

การศึกษาอิทธิพลของแบบหล่อที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ของเหล็กหล่อสีเทา FC25

STUDY OF THE EFFECTS OF THE MOLD MATERIALS ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND THE MICROSTRUCTURES OF THE GRAY CAST IRON (FC 25)

*จักรชัย ลัชชานนท์, ** กันต์วิชญ์ พลูปราชนุญ, **ตระกูลศักดิ์ สุขศรี,

** วรรณชัย อาริวิทย์กุล, ** สมชาย เนตรวิจิตร, ** เอกชัย มุติมาลย์

*ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โทร. 6641000 ต่อ 2055 , โทรสาร 037 - 322609

*Jackchai Lutchanont, **Gunwarich Pluphrach, **Trakulsak Sukree,

**Wanchai Arthonwiriyaikul, **Somchai Nantvrijit, **Akachai Mutiman

Department of Physics , Faculty of Science , Srinakharinwirot University

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

Tel 6641000 Ext 2055, Fax 037 – 322-609

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลการนำความร้อนของแบบหล่อที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทา (FC 25) แบบหล่อที่ใช้มี 3 ชนิด คือ แบบหล่อที่ทำจากเหล็กเหนียว(Steel mold),ที่ทำจากทรายคาร์บอนไดออกไซด์(CO₂ mold) และที่ทำจากเรซิน(Shell mold) แบบหล่อเป็นรูปทรงกระบอกเรียว สูง 215 มม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายในด้านบน 96 มม. และเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่าง 60 มม.

จากการทดลองพบว่า แบบหล่อที่ทำจากเหล็กเหนียว SC 46 มีอัตราการนำความร้อนออกจากชิ้นงานเหล็กหล่อสีเทาสูงสุด รองลงมาคือแบบหล่อที่ทำจากทรายคาร์บอนไดออกไซด์ และแบบหล่อที่ทำจากเรซิน ตามลำดับ แบบหล่อทั้ง 3 ชนิดนี้ปริมาณความร้อนจะถูกถ่ายเทอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณขอบนอกของชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณด้านใน ซึ่งในบริเวณขอบนอกของชิ้นงานจะเกิดกราฟไฟต์เล็กและสั้น ได้เกรนของเพอร์ไลต์ที่ละเอียด

ค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานจากแบบหล่อเหล็กเหนียว, ทรายคาร์บอนไดออกไซด์, เรซิน เท่ากับ 346.61 HV , 220.12 HV , 212.48 HV ตามลำดับ

การทดสอบความต้านแรงดึงพบว่า ค่าความต้านแรงดึงจะแปรผันตามความแข็งของชิ้นงาน ค่าความต้านแรงดึงของชิ้นงานจากแบบหล่อเหล็กเหนียว , ทรายคาร์บอนไดออกไซด์ , เรซิน เท่ากับ 38.26 kgf/mm² , 24.97 kgf/mm² , 23.57 kgf/mm² ตามลำดับ

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทาที่ได้จากแบบหล่อเหล็กเหนียวประกอบด้วยเหล็กคาร์ไบด์ (Fe₃ C) ที่บริเวณขอบนอกชิ้นงานลึกเข้าไป 5 มม. ส่วนบริเวณกลางชิ้นงานเกิดเพอร์ไลต์ละเอียด และมีกราฟไฟต์ชนิด D และ E ขนาด 7-8 ASTM โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากแบบหล่อทรายคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณขอบนอกของชิ้นงานประกอบด้วยเพอร์ไลต์ละเอียด และกราฟไฟต์ชนิด B และ D ขนาด 5-6 ASTM ส่วนบริเวณกลางชิ้นงานเกิดกราฟไฟต์ชนิด A และ B ขนาด 3-5 ASTM โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากแบบหล่อเรซินที่บริเวณขอบนอกของชิ้นงานเกิดกราฟไฟต์ชนิด B และ D ขนาด 4-5 ASTM ส่วนบริเวณกลางชิ้นงานเกิดกราฟไฟต์ชนิด A,B และ C เล็กน้อย ขนาด 3-5 ASTM ได้เพอร์ไลต์หยาบที่สุด

ABSTRACT

This objective is to study the effects of the mold materials on the mechanical properties and the microstructures of the Gray cast iron (FC 25) , three types of mold are used, Cast steel SC 46 , CO₂ mold and Shell mold. The molds have cylindrical shape with height of 215 mm., the in-sides top diameter of 96 mm., and the in-sides bottom diameter of 60 mm.

From the experimental results we found the highest heat conduction rate occurring in the Cast steel SC 46 mold. Result in the hardness around the outer periphery of the workpiece with Short and Thin graphite and Fine Pearlite. The average hardness

measured on the workpiece surface of the cast steel SC 46 , CO₂ mold , and the shell mold are 346.61 HV , 212.48 HV , and 220.12 HV respectively. The tensile strengths measured on the workpiece of the cast steel SC 46 , CO₂ mold , and the shell mold are 38.26 kgf/mm², 24.97 kgf/mm², and 23.57 kgf/mm² respectively. The microstructure of the Gray Cast Iron from the Cast steel mold consists of iron carbide (Fe₃ C) around the outer periphery and of type D and E graphite with size of 7.8 ASTM and fine pearlite around the center. The microstructure of the cast iron from the CO₂ mold consists of type B and D graphites with sizes of 5-6 ASTM and fine pearlite around the outer periphery and of types A and B graphites with sizes of 3-5 ASTM around the center. The microstructure of the cast iron from the Shell mold consists of type B and D graphites with size of 4-5 ASTM around the outer periphery and of types A and B graphites with little amount of type C graphite and consists pearlite at the center.

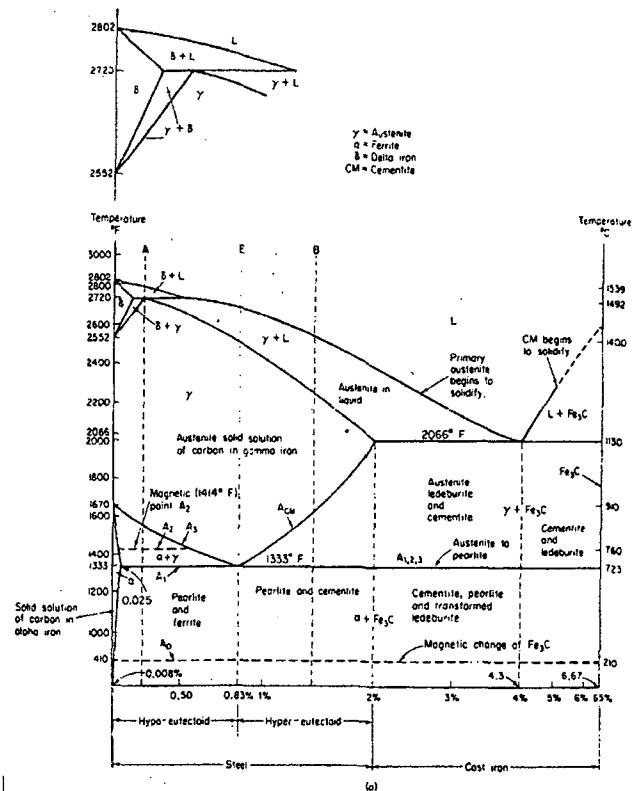
1. บทนำ

โลหะในตระกูลของเหล็กหล่อนั้นมีขอบเขตครอบคลุมอย่างกว้างขวาง และหลากหลายในเรื่องส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติทางกล เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่นิยมใช้กันมากในวงการอุตสาหกรรมยานยนต์ และเครื่องจักรกล ทั้งนี้ก็เนื่องจากมีราคาถูก จุดหลอมเหลวต่ำ ขึ้นรูปได้ง่ายโดยการหล่อ เหล็กหล่อสำหรับงานทางวิศวกรรมทั่วไป (General Purpose) หรือ General Engineering Cast Iron ได้แก่ เหล็กหล่อเทา (Gray cast iron) เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron) เหล็กหล่อขาว (White cast iron) และเหล็กหล่อกรวยไฟด์กลม (Nodular cast iron) ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า (Ductile cast iron) ในชิ้นงานเหล็กหล่อนั้น แม้ว่าจะมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกันทุกประการ มีอุณหภูมิหลอมละลาย และอุณหภูมิการเทที่เท่ากัน ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานเหมือนกัน ก็อาจมีคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกันได้ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในแบบหล่อเป็นสำคัญ การเลือกวัสดุที่จะใช้ทำแบบหล่อจำเป็นต้องพิจารณาถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แท้จริงของเหล็กหล่อนั้น ๆ ในแบบหล่อที่นำมาทดลอง เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบและตัดสินใจเลือกวัสดุที่จะนำมาทำแบบหล่อ

2. เหล็กหล่อสีเทา (Gray cast iron)

เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมและโครงสร้างใกล้เคียงกับเหล็กดิบ (Pig iron) ที่หลอมจากเตาสูง (Blast furnace) ในบางโอกาสอาจจะผลิตเหล็กหล่อสีเทาจากเหล็กดิบโดยตรงโดยปราศจากการปรับปรุงส่วนผสมใด ๆ หรือไม่ก็อาจจะนำเหล็กดิบมาหลอมใหม่ในเตาพินลม (Cupola) หรือเตาไฟฟ้า แล้วปรับปรุงส่วนผสมบ้างเล็กน้อย เพื่อให้เหล็กหล่อดีขึ้น ทำให้เหล็กหล่อสีเทามีราคาถูกเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ นอกจากนี้เหล็กหล่อสีเทายังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมอีกหลายประการ เช่น

1. มีความแข็งแรงไม่สูงสามารถกลึงหรือไส ตบแต่งให้ได้ขนาดตามต้องการได้ง่าย
2. มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ และมีความสามารถในการไหล (Fluidity) ดีสามารถหล่อหลอมให้ได้รูปร่างชนิดซับซ้อนได้ง่าย
3. มีอัตราการขยายตัวน้อย สามารถใช้ทำส่วนประกอบของเครื่องจักรกลที่ต้องการรูปร่างและขนาดที่แน่นอน
4. มีความต้านทานต่อแรงอัด และรับแรงสั่น (Damping Capacity) ได้ดีใช้ทำแท่นรองรับอุปกรณ์เครื่องมืองกลต่าง ๆ ได้ดี
5. สามารถที่จะปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงได้มากขึ้นอยู่กับการปรับปรุงส่วนผสมและการอบชุบ ทำให้ได้งานได้กว้างขวาง



รูปที่ 1 แผนภาพสมดุลเหล็กคาร์บอน (Iron - carbon equilibrium diagram)

ที่เรียกว่าเหล็กหล่อสีเทา ก็เพราะเหล็กหล่อนี้มีเนื้อเมื่อตีหักดูเนื้อเหล็กตรงรอยหักจะมีลักษณะเป็นสีเทาซึ่งต่างกับเหล็กสีขาว ซึ่งความจริงเหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับเหล็กสีขาว ผิดกันตรงที่เหล็กหล่อสีเทาในขณะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะเป็นระบบสแตเบิ้ล (Stable) กล่าวคือปริมาณคาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์ แยกตัวออกมาเป็นแผ่น (Flakes) ซึ่งเรียกว่า กราไฟต์ และกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเหล็ก ทำให้มองดูรอยหักเป็นสีเทา จากแผนภาพ Equilibrium (ภาพที่ 1) เห็นใช้ปลาจะเป็นระบบสแตเบิ้ลระหว่างเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งจุดต่าง ๆ ของแผนภาพที่ปรากฏจะแตกต่างกันไปจากระบบเมตาสแตเบิ้ลเล็กน้อย แต่การศึกษาโครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทาจะไม่อาจศึกษาได้โดยตรงจากแผนภาพเพราะในทางปฏิบัติการเย็นตัวของเหล็กหล่อจะให้ไปตามแผนภาพเป็นไปไดยาก

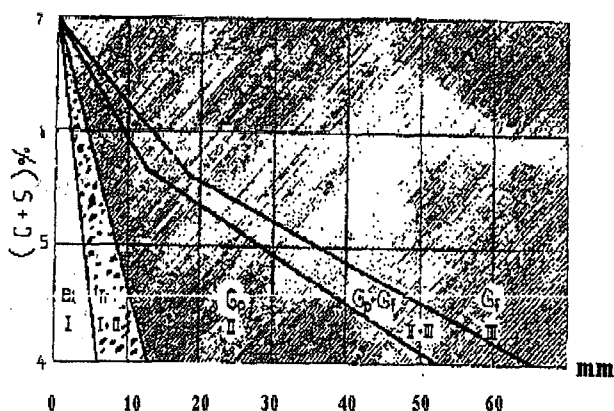
เพราะเหล็กจะต้องเย็นตัวช้ามาก ถึงแม้ว่าเหล็กจะถูกปล่อยให้เย็นตัวในแบบทราย อัตราการเย็นตัวก็ยังช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในสภาวะสมดุล (Equilibrium cooling rate) และอีกประการหนึ่งในเหล็กหล่อสีเทาที่มีธาตุอื่น ๆ นอกเหนือจากคาร์บอนผสมอยู่ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กหล่ออยู่มาก การศึกษาคุณสมบัติของเหล็กหล่อจึงต้องกระทำในลักษณะที่เน้นหนักไปทางด้านปฏิบัติมากกว่าทางทฤษฎี

3. อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อ (Cooling rate)

เราจะเห็นว่า จาก Equilibrium diagram ของเหล็กกับคาร์บอน การเย็นตัวของเหล็กหล่อจะให้การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิยูเทคติก เป็นออสเตนไนต์กับกราไฟต์ ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดได้จะต้องใช้เวลานานมาก เพื่อให้อะตอมของคาร์บอนมีเวลาพอที่จะรวมกลุ่มกันและมีการขยายตัวโดยอิสระ สำหรับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมแอมอนไนต์หนึ่งนั้น ในขณะที่เย็นตัวและให้กำเนิดกราไฟต์ยูเทคติกได้นั้น ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ หลายประการ หรือพูดง่าย ๆ อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อในระบบเหล็ก-คาร์บอน ไม่ใช่เหล็ก-ซีเมนไต์ นั้น ขึ้นอยู่กับ

1. อุณหภูมิของเหล็กหล่อตอนเทลงแบบหล่อ (Pouring temperature)
2. ความร้อนแฝงของเหล็กหล่อ (Latent heat of solidification)
3. สภาพการนำหรือพาความร้อนของตัวแบบหล่อ (Heat conductivity of mold)
4. ขนาดหรือปริมาณของน้ำเหล็กหล่อที่เทลงแบบ (Size of casting)

แฟกเตอร์ทั้งสี่ประการดังกล่าวมาแล้วนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเหล็กหล่อกับความร้อนแฝงของเหล็กหล่อขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเหล็กหล่อโดยตรง แต่ตัวนำความร้อนของแบบหล่อ และขนาดของเหล็กหล่อเป็นแฟกเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างขวางมาก ในการศึกษาเรื่องนี้ผู้ได้พยายามสร้างแผนภาพกราฟที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size of casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand mold)



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size of casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand mold)

แบบแรกใช้แกนตั้ง (Y-axis) แทนส่วนผสมโดยบอกเป็นผลรวมระหว่างเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนกับซิลิกอน (C+Si)% แกนนอน (X-Axis) แทนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นมิลลิเมตรแผนภาพจะแสดงลักษณะของโครงสร้างโดยแบ่งเป็นโซนต่าง ๆ เช่น

โซน I แสดงถึงโครงสร้างเป็นเหล็กหล่อขาว (Ledeburite + pearlite)

โซน I + II แสดงถึงโครงสร้างเป็น เหล็กหล่อ Mottled (Ledeburite + pearlite + graphite)

โซน II + III แสดงถึงโครงสร้างเป็น เหล็กหล่อสีเทาประเภท Ferrite - pearlitic

โซน III แสดงถึงโครงสร้างเป็น เหล็กหล่อสีเทาประเภท Ferritic

4. โครงสร้างและสมบัติชิ้นงานหล่อ

โครงสร้างของชิ้นงานเหล็กหล่อเทา

4.1 โครงสร้างของเหล็กหล่อ

โครงสร้างพื้นฐานของเหล็กหล่อประกอบด้วยกราไฟท์ เฟอไรต์ ซีเมนไท์ และ เพอไลต์ เหล็กหล่อชนิดที่ใช้กันมากที่สุดคือเหล็กหล่อเทา ซึ่งมีกราไฟท์หรือคาร์บอนอิสระกระจายอยู่ในรูปเกล็ด

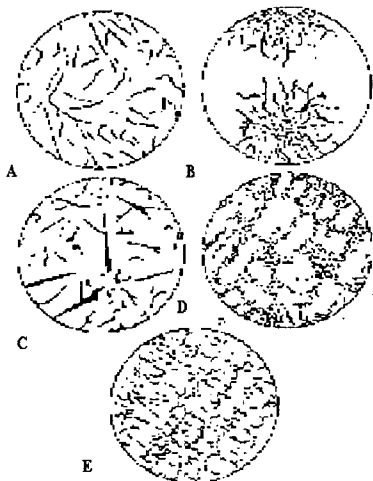
ในบางกรณีก็ใช้เหล็กหล่อกราไฟท์กลมซึ่งมีกราไฟท์ที่มีรูปกลม (Spheroids) แทนที่จะเป็นรูปเกล็ดหรือใช้เหล็กหล่อขาวซึ่งมีคาร์บอนอยู่ในรูปซีเมนไท์ทั้งหมด ไม่มีคาร์บอนอิสระโครงสร้างที่ประกอบด้วยสภาพต่าง ๆ นี้เรียกว่าเมทริกซ์ (Matrix) ทั้งนี้ไม่นับกราไฟท์ว่าเป็นส่วนหนึ่งของเมทริกซ์ และโครงสร้างพื้นฐานของเมทริกซ์ประกอบด้วยเฟอไรต์ ซีเมนไท์ และเพอไลต์ เพอไลต์เป็นโครงสร้างที่มีเฟอไรท์ที่เหนียวและซีเมนไท์ที่แข็งและเปราะเรียงกันเป็นชั้น ๆ ทนต่อการกระแทกได้ดี และทนต่อการสึกหรอได้ดีมาก ดังนั้นจึงเป็นโครงสร้างที่จำเป็นสำหรับเหล็กหล่อชนิดคุณภาพดีพิเศษเฟอไรท์ชนิดที่เกิดในเหล็กหล่อเป็นซิลิโก-เฟอไรท์ (Silico-ferrite) ซึ่งเหนียวแต่ถ้ามีมากนักก็ไม่ได้ เพราะจะทำให้คุณสมบัติบางอย่างเช่นความแข็งแรงในทางดึงตกต่ำลงแต่ในบางกรณีก็อาจต้องการให้มีเฟอไรท์มาก เช่นเมื่อต้องการความเหนียวในเหล็กหลอมลิลีเบลหรือเหล็กหล่อกราไฟท์กลม

ซีเมนไท์จะไม่อยู่ในเมทริกซ์แต่ลำพัง แต่จะแยกมาอยู่เป็นสภาพหนึ่งในเมทริกซ์หรืออยู่รวมในโครงสร้างยูเทคติกกับออสเตไนท์ หรืออยู่ร่วมกับไอเอนฟอสไฟด์ (Iron phosphide) เป็นสเตไต์ (Steadite) ซีเมนไท์แข็งมาก และทำให้ความสามารถในการรับการปอกด้วยเครื่องกลโรงงาน (Machinability) ลดลง ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการเกิดซีเมนไท์ ยกเว้นเมื่อต้องการให้ทนต่อการสึกหรอ

4.2 โครงสร้างของกราไฟท์

กราไฟท์เป็นผลึกที่นุ่มและเปราะของคาร์บอน มีความแข็งบริเนล (Brinell hardness) H_B ประมาณ 1 มีความแข็งแรงในทางดึงประมาณ 2 kg/mm^2 หรือประมาณ 20 MPa และความหนาแน่นประมาณ 2.2 kg/cm^3 สำหรับโครงสร้างของเหล็กหล่อที่ใช้กันมาก 85 % ของคาร์บอนทั้งหมดจะอยู่ในสภาพกราไฟท์ โครงสร้างละเอียดของกราไฟท์ยังแยกออกได้ตามรูปร่างและขนาด เช่น เล็กหรือใหญ่ เกล็ดหรือมีแฉก อยู่โดยรอบ (Asteroidal) เป็นก้อน ๆ หรือกลม (Spheroidal) สภาพของชิ้นกราไฟท์มีผลเป็นอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ตัวอย่างเช่นเหล็กหล่อเทาซึ่งมีคาร์บอนอยู่ 3.6 % และมีซิลิกอนอยู่ 2.1 % มีกราไฟท์ในรูปเกล็ดมีความแข็งแรงทางดึง 1.8 kg/mm^2 หรือประมาณ 180 MPa เทียบกับเหล็กหล่อกราไฟท์กลมที่มีปริมาณคาร์บอนและซิลิกอนเท่ากัน แต่มีกราไฟท์เป็นรูปกลม ปรากฏว่าเหล็กหล่อชนิดหลังนี้มีความแข็งแรงทางดึงถึง $55\text{--}70 \text{ kg/mm}^2$ หรือประมาณ $550\text{--}700 \text{ MPa}$ ความแตกต่างนี้เนื่องมาจากรูปร่างของชิ้นกราไฟท์ต่างกัน กราไฟท์ในรูปเกล็ดทำให้เกิดการเพิ่มความเค้น (stress concentration) ที่ตรงปลายแหลมของเกล็ดถ้ามีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของเกล็ด สำหรับกราไฟท์รูปกลมนั้นจะมีการเพิ่มความเค้นน้อยกว่ามาก

(1) รูปร่างของชิ้นกราไฟท์ในเหล็กหล่อเทา



รูปที่ 3 แสดงรูปร่างต่าง ๆ กัน 5 อย่างของชิ้นกราไฟท์ที่เกิดขึ้นในเหล็กหล่อเทา

ชนิด A: กราไฟท์กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (random orientation)

กราไฟท์ชนิดนี้ปรากฏในเหล็กหล่อชนิดคุณภาพดีพิเศษ โครงสร้างส่วนใหญ่คือเฟอไรต์ และกราไฟท์มีขนาดที่เหมาะสม นอกจากนั้น การที่กราไฟท์มีรูปร่างโค้งทำให้เหล็กหล่อเทามีความแข็งแรงสูง กราไฟท์มีขนาดที่เหมาะสม นอกจากนั้นการที่กราไฟท์มีรูปร่างโค้งทำให้

เหล็กหล่อเทามีความแข็งแรงสูง กราไฟท์จะโค้งได้ก็เพราะออสเตไนท์ที่มีรูปร่างเป็นกิ่งไม้ (dendritic) ที่ตกผลึกก่อนอุณหภูมิยูเทคติก (proeutectic) หรือที่เรียกว่าผลึกไพรมารี กราไฟท์จะถูกดึงไปตามแนวของรูปร่างกิ่งไม้ของออสเตไนท์ ดังนั้นถ้าต้องการให้มีกราไฟท์รูปร่างโค้งให้มากก็จะต้องมีการกระทำให้มีผลึกไพรมารีมาก ๆ น้ำโลหะที่มี % คาร์บอนสูงจะมีกราไฟท์โค้งอยู่น้อยเพราะมีผลึกไพรมารีน้อย เพื่อให้มีผลึกไพรมารีมาก ๆ จะต้องใส่ (inoculate) สารเคมีที่ทำหน้าที่ลดออกซิเจน (deoxidization) และช่วยในการเกิดกราไฟท์ (graphitization) เข้าไปในน้ำโลหะ

ชนิด B: เป็นกลุ่ม ๆ แต่ละกลุ่มมีกราไฟท์เรียงกระจายออกตามแนวรัศมีคล้ายดอกกุหลาบ (rosette grouping) การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (random orientation)

กราไฟท์ชนิดนี้ประกอบด้วยก้อนยูเทคติก (eutectic cells) ซึ่งมีกราไฟท์ชิ้นเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการแปรสภาพแบบยูเทคติก กราไฟท์เล็ก ๆ เลื่อนอยู่ตรงกลาง และกราไฟท์ขนาดใหญ่กว่าอยู่รอบ ๆ เรียงตามแนวรัศมี กราไฟท์ประเภทนี้มักเกิดตรงส่วนบาง ๆ ของชิ้นงานหล่อ ส่วนขนาดเนื้อที่ของกราไฟท์ยูเทคติกนั้นขึ้นกับอัตราส่วนผสมและอัตราการเย็น ในบางกรณีก็ไม่มีกราไฟท์ยูเทคติกเลย มีแต่กราฟไฟท์ที่เกิดตามแนวทางรัศมี

ถ้ามีน้ำโลหะมีออกซิเจนละลายอยู่เกินเกณฑ์ปกติจะมีกราไฟท์ยูเทคติก แต่ถ้าอัตราคาร์บอนสูงหรือมีซิลิกอนอยู่มากจะมีแต่เฟอไรต์อยู่กลางกลุ่มกราไฟท์ กราไฟท์ในลักษณะนี้มักเกิดร่วมกับกราไฟท์ชนิด A ในชิ้นงานหล่อบาง ๆ

ถ้าต้องการให้ชิ้นงานหล่อมีความแข็งแรงทางดึงประมาณ 25–30% หรือประมาณ $250\text{--}300 \text{ MPa}$ จะต้องมีกราไฟท์ชนิด B ที่มีกราไฟท์ยูเทคติกน้อย ๆ ไม่เกิน 20–30 %

กราไฟท์ชนิด B นี้จะมีอยู่หนาแน่นในเหล็กหล่อที่มี % คาร์บอนสูง เพราะมีการตกผลึกของกราไฟท์มาก ดังนั้นจะทำให้ชิ้นงานหล่ออ่อนแอ บางครั้งจะขาดครึ่งตอนขณะกระทำด้วยเครื่องกลโรงงาน และถ้าดูตรงที่ขาดจะเห็นเป็นรู ๆ เล็ก ๆ เหมือนเจาะด้วยเข็ม ถ้ายังมีเฟอไรต์อยู่ตรงกลางแทนที่จะมีกราไฟท์ยูเทคติกด้วยแล้วจะยิ่งหักง่าย

ชนิด C: เกล็ดกราไฟท์เกิดทับกัน (superimposed flakes) การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (random orientation)

โครงสร้างชนิดนี้เกิดขึ้นสำหรับเหล็กหล่อที่มี % คาร์บอนมากกว่า % คาร์บอนของเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมยูเทคติก (เกิน 4.25 %C) (hyper-eutectic) คาร์บอนที่มีอยู่จะอยู่ในสภาพกราไฟท์เสียมาก จนกระทั่งที่เหลือจะเป็นเฟอไรต์เป็นส่วนมาก มีซิเมนไทต์น้อย กราไฟท์ชนิด C นี้จะมีผลึกกราไฟท์ไพรมารีที่ยาวและกว้าง และมีเกล็ดที่เกิดที่อุณหภูมิยูเทคติกมาทับหรือล้อมรอบกรอบกราไฟท์ไพรมารี โครงสร้างประเภทนี้เมื่อยังมีเฟอไรต์อยู่มากด้วยจะอ่อนแอมากใช้ประโยชน์อะไรไม่ได้

**ชนิด D: เกิดการไฟท์เกิดระหว่างออสเตรไนท์ไพรมารีรูบกิ่ง
ไม้ (Interdendritic segregation) การเรียงตัวไม่เป็น
ระเบียบ (Random orientation)**

สำหรับโครงสร้างแบบนี้ กราไฟท์ชั้นเล็กที่ตกผลึกที่อุณหภูมิเยือก
คืดจะเกิดขึ้นระหว่างออสเตรไนท์ไพรมารีรูบกิ่งไม้ ปรากฏการณ์นี้เกิด
ขึ้นเมื่อมีสถานการณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดแข็งแต่น้ำโลหะยังไม่แข็งตัว
(Super-cooling) เมื่ออุณหภูมิอยู่แถบอุณหภูมิเยือกคืด เรือนไขอันหนึ่ง
ที่จะทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้นคือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำโลหะและ
ออกซิเจน (Oxidation) ถ้าใส่สารเคมีเข้าไปในน้ำโลหะเพื่อช่วยในการ
เกิดกราฟไฟท์ (Graphitizing inoculation) จะช่วยเฉลี่ยเสียมิให้เกิดการ
แข็งตัวซ้ำได้บ้างแต่ช่วยไม่มากถ้าน้ำโลหะมีออกซิเจนอยู่มากขนาดเกิด
ปฏิกิริยาได้ง่าย กราไฟท์ชนิด D บางครั้งก็เกิดตรงกลางของชิ้นงานหล่อหนา ๆ ที่แข็งตัว
ที่หลังส่วนอื่น โครงสร้างชนิดนี้มักมีเฟสไรท์เป็นพื้นทำให้อ่อนแอ

**ชนิด E: เกิดการไฟท์เกิดระหว่างออสเตรไนท์ไพรมารีรูบกิ่ง
ไม้ (Interdendritic segregation) การเรียงตัวมีระบบ
อยู่บ้าง (Preferred orientation)**

กราฟไฟท์ชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่อ % คาร์บอนค่อนข้างต่ำ จะเกิดการลด
ความแข็งแรงเพราะชิ้นกราฟไฟท์อยู่ติด ๆ กัน เช่นเดียวกับชนิด D แต่
บางครั้งความแข็งแรงก็สูงเพราะ % คาร์บอนต่ำจึงมีกราฟไฟท์น้อย

5. การทำแบบหล่อ

5.1 วิธีการทำ Mold เหล็กเหนียว (SC 46)

นำเหล็ก SC 46 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. ยาว 215 มม.
ผ่าเป็น 2 ซีกแล้วกัดด้วยเครื่องกัดให้ได้ขนาดโตในเท่ากับขนาดของชิ้น
Test piece พร้อมกับทำสลักยึด 2 ด้านเพื่อประกอบ จากนั้นจึงนำไปถลุง
เร็วด้านนอกให้ได้เท่ากับขนาดของ Shell mold และ CO₂ mold ตาม
Drawing

5.2 วิธีการทำแบบหล่อเปลือก (Shell molds)

วิธีการทำแบบหล่อเปลือกมีดังนี้

ทำการกระสวนโลหะให้ร้อนแล้วโปรยทรายซิลิกาผสมตัวประสานฟีน
ลิกเรซินลงบนกระสวน จะเกิดเป็นแบบหล่อเปลือกที่บางและแข็งเนื่อง
จากคุณสมบัติแข็งตัวเพราะความร้อน (thermo-setting) ของเรซิน
เสร็จแล้วเทน้ำโลหะเข้าแบบหล่อเพื่อทำชิ้นงานหล่อ วิธีนี้เรียกว่าโครนิง
(Croning) หรือวิธี C (C-process) ด้วย

กระบวนการทำแบบหล่อเปลือก

1. ใส่กระสวนทำด้วยเหล็กหล่อหรืออลูมิเนียมซึ่งติดอยู่กับแผ่นโลหะ
เข้าในเตาอบ (ชนิดใช้ไฟฟ้าหรือแก๊ส) เพื่อทำให้ร้อนถึง 200-250 °C ไว้
ก่อนแล้วพ่นสารละลายซิลิโคน (silicone) ลงบนกระสวนเพื่อให้เกาะ
แบบหล่อออกได้ง่าย

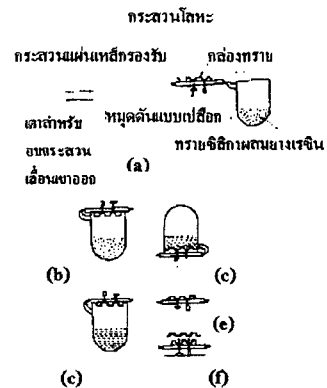
2. ประกอบแผ่นโลหะพร้อมกระสวนเข้ากับถังเท (dump box) แล้ว
ปิดถังโดยใช้แผ่นโลหะนั้นเป็นฝา

3. จับถังเทกลับหัว ทรายจะลงไปกองบนกระสวนเนื่องจากผลของ
การแข็งตัวเข้ารูป (thermosetting) ของเรซินที่ผสมอยู่กับทราย จะเกิด
เป็นเปลือกบาง ๆ อยู่บนกระสวน

4. ทิ้งกระสวนไว้ในตำแหน่งเดิมเป็นเวลาสอง - สามหรืออาจถึง
หลายวินาทีแล้วจึงพลิกกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิม ทรายที่ไม่เกาะตัวกัน
เป็นเปลือกแข็งจะตกลงเข้าไปในหีบเท ส่วนเปลือกหนา 5-7 mm จะ
ติดอยู่กับกระสวน

5. พลิกแผ่นกระสวนกลับอีกครั้งหนึ่งแล้วนำเข้าในเตาอบเพื่ออบ
เปลือกนี้ที่ 200-300 °C เปลือกทั้งอันจะแข็งในเวลา 2-3 นาที 200 °C

6. นำแผ่นกระสวนออกจากเตาอบและถอดเปลือกออกจาก แผ่น
กระสวนโดยใช้หมุดดันแบบเปลือก (Stipping pint) ซึ่งติดอยู่กับ
กระสวนโลหะ เมื่อถึงขั้นนี้ครั้งหนึ่งของแบบหล่อเปลือกก็จะเสร็จเรียบ
ร้อยแบบหล่ออีกครั้งหนึ่งก็ทำเหมือนกัน แล้วนำมายึดกันด้วยปากจับ
หรือใช้เรซินเป็นตัวประสาน เสร็จแล้วเทน้ำโลหะลงไปแบบ



รูปที่ 4 แสดงกระบวนการทำแบบหล่อเปลือกโดยใช้เครื่องทำแบบ
หล่อเปลือกที่ใช้หีบเท (dump box)

5.3 วิธีการทำแบบหล่อโดยใช้ CO₂

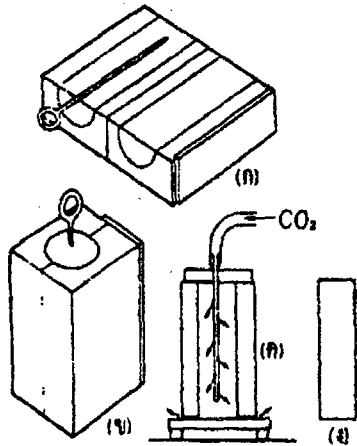
เติมโซเดียมซิลิเกต (Water glass) ประมาณ 3-7 % เข้าไปกับ
ทรายซิลิกาแล้วผสมกันอย่างดี แล้วให้ทรายผสมนี้ทำแบบหล่อ โดยใช้
มือหรือใช้เครื่อง แก๊ส CO₂ จะถูกปล่อยให้ผ่านแบบหล่อ โดยมีความ
ดัน 1.0 -1.5 kg/cm² (ประมาณ 0.1-0.15 Pal) แบบหล่อก็จะแข็งตัว
โดยเร็ววิธีการทำแบบหล่อเช่นนี้เรียกว่าวิธี CO₂วิธีนี้ใช้ทำใส่แบบได้
ด้วยทรายแก้วสำหรับวิธี CO₂

ผสมน้ำแก้ว (Water glass) 3-6 % ลงไปกับทรายซิลิกาที่มีดิน
เหนียวน้อยที่สุด แล้วผสมกันให้ดีโดยใช้เครื่องมือทราย เม็ดทรายที่
เหมาะกับวิธีนี้จะต้องมีรูปร่างกลม น้ำแก้วควรมีจำนวนโมล (mole) ของ
SiO₂ ต่อจำนวนโมลของ Na₂O เกิน 2.5 ควรมีปริมาณความชื้นอิสระ
(free moisture content) ต่ำกว่า 50 % และควรมีความหนืดต่ำ

เวลาที่ใช้ในการผสมควรต่ำกว่า 5 นาที จะต้องใส่ของผสม
(mixture) ไว้ในภาชนะปิดไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศ

แบบหล่อหรือใส่แบบหล่อ ที่ทำด้วยทรายผสมน้ำแก้วจะ
สลายรูปยาก และทำให้แกะแบบยากดังนั้นจึงใส่ผงถ่านโค้กหรือผงยาง
มะตอย (pitch powder) และขี้เลื่อย (wooden powder) ลงไปด้วย ผง

เหล่านี้จะไหม้และทำให้แบบหล่อสลายรูปได้ง่ายขึ้น นอกจากนั้นผงยังแทรกไม่ให้น้ำแทรกเข้าไปในระหว่างเม็ดทรายทำให้ผิวงานหล่อเรียบใสผ่องงามจะตอย 0.5-2% และซีล้อย 0.5-1.5 %



รูปที่ 5 แสดงการทำเบ้า CO₂

การใช้หน้าแก้วและซีตะกรัน

ทรายผสมด้วยตัวเติมเช่นซีตะกรัน (slag) หรือซีเมนต์จะแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องและจะมีความแข็งแรงพอสำหรับแบบหล่อเพราะซีตะกรันหรือซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นตัวให้แข็ง

ทรายผสมชนิดนี้ค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับชนิดอื่น และสลายรูปง่ายกว่าทรายที่แข็งโดยวิธี CO₂ ประเด็นที่ควรสังเกตเกี่ยวกับทรายผสมชนิดนี้มีดังนี้

1. แบบหล่อจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเทน้ำโลหะเลยทันทีจะเกิดรูพรุนที่ผิวเพราะยังมีความชื้นเหลืออยู่มากควรรอ 24 ชั่วโมงหลังการทำแบบหล่อเสร็จก่อนเทน้ำโลหะเข้าแบบ
2. ควรดึงกระสวนออกจากแบบหล่อนในระยะเวลา 40-60 นาทีหลังจากทำแบบหล่อเสร็จและในระยะเวลา 90-120 นาทีสำหรับแบบหล่อล่าง จะต้องหาผิวกระสวนด้วยตัวทำให้จาก (parting agent) อย่างเพียงพอเพื่อไม่ให้ผิวกระสวนเบื้อน
3. หากผิวแบบหล่อด้วยผงกราฟไฟท์หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน ถ้าไม่ทาจะทำให้แกะแบบหล่อยากและผิวงานหล่อจะไม่เรียบ

การใช้หน้าแก้วและผงโลหะ

ทรายที่ผสมหน้าแก้วและผงโลหะ เช่น Si หรือ Al จะแข็งตัวด้วยปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดความร้อน (exothermic reaction) ปฏิกิริยานี้จะรุนแรงและจะดึงน้ำไปใช้ทำไฮโดรเจนดังนั้นจะได้แบบหล่อที่แข็งแรงและไม่มีความชื้น

กระบวนการประเภทที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือวิธีที่ใช้ผงเฟอโรซิลิกอนแทนผงซิลิกอนกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการ N

ประเด็นที่ควรสังเกตเกี่ยวกับการทำแบบหล่อชนิดนี้มีดังนี้

1. จะต้องให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเสียแต่เนิ่น ๆ ก่อนเทน้ำโลหะ ถ้าเทน้ำโลหะเข้าแบบโดยไม่รอนานพอจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนเพราะแบบหล่อได้รับความร้อนและอาจทำให้เกิดระเบิด
2. อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของบรรยากาศ ดังนั้นในการกำหนดส่วนผสมและเวลาที่ใช้ในการผสมจะต้องคำนึงถึงสภาพบรรยากาศ

6. ส่วนผสมของงานที่เกี่ยวข้อง

ส่วนผสม

ส่วนผสมน้ำเหล็กหล่อสีเทา (FC 25) ที่ใช้ในการหล่อ (อุณหภูมิน้ำเหล็ก 1390 °C)

C=3.46% Si = 2.21% Mn=0.639% P=0.043%
S=0.0646% Cu=0.07% Cr=0.08% Ni=0.01%

ส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ที่นำมาทำแบบหล่อเหล็ก(SC 46)

C=0.20% Si = 0.95% Mn=0.63% P=0.019%
S=0.005% Cu=0.04% Cr=0.001% Ni=0.001%
Mo=0.01% Al=0.020% Sn=0.002% V=0.001%
Pi=0.006%

HB = 156 Brinell

ส่วนผสมของแบบหล่อทราย CO₂ (CO₂ mold)

การผสมทรายซิลิกา CO₂ (เหล็ก ST,SC,FC,FCD) เวลาผสมทราย 3 นาที

ทรายซิลิกา 150 ± 10 กก.
แป้งมัน 1.5 ± 0.2 กก.
น้ำแก้ว 7 ± 0.5 กก.
น้ำอ้อย 0.3 ± 0.1 กก.
น้ำ 1 ± 0.5 กก.

ส่วนผสมของแบบหล่อเรซิน (Sheet mold)

SIRCON SAND 150 กก.
HARTER 35 กก.
THERMOSET 1.5 กก.
KONSERVEN 2 กก. ต่อ 1 โม

7.อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาหลอมชนิดเหนียวนำความถี่สูง
2. เครื่อง View recorder และเทอร์โมมิเตอร์แบบเปิด Type K
3. เครื่อง Spectrometer
4. เครื่องตัดตัวอย่าง
5. เครื่องทดสอบแรงดึง
6. เครื่องขัดตัวอย่างโครงสร้าง

7. กล้องจุลทรรศน์แบบ Optical
8. เครื่องวัดความแข็งแบบ Micro Vicker hardness
9. กล้องจุลทรรศน์แบบ Scanning electron
10. Steel Mold , shell Mold , CO₂ Mold

8. อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

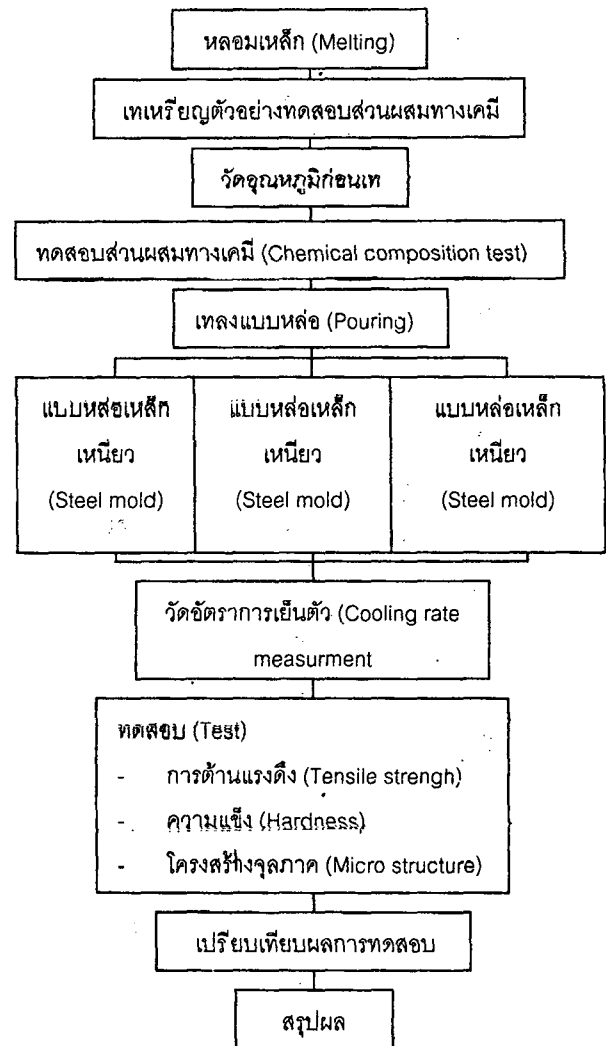
อุปกรณ์การวัดที่สำคัญสำหรับการใช้ในการทดลอง มีดังต่อไปนี้

1. เครื่อง View recorder สำหรับวัดอุณหภูมิและเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะอยู่ในแบบหล่อแต่ละชนิด
2. เทอร์โมคัปเปิล Type K ต่อเข้ากับเครื่อง viewrecorder มีช่วงการวัดอยู่ที่ -200°C ถึง 1590°C
3. กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งมีกล้องถ่ายรูปประกอบติดอยู่เพื่อถ่ายรูปโครงสร้างชิ้นส่วนทดสอบกำลังขยายสูงสุด 1000 เท่า
4. เครื่องวัดความแข็งแบบ Micro Vicker กำลังขยายของกล้องส่องรยอกด 100 เท่า และ 400 เท่า ของระบบการอ่านค่าดิจิทัล
5. เครื่องวัดส่วนผสมทางเคมีของโลหะ (Spectrometer)
6. กล้องจุลทรรศน์แบบ Scanning electron กำลังขยายสูงสุด 200,000 เท่า

9. ขั้นตอนในการทดลอง

1. เตรียมอุปกรณ์ และส่วนประกอบต่าง ๆ โดยนำสายเทอร์โมคัปเปิลติดตั้งบนแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 1 จุด
2. เตรียมเครื่องวัดอุณหภูมิพร้อมทั้งตั้งค่าต่าง ๆ ให้ถูกต้อง
3. เติมน้ำหล่อให้ร้อนประมาณ 50°C เพื่อไล่ความชื้นของแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด
4. หลอมเหล็ก FC 25 ในการทดลองโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) อุณหภูมิประมาณ 1400°C
5. ถ่ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมลงสู่เบ้าเท วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้า
6. ตักน้ำเหล็กด้วยถ้วยเทจากเบ้าลงใน Mold ทองแดงเพื่อใช้เป็นเหรียญตัวอย่างทดสอบส่วนผสมทางเคมี
7. ตักน้ำเหล็กด้วยถ้วยเท เทลงใน Mold ทั้ง 3 ชนิด ในเวลาติดต่อกัน
8. ปลดปล่อยให้เหล็กแข็งตัวจน Mold ทั้ง 3 ชนิด เย็นลงใกล้กับอุณหภูมิห้อง
9. ทับ Mold เพื่อนำไปทดสอบ

ในการศึกษาอิทธิพลของแบบหล่อที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา (FC 25) ได้ทำการเลือกวัสดุที่นำมาทำแบบหล่อ 3 ชนิดโดยมีขั้นตอนการทดลองและทดสอบตามรูปที่ 5



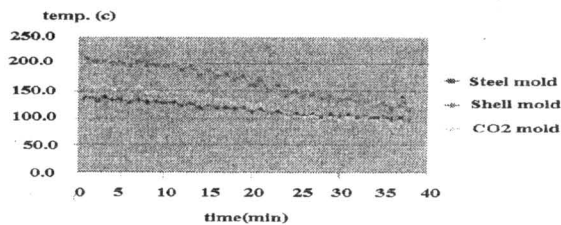
รูปที่ 6 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทดลองและทดสอบ

10. ผลการทดลอง

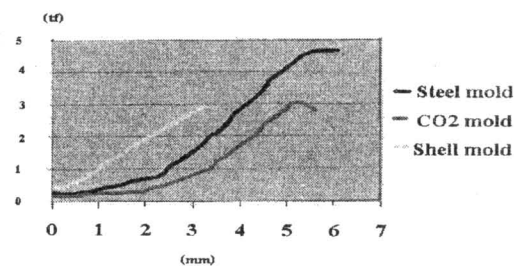
1. การวัดอุณหภูมิเมื่อเทน้ำลงในแบบหล่อ เครื่องวัดอุณหภูมิจะทำการวัดและเก็บค่าอุณหภูมิและเวลาทุก ๆ 60 วินาที
2. การวัดความแข็ง
 - นำชิ้นทดสอบที่ยืนยันแล้วลงไปตัดตามแนวหน้าตัด (Cross Section) ยาว 20 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม.
 - ชิ้นผิวหน้าตัดเรียบที่ระดับทราย # 40 , #220 , #400 , #600 และขัดมันด้วยผ้าสักหลาด
 - วัดความแข็งด้วยเครื่อง Micro Vicker จากผิวหน้าตัดเข้าไปถึงศูนย์กลางและจากศูนย์กลางถึงผิวด้านนอก 9 จุด แต่ละจุดห่างกันประมาณ 2 มม.
3. การถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
 - นำชิ้นทดสอบชิ้นเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบความแข็งของ Mold ทั้ง 3 ชนิด มาตรวจสอบโครงสร้างในบริเวณจุดวัดความแข็งทั้ง 9 จุด

- ถ่ายภาพโครงสร้างในตำแหน่งที่ 2 ม.ม., 4 ม.ม., 6 ม.ม., 8 ม.ม., 10 ม.ม. ตามลำดับในสภาพก่อนกัดกรดเพื่อดูขนาดและชนิดของ Graphite
- นำชิ้นทดสอบไปกัดกรดด้วยกรด Nitric 2 % ในแอลกอฮอล์ เพื่อดูโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ในตำแหน่งที่ 2 ม.ม., 4 ม.ม., 6 ม.ม., 8 ม.ม., 10 ม.ม.

4. การทดสอบการต้านแรงดึง นำชิ้นทดสอบไปกลึงขึ้นรูปตามมาตรฐาน JIS-Z-2201(1989)No.8 Type of Test piece 8B



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ Mold 3 ชนิด



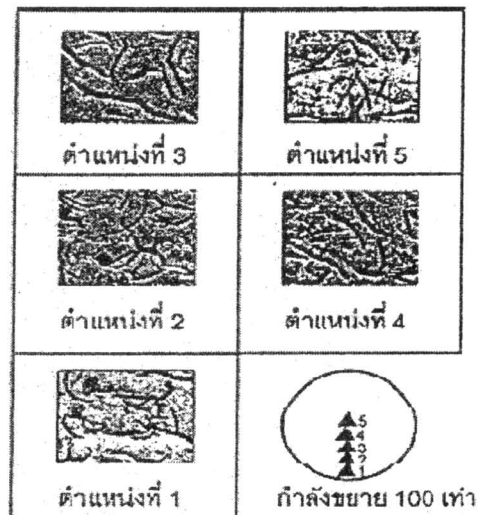
รูปที่ 8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดึงของชิ้น Test piece ทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 1 ความแข็งตามแนวรัศมีของชิ้นทดสอบซึ่งใช้แบบหล่อต่างกัน (แต่ละจุดห่างกัน 2 m.m.)

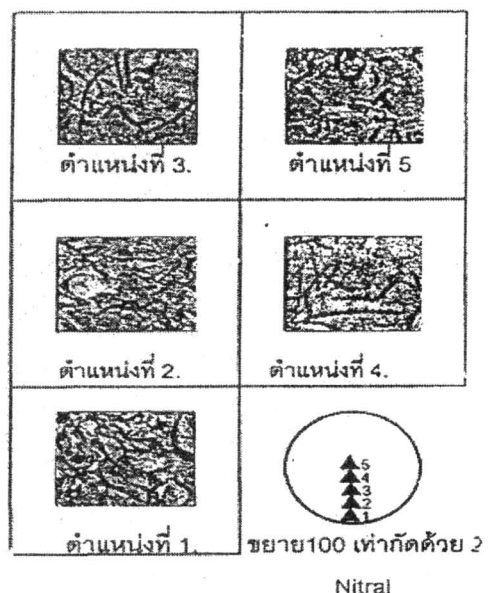
ตำแหน่งที่	ความแข็ง (HV)		
	Steel mold	Shell mold	CO ₂ mold
1	413.63	217.01	226.40
2	381.42	214.54	220.80
3	332.49	209.84	217.63
4	318.93	206.41	213.90
5	308.52	204.42	208.39
6	312.73	208.96	219.43
7	322.84	215.15	216.95
8	339.69	216.08	222.84
9	389.25	219.93	234.78
ค่าเฉลี่ย	346.61	212.48	220.12

ตารางที่ 2 ความแข็งตามแนวรัศมีของชิ้นทดสอบซึ่งใช้แบบหล่อทั้ง 3 ชนิด (แต่ละจุดห่างกัน 3.6 m.m.)

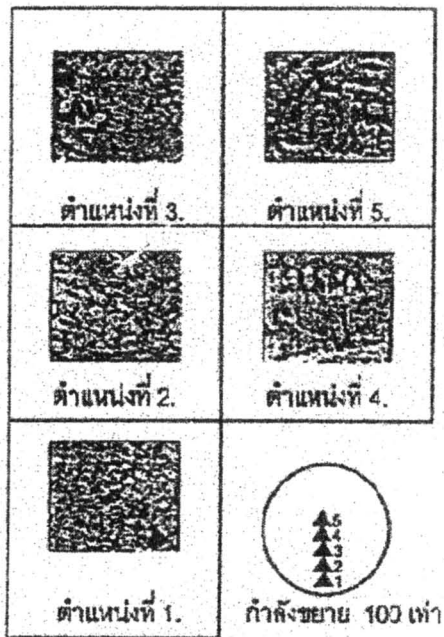
ตำแหน่งที่	ความแข็ง (HV)		
	Steel mold	Shell mold	CO ₂ mold
1	471.00	222.00	230.00
2	471.00	222.00	238.00
3	458.00	230.00	238.00
4	458.00	230.00	238.00
5	458.00	238.00	238.00
ค่าเฉลี่ย	463.20	228.40	236.40



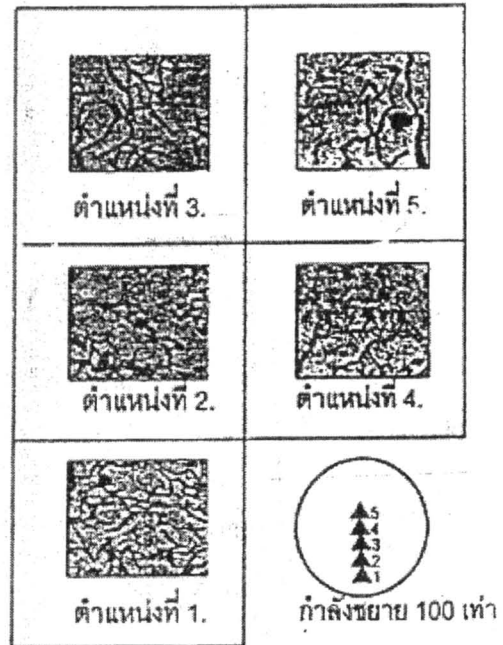
รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างของเหล็กก่อนกัดกรดที่ตำแหน่ง ต่าง ๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น CO₂



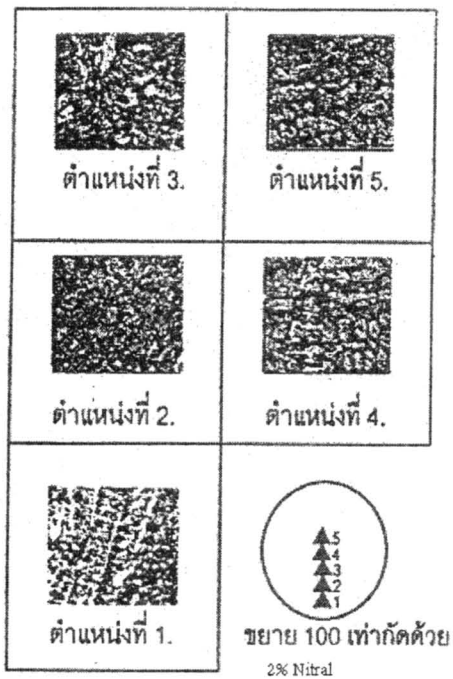
รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างของเหล็กหลังกัดกรดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น CO₂



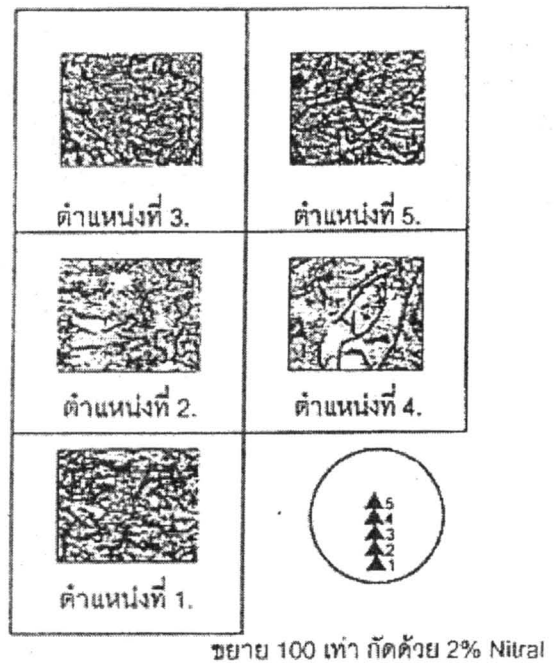
รูปที่ 11 แสดงโครงสร้างของเหล็กก่อนกัดกรดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้ เป็น Steel



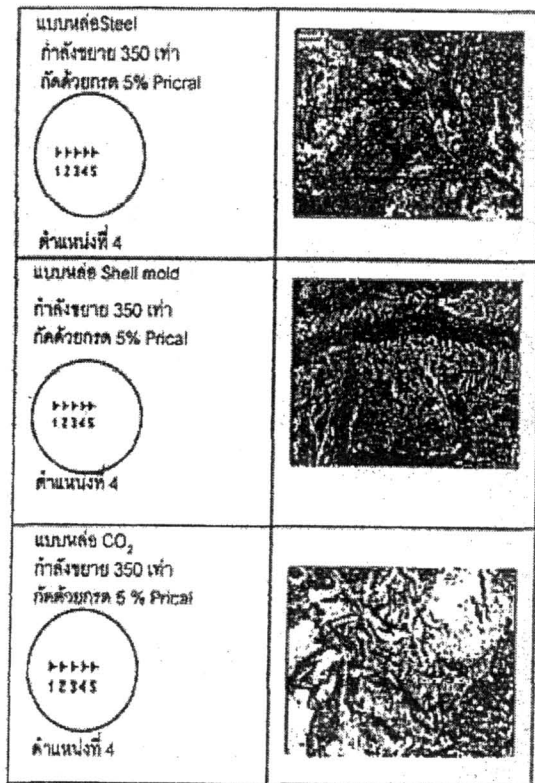
รูปที่ 13 แสดงโครงสร้างของเหล็กก่อนกัดกรดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น Shell



รูปที่ 12 แสดงโครงสร้างของเหล็กหลังกัดกรดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น Steel



รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างของเหล็กหลังกัดกรดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น Shell



รูปที่ 15 แสดงภาพการวัดความหยาบละเอียดของเพอร์ไลต์

11. สรุป

1. การแข็งตัวและการถ่ายเทความร้อนของน้ำโลหะในแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด

ผลการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด จะได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเหล็กหล่อที่ใช้เหล็กเหนียว (Steel mold) ถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด รองลงมาคือแบบหล่อที่ใช้ทราย (CO_2 mold) และแบบหล่อที่ใช้เรซิน (Shell mold) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ในการเย็นตัวของชิ้นงานจะเกิดการนำความร้อนเข้าสู่แบบหล่อ โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทออกสู่ผนังแบบหล่อ บริเวณใกล้กับผนังแบบหล่อจะมีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว การแข็งตัวของโลหะจะเริ่มจากบริเวณที่อยู่ใกล้กับผนังแบบหล่อเข้าสู่จุดศูนย์กลางของชิ้นงาน ซึ่งอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันนี้ มีผลทำให้เกิดความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาค ความแข็งและความต้านแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทา ทั้งนี้เกิดจากการกระจายตัวของส่วนผสมที่ไม่เท่ากันในระหว่างการเย็นตัวตามแผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับคาร์บอนของเหล็กหล่อสีเทาที่มีคาร์บอน 3.46% อุณหภูมิหลอมเหลว 1390°C การกระจายตัวของส่วนผสมนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ไม่เท่ากันของแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด

2. ความแข็ง โครงสร้างจุลภาคตามแนวรัศมี และความต้านทานแรงดึง

จากการทดลองค่าความแข็งที่วัดได้ตามแนวรัศมีของชิ้นทดสอบที่ได้จากแบบหล่อเหล็กเหนียว นั้นมีความแตกต่างกันกล่าวคือ บริเวณขอบนอกของชิ้นงานจะมีความแข็งมากที่สุด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมี

การถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้โครงสร้างของกราฟไฟท์ที่เล็กและสั้น ลักษณะการเกิดของกราฟไฟท์มีทิศทางที่แน่นอน ได้ชนิดของกราฟไฟท์ชนิด D และ E ซึ่งการเกิดกราฟไฟท์ชนิดนี้จะให้ความแข็งที่สูงแต่จะขาดคุณสมบัติทางความเหนียว (Ductility) และได้เกรนของเพอร์ไลต์ละเอียดมาก เมื่อพิจารณาบริเวณที่วัดค่าพบว่าความแข็งลดลงเรื่อย ๆ จนถึงบริเวณกลางชิ้นทดสอบ ขนาดของเส้นกราฟไฟท์ก็จะยาวและใหญ่ขึ้นได้ ชนิดกราฟไฟท์ชนิด A และ B ชิ้นทดสอบที่ได้จากเหล็กเหนียว (Steel mold) บริเวณผิวของชิ้นงานจะเกิดโครงสร้างคาร์ไบด์ (Fe_3C) เพอร์ไลต์ที่ละเอียดมาก รวมทั้งกราฟไฟท์ที่เล็กและสั้นชนิด D และ E สลักจากผิวตามแนวรัศมีประมาณ 5 มิลลิเมตร ทำให้บริเวณนี้มีความแข็งสูงมาก และจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงด้วย ค่าความแข็งและความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ได้จากแบบหล่อทราย CO_2 (CO_2 mold) จะมีค่าสูงรองลงมา โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีกราฟไฟท์ที่ยาวและใหญ่มากกว่าของแบบหล่อเหล็กเหนียว ชนิดของกราฟไฟท์ที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบเป็นชนิด A และ B เกรนของเพอร์ไลต์จะมีความหยาบกว่าแบบหล่อเหล็กเหนียว ค่าความแข็งและความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบจากแบบหล่อเรซิน (Shell mold) จะมีค่าต่ำที่สุดทั้งนี้เนื่องจากแบบหล่อชนิดนี้มีการถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุด โครงสร้างทางจุลภาคที่เกิดขึ้นมีกราฟไฟท์ชนิด A, B และ C เล็กน้อย ในบริเวณกลางชิ้นงานเกรนของเพอร์ไลต์จะหยาบที่สุด

จากการศึกษาในการทดลองนี้พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนค่าความแข็งความต้านทานแรงดึง และโครงสร้างจุลภาค มีความสัมพันธ์กันคือ แบบหล่อที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงมีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็ง ความต้านทานแรงดึงสูง และโครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีเพอร์ไลต์ที่ละเอียด เส้นกราฟไฟท์เล็กและสั้น การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ มีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็ง ความต้านทานแรงดึงต่ำ และมีโครงสร้างจุลภาคที่ได้กราฟไฟท์ใหญ่และยาวได้เพอร์ไลต์ที่หยาบ

หนังสืออ้างอิง

- [1] กันต์วีรชัย พลุปรายชัย . วัสดุวิศวกรรม . กรุงเทพมหานคร , มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ , 2540 .
- [2] จงกล รัตสุข . โลหะวิทยาเบื้องต้นและวัสดุวิศวกรรม . กรุงเทพฯ , โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ , 2537 .
- [3] ชานูวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช ฐิติเกียรติพงศ์ . วัสดุในงานวิศวกรรม . กรุงเทพมหานคร , บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2521 .
- [4] บัญชา ธนบุญสมบัติ , John T.H.Pearce . เทคโนโลยีวิทยาของเหล็กหล่อผสม . กรุงเทพมหานคร . ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) , 2542 .
- [5] มนัส สติรจินดา . เหล็กหล่อ . กรุงเทพมหานคร , วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ , พิมพ์ครั้งที่ 3 , 2536 .
- [6] แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา . วัสดุวิศวกรรม . กรุงเทพฯ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร , 2536 .
- [7] หริส สุตะบุตร และ เคนยิ จิยิวิธา . เหล็กหล่อ . กรุงเทพฯ , สมาคมส่งเสริมความรู้ ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ , 2540 .