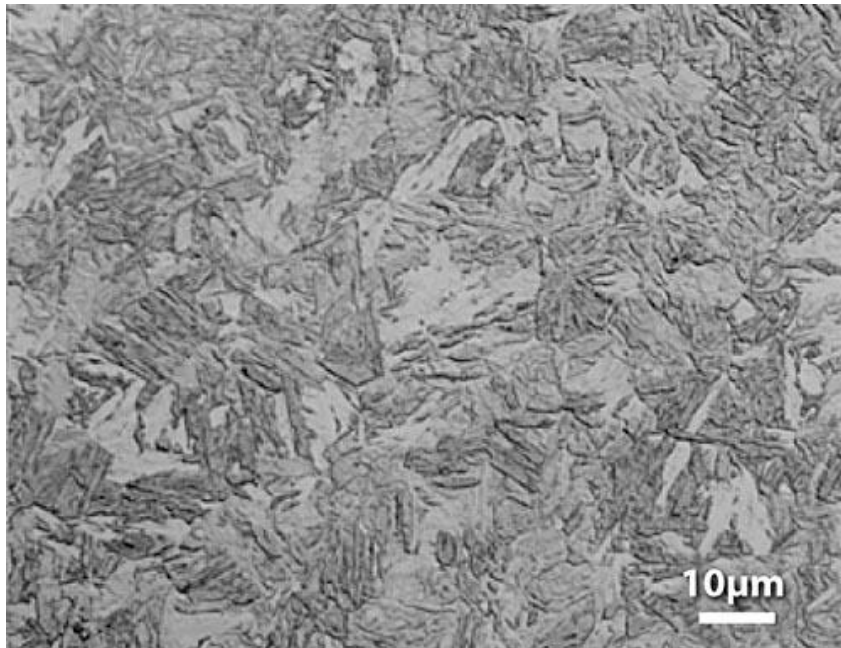
(ข) ชิ้นงานอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต

รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (ก) กับชิ้นงานอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต (ข) กัดด้วยสารละลายวิลเลล่า (Vilella's reagent) เวลา 10-15 วินาที

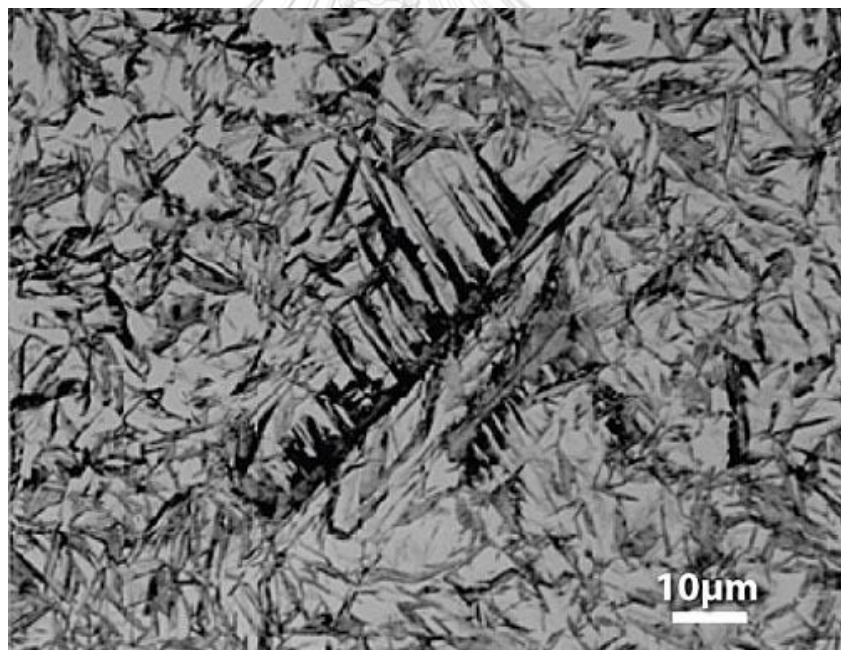
ภาพกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของชิ้นงานอบชุบแข็งจะพบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ตามรูปที่ 4.1 (ข) และภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามรูปที่ 4.2 (ข) โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์สามารถแบ่งเป็น Lath และ Plate martensite ตามปริมาณคาร์บอน ถ้าปริมาณคาร์บอนมีค่าไม่เกิน 0.6% จะเป็น Lath martensite มีลักษณะยาว แผ่นบาง และรวมเป็นกลุ่ม แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนเกิน 1.0% จะเป็น Plate (or lenticular) martensite มีลักษณะโครงสร้างคล้ายเข็มหรือแผ่นแหลมคล้ายเลนส์ซ้อนกันในโครงสร้างออสเทนไนต์ นอกจากนี้ยังมี Mix martensite เป็นการผสมกันระหว่าง Lath และ Plate martensite โดยปริมาณคาร์บอนจะอยู่ในช่วง 0.6–1.0% [26] ประเภทของมาร์เทนไซต์และลักษณะโครงสร้าง Lath และ Plate martensite แสดงตามรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ เมื่อเทียบส่วนผสมเคมีตามตารางที่ 2-1 ธาตุคาร์บอนมีค่า 0.125% ซึ่งต่ำกว่า 0.6% และจากรูปภาพกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงตามรูปที่ 4.1 (ข) จะพบโครงสร้างเป็น Lath martensite และคาร์ไบด์ที่พบในชิ้นงานที่ได้รับ จะละลายกลับเข้าเนื้อพื้น ขณะเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ที่มีโครงสร้างผลึก Face Center Cubic (FCC) ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์และเหล็กคาร์ไบด์ตามสภาวะสมดุลได้ทันก่อนการเย็นตัวถึงอุณหภูมิห้อง เนื่องจากคาร์บอนต้องใช้เวลาในการแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์จึงมีคาร์บอนอิ่มตัวและมีการบิดเบือนโครงสร้างตามหลักการของ Bain distortion กลายเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีโครงสร้างผลึก Body Center Tetragonal (BCT) [10]



รูปที่ 4.6 ประเภทของการเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ตามปริมาณคาร์บอน [26]



(ก) Lath martensite



(ข) Plate (or lenticular) martensite

รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ Lath martensite (ก) และ Plate martensite (ข) [26]

ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายสูงขึ้น ในรูปที่ 4.2 (ข) จะเห็น Lath martensite ที่มีลักษณะเป็นแผ่นอย่างชัดเจน และพบคาร์ไบด์บางส่วนที่ยังไม่ละลายกลับเนื้อพื้น เมื่อเทียบกับภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ได้รับ ในรูปที่ 4.2 (ก) พบว่าเม็ดคาร์ไบด์หายไปเป็นจำนวนมากแทบจะไม่หลงเหลือคาร์ไบด์อยู่เลย

4.3 ตรวจวัดความแข็งร็อกเวล (Rockwell hardness) ชิ้นงานที่ได้รับและชิ้นงานผ่านการอบชุบแข็ง

นำชิ้นงานจากหัวข้อ 3.3.4 วัดความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งร็อกเวล B และ C ได้ผลตามตารางที่ 4-3 (ภาคผนวก จ)

ตารางที่ 4-3 ความแข็งของชิ้นงานที่ได้รับ ชิ้นงานอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต และชิ้นงานหลังการอบชุบแข็ง (ภาคผนวก จ)

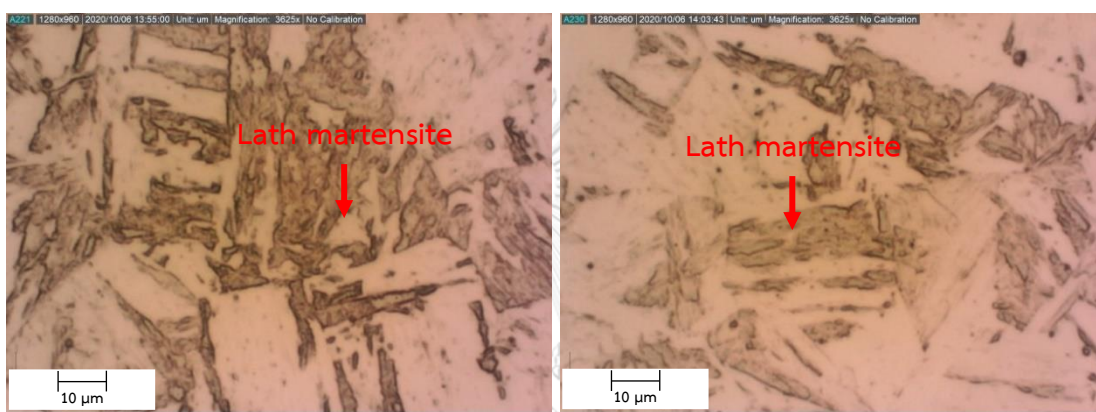
ตัวอย่าง	ชิ้นงานที่ได้รับ	อบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต	อบชุบแข็ง
ความแข็ง	94.48 ± 0.53 HRB* (100 kgf)	94.56 ± 1.05 HRB* (100 kgf)	44.48 ± 1.12 HRC (150 kgf)
ระดับ [3, 4]	สูง	สูง	ปานกลาง

หมายเหตุ ความแข็งเฉลี่ย ± SD *ตามมาตรฐาน ASTM [3] ค่าความแข็งมีค่าต่ำกว่า 20 HRC ให้ใช้ค่า HRB ถ้าค่าความแข็งสูงกว่า 100 HRB ให้ใช้ค่า HRC

จากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยอื่น ค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่มีคาร์บอน 0.15% ในสภาวะอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต ที่อุณหภูมิไม่เกิน 760 °C [5, 24] มีค่าประมาณ 82-96 HRB หลังการอบชุบแข็ง มีค่าความแข็ง 38-45 HRC [27] จากผลการทดลองค่าความแข็งของชิ้นงานที่ได้รับ (As-received state) ที่มีคาร์บอน 0.125% และชิ้นงานอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต มีค่าความแข็งประมาณ 94 HRB ส่วนชิ้นงานหลังอบชุบแข็งมีค่าประมาณ 44 HRC ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

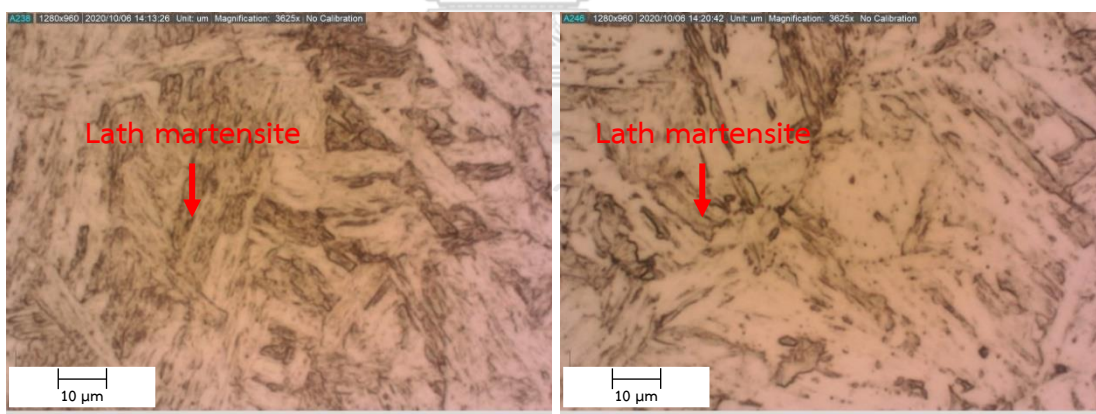
4.4 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C

นำชิ้นงานหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C จากหัวข้อ 3.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) ได้ภาพตามรูปที่ 4.8 และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ได้ภาพตามรูปที่ 4.9



(ก) การอบคืนตัวที่ 300 °C

(ข) การอบคืนตัวที่ 400 °C

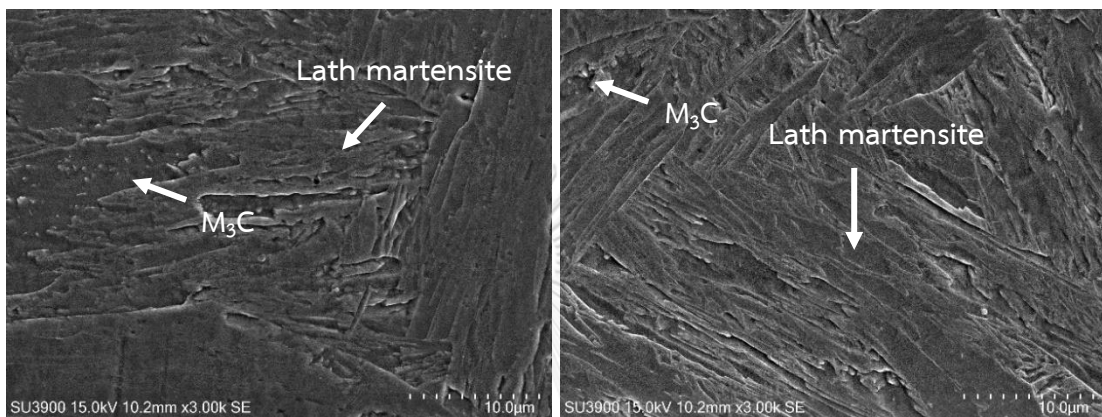


(ค) การอบคืนตัวที่ 500 °C

(ง) การอบคืนตัวที่ 650 °C

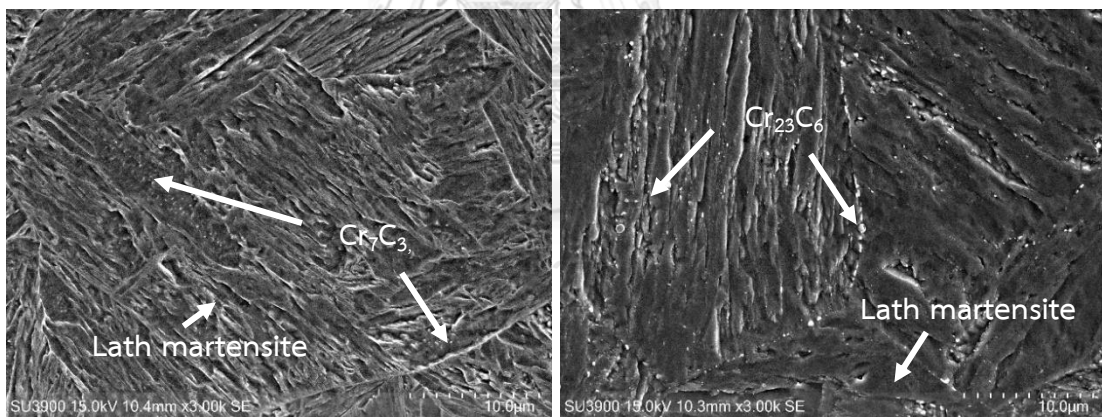
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 (ก) 400 (ข) 500 (ค) และ 650 °C (ง) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กัดชิ้นงานด้วยสารละลาย วิเลลล่า (Vilella's reagent) เวลา 10-15 วินาที

ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่ 300, 400, 500 และ 650 °C จะพบโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ ที่เป็น Lath martensite เหมือนกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งรูปที่ 4.1 (ข) กำลังขยายในระดับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ภาพที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกัน แต่ในขณะที่ภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบความแตกต่าง ในรูปที่ 4.9



(ก) การอบคืนตัวที่ 300 °C

(ข) การอบคืนตัวที่ 400 °C



(ค) การอบคืนตัวที่ 500 °C

(ง) การอบคืนตัวที่ 650 °C

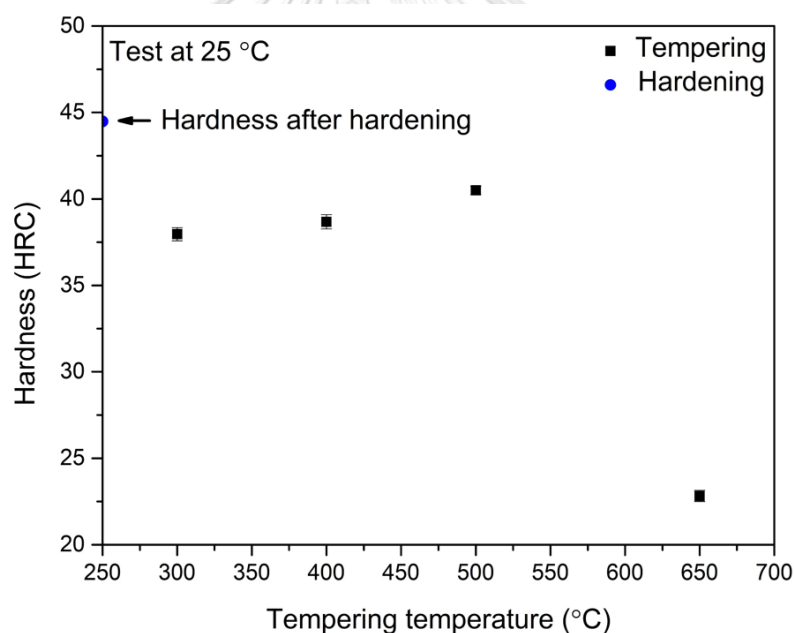
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 (ก) 400 (ข) 500 (ค) และ 650 °C (ง) ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C มีโครงสร้างจุลภาคเป็น Lath martensite และมีตะกอน M_3C เกิดขึ้น เหมือนกับชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็ง ตามรูปที่ 4.9 (ก) และ 4.9 (ข) แต่การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 °C จะพบโครงสร้างจุลภาค lath martensite และมีตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ขนาดเล็กชนิด

