

ผลของคาร์บอนต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการสึกหรอ
ของเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C ที่เตรียมโดยกรรมวิธีโลหะผง
Effect of Carbon on Microstructure and Wear Resistance
of Fe-Mo-Si-C Steels Prepared by Powder Metallurgy

กิตติคุณ เรืองชัย¹ เรืองเดช ธงศรี² มนภาส มรกฏจิตดา² รุ่งทิพย์ กระจ่างทอง² ธฤติ ตันประยูร² ธัญพร ยอดแก้ว²
นัตยา ต่อแสงธรรม² อัสสฎาวุฒิ ปาทาคำ² และ อัมพร เวียงมูล^{1*}

Kittikhun Ruangchai¹, Ruangdaj Tongstri², Monnapas Morakotjinda², Rungtip Krataitong²,
Dhritti Tanprayoon², Thanyaporn Yotkaew², Nattaya Tosangthum², Ussadawut Patakham²
and Amporn Wiengmoon^{1*}

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

² ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีกระบวนการผลิตวัสดุผง (PMPT) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University

² Particulate Materials Processing Technology Laboratory (PMPT), Thailand National Metal and Materials Technology Center

Received : 12 June 2017

Accepted : 1 September 2017

Published online : 15 September 2017

บทคัดย่อ

เหล็กกล้าซินเตอร์ Fe-Mo-Si-C ถูกเตรียมโดยใช้ผงโลหะ Fe-Mo เป็นผงโลหะเริ่มต้นมาผสมกับซิลิกอนคาร์ไบด์ ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และผงกราฟไฟต์ ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก นำมาอัดขึ้นรูปและซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 45 นาที และเย็นตัวอย่างช้า ๆ ในเตาสู่ญญากาศ ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วัดความแข็ง ทดสอบความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการสึกหรอ จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่ไม่เติมกราฟไฟต์ประกอบด้วยอนุภาคก้อนกลมในเมทริกซ์ของเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ การเติมกราฟไฟต์ทำให้ลักษณะของอนุภาคก้อนกลมเปลี่ยนเป็นเส้นยาว เมทริกซ์ของเฟอร์ไรต์และเบนไนต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงและความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนความต้านทานการสึกหรอจะลดลง

คำสำคัญ : โลหะผสม Fe-Mo-Si-C โครงสร้างจุลภาค ซินเตอร์รีง สมบัติทางกล ความต้านทานการสึกหรอ

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

Abstract

Sintered Fe-Mo-Si-C steel was prepared from pre-alloyed Fe-Mo powder that was mixed with 4wt.% silicon carbide (SiC) and 0.3wt.% graphite. The powder mixture was compacted, sintered at 1250°C for 45 min and slowly cooled in a vacuum furnace. Microstructures were observed by OM and SEM. Hardness, tensile and wear properties were tested. From the experimental results, the sintered Fe-Mo-Si-C steel without graphite addition consisted of spherical particles in a matrix of ferrite, pearlite and bainite structures. With graphite addition, the feature of spherical particles was changed to vermicular shape, and the pearlite and bainite structures were increased. Tensile strength and hardness increased, but wear resistance decreased.

Keywords : Fe-Mo-Si-C alloy, microstructure, sintering, mechanical property

บทนำ

โลหะผงวิทยาเป็นกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะจากผงโลหะด้วยขั้นตอนขึ้นรูปชิ้นงานและทำให้ชิ้นงานแน่นตัว จึงเป็นกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพและเป็นทางเลือกใหม่ เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับด้านอื่นๆ เช่น การหล่อ เป็นต้น โมลิบดีนัมเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมโลหะผง ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการชุบแข็งของโลหะผสม นอกจากนี้โมลิบดีนัมยังลดปัญหาการเกิดออกซิเดชันจากการทำอะตอมไม่เข้มข้น การอบอ่อน และการเผาผนึก (Sheikhi, 2012) โดยทั่วไปกราฟไฟต์มักจะใช้เติมในผงโลหะตั้งต้นเพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดของคาร์บอน การเติมคาร์บอนในเหล็กกล้า Astaloy 85Mo พบว่าจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเบนไนต์ เมื่ออัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 3°C/s โครงสร้างเบนไนต์จะมีความละเอียดมากขึ้น ความแข็งและความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น (Sheikhi, 2012, Öksüz, 2014) ส่วนการเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ในผงโลหะเหล็กจะทำให้ซิลิกอนและคาร์บอนแตกตัวและแพร่เข้าไปในเมทริกซ์ระหว่างการซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูง (Coovattanachai, 2006, Chakthin, 2008) การเติมซิลิกอนคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าซินเตอร์ Fe-Cr-Mo-C พบว่ามีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์และเบนไนต์ (Kiatdherarat, 2015) เช่นเดียวกับเหล็กกล้าที่ไม่เติมซิลิกอนคาร์ไบด์ (Kiatdherarat, 2015, Srijampan, 2015) แต่ปริมาณซิลิกอนและคาร์บอนในเมทริกซ์จะสูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กกล้าซินเตอร์ Fe-C ที่เติมซิลิกอนคาร์ไบด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีโครงสร้างที่คล้ายกับเหล็กหล่อเหนียวที่มีกราฟไฟต์ก้อนกลมล้อมรอบด้วยโครงสร้างของเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ไลต์ ซึ่งพบว่าโครงสร้างกราฟไฟต์ก้อนกลมที่เกิดขึ้นนั้นช่วยเป็นสารหล่อลื่นให้กับวัสดุ นั่นคือจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุ (Binder, 2010) ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคาร์บอนต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรง ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้า Fe-0.85Mo-0.01C ที่เติมซิลิกอนคาร์ไบด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการซินเตอร์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุประสงค์และการขึ้นรูปชิ้นงาน

ผงตั้งต้นที่ใช้ คือ ผงเหล็กกล้า Fe-0.85Mo-0.01C นำมาผสมกับผงซิลิกอนคาร์ไบด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก คาร์บอนในรูปของผงกราฟไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก และสารหล่อลื่น Zinc Sterate (ZnSt) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 60 นาที และนำไปอัดขึ้นรูปให้มีความหนาแน่น 6.5 g/cm^3 ด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกที่ความดัน 400 MPa เป็นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน MPIF Standard 10 และชิ้นงานแบบเหรียญที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.5 มิลลิเมตร หนา 4.70 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแบบ Pin-on-disk ภายใต้แรงกดขนาด 15 นิวตัน ชิ้นงานอัดขึ้นรูปแล้วนำไปขึ้นเตาในเตาสถูญญากาศที่ความดัน $1.28 \times 10^{-5} \text{ MPa}$ โดยเริ่มให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อกำจัดสารหล่อลื่น จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 1250°C เป็นเวลา 45 นาที และปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ภายในเตาที่อัตราการเย็นตัว 0.1°C/s ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานขึ้นเตา Fe-Mo-Si-C แสดงในตารางที่ 1

ตาราง 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C ที่ใช้ในการทดลอง

ปริมาณกราฟไฟต์ที่เติม (wt%)	ส่วนผสมทางเคมี (wt%)			
	Mo	C	Si	Fe
-	0.85	1.255	2.8	Bal.
0.3	0.85	1.555	2.8	Bal.

2. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติทางกล

โดยนำชิ้นงานหลังกระบวนการขึ้นเตาเสร็จมาขัดด้วยกระดาษทรายและผงขัดเพชร กัดผิวหน้าด้วยกรด Nital เข้มข้น 3% ในเอทานอล ศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์ธาตุด้วยการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive spectroscopy; EDS)

การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบความแข็งโดยรวมแบบร็อคเวลล์ (HRB) ด้วยน้ำหนัก 100 กิโลกรัมแรง และทดสอบความแข็งจุลภาคแบบวิกเกอร์ด้วยน้ำหนัก 300 กรัมแรง (HV0.3) เพื่อจำแนกชนิดของเมทริกซ์ ทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Instron Universal Instrument และทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-Disk โดยหัวหมุนเป็นลูกบอลทรงกลมทำจากเหล็กกล้ารัศมี 6 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกด 15 นิวตัน ความเร็วการไถลเท่ากับ 300 รอบต่ออนาที และระยะการทดสอบ 1000 เมตร

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

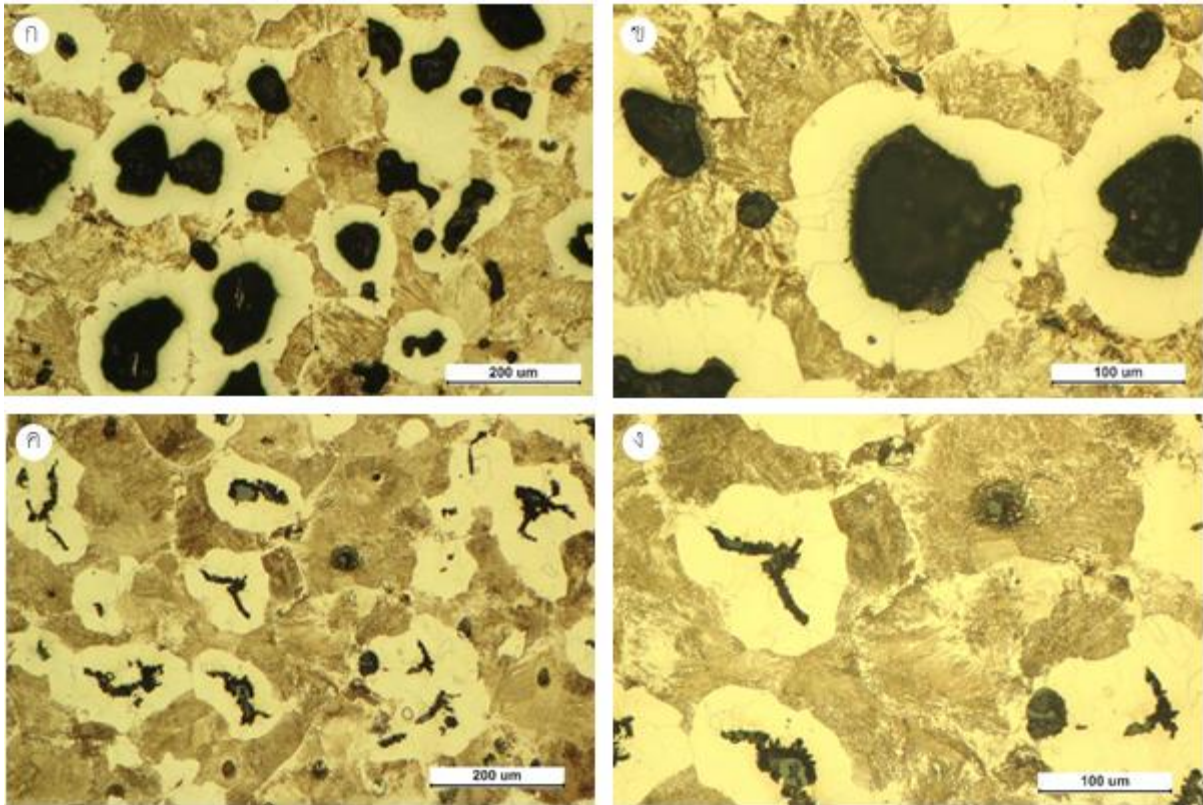
1. โครงสร้างจุลภาค

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าในเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C ที่ไม่เติมกราฟไฟต์ โครงสร้างจะประกอบด้วยอนุภาคก้อนกลมสีดำ (Black nodular particle) ที่ล้อมรอบด้วยเฟอไรต์ (บริเวณสีขาว) และเฟอไรต์ไลต์ (บริเวณสีน้ำตาล) ดังภาพที่ 1(ก-ข) ส่วนเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C ที่เติมกราฟไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าลักษณะของอนุภาคเปลี่ยนจากก้อนกลมเป็นเส้นยาว (Vermicular shape) ล้อมรอบด้วยเฟอไรต์และเฟอไรต์ไลต์ ดังแสดงในภาพที่ 1(ค-ง) จากการวิเคราะห์สัดส่วนโดยพื้นที่ของเฟสต่าง ๆ พบว่าเหล็กกล้าที่ไม่เติมกราฟไฟต์ มีสัดส่วนโดย

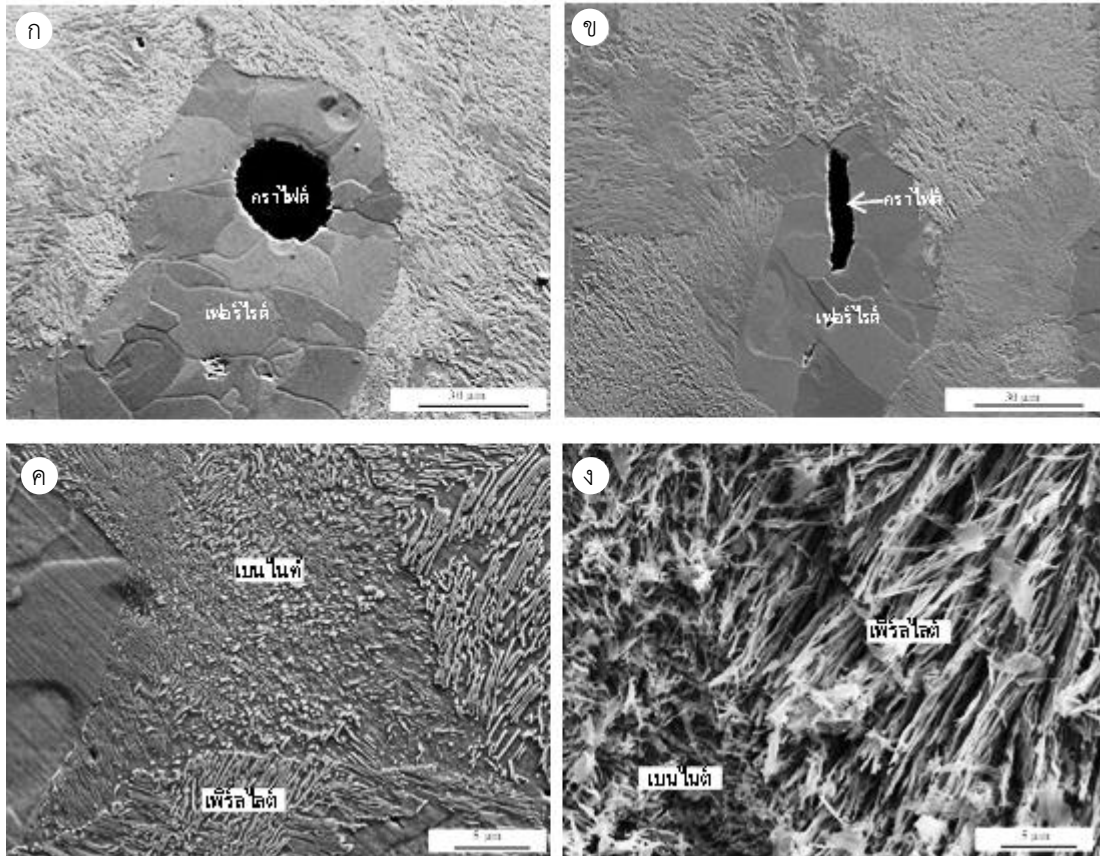
พื้นที่ของอนุภาคสีดำและเมทริกซ์เป็น 17 : 50 ส่วนเหล็กกล้าที่เติมกราไฟต์ ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก มีค่าเป็น 5 : 65 โดยเหล็กกล้าที่ไม่เติมกราไฟต์จะมีปริมาณเฟอร์ไรต์มากกว่า

จากภาพถ่ายที่กำลังขยายสูงด้วยกล้อง SEM ดังแสดงในภาพที่ 2(ก-ข) พบว่าเมทริกซ์ของเหล็กกล้าทั้งสองประกอบด้วย 3 เฟส คือ เฟอร์ไรท์ เฟอร์ไรต์ และเบนไนต์ จากภาพถ่ายด้วยกล้อง SEM ทำให้สามารถจำแนกโครงสร้างเมทริกซ์ได้ โดยเฉพาะลักษณะโครงสร้างของเฟอร์ไรต์และเบนไนต์จะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 2(ค-ง) โดยโครงสร้างของเบนไนต์จะละเอียดกว่าเฟอร์ไรต์ที่มีลักษณะเป็นแถบยาว ๆ สลับกัน (Lamellar structure) นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันได้จากการทดสอบความแข็งบริเวณเฟอร์ไรท์ เฟอร์ไรต์ร่วมกับเบนไนต์ ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 192 HV0.3 และ 319 ถึง 357 HV0.3 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเกิดโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ในเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C ที่ผลิตจากสารตั้งต้นมีปริมาณคาร์บอนต่ำมาก (Fe-0.85Mo-0.01C) ได้นั้น เนื่องจากการสลายตัวของซิลิกอนคาร์ไบด์และการแพร่ของซิลิกอนและคาร์บอนอะตอมเข้าไปในเนื้อเมทริกซ์ของเหล็ก-โมลิบดีนัม (Coovattanachai, 2006, Chakthin, 2008) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย EDS (ภาพที่ 3ก) ที่พบว่าบริเวณขอบของอนุภาคก่อนกลบสีดำจะมีปริมาณคาร์บอนสูง ส่วนบริเวณตรงกลางจะพบ C, Fe, Si และ Mo ซึ่งแสดงถึงการแพร่ของซิลิกอนและคาร์บอนอะตอมในทิศทางตรงกันข้ามกับอะตอมของเหล็กและโมลิบดีนัม ส่วนอนุภาคแบบเส้นยาวสีดำ (ภาพที่ 3ข) ประกอบด้วยคาร์บอนเกือบทั้งหมด

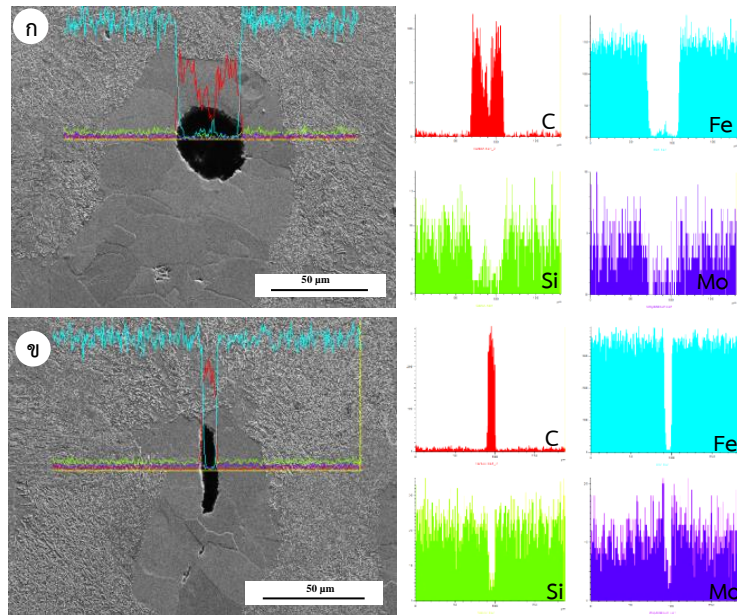
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่ไม่เติมกราไฟต์จะมีลักษณะคล้ายเหล็กหล่อเหนียว เนื่องจากในระหว่างการให้ความร้อนและการขึ้นเตอรืงจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของผงสารตั้งต้น (Fe-0.85Mo) และอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยซิลิกอนคาร์ไบด์จะแตกตัวเป็นอะตอมของซิลิกอนและคาร์บอน จากนั้นจะแพร่เข้าไปในเมทริกซ์ออสเทนไนต์ของ Fe-0.85 Mo ในทางตรงกันข้ามอะตอมของเหล็กและโมลิบดีนัมจะแพร่เข้าไปในอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ เมื่อเหล็กกล้าเย็นตัวในขั้นตอนสุดท้ายจะเกิดการตกตะกอนของอนุภาคกราไฟต์ ซึ่งจะดึงอนุภาคคาร์บอนจากบริเวณรอบ ๆ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ส่วนบริเวณที่ห่างออกไปจะมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า ทำให้เกิดการตกตะกอนเป็นซีเมนไตต์ (Fe_3C) ในโครงสร้างของเฟอร์ไรต์และเบนไนต์ ส่วนเหล็กกล้าที่เติมกราไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก อนุภาคจะมีลักษณะเป็นเส้นยาวสีดำ ซึ่งน่าจะเกิดจากกราไฟต์ที่เติมทำปฏิกิริยากับเมทริกซ์ของเหล็กได้เร็วกว่าซิลิกอนคาร์ไบด์ (Tongsri, 2010) ทำให้เกิดการหลอมเหลวของ Fe-C รอบ ๆ อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ ส่งผลให้อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์หลอมเหลว จากนั้นเมื่อเหล็กกล้าเย็นตัวคาร์บอนจะตกตะกอนเป็นกราไฟต์แบบเส้นยาว ในขณะเดียวกันก็จะดึงอะตอมคาร์บอนจากเมทริกซ์ที่อยู่รอบ ๆ เช่นเดียวกับเหล็กกล้าที่ไม่เติมกราไฟต์



ภาพที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า Astaloy85Mo+4wt%SiC ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 200 เท่า (ก-ข) ไม่เติมกราฟไฟต์ (ค-ง) เติมกราฟไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงเมทริกซ์ของเพอร์ไรท์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ในเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C (ก) ไม่เติมกราไฟต์ (ข-ง) เติมกราไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก



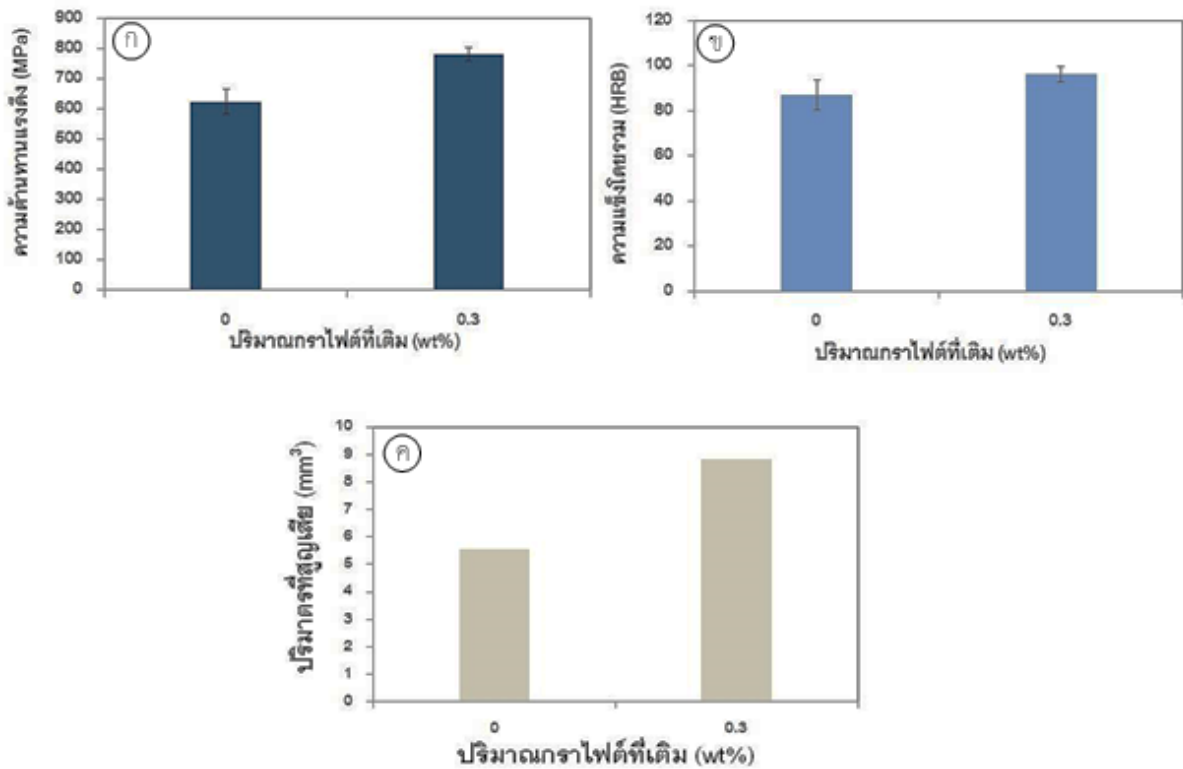
ภาพที่ 3 ภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์ด้วย EDS แบบ line scan ของเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C (ก) ไม่เติมกราไฟต์ (ข) เติมกราไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก

2. ความต้านทานแรงดึงและความแข็งโดยรวม

ภาพที่ 4 แสดงผลของกราไฟต์ที่เติมต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า พบว่าความต้านทานแรงดึง (ภาพที่ 4ก) และความแข็งโดยรวม (ภาพที่ 4ข) ในเหล็กกล้าที่ไม่เติมกราไฟต์เท่ากับ 623 MPa และ 87 HRB ส่วนเหล็กกล้าที่เติมกราไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 779 MPa และ 96 HRB เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเมทริกซ์เบนไนต์และเฟิร์ลไลต์ที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่าเฟอร์ไรท์

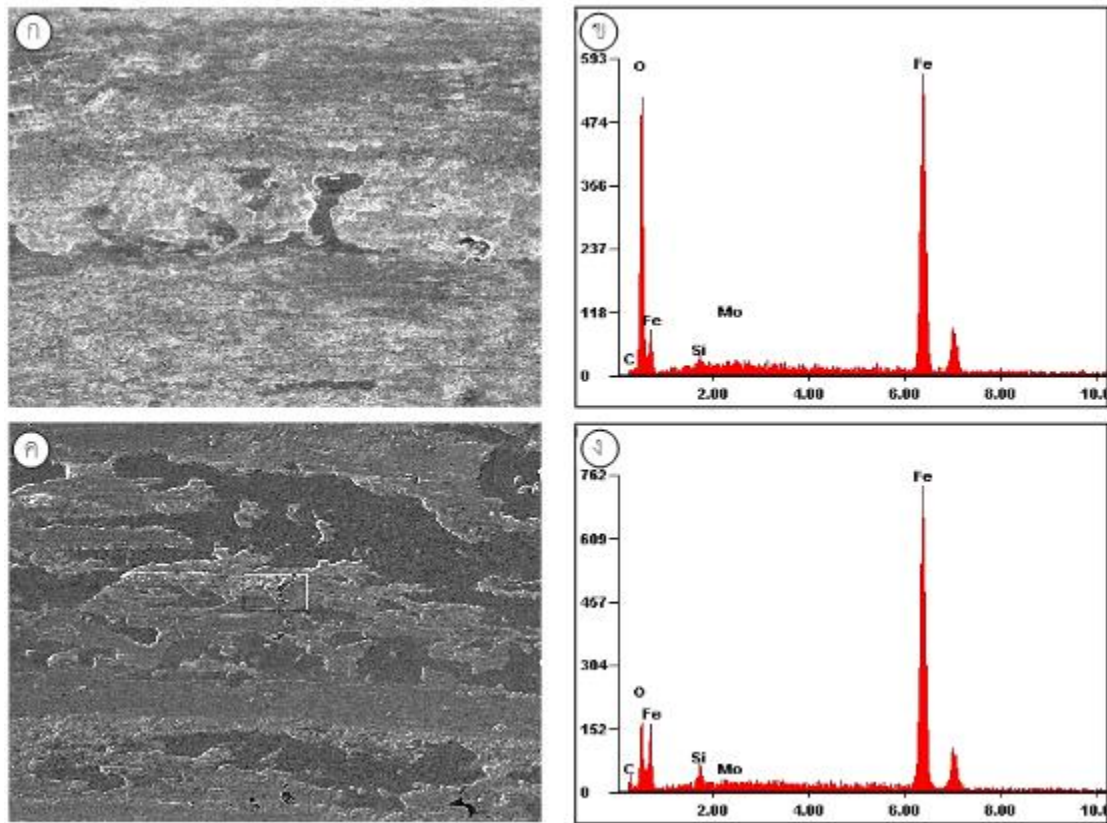
3. ความต้านทานการสึกหรอ

จากการทดสอบการสึกหรอ ดังภาพที่ 4(ค) พบว่าในเหล็กกล้าที่เติมกราไฟต์จะมีปริมาณที่สูญเสียเนื่องจากการสึกหรอเพิ่มขึ้น หรือมีความต้านทานต่อการสึกหรอน้อยลง อาจเนื่องมาจากโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C เปลี่ยนไปดังนี้ คือ (1) รูปร่างของอนุภาคสีดำเปลี่ยนจากทรงกลมขนาดใหญ่เป็นเส้นยาวขนาดเล็ก (2) ปริมาณของอนุภาคสีดำลดลง โดยมีสัดส่วนโดยพื้นที่ของอนุภาคสีดำต่อเมทริกซ์ลดลงจาก 17:50 เป็น 5:65 (3) อนุภาคสีดำมีองค์ประกอบที่เป็นกราไฟต์อยู่รอบอนุภาคหรือทั่วทั้งอนุภาค ดังนั้นหากพิจารณาว่าอนุภาคสีดำทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นชนิดของแข็ง (Solid lubricant) ก็พบว่าสัดส่วนโดยพื้นที่ของอนุภาคสีดำต่อเมทริกซ์ มีส่วนสำคัญต่อพฤติกรรมการรับแรงเสียดทานและการสึกหรอของเหล็กกล้า ในกรณีของผลการทดลองที่ใช้แรงกด 15 นิวตัน พบว่าเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C ที่มีสัดส่วนโดยพื้นที่ของอนุภาคสีดำต่อเมทริกซ์น้อยกว่า จะเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุได้มากกว่า เนื่องจากมีปริมาณสารหล่อลื่นน้อยกว่า แม้ว่า จะมีความแข็งแรงและความแข็งที่ดีกว่าก็ตาม (Binder, 2010)



ภาพที่ 4 แสดงสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C ที่มีการเติมกราไฟต์ (ก) ความต้านทานแรงดึง (ข) ความแข็งโดยรวม และ (ค) การสึกหรอ

จากการวิเคราะห์รอยสึกหรอบนชิ้นงานเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C (ภาพที่ 5ก และ 5ค) พบว่ารอยสึกหรอประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ บริเวณผิวสีดำเข้มและบริเวณสีเทา จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ดังแสดงในภาพที่ 5(ข) และ 5(ง) ซึ่งมีแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ บริเวณผิวสีดำเข้มมีปริมาณของออกซิเจนสูงกว่าบริเวณสีเทา นั้นแสดงว่ากลไกการสึกหรอน่าจะเกิดจากการเกิดออกไซด์ในชั้นผิวอัด (Compacted layers) และเกิดการหลุดร่อนจากการเสียดสี



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงรอยสักหลังทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้า Fe-M-Si-C และ EDS spectra (ก-ข) ไม่เติมกราฟไฟต์ (ค-ง) เติมกราฟไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก

สรุปผลการวิจัย

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C ที่ไม่เติมกราฟไฟต์ประกอบด้วยอนุภาคก้อนกลมสีดำล้อมรอบด้วยโครงสร้างเมทริกซ์ของเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์และเบนไนต์ เมื่อเติมกราฟไฟต์ร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ทำให้รูปร่างของอนุภาคก้อนกลมสีดำเปลี่ยนเป็นเส้นยาวและมีปริมาณลดลง ส่วนโครงสร้างเบนไนต์และเฟอร์ไรต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงและความเหนียวของเหล็กกล้า Fe-Mo-Si-C เพิ่มขึ้น โดยอนุภาคสีดำที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นชนิดของแข็ง ดังนั้นเมื่อปริมาณของอนุภาคสีดำลดลง ความต้านทานการสึกหรอจะลดลง โดยกลไกการสึกหรอเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดออกไซด์ในชั้นผิวอัดและการเกิดการหลุดร่อนเมื่อมีการเสียดสี

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจาก โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) เลขที่ทุน TG-33-26-59-045M ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีกระบวนการผลิตวัสดุผง (Particulate Materials Processing Technology) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ประจำปี 2560 สัญญาเลขที่ R2560C177

เอกสารอ้างอิง

- Binder, C., Hammes, G., Schroeder, R., Klein, A.N., Mello, J.D.B. de, Binder, R. (2010). Fine tuned steels point the way to a focused future. *Metal Powder Report*, 10, 29-37.
- Chakthin, S., Poolthong, N., Thavarungkul and Tongsri, R. (2008). Effect of reaction between Fe and carbide particles on mechanical properties of Fe-base composite. *Advanced Materials Research*, 55-57, 357-360.
- Chakthin, S., Poolthong, N., Thavarungkul, N. and Tongsri, R. (2008). Iron-carbide composites prepared by P/M, *Proceedings of the Minerals, Metals and Materials society-3rd International Conference on Processing Materials for Properties 2008, PMP-III, 1*, 571-578.
- Coovattanachai, O., Mima, S., Yodkaew, T., Krataitong, R., Morkotjinda, M., Daraphan, A. (2006). Effect of admixed ceramic particles on properties of sintered 316L stainless steel. *Proceedings of the Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials 2006*, 7161-7171.
- Kiatdherarat, W., Mungsantisuk, P., Mahathanabodee, S., Sirivedin, K., Krataitong, R., Morakotjinda, M. (2015). Effects of cooling rate and carbon content on mechanical property of sintered Fe-Cr-Mo alloys. *Key Engineering Materials*, 658, 69-75.
- Kiatdherarat, W., Mungsantisuk, P., Tongsri, R., Mahathanabodee, S., Sirivedin, K., Krataitong, R. (2015). Microstructure and mechanical property of sintered Fe-Cr-Mo-Si-C steels. *Proceedings of the Burapha University International Conference 2015*, 454-462.
- Öksüz, K.E., Gün, T. and Simsir, M. (2014). The microstructure and wear behaviour of sintered Astaloy 85Mo. *WIT Transactions on The Built Environment*, 137, 545-552.
- Sheikhi, K., Ghambari, M., Farhangi, H. and Solirnanjad, N. (2012). Effect of sinter hardening on microstructure and mechanical properties of Astaloy 85 Mo. *Iron and Steel Research International*, 19, 43-46.
- Srijampan, W., Wiengmoon, A., Morakotjinda, M., Krataitong, R., Yotkaew, T., Tosangthum, N. (2015). Microstructure and mechanical property of sintered Fe-Cr-Mo steels due to phase transformations with fast cooling rates. *Materials and Design*, 88, 693-701.
- Srijampan, W., Morakotjinda, M., Krataitong, R., Yotkaew, T., Tosangthum, N., Wiengmoon, A. (2016). Sintered dual-phase steels produced from pre-alloyed Fe-Cr-Mo powder. *Chiang Mai Journal of Science*, 43, 358-364.
- Tongsri, R. and Vetayanugul, B. (2010). Thermal analysis of Fe-Carbide and Fe-C mixtures. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 20(1), 45-49.