

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้า Fe-Cr-Mo ที่ผ่านการขึ้นเตอร้ง

วนานูรัตน์ ศรีจำพันธ์¹, เรืองเดช ธงศรี², ธัญพร ยอดแก้ว², นาทยา ต่อแสงธรรม²,
มนภาส มรกตจินดา², รุ่งทิพย์ กระต่ายทอง² และอัมพร เวียงมูล^{1*}

Relationship between Microstructure and Mechanical Property of Sintered Fe-Cr-Mo Steels

Wananurat Srijampan¹, Ruangdaj Tongsrir², Thanyaporn Yotkaew², Nattaya Torsangthum²,
Monnapas Morakotjinda², Rungtip Krataitong² and Amporn Wiengmoon^{1*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

²หน่วยวิจัยและพัฒนาโลหะวิทยาผอง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ปทุมธานี 10120

¹Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000

²Powder Metallurgy Research and Development Unit, National Metal and Materials Technology Center, PathumThani 12120

*Corresponding author. E-mail address: ampornw@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลของคาร์บอนและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติในเหล็กกล้า Fe-3.0wt.%Cr-0.5wt.%Mo-0.01wt.%C ที่เติมคาร์บอนในปริมาณ 0.2 และ 0.3wt.%C โดยนำผงโลหะมาอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องให้มีความหนาแน่น 6.5 g/cm³ และขึ้นเตอร้งที่อุณหภูมิ 1280°C ในเตาส์ญญากาศ ทำให้เย็นตัวด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อัตรา 0.1 และ 4.0°C/s ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาชนิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ทดสอบความแข็งและทดสอบแรงดึง จากการศึกษาพบว่าเมื่อให้อัตราการเย็นตัว 0.1°C/s ชิ้นงานที่เติมคาร์บอน 0.2% มีโครงสร้างจุลภาคเป็น polygonal ferrite (PF) ส่วนชิ้นงานที่เติมคาร์บอน 0.3wt.% ประกอบด้วย PF และเบนไนต์เมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นเป็น 4.0°C/s มีโครงสร้างเป็นเบนไนต์ มาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์บางส่วนความแข็งและความต้านทานแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่เติมคาร์บอน 0.2 และ 0.3% ที่อัตราการเย็นตัว 0.1°C/s มีค่าเป็น 106.7 HV0.1, 127.3 HV0.1 และ 205.3 MPa, 565.5 MPa ตามลำดับเมื่ออัตราการเย็นตัวเป็น 4.0°C/s จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 304.5 HV0.1, 436.1 HV0.1 และ 470.4 MPa, 700.2 MPa ตามลำดับ

คำสำคัญ: เหล็กกล้า Fe-Cr-Mo โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล อัตราการเย็นตัว

Abstract

In this work, the effect of carbon content and cooling rate on microstructure and mechanical property of the Fe-3.0wt.%Cr-0.5wt.%Mo-0.01wt.%C steel was investigated. The pre-alloyed powder was mixed with 0.2 and 0.3wt.%C. The powder mixtures were compacted with hydraulic compactor at room temperature to green density of 6.5 g/cm³. The green compact were sintered at 1280 °C in vacuum furnace and cooled by nitrogen gas with cooling rate of 0.1 and 4.0°C/s. It was found that the microstructure of 0.2wt.%C sintered steel at cooling rate of 0.1°C/s consisted of polygonal ferrite (PF). The steel containing 0.3wt.%C, the microstructure consisted of PF and bainite. At higher cooling rate of 4.0°C/s, bainite, martensite and some retained austenite (γ) were found in both steels. The Vickers microhardness and ultimate tensile strength of the steels containing 0.2 and 0.3wt.%C with cooling rate of 0.1°C/s were 106.7 HV0.1, 127.3 HV0.1 and 205.3 MPa, 565.5 MPa, respectively. At cooling rate of 4.0°C/s, Vickers microhardness and ultimate tensile strength were increased up to 304.5 HV0.1, 436.1 HV0.1 and 470.4 MPa, 700.2 MPa, respectively.

