ผลของปริมาณแมกนีเซียมที่มีต่อรูปร่างกราไฟต์และสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว

The Amount of Magnesium Affected on Graphite Shape and Mechanical Property of Ductile Cast Iron

กฤช รุนรักษา [1*] ชลที มูลทา [1] อนวรรษ มูลรักษา [1] นิรวิทย์ สุทธิ [1] และ คนึงนิตย์ จับใจเหมาะ [2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรสภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น 150 ถนนศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

Krit Runraksa [1*] ,Chonnlatee Moonta [1], Anawat Moonraksa [1], Nirawit Sutth [1]

and Khanuengnit Chapchaimoh [2]

[1]Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

[2]Department of Post-Harvest and Processing Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan 150, Srichan Road, Nai Mueang, Amphoe Mueang Khon Kaen, Khon Kaen 40000

[*]ผู้นิพนธ์ประสานงาน : krit.runruksa@gmail.com, 085-7585665

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมที่มีต่อรูปร่างกราไฟต์และสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียวที่ผลิตให้มีประกอบอื่นทางเคมีคือคาร์บอน 3.0-4.0% และซิลิกอน 1.8-2.9% ด้วยเตาหลอมโลหะแบบไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ ทำอินนอคคูเลชัน 0.30% โดยน้ำหนัก พร้อมกับเติม FeSi Mg 4.5-5.1% (แมกนีเซียมทรีทเมนต์)ในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.5, 1.0 และ 1.5% โดยน้ำหนัก ในเบ้าผสมแบบแซนวิชโปรเซสที่อุณหภูมิ 1450 °C แล้วตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดสมบัติทางกล พบว่าการเติมแมกนีเซียม 1.0% โดยน้ำหนัก ทำให้เหล็กหล่อเหนียวเกิดกราไฟต์โครงสร้างกลมซึ่งมีสมบัติทางกลดีที่สุด โดยมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 782 MPa, ความเค้นจุดคราก 578 MPa, เปอร์เซ็นต์การยืดตัว 16% และความแข็ง 85 HB

คำสำคัญ เหล็กหล่อเหนียว รูปร่างกราไฟต์ แมกนีเซียมทรีทเมนต์

Abstract

This research aimed to investigate the the amount of magnesium affected on graphite shape and mechanical property of ductile cast iron, the rest of chemical components in iron were 3.0-4.0 %carbon and 1.8-2.9 %silicon, by the induction furnace in term of 0.30 %weight inoculation while three different levels of 0.5, 1.0 and 1.5 %weight of FeSiMg 4.5-5.1% were used in the sandwich process-furnace at 1450°C. The microstructure was examined for the graphite shape and the mechanical property was investigated. It was found that the 1.0% weight of FeSiMg 4.5-5.1% provided the circular graphite shape which was the optimum mechanical property of the ultimate tensile strength at 782 MPa, yield strength at 578 MPa, elongation at 16% and hardness at 85 HB.

Keywords: ductile cast iron, graphite shape, magnesium treatment process.

1. บทนำ

ในประเทศไทยเหล็กหล่อเหนียวจัดได้ว่าเป็นเหล็กที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมฐานเครื่องจักรขนาดใหญ่ อีกทั้งอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปและวัสดุตั้งต้นเพื่อนำไปแปรรูปใช้งานต่อไปเป็นต้น เหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กหล่อกราไฟต์ก้อนกลม (ductile cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีกราไฟต์เป็นลักษณะกลมแทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก เหล็กหล่อชนิดนี้เป็นการพัฒนามาจากเหล็กหล่อสีเทา ด้วยลักษณะรูปร่างกราไฟต์ที่กลมจึงทำให้มีสมบัติด้านความเหนียวและรับแรงกระแทกได้ดี สามารถหล่อขึ้นรูปแม้ชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยเหล็กหล่อเหนียวมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 3-4% และมีเปอร์เซ็นต์ซิลิกอนผสมอยู่ 1.8-2.8% โดยผสมเติมแมกนีเซียม ลงในน้ำเหล็กหลอมเหลวก่อนจะเทลงแบบ ทำให้มีสมบัติในการต้านทานแรงดึงได้สูงประมาณ 540-700 MPa สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยความร้อน อบลดความเครียดหรือชุบแข็งผิวได้ ความแข็งและความเปราะลดลง ทำให้กลึงกัดไสเจาะได้ง่าย ทนความร้อนได้ดี ทนการเสียดสี สามารถดีขึ้นรูปได้ดี และสามารถรับแรงกระแทกได้ดี เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆได้ดี [1]

ในการผลิตเหล็กหล่อเหนียวนั้นจำเป็นต้องอาศัยแมกนีเซียมในการผสมเติมเพื่อช่วยทำให้คาร์บอนอิสระที่อยู่ในรูปกราไฟต์เปลี่ยนรูปร่างลักษณะการจับตัวกันแบบยาวๆเป็นลักษณะก้อนกลม ซึ่งปริมาณแมกนีเซียมมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกล ดังนั้นในการเติมแมกนีเซียมในเหล็กหล่อเหนียวจะต้องทำการเติมในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่ดีที่สุด

จากปัจจัยข้างต้นทำให้คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาปริมาณแมกนีเซียมมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว โดยมีการเติมแมกนีเซียมในเบ้ารับน้ำโลหะแบบ sandwich process ในช่วงปริมาณของ FeSi Mg 4.5-5.1% (แมกนีเซียมทรีทเมนต์) ที่แตกต่างกันคือ 0.5%, 1% และ 1.5% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในเหล็กหล่อเหนียวและเพื่อศึกษาปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อรูปร่างของกราไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียว

2.ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 กระบวนการผลิตเหล็กหล่อกราไฟต์ก้อนกลม

เหล็กหล่อกราไฟต์กลมสามารถจะหลอมได้โดยใช้เตาทุกชนิดที่หลอมเหล็กหล่อเทาได้ เตาไฟฟ้าหลอมโลหะทั้งอาร์คและเตาไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำจะสามารถควบคุมส่วนผสมเคมีของน้ำเหล็กได้ง่ายกว่าและควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กได้ง่ายกว่า ส่วนการหลอมด้วยเตาคิวโพล่า น้ำเหล็กจะมีปริมาณกำมะถันเพิ่มมากขึ้นจึงจำเป็นจะต้องกำจัดกำมะถันออกจากน้ำเหล็กก่อนการผสม เติมแมกนีเซียม เหล็กหล่อกราไฟต์กลมตามข้อกำหนดของ ASTM A339 โดยรหัสมาตรฐาน เหล็ก A 395 เป็นเหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงเหล็กหล่อ รหัสมาตรฐาน A 396 เหล็กหล่อกราไฟต์กลมที่ใช้งานสภาวะที่ต้องการความแข็งแรงสูง ส่วนเหล็กหล่อรหัสมาตรฐาน A 436 เป็นเหล็กหล่อที่มีโครงสร้างเนื้อเหล็กเป็นออสเตนไนท์ สมบัติทางกลของเหล็กหล่อกราไฟต์กลมแต่ละรหัสเบอร์เหล็ก กรรมวิธีการผลิตจะใช้เหล็กหล่อดิบพิเศษที่มีกำมะถันน้อยปราศจาก As Pb Bi Ti หรือ เศษเหล็กกล้าที่ไม่เจือธาตุเพิ่มสมบัติอยู่ด้วย ต้องไม่มีน้ำมันและสนิมเจือปนเตาหลอม ใช้เตาคิวโพลาหลอมก่อนแล้วจึงไปหลอมในเตาไฟฟ้าให้สะอาดขึ้นหรือหลอมในเตาเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าส่วนเจือในเหล็กหล่อเหนียวจะมี 3.3-3.8% C ; 2.4-2.8% Si และ Mn < 0.5% โดยจะต้องมีความสะอาดเป็นพิเศษ กราไฟต์จึงจะจับตัวกันเป็นก้อนกลมได้ อุณหภูมิเจาะน้ำเหล็กให้ไหลออกประมาณ 1500 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงมีการใส่ส่วนเจือลงในเบ้า (ladle) ทำให้กราไฟต์จับตัวเป็นก้อนกลม

2.1.2 กลไกการเกิดกราไฟต์กลม

2.1.2.1 เกิดในสภาวะของเหลวกลุ่มแนวคิดนี้เชื่อว่านิวเคลียสของกราไฟต์กลมจะเกิดขึ้นครั้งแรกในน้ำเหล็กที่กำลังหลอมเหลวซึ่งปริมาณคาร์บอนสูงกว่าสภาวะสมดุลมาก ต่อจากนั้นจึงจะถูกห่อหุ้มด้วยเหล็กออสเทนไนท์อย่างรวดเร็ว อันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเย็นตัวของเหล็กมีค่า degree

of super cooling สูงมาก บางท่านเสนอว่ากำเนิดของกราไฟต์กลมอาจเกิดขึ้นตามปฏิกิริยาเพอริเทคติค (peritectic) ด้วย ตัวอย่างแนวคิดในกลุ่มนี้เช่น Johnson และ Smartt ร่วมกันศึกษาและได้ข้อสรุปว่า รูปแบบของการเกิดกราไฟต์กลมในเหล็กหล่อถือกำเนิดขึ้นครั้งแรกจากสภาวะที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูงโดยเกิดนิวคลีเอชั่น (nucleation) ตรงบริเวณจุดกึ่งกลางของกราไฟต์กลมขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงเจริญเติบโต (growth) สู่ด้านนอกทำให้รัศมีของวงกราไฟต์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามลำดับ เช่นเดียวกับ Oldfied ที่กล่าวอธิบายว่า จุดเริ่มต้นตรงบริเวณศูนย์กลางของกราไฟต์กลมจะมีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม การเจริญเติบโตเป็นไปในลักษณะเกิดสกรูดิสโลเคชั่น (screw dislocation) โดยมีทิศทางเริ่มจากในสู่ผิวนอกของทรงกลม นอกจากนั้น Minkoff และคณะฯ ยังได้ศึกษาระบบยูเทคติค (eutectic) ในหลายๆระบบที่เกี่ยวข้องกับกราไฟต์กลมภายใต้ตัวแปรอันเดอร์คูลิ่ง (undercooling) และปฏิกิริยาจากการเติมธาตุแมกนีเซียม,ซีเรียมและธาตุหายาก (rare earths) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อรูปแบบการเกิดและเจริญเติบโตในกราไฟต์กลมในเหล็กหล่อเหนียว อีกแนวทางได้จากแนวคิดด้านหนึ่งของ Prof. Albert Desy แห่งมหาวิทยาลัย Universite'de Gand ประเทศเบลเยี่ยมที่แนะนำว่า กราไฟต์กลมอาจจะเกิดขึ้นได้ก่อนในน้ำเหล็กหล่อซึ่งขณะนั้นมีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าสภาวะสมดุล หลังจากนั้นจึงเกิดออสเทนไนท์ล้อมรอบกราไฟต์กลมอย่างรวดเร็วในเวลาถัดมาตามปฏิกิริยาเพอริเทคติค คือ

$$L + S \longrightarrow G \qquad (1)$$

เมื่อ L คือ น้ำเหล็กที่หลอมเหลว

S คือ เหล็กออสเทนไนท์ที่เป็นของแข็ง

G คือ กราไฟต์กลม

มีอีกหลายท่านที่ส่วนใหญ่แล้วต่างก็สรุปว่านิวเคลียสของกราไฟต์เกิดขึ้นก่อน จากนั้นจึงเจริญเติบโตเป็นเม็ดกราไฟต์กลมซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวเพื่อเป็นของแข็ง (solidification process) ของน้ำเหล็ก ถ้าเป็นเหล็กหล่อไฮเปอร์ยูเทคติคครั้งแรกกราไฟต์จะเริ่มแยกตัวออกมาจากของเหลวก่อนโดยที่อุณหภูมิของการเกิดจะอยู่บริเวณตำแหน่งต่ำกว่าจุดหลอมเหลวไปถึงจุดยูเทคติคเมื่อถึงอุณหภูมิยูเทคติคการเกิดนิวเคลียสและเจริญเติบโตของกราไฟต์ก็จะปรากฏให้เห็นพร้อมกับการเกิดนิวเคลียสและการเจริญเติบโตของกราไฟต์ แต่ถ้าเป็นเหล็กยูเทคติคกับเหล็กไฮโปยูเทคติคการเกิดนิวเคลียสและการเจริญเติบโตของกราไฟต์จะไม่เกิดขึ้นจนกว่าจะถึงอุณหภูมิที่ยูเทคติค สำหรับรูปแบบการเกิดกราไฟต์กลมที่แสดงแนวคิดไว้ส่วนใหญ่จะมีอยู่ 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- เกิดนิวเคลียส
- เจริญเติบโต

นิวเคลียสนั้นน่าจะเกิดในลักษณะเฮคเทอร์โรจิเนียส (heterogeneous) โดยความเห็นพ้องกันว่าอาจจะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการเติมสารช่วยทำให้เกิดกราไฟต์กลม (spheroidizing treatment) หรือระหว่างการทำอินนอคคูเลชั่นให้กับน้ำเหล็ก นอกจากนั้นแนวคิดบางส่วนซึ่งยังเชื่อว่าการเจริญเติบโตของผลึกกราไฟต์อาจมีลักษณะเกิดเป็นเดนไดรท์อย่างเข้มงวดที่เรียกว่า drastically คือมีการเติบโตสัมพันธ์กับเวลาที่จำกัดโดยเริ่มจากนาทีแรกที่เกิดแล้วจะพัฒนาเป็นหลายกิ่งก้าน (branching) ในลำดับต่อมา ถ้าขั้นตอนการเกิดช้าและไม่เข้มงวดกับการเติบโตของกิ่งก้าน (คือความถี่ของการเกิดกิ่งก้านสัมพันธ์กันต่ำมาก) ก็จะเกิดการต่อกิ่งก้านเป็นกราไฟต์เกล็ดหรือแผ่นอย่างธรรมดาเหมือนในเหล็กหล่อเทา รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการเกิดกราไฟต์กลมโดยมีจุดเริ่มต้นที่ศูนย์กลางของทรงกลมก่อน จากนั้นจึงเจริญเติบโตขยายรัศมีขึ้นเรื่อยๆตามลำดับ

รูปที่ 1 ลำดับขั้นการเกิดกราไฟต์กลมตามแนวทางที่ 1

2.2.1.2 เกิดในสภาวะของแข็งกราไฟต์กลมเกิดขึ้นภายในสภาวะของแข็งในเหล็กออสเทนไนท์ โดยไม่มีโอกาสสัมผัสโดยตรงกับน้ำเหล็กที่หลอมเหลว ตัวอย่างแนวคิดกลุ่มนี้เช่น Prof. Albert Desy ที่เชื่อว่าเหล็กหล่อเหนียวแข็งตัวคล้ายคลึงกับระบบเพอริเทคติคทุกประการไม่เหมือนกับในเหล็กหล่อทั่วไปที่มีระบบการแข็งตัวแบบยูเทคติค นอกจากนั้นจุดยูเทคติคของเหล็กหล่อเหนียวจะอยู่ต่ำกว่าสภาวะสมดุลอีกด้วย อีกทั้งส่วนผสมของคาร์บอนก็มีค่าสูง

กว่าสมดุลด้วยเช่นกัน ดังนั้นนิวเคลียสของกราไฟต์ก้อนกลมจึงควรถือกำเนิดขึ้นภายในเหล็กออสเทนไนท์ที่แข็งตัวแล้ว ทั้งนี้เพราะเหล็กออสเทนไนท์มีส่วนผสมคาร์บอนเกินสภาวะสมดุลมากกว่าในของเหลวที่คาร์บอนสูงกว่าสภาวะสมดุลย์เหมือนกันแต่ค่าน้อยกว่าส่วนการเจริญเติบโตของกราไฟต์กลมได้จากอะตอมของคาร์บอนเคลื่อนที่จากน้ำเหล็กแพร่ซึมผ่านเหล็กออสเทนไนท์เพื่อนรวมกับนิวเคลียสของ กราไฟต์ขยายให้มีขนาดโตขึ้นเรื่อยๆตามปฏิกิริยาเพอริเทคติค

Gorshkov เป็นอีกผู้หนึ่งที่มีแนวคิดว่านิวเคลียสของคาร์บอนสำหรับเกิดกราไฟต์กลมจะเกิดขึ้นและเจริญเติบโตในเหล็กออสเทนไนท์ นิวเคลียสแต่ละตัวจะมีลักษณะเป็นยูเตคติคเซล (eutectic cell) และมีปริมาณมากกว่าในเหล็กหล่อเทา โดยที่มีจุดกำเนิดจากฟองแก๊สไฮโดรเจนเล็กๆในน้ำเหล็กหล่อ จากนั้นอะตอมของคาร์บอนจะเข้าร่วมกลุ่มเป็นนิวเคลียสพร้อมทั้งขยายการเจริญเติบโตอยู่ภายในฟองแก๊สนี้รูปร่างของกราไฟต์จึงกลมเหมือนกับฟองแก๊ส นอกจากนั้นยังมีแนวคิดอีกหลายท่านที่เสนอว่า นิวเคลียสของกราไฟต์กลมควรจะกำเนิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกของฟองแก๊สตรงผิวอิสระ (free surface) จากนั้นจึงเจริญเติบโตเข้าสู่ด้านในโดยมีกลไกลดังต่อไปนี้

1.เมื่อถึงอุณหภูมิแข็งตัว ออกซิเจนส่วนมากที่รวมตัวอยู่กับซิลิกอนจะมีการแยกตัวออกมาในรูปของสารแปลกปลอม SiO_2

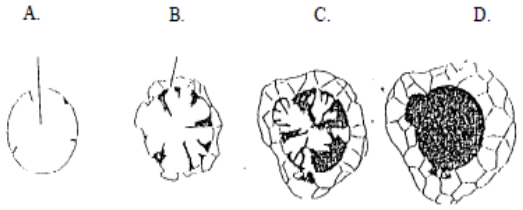
2.ออกไซด์ของ Ca, Al, Ba และ Sr ที่ผสมในสารอินนอคคูแลนจะคอยทำหน้าช่วยส่งเสริมให้เกิดนิวเคลียสของ SiO_2 ที่แยกตัวออกมาและผลลัพธ์อันนี้คือ การได้รับขนาดหรือการกระจายตัวได้ดีของกราไฟต์ (high rate of dispersion)

3.หลังจากอนุภาคของ SiO_2 ปรากฏขึ้นชัดเจนแล้ว ความสมดุลระหว่าง SiO_2 และ C ก็จะถูกรบกวนโดยการเกิดปฏิกิริยาตามสมการนี้คือ

$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO \qquad (2)$$

4. เกิดนิวเคลียสของกราไฟต์ขึ้นบนบริเวณผิวของฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

5. ทิศทางของการเจริญเติบโตสำหรับกราไฟต์กลมจะไม่เป็นไปตามแนวยาว (basal plane) เหมือนในกรณีเหล็กหล่อเทา แต่จะมีทิศทางตั้งฉากกับผิวนั้นๆและเรียกรูปแบบนี้ว่า กราไฟต์วิคเกอร์ (whiskers graphite) การเจริญเติบโตจะมีต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกบรรจุด้วยกราไฟต์จนเต็ม ขั้นตอนการเกิดกราไฟต์กลม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 เริ่มเกิดนิวเคลียสขึ้นครั้งแรกตรงผิวฟองแก๊สก่อนจากนั้นจึงแพร่ซึมเข้าสู่ภายในฟองโดยมีเหล็กออสเทนไนท์เกิดขึ้นโดยรอบฟองแก๊ส การเจริญเติบโตจะมีได้ก็ต่อเมื่ออะตอมคาร์บอนจะแพร่ซึมผ่านเหล็กออสเทนไนท์เข้าไปรวมกลุ่มกันจนเต็มฟองแก๊ส



รูปที่ 2 ลำดับขั้นการเกิดกราไฟต์กลมตามแนวทางที่ 2
A คือ ฟองแก๊ส B คือ กราไฟต์ Whiskers
C คือ น้ำเหล็กที่หลอม D คือ เหล็กที่เป็นของแข็ง

2.2 การดำเนินการวิจัย

2.2.1 ขั้นตอนการหลอมเหล็กหล่อ

1. จัดเตรียมวัสดุที่จะใช้ในการหลอม โดยใช้น้ำหนักรวมในการหลอมทั้งหมด 65 kg เป็น pig iron 3 kg, return scrap 42.3 kg และ steel scrap 19.7 kg

2. ตรวจสอบความพร้อมของเตาอินดักชั่น (induction) โดยทำการตรวจเช็คปริมาณของน้ำหล่อเย็น ระบบน้ำหล่อเย็น แรงดันน้ำหล่อเย็น ตรวจเช็คผนังเตาและปากเตาว่ามีการสึกกร่อนหรือมีการแตกร้าวหรือไม่ก่อนทำการหลอม ตรวจสอบความพร้อมของเบ้าเทน้ำโลหะว่ามีความแข็งแรงหรือไม่ และตรวจเช็คแบบทรายว่ามีตำหนิหรือการแตกร้าวหรือไม่ก่อนการเทน้ำโลหะ

3. นำวัสดุที่ได้ทำการจัดเตรียมไว้บรรจุลงเตาเพื่อเตรียมการหลอม

4. ดำเนินการเปิดเตาอินดักชั่น เพื่อทำการหลอมโลหะโดยใส่วัตถุดิบตามลำดับดังนี้

1. เหล็กพิก (pig iron)
2.เศษเหล็กหล่อ (return scrap)
3.เศษเหล็กเหนียว (steel scrap)

5. ทำความสะอาดน้ำโลหะโดยการโรยแซนสแล็ก (sand slag) บนผิวน้ำโลหะเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนในน้ำโลหะออกและทำการตักชิ้นทดสอบเพื่อเช็คส่วนผสมเคมีในโมลทองแดง

6. ตรวจเช็คส่วนผสมเคมีด้วยเครื่องสเปคโตมิเตอร์ (spectrometer) โดยตรวจเช็คส่วนผสมเคมีที่ได้จากการหลอมบนเตาเพื่อทำการปรับปรุงส่วนผสมเคมี

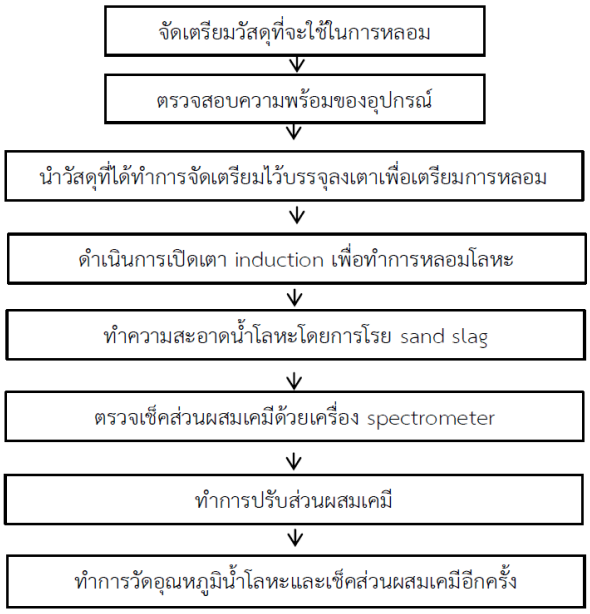
7. ทำการปรับส่วนผสมเคมีเพื่อให้ได้ค่าเคมีตามที่กำหนดไว้

8. ทำการวัดอุณหภูมิน้ำโลหะเมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะถึง 1,450 องศาเซลเซียส และทำการเช็คส่วนผสมเคมีอีกครั้งเพื่อตรวจเช็คปริมาณของธาตุผสมเติม ดังแสดงขั้นตอนต่างๆในรูปที่ 3

2.2.2 ขั้นตอนการผสมเติมแมกนีเซียม

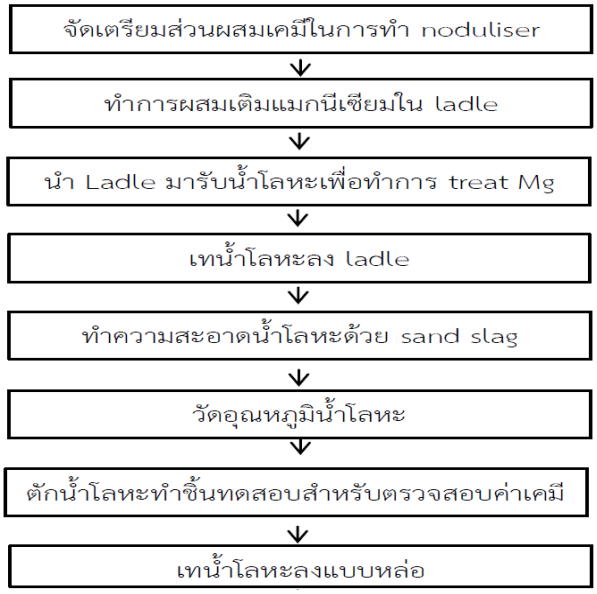
รูปที่ 4 แสดงถึงขั้นตอนการผสมเติมแมกนีเซียมโดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. จัดเตรียมสารอินอคคูลเลน (inoculants) และเติม FeSiMg 4.5-5.1% ซึ่งจะคิดน้ำหนักตามเปอร์เซ็นต์ที่ใช้เติม คือ 0.5%, 1.0% และ1.5% เมื่อทำการตรวจเช็คส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปคโตมิเตอร์ เหล็กหล่อที่ได้จะมีปริมาณส่วนผสมของแมกนีเซียมอยู่ระหว่าง0.015-0.017%, 0.021-0.037%, 0.052-0.063% ตามลำดับ



รูปที่ 3 ขั้นตอนการหลอมเหล็กหล่อเหนียว

2. ทำการผสมเติมแมกนีเซียมในเบ้ารับน้ำโลหะด้วยวิธีแซน วิชโปรเซส (sandwich process) โดยทำการเติม FeSiMg 4.5-5.1% ลงในเบ้ารับน้ำโลหะ แล้วนำเศษเหล็กเหนียวปกคลุมไว้ เพื่อชะลอระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมกับน้ำโลหะและทำอินอคคูลเลชั่น (inoculation) ไปพร้อมกับการถ่ายโอนน้ำโลหะจากเตาลงสู่เบ้ารับน้ำโลหะ



รูปที่ 4 ขั้นตอนการเติมแมกนีเซียมในเหล็กหล่อเหนียว

3. ทำความสะอาดน้ำโลหะด้วยแซนสแล็ก เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกในน้ำโลหะก่อนเทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อ

4. ทำการวัดอุณหภูมิน้ำโลหะเมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะถึง 1,400 องศาเซลเซียส จึงทำการตักน้ำโลหะจากเบ้ารับน้ำโลหะที่ทำการเติมแมกนีเซียมเทลงโมล (mold) ทองแดงเพื่อเป็นชิ้นทดสอบส่วนผสมเคมีของน้ำโลหะในขั้นตอนต่อไป [2]

2.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบสมบัติทางกล

2.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยาโดยการตรวจสอบใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง

2.3.2 ดำเนินการนำชิ้นงานที่เตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8 [3] มาตรวจสอบคุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงดึง (tensile test) ใช้เครื่อง universal testing machine และการทดสอบความแข็ง (hardness test) โดยใช้มาตรฐาน ASTM E10-96 [4] วัดแบบบริเนลล์ตัวอย่างละ 3 ชิ้น

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

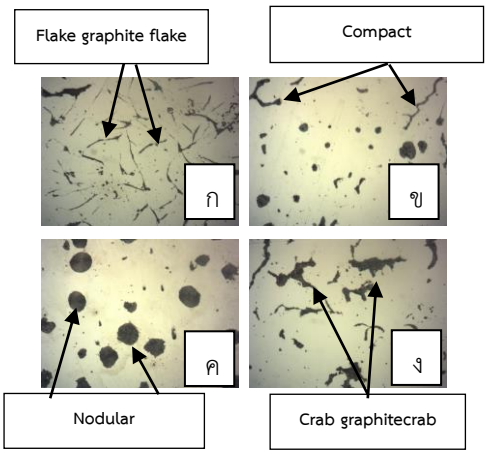
3.1 ปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคกราไฟต์และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียว

3.1.1 รูปร่างของอนุภาคกราไฟต์

การเติมแมกนีเซียมในปริมาณต่างๆ ทำให้เกิดรูปร่างของกราไฟต์ที่แตกต่างกันโดยรูปร่างของกราไฟต์ที่เหล็กหล่อมีปริมาณแมกนีเซียมผสมอยู่ในช่วง 0.015-0.017% คล้ายตัวหนอนและลักษณะของกราไฟต์ที่ไม่กลมชนิดที่ 2 และชนิดที่ 4 ซึ่งเกิดจากการเติมแมกนีเซียมในปริมาณที่น้อยจนเกินไป ส่วนเหล็กหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียมผสมอยู่ในช่วง 0.021-0.037% พบว่ากราไฟต์ที่ได้มีลักษณะกลมปกติชนิดที่ 1 เนื่องจากปริมาณแมกนีเซียมอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และเหล็กหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียมผสมอยู่ในช่วง 0.052-0.063% พบว่าได้กราไฟต์รูปร่างผิดปกติ ชนิดที่ 5 กราไฟต์มีลักษณะคล้ายก้ามปูและชนิดที่ 7 กราไฟต์มีลักษณะเป็นแผ่น อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67 [5]

3.1.2 โครงสร้างจุลภาค

ผลการทดลองการผสมเติมแมกนีเซียมที่มีปริมาณแตกต่างกันทำให้เกิดโครงสร้างของเหล็กหล่อที่มีกราไฟต์รูปร่างแตกต่างกันดังนี้ เมื่อไม่เติมแมกนีเซียม ทำให้ได้ผลดังรูปที่ 5 (ก) ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อที่มีกราไฟต์รูปร่างเป็นแผ่น (flake graphite) ที่เป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อเทา ส่วนเมื่อเหล็กหล่อมีแมกนีเซียมผสมในปริมาณ 0.015-0.017% จึงเกิดผลดังรูปที่ 5 (ข) ซึ่งเหล็กหล่อมีโครงสร้างกราไฟต์ตัวหนอน (compact graphite) และมีกราไฟต์ที่ไม่กลมกระจายอยู่ภายในโครงสร้างด้วย ซึ่งเป็นลักษณะกราไฟต์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากกราไฟต์แผ่นเป็นกราไฟต์กลม เนื่องจากเหล็กหล่อมีปริมาณแมกนีเซียมต่ำเกินไป ไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดกราไฟต์กลม แต่เมื่อเหล็กหล่อมีแมกนีเซียมผสมในปริมาณ 0.025-0.037% พบว่าเหล็กหล่อจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 5 (ค) ซึ่งแสดงรูปร่างกราไฟต์ลักษณะกลมปกติ กระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้าง เนื่องจากมีปริมาณแมกนีเซียมเหมาะสม อย่างไรก็ตามเมื่อเหล็กหล่อมีแมกนีเซียมผสมปริมาณ 0.052-0.063% จะเกิดโครงสร้างดังรูปที่ 5 (ง) ซึ่งมีรูปร่างกราไฟต์ที่ผิดปกติเนื่องจากการเติมแมกนีเซียมมากเกินไป ทำให้เกิดกราไฟต์เสื่อม (degenerate graphite) โดยเฉพาะกราไฟต์รูปร่างคล้ายก้ามปู (crap graphite) และเกิดกราไฟต์แบบแผ่นเพิ่มขึ้น คาดว่าอาจมีธาตุอื่นมากเกินไปถูกขับออกมาที่บริเวณระหว่างอนุภาคกราไฟต์ในระหว่างการแข็งตัวที่ปฏิกิริยายูเทคตอยด์ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอะตอมคาร์บอน ทำให้ไม่สามารถแพร่ซึมไปสู่ข้างในกราไฟต์ข้างเคียงได้ จึงทำให้เกิดกราไฟต์แผ่นเพิ่มขึ้น [6]



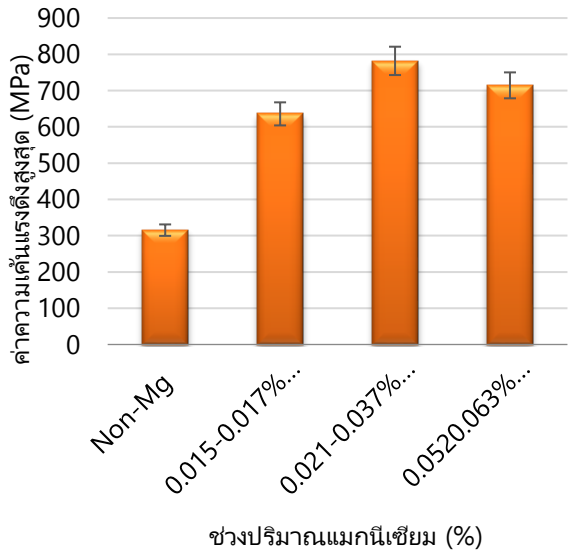
รูปที่ 5 แสดงผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อเหนียว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) ที่กำลังขยาย50X ก) ไม่เติมแมกนีเซียม ข) 0.015-0.017% ค) 0.021-0.037% และ ง) 0.052-0.063%

3.2 ปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว

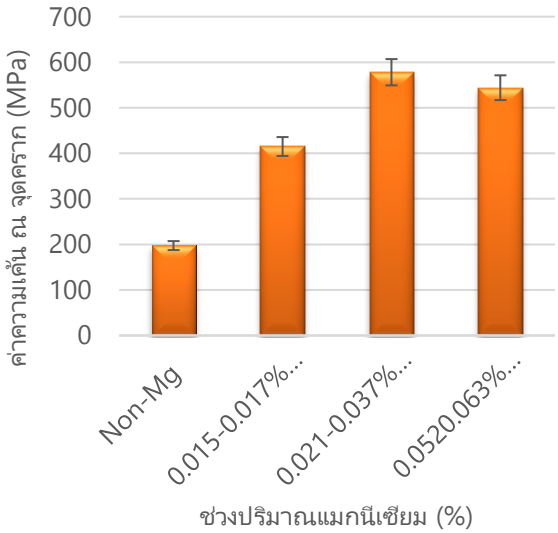
3.2.1 ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength), ความเค้นจุดคราก (Yield Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation)

เหล็กหล่อที่ไม่มีแมกนีเซียมจะมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด, ความเค้นจุดครากและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว คือ 300 MPa, 180 MPa และ 3% ตามลำดับ เมื่อเหล็กหล่อมีปริมาณของแมกนีเซียมในปริมาณที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีค่าสมบัติทางกลดังแสดงในรูปที่ 6, 7, 8 ซึ่งเหล็กหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียม 0.015-0.017% พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด, ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 600 MPa, 400 MPa และ 10% เนื่องจากแมกนีเซียมทำให้เหล็กหล่อมีรูปร่างกราไฟต์เปลี่ยนจากแบบแผ่นเป็นแบบตัวหนอน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่า

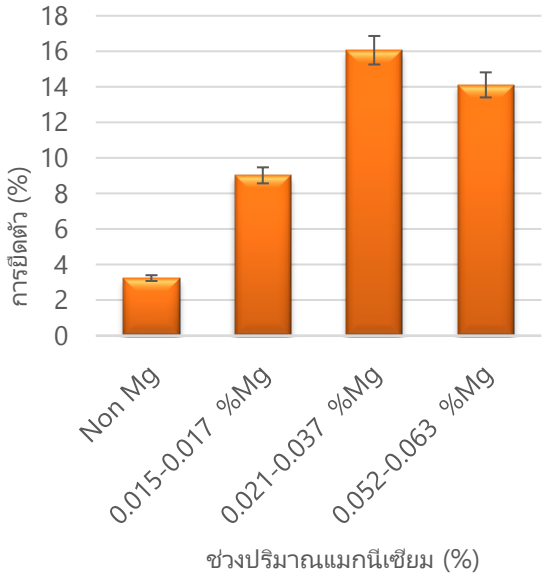
เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกราไฟต์แบบแผ่นนั้นมีส่วนปลายที่แหลมซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นการแตกร้าวในเหล็กหล่อ ส่วนกราไฟต์ตัวหนอนนั้นมีส่วนปลายของกราไฟต์ที่มีลักษณะโค้งมน จึงทำให้แตกร้าวได้ยากขึ้น ส่วนเหล็กหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียม 0.021-0.037% พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด, ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 782 MPa, 550 MPa และ 15% ตามลำดับ เนื่องจากเหล็กหล่อที่ได้มีรูปร่างกราไฟต์ลักษณะกลมปกติ ไม่เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของส่วนที่เป็นเนื้อพื้นในเหล็กหล่อ จึงส่งผลให้สมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้นกว่าเหล็กหล่อที่มีรูปร่างกราไฟต์แบบแผ่นและแบบตัวหนอน แต่เมื่อเหล็กหล่อมีปริมาณแมกนีเซียม 0.052-0.063% ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวมีค่าลดต่ำลงเป็น 700 MPa, 500 MPa และ 13% ทำให้เหล็กหล่อมีรูปร่างกราไฟต์ที่ผิดปกติและเกิดกราไฟต์แบบแผ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณแมกนีเซียมมากเกินไปซึ่งคาดว่าแมกนีเซียมส่วนที่เกินนั้นจะเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) จึงส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ความเค้นจุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าลดลง [7]



รูปที่ 6 ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของเหล็กหล่อเหนียวเมื่อเติมแมกนีเซียมในปริมาณแตกต่างกัน



รูปที่ 7 ค่าความเค้นจุดครากของเหล็กหล่อเหนียวเมื่อเติมแมกนีเซียมในปริมาณแตกต่างกัน

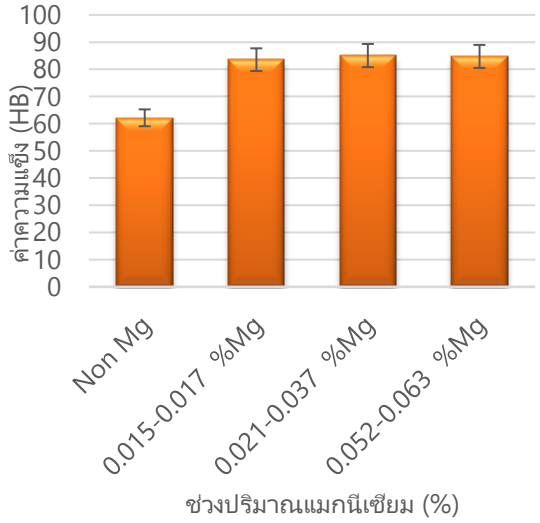


รูปที่ 8 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของเหล็กหล่อเหนียวเมื่อเติมแมกนีเซียมในปริมาณแตกต่างกัน

3.2.2 ความแข็ง (Hardness)

จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 9 พบว่าเหล็กหล่อที่ไม่มีการเติมแมกนีเซียมจะมีความแข็ง 60 HB และเมื่อทำการเติมแมกนีเซียมส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเหล็กหล่อที่มีปริมาณแมกนีเซียม 0.015-0.017%, 0.021-0.037% และ 0.052-0.063% นั้นความแข็งของเหล็กหล่อจะไม่แตกต่างกันโดยมีค่า 80 HB ทั้งนี้เนื่องจากการเติมแมกนีเซียมในรูปของ FeSiMg4.5-5.1% ส่งผลให้ปริมาณของซิลิคอนมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมกนีเซียมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ความ

เค้นจุดคราก และค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอนในเหล็กหล่อเหนียวทำหน้าที่เป็นสารละลายของแข็งซึ่งจะเข้าไปแทนที่อะตอมของเหล็กบางส่วนในผลึก (substitutional impurity atom) ทำให้เกิดความเครียดแรงดึงภายในแขนของอะตอมที่ยึดเหนี่ยวรอบอะตอมของซิลิคอน ส่งผลให้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ภายในผลึกเมื่อผลึกไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจึงส่งผลให้โครงสร้างเหล็กหล่อมีความแข็งเพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าลดต่ำลง [8]



รูปที่ 9 ค่าความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวเมื่อเติมแมกนีเซียมในปริมาณแตกต่างกัน

4. บทสรุป

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียว

การเติมปริมาณของแมกนีเซียมในช่วงปริมาณ 0.021-0.037% เป็นการเติมปริมาณแมกนีเซียมที่เหมาะสม ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าแมกนีเซียมปริมาณที่เติมเพียงพอต่อความต้องการจะทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดกราไฟต์มีลักษณะกลมปกติและส่งผลให้เหล็กหล่อมีสมบัติทางกลที่ดีที่สุดคือมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 782 MPa มีค่าความเค้นจุดครากเฉลี่ย 578 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว 16% และมีค่าความแข็ง 85 HB

4.2 ปริมาณของแมกนีเซียมที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคกราไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียว

การเติมแมกนีเซียมในช่วงปริมาณ 0.021-0.037% ผลปรากฏว่าพบกราไฟต์ที่ลักษณะกลมปกติ ชนิดที่ 1 อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM A247-67 เนื่องจากปริมาณแมกนีเซียมอยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงทำให้ได้กราไฟต์มีลักษณะกลม

11. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น รวมถึงคณะผู้จัดทำงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

12. เอกสารอ้างอิง

[1] สมนึก วัฒนศรียกุล. เหล็กหล่อกราไฟต์กลม.โลหะวิทยา. King mongkut's university of technology northbangkok (Thailand) Publishing;1995.

[2] วุฒิศักดิ์ อบมา. อิทธิพลของพารามิเตอร์การผลิตต่อโครงสร้างเหล็กหล่อเหนียว.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2539.

[3] เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. การทดสอบแรงดึง. สถาบันเหล็ก และเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย; 2550.

[4] อิทธิพล เดี่ยววณิชย์. การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก.สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย; 2550.

[5] Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron casting. ASTM A247-67;1998

[6] ศักดิ์สิทธิ์ โรจน์ฤทธากร และ ประมูล บัวน้อย. อิทธิพลของปริมาณอนุภาคแกรไฟต์ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 2555;8(2)38-46.

[7] D. Sheng and C. Shao-chun. "Critical Content of MgO in Spheroidisers." Journal of Iron and Steel Research, International. 2006;13(1):1-4.

[8] Haycock, Meghan. Effects of silicon content and cooling rate on mechanical properties of heavy section ductile cast iron. Michigan Technological University. Master's Thesis;2011.