Cr_7C_3 เกิดขึ้นตาม รูปที่ 4.9 (ค) ตะกอนที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดการแข็งตัวแบบทุติยภูมิ (Secondary hardening) [14, 28] คือ ทำให้เหล็กมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอีกจากค่าความแข็งของโครงสร้าง มาร์เทนไซต์ การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C พบเห็นโครงสร้างจุลภาค Lath martensite และพบ ตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรน ตามรูปที่ 4.9 (ง) ตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นชนิด $Cr_{23}C_6$ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของตะกอน Cr_7C_3 [14, 28] G. Chakraborty และคณะ [6] ได้ทำการตรวจสอบแล้วว่าคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 650 °C นั้นเป็น คาร์ไบด์ชนิด $Cr_{23}C_6$

4.5 ตรวจวัดความแข็งร็อกเวล (Rockwell hardness) ขึ้นงานผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C

นำชิ้นงานหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C จากหัวข้อ 3.3.4 ทดสอบวัดค่าความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งร็อกเวล HRC ได้ผลตามรูปที่ 4.10

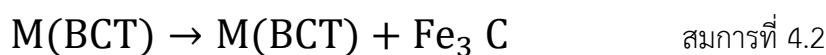
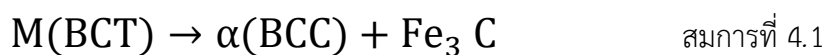


รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งของชิ้นงานมาร์เทนไซต์เกรด 410 หลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C)

จากการตรวจสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 หลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C พบว่าการอบชุบแข็งจะนำไปสู่การเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ที่มีความแข็งแรงสูง มีความแกร่งต่ำและเปราะ ดังนั้นการอบคืนตัวจึงต้องทำหลังจากการอบชุบแข็งเพื่อเพิ่มความเหนียวและความแกร่ง จากการอบชุบแข็งชิ้นงานจะมีความแข็งอยู่ที่ 44.5 HRC หลังการอบคืนตัวพบว่าค่าความแข็งที่เกิดจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัวทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าความแข็งของการอบชุบแข็ง อย่างไรก็ตามความแข็งของชิ้นงานหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบคืนตัวจาก 300 ถึง 500 °C หลังจากนั้นความแข็งจะลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 650 °C

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C ค่าความแข็งมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็ง เป็นผลจากการเกิดอนุภาคซีเมนไทต์ละเอียด (Fine cementite, Fe_3C) เล็กน้อยตามรูปที่ 4.9 (ก) และ 4.9 (ข) ทำให้เกิดการลดลงของจำนวนคาร์บอนในสารละลายของแข็ง (Solid solution) ของโครงสร้างมาร์เทนไซต์ [14] เมื่อโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ได้รับความร้อน คาร์บอนจะแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์มากขึ้นจนกลายเป็นโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์และซีเมนไทต์ตามสภาวะสมดุลอุณหพลศาสตร์ ตามสมการที่ 4.1 [10] แต่ในกรณีการอบคืนตัว ไม่ได้เป็นไปตามตามสภาวะสมดุลอุณหพลศาสตร์ คาร์บอนจะแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์บางส่วนแล้วไปจับกับเหล็ก ทำให้เกิดอนุภาคซีเมนไทต์แต่ยังคงมีโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์หลงเหลืออยู่ ตามสมการที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์จึงมีความแข็งลดลงแต่ความเหนียวและความแกร่งเพิ่มขึ้น การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 °C มีตะกอนซีเมนไทต์และมีการเปลี่ยนแปลงคาร์ไบด์จาก M_3C เป็น M_7C_3 โดยตะกอน M_7C_3 ที่เกิดขึ้นจะเป็น Cr_7C_3 เนื่องจากโครเมียมสามารถจับคาร์บอนได้ดีกว่าเหล็ก โดยตะกอนโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด Cr_7C_3 จะส่งผลให้เกิดการแข็งตัวแบบทุติยภูมิ [14, 28] ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่พบคาร์ไบด์เกิดขึ้นบริเวณเนื้อพื้นตามรูปที่ 4.9 (ค) ในขณะการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C ค่าความแข็งจะมีค่าลดลง เพราะโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด Cr_7C_3 จะรวมตัวกันเป็น $Cr_{23}C_6$ ที่บริเวณขอบเกรน [10, 14, 28] การที่เกิดคาร์ไบด์ขึ้นไม่ว่าจะเป็นบริเวณเนื้อพื้นหรือขอบเกรนจะส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเนื่องจากตัวคาร์ไบด์มีความแข็งและเปราะ อย่างไรก็ตามการวัดความแข็งแบบรีอเวลจะวัดทั้งเนื้อพื้นและขอบเกรน การที่เกิด $Cr_{23}C_6$ บริเวณจะเพิ่มความแข็งที่ขอบเกรนแต่จะทำให้ความแข็งเนื้อพื้นลดลงเนื่องจากการสูญเสียของคาร์บอนที่ละลายอยู่ในมาร์เทนไซต์ส่งผลให้ความแข็งโดยรวมของชิ้นงานลดลง [6, 10, 14] สอดคล้องกับผลการตรวจ

โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่พบคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนตามรูปที่ 4.9 (ง) ค่าความแข็งจากรูปที่ 4.10 จะสรุปไว้ตามตารางที่ 4-4 (ภาคผนวก จ)



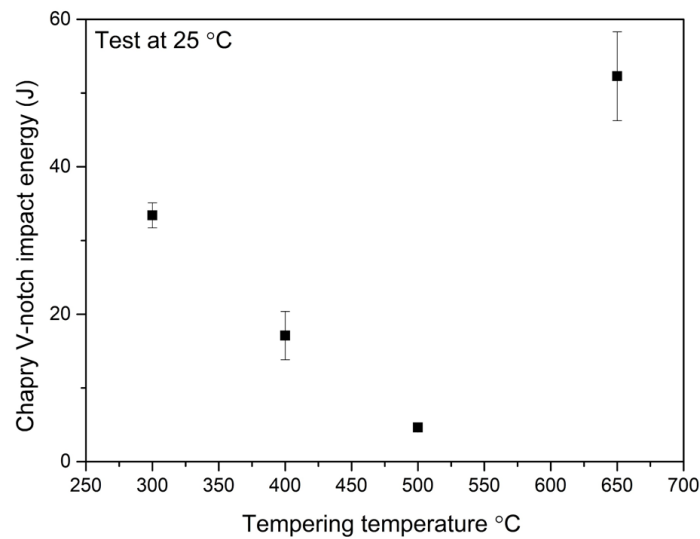
ตารางที่ 4-4 ความแข็งของชิ้นงานที่ได้รับ หลังการอบชุบแข็ง และ ชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C (ภาคผนวก จ)

ตัวอย่าง	ชิ้นงานที่ได้รับ	อบชุบแข็ง	อบคืนตัวที่ 300 °C	อบคืนตัวที่ 400 °C	อบคืนตัวที่ 500 °C	อบคืนตัวที่ 650 °C
ความแข็ง	94.48 ± 0.53 HRB* (100 kgf)	44.48 ± 1.12 HRC (150 kgf)	37.96 ± 0.38 HRC (150 kgf)	38.68 ± 0.41 HRC (150 kgf)	40.50 ± 0.24 HRC (150 kgf)	22.82 ± 0.33 HRC (150 kgf)
ระดับ [3, 4]	สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง

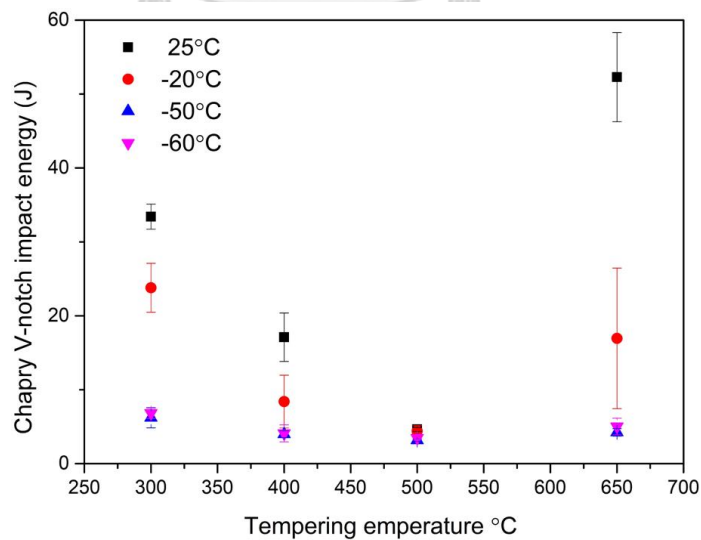
หมายเหตุ ความแข็งเฉลี่ย ± SD *ตามมาตรฐาน ASTM [3] ค่าความแข็งมีค่าต่ำกว่า 20 HRC ให้ใช้ค่า HRB ถ้าค่าความแข็งสูงกว่า 100 HRB ให้ใช้ค่า HRC

4.6 ผลการตรวจวัดค่าความแกร่ง

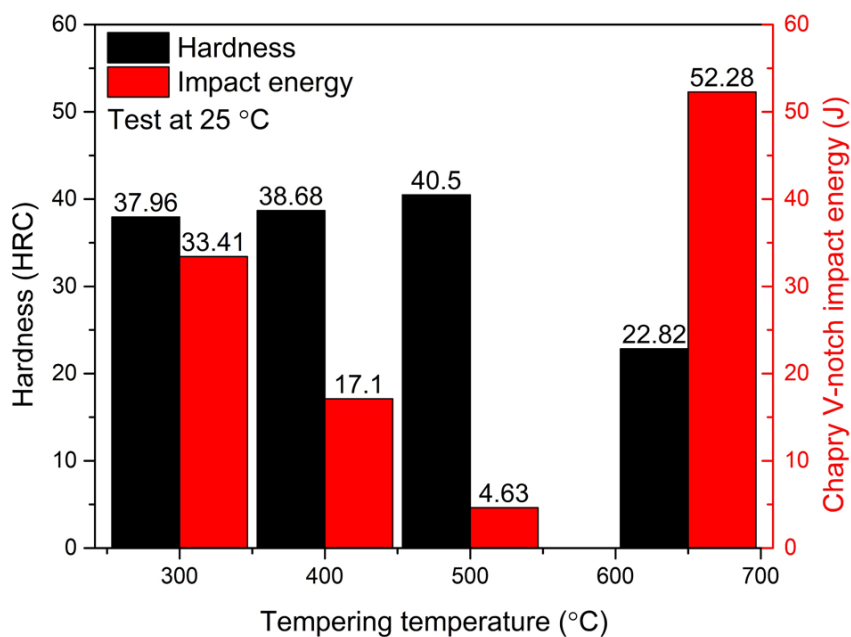
ชิ้นเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 สำหรับทดสอบการกระแทกตามหัวข้อ 3.3.5 นำมาทดสอบการกระแทก ได้ผลความแกร่งที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ตามรูปที่ 4.11, ที่อุณหภูมิ -20, -50 และ -60 °C ตามรูปที่ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ค่าความแกร่งของชิ้นงานที่ได้รับ หลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C)



รูปที่ 4.12 ค่าความแกร่งชิ้นงานที่ได้รับ หลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ที่อุณหภูมิตดสอบ 25, -20, -50 และ -60 °C ตามลำดับ

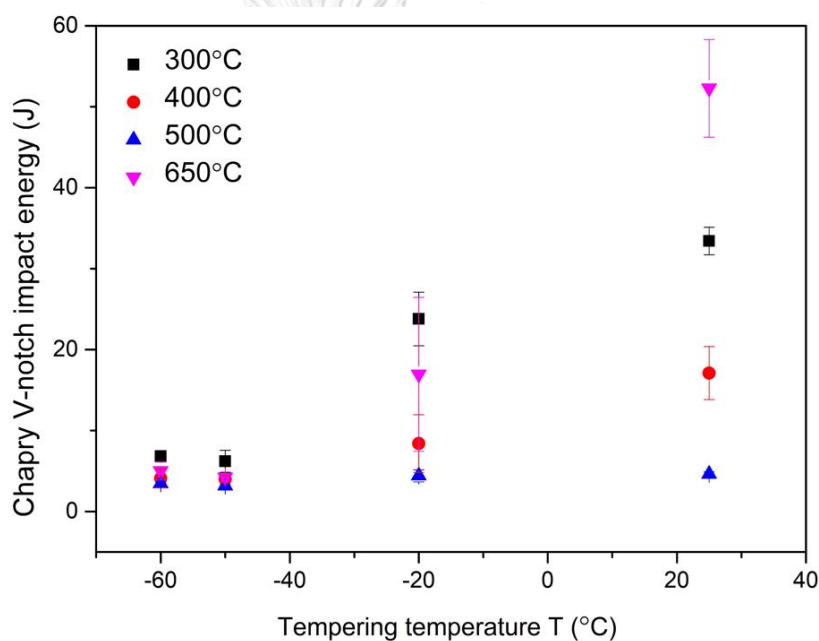


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความแกร่งของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ณ อุณหภูมิห้อง

เมื่อทำการเขียนกราฟความแกร่งและความแข็งเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิห้องตามรูปที่ 4.13 พบว่าค่าความแข็งและค่าความแกร่งของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 หลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C จะมีค่าแปรผกผันกัน เมื่อทำการศึกษาเอกสารงานวิจัยอื่นตามหัวข้อ 2.5 พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน

จากรูปกราฟความแกร่งรูปที่ 4.11 พบว่า ณ อุณหภูมิห้องค่าความแกร่งหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 ถึง 500 °C จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการอบคืนตัวให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความแกร่งของชิ้นงานหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C จะมีค่าสูงที่สุดและมีค่าความแข็งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานอบคืนตัวที่อุณหภูมิอื่น ตามธรรมชาติของเหล็กกล้าที่อุณหภูมิสูงเหล็กกล้าจะมีความแข็งลดลงและความเหนียวหรือความแกร่งเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิต่ำเหล็กกล้าจะแสดงความเปราะเนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น จากที่อธิบายไว้จึงได้เขียนกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิทดสอบที่ 25, -20, -50 และ -60 °C กับค่าความแกร่งของชิ้นงานหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C จะได้ผลตามกราฟรูปที่ 4.14 จะพบว่าที่อุณหภูมิทดสอบ 25 °C จะมีค่าความแกร่งสูงกว่าค่าความแกร่งที่อุณหภูมิ -20, -50 และ -60 °C เป็นผลมาจากความเปราะที่อุณหภูมิต่ำตามที่อธิบายไว้

และเมื่อสังเกตผลของอุณหภูมิการอบคืนตัวกับค่าความแกร่งจะพบว่า การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 °C ที่อุณหภูมิตดสอบ -20, -50 และ -60 °C จะมีค่าความแกร่งสูงกว่าการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 650 °C เป็นผลจากการลดลงของจำนวนคาร์บอนในสารละลายของแข็งเนื่องจากเกิดตะกอนซีเมนไทต์ ตามสมการที่ 4.2 การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C มีค่าความแกร่งที่อุณหภูมิต่ำ น้อยกว่าการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นผลจากตะกอน $M_{23}C_6$ J. Li และคณะ [29] ได้อธิบายไว้ว่า ตะกอน $M_{23}C_6$ จะช่วยเพิ่มการก่อดั้วและการแพร่กระจายของรอยแตก ส่งผลให้เป็นอันตรายต่อค่าความแกร่งที่อุณหภูมิต่ำ โดยจะสรุปค่าความแกร่งของอุณหภูมิการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C ตามตารางที่ 4-5 (ภาคผนวก ฉ)



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าความแกร่งที่อุณหภูมิตดสอบที่ 25, -20, -50 และ -60 °C ของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C

จากลักษณะกราฟรูปที่ 4.14 จะเป็นส่วนหนึ่งของกราฟอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงสมบัติระหว่างเหนียวและเปราะ (Ductile brittle transition temperature, DBTT) ตามที่เคยอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.4 แต่ในกรณีของชิ้นงานในที่นี้ไม่สามารถหาจุดกึ่งกลางของอุณหภูมิทรานซิชันได้เนื่องจากข้อมูลไม่เพียงพอ แต่สามารถอธิบายว่าชิ้นงานที่ได้รับมานั้นมีการแตกแบบเหนียวหรือแบบเปราะได้จากลักษณะรอยแตกในหัวข้อ 4.7 ที่จะกล่าวต่อไป

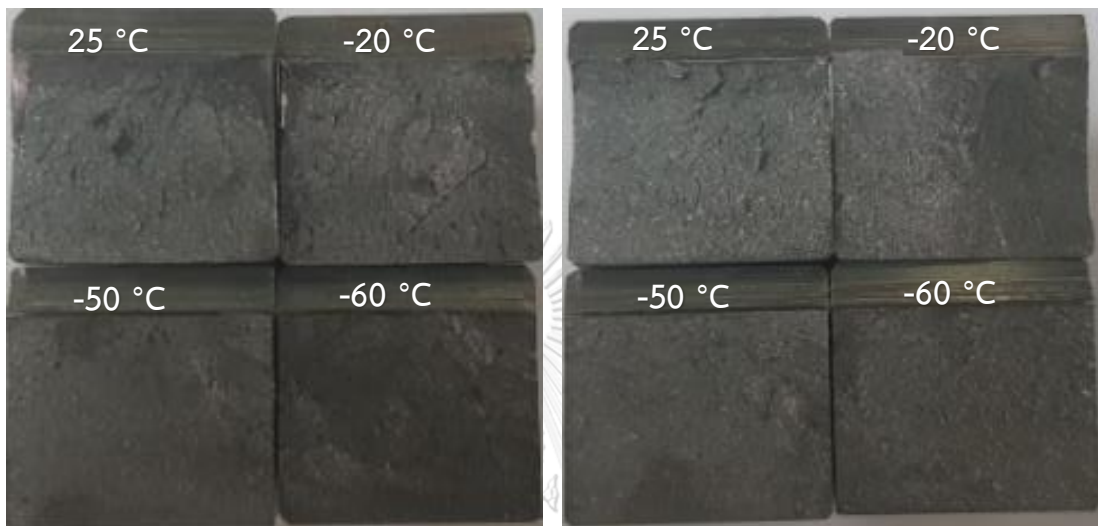
ตารางที่ 4-5 ความแกร่งของชิ้นงานหลังอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300-650 °C ที่อุณหภูมิห้อง (ภาคผนวก ฉ)

ชิ้นงาน	อุณหภูมิ 25 °C		อุณหภูมิ -20 °C		อุณหภูมิ -50 °C		อุณหภูมิ -60 °C	
	ค่าความแกร่ง (J)	ค่าความแกร่งต่อพื้นที่ (kJ/m ²)	ค่าความแกร่ง (J)	ค่าความแกร่งต่อพื้นที่ (kJ/m ²)	ค่าความแกร่ง (J)	ค่าความแกร่งต่อพื้นที่ (kJ/m ²)	ค่าความแกร่ง (J)	ค่าความแกร่งต่อพื้นที่ (kJ/m ²)
อบคืนตัวที่ 300 °C	33.41 ± 1.70	416.93 ± 21.09	23.79 ± 3.31	296.13 ± 41.09	6.22 ± 1.36	77.33 ± 16.93	6.82 ± 0.70	84.87 ± 8.71
อบคืนตัวที่ 400 °C	17.10 ± 3.27	212.85 ± 40.64	8.41 ± 3.57	104.63 ± 44.45	3.98 ± 0.46	49.62 ± 5.70	4.09 ± 1.15	50.93 ± 14.33
อบคืนตัวที่ 500 °C	4.63 ± 0.25	57.67 ± 3.07	4.41 ± 0.75	55.04 ± 9.22	3.17 ± 0.16	39.48 ± 1.99	3.46 ± 0.17	43.18 ± 2.05
อบคืนตัวที่ 650 °C	52.28 ± 6.03	651.81 ± 75.81	16.94 ± 9.51	210.92 ± 118.19	4.23 ± 0.50	52.68 ± 6.18	5.02 ± 1.13	62.56 ± 14.02

หมายเหตุ Impact Strength คำนวณจาก Impact energy หารด้วย พื้นที่ (s_0) (ภาคผนวก ฉ)

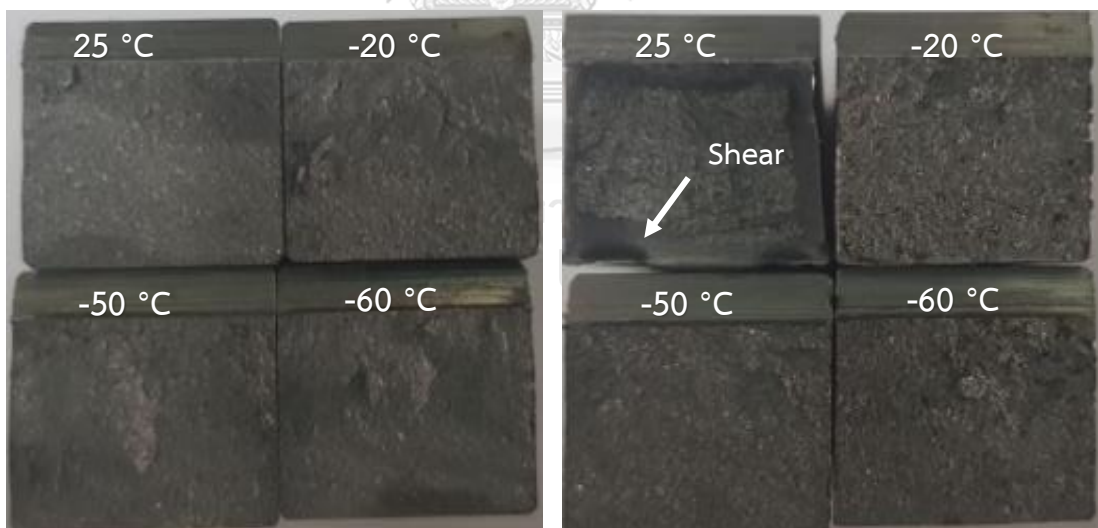
4.7 ตรวจสอบลักษณะรอยแตก (Fracture) หลังทำการทดสอบความแกร่ง

เมื่อนำชิ้นงานหลังทดสอบความแกร่ง จากหัวข้อ 4.6 มาตรวจสอบลักษณะรอยแตก ได้ผลตามรูปที่ 4.15



(ก) การอบคืบตัวที่ 300 °C

(ข) การอบคืบตัวที่ 400 °C

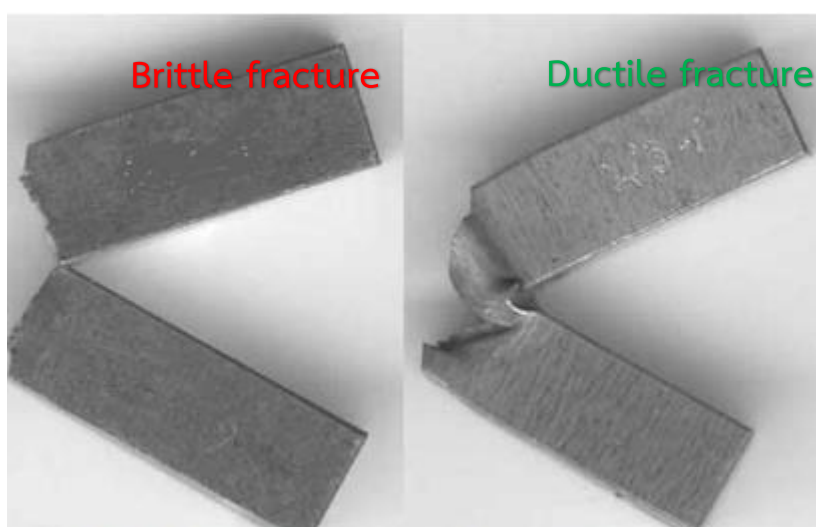


(ค) การอบคืบตัวที่ 500 °C

(ง) การอบคืบตัวที่ 650 °C

รูปที่ 4.15 ลักษณะรอยแตกหลังทดสอบความแกร่งของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืบตัวที่อุณหภูมิ 300 (ก) 400 (ข) 500 (ค) และ 650 °C (ง)

ลักษณะรอยแตกโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. รอยแตกแบบเปราะ (Brittle fracture) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย 2. รอยแตกแบบเหนียว (Ductile fracture) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างเห็นได้ชัด [30] ตามรูปที่ 4.16 จากผลการทดสอบความแกร่งตามรูปที่ 4.15 ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม มาร์เทนไซต์เกรด 410 ทั้งหมดแตกหักเป็น 2 ส่วน แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะของการแตกแบบเปราะ แต่บริเวณขอบของชิ้นงานหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่ 650 °C อุณหภูมิทดสอบ 25 °C จะเริ่มเห็นลักษณะรอยฉีก (Shear)

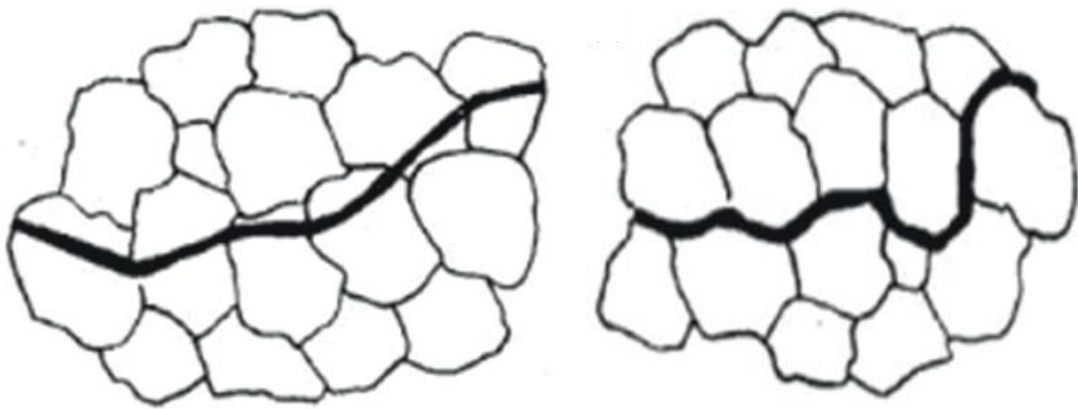


รูปที่ 4.16 ลักษณะรอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียว [31]

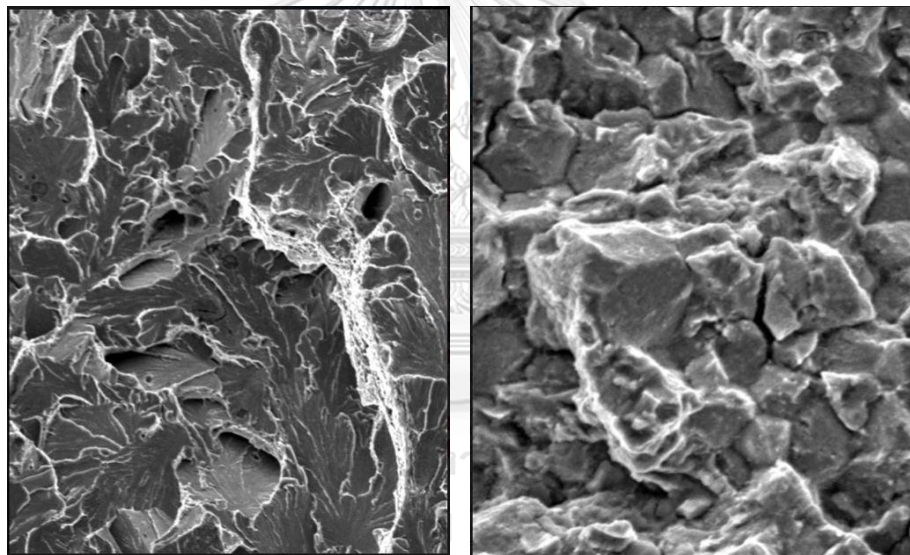
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลักษณะรอยแตกแบบเปราะยังสามารถแยกได้อีก 2 ประเภท ตามเส้นทางของรอยแตก ดังต่อไปนี้ 1. รอยแตกผ่ากลางเกรน (Transgranular fracture) 2. รอยแตกตามขอบเกรน (Intergranular fracture) ตามรูปที่ 4.17 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยแตกผ่ากลางเกรน และตามขอบเกรนตามรูปที่ 4.18 โดยรอยแตกผ่ากลางเกรน จะมีรูปแบบเป็นแม่น้ำ (River pattern) และเห็นรอยแตก (cleavage) ที่เป็นลักษณะเส้นสีขาว ในขณะที่รอยแตกตามขอบเกรนจะพบ ขอบเกรน รอยแตกตามขอบเกรน และ รอยแตกที่เป็นเส้นสีขาวบางส่วน

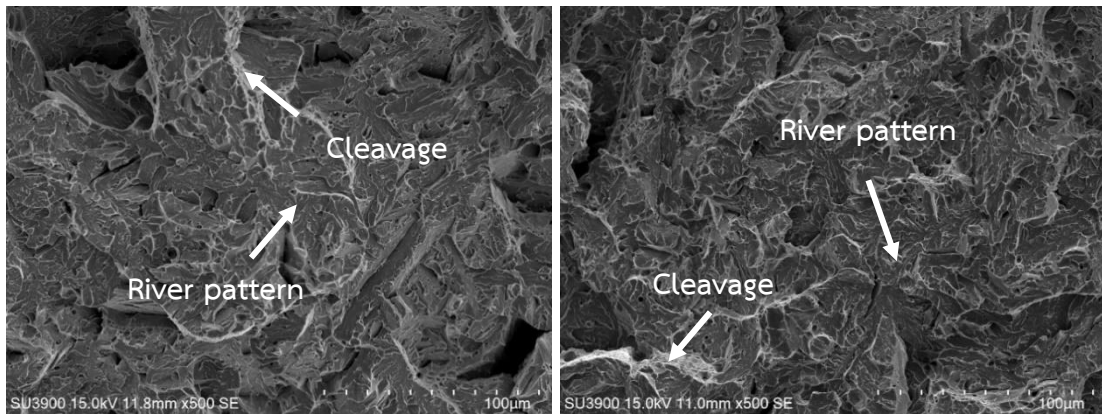
เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C หลังทดสอบความแกร่งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดจะได้ผลตามรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ภาพจำลองการแตกแบบผ่ากลางเกรน (ข้าว) และขอบเกรน (ขมิ้น) [32]

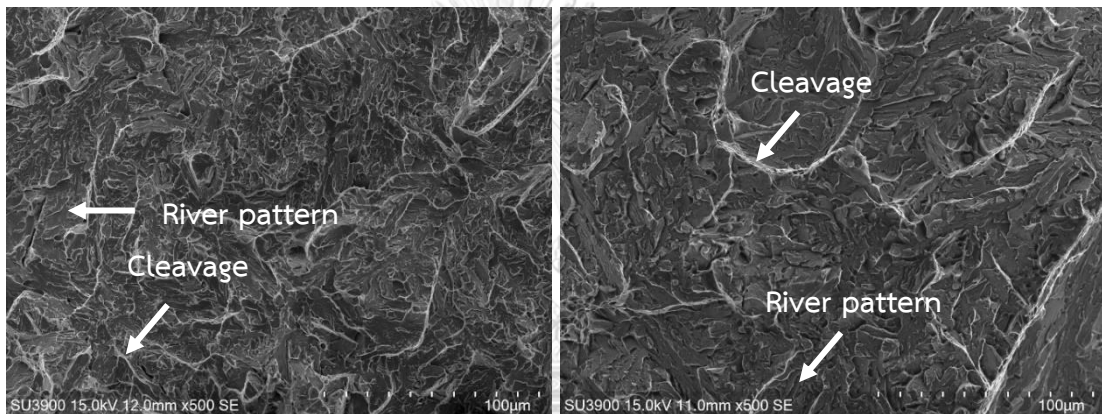


รูปที่ 4.18 ลักษณะรอยแตกแบบผ่ากลางเกรน (ข้าว) และ ขอบเกรน (ขมิ้น) [33]



(ก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C

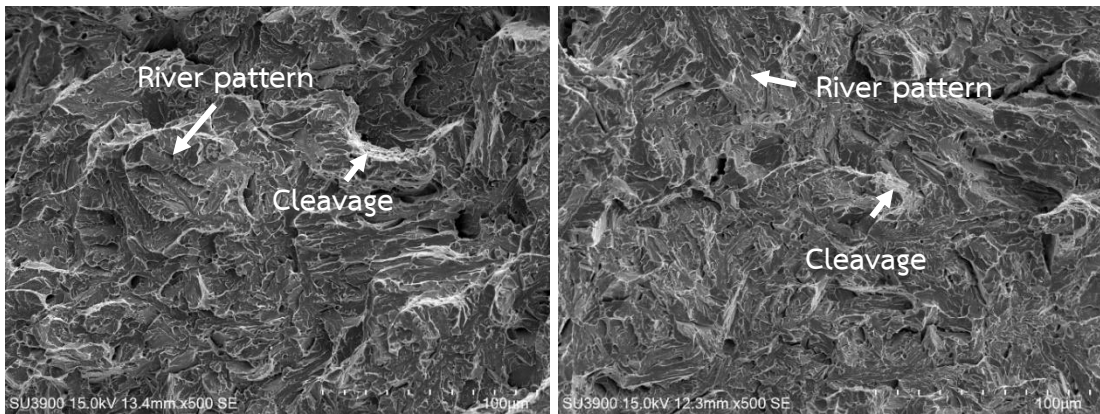
(ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ -20 °C



