

อิทธิพลของปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

ศักดิ์สิทธิ์ โจรณ์ฤทธาการ^{1*} และ ประมูล บัวน้อย²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ (Nodule count) ที่มีผลต่อปริมาณสัดส่วนโครงสร้างจุลภาค เฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ และสมบัติทางกลของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม โดยการหลอมด้วยเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า ทำการปรับปรุงส่วนผสมธาตุคาร์บอนและซิลิกอนให้ได้ปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า ในช่วง 3.95-4.45 %CE และควบคุมกระบวนการอินนอคูลูชัน (Inoculation) 0.30 - 0.32% โดยน้ำหนัก กระทำพร้อมกับการทำ แมกนีเซียมทรูทเมนต์ (Nodulization) ในเบ้าผสมที่อุณหภูมิ 1500 - 1520 องศาเซลเซียส ที่ใช้ปริมาณแมกนีเซียมแตกต่างกัน ทดสอบหาความต้านทานแรงดึง และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image analysis) ผลการวิจัยพบว่าปริมาณแมกนีเซียมตกค้าง (Residual Mg) ที่เพิ่มขึ้นมากในช่วง 0.065 - 0.075% โดยน้ำหนัก ทำให้ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ลดลงเหลือ 78 อนุภาคต่อตารางมิลลิเมตร (Nodules/mm²) เกิดอนุภาคแกรไฟต์รูปร่างผิดปกติ มีผลต่อ ปริมาณสัดส่วนโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์เปลี่ยนแปลงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากผลดังกล่าวทำให้สมบัติทางกลโดยเฉพาะ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสรุป จะเห็นว่าปริมาณอนุภาคแกรไฟต์และปริมาณแมกนีเซียมตกค้างมีผลต่อ สัดส่วนโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ และสมบัติทางกลในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

คำสำคัญ: เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม, ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์, ลักษณะรูปร่างอนุภาคแกรไฟต์, สัดส่วนโครงสร้างจุลภาค, ชิ้นส่วนยานยนต์ (การประชุมวิชาการ การวิจัยภาคปฏิบัติและการพัฒนา ครั้งที่ 1 เชียงใหม่)

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน

² สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: saksit369@gmail.com รับเมื่อ 1 สิงหาคม 2554 ตอบรับเมื่อ 7 ธันวาคม 2554

Effect of Nodule Count on Microstructure and Mechanical Properties of Spheroidal Graphite Cast Iron in Automotive Parts Manufacturing

Saksit Rojritthakorn^{1,*} and Pramool Buanoi²

Abstract

This research aims to study the effect of graphite nodule count on the proportions of ferrite and pearlite, mechanical properties and microstructure of ductile cast iron. The ductile cast iron casting was produced by induction furnace, adjusting carbon and silicon content for carbon equivalent of 3.95-4.45 %CE, treated with FeSi 4.8%Mg alloy, and inoculated with FeSi-Ba alloys 0.30-0.32 % by weight, using the sandwich method and late stream inoculation. The metal was poured at approximately 1500-1520 °C with different residual magnesium contents. The tensile strength, microstructure of ferrite / pearlite, and nodule count were mainly determined. The results suggested that the residual magnesium range of 0.065-0.075 %Mg reduced the nodule count to 78 nodules/mm², with a shape deterioration of spheroidal graphite. This also resulted in reductions in the proportion of ferrite in the structure and the elongation at break. In summary, it can be concluded that the nodule count and the residual magnesium greatly affected the relative amount of ferrite and pearlite in the matrix and the mechanical properties of the ductile cast iron.

Keywords: Ductile cast iron, Nodule count, Graphite nodule shape, Proportions in matrix, Automotive parts
(selected from 1st Symposium on Hands-on Research and Development, Chiang Mai)

¹ Department of Engineering, Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Nan,

² Department of Engineering, Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

* Corresponding author, E-mail: saksit369@gmail.com Received 1 August 2011; Accepted 7 December 2011

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทสำคัญทั้งในแง่การจ้างงาน การผลิต การส่งออกที่สามารถนำเงินตราเข้าประเทศเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศและเป็นฐานการผลิตรายใหญ่ในภูมิภาคเอเชียที่สามารถผลิตรถยนต์ได้สูงสุดของอาเซียน [1] ในอุตสาหกรรมงานหล่อโลหะเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมหรือเหล็กหล่อเหนียว (Ductile cast iron, Nodular cast iron, Spheroidal graphite cast iron) นิยมใช้มากในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เนื่องจากเป็นเพราะมีลักษณะเด่นเป็นพิเศษในการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนให้มีสมบัติทางกลสูงเป็นที่ยอมรับ และที่สำคัญคุณสมบัติที่โดดเด่นในเรื่องความเหนียวเป็นเลิศ อาทิ ผลิตเพลลาข้อเหวี่ยง (Crankshaft), คุมล้อช่วยแรง (Flywheel), ครัมเบรก (Drum brake), จานเบรก (Disc-brake) และเสื้อชุดเกียร์ (Gear box) ปกติโดยทั่วไปโครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมจะประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคเป็นส่วนใหญ่ ที่เหลือเป็นอนุภาคแกรไฟต์กระจายอยู่ทั่วไปประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ของโครงสร้างจุลภาค และยูเทคติกของอนุภาคแกรไฟต์ (Eutectic graphite) มีลักษณะแกรไฟต์ทรงกลมที่ตกผลึกอยู่ในโครงสร้างเหล็กหล่อ [2,3] จากความรู้ทางด้านวิศวกรรมโลหการปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมมี 3 ประการคือ อิทธิพลของส่วนผสมเคมี อิทธิพลของขนาดความหนาที่มีผลต่ออัตราการเย็นตัว (Cooling rate) และอิทธิพลของโครงสร้างฐานวิทยาของแกรไฟต์ (Morphology of graphite) [2,4] เนื่องจากปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ (Nodule count) เป็นพารามิเตอร์ดัชนีบ่งชี้ที่สำคัญในการวัดคุณภาพเชิงโลหการของชิ้นงานเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม เป็นเพราะว่าปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกล โดยเฉพาะค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบแรงดึง และมีอิทธิพลต่อสัดส่วนของโครงสร้างพื้น (Matrix structure) และโครงสร้างพื้นเป็นแฟคเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดเกรดของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม [4] ในงานควบคุมคุณภาพการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมให้

ได้คุณภาพเบื้องต้นก็ต้องควบคุมปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ไม่ควรต่ำกว่า 100 อนุภาคต่อตารางมิลลิเมตร (โดยประเมินปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ เปรียบเทียบจาก Foundrymen Guide to Ductile Iron Microstructures) และต้องมีการกระจายปริมาณอนุภาคแกรไฟต์อย่างสม่ำเสมอ เม็ดกลมของอนุภาคแกรไฟต์ควรจะเป็นชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 (อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67) มีเปอร์เซ็นต์ความกลมของอนุภาคแกรไฟต์ (% Nodularity) เท่ากับหรือมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานหล่อปราศจากคาร์ไบด์หรือซีเมนไตด์อิสระ (Cementite, Fe_3C) และชิ้นงานหล่อต้องมีปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรท์ โครงสร้างเพิร์ลไลท์ อยู่ในกรอบที่ต้องการ [5-7] ด้วยลักษณะของอนุภาคแกรไฟต์ในเหล็กหล่ออ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67 ได้แบ่งรูปร่างของแกรไฟต์เป็น 7 ประเภท อาทิ แกรไฟต์ประเภทที่ 1 และ 2 ให้สมบัติทางกลแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ประเภทที่ 3 มักพบในเหล็กหล่ออบเหนียวที่ผ่านการอบอ่อน (Annealing) ประเภทที่ 4 แกรไฟต์ตัวหอนซึ่งเป็นชนิดล่าสุดที่ถูกจัดให้อยู่ในมาตรฐาน ประเภทที่ 5 และ 6 เกิดจากการเสีรูของแกรไฟต์ก่อนกลม ประเภทที่ 7 คือแกรไฟต์แผ่น (Flake graphite) [2, 8] จากผลกระทบเมื่อปริมาณอนุภาคแกรไฟต์มีจำนวนมากเกินไป ทำให้เกิดปริมาณสัดส่วนโครงสร้างเฟอร์ไรต์ในเหล็กหล่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เหล็กหล่อมีความแข็งแรงต่ำด้วย แต่ถ้าหากปริมาณอนุภาคแกรไฟต์มีจำนวนน้อยมาก ทำให้มีโอกาสเกิดปริมาณยูเทคติกคาร์ไบด์ก็มากขึ้นด้วย จึงทำให้เหล็กหล่อมีคุณสมบัติความสามารถด้านการกลึงตัดไม่ดี ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ผลิตมีความแข็งแรงต่ำ [7, 9] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการวัดปริมาณอนุภาคแกรไฟต์แสดงถึงจำนวนของอนุภาคแกรไฟต์กลมบนหนึ่งหน่วยพื้นที่อนุภาคต่อตารางมิลลิเมตร การประเมินโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis Program) วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในเชิงปริมาณวิเคราะห์หรือจำนวนอนุภาคแกรไฟต์ (Quantitation metallography) การประเมินลักษณะรูปร่างของแกรไฟต์ (Graphite shape หรือ Shape factor) ได้จาก Sphericity เป็นสำคัญ มักนิยมใช้ในงานวิจัยที่ผลิตถูกต้องและแม่นยำเพื่อประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพในการ

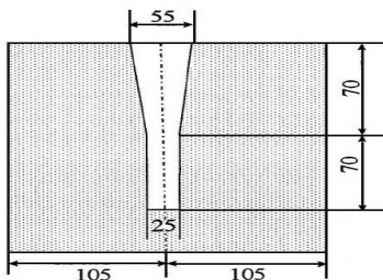
ผลิตเหล็กหล่อเกรดไฟต์กลม [6, 10] ในปัจจุบันปัญหาโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มักพบว่าปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อปริมาณสัดส่วนของโครงสร้างจุลภาคเฟิร์ลไลต์และเฟอร์ไรต์ในชิ้นงานหล่อไม่เหมาะสม ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ผลิตไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลกระทบต่อปริมาณสัดส่วนโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์เป็นหลัก เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ในการใช้ปริมาณแมกนีเซียมเป็นตัวควบคุมการผลิต และทำการตรวจสอบปริมาณอนุภาคแกรไฟต์และโครงสร้างจุลภาค โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพเพื่อลดปัญหาจากการประเมินที่ผิดพลาดเนื่องมาจากปัจจุบันการประเมินคุณภาพชิ้นงานหล่อในภาคอุตสาหกรรมยังใช้การเปรียบเทียบภาพโครงสร้างจุลภาพ (Comparator charts) มักจะอ้างอิงจากคู่มือการตรวจสอบของมาตรฐานโรงงานที่เป็นข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตกับลูกค้ามากกว่า จึงทำให้ไม่มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการ ประกอบกับการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพที่ยังไม่แพร่หลายในเชิงพาณิชย์และแม้แต่วางการวิจัยงานหล่อของเหล็กหล่อเกรดไฟต์กลม

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมแบบหล่อ

การทดสอบในแบบหล่อชิ้นงานทดสอบ Y-Block ขนาดหน้าตัด 25 มิลลิเมตร อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A 536-84: Standard Specification for Ductile Iron Casting ใช้แบบหล่อทรายคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แล้วทำการทดสอบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค อาทิ ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ตามลำดับ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปภาพตัดชิ้นงานทดสอบแท่ง Y-Block

2.2 การเตรียมวัสดุดิบ

กลุ่มที่หนึ่ง : วัสดุดิบหลัก (Main materials) ที่สำคัญ อาทิ
 1) เศษเหล็กเหนียว (Steel scrap) ใช้ปริมาณ 70% โดยน้ำหนัก
 2) เหล็กหล่อใช้ซ้ำใช้ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ทำการปรับปรุง โดยกำหนดควบคุมส่วนผสมทางเคมีขั้นสุดท้ายที่ 3.48±0.02 %C, 2.52±0.02 %Si, <0.11 %Mn, <0.010 %S, <0.015 %P, และ 3.95-4.45 %CE และทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยเครื่อง Emission Spectrometer

กลุ่มที่สอง : วัสดุดิบที่ใช้ปรับส่วนผสม (Control materials) ได้แก่ 1) Fe-Si alloy 2) Carbon powder

กลุ่มที่สาม : วัสดุดิบที่ใช้ปรับโครงสร้าง (Nodularising treatment) เป็นสารเกิดแกรไฟต์กลมได้แก่ FeSi 4.8%Mg alloy โดยใช้วิธี Sandwich Opened Ladle นิยมใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม เป็นเทคนิคที่ง่าย ต้นทุนต่ำที่สุด การเตรียมเบ้าผสมโดยใช้วัสดุกรูเบ้าเป็นปูนทนความร้อนแล้วเผาให้แห้ง และใช้ตะปูเหล็กเหนียวทับ FeSi 4.8%Mg alloy ดังรูปที่ 2 กำหนดช่วงอุณหภูมิ Superheat 1535-1550°C, Tapping temperature 1500-1520°C, เทลงแบบหล่อ Pouring temperature 1420-1430°C ตามลำดับ

กลุ่มที่สี่ : วัสดุดิบที่ใช้ทำ Inoculated ชนิด FeSi-Ba เป็นสาร Inoculant ปริมาณ 0.30-0.32% โดยน้ำหนัก โดยกระทำพร้อมกับการทริทเมนต์แมกนีเซียมเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีสำหรับการผลิตเหล็กหล่อเหนียวซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของสารอินนอคคูลแลนท์ในน้ำเหล็กได้อย่างทั่วถึง



รูปที่ 2 การเตรียมเบ้าโดยให้ความร้อนก่อนผสมแมกนีเซียม

2.3 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐาน ASTM E 10-96 วัดแบบบริเนล หัวกดลูกบอลขนาด 2.5 มม. แรงกด 187.5 กก. ใช้เวลาทดสอบประมาณ 15 วินาที และทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron model 8801 กำหนด Test Speed 3 มม./นาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยบันทึกความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ เพื่อนำไปคำนวณหาความต้านแรงดึง ณ จุดคราก (σ_y) และความต้านทานแรงดึงสูงสุด (σ_u) จากภาระแรงที่กระทำ (P) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (A_0) ส่วนความเหนียว (Ductile) ของวัสดุจะคำนวณจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation, %EL) หรือเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดในชิ้นทดสอบ โดยการกำหนดพิสัยความยาว (Gauge length) เริ่มต้นให้ชิ้นทดสอบมีค่า L_0 และกำหนดพิสัยความยาวตำแหน่งที่ชิ้นทดสอบเกิดแตกหักมีค่า L_f การเตรียมชิ้นงานโดยวิเคราะห์ชิ้นงานที่ตำแหน่งกลางของหน้าตัด Y-Block อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8M (Small-Size tensile test)

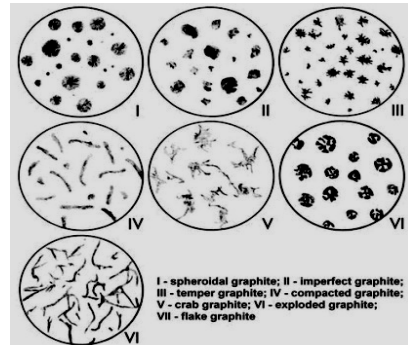
2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและอนุภาคแกรไฟต์

การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) เป็นการตรวจสอบโครงสร้างของโลหะที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานด้วยการขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 220 ถึง 1200 ขัดละเอียดด้วยผ้าสักหลาด (Polishing) ด้วยผงขัดที่ทำจากอลูมินา (Alumina oxide) ผ่านการกัดกรด (Etching) แล้วล้างด้วยแอลกอฮอล์และถ่ายภาพโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคปริมาณอนุภาคแกรไฟต์และโครงสร้างพื้น ประเมินโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพเป็นซอฟต์แวร์ กำหนดเลือกพื้นที่ภาพถ่ายโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์ใช้รูปภาพขนาด 640 x 480 pixels x 8 bit grey images ที่กำลังขยาย 100 เท่า [11-13] เลือกภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจำนวนเฉลี่ยจากจำนวน 5 ภาพ การประเมินยอมรับอนุภาคของแกรไฟต์พิจารณาจากขนาดอนุภาคแกรไฟต์ (Graphite particle size) มากกว่า 5 μm [13] และลักษณะรูปร่างของแกรไฟต์ (Shape factor) ประเมินจาก Sphericity มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 0.65

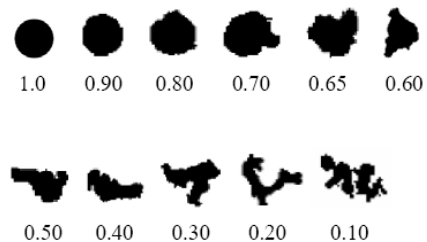
[11] โดยสูตรสมการประเมินค่า Shape factor (S) ดังสมการที่ 1 และ Nodularity By Count (NBC%) ดังสมการที่ 2 [13] ผลการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ พบว่าอนุภาคแกรไฟต์เม็ดกลม (Nodular) ชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67 ดังรูปที่ 3 ลักษณะอนุภาคแกรไฟต์เม็ดกลมที่ให้การยอมรับมีค่า Shape factor ตั้งแต่ 1.00 - 0.65 ดังรูปที่ 4 และ 5 แสดงตัวอย่าง Shape factor ทั้งนี้จะเห็นว่าสอดคล้องกับการประเมินค่า Shape factor ≥ 0.65 [7, 8] ที่ให้ผลเปอร์เซ็นต์ความกลมของอนุภาคแกรไฟต์ (% Nodularity By Count) มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานการยอมรับสำหรับการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม มีค่าความกลมของอนุภาคแกรไฟต์ ≥ 80 เปอร์เซ็นต์) [2] ดังรูปที่ 6

$$S = \text{Sphericity} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \text{Area}}{(\text{Perimeter})^2} \dots\dots\dots(1)$$

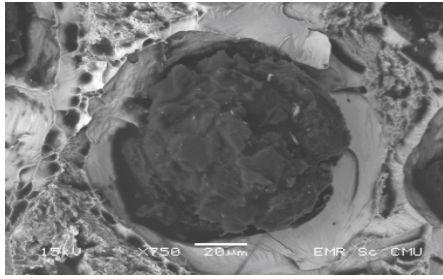
$$\text{NBC} = \frac{\text{Number of acceptable particles}}{\text{Number of acceptable} + \text{Number of unacceptable particles}} \cdot 100 \dots(2)$$



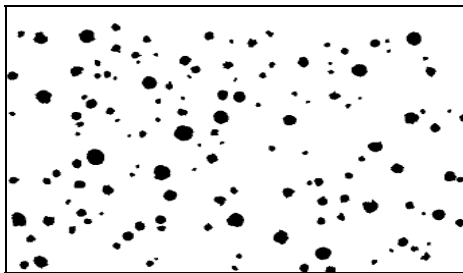
รูปที่ 3 ลักษณะอนุภาคแกรไฟต์ทั้ง 7 ชนิด อ้างอิงตาม ASTM A 247-67 [2,8]



รูปที่ 4 ผลการประเมินลักษณะอนุภาคแกรไฟต์ที่มี Shape factor ตั้งแต่ 0.10 - 1.0 (Image Analysis)



รูปที่ 5 อนุภาคแกรไฟต์หลังการทดสอบความต้านทานแรงดึง ที่มี Shape factor มากกว่า 0.65 (ภาพถ่าย SEM)



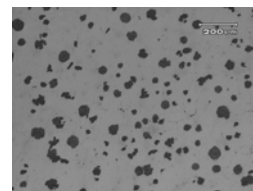
รูปที่ 6 ผลการประเมินโครงสร้างจุลภาคที่มี Shape factor 0.65- 1.0 และ Nodularity By Count >80% (Image Analysis)

3. ผลการวิจัย

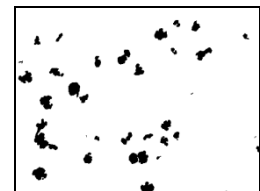
3.1 ผลกระทบของปริมาณแมกนีเซียมต่อปริมาณอนุภาคแกรไฟต์

ผลจากการทดลอง ในรูปที่ 7 และ 8 พบว่า เมื่อช่วงปริมาณแมกนีเซียมมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากในช่วง 0.035-0.052 %, 0.055-0.062% และ 0.065-0.075% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่ามีแนวโน้มทำให้ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จาก 138 เหลือเพียง 78 อนุภาคต่อตารางมิลลิเมตร และโครงสร้างเหล็กหล่อมีอนุภาคแกรไฟต์คล้ายกำมู่ (Grab graphite) และแกรไฟต์แผ่น (Flake graphite) มีลักษณะปลายแหลม [6,15] เป็นผลจากปริมาณแมกนีเซียมที่มากเกินไป (Excessive magnesium) มากเกินความต้องการ คาดว่าเกิด Magnesium oxide (MgO) มากเกินความต้องการจึงทำให้ความกลมของอนุภาคแกรไฟต์ลดลง [14,15] และอาจคาดว่ามีธาตุอื่นๆ ที่มีมากเกินความต้องการ ถูกขับออกมาที่บริเวณระหว่างอนุภาคแกรไฟต์ (Intercellular graphite segregation) ระหว่างการแข็งตัวในช่วงการเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ (Eutectoid reaction) เป็นสำคัญ [2,4,5] จึงเป็นสาเหตุหนึ่ง

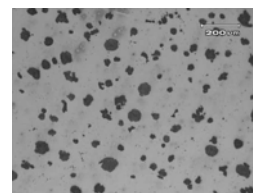
ไปขัดขวาง (Barriers) การเคลื่อนไหวอะตอมของคาร์บอนทำให้อะตอมของคาร์บอนไม่สามารถเกิดการแพร่ซึม (Carbon diffusion) โดไปยังอนุภาคแกรไฟต์ข้างเคียงได้ [5] จึงทำให้เกิดแกรไฟต์แผ่นมากขึ้น [5,15] ทั้งนี้เป็นเพราะจากการประเมิน Shape factor น้อยกว่า 0.65 ทำให้พบโครงสร้างอนุภาคแกรไฟต์ที่ผิดปกติ (Deleterious nodule) ลักษณะไม่กลม ชนิดที่ 4, 5 และชนิดที่ 7 ดังรูปที่ 3 มีปริมาณมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน (อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67) และเป็นผลให้เปอร์เซ็นต์ความกลมของอนุภาคแกรไฟต์น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 7 (ค) ดังรูปที่ 9 แสดงอนุภาคแกรไฟต์ที่ผิดปกติ



ก) 0.035-0.052 %Mg



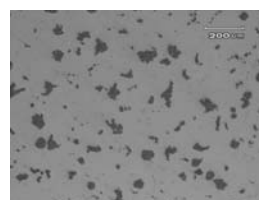
Shape factor < 0.65



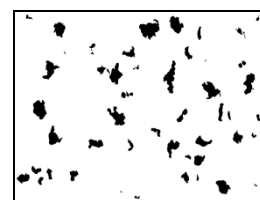
ข) 0.055-0.062 %Mg



Shape factor < 0.65

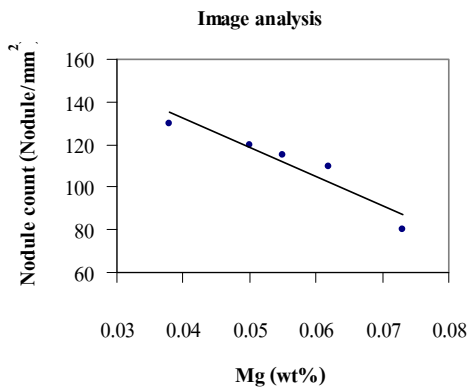


ค) 0.065-0.075 %Mg

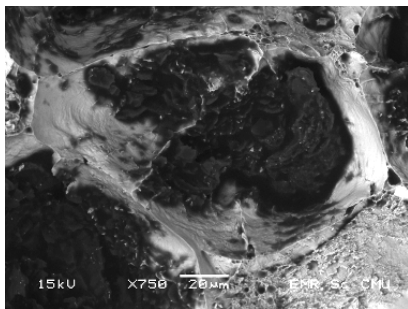


Shape factor < 0.65

รูปที่ 7 ภาพโครงสร้างจุลภาคที่ยังไม่گذกรดที่ใช้ปริมาณแมกนีเซียมแตกต่างกัน



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมกนีเซียมและจำนวนอนุภาคแกรไฟต์

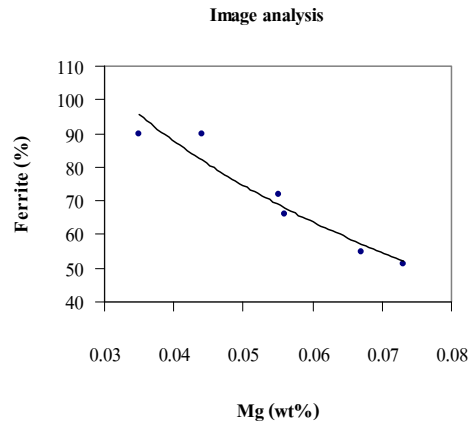


รูปที่ 9 อนุภาคแกรไฟต์ผิดปกติ ถ่ายภาพพื้นผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

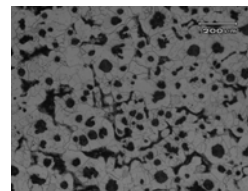
3.2 ผลกระทบของปริมาณแมกนีเซียมต่อสัดส่วนปริมาณโครงสร้างเฟอร์ไรต์

ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อช่วงปริมาณแมกนีเซียมมีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.035-0.052%, 0.055-0.062% และ 0.065-0.075 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่ามีแนวโน้มทำให้ปริมาณสัดส่วนโครงสร้างเฟอร์ไรต์เปลี่ยนแปลงลดลงจาก 90 เหลือเพียง 55 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 10 ทั้งนี้เป็นเพราะจากการประเมิน Shape factor เท่ากับหรือมากกว่า 0.65 ทำให้ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์เม็ดกลมที่มีสภาพปกติทั้งชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 (อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67) มีจำนวนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ขนาดอนุภาคแกรไฟต์มีแนวโน้มเล็กลงและการกระจายอนุภาคแกรไฟต์ไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ดังรูปที่ 11 (ค) ทั้งนี้จะเห็นว่าสอดคล้องกับทฤษฎีการเกิดโครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม กล่าวคือเมื่อปริมาณสัดส่วน

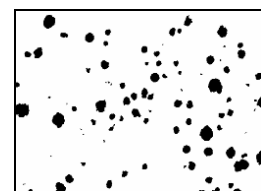
โครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ลดลง แนวโน้มปริมาณอนุภาคแกรไฟต์จะลดลงด้วย [2]



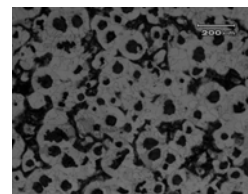
รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแมกนีเซียมและปริมาณสัดส่วนโครงสร้างเฟอร์ไรต์



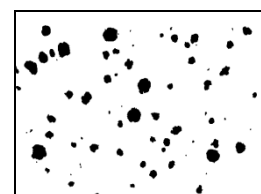
ก) 0.035-0.052 %Mg



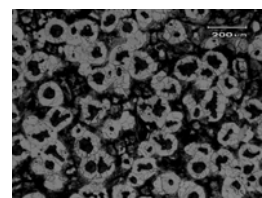
Shape factor ≥ 0.65



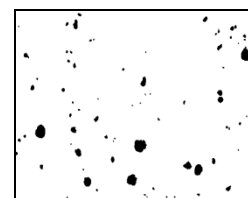
ข) 0.055-0.062 %Mg



Shape factor ≥ 0.65



ค) 0.065-0.075 %Mg

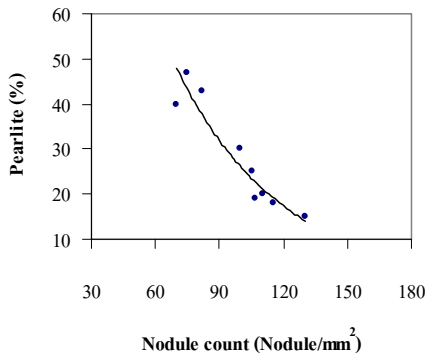


Shape factor ≥ 0.65

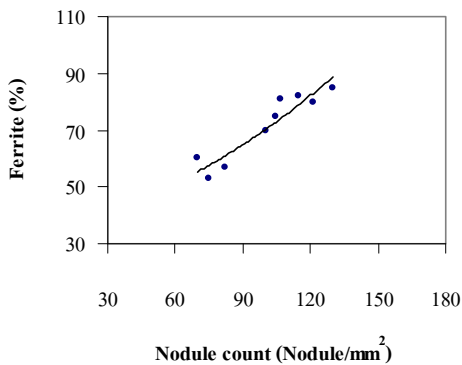
รูปที่ 11 ภาพโครงสร้างจุลภาคที่กัดกรด Nital 2% ที่ใช้ปริมาณแมกนีเซียมแตกต่างกัน

3.3 ผลกระทบของปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ต่อสมบัติทางกล

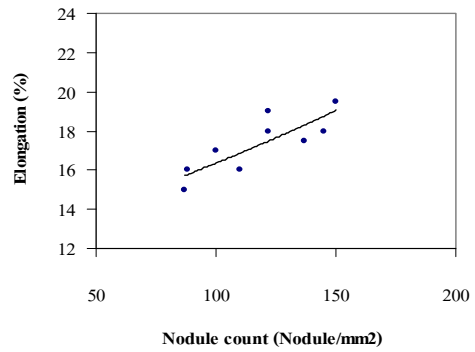
จากการทดลองพบว่าปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้แนวโน้มปริมาณสัดส่วนโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่ 12 หรือในทางตรงกันข้ามทำให้แนวโน้มปริมาณสัดส่วนโครงสร้างเฟอร์ไรต์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่ 13 นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์มีผลต่อสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เฟอร์เซนต์การยืดตัวในชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงแปรผันโดยตรงกับปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ ดังรูปที่ 14 แต่แปรผกผันกับค่าความต้านทานแรงดึงดังรูปที่ 15 ทั้งนี้เป็นเพราะด้วยสมบัติเฉพาะตัวของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีคุณสมบัติเหนียวสูงแต่ความแข็งแรงต่ำ [2, 7]



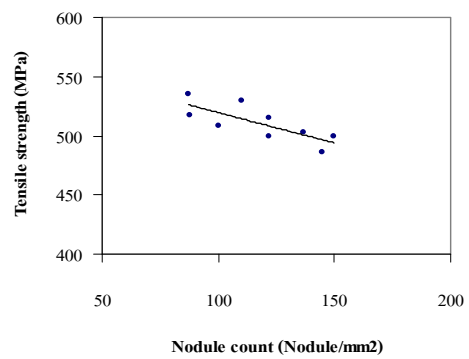
รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอนุภาคแกรไฟต์และปริมาณสัดส่วนโครงสร้างเฟอร์ไรต์



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอนุภาคแกรไฟต์และปริมาณสัดส่วนโครงสร้างเฟอร์ไรต์



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอนุภาคแกรไฟต์และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว



รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอนุภาคแกรไฟต์และค่าความต้านทานแรงดึง

4. สรุปผลการวิจัย

1. ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ผลจากการประเมินค่ายอมรับลักษณะรูปร่างของแกรไฟต์ (Shape factor) ในช่วงตั้งแต่ 1.00 - 0.65 พบว่ามีอนุภาคแกรไฟต์เม็ดกลมปกติ (spherical or near-spherical graphite particles) ทั้งชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 มีผลทำให้ยอมรับค่าเปอร์เซ็นต์ความกลมของอนุภาคแกรไฟต์ (% Nodularity by count) มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

2. ปริมาณแมกนีเซียมตกค้าง (Residual Mg) ที่เพิ่มขึ้นมากเกินไปเกินความต้องการในช่วง 0.065-0.075 % โดยน้ำหนัก ทำให้ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ลดลงเหลือ 78 อนุภาคต่อตารางมิลลิเมตร พบว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคแกรไฟต์ไม่กลม

คล้ายกำมะถันและแกรไฟต์แผ่นปลายแหลมเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความกลมของอนุภาคแกรไฟต์ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

3. ปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่ลดลง การกระจายอนุภาคแกรไฟต์ไม่สม่ำเสมอมากขึ้นทำให้แนวโน้มสัดส่วนโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์เปลี่ยนแปลงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมเกินความต้องการ จากผลดังกล่าวทำให้สมบัติทางกล เช่น ค่าความต้านทานแรงดึงและความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ASEAN Economic Community, <http://www.thaiautoparts.or.th/>

[2] J.R. Davis, "Cast Iron ASM Specialty Handbook", ASM International Handbook, 1996, pp. 1-172.

[3] G. Nicoletto, R. Konecna, B. Hadzimevea and L. Collini, "Microstructure and Mechanical Strength of Nodular Cast Iron", Journal of American Iron and Steel Institute, 38, 2002, pp.18-21.

[4] ASM Metals Handbook, "Metallography and Microstructures", Volume 9, The Materials Information Company, 2004, pp. 10-1383.

[5] SORELMETAL, "Suggestions for Ductile Iron Production", D.I. Techniques, Published by Rio Tinto iron & Titanium Inc., Canada, 2008, pp. 1-55.

[6] American Foundrymen's Society, "Foundrymen's Guide to Ductile Iron Microstructures", Ican Foundrymen's Society Publication, USA, 1984, pp. 1-128.

[7] SORELMETAL, "Ductile Iron Data for Design Engineering", Published by Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Canada, 1990, pp. 1-170.

[8] Annual Book of ASTM Standards, "ASTM A 247-67: Standard Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings", 1997, pp. 319-323.

[9] R. Salazar, M. Herrera-Trejo and N. Mendez, "Effect of Nodule Count and Cooling Rate on As - Cast Matrix of a Cu-Mo Spheroidal Graphite", Journal of Materials Engineering and Performance, 8, 1999, pp. 325-329.

[10] B.J. Miguel and S.J. Antonio, "Shape and Count of free Graphite Particles in Thin Wall Ductile Iron Castings", The Iron and Steel Institute of Japan International, 42, 2001, pp. 257-263.

[11] K.K. Schrems and J.A. Hawk, "Microstructure of Thin Wall Ductile Castings", Journal: Transactions of the American Foundry Society, 111, 2004, pp. 18-21.

[12] P. Davis, J. Massone, R. Boeri and J. Sikora, "Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron- Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution", The Iron and Steel Institute of Japan International, 44, 2004, pp. 1180-1187.

[13] S. Charoenvilai and D.M. Stefanescu, "The Possibility on Prediction of Graphite Shape in Mg-treated Irons by Mean of Thermal Analysis", Proceedings of the Seventh Asian Foundry Congress, Taiwan, 2001, pp. 91-100.

[14] D. SHENG and C. Shao-chun, "Critical Content of MgO in Spheroidisers", Journal of Iron and Steel Research, International, 13, 2006, pp. 1-4.

[15] G.S. Cole, "Solidification of Ductile Iron", Ford Motor Co., Michigan, American Foundrymen's Society, 80, pp. 172-184.