Keywords: Fe-Cr-Mo steel, Microstructure, Mechanical Property, Coolingrate



บทนำ

กรรมวิธีโลหะผงเป็นวิธีการผลิตวัสดุหรือชิ้นส่วนจากผงโลหะ โดยการนำผงโลหะไปอัดขึ้นรูปและนำไปขึ้นเครื่อง กรรมวิธีโลหะผงเข้ามามีบทบาททดแทนการขึ้นรูปแบบดั้งเดิม เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ มีน้ำหนักเบา มีความแม่นยำของรูปร่างและยังประหยัดวัตถุดิบหรือผงตั้งต้น (นภิสร มิมงคล, 2548)

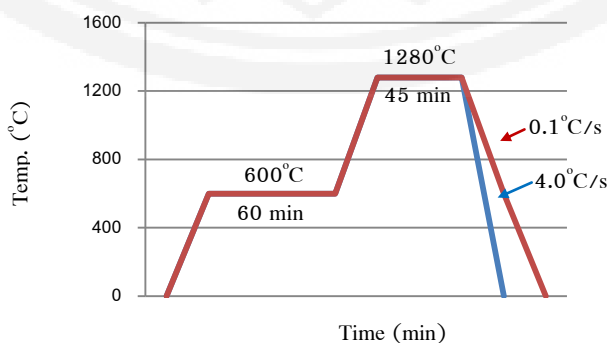
Astaloy CrM มักใช้เป็นผงโลหะเริ่มต้น (Pre-alloyed) ที่มีส่วนผสมประกอบด้วยธาตุเหล็ก โครเมียม 3wt.% โมลิบดีนัม 0.5wt.% และคาร์บอน 0.01wt.% ผลิตด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันด้วยน้ำ ทำให้ผงโลหะมีความเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถทำการอัดขึ้นรูปและชุบแข็งได้ดี (Höganäs, 2015) จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้า Astaloy CrM ขึ้นกับการเติมธาตุ เช่น คาร์บอน อุณหภูมิขึ้นเครื่องและอัตราการเย็นตัว ในปี 2000 Yu พบว่าเหล็กกล้า Astaloy CrM ที่เติมคาร์บอน 0.3–0.5wt.% เมื่อปล่อยให้เย็นตัวปกติภายในเตาจะมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเบนไนต์และเฟอร์ไรท์ ซึ่งเบนไนต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น Lindberg, Johansson, and Maroli (2000) ได้เติมคาร์บอน 0.4wt.% ใน Astaloy CrM อัดขึ้นรูปร้อนและขึ้นเครื่องที่ 1120°C พบว่ามีความแข็งแรงสูงถึง 450 HV10 มีความแข็งแรงสูงมากถึง 850 MPa นอกจากนี้ Lewenhagen (2000) (Dlapka, Danning, Gierl, & Lindqvist, 2010; Sulowaski & Cias, 2011) พบว่าเหล็กกล้า Astaloy CrM ที่เติมคาร์บอน 0.3, 0.5, 0.7wt.% เมื่อนำมาขึ้นเครื่องอุณหภูมิ 1250°C จะส่งผลให้เหล็กกล้ามีความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงสูงกว่าการขึ้นเครื่องที่อุณหภูมิ 1120°C แต่ความเหนียวจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราการเย็น

ตัวหลังการขึ้นเครื่องจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันไป โดยที่อัตราการเย็นตัวเร็วจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ทำให้ความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงสูง เมื่ออัตราการเย็นตัวต่ำส่งผลให้เกิดโครงสร้างเบนไนต์ เฟอร์ไรท์และเพอร์ไรท์ ซึ่งความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงจะลดลง (Dobrzański & Muszyfaga, 2009; Moghaddam Farhangi, Ghambari, & Solimanjad, 2012; Moghaddam & Solimanjad, 2013) อย่างไรก็ตามพบว่าการวิจัยที่ผ่านมาจะมุ่งเน้นไปที่การเติมคาร์บอนในปริมาณที่มากกว่า 0.3wt.% และอัตราเย็นตัว 1.0–7.0°C/s ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของคาร์บอนในปริมาณ 0.2 และ 0.3wt.% ที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำและปานกลาง

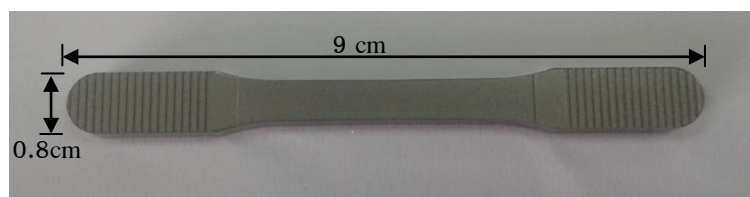
วิธีการศึกษาและวัสดุอุปกรณ์

1. การเตรียมชิ้นงาน

ชิ้นงานในการทดลองเตรียมโดยการนำโลหะผง Astaloy CrM (3.0wt.%Cr–0.5wt.%Mo–0.01wt.%C) มาผสมกับคาร์บอนในรูปของกราไฟต์ในปริมาณ 0.2 และ 0.3wt.% และสารหล่อลื่น zinc stearate (ZnSt) ในปริมาณ 1wt.% ในเครื่องผสมสารเป็นเวลา 45 นาที จากนั้นนำผงโลหะที่ผสมแล้วไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรงอัด 400 MPa เป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน MPIF Standard 10 ให้มีความหนาแน่น (green density) 6.5 g/cm³ จากนั้นนำไปขึ้นเครื่องที่อุณหภูมิ 1280°C เป็นเวลา 45 นาที ในสุญญากาศและปล่อยให้เย็นตัวถึงอุณหภูมิห้องภายใต้อัตราการเย็นตัว 0.1 และ 4.0°C/s โดยการอัดก๊าซไนโตรเจนขึ้นตอนการเตรียมชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 1 ตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นเครื่อง แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการขึ้นเครื่องและการเย็นตัว



รูปที่ 2 ตัวอย่างชิ้นงานหลังการขึ้นเตอร้ง

2. ศึกษาชนิดเฟสและโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานเพื่อศึกษาชนิดเฟสด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นเตอร้งมาตัดและขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 320, 600 และ 1000 ตามลำดับและขัดละเอียดบนผ้าสักหลาดด้วยผงขัดเพชรขนาด 6, 3 และ 1 ไมครอน จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ห้อง Rigaku รุ่น TTRAX III

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยนำชิ้นงานที่ขัดละเอียดมากัดด้วยกรด 2 ชนิด 1) Nital 5% เพื่อศึกษาโครงสร้างโดยรวม 2) การย้อมสีด้วยกรด Picric 5 g + Ethanol 100 ml เป็นเวลา 20 วินาที และตามด้วย กรด $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 10 g + น้ำกลั่น 100 ml เพื่อแยกแยะระหว่างเบนไนต์ มาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์

3. การทดสอบสมบัติทางกล

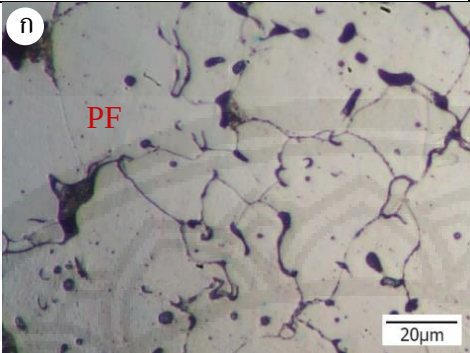
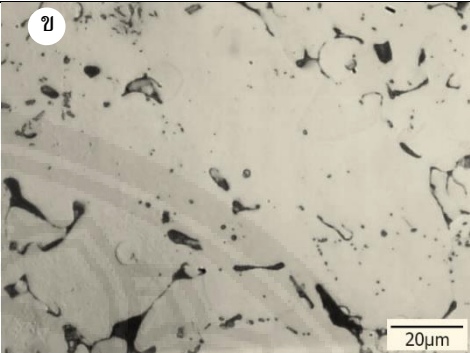
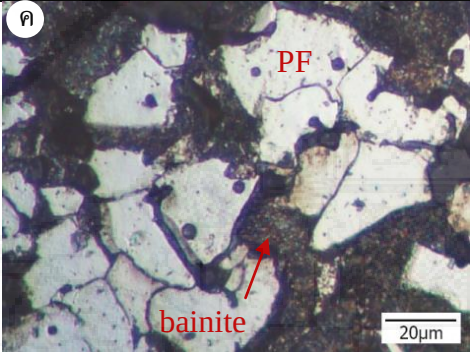
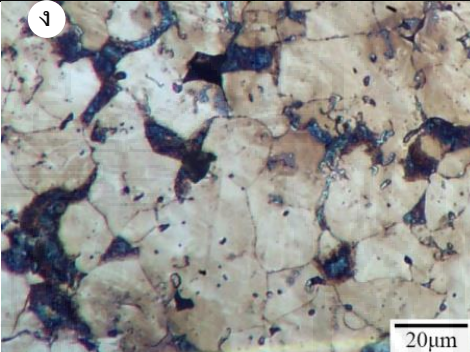
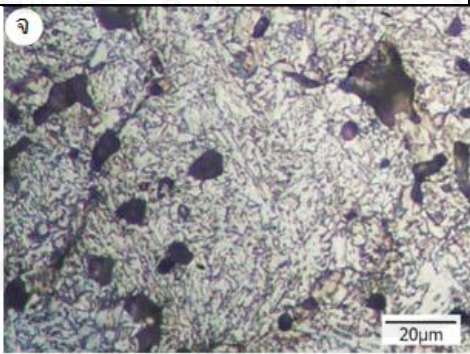
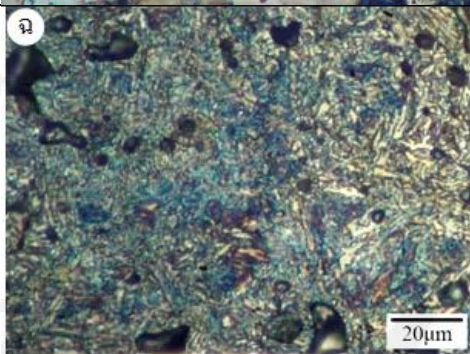
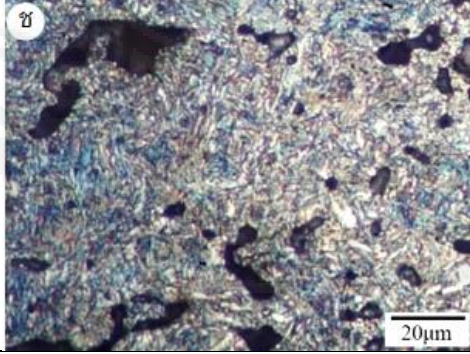
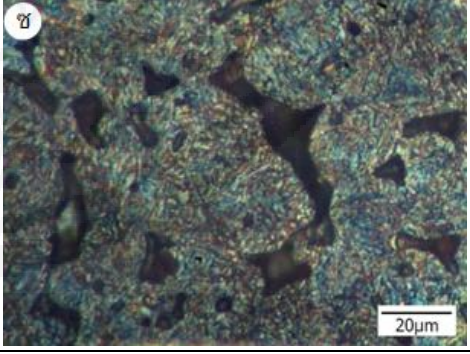
สมบัติทางกลของเหล็กกล้าได้ทำการทดสอบความแข็งแรงโมโครแบบวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนัก 100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที ชิ้นงานละ 10 จุด และหาค่าเฉลี่ย และทำการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ด้วยเครื่อง Instron Universal Instrument ทดสอบตามมาตรฐาน MPIF Standard 42 ทดสอบตัวอย่างละ 3 ชิ้น และนำมาหาค่าเฉลี่ย

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

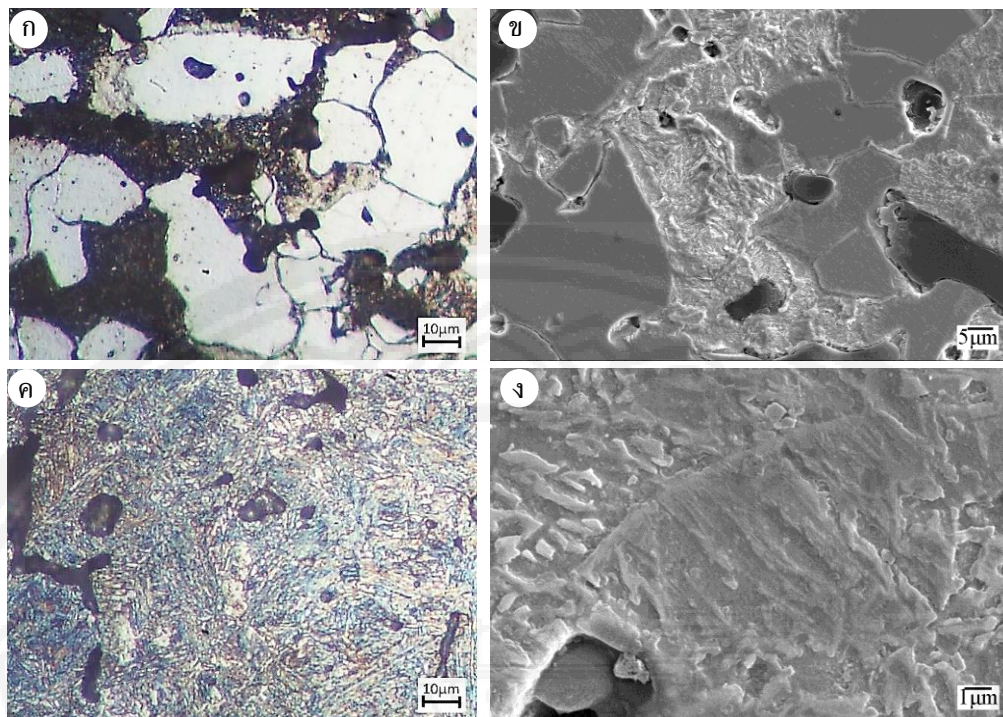
1. โครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงพบว่าเมื่ออัตราการเย็นตัวเป็น 0.1°C/s เหล็กกล้า Astaloy CrM ที่มีปริมาณคาร์บอน 0.2wt.% หลังการกัดกรดด้วย Nital 5% ดังรูปที่ 3(ก-ข) พบว่ามีโครงสร้างเป็น polygonal ferrite (PF) ส่วนชิ้นงานที่มีคาร์บอน 0.3wt.% มีโครงสร้างจุลภาคแบบ dual phase ที่ประกอบด้วย PF และเบนไนต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างของเฟอร์ไรท์และซีเมนไตต์ (Fe_3C) ดังรูปที่ 3(ค-ง) เมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นเป็น 4.0°C/s ชิ้นงานที่เติมคาร์บอน 0.2 และ 0.3wt.% มีโครงสร้างประกอบด้วย เบนไนต์มาร์เทนไซต์ และออสเทนไนต์ตกค้าง เมื่อทำการกัดกรดด้วยสีโครงสร้าง (color etching) ทำให้สามารถแยกเฟสเบนไนต์และมาร์เทนไซต์ได้ ซึ่งจะเห็นโครงสร้างของเบนไนต์เป็นสีฟ้า ส่วนมาร์เทนไซต์เป็นสีน้ำตาล และออสเทนไนต์เป็นสีขาว ดังรูปที่ 3 (จ-ข) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็น 0.3wt.% ปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์ (สีน้ำตาล) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอน 0.2wt.% รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของเบนไนต์ที่กำลังขยายสูงจะเห็นลักษณะของเฟอร์ไรท์ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นแหลมและโตเข้าไปในเกรนจากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu ซึ่งได้ศึกษา Astaloy CrM ที่เติมคาร์บอน 0.3 และ 0.4wt.% ที่อัตราการเย็นตัว $0.1-0.25^\circ\text{C/s}$ พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรท์และเบนไนต์ และที่อัตราการเย็นตัว $2-5^\circ\text{C/s}$ มีโครงสร้างเป็น เบนไนต์และมาร์เทนไซต์



Cooling rate (°C/s)	%C	Nital 5%	Picral 5% และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 10%
0.1	0.2	ก 	ข 
	0.3	ค 	ง 
4.0	0.2	จ 	ฉ 
	0.3	ช 	ซ 

รูปที่ 3 ผลของคาร์บอนและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างจุลภาคของ Astaloy CrM หลังการกัดด้วยกรด 5% Nital และ Picral 5% และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 10%

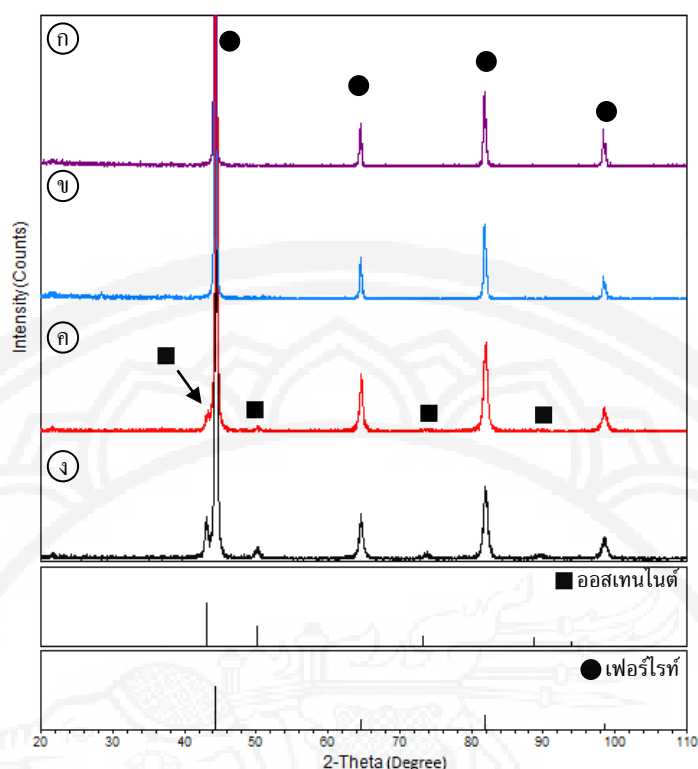


รูปที่ 4 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ Astaloy CrM ที่มีปริมาณคาร์บอน 0.3%C ที่อัตราการเย็นตัวต่างกัน (ก-ข) 0.1°C/s (ค-ง) 4.0°C/s

2. การศึกษาชนิดเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากผลการศึกษาด้วย XRD พบว่าที่อัตราการเย็นตัว 0.1°C/s จะประกอบด้วยพีคของเฟอร์ไรต์ทั้งหมดเมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นเป็น 4.0°C/s จะพบเฟสของเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ตกค้าง (รูปที่ 5) อย่างไรก็ตามไม่พบพีคของซีเมนไตต์และมาเทนไซต์ ทั้งนี้อาจ

เนื่องมาจากเฟสทั้งสองมีปริมาณต่ำจนไม่สามารถตรวจพบด้วยเทคนิคนี้ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 3 ที่พบเฟสของเบนไนท์ (สีฟ้า) มากกว่ามาเทนไซต์ (สีน้ำตาล) การเกิดเฟสออสเทนไนต์ตกค้างเมื่ออัตราการเย็นตัวสูง เนื่องจากโครงสร้างออสเทนไนต์ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์เบนไนท์ หรือมาเทนไซต์ได้ทั้งหมด ทำให้ยังคงมีออสเทนไนต์ตกค้าง

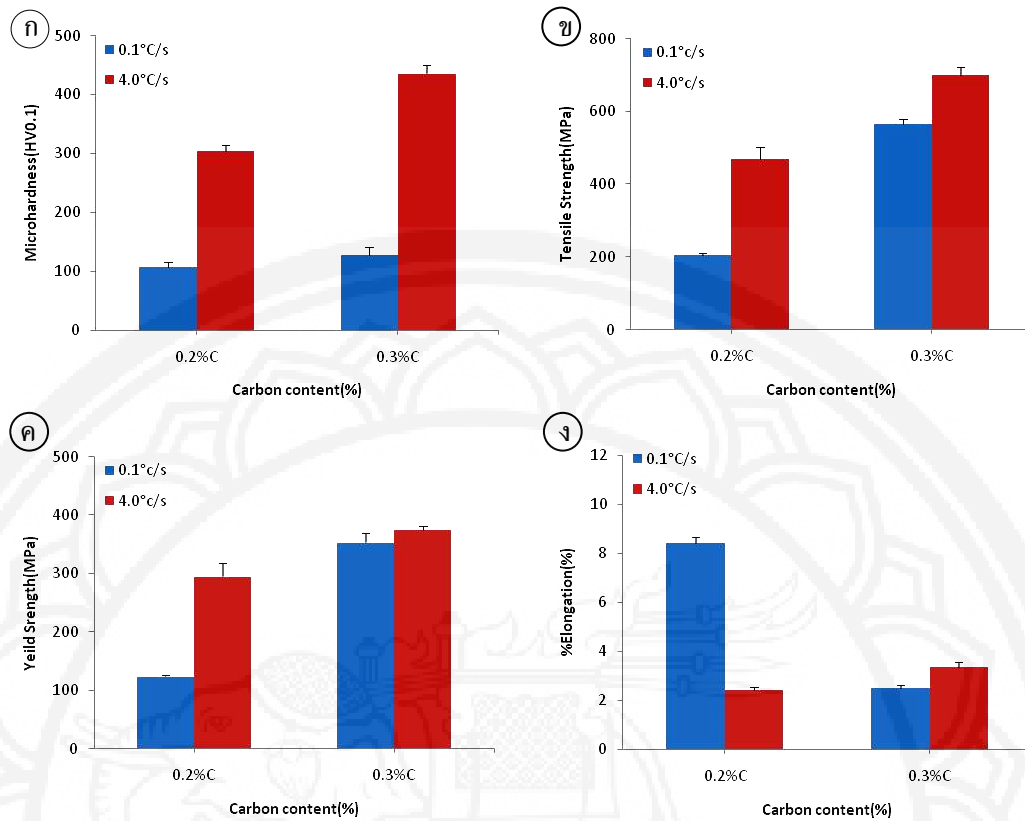


รูปที่ 5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของAstaloyCrMที่ปริมาณคาร์บอนต่างกันและอัตราเย็นตัวต่างกัน
(ก) 0.2wt.%C, 0.1°C/s (ข) 0.3wt.%C, 0.1°C/s (ค) 0.2wt.%C, 4.0°C/s (ง) 0.3wt.%C, 4.0°C/s

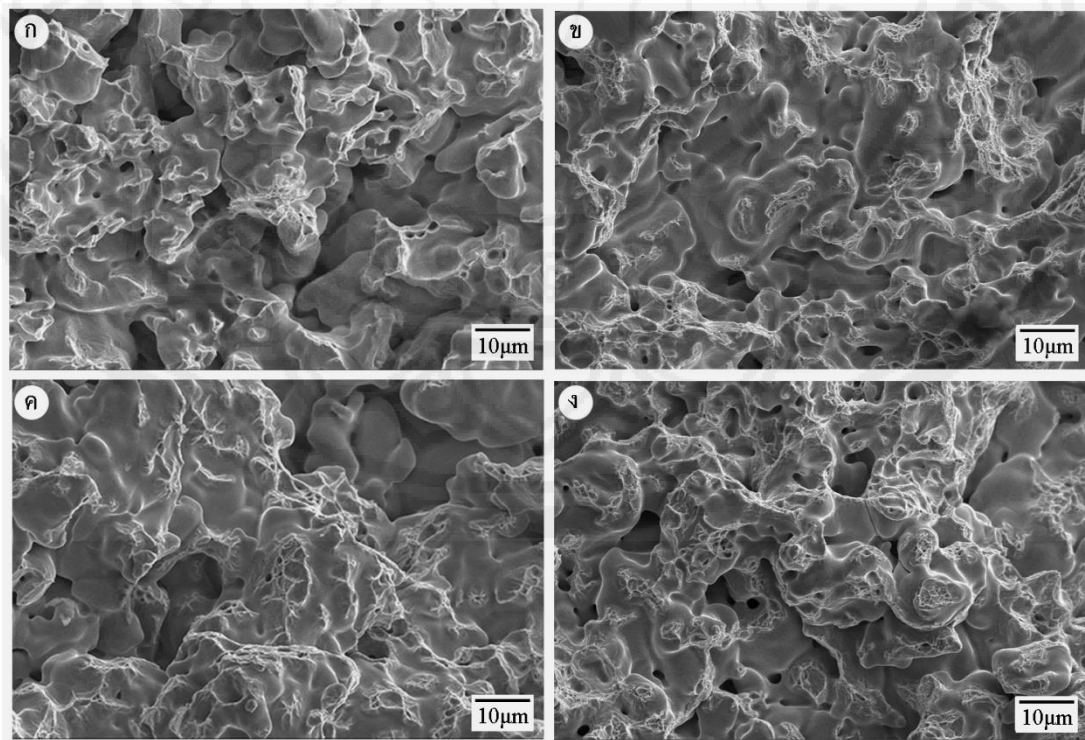
3. การทดสอบสมบัติทางกล

รูปที่ 6 แสดงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ปริมาณคาร์บอนและอัตราการเย็นตัวต่างกันจากการทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์และทดสอบแรงดึงพบว่าที่อัตราการเย็นตัว 0.1°C/s เหล็กกล้า Astaloy CrM ที่เติมคาร์บอน 0.2% มีความแข็งแรงความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ความต้านทานแรงดึงจุดคราก (yield Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (percent elongation) เป็น 106.7 HV0.1, 205.3 MPa, 123.8 MPa และ 8.42% ตามลำดับ ส่วนเหล็กกล้า Astaloy CrM ที่เติมคาร์บอน 0.3wt.% มีค่าเป็น 127.3 HV0.1, 565.5 MPa, 353.4 MPa และ 2.5% ตามลำดับ เมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นเป็น 4.0°C/s เหล็กกล้า Astaloy CrM ที่เติมคาร์บอน 0.2wt.% มีความแข็งแรงความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความต้านทานแรงดึงจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว เป็น 304.5 HV0.1, 470.4 MPa, 294.8 MPa , 2.4% ตามลำดับ ส่วนเหล็กกล้า Astaloy CrM ที่เติมคาร์บอน 0.3wt.% มีค่าเป็น 436.1 HV0.1, 700.2 MPa,

374.5 MPa, 3.4% ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อปริมาณคาร์บอนและอัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นเหล็กกล้าจะมีความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นส่วนเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะลดลง เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นเบ็นไนต์และมาร์เทนไซต์ที่แข็ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sulowaski & Cias (2011; Moghaddamet al., 2012; Moghaddam & Solimanjad, 2013; Dobrzański & Musztyfaga, 2009) จากการศึกษาผิวรอยแตกหลังทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียวและแบบเปราะ โดยสังเกตจากลักษณะที่เป็นหลุมหรือรอยบุ๋ม (dimple) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการแตกแบบเหนียว ส่วนการแตกแบบเปราะจะมีลักษณะการแตกแบบผ่าเกรนที่มีผิวเรียบเป็นชั้นๆ (cleavage) แสดงดังรูปที่ 7 เมื่อปริมาณคาร์บอนและอัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นจะพบการแตกแบบเปราะมากขึ้นเนื่องจากเหล็กกล้ามีโครงสร้างเป็นเบ็นไนต์และมาร์เทนไซต์ที่แข็งนอกจากนี้ยังพบรอยแตก (crack) ในชิ้นงานอีกด้วย



รูปที่ 6 ผลของคาร์บอนและอัตราการเย็นตัวต่อสมบัติทางกล (ก) ความแข็ง (ข) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (ค) ความต้านทานแรงดึงจุดคราก (ง) เปรอเซ็นต์การยืดตัว



รูปที่ 7 ผิวรอยแตกหลังการทดสอบแรงดึง (ก) 0.2wt.%C, 0.1°C/s (ข) 0.3wt.%C, 0.1°C/s (ค) 0.2wt.%C, 4.0°C/s (ง) 0.3wt.%C, 4.0°C/s



สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

1. เหล็กกล้า Astaloy CrM ที่มีการเติมคาร์บอนในปริมาณ 0.2wt.% หลังการขึ้นเตอรืงและให้อัตราการเย็นตัว 0.1°C/s มีโครงสร้างจุลภาคเป็น polygonal ferrite (PF) เมื่อเติมคาร์บอน 0.3wt.% จะมีโครงสร้างเป็น dual phase ซึ่งประกอบด้วย PF และเบนไนต์
2. เมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นเป็น 4.0°C/s จะมีโครงสร้างเป็นเบนไนต์มาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้าง เหล็กกล้าที่มีคาร์บอน 0.3wt.% จะมีปริมาณโครงสร้างของเบนไนต์ มาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์ตกค้างเพิ่มขึ้น
3. เมื่อปริมาณคาร์บอนและอัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งและความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดโครงสร้างของเบนไนต์และมาร์เทนไซต์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และทุนวิจัยจากงบประมาณรายได้มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ประจำปีงบประมาณ 2559 ที่สนับสนุนทุนวิจัยและเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ณิสพร มีมงคล. (2548). *โลหะกรรมวัสดุผง Powder Metallurgy*. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. [1]
- Lindberg, C., Johansson, B., & Maroli, B. (2000). Mechanical properties of warm compacted Astaloy CrM, Euro PM. In *Proceedings of an international conference held in Shrewsbury* (pp. 1–8). UK: Shrewsbury.
- Höganäs, A. B. (2015). *Handbook for Iron and Steel Powders: Hoganas Iron and Steel Powders for Sintered Components*. Sweden: Helsingborg.
- Lewenhagen, J. (2000). Chromium steel powders for components. *Mater. Sci. Forum*, 2000, 241–246.

Moghaddam, K. S., & Solimanjad, N. (2013). Effects of sinter hardening technology on homogeneous and heterogeneous microstructures. *Powder Metallurgy*, 56, 245–250.

Dobrzański, L. A. & Muszyfaga, M. (2009). Effect of cooling rates on sinter-hardened steels. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 37/2, 630–638.

Dobrzański, L. A. & Muszyfaga, M. (2009). Influence of cooling rates on properties of pre-alloyed PM materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 37/1, 28–35.

Dlapka, M., Danninger, H., Gierl, Ch., & Lindqvist, B. (2010). Sinter hardening Cr–Mo prealloyed steels with sufficient toughness. *Powder Metallurgy Progress*, 10, 20–31.

Sulowaski, M., & Cias, A. (2011). The effect of sintering atmosphere on the structure and mechanical properties of sintered Fe–Mn–Cr–Mo–C structural steels, *Powder Metall.* In *Proceedings of an international conference held in Pune* (pp. 123–131). India: Pune.

Moghaddam, S., Farhangi, H., Ghambari, M., & Solimanjad, N. (2012). Effect of sinter hardening on mechanical properties of Astaloy CrM powder metallurgy steel. *Micro & Nano Letters*, 7, 955–958.

Yu, Y. (2000). Thermodynamic and kinetic behaviours of Astaloy CrM. *Powder Metallurgy World Congress*. In *Proceedings of an international conference held in Kyoto* (pp. 9–11). Japan: Kyoto.

Translated Thai Reference

Meemongkol, N. (2005). *Powder Metallurgy*. Songkhla: Songklanakarin University. [in Thai] [1]