(ค) ทดสอบที่อุณหภูมิ -50 °C

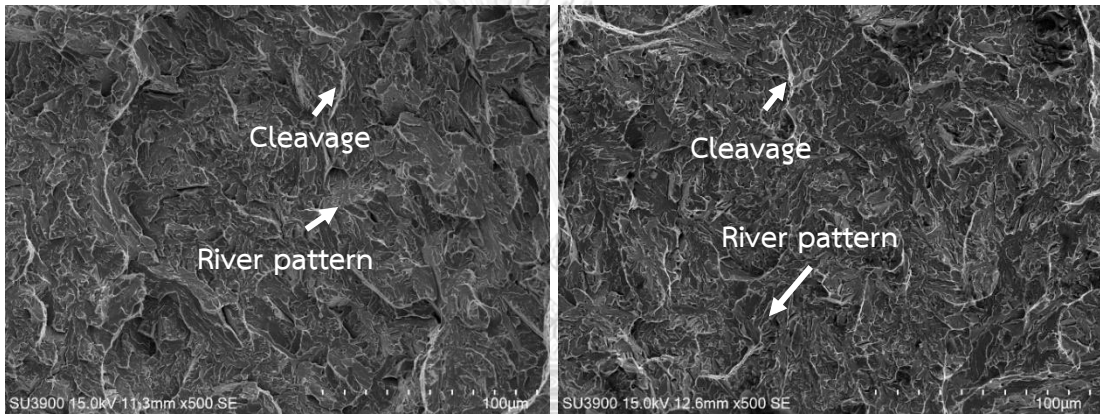
(ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ -60 °C

รูปที่ 4.19 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 °C หลังทดสอบความแกร่งที่อุณหภูมิ 25 (ก), -20 (ข), -50 (ค) และ -60 °C (ง)



(ก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C

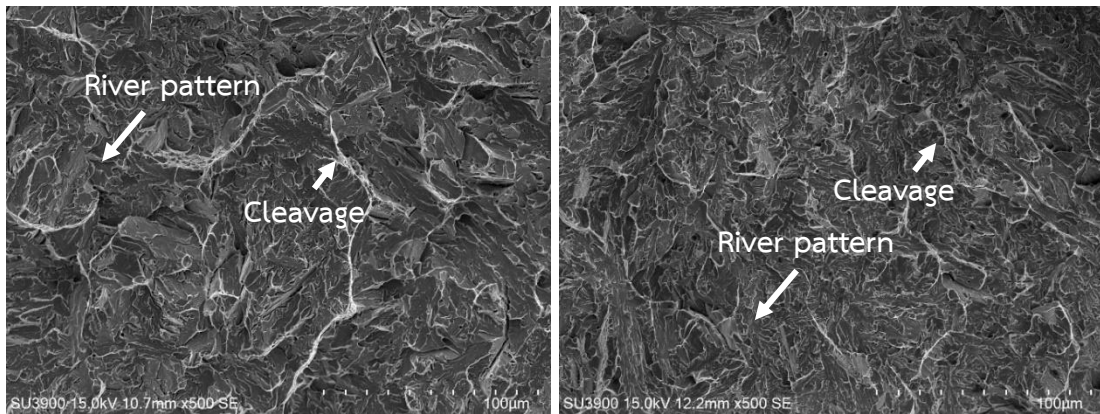
(ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ -20 °C



(ค) ทดสอบที่อุณหภูมิ -50 °C

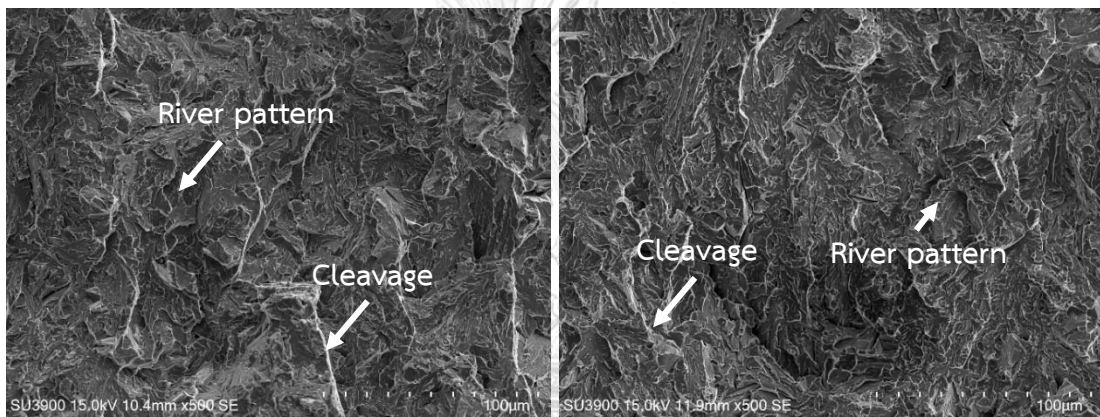
(ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ -60 °C

รูปที่ 4.20 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 400 °C หลังทดสอบความแรงที่อุณหภูมิ 25 (ก), -20 (ข), -50 (ค) และ -60 °C (ง)



(ก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C

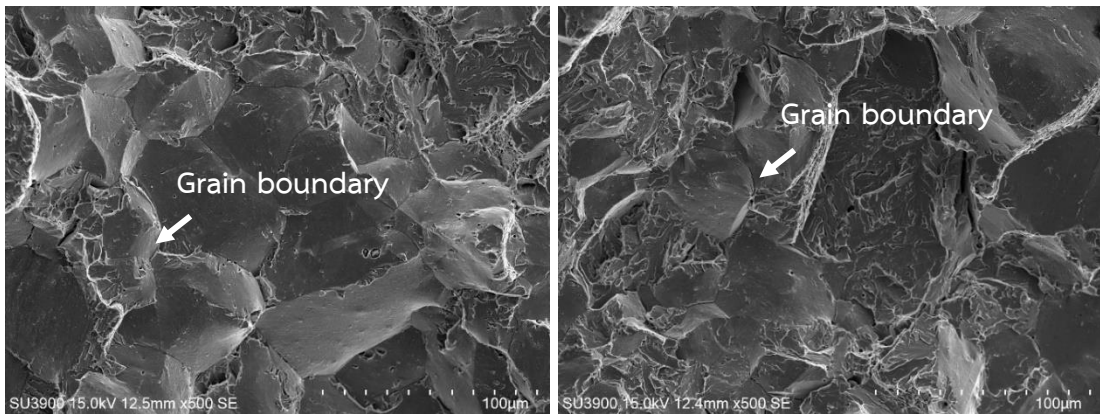
(ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ -20 °C



(ค) ทดสอบที่อุณหภูมิ -50 °C

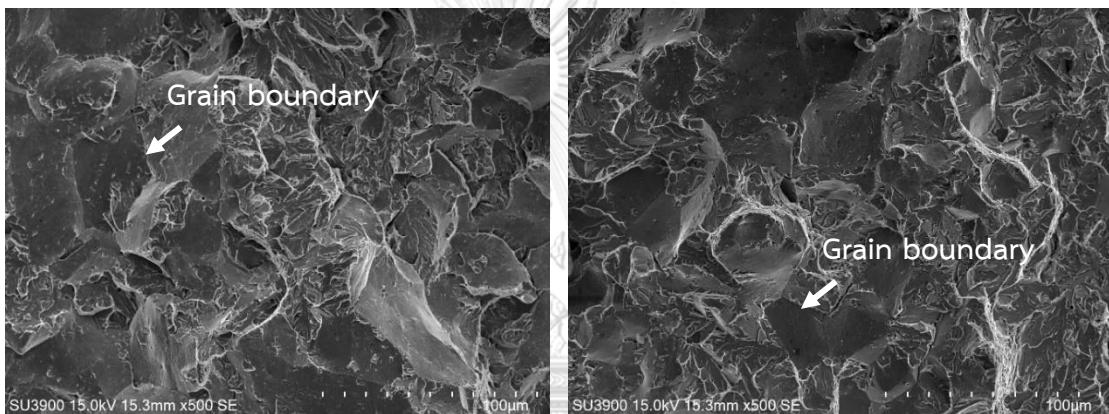
(ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ -60 °C

รูปที่ 4.21 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 °C หลังทดสอบความแกร่งที่อุณหภูมิ 25 (ก), -20 (ข), -50 (ค) และ -60 °C (ง)



(ก) ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C

(ข) ทดสอบที่อุณหภูมิ -20 °C



(ค) ทดสอบที่อุณหภูมิ -50 °C

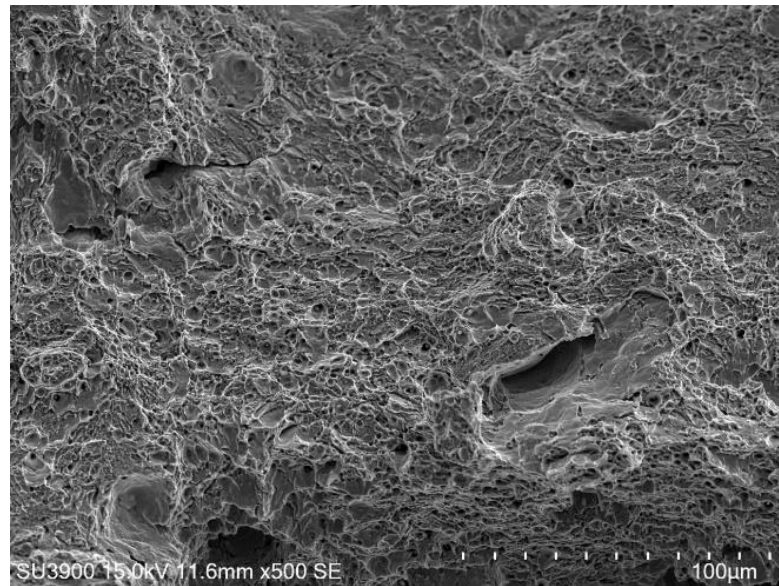
(ง) ทดสอบที่อุณหภูมิ -60 °C

รูปที่ 4.22 ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C หลังทดสอบความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 25 (ก), -20 (ข), -50 (ค) และ -60 °C (ง)

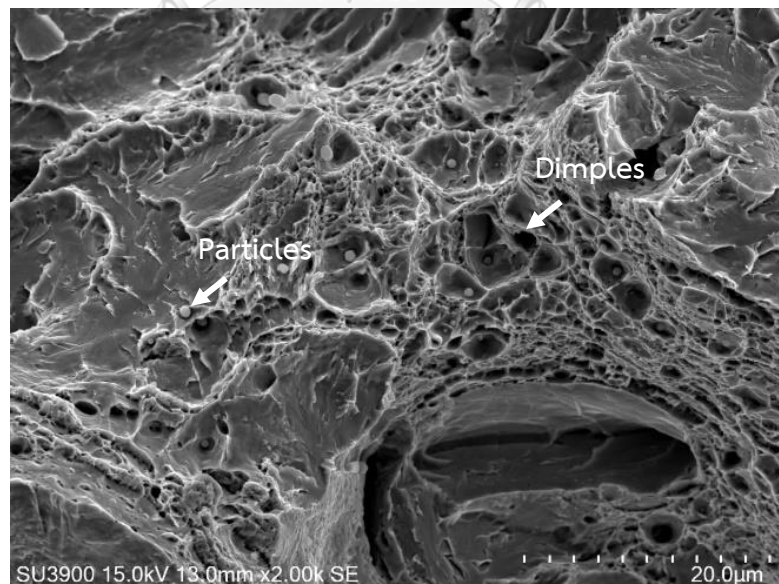
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พบว่าชิ้นงานหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 °C จะมีลักษณะรอยแตกแบบผ่ากลางเกรน ที่มีรูปแบบเป็นแม่น้ำ และเห็นรอยแตก ที่เป็นเส้นสีขาวได้อย่างชัดเจน ในขณะที่การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C จะพบรอยตามขอบเกรน เนื่องจากมีตะกอน $Cr_{23}C_6$ ที่บริเวณขอบเกรนตามรูปที่ 4.9 (ง) ส่งผลให้ขอบเกรนเปราะจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C รอยแตกจึงเป็นแบบตามขอบเกรน และ $Cr_{23}C_6$ ที่เกิดขึ้นจะช่วยเพิ่มการก่อตัวและการแพร่กระจายของรอยแตก ส่งผลให้เป็นอันตรายต่อค่าความแข็งแรงที่อุณหภูมิต่ำ [29] ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.6

เมื่อตรวจสอบลักษณะขอบของชิ้นงานที่เป็นผลจากแรงเฉือน หลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่ 650 °C ที่อุณหภูมิทดสอบ 25 °C ตามรูปที่ 4.23 จะพบลักษณะรอยแตกเป็นแบบหลุม (Dimples) และภายในหลุมมีอนุภาค (Particles) โดยเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.9 (ง) อนุภาคที่สังเกตเห็นจะเป็นคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจากการอบคืนตัวตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2



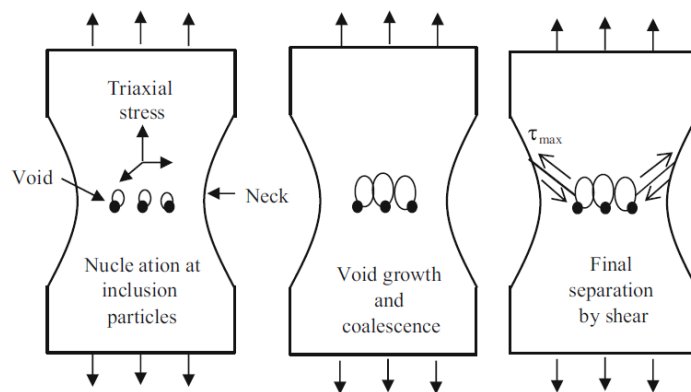
(ก) กำลังขยาย 500 เท่า



(ข) กำลังขยาย 2000 เท่า

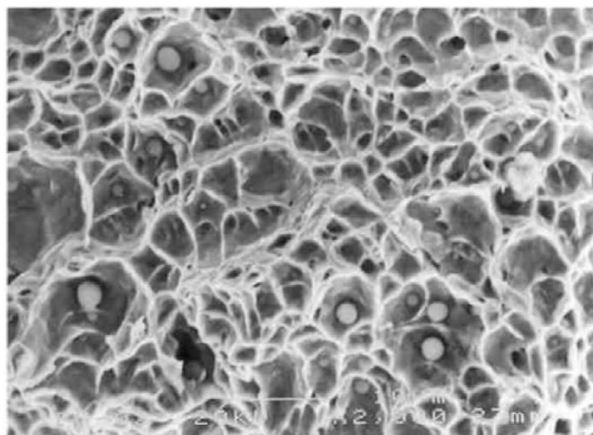
รูปที่ 4.23 ลักษณะรอยแตกแบบเหนียวบริเวณขอบชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่ อุณหภูมิ 650 °C ณ อุณหภูมิทดสอบ 25 °C

อธิบายการเกิดหลุมได้จากรูปที่ 4.24 โดยลักษณะการแตกแบบเหนียวเริ่มเกิดเมื่อ มีบริเวณคอคอด (Neck) เกิดขึ้น และมีความเค้นสามแกน (Triaxial stress) เหนียวทำให้เกิดการสร้างช่องว่าง (Void) จะเกิดบริเวณที่มีอนุภาคหรือสารฝังใน (Inclusion) ตามรูปที่ 4.24 (ซ้าย) เมื่อช่องว่างโตขึ้นจากผลของการเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) จนมีขนาดเล็กพอที่จะทำรวมตัวกันเกิดเป็นโพรงตามรูปที่ 4.24 (กลาง) สุดท้ายเมื่อชิ้นงานได้แยกออกจากกันจากผลของแรงเฉือน เกิดเป็นลักษณะรอยแตกแบบเหนียวขึ้น ตามรูปที่ 4.24 (ขวา) โดยขนาดของหลุมจะขึ้นกับลักษณะ รูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาคหรือสารฝังใน [30] โดยเทียบกับตัวอย่างการแตกแบบเหนียวรูปที่ 4.23 กับเอกสารงานวิจัยอื่นตามรูปที่ 4.25 พบว่ามีลักษณะเหมือนกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่า ชิ้นงานหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่ 650 °C อุณหภูมิทดสอบ 25 °C บริเวณขอบของชิ้นงานจะมีการแตกแบบเหนียวเป็นผลจากแรงเฉือน ในขณะที่ใจกลางจะเป็นการแตกแบบเปราะ



รูปที่ 4.24 กลไกการเกิดรอยแตกแบบเหนียว [30]

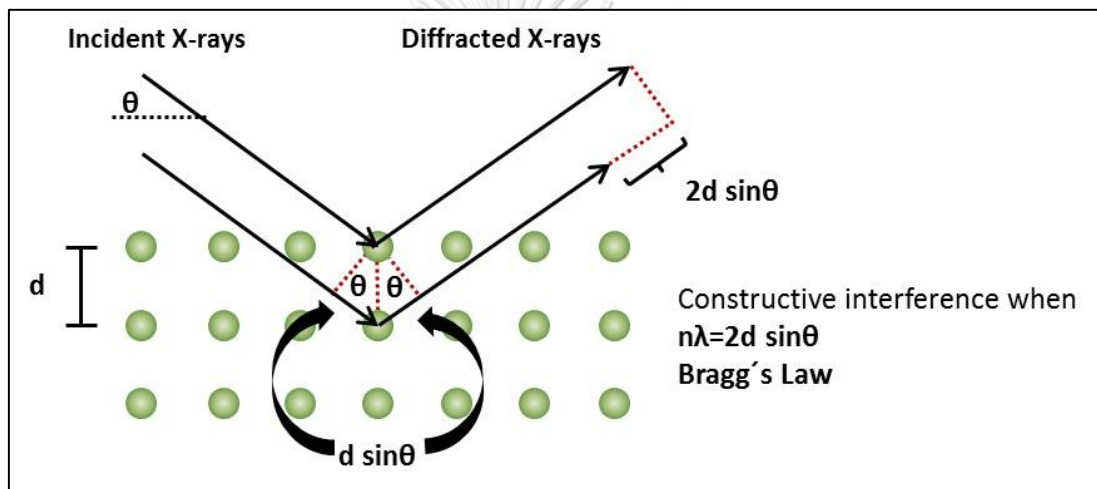
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.25 ตัวอย่างลักษณะรอยแตกแบบเหนียว ที่มีอนุภาคหรือสารฝังในอยู่ในหลุม [30]

4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ก่อนและหลังการอบคืนตัวด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD)

X-ray diffraction analysis (XRD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในวัสดุศาสตร์เพื่อกำหนดโครงสร้างผลึกของตัววัสดุ หลักการของ XRD ทำงานโดยฉายรังสีไปวัสดุด้วยรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบจากนั้นวัดความเข้มและมุมกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ที่ออกจากวัสดุ ตามรูปที่ 4.26 [34] สามารถคำนวณด้วยสมการของ Bragg's law แสดงไว้ที่สมการ 4.3 โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบที่หักเห, θ คือ มุมที่ตกกระทบ, n คือ ค่าคงที่จำนวนเต็ม และ λ คือความยาวคลื่น [34, 35]



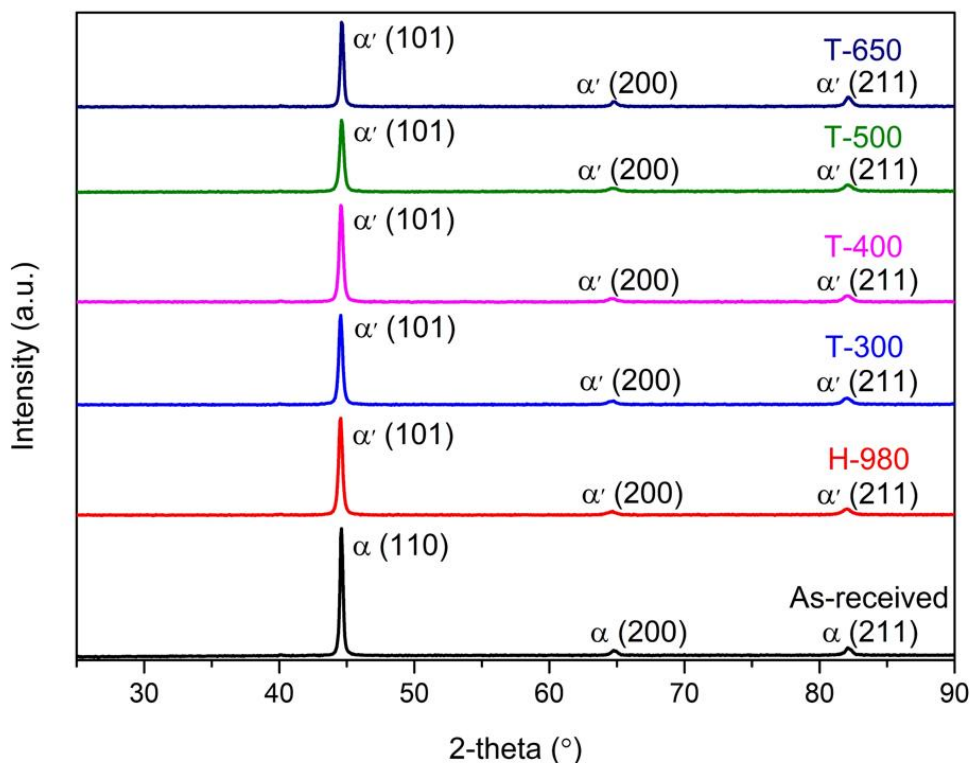
รูปที่ 4.26 แสดงหลักการทำงานตามสมการ Bragg's law [34]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

สมการที่ 4.3

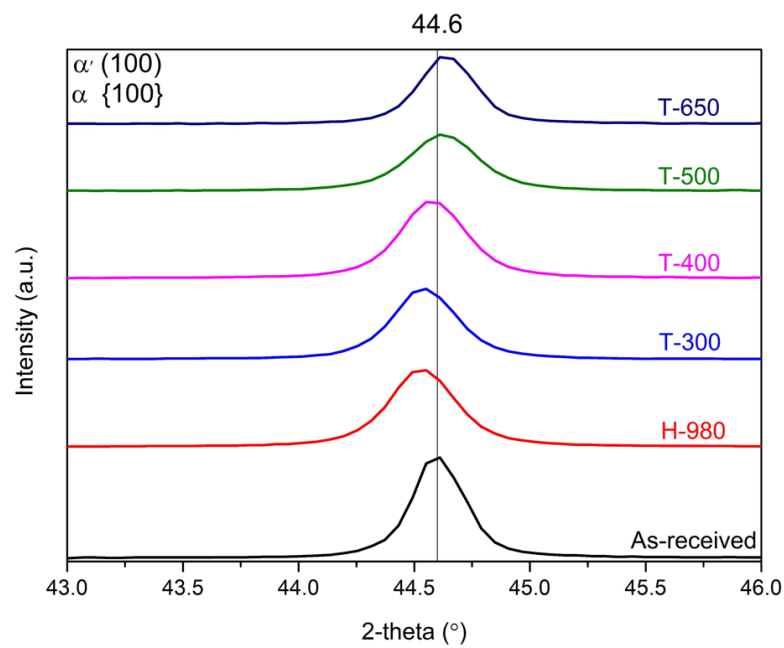
นำชิ้นงานที่ได้จากหัวข้อ 3.3.6 ตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ได้ผลตามรูปที่ 4.27



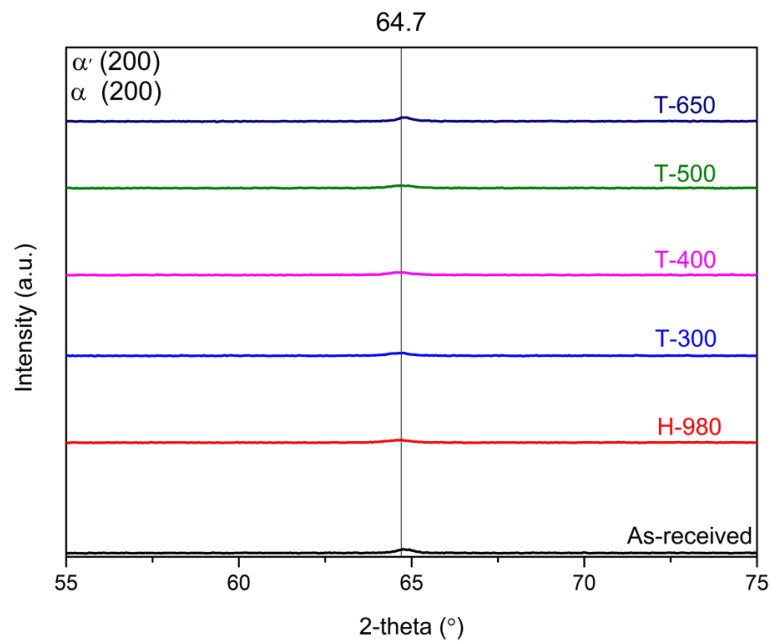
รูปที่ 4.27 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานที่ได้รับ (As-received) หลังการอบชุบแข็ง (H-980) และชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 (T-300), 400 (T-400), 500 (T-500) และ 650 (T-650) °C

จากการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานที่ได้รับจะพบพีค 3 พีคหลักของโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ของเหล็ก ได้แก่ $\alpha(110)$, $\alpha(200)$ และ $\alpha(211)$ โดยแสดงตามรูปที่ 4.27 (ภาคผนวก ข) (PDF number: 03-065-4899) [36, 37] ตามโครงสร้างจุลภาคที่มีเนื้อพื้นเป็นเฟอร์ไรต์ แต่ชิ้นงานหลังผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C จะพบโครงสร้างจุลภาคที่เป็นมาร์เทนไซต์ เมื่อตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะพบพีค 3 พีคหลักของโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ ได้แก่ $\alpha'(101)$, $\alpha'(200)$ และ $\alpha'(211)$ (ภาคผนวก ข) (PDF number: 00-044-1290) [38] เมื่อพิจารณาระนาบ (110), (200) และ (211) ที่บริเวณ 44.6, 64.7 และ 82.2 องศา ของกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์รูปที่ 4.27 จะได้ตามรูปที่ 4.28 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ พบว่าที่ระนาบ (110) และ (211) หลังทำการอบชุบแข็ง พีคจะเลื่อนไปทางซ้ายเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ได้รับเนื่องจากมีเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ (BCC) เป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (BCT) สอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคตามรูปที่ 4.1 หลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ

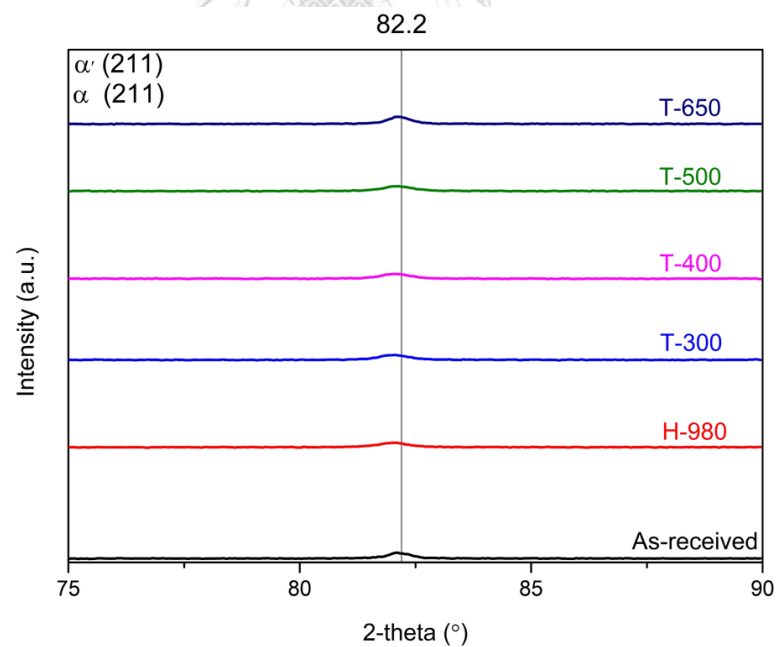
300-650 °C จะพบว่ากราฟจะเลื่อนไปทางขวา เมื่อเทียบกับชิ้นงานหลังการชุบแข็ง อธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยเมื่อทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้คาร์บอนแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ ทำให้โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์กลายเป็นโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ [10] ตามสมการที่ 4.1 แต่ในกรณีของระนาบ (200) การแพร่ของคาร์บอนออกจากโครงสร้างจะไม่ส่งผลต่อระนาบ (200) พิกัดจึงไม่มีการเลื่อนเหมือนของระนาบ (110) และ (211)



รูปที่ 4.28 แสดงการเลื่อนเบนของรังสีเอ็กซ์ในระนาบ (110) บริเวณมุม 44.6 องศา ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410



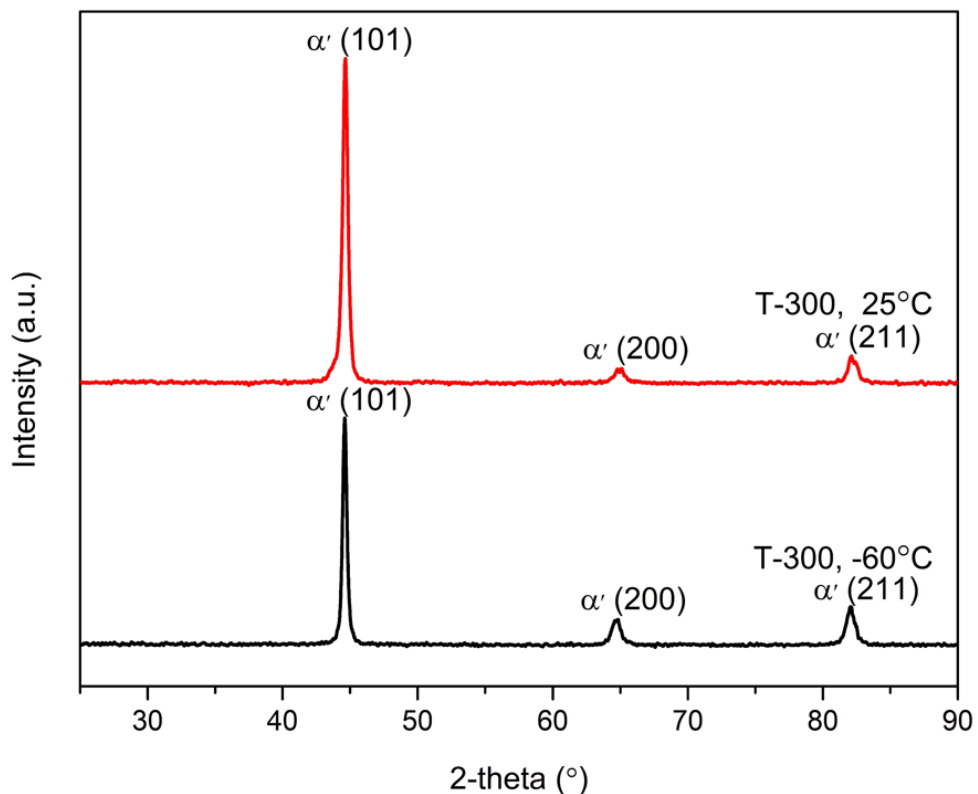
รูปที่ 4.29 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในระนาบ (200) บริเวณมุม 64.7 องศา ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410



รูปที่ 4.30 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในระนาบ (211) บริเวณมุม 82.2 องศา ของเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

4.9 ปริมาณออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained austenite) ในชิ้นงานหลังการอบคืนตัว

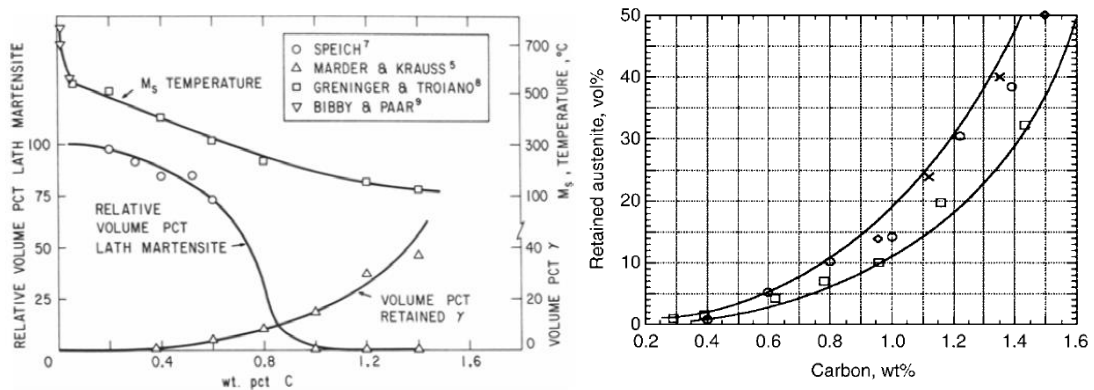
การตรวจสอบออสเทนไนต์ตกค้างสามารถใช้เทคนิค XRD คำนวณหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีคโครงสร้าง FCC และ BCC ตามมาตรฐาน ASTM E975 [20] โดยใช้รังสี Copper ที่มีอุปกรณ์ diffracted-beam monochromator ติดตั้งอยู่ หลังการตรวจสอบได้ผลตามรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 °C หลังทดสอบการกระแทกที่อุณหภูมิ 25 °C และ -60 °C

สำหรับการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงาน จะทดสอบชิ้นงานหลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300 °C หลังจากทดสอบความแกร่งที่ อุณหภูมิ 25 และ -60 °C จะพบพีค 3 พีคหลักของโครงสร้างจุลภาคเฟร์ไรต์ของเหล็ก ได้แก่ $\alpha(110)$, $\alpha(200)$ และ $\alpha(211)$ และไม่ปรากฏพีคของโครงสร้างออสเทนไนต์ทำให้ไม่สามารถคำนวณปริมาณออสเทนไนต์ที่ตกค้างได้ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนของชิ้นงานตามตารางที่ 4-1 มีอยู่เพียง 0.125% การที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำจะส่งผลให้ปริมาณออสเทนไนต์ตกค้างมีปริมาณน้อยลงตามไปด้วย จากมาตรฐาน ASTM E975 จะ

พบปริมาณออสเทนไนต์ตกค้างที่ปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.4% [20] สอดคล้องกับงานวิจัยของ G.R. SPEICH และ W.C. LESLIE [39] กับ ASM: Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist [40] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าออสเทนไนต์ตกค้างจะเริ่มมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนเริ่มมากกว่า 0.4% ตามรูปที่ 4.32 จึงไม่พบออสเทนไนต์ที่ตกค้างในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.32 แสดงผลของปริมาณคาร์บอนต่อปริมาณออสเทนไนต์ตกค้าง โดย G.R. SPEICH และ W.C. LESLIE [39] (ซ้าย) และ ASM: Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist [40] (ขวา)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด AISI 410 นำไปอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 980 °C เย็นตัวในน้ำมัน และนำไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C หลังจากนั้นทดสอบวัดค่าความแกร่ง ที่อุณหภูมิ 25, -20, -50 และ -60 °C ตามมาตรฐาน ASTM E23 ในงานนี้สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. หลังการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว พบตะกอนของคาร์ไบด์หลายชนิดในโครงสร้างจุลภาคขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้การอบคืนตัว สรุปได้ดังตารางที่ 5-1

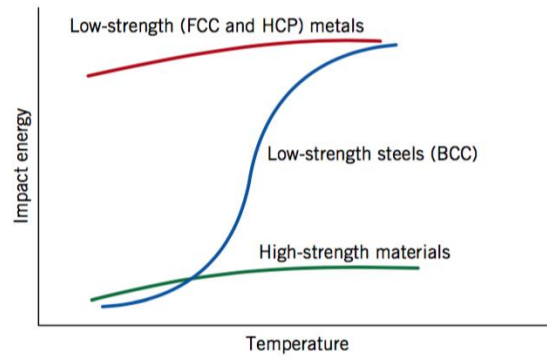
ตารางที่ 5-1 ประเภทของคาร์ไบด์ที่พบหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C

อุณหภูมิการอบคืนตัว	300 °C	400 °C	500 °C	650 °C
ประเภทคาร์ไบด์	M ₃ C	M ₃ C	Cr ₇ C ₃	Cr ₂₃ C ₆

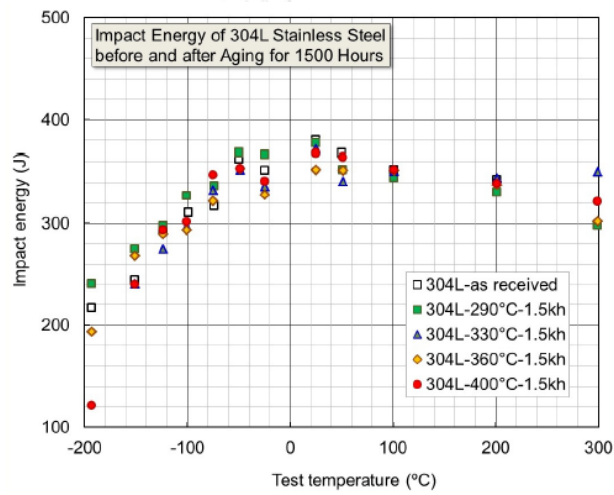
2. การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 500 และ 650 °C จะมีค่าความแข็งสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C จะมีตะกอนของคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ (Cr₂₃C₆) ที่บริเวณขอบเกรนส่งผลให้เนื้อพื้นมีความแข็งลดลงเนื่องจากการลดลงของคาร์บอนในสารละลายเนื้อพื้น
3. ค่าความแกร่งของชิ้นงานแปรผกผันกับค่าความแข็งของชิ้นงาน
4. ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 °C หลังทดสอบความแกร่งแสดงรอยแตกผ่ากลางเกรนเป็นส่วนใหญ่ สำหรับอุณหภูมิทดสอบทั้งหมดในการศึกษา นี้ อย่างไรก็ตาม ลักษณะรอยแตกของชิ้นงานอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 650 °C แสดงรอยแตกตามขอบเกรนเนื่องจากตะกอนคาร์ไบด์ที่เปราะบริเวณขอบเกรน
5. ไม่มีโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ตกค้างปรากฏให้เห็นในชิ้นงานที่ศึกษา

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

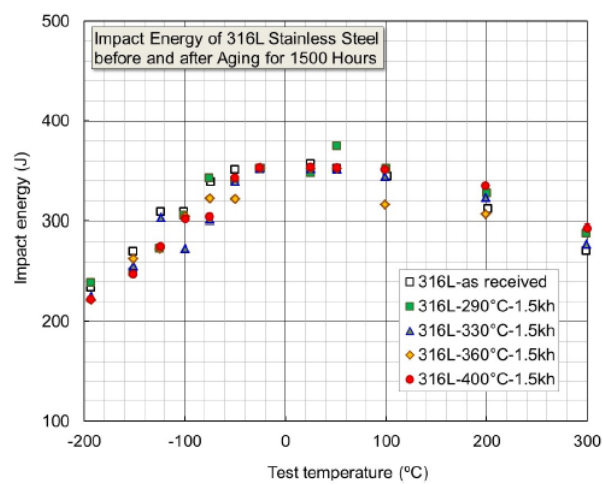
จากที่กล่าวมาหัวข้อ 4.6 ค่าอุณหภูมิ DBTT คือ ค่าอุณหภูมิที่พลังงานการกระแทก (Impact energy) หรือค่าความแรงแรงลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งบางครั้งใช้สัญลักษณ์เป็น $DBTT_{50}$ เป็นค่าที่สำคัญในการใช้งานโลหะที่อุณหภูมิต่ำกว่าใช้งานโลหะที่ค่าอุณหภูมิต่ำกว่าค่าอุณหภูมิ DBTT ชิ้นงานโลหะจะเปราะแตกหักได้ง่าย ชิ้นงานที่มีโครงสร้างจุลภาค FCC และ HCP จะมีค่าพลังงานการกระแทกสูงกว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างจุลภาคเป็น BCC อย่างมากดังแสดงในรูปที่ 5.1 [41] หรือมีค่าอุณหภูมิ DBTT ต่ำกว่ามาก ตามรายงานการวิจัยของ Byun, T.S. and Lach, T.G [42] ค่าความแรงแรงในรูปพลังงานการกระแทกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต 304L และ 316L มีค่าอุณหภูมิ DBTT ต่ำกว่า $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามรูปที่ 5.2 เนื่องจากอุปกรณ์การใช้งานขนส่งก๊าซธรรมชาติถูกใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ การเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์จึงอาจไม่ใช่ตัวเลือกที่ดีนัก เพราะค่าความแรงแรงหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะมีค่าความแรงแรงประมาณ 3-6 J (ภาคผนวก ฉ) ซึ่งน้อยกว่าค่าความแรงแรงขั้นต่ำ (15.9J) ตามมาตรฐาน ASTM E23



รูปที่ 5.1 ผลของโครงสร้างจุลภาคต่อค่าพลังงานการกระแทกที่อุณหภูมิต่างๆ [41]



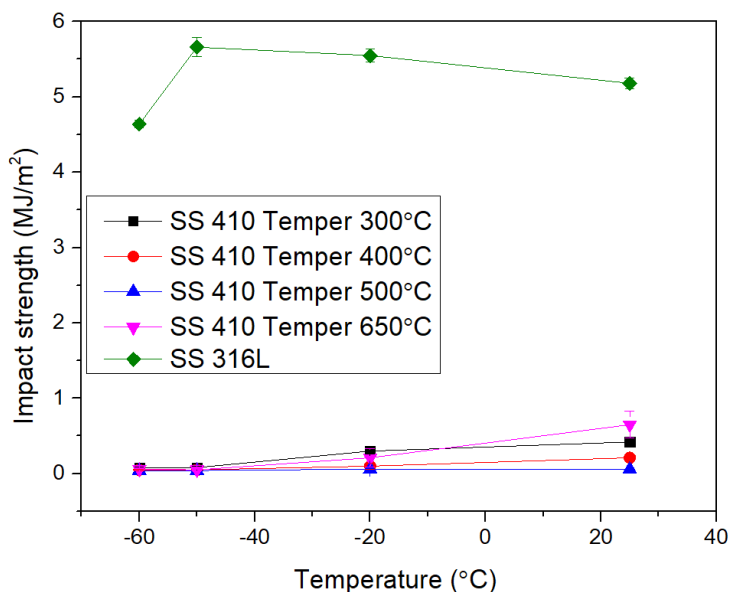
(ก) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิตเกรด 304L



(ข) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิตเกรด 316L

รูปที่ 5.2 ค่าพลังงานการกระแทกของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิตเกรด 304L (ก) และ 316L (ข) [42]

จากการตรวจสอบชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L หลังทดสอบความความแข็งและความแกร่งพบว่า ชิ้นงานมีความแข็งอยู่ที่ 78.66 ± 0.32 HRB หรือ 6.52 ± 0.22 HRC (ภาคผนวก ซ) มีค่าไม่เกิน 36 HRC เมื่อทดสอบค่าความแกร่งตามมาตรฐาน ASTM E-23 เขียนกราฟความแกร่งเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่อุณหภูมิทดสอบ 25, -20, -50 °C และ -60 °C ได้ผลตามรูปที่ 5.3 (ภาคผนวก ฉ)



รูปที่ 5.3 ความแกร่งของชิ้นงานโครงสร้างจุลภาค BCC (SS410) และ FCC (SS316L)

ค่าความแกร่งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L มีค่าสูงกว่าของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410 ที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ เป็นอย่างมาก จึงสรุปได้ว่าการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์อาจเป็นตัวเลือกที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์ เพราะชิ้นงานยังคงมีความเปราะสูง ผู้จัดทำเสนอแนะให้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์หรือเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างเป็น FCC เนื่องจากค่าอุณหภูมิ DBTT ต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสมาก จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในด้านขนส่งก๊าซที่อุณหภูมิต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียสมากกว่า

บรรณานุกรม

- 1 H. Salem. "L.A. Turbine- The Turboexpander."
<https://www.youtube.com/watch?v=AS5CB1zCfRI> (accessed Jun 28, 2019)
- 2 P. A. o. T. (PTT), "รายละเอียดความเสียหายชิ้นส่วนเครื่องจักรของโรงแยกก๊าซธรรมชาติขนอมข้อมูลเบื้องต้น," 28.6. 2019
- 3 ASTM E18-20, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, West Conshohocken, PA, 2020
- 4 ISO 6508-2:2015, Metallic materials — Rockwell hardness test — Part 2: Verification and calibration of testing machines 2015
- 5 A. S. M. International and C. Handbook, ASM handbook. Vol. 4, Vol. 4. Materials Park, OH: ASM International (in English), 1991
- 6 G. Chakraborty et al., "Study on tempering behaviour of AISI 410 stainless steel," materials Characterization, vol. 100, pp. 81-87, 2015, doi: 10.1016/j.matchar.2014.12.015
- 7 K. J. Lee, M. S. Chun, M. H. Kim, and J. M. Lee, "A new constitutive model of austenitic stainless steel for cryogenic applications," Computational Materials Science, vol. 46, no. 4, pp. 1152-1162, 2009, doi: 10.1016/j.commatsci.2009.06.003
- 8 N. Institute, Materials for cryogenic service, London: International Nickel Ltd., 1974
- 9 ASTM E23-18, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, west conshohocken, PA, 2018
- 10 G. Lothongkum, Stainless steels. Bangkok: ห้างหุ้นส่วนจำกัด บี.เอ็น.ซี เอ็นเตอร์ไพรส์, 2016
- 11 W. D. Callister, วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน, 6 ed. Bangkok: Top Publishing Co., Ltd., 2003
- 12 A. P. Dominique François, André Zaoui, Mechanical Behaviour of Materials Volume II: Fracture Mechanics and Damage, 2 ed. (no. 191). Springer Netherlands, 2013, p. 666. Springer Netherlands
- 13 S. o. M. S. a. Engineering. "Ductile to Brittle Transition."
<http://www.materials.unsw.edu.au/tutorials/online-tutorials/2ductile-brittle-transition>
(accessed Dec 02, 2019).
- 14 M. F. McGuire, Stainless Steels for Design Engineers. ASM International, 2008

- 15 E. Maburri, Z. Syahlan, M. Sahlan, T. Anwar, and B. A. Romijarso, "Effect of tempering temperature on hardness and impact resistance of the 4101Mo martensitic stainless steels for steam turbine blades," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 2547-2551, 2017, doi: 10.21817/ijet/2016/v8i6/160806208
- 16 M. Mirzaee, A. Momeni, N. Aieni, and H. Keshmiri, "Effect of quenching and tempering on microstructure and mechanical properties of 410 and 410 Ni martensitic stainless steels," *Journal of Materials Research*, vol. 32, no. 3, p. 687, 2017, doi: 10.1557/jmr.2016.485
- 17 C.-H. Hsu and H.-Y. Teng, "Temperature effects on the static and dynamic fracture behaviors of low-silicon CA-15 tempered stainless steel castings," *Journal of nuclear materials*, vol. 340, no. 1, pp. 1-11, 2005, doi: 10.1016/j.jnucmat.2004.10.004
- 18 A. S. M. International and C. Handbook, *ASM handbook. Vol. 9, Vol. 9. Materials Park, OH: ASM International (in English)*, 2004
- 19 T. Ltd. "WHAT IS A CHARPY IMPACT TEST?" <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-charpy-testing> (accessed Jun 29, 2019)
- 20 ASTM E975-13, *Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation*, West Conshohocken, PA, 2013
- 21 A. Hassan and Q. Jawad, "Experimental Study of the Effect of Austenitizing Temperature and Multiple Tempering on the Microstructure of AISI 410 Martensitic Stainless Steel," vol. 1, pp. 185-199, 2015
- 22 A. Hassan and Q. Jawad, "Investigation of the Effect of Austenitizing Temperature and Multiple Tempering on the Mechanical Properties of AISI 410 Martensitic Stainless Steel," vol. C, pp. 411-435, 2016
- 23 น. (IMIARU). "Heat Treatment of Metal." http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Full_Annealing.html. (accessed Dec 13 2020)
- 24 P. D. Harvey and M. American Society for, *Engineering properties of steel. Metals Park, Ohio: American Society for Metals (in English)*, 1982
- 25 S. M. R. d.o.o. "SINOXX 4006 Steel." <https://steelselector.sij.si/steels/PK330.html> (accessed MAY 02, 2020)
- 26 D. H. Herring. "Martensite." <https://www.industrialheating.com/articles/90008-martensite>

- (accessed Jul 28, 2020)
- 27 U. p. metals. "410 Stainless Steel - AMS 5504 - UNS S41000."
<https://www.upmet.com/products/stainless-steel/410> (accessed Jul 28, 2020)
- 28 H. K. D. H. Bhadeshia and S. Honeycombe, "The Tempering of Martensite," pp. 183-208, 2006, doi: 10.1016/B978-075068084-4/50011-X
- 29 J. Li, C. Zhang, B. Jiang, L. Zhou, and Y. Liu, "Effect of large-size M23C6-type carbides on the low-temperature toughness of martensitic heat-resistant steels," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 685, pp. 248-257, 2016/11/15/ 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.05.294
- 30 J. L. González-Velázquez, *Fractography and Failure Analysis*, 1 ed. (no. 3). Springer International Publishing, 2018, p. 165
- 31 I. I. LLC. "What is the Destructive Testing?" <https://www.inspection-for-industry.com/destructive-testing.html> (accessed Dec 04, 2020)
- 32 J. H. Chen and R. Cao, *Micromechanism of Cleavage Fracture of Metals*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2015, p. 486
- 33 S. G. Srinivasa Koneti, Thomas Wadsworth, T.H. Hill Associates. "Tubular fracturing: Pinpointing the cause." <https://www.drillingcontractor.org/tubular-fracturing-pinpointing-the-cause-14544> (accessed Dec 04, 2020)
- 34 A. Paar. "X-Ray diffraction (XRD)." <https://wiki.anton-paar.com/en/x-ray-diffraction-xrd/> (accessed Dec 31, 2020)
- 35 TWI. "What is X-Ray Diffraction Analysis (XRD) and How Does it Work?" <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/x-ray-diffraction> (accessed Jan 04, 2021)
- 36 C. Scheuer, R. Fraga, R. Cardoso, and S. Brunatto, "Effects of heat treatment conditions on microstructure and mechanical properties of AISI 420 steel," 2014
- 37 Y. Yu, S. Shironita, K. Souma, and M. Umeda, "Effect of chromium content on the corrosion resistance of ferritic stainless steels in sulfuric acid solution," *Heliyon*, vol. 4, no. 11, p. e00958, 2018/11/01/ 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00958
- 38 G. Kirtiratan, B. B. PANIGRAHI, and D. Chittaranjan, "Tailoring of mechanical properties of AISI 410 martensitic stainless steel through tempering."

- 39 G. R. Speich and W. C. Leslie, "Tempering of steel," Metallurgical Transactions, vol. 3, no. 5, pp. 1043-1054, 1972/05/01 1972, doi: 10.1007/BF02642436
- 40 J. Verhoeven, Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist (ASM Int.). 2007
- 41 J. JORDAN. "Ductile to brittle transitions in materials."
<https://www.jeremyjordan.me/ductile-to-brittle-transitions-in-materials/> (accessed Dec 01, 2020)
- 42 T. G. L. Thak Sang Byun, "Mechanical Properties of 304L and 316L Austenitic Stainless Steels after Thermal Aging for 1500 Hours," pp. 1-19, 2016. U.S. Department of Energy/Office of Nuclear Energy: District of Columbia





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTRE, CHULALONGKORN UNIVERSITY, Chulalongkorn Soi 62, Phayathai Rd, Bangkok 10330 Thailand Tel: 0-2218-8032 Fax: 0-2254-0211
 ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อู่พวงกวางมหาวิทยาลัย อพารตเมนต์ 3 อู่พวงกวางซอย 62 พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330 โทร. 0-2218-8032 โทรสาร 0-2254-0211



Test Report

Page 1/1

Report No. 612706-0018

Sample type: Description of specimen: Sample owner: Address:	Stainless steel Suitable for testing Department of Metallurgical Engineering Engineering 4 Building, 16 th Floor Faculty of Engineering Chulalongkorn University 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330	Objective: Analysis method: Instrument: Analysis date:	To analyze chemical composition Spark source optical emission spectrometry Optical emission spectrometer; BRUKER Q8 June 28, 2018
---	---	---	--

Sample name	Elemental composition (% by weight)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti	V
SST 401	0.148	0.340	0.486	0.017	0.0065	11.78	0.137	0.300	0.104	0.026	0.0036	0.058

 (Mr. Somnuk Nopanitaya) Analyst
 (Miss Kaew Kajornchayakul) Chief Scientist
 (Assoc. Prof. Dr. Amorn Petsorn) Acting Director

Remarks: 1. The results are valid exclusively for those samples analyzed.
 2. The report shall not be reproduced partly, except in full, without written approval of the organization.

SNVAP

รูปที่ ก.1 ส่วนผสมเคมี (wt.-%) ของชิ้นงานสลักที่เสียหายวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (wt.-%)

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าความแข็งโดยใช้เทคนิค Rockwell tester (ASTM E18)

ขณะที่ทำการทดสอบความแข็งร็อกเวล แรงที่ใช้บนหัวกดจะเพิ่มขึ้นจากแรงทดสอบเบื้องต้น จนถึงแรงทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ และจากนั้นจะลดแรงกลับไปยังแรงทดสอบเบื้องต้น โดยระยะห่าง ระหว่างการวัดความลึกของ 2 หัวกด ในขณะที่อยู่ภายใต้แรงทดสอบเบื้องต้น ค่าที่ระยะห่างความ ลึกที่วัดได้ แทนด้วย h (mm)

สำหรับการวัดที่ใช้ในหัวกดแบบเพชรมีการคำนวณดังนี้

$$\text{Rockwell hardness} = 100 - \frac{h}{0.002}$$

สำหรับการวัดที่ใช้ในหัวกดแบบบอลมีการคำนวณดังนี้

$$\text{Rockwell hardness} = 130 - \frac{h}{0.002}$$

*Rockwell C แรงทั้งหมดคือ 150 kgf, Rockwell B แรงทั้งหมดคือ 100 kgf

ตารางที่ ข-1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล HRC ของชิ้นงานสลักพินที่เสียหาย สลัก 1A สลักพิน 1B และ 1C

ตัวอย่าง	สลักพินที่เสียหาย	สลัก 1A	สลักพิน 1B	สลักพิน 1C
ครั้งที่ 1	51.0	50.0	50.0	22.0
ครั้งที่ 2	51.0	52.0	50.0	20.0
ครั้งที่ 3	55.0	52.0	50.0	20.0
ครั้งที่ 4	55.0	53.0	50.0	19.0
ครั้งที่ 5	54.0	52.0	51.0	20.0
ค่าเฉลี่ย	53.2	51.8	50.2	20.2

*ขั้นต่ำตามมาตรฐาน ASTM E18 คือ 5จุด หากต้องการความแม่นยำกว่านี้ควรกด 7-10 จุด

ภาคผนวก ค



SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH EQUIPMENT CENTRE CHULALONGKORN UNIVERSITY Chulalongkorn Soi 62 Phayathai Rd, Bangkok, 10330 Thailand Tel: 0-2254-0211
 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานเครื่องมือ ภาควิชาฟิสิกส์ อาคารสมเด็จฯ จุฬาลงกรณ์ซอย 62 พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330 โทร. 0-2254-0211 โทรสาร 0-2254-0211

Test Report

Report No. 610609-4348

Sample type: Stainless steel Description of specimen: Suitable for testing Sample owner: Engineering-4 Building, 16 th Floor Address: Faculty of Engineering Chulalongkorn University 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330	Objective: To analyze chemical composition Analysis method: Spark source optical emission spectrometry Instrument: Optical emission spectrometer; BRUKER Q8 Analysis date: September 7, 2018
---	---

Sample name	Elemental composition (% by weight)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti	V
1A	0.357	0.322	0.438	0.022	0.024	12.96	0.115	0.544	0.145	0.014	0.0040	0.017
1B	0.358	0.273	0.473	0.023	0.026	12.10	0.041	0.339	0.085	0.051	0.0039	0.089
1C	0.168	0.367	0.627	0.028	0.0088	12.03	0.056	0.376	0.183	0.015	0.0040	0.053

(Mr. Somnuk Nopanitaya)
 Analyst

(Miss Kaew Kajornchaiyakul)
 Chief Scientist

(Assoc. Prof. Dr. Amorn Petsom)
 Acting Director

Remarks: 1. The results are valid exclusively for those samples analyzed.
 2. The report shall not be reproduced partly, except in full, without written approval of the organization.

SN/SM/AP


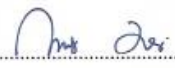
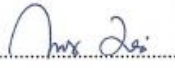
รูปที่ ค.1 ส่วนผสมเคมี (wt.-%) ของชิ้นงานสลักที่เสียหาย 1A, 1B และ 1C วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer (wt.-%)

ภาคผนวก ง



ศูนย์ทดสอบ

หน้า 1 / 2

รายงานผลทดสอบ/วิเคราะห์	
เลขที่ สลท/ศท 1479/2563	2 มีนาคม 2563
หมายเลขคำขอรับบริการ : 631382	
วันที่ขอรับบริการ : 26 กุมภาพันธ์ 2563	
ชื่อที่อยู่ผู้ขอรับบริการ : คุณกิตติภูมิ สุวรรณพัชรกุล	
185 ซอย 3ก ถนนพัฒนาการ 29 เขตสวนหลวง	
แขวงสวนหลวง กทม. 10250	
รายละเอียดตัวอย่าง : SS 410	
วิธีทดสอบ/วิเคราะห์ : Emission Spectroscopy : ส่วนประกอบทางเคมี	
ผลทดสอบ/วิเคราะห์ : รายละเอียดผลทดสอบ/วิเคราะห์ ตามเอกสารแนบ	
ผู้ทดสอบ  (นายชวาทพงษ์ กิจเจริญ) เจ้าหน้าที่ทดสอบและวิเคราะห์วัสดุ	ผู้ตรวจสอบ  (นางสาวกชพร มั่งมีทรัพย์) ทีมวิชาการ
	ผู้รับรอง  /ทท (นายณัฐพล รัตนมาลี) หัวหน้าทีมวิชาการ
1. รายงานฉบับนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบ/วิเคราะห์ และการแปลผลเป็นการแปลความทางวิชาการเท่านั้น 2. สถาบันเหล็กฯ ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งส่วนใดของรายงาน เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร จากสถาบันเหล็กฯ	

รูปที่ ง.1 เอกสารรับรองผลการทดสอบส่วนประกอบทางเคมี

เอกสารแนบ : ผลทดสอบส่วนประกอบทางเคมี	
เลขที่ สลท/ศท 1479/2563	2 มีนาคม 2563
หมายเลขคำขอรับบริการ : 631382	
วันที่ทดสอบ : 28 กุมภาพันธ์ 2563	
สถานที่ทดสอบ : อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา ชั้น 1 ห้อง 104	
ชื่อผู้ขอรับบริการ : คุณกิตติภูมิ สุวรรณพัชรกุล	
รายละเอียด/สภาพตัวอย่าง : SS 410	
หมายเลขปฏิบัติการ : TC 6308599	
สภาพแวดล้อมขณะทดสอบ : อุณหภูมิ 23.3 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ 53 %RH	
เครื่องทดสอบ : Spectrolab Model : M8, Type : LAVWA 18A, S/N : 4N0149	
หน่วย : ร้อยละ	
ชื่อตัวอย่าง	SS 410
ธาตุ	ผล
C	0.1254
Si	0.4164
Mn	0.3858
P	0.0216
S	0.0175
Cr	12.1171
Mo	0.0108
Ni	0.4211
Al	0.0012
Cu	0.0729
Nb	0.0270
Ti	0.0015
V	0.0726
1. รายงานฉบับนี้รับรองเฉพาะชิ้นตัวอย่างที่ได้ทดสอบ และการแปลผลการทดสอบเป็นการแปลความทางวิชาการเท่านั้น 2. สถาบันเหล็กฯ อนุญาตให้มีการแก้ไข เพิ่มเติม หรือเปลี่ยนแปลงรายงาน หรือส่วนหนึ่งส่วนใดของรายงาน เว้นแต่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสถาบันเหล็กฯ	

รูปที่ ง.2 ส่วนผสมเคมี (wt.-%) ของชิ้นงานที่ได้รับ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง

Optical Emission Spectrometer

ภาคผนวก จ

รายละเอียดการวัดความแข็งแบบ Rock well แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ จ-1 การทดสอบความแข็งแบบ HRB/HRC (Rockwell) ของชิ้นงานที่ได้รับ (As-received) ผ่านการอบอ่อนได้อุณหภูมิวิกฤต (Process annealing) ผ่านการอบชุบแข็ง (Hardening) และผ่านการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว (Tempering) ที่อุณหภูมิ 300, 400, 500 และ 650 °C

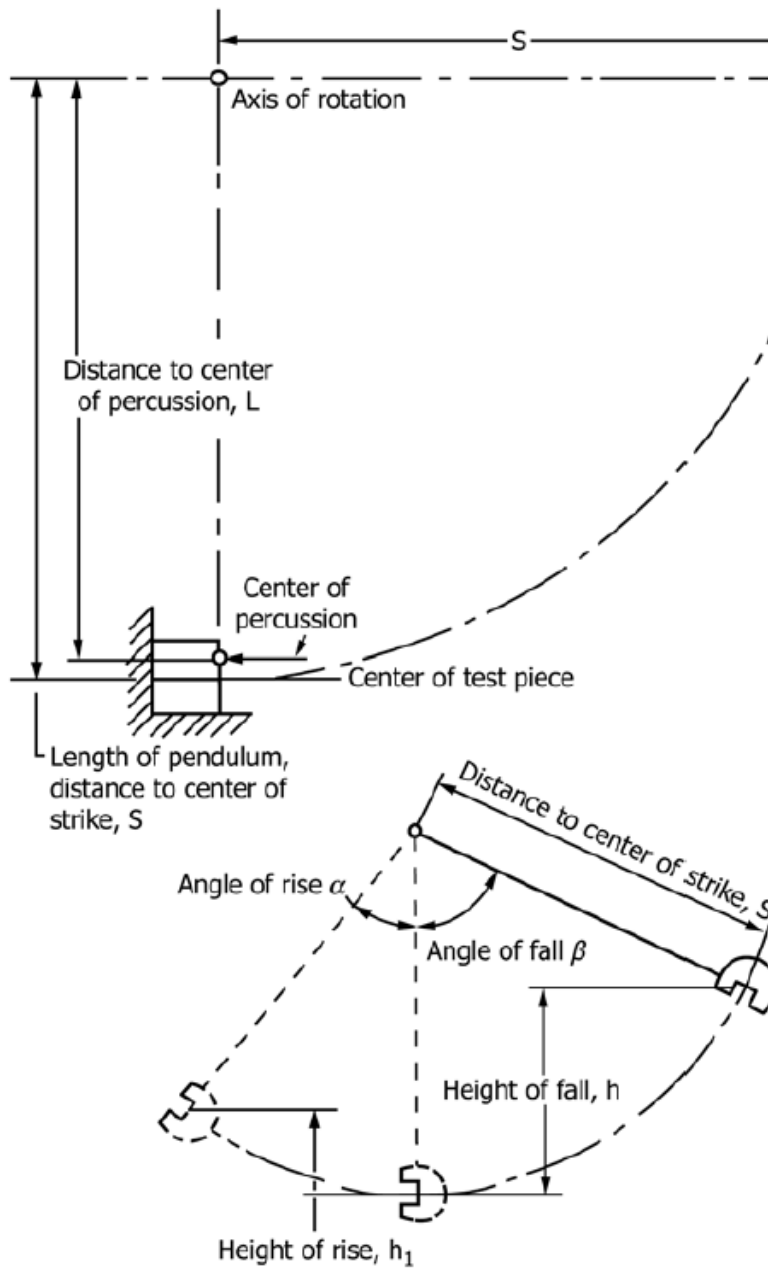
ตัวอย่าง	ชิ้นงานที่ได้รับ HRB (100 kgf)	อบอ่อนได้ อุณหภูมิ วิกฤต HRB (100 kgf)	ชุบแข็ง HRC (150 kgf)	อบคืนตัวที่ 300 °C HRC (150 kgf)	อบคืนตัวที่ 400 °C HRC (150 kgf)	อบคืนตัวที่ 500 °C HRC (150 kgf)	อบคืนตัวที่ 650 °C HRC (150 kgf)
ครั้งที่ 1	94.00	95.50	42.70	38.20	38.50	40.30	22.80
ครั้งที่ 2	93.90	93.20	44.30	37.40	38.40	40.80	22.30
ครั้งที่ 3	95.10	95.70	44.70	37.90	38.50	40.60	23.00
ครั้งที่ 4	94.50	94.40	45.00	38.40	39.40	40.60	22.80
ครั้งที่ 5	94.90	94.00	45.70	37.90	38.60	40.20	23.20
ค่าเฉลี่ย	94.48	94.56	44.48	37.96	38.68	40.50	22.82

*ชิ้นต่ำตามมาตรฐาน ASTM E18 คือ 5 จุด หากต้องการความแม่นยำกว่านี้ควรกด 7-10 จุด

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณค่าความแกร่งโดยใช้เทคนิค Impact tester (ASTM E23)

การหาค่าความแกร่งจะคำนวณ สามารถคำนวณจากค่าพลังงานศักย์ของระบบเท่ากับความสูงของลูกตุ้มที่ตกลงมาตามรูปและสมการด้านล่าง



(1)

รูปที่ ฉ.1 แบบจำลองการคำนวณค่าความแกร่ง

$$h = S(1 - \cos\beta)$$

$$h_1 = S(1 - \cos\alpha)$$

โดยที่

h = ระดับความสูงเริ่มต้นของตัวกระแทก (m)

S = ความยาวของระยะห่างของลูกตุ้มถึงจุดศูนย์กลางของตัวกระแทก (m)

β = มุมตก

h_1 = ความสูงของการเพิ่มขึ้น

α = มุมขึ้น



Test report

Customer : - Specimen Label : Stainless 410
 Job No. : 633482 Impact tup : 8 mm
 Tester : RUNGSUN Machine data : 25.6 C 38%RH
 Test standard : ASTM-E23

Type of test : Charpy

Results:


No.	Specimen designation	Specimen ID	T _{Specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	Specimen assessment	S ₀ mm ²	h mm
1	TC 6322520	No:T300-1	25	32.32	1.38	Broken	80.09	9.9800
2	TC 6322521	No:T300-2	25	32.53	1.38	Broken	80.12	10.017
3	TC 6322522	No:T300-3	25	35.37	1.38	Broken	80.16	10.007
4	TC 6322523	No:T400-1	25	13.34	1.42	Broken	80.31	9.9850
5	TC 6322524	No:T400-2	25	18.69	1.41	Broken	80.33	10.000
6	TC 6322525	No:T400-3	24.9	19.26	1.41	Broken	80.32	9.9990
7	TC 6322526	No:T500-1	25	4.88	1.44	Broken	80.35	10.021
8	TC 6322527	No:T500-2	24.2	4.63	1.44	Broken	80.28	10.001
9	TC 6322528	No:T500-3	24.2	4.39	1.44	Broken	80.42	9.9860
10	TC 6322529	No:T650-1	24.1	36.22	1.38	Broken	80.24	10.000
11	TC 6322530	No:T650-2	24	56.04	1.34	Broken	80.24	9.9920
12	TC 6322531	No:T650-3	24	64.57	1.33	Broken	80.15	9.9950

No.	w mm	Height at the notch base mm	l mm
1	9.9840	8.0220	55
2	9.9870	8.0220	55
3	9.9930	8.0220	55
4	10.011	8.0220	55
5	10.014	8.0220	55
6	10.013	8.0220	55
7	10.016	8.0220	55
8	10.008	8.0220	55
9	10.025	8.0220	55
10	10.003	8.0220	55
11	10.003	8.0220	55
12	9.9910	8.0220	55

Statistics:

Series n = 12	T _{Specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	S ₀ mm ²	h mm	w mm	Height at the notch base mm	l mm
x	24.62	26.85	1.40	80.25	9.9986	10.004	8.0220	55
s	0.4609	19.74	0.04	0.10	0.012310	0.012835	0.00000	0.000
v	1.87	73.50	2.68	0.13	0.12	0.13	0.00	0.00

รูปที่ ๑.2 รายงานสรุปผลค่าความแกร่งด้วยเครื่อง Impact tester (RKP450) ที่อุณหภูมิทดสอบ 25 °C ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410


16.11.2020

Test report

Customer : - Specimen Label : Stainless 410
 Job No. : 633482-2 Impact tup : 8 mm
 Tester : RUNGSUN Machine data : 23.3C 40%RH
 Test standard : ASTM-E23

Type of test : Charpy

Results:

No.	Specimen designation	Specimen ID	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	Specimen assessment	S ₀ mm ²	h mm
1	TC 6322532	NoT300-1	-20.4	27.39	1.39	Broken	80.39	10.007
2	TC 6322533	NoT300-2	-20.4	23.11	1.40	Broken	80.28	9.9850
3	TC 6322534	NoT300-3	-20.3	20.88	1.41	Broken	80.37	9.9740
4	TC 6322535	NoT400-1	-20.4	6.46	1.44	Broken	80.36	9.9970
5	TC 6322536	NoT400-2	-20.4	12.53	1.42	Broken	80.36	9.9970
6	TC 6322537	NoT400-3	-20.4	6.29	1.44	Broken	80.32	9.9750
7	TC 6322538	NoT500-1	-20.5	5.21	1.44	Broken	80.36	10.006
8	TC 6322539	NoT500-2	-20.5	4.31	1.44	Broken	80.16	9.9930
9	TC 6322540	NoT500-3	-20.5	3.73	1.44	Broken	80.16	9.9810
10	TC 6322541	NoT650-1	-20.5	5.96	1.44	Broken	80.05	10.009
11	TC 6322542	NoT650-2	-20.5	22.33	1.40	Broken	80.34	9.9800
12	TC 6322543	NoT650-3	-20.5	22.53	1.40	Broken	80.36	9.9750

No.	w mm	Height at the notch base mm	l mm
1	10.021	8.0220	55
2	10.008	8.0220	55
3	10.019	8.0220	55
4	10.018	8.0220	55
5	10.018	8.0220	55
6	10.013	8.0220	55
7	10.018	8.0220	55
8	9.9930	8.0220	55
9	9.9920	8.0220	55
10	9.9790	8.0220	55
11	10.015	8.0220	55
12	10.018	8.0220	55


Statistics:

Series n = 12	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	S ₀ mm ²	h mm	w mm	Height at the notch base mm	l mm
\bar{x}	-20.44	13.40	1.42	80.29	9.9899	10.009	8.0220	55
s	0.06686	9.08	0.02	0.11	0.013228	0.013700	0.00000	0.000
v	-0.33	67.80	1.36	0.14	0.13	0.14	0.00	0.00

633482-2..zs2

Page1/1

รูปที่ ๓.3 รายงานสรุปผลค่าความแกร่งด้วยเครื่อง Impact tester (RKP450) ที่อุณหภูมิทดสอบ
 -20 °C ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410


16.11.2020

Test report

Customer : - Specimen Label : Stainless 410
 Job No. : 633482 Impact tup : 8 mm
 Tester : RUNGSUN Machine data : 25.0°C 36%RH
 Test standard : ASTM-E23
 Type of test : Charpy

Results:

No.	Specimen designation	Specimen ID	T _{Specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	Specimen assessment	S ₀ mm ²	h mm
1	TC 6322544	No:T300-1	-50.2	7.39	1.43	Broken	80.51	9.9870
2	TC 6322545	No:T300-2	-50.2	6.54	1.44	Broken	80.26	9.9860
3	TC 6322546	No:T300-3	-50.2	4.72	1.44	Broken	80.40	9.9860
4	TC 6322547	No:T400-1	-50.3	4.06	1.44	Broken	80.07	9.9940
5	TC 6322548	No:T400-2	-50.4	3.49	1.44	Broken	80.30	10.000
6	TC 6322549	No:T400-3	-50.4	4.39	1.44	Broken	80.25	9.9760
7	TC 6322550	No:T500-1	-50.5	3.17	1.44	Broken	80.25	10.002
8	TC 6322551	No:T500-2	-50.5	3.33	1.44	Broken	80.32	9.9960
9	TC 6322552	No:T500-3	-50.5	3.01	1.44	Broken	80.30	9.9930
10	TC 6322553	No:T650-1	-50.5	4.80	1.44	Broken	80.27	10.019
11	TC 6322554	No:T650-2	-50.5	3.90	1.44	Broken	80.21	10.008
12	TC 6322555	No:T650-3	-50.7	3.98	1.44	Broken	80.21	10.008

No.	w mm	Height at the notch base mm	l mm
1	10.036	8.0220	55
2	10.005	8.0220	55
3	10.023	8.0220	55
4	9.9810	8.0220	55
5	10.010	8.0220	55
6	10.004	8.0220	55
7	10.004	8.0220	55
8	10.012	8.0220	55
9	10.010	8.0220	55
10	10.006	8.0220	55
11	9.9990	8.0220	55
12	9.9990	8.0220	55

Statistics:

Series n = 12	T _{Specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	S ₀ mm ²	h mm	w mm	Height at the notch base mm	l mm
x	-50.41	4.40	1.44	80.28	9.9963	10.007	8.0220	55
s	0.1564	1.34	0.00	0.11	0.011917	0.013365	0.00000	0.000
v	-0.31	30.50	0.22	0.13	0.12	0.13	0.00	0.00

633482-3(-50°C)-1.zs2

Page1/1

รูปที่ ๑.4 รายงานสรุปผลค่าความแกร่งด้วยเครื่อง Impact tester (RKP450) ที่อุณหภูมิทดสอบ
 -50 °C ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

Test report

Customer : - Specimen Label : Stainless 410
 Job No. : 633482-3 Impact tup : 8 mm
 Tester : RUNGSUN Machine data : 24.7°C 35%RH
 Test standard : ASTM-E23

Type of test : Charpy

Results:

No.	Specimen designation	Specimen ID	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	Specimen assessment	S ₀ mm ²	h mm
1	TC 6322556	No:T300-1	-60.3	6.04	1.44	Broken	80.42	10.002
2	TC 6322557	No:T300-2	-60.3	7.39	1.43	Broken	80.46	10.002
3	TC 6322558	No:T300-3	-60.4	7.05	1.43	Broken	80.44	9.9830
4	TC 6322559	No:T400-1	-59.5	3.73	1.44	Broken	80.44	9.9890
5	TC 6322560	No:T400-2	-59.5	3.17	1.44	Broken	80.38	9.9780
6	TC 6322561	No:T400-3	-60.1	5.38	1.44	Broken	80.32	9.9987
7	TC 6322562	No:T500-1	-60.1	3.65	1.44	Broken	80.27	9.9980
8	TC 6322563	No:T500-2	-60.1	3.41	1.44	Broken	80.08	9.9800
9	TC 6322564	No:T500-3	-60.2	3.33	1.44	Broken	80.24	10.000
10	TC 6322565	No:T650-1	-60.3	4.63	1.44	Broken	80.20	9.9910
11	TC 6322566	No:T650-2	-60.3	4.14	1.44	Broken	80.24	9.9950
12	TC 6322567	No:T650-3	-60.3	6.29	1.44	Broken	80.27	9.9980

No.	w mm	Height at the notch base mm	l mm
1	10.025	8.0220	55
2	10.030	8.0220	55
3	10.027	8.0220	55
4	10.027	8.0220	55
5	10.020	8.0220	55
6	10.012	8.0220	55
7	10.006	8.0220	55
8	9.9830	8.0220	55
9	10.002	8.0220	55
10	9.9980	8.0220	55
11	10.002	8.0220	55
12	10.006	8.0220	55

Statistics:

Series n = 12	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	S ₀ mm ²	h mm	w mm	Height at the notch base mm	l mm
x	-60.12	4.85	1.44	80.31	9.9929	10.012	8.0220	55
s	0.304	1.52	0.00	0.12	0.0085883	0.014501	0.00000	0.000
v	-0.51	31.39	0.25	0.14	0.09	0.14	0.00	0.00

633482-3(-60°C).zs2

รูปที่ ๑.5 รายงานสรุปผลค่าความแกร่งด้วยเครื่อง Impact tester (RKP450) ที่อุณหภูมิทดสอบ
 -50 °C ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์เกรด 410

ภาคผนวก ข

รูปแบบตำแหน่งระนาบของโครงสร้างผลึกที่วัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

Reference pattern: 03-065-4899

ชื่อ Iron (Ferrite)

ความยาวคลื่น 1.540600 Å

Angle (2θ)	Intensity	(h,k,l)
44.663	999	1 1 0
65.008	116	2 0 0
82.314	174	2 1 1
98.917	45	2 2 0
116.344	62	3 1 0
137.097	17	2 2 2

Reference pattern: 00-044-1290

ชื่อ Iron (Martensite)

ความยาวคลื่น 1.540600 Å

Angle (2θ)	Intensity	(h,k,l)
44.183	100	1 0 1
44.803	49	1 0 0
63.285	7	0 0 2
65.222	12	2 0 0
80.842	11	1 1 2
82.164	20	2 1 1
97.545	6	2 0 2
99.307	3	2 2 0
112.543	5	1 0 3
116.390	5	3 0 1
116.861	7	3 1 0
135.389	4	2 2 2
164.610	10	2 1 3

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 การทดสอบความแข็งแบบ HRB (Rockwell) ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์เกรด 316L


ตัวอย่าง	SS316L
ครั้งที่ 1	78.70
ครั้งที่ 2	78.60
ครั้งที่ 3	78.20
ครั้งที่ 4	78.70
ครั้งที่ 5	79.10
ค่าเฉลี่ย	78.66

*ขั้นต่ำตามมาตรฐาน ASTM E18 คือ 5 จุด หากต้องการความแม่นยำกว่านี้ควรกด 7-10 จุด

ตารางที่ ข-2 การทดสอบความแข็งแบบ HRC (Rockwell) ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนิต์เกรด 316L

ตัวอย่าง	SS316L
ครั้งที่ 1	6.20
ครั้งที่ 2	6.70
ครั้งที่ 3	6.60
ครั้งที่ 4	6.60
ครั้งที่ 5	6.40
ค่าเฉลี่ย	6.52

*ขั้นต่ำตามมาตรฐาน ASTM E18 คือ 5 จุด หากต้องการความแม่นยำกว่านี้ควรกด 7-10 จุด

		22.12.2020						
		Test report						
Customer	: -	Specimen Label	: Stainless 316L					
Job No.	: 640887	Impact tup	: 8 mm					
Tester	: RUNGSUN	Machine data	: 23.0°C 32 %RH					
Test standard	: ASTM-E23							
Type of test : Charpy								
Results:								
No.	Specimen designation	Specimen ID	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	Specimen assessment	S ₀ mm ²	h mm
1	TC 6408636	No:1 (25°C)	23	312.74	0.99	Broken	60.79	10.040
2	TC 6408637	No:2 (25°C)	23	311.92	1.00	Broken	60.78	10.017
3	TC 6408638	No:3 (25°C)	23	320.06	0.98	Broken	60.94	10.025
No.	w mm	Height at the notch base mm	l mm					
1	7.5510	8.0500	55					
2	7.5500	8.0500	55					
3	7.5700	8.0500	55					
Statistics:								
Series n = 3	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	S ₀ mm ²	h mm	w mm	Height at the notch base mm	l mm
\bar{x}	23	314.91	0.99	60.83	10.027	7.5570	8.0500	55
s	0.000	4.48	0.01	0.09	0.011676	0.011269	0.00000	0.000
v	0.00	1.42	0.64	0.15	0.12	0.15	0.00	0.00

640887-25°C.zs2

รูปที่ ณ.1 รายงานสรุปผลค่าความแกร่งด้วยเครื่อง Impact tester (RKP450) ที่อุณหภูมิทดสอบ 25 °C ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L

Test report

Customer : - Specimen Label : Stainless 316L
 Job No. : 640887 Impact tup : 8 mm
 Tester : RUNGSUN Machine data : 23.1°C 31 %RH
 Test standard : ASTM-E23

Type of test : Charpy

Results:


No.	Specimen designation	Specimen ID	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	Specimen assessment	S ₀ mm ²	h mm
1	TC 6408639	No:1 (-20°C)	-20.1	331.83	0.97	Broken	60.95	10.021
2	TC 6408640	No:2 (-20°C)	-20.1	341.58	0.95	Broken	60.95	10.025
3	TC 6408641	No:3 (-20°C)	-20.1	339.55	0.96	Broken	60.78	10.002

No.	w mm	Height at the notch base mm	l mm
1	7.5720	8.0500	55
2	7.5720	8.0500	55
3	7.5500	8.0500	55

Statistics:

Series n = 3	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	S ₀ mm ²	h mm	w mm	Height at the notch base mm	l mm
\bar{x}	-20.1	337.66	0.96	60.90	10.016	7.5647	8.0500	55
s	0.000	5.14	0.01	0.10	0.012288	0.012702	0.00000	0.000
v	-0.00	1.52	0.81	0.17	0.12	0.17	0.00	0.00

รูปที่ ๓.2 รายงานสรุปผลค่าความแกร่งด้วยเครื่อง Impact tester (RKP450) ที่อุณหภูมิทดสอบ
 -20 °C ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L


22.12.2020

Test report

Customer : - Specimen Label : Stainless 316L
 Job No. : 640887 Impact tup : 8 mm
 Tester : RUNGSUN Machine data : 21°C 31 %RH
 Test standard : ASTM-E23
 Type of test : Charpy

Results:

No.	Specimen designation	Specimen ID	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	Specimen assessment	S ₀ mm ²	h mm
1	TC 6408642	No:1(-50°C)	-50.2	354.30	0.93	Broken	60.94	10.019
2	TC 6408643	No:2(-50°C)	-50.2	342.59	0.95	Broken	60.95	10.021
3	TC 6408644	No:3(-50°C)	-50.2	338.66	0.96	Broken	60.96	10.016

No.	w mm	Height at the notch base mm	l mm
1	7.5700	8.0500	55
2	7.5720	8.0500	55
3	7.5730	8.0500	55

Statistics:

Series n = 3	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	S ₀ mm ²	h mm	w mm	Height at the notch base mm	l mm
\bar{x}	-50.2	345.19	0.95	60.95	10.019	7.5717	8.0500	55
s	0.000	8.14	0.01	0.01	0.0025166	0.0015275	0.00000	0.000
v	-0.00	2.36	1.34	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00

640887-50°C.zs2

Page1/1

รูปที่ ๓.3 รายงานสรุปผลค่าความแกร่งด้วยเครื่อง Impact tester (RKP450) ที่อุณหภูมิทดสอบ -50 °C ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L

22.12.2020

Zwick / Roell

Test report

Customer : - Specimen Label : Stainless 316L
 Job No. : 640887 Impact tup : 8 mm
 Tester : RUNGSUN Machine data : 22.2°C 30%RH
 Test standard : ASTM-E23
 Type of test : Charpy

Results:

No.	Specimen designation	Specimen ID	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	Specimen assessment	S ₀ mm ²	h mm
1	TC 6408645	No:1(-60°)	-60	360.85	0.92	approx. (Broken)	60.95	10.015
2	TC 6408646	No:2(-60°)	-60	284.23	1.03	Broken	60.86	10.008
3	TC 6408647	No:3(-60°)	-60	280.62	1.04	Broken	60.94	10.023

No.	w mm	Height at the notch base mm	l mm
1	7.5720	8.0500	55
2	7.5600	8.0500	55
3	7.5700	8.0500	55

Statistics:

Series n = 3	T _{specimen} °C	KV _s J	K(Friction) J	S ₀ mm ²	h mm	w mm	Height at the notch base mm	l mm
\bar{x}	-60	308.57	1.00	60.92	10.015	7.5673	8.0500	55
s	0.000	45.31	0.07	0.05	0.0075056	0.0064291	0.00000	0.000
v	-0.00	14.69	6.62	0.08	0.07	0.08	0.00	0.00

640887-60°C.zs2

Page1/1

(4)

รูปที่ ๓.4 รายงานสรุปผลค่าความแกร่งด้วยเครื่อง Impact tester (RKP450) ที่อุณหภูมิทดสอบ -60 °C ของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์เกรด 316L

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

วัน เดือน ปี เกิด

สถานที่เกิด

วุฒิการศึกษา

ที่อยู่ปัจจุบัน

28 มิถุนายน 2539

กรุงเทพฯ

ระดับประถมศึกษา : โรงเรียนอุดมศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา : โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ

ปริญญาตรี : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

185 ซอย 3ก ถนน พัฒนาการ 29 เขต สวนหลวง แขวง สวนหลวง กทม
10250



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY