

Received: Mar 16, 2025

Revised: Jun 13, 2025

Accepted: Jun 18, 2025

ศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอนต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ แกรไฟต์กลม

THE STUDY ON THE EFFECT OF CARBON CONTENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF SPHERICAL GRAPHITE CAST IRON

ชาตรี นุชนาง*, มนตรี สุขชุม, กิตติศักดิ์ จิตรประยูร, เอกวิทย์ พลสุสวัสดิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงใหม่

Chatree Nutnang, Montri Sukchum, Kitisak Chitprayoon, Aekkawit Poonsawat

Department of Mechanical Engineering, Faculty of engineering, Chiangrai College

Corresponding author: chatree.de63@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอนที่มีต่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% โดยใช้เตาหลอมไฟฟ้าชนิดแบบเหนี่ยวนำ ด้วยอุณหภูมิ 1450-1550 °C ใส่แมกนีเซียม 0.02-0.1% และ ฟอสฟอรัส 0.05% นำมาทดสอบเชิงเปรียบเทียบสมบัติทางกลและทางด้านโลหะวิทยา การทดลองและวิเคราะห์ผล การศึกษาเชิงการเปรียบเทียบสมบัติทางกลพบว่า เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 4.0% มีค่าความต้านทานแรงดึง ได้สูงสุดเท่ากับ 630.85 N/mm² , มีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 433.96 N/mm² , มีค่าความแข็งมากที่สุดเท่ากับ 180.5 HB และเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดเท่ากับ 22.45% ในส่วนของผลการ วิเคราะห์โครงสร้างวัสดุที่มีส่วนผสมของคาร์บอนทั้ง 3 ค่า พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยจะมีลักษณะของแกรไฟต์ที่เป็นรูป วงกลม และ ปริมาณโครงสร้างของเฟอร์ไรต์จะมีอยู่ประมาณ 80% และปริมาณโครงสร้างของเพิร์ลไลต์จะมีอยู่ประมาณ 20% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

คำสำคัญ : เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม, เหล็กหล่อเหนียว, เพอร์เซ็นต์คาร์บอน, เฟอร์ไรต์, เพิร์ลไลต์

Abstract

The study of this research was the effects of varying carbon content on ductile cast iron, specifically with carbon contents of 3.0%, 3.5%, and 4.0%. The samples were melted using an induction furnace at temperatures ranging from 1450–1550 °C, with magnesium added at levels between 0.02–0.1% and phosphorus at 0.05%. Comparative testing of mechanical and metallurgical properties was carried out. The experimental results from the comparative analysis of mechanical properties revealed that ductile cast iron with a carbon content of 4.0% exhibited the highest tensile strength at 630.85 MPa, the highest yield strength at 433.96 MPa, and the greatest hardness at 180.5 HB. In contrast, ductile cast iron with a carbon content of 3.0% showed the highest elongation percentage at 22.45%. Regarding the metallographic analysis of the samples with the three different carbon contents, the microstructures were found to be similar. The

graphite appeared in a nodular (spherical) form, with the microstructure comprising approximately 80% ferrite and 20% pearlite—consistent with the standard metallurgical characteristics of ductile cast iron.

Keyword : Spheroidal graphite cast iron, Ductile cast iron, Carbon percentage, Ferrite, Pearlite

บทนำ

เหล็กหล่อที่ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการก่อสร้าง เนื่องจากต้นทุนต่ำและสามารถผลิตได้ง่ายอีกทั้งคุณสมบัติทางกลอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และมีการพัฒนาเหล็กหล่อหลากหลายเกรด ซึ่งมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน เช่น เหล็กหล่อเทา (Grey Cast iron) (Kaewpharin, 2010) มีคุณสมบัติในการนำความร้อนและการดูดซับแรงสั่นสะเทือนได้ดี แต่มีความทนทานต่ำ ในทางกลับกัน เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม หรือ เหล็กหล่อเหนียว (Spheroidal graphite cast iron, Ductile cast iron) มีความเหนียว ทนต่อแรงกระแทกและแรงสั่นสะเทือนได้ดีกว่า โดยมีแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสเป็นส่วนผสม (สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์, 2553) ข้อดีคือใช้ความร้อนและเวลาในการผลิตน้อย

เหล็กหล่อถูกผลิตขึ้นจากการถลุงมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2% (Thamachote, 2015) โดยหลังจากขั้นตอนการหลอม เหล็กหล่อจะถูกเทลงในแม่พิมพ์ ความแตกต่างในการผลิตระหว่างเหล็กกล้าและเหล็กหล่อคือเหล็กหล่อจะต้องใช้เครื่องมือในการผลิต (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2558) นอกจากนั้นองค์ประกอบภายในยังมีความแตกต่างกัน โดยเหล็กหล่อจะประกอบด้วย คาร์บอนประมาณ 3.5% และจะมีโลหะอื่นๆ ผสมรวมถึงแมกนีเซียมและฟอสฟอรัส ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อของโลหะ บางครั้งอาจจะมีการผสมแร่แมงกานีสเล็กน้อย และแร่วัสดุอย่างอื่น เช่น กำมะถัน และซิลิคอน ถึงแม้ว่าเหล็กกล้าและเหล็กหล่อจะมีส่วนประกอบของคาร์บอนและมีลักษณะภายนอกที่คล้ายกัน (Piyasrisawat, 2013) แต่ทั้งสองก็มีความแตกต่างที่สำคัญคือเหล็กกล้าจะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนน้อยกว่า 2% ซึ่งช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายมีลักษณะที่แข็งตัวอยู่ในโครงสร้างไมโครคริสตัลไลน์แบบเดียว (สุทธิเกียรติ ปิยะศรีสวัสดิ์, 2556) ซึ่งการมีค่าของธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าของเหล็กหล่อส่งผลให้ผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอยู่ในรูปของโลหะเนื้อผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในลักษณะนี้จึงมีโครงสร้างของไมโครคริสตัลไลน์ มากกว่าหนึ่งโครงสร้างในหนึ่งผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการมีปริมาณของธาตุคาร์บอนที่สูงและการแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ (Boonmee, 2020) ทำให้เหล็กหล่อมีความสามารถในการหล่อที่ดีเยี่ยม มีเพิร์ลไลท์ (Pearlite) ที่เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของเฟอร์ไรต์ และซีเมนต์ไต์ (Cementite) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีคาร์บอนสูง โดยจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ ซึ่งสร้างความแข็งแรงและความทนทานที่สูงขึ้นกว่าผลึกของเฟอร์ไรต์เพียงอย่างเดียว และยังมีเฟอร์ไรต์ (Ferrite) คือโครงสร้างที่เกิดขึ้นในเหล็กหล่อที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (สารัมภ์ บุญมี, 2563) โดยเป็นเฟสของเหล็กที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ที่มีจุดศูนย์กลาง (Body-Centered Cubic: BCC) โดยจะมีคุณสมบัติที่มีความอ่อนตัวและทนทานต่อการยืดหยุ่นสูง แต่ก็มี ความแข็งแรงไม่สูงมากนัก โครงสร้างเกรน (Grain structure) ของเหล็กหล่อแกรไฟต์ หรือ CGI (Compacted Graphite Iron) (Suwanmanee, 2011) เป็นโครงสร้างที่สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อชนิดนี้ ซึ่งมีการจัดเรียงของแกรไฟต์ในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ที่มีอัตราส่วนผสมของคาร์บอนอยู่ประมาณ 3.5% แกรไฟต์จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ซึ่งมีแกรไฟต์ที่จัดเรียงเป็นลักษณะกลม (ณัฐพงศ์ สุวรรณณัฏ, 2554) มีผลทำให้วัสดุมีความแข็งแรงสูง ความเหนียว และทนทานต่อการแตกหัก ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานในหลายๆ สาขางานในด้านอุตสาหกรรม (Goodrich และคณะ, 2012) ซึ่งจากการศึกษาจึงทำให้ทราบว่า อัตราส่วนของปริมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอนมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นความสัมพันธ์ของปริมาณค่าคาร์บอนที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม รวมไปถึงสมบัติทางกลของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม หากมีการปรับปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในการหล่อของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% เพื่อทดสอบเชิงเปรียบเทียบ ว่าจะมีการแปรผกผันของสมบัติทางกลในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมตามปริมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอนมากน้อยเพียงใด โดยการทดลองอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM ซึ่งสามารถนำไปเป็น

แนวทางการเลือกใช้ในการออกแบบหล่อขึ้นงานและการเลือกใช้วัสดุในอุตสาหกรรม เพื่อให้สอดคล้องต่อสมบัติทางกลที่ต้องการใช้ในการออกแบบและลดในส่วนของอัตราค่าใช้จ่ายในการผลิตขึ้นงาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1 ศึกษาผลกระทบของปริมาณคาร์บอนที่มีต่อเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม เพื่อศึกษาผลของปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกันต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม
- 2 ศึกษาสมบัติทางแรงดึงของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3%, 3.5% และ 4% เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึง ความเค้นคราก และความแข็งของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม
- 3 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมภายใต้สภาวะปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกัน

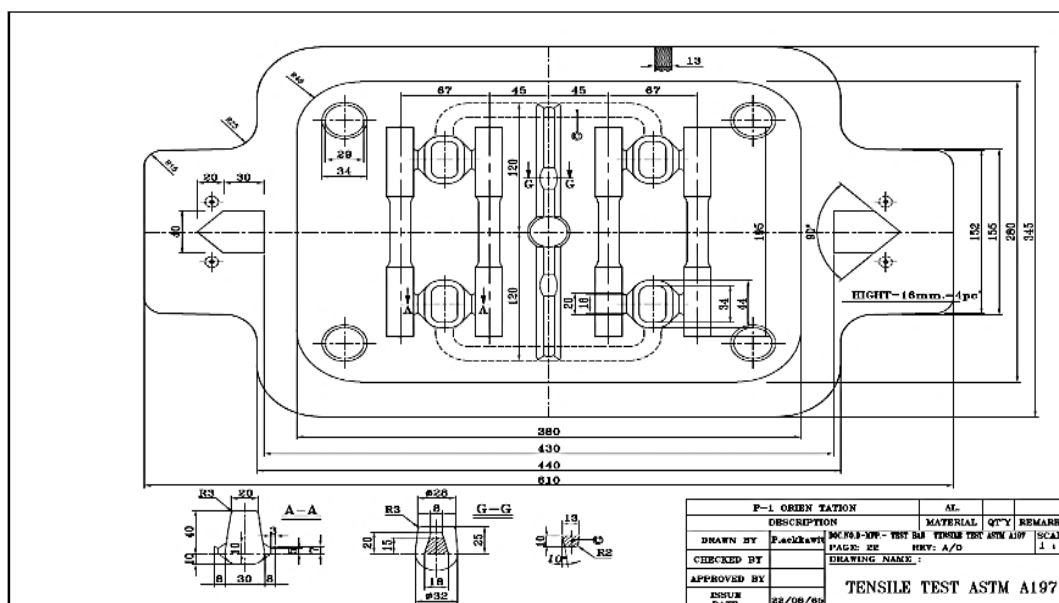
ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีให้เหมาะสมกับลักษณะในการใช้งาน
- 2 สามารถนำไปใช้ในการออกแบบขึ้นงานหล่อและการเลือกใช้วัสดุในอุตสาหกรรม
- 3 สามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพและกระบวนการหล่อโลหะ

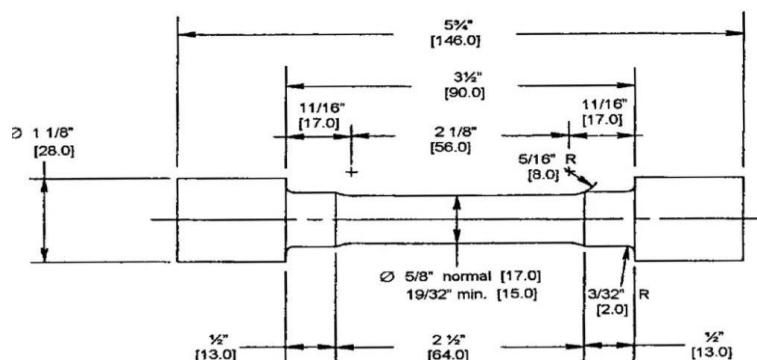
วิธีการดำเนินการวิจัย

1 การออกแบบ

เขียนแบบแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการหล่อเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมขึ้นงานตัวอย่าง 2D โดยใช้โปรแกรม Gstar CAD และ 3D โดยใช้โปรแกรม Power Shape 2015 ลิขสิทธิ์ของบริษัท แคดแคมไทย จำกัด อยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation : A 197/A 197M – 00 ดังภาพที่ 1 ออกแบบแม่พิมพ์สำหรับการหล่อขึ้นงานทดสอบแรงดึงของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม โดยออกแบบภาพสองมิติ (2D) ด้วยโปรแกรม Gstar CAD และแบบจำลองสามมิติ (3D) ด้วยโปรแกรม Power Shape 2015 ซึ่งได้รับสิทธิใช้งานจากบริษัท แคดแคมไทย จำกัด แบบแม่พิมพ์ได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM A197/A197M-00 ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2



ภาพที่ 1 แบบแม่พิมพ์หล่อขึ้นงานตัวอย่าง



ภาพที่ 2 แบบขึ้นงานตัวอย่างมาตรฐาน ASTM Designation : A 197/A 197M - 00

2 กระบวนการหล่อ

2.1 โดยนำเหล็กเก่าที่จะใช้ในการหล่อ และส่วนผสมที่จำเป็นต้องใช้ในการหล่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ที่ผ่านการคำนวณอัตราส่วนที่จะต้องใช้ในการหล่อใส่เข้าไปในเตาหลอม โดยควบคุมอัตราส่วนผสมปริมาณสารหรือธาตุให้ได้ อัตราส่วนดังนี้ คาร์บอน (Carbon) C = 3.0% , 3.5% , 4.0% ซิลิคอน (Silicon) Si = 2.5% ฟอสฟอรัส (Phosphorus) P = 0.05% กำมะถัน (Sulfur) S = 0.02 % โครเมียม (Chromium) Cr = 0.10% และ แมงกานีส (Manganese) Mn = 0.35 % ใส่เข้าเตาหล่อไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (induction furnace) โดยใช้ความร้อนในการหลอมละลายประมาณ 1400-1500 องศาเซลเซียส

2.2 เมื่ออุณหภูมิได้ถึงตามที่กำหนดเมื่ออุณหภูมิของน้ำเหล็กถึงค่าที่กำหนด (ประมาณ 1400-1500 องศาเซลเซียส) จะทำการเติมแมกนีเซียม (Magnesium Mg) ในช่วง 0.035 - 0.055 % โดยน้ำหนักเข้าไป เพื่อเพิ่มความเหนียวให้สูงขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการที่แข็งแกร่งของการหล่อขึ้นรูปนำน้ำเหล็กเทลงใส่เบ้าแม่พิมพ์ ข้อควรระวังในกระบวนการนี้ คือ ความชื้นของทรายและเบ้าแม่พิมพ์และอัตราการเย็นตัวที่สามารถทำให้เกิดฟองอากาศที่ผิวของชิ้นงาน อาจส่งผลกระทบบต่อความสัมพันธ์ของสมบัติทางกล ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เทน้ำเหล็กลงสู่แม่พิมพ์

2.3 หลังจากการเทน้ำเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมลงในแม่พิมพ์แล้ว จะปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลง ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาโดยประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้โลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง และคงรูปเป็นโครงสร้างของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม (Spheroidal graphite cast iron) ตามมาตรฐาน ASTM Designation : A 536 -84 ดังภาพที่4 เมื่อชิ้นงานเย็นตัวสมบูรณ์แล้ว จะนำไปผ่านกระบวนการกลึงตกแต่งผิวให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่กำหนด



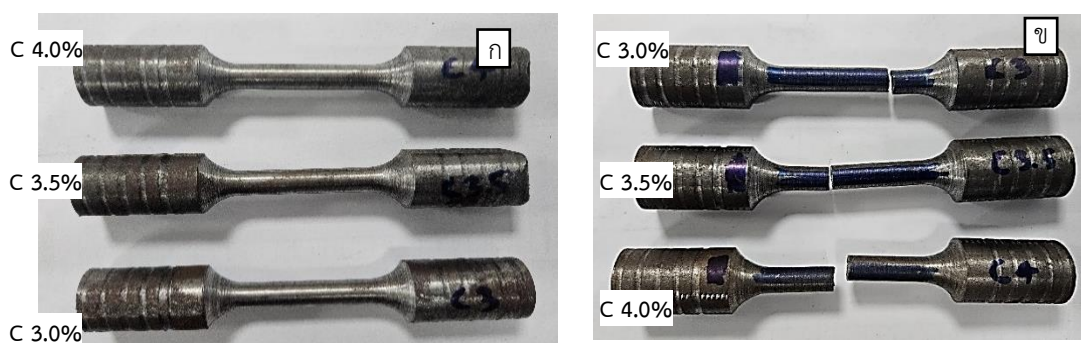
ก ข ค
 ภาพที่ 4 ชิ้นงานหลังหลอมเสร็จ ก.คาร์บอน 3.0% ข.คาร์บอน 3.5% , ค.คาร์บอน 4.0%

3 ขั้นตอนการทดลอง

3.1 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง TENSILE TESTING MACHINE MODEL : WE 300B (W10-277) BRAND : NAME CHANG CHUN ทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate tensile) , หาค่าความเค้นสูงสุดของชิ้นงาน (Yield strength) , หาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุ (Elongation) โดยอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 536 – 84 ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ทดสอบชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง TENSILE TESTING MACHINE MODEL : WE 300B (W10-277)



ภาพที่ 6 ก.ลักษณะก่อนทดสอบของชิ้นงานที่ปริมาณคาร์บอนที่แตกต่าง
 ข.ลักษณะการขาดของชิ้นงานที่ปริมาณคาร์บอนที่แตกต่าง

3.2 การทดสอบความแข็งของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ด้วยเครื่อง HARDNEES TESTER MODEL: SA 200
 BRAND NAME : GALILEO วัดค่าความแข็งของวัสดุ โดยอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation : E 140-02

3.3 ศึกษาโครงสร้างของชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 1 ดูโครงสร้างจุลภาคของเกรน ใช้กล้องจุลทรรศน์ MICROSCOPE MODEL : JAPAN 258203 BRAND NAME : NIKON เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคเกรนของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม

ขั้นตอนที่ 2 ขัดเปิดหน้าผิวด้วยน้ำผงกักร่อน (Alumina Powder) หยดน้ำยาอะซิโตน (Acetone) ดูโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมตัวอย่าง เพื่อดูโครงสร้างของเฟอไรต์และเพอร์ไรต์ โดยอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM : A 247-17 ดังภาพที่ 7



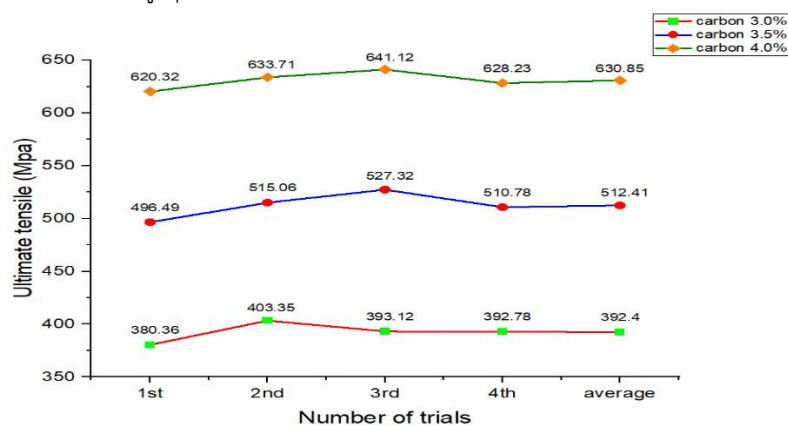
ภาพที่ 7 ดูโครงสร้างจุลภาคของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์ MICROSCOPE MODEL : JAPAN 258203

3.4 วิเคราะห์อัตราส่วนผสมของชิ้นงาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมของโลหะแบบตั้งโต๊ะ SPECTROMETER MODEL : F – MATE BRAND NAME : BAIRD FOUNDRY MATE

การทดลองและวิเคราะห์ผล

เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณค่าคาร์บอนที่มีผลกระทบต่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม โดยมีปริมาณค่าคาร์บอนที่ใช้ในการหล่อเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่ต่างกัน คือ 3.0% , 3.5% และ 4.0% อย่างละ 4 ชิ้นงานตัวอย่าง รวม 12 ชิ้น ผลที่ได้จากการวิจัยซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะแบ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ออกเป็น 6 ส่วนดังนี้

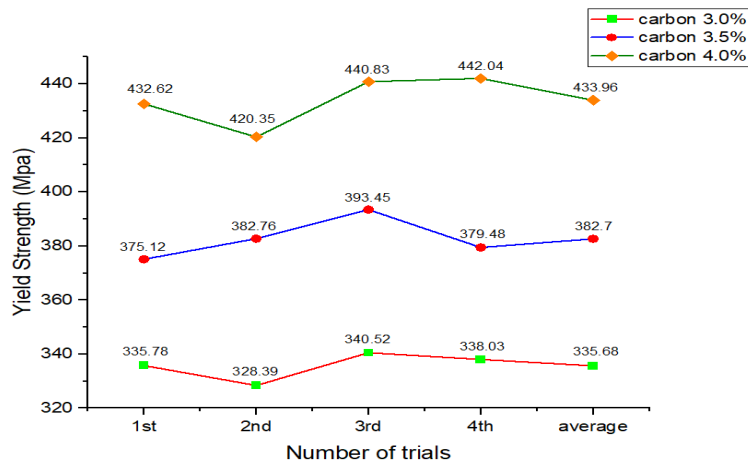
1 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile Strength)



ภาพที่ 8 กราฟแสดงค่า Ultimate tensile Strength

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile Strength) เผยให้เห็นว่า เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 4.0% จะมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด โดยมีค่าความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 630.85 N/mm^2 และเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.5% มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 512.41 N/mm^2 ในขณะที่เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% จะมีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 392.40 N/mm^2 ตามลำดับ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของแกรไฟต์กลมให้เพิ่มขึ้น จึงสามารถต้านทานแรงดึงได้ดี

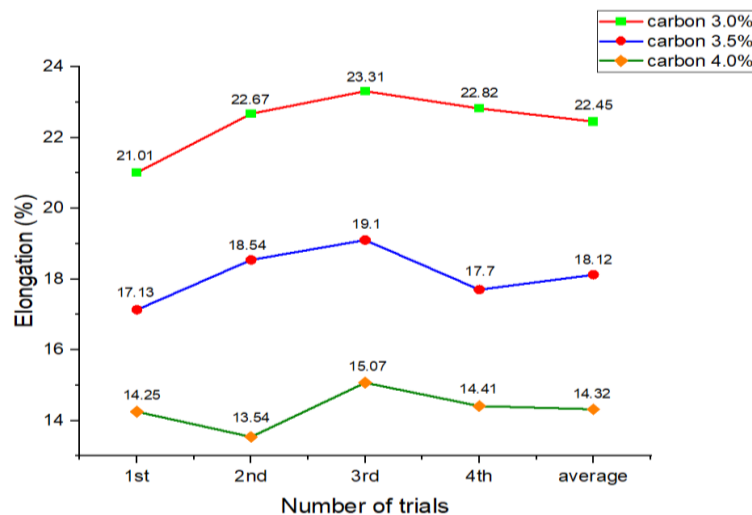
2 ค่าความเค้นสูงสุด (Yield Strength)



ภาพที่ 9 กราฟแสดงค่า Yield Strength

จากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นสูงสุด (Yield Strength) เผยให้เห็นว่า เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 4.0% จะมีค่าความเค้นเฉลี่ยมากที่สุด โดยมีค่าความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 433.96 N/mm^2 และปริมาณคาร์บอน 3.5% มีค่าความเค้นเฉลี่ยเท่ากับ 382.7 N/mm^2 ในขณะที่ชิ้นงานตัวอย่างที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% จะมีค่าความเค้นน้อยที่สุด โดยมีค่าความเค้นเฉลี่ยอยู่ที่ 335.68 N/mm^2 ตามลำดับของปริมาณคาร์บอนเนื่องจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของแกรไฟต์กลมให้เพิ่มขึ้น จึงสามารถต้านทานแรงดึงได้ดี

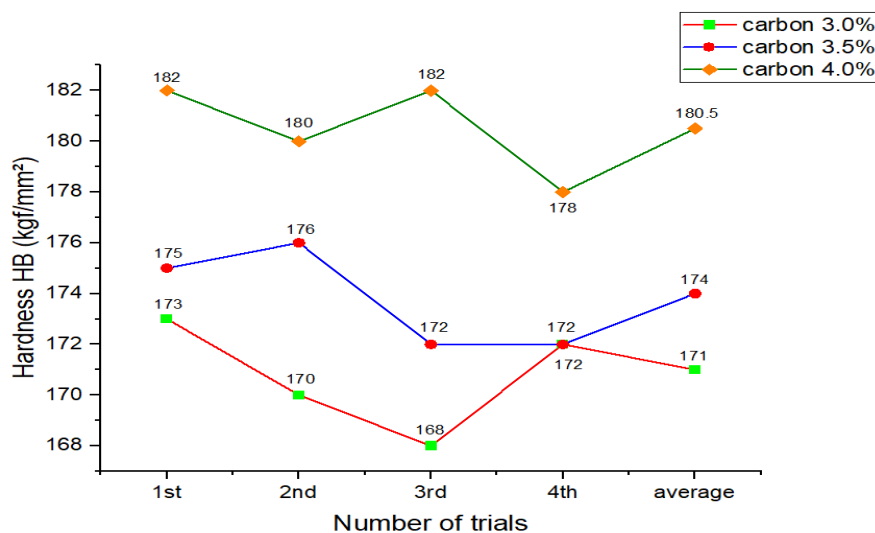
3 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation)



ภาพที่ 10 กราฟแสดงค่า Elongation

จากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด (Elongation) เผยให้เห็นว่า ปริมาณคาร์บอน 3.0% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยมากที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 22.45% และที่มีปริมาณคาร์บอน 3.5% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 18.12% ในขณะที่ปริมาณคาร์บอน 4.0% จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 14.32% ตามลำดับ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนลดลงจะส่งผลให้มีปริมาณแกรไฟต์น้อยลง และจะมีพื้นที่ของ Matrix มีสัดส่วนสูงขึ้นโดยเฉพาะเฟิร์ลไลต์ จึงทำให้เกิดความยืดตัวได้มากกว่า ซึ่งส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนยิ่งต่ำจะมีคุณสมบัติที่ อ่อนแต่เหนียว

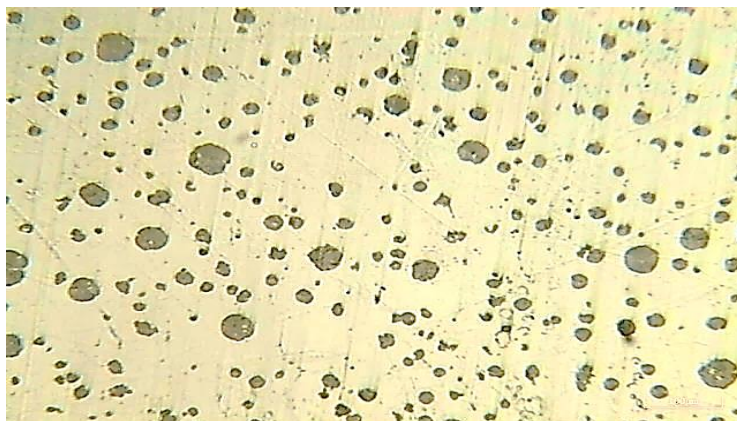
4 ค่าความแข็งของชิ้นงาน (Hardness HB)



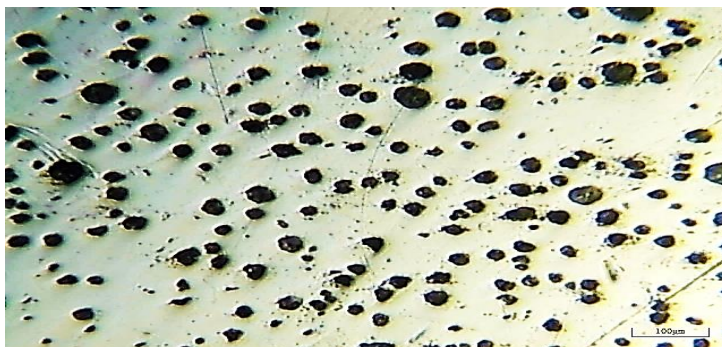
ภาพที่ 11 กราฟแสดงค่า Hardness HB

จากภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งของวัสดุ (Hardness HB) เผยให้เห็นว่า ชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอน 4.0% จะมีค่าความแข็งมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 180.5 HB และที่มีชิ้นงานตัวอย่างที่มีปริมาณคาร์บอน 3.5% มีค่าความแข็งเท่ากับ 173.75 HB ในขณะที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% จะมีค่าความแข็งน้อยที่สุด โดยมีค่าความแข็งของวัสดุเฉลี่ยอยู่ที่ 170.75 HB ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของปริมาณแกรไฟต์กลมให้เพิ่มขึ้นตาม จึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนยิ่งสูง ค่าความแข็งของวัสดุก็จะสูงขึ้นตามอย่างมีนัยสำคัญ

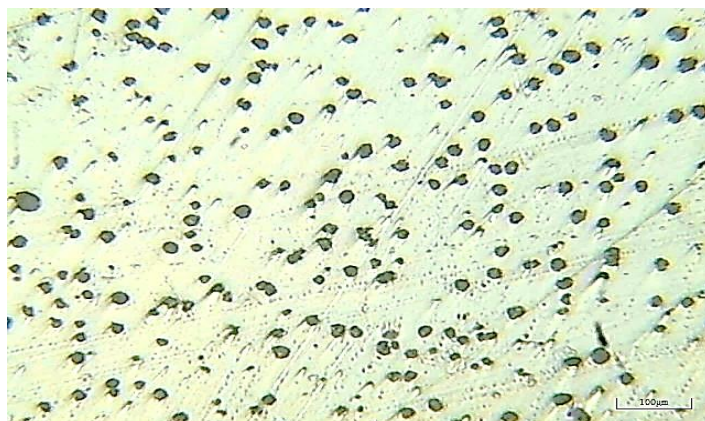
5 ศึกษาโครงสร้างชิ้นงาน เพื่อส่องดูโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ดังภาพที่ 12,13 และ 14



ภาพที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 3.0% (X100 μm)

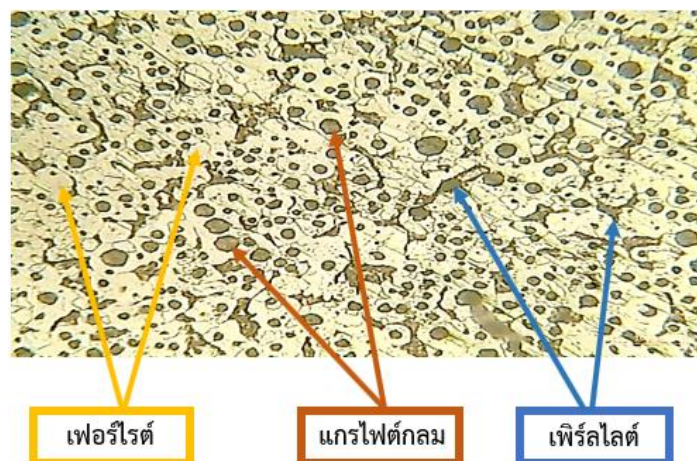


ภาพที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 3.5% (X100 μm)

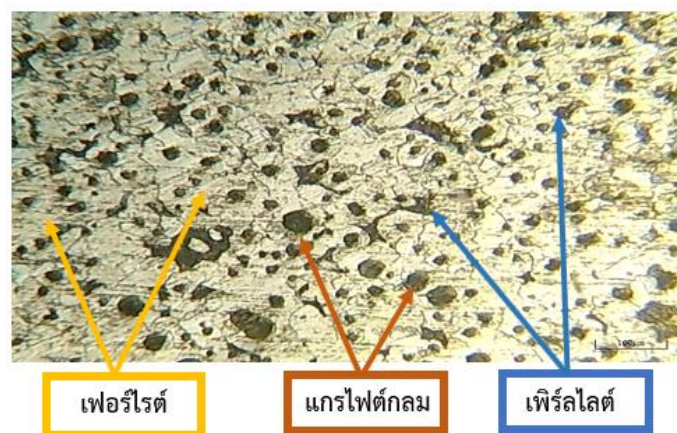


ภาพที่ 14 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมปริมาณคาร์บอน 4.0% (X100 μm)

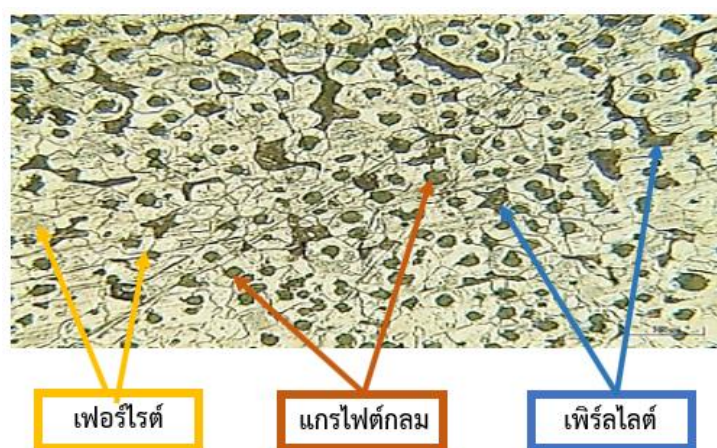
จากภาพที่ 11, 12 และ 13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมชิ้นงานตัวอย่างเข้าสู่กล้องจุลทรรศน์ MICROSCOPE MODEL : JAPAN 258203 BRAND NAME : NIKON ใช้ขนาดความละเอียดในการซูมของเลนส์เท่ากับ 100 μm จะเผยให้เห็นสภาพโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะของแกรไฟต์ที่กลม หรือ คาร์บอนบริสุทธิ์ที่รวมตัวอยู่ในเนื้อเหล็กจับรวมตัวกันมีลักษณะเป็นวงกลมดี ไม่มีการเสียรูปร่างเป็นเส้นแนวยาวหรือเป็นแบบลักษณะตัวหนอน ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างที่ผ่านขั้นตอนในกระบวนการหลอมที่ดี ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม และมีลักษณะโครงสร้างใกล้เคียงกันทั้ง 3 ค่าของปริมาณคาร์บอน



ภาพที่ 14 โครงสร้างจุลภาคของเฟอร์ไรต์และเฟอร์ไรต์ปริมาณคาร์บอน 3.0% (X100 μm)



ภาพที่ 15 โครงสร้างจุลภาคของเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ปริมาณคาร์บอน 3.5% (X100 μm)



ภาพที่ 16 โครงสร้างจุลภาคของเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ปริมาณคาร์บอน 4.0% (X100 μm)

จากภาพที่ 14, 15 และ 16 จะเผยให้เห็นสภาพของลักษณะโครงสร้างจุลภาคชั้นของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เป็นชั้นๆ ที่มีสีขาวและชั้นของโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่เป็นชั้นๆ ที่มีสีดำ ได้อย่างชัดเจน จากการมองลักษณะของโครงสร้างจุลภาคด้วยตาเปล่าจะแสดงให้เห็นว่า ปริมาณโครงสร้างของเฟอร์ไรต์จะมีอยู่ประมาณ 80% ของพื้นที่ และปริมาณโครงสร้างของเพิร์ลไลต์จะมีอยู่ประมาณ 20% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม โครงสร้างในภาพแสดงลักษณะของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มี matrix มีเฟอร์ไรต์เป็นส่วนใหญ่ร้อยละ 80 และมีเพิร์ลไลต์ร้อยละ 20 ซึ่งบ่งบอกถึงเหล็กที่มีความเหนียวสูง เหมาะกับงานที่ต้องการการดูดซับแรงกระแทกหรือการเสียรูปแบบยืดหยุ่น

6 อัตราส่วนผสม การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมของโลหะ ใช้เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมของโลหะแบบตั้งโต๊ะ SPECTROMETER MODEL : F – MATE BRAND NAME : BAIRD FOUNDRY MATE เพื่อทดสอบปริมาณส่วนผสมทั้งหมด แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนผสมภายในของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมชิ้นงาน ที่เผยให้เห็นว่า อัตราส่วนผสมของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% จะมีปริมาณธาตุหลักผสมอยู่ประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) , ซิลิคอน (Si) , แมงกานีส (Mn) , ฟอสฟอรัส (P) , กำมะถัน (S) , โครเมียม (Cr) , แมกนีเซียม (Mg) , เหล็ก (Fe) และมีเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนผสมทั้งหมด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณค่า 3.0% , 3.5% และ 4.0%

ชื่อเคมี	ชื่อเคมีอังกฤษ	สัญลักษณ์ธาตุ	เลขอะตอม	ปริมาณที่ใช้ (%)		
				Carbon 3.0%	Carbon 3.5%	Carbon 4.0%
คาร์บอน	Carbon	C	6	3.07	3.53	4.01
ซิลิคอน	Silicon	Si	14	2.72	2.69	2.67
แมงกานีส	Manganese	Mn	25	0.29	0.293	0.293
ฟอสฟอรัส	Phosphorus	P	15	0.0149	0.0166	0.0161
กำมะถัน	Sulfur	S	16	0.0084	0.0093	0.0072
โครเมียม	Chromium	Cr	24	0.052	0.0518	0.0508
แมกนีเซียม	Magnesium	Mg	12	0.0406	0.0374	0.0366
เหล็ก	Iron	Fe	26	93.4	93.0	92.5

สรุปผล

1 จากการทดลองหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสรุปผลได้ว่า ผลหาค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) ชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 4.0% มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 630.85 Mpa และที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 512.41 Mpa ค่าความต้านทานแรงดึงมีความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณคาร์บอน กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความความต้านทานแรงดึงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามของปริมาณคาร์บอน ซึ่งผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 536 – 84

2 จากการทดลองหาค่าความเค้นสูงสุดสรุปผลได้ว่า ผลหาค่าความเค้นสูงสุดของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) ชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 4.0% มีค่าความเค้นเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 433.96 Mpa และที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% มีค่าความเค้นเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 335.68 Mpa ค่าความเค้นมีความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณคาร์บอน กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามของปริมาณคาร์บอน ผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 536 – 84

3 จากการทดลองหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดสรุปผลได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester) ชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 22.45% และที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 4.0% มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 14.32% ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณคาร์บอน กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนน้อยลง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามของปริมาณคาร์บอน ผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 536 – 84 ของปริมาณคาร์บอนทั้ง 3 ค่า

4 จากการทดลองหาค่าความแข็งสรุปผลได้ว่า ค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ทดลองด้วยเครื่องทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness tester HB) ชิ้นงานที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 4.0% มีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 180.5 kg/mm² และที่มีปริมาณค่าคาร์บอน 3.0% มีค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 170.75 kg/mm² ค่าความแข็งของวัสดุมีความสัมพันธ์ผกผันกับปริมาณคาร์บอน กล่าวคือ เมื่อปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ค่าความความแข็งของวัสดุจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามของปริมาณคาร์บอน ผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: E 140 – 02 ของปริมาณคาร์บอนทั้ง 3 ค่า

5 จากการส่องกล้องจุลทรรศน์สลับเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคเกรน มีดังนี้

1) จากการนำชิ้นงานส่องกล้องจุลทรรศน์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเกรนของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ด้วยขนาดความละเอียดของเลนส์เท่ากับ 100 μm จะเห็นได้ว่า สภาพโครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะของแกรไฟต์ที่กลม กล่าวคือ คาร์บอนบริสุทธิ์ที่รวมตัวอยู่ในเนื้อเหล็กจับรวมตัวกันมีลักษณะเป็นวงกลมดี ไม่มีการเสียรูปร่างเป็นแบบลักษณะตัวหนอน เป็นโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการหลอมที่ดี และผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 247 – 19

2) จากการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดกร่อนด้วยกรดกัดกร่อน มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคปริมาณของเฟอร์ไรต์และเพอร์ไรต์ของชิ้นงานที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ด้วยขนาดความละเอียดของเลนส์เท่ากับ 100 μm จะเห็นได้ว่า สภาพโครงสร้างจุลภาคชั้นของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เป็นชั้นสีขาว และชั้นของโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่เป็นชั้นสีดำ ได้อย่างชัดเจน จากการมองลักษณะของโครงสร้างจุลภาคด้วยตาเปล่าจะแสดงให้เห็นว่า ปริมาณโครงสร้างของเฟอร์ไรต์จะมีอยู่ประมาณ 80% ของพื้นที่ และปริมาณโครงสร้างของเฟอร์ไรต์จะมีอยู่ประมาณ 20% ผ่านเกณฑ์ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation: A 247 – 19

6 การทดสอบแยกอัตราส่วนผสมโลหะอยู่ภายในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอน 3.0% , 3.5% และ 4.0% ผลการทดสอบเผยให้เห็นว่า อัตราส่วนผสมของโลหะที่อยู่ภายในชิ้นงานนั้น มีเปอร์เซ็นต์ของธาตุโลหะ ดังตารางที่ 1 ซึ่งปริมาณของธาตุโลหะต่างๆ มีเปอร์เซ็นต์ $\pm$ ไม่เกิน 1% ในเกณฑ์การทดสอบอัตราส่วนชิ้นงานตัวอย่าง อยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM Designation : A 536-84

เอกสารอ้างอิง

ณัฐพงศ์ สุวรรณมณี. (2554). *โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่ออบเหนียวภายหลังการอบชุบด้วยความร้อน*.

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2558). *วัสดุวิศวกรรม*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งซีเอ็ดยูเคชั่น.

สุทธิเกียรติ ปิยะศรีสวัสดิ์. (2556). *การศึกษาปัจจัยในกระบวนการหล่อโลหะที่มีผลต่อการเกิดฟองอากาศในชิ้นส่วนยานยนต์*.

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์. (2553). *โลหะวิทยาเบื้องต้น*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งซีเอ็ดยูเคชั่น.

สารัมภ์ บุญมี. (2563). *ผลของโครงสร้างผิวงานหล่อต่อสมบัติเชิงกลในเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว*.

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, วิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ASTM Designation: A 197/A 197M – 00. (2000). *Standard Specification for Cupola Malleable Iron*. American Society for Testing and Materials.

ASTM Designation: A247 – 19. (2019). *Standard Test Method for Evaluating Microstructure of Graphite in Iron Castings*. American Society for Testing and Materials.

ASTM Designation: A 536 – 84. (1984). *Standard Specification for Ductile Iron Castings*. American Society for Testing and Materials.

ASTM Designation: E 140 – 02. (2002). *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness*. American Society for Testing and Materials.

Boonmee, S. (2020). *Effect of Cast Surface Structure on the Mechanical Properties of Nodular Cast Iron and Ductile Cast Iron*. (Bachelor of Engineering, Suranaree University of Technology).

- Goodrich and R.W. Lobenhofer. (2012). *Effect of Cooling rate on ductile iron Mechanical Properties*. Journal of Materials Engineering and Performance.
- Kaewpharin, S. (2010). *Introduction to Metallurgy*. Bangkok: SE-Education Publishing.
- Piyasrisawat, S. (2013). *Study of Factors in the Metal Casting Process Affecting the Formation of Air Bubbles in Automotive Parts*. (Bachelor of Engineering, Silpakorn University).
- Suwanmanee, N. (2011). *Microstructure and Mechanical Properties of Tempered Ductile Cast Iron After Heat Treatment*. (Bachelor of Engineering, Srinakharinwirot University).
- Thamachote, N. (2015). *Engineering Materials*. Bangkok: SE-Education Publishing.

Translated Thai References

- Natthaphong Suwanmanee. (2011). *Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron after heat treatment*. Bachelor of Engineering, Srinakharinwirot University.
- Narongsak Thammachote. (2015). *Engineering materials*. Bangkok: SE-Education Publishing.
- Saram Boonmee. (2020). Effect of casting skin on mechanical properties in compacted graphite and ductile irons , Suranaree College of Technology.
- Sutthikiat Piyasrisawat. (2013). Study of foundry process factors affecting on the formation of air bubble in automotive parts. Bachelor of Engineering, Silpakorn University.
- Surasit Kaewphra-in. (2010). Basic metallurgy. Bangkok: SE-Education Publishing.