การตรวจสอบจุลโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อจากผู้ผลิตในจังหวัดอุบลราชธานี

Testing of Microstructure and Mechanical Property in Cast Iron from Indnstry in Ubon Ratchathani

โดย

เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์

จินตนา เหล่าไพบูลย์

ฉวีวรรณ ชัยวัฒนา

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงบประมาณแผ่นดิน

ปีงบประมาณ ๒๕๔๑

กิติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติ และสำนักงบประมาณที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัย การตรวจสอบจุลโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อจากผู้ผลิตในจังหวัดอุบลราชธานี ในปีงบประมาณ 2541

ขอขอบคุณ คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณสมหวัง บรรเทา ที่อำนวยความสะดวกและส่งตัวอย่างในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุที่ผสมอยู่ในเหล็กหล่อ

ขอขอบคุณ คุณสุภาพร บุตตารวม ที่ได้จัดพิมพ์รายงานการวิจัยฉบับนี้ และขอขอบคุณโรงหล่อนิรันดร์ ถนนอุบล - ตระการพืชผล ตำบลขามใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ที่ได้กรุณาให้เก็บตัวอย่างเหล็กหล่อ และให้ข้อมูลต่าง ๆ ตลอดจนอำนวยความสะดวกแก่คณะผู้วิจัยในครั้งนี้ด้วย

คณะผู้วิจัย

28 เมษายน 2542

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่ หน้า

รูปที่ หน้า

สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่ หน้า

สารบัญ

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบจุลโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อจากผู้ผลิตในจังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งสมบัติทางกลที่ทดสอบได้แก่ การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง นอกจากนี้มีการหาปริมาณของธาตุที่สำคัญที่ผสมของในเหล็กหล่อ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะใช้กำหนดประเภทของเหล็กหล่อที่ผลิตได้จากโรงงาน และนำไปปรับปรุงเหล็กหล่อให้มีคุณภาพได้มาตรฐานอุตสาหกรรม ตลอดจนการนำเหล็กหล่อที่ผลิตได้ไปใช้งานให้เหมาะสม

จากการตรวจสอบจุลโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อปรากฏว่าเป็นเหล็กหล่อสีเทา มีเกรดกราไฟต์ 5 ประเภท คือ A, B, C, D, และ E ปนกันอยู่ และมีโครงสร้างประกอบด้วย เกรดกราไฟต์ มีโครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ , เฟอร์ไรท์อิสระและเหล็กฟอสไฟด์ มีธาตุที่ผสมอยู่ดังนี้ 4.20 % C , 3.3. % Si , 0.305 % Mn , 0.155 % P , และ 0.70 % S มีแรงดึงสูงสุด 73850 N , ความต้านทานแรงดึงสูงสุด 237 N/mm^2 การยืดตัว 0.40 - 1.20 % ค่าพลังงานในการรับแรงกระแทกเป็น 2 จูลความแข็งบริเนลล์อยู่ในช่วง 212 HB - 276 HB

ABSTRACT

The aim of this project is to testing of microstructure and mechanical property in cast iron from industry in Ubon Ratchathani province. The mechaical properties are tensile test , impact test , hardness test and element composition in cast iron. This data use for improve the properties of cast iron and apply this materials.

It could be concluded from this experiment that the cast iron had the standard of gray cast iron. It had graphite flank type A, B, C, D and E, lamellar pearlite, free ferrite and steadite. The tensile strength was given by 237 N/mm^2 , maximum tensile was 73850 N, elongation was 0.40 - 1.20 % . The energy for impact was given by 2 Joules and the hardness was given by 212 HB - 276 HB.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เหล็กหล่อเป็นโลหะผสมมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ คือ เหล็ก คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ซึ่งธาตุเหล่านี้มีผลต่อสมบัติทางกลและจุลโครงสร้างของเหล็กหล่อ เหล็กหล่อที่ใช้ในอุตสาหกรรม มีหลายชนิดแต่ละชนิดเหมาะสมกับการนำไปใช้งานแตกต่างกันไป ถ้ามีการนำเหล็กหล่อไปใช้งานไม่เหมาะสมกับชนิดของเนื้อเหล็กที่ผลิตขึ้นแล้ว คุณภาพของชิ้นงานก็จะไม่ได้มาตรฐาน และอาจเกิดความเสียหายต่อชิ้นงานนั้นได้ ดังนั้นการวิจัยนี้ เพื่อการตรวจสอบและเป็นข้อมูลพื้นฐานของเหล็กหล่อที่ผลิตได้ในจังหวัดอุบลราชธานี และนำเหล็กหล่อที่ผลิตได้ไปใช้งานให้เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

1.2.1 การตรวจสอบจุลโครงสร้างของเหล็กหล่อจากผู้ผลิตในจังหวัดอุบลราชธานี

1.2.2 หาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในเหล็กหล่อ

1.2.3 ทดสอบสมบัติทางกล เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก และความแข็งตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

1.3 สถานที่ทำการวิจัย

1.3.1 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1.3.2 โรงหล่อนิรันดร์ 128 ถนนอุบล - ตระการพืชผล ตำบลขามใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

1.3.3 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย 196 พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร

1.3.4 ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงเหล็กหล่อให้มีคุณภาพได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

1.4.2 การนำเหล็กหล่อไปใช้งานให้เหมาะสมกับชนิดของเหล็กที่ผลิตขึ้น

1.4.3 นำข้อมูลที่ได้มาเสริมแนวทางในการเรียนการสอนสาขาวัสดุศาสตร์ ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1.5 <u>วิธีดำเนินการวิจัย</u>

1.5.1 ค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

1.5.2 ศึกษากรรมวิธีการผลิตเหล็กหล่อของโรงงาน วัตถุดิบที่ใช้ ประเภทของเตาหลอม และการเติมสารต่าง ๆ ลงในเตาหลอม

1.5.3 เก็บตัวอย่างเหล็กหล่อจากโรงงาน

1.5.4 เตรียมชิ้นตัวอย่างที่จะทดสอบด้านต่าง ๆ ให้ได้ขนาดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

1.5.5 ตรวจสอบจุลโครงสร้างของเหล็กหล่อและจำแนกประเภทของเหล็กหล่อ

1.5.6 หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในเหล็กหล่อ

1.5.7 ทดสอบสมบัติทางกล เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อแรงกระแทก และความแข็งตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

1.5.8 วิเคราะห์ข้อมูล สรุป และรายงานผลการวิจัย

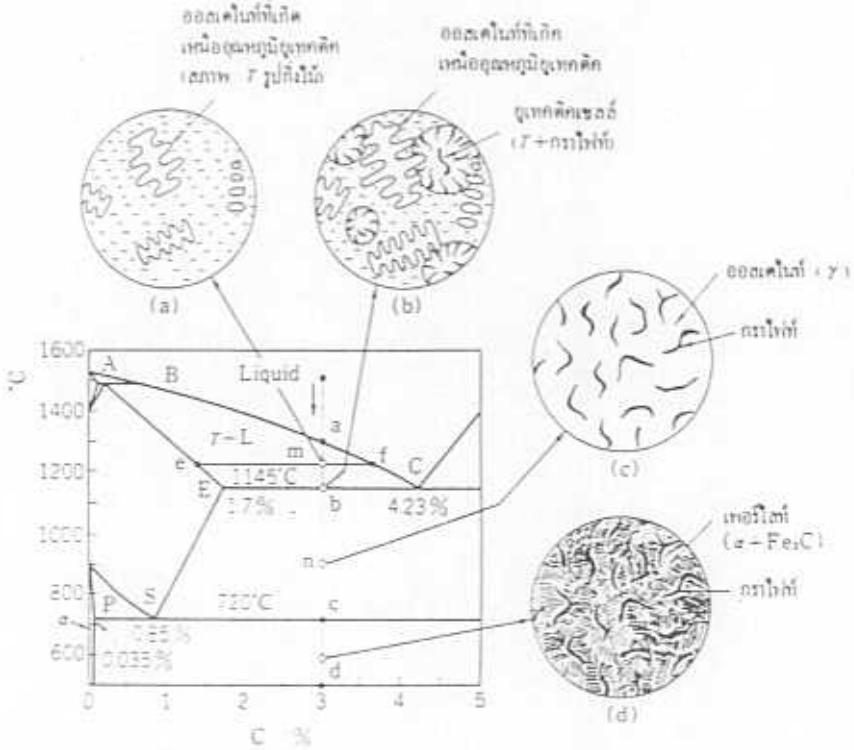
บทที่ 2

เหล็กหล่อ (Cast Iron)

เหล็กหล่อ หมายถึง เหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมมากกว่า 2.06 % และเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากราคาไม่แพง เหล็กหล่อส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงต่ำ และขาดคุณสมบัติด้านความเหนียว นอกจากนั้นยังมีจุดหลอมเหลวต่ำ ไม่สามารถขึ้นรูปร้อนหรือเย็นได้ การขึ้นรูปสามารถทำโดยการหล่อรูปทรงเบื้องต้นและใช้กรรมวิธีทางกลมาทำต่อจนสำเร็จ และสามารถเติมธาตุบางอย่างผสมลงไปในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กหล่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

2.1 ลำดับการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของเหล็กหล่อจากของเหลวจนเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง

โครงสร้างของเหล็กหล่อที่เกิดขึ้นมีผลมาจากอัตราส่วนผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน โดยพิจารณารูปที่ 2.1 ที่มีคาร์บอน 3 %



รูปที่ 2.1 แผนภูมิการสมดุลย์ระหว่างเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ (จาก หล่อโลหะ , หริส สูตะบุตรและเคนยิ จิยิอิวา ,KINMEI PRINTING CO.,LTD., 2517)

พิจารณาเหล็กหล่อที่มีคาร์บอน 3% การแข็งตัวเริ่มจากจุด a และสิ้นสุดที่จุด b ในช่วงนี้อุณหภูมิจะไม่คงที่ในขณะที่เกิดการแข็งตัว การแข็งตัวของเหล็กเมื่อถึงจุด m จะมีโครงสร้างดังรูป (a) ซึ่งมีผลึกรูปกิ่งไม้ (Dendritic Crystals) รวมอยู่กับของเหลวเป็นสารละลายของแข็ง γ (แกมมา) ซึ่งมีสภาวะแทนได้ด้วยจุด c สารละลายของแข็งนี้เรียกว่า ออสเตไนท์ (Austenite) เนื่องจากลักษณะรูปกิ่งไม้เกิดขึ้นก่อนผลึกชนิดอื่น จึงเรียกว่าผลึกไพรมารี (Primary Crystals)

ที่จุด c แสดงเปอร์เซนต์ของคาร์บอนของออสเตไนท์ และจุด f แสดงเปอร์เซนต์ของคาร์บอนของของเหลว เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงจุด b จุด e จะแสดงเปอร์เซนต์ของคาร์บอนของออสเตไนท์ และจุด c แสดงเปอร์เซนต์ของคาร์บอนของของเหลว เมื่ออุณหภูมิลงต่ำกว่าจุด b ของที่เหลืออยู่จะเริ่มแข็งตัว เม็ดผลึกที่เกิดจากการแข็งตัวของของเหลวที่เหลือจะเป็นกราไฟต์ ชิ้นเล็ก ๆ ปนกับออสเตไนท์
ดังรูป (b) ซึ่งเรียกว่าผลึกยูเทคติค และจะขยายใหญ่ขึ้นจนกระทั่งสัมผัสกับเม็ดยูเทคติคที่อยู่ข้าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการแข็งตัวในระหว่างการแข็งตัวอุณหภูมิจะคงที่ ประมาณ 1145 °C รูป (c) เป็นโครงสร้าง
ออสเตไนท์ที่มีกราไฟต์กระจายอยู่ทั่วไป

ที่อุณหภูมิต่ำว่า 720 °C หลังจากที่โลหะได้กลายเป็นของแข็งทั้งหมดสารละลายของแข็ง γ จะแตกออกเป็นสองสภาพคือ สารละลายของแข็ง α และ Fe_3C (Iron Carbide) สารละลายของแข็ง α ที่เกิดจากการแปรสภาพนี้เรียกว่า เฟอไรท์ (Ferrite) และ Fe_3C เรียกกว่า ซีเมนไทท์ (Cementite) ทั้งสองอย่างนี้เกิดเป็นชั้นสลับกันทำให้มีลักษณะเป็นลาย โครงสร้างที่เป็นลายนี้เรียกว่าเพอไลท์ (Pearlite) ถ้าอัตราการเย็นตัวต่ำมาก ๆ สารละลายของแข็งจะแปรสภาพเป็นสารละลายของแข็ง α และกราไฟต์

ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องเหล็กหล่อสีเทาจะมีโครงสร้างเป็นเพอไลท์และมีกราไฟต์กระจายอยู่ทั่วไป หรืออาจจะเป็นเฟอร์ไรท์กับกราไฟต์ หรืออาจเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลาง ๆ ระหว่างทั้งสองอย่าง ค่าความแข็งของโครงสร้างแบบต่าง ๆ (โดยประมาณ) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแข็งของโครงสร้างแบบต่าง ๆ (โดยประมาณ)

ประเภทของโครงสร้าง	ความแข็งบริเนลล์(HB)
Ferrite & Pearlite	165
Pearlite & Ferrite	200
Pearlite	215
Fine pearlite	240

(จาก Materials Science and Metallurgy , Herman W. Pollack , Prentice - Hall Internation Editions, P 165)

2.2 ชนิดของเหล็กหล่อ

เหล็กหล่อสามารถจำแนกโดยพิจารณาตามลักษณะการรวมตัวของคาร์บอนได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

2.2.1 เหล็กหล่อสีขาว (White Cast Iron)

2.2.2 เหล็กหล่อสีเทา (Gray Cast Iron)

2.2.3 เหล็กหล่อเหนียว (Ductile and Malleable Cast Iron)

2.2.4 เหล็กหล่อผสม หรือ เหล็กหล่อพิเศษ (Alloys or Special Cast Iron)

2.3 เหล็กหล่อสีเทา

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเหล็กหล่อสีเทา เหล็กหล่อชนิดนี้มีส่วนผสมของคาร์บอนระหว่าง 2.5 ถึง 4 % ซึ่งคาร์บอนแยกตัวออกเป็นกราไฟต์แทรกอยู่ในเนื้อเหล็กขณะที่เย็นตัวลงจากสภาพหลอมเหลวจนกระทั่งแข็งตัว ในเหล็กหล่อสีเทานี้มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ คือ คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ซึ่งธาตุเหล่านี้จะมีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กหล่อ ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กหล่อชนิดนี้ประกอบด้วย กราไฟต์ ซีเมนไตต์ และเฟอร์ไรท์ โดยกราไฟต์จะอยู่ในรูปคาร์บอนอิสระกระจายอยู่ เรียกว่า เกร็ดกราไฟต์ (Graphite Flank) เนื่องจากมีโครงสร้างที่ล้อมรอบผลึกของกราไฟต์ที่แตกต่างกัน จึงทำให้คุณสมบัติความต้านทานแรงดึงแตกต่างกันออกไป ซึ่งใช้พิจารณากำหนดเกรดต่าง ๆ ของเหล็กหล่อ รูปร่างของกราไฟต์ที่ปรากฏในเหล็กหล่อสีเทาสามารถจำแนกออกได้ 5 ประเภท ดังรูปที่ 2.3.1 คือ

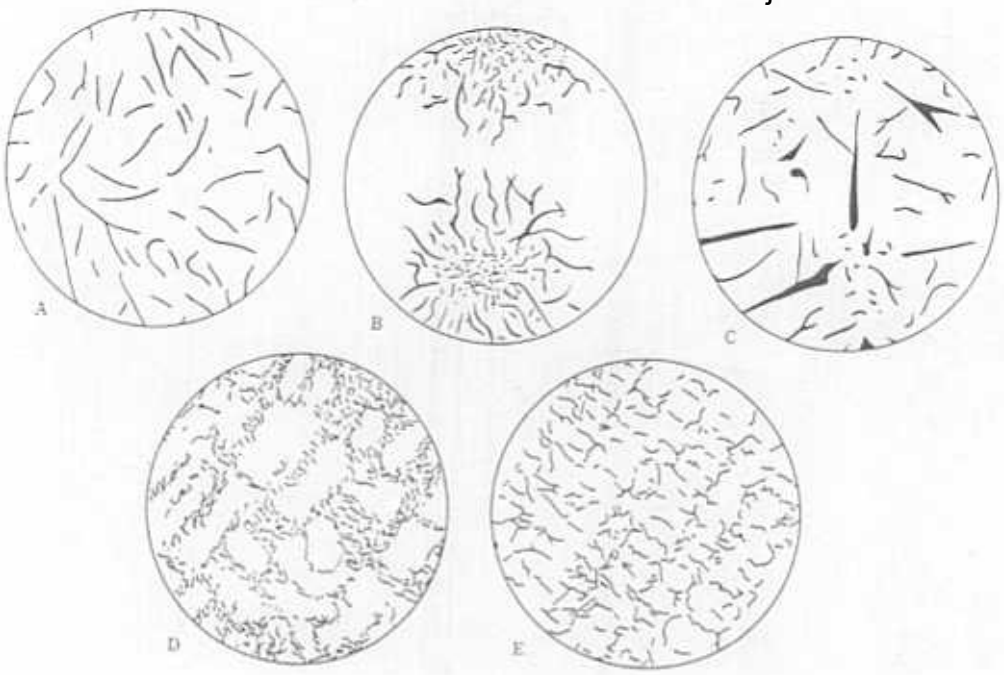
2.3.1 <u>ประเภทA</u> จะกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ และเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Random Orientation) โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเพิร์ลไลท์และกราไฟต์มีขนาดเล็ก ลักษณะของกราไฟต์ที่ได้จะเป็นเส้น แต่ความจริงแล้วจะเป็นแผ่นมีลักษณะโค้งไปมาทำให้มีความแข็งแรงสูง ลักษณะโค้งของกราไฟต์เนื่องจากออสเตไนท์ที่มีรูปร่างเป็นกิ่งไม้ (Dendritic) ตกผนึกก่อนอุณหภูมิยูเทคติค หรือเรียกว่าผลึกไพรมารี

2.3.2 <u>ประเภท B</u> ลักษณะของกราไฟต์มีขนาดเล็กเช่นเดียวกับประเภท A แต่จะอยู่เป็นกลุ่มมีกราไฟต์เรียงกระจายออกตามแนวรัศมีคล้ายดอกกุหลาบ (Rosette Grouping) และเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ กราไฟต์ประเภทนี้ประกอบด้วยก้อนยูเทคติค (Eutectic Cells) โดยกราไฟต์ขนาดเล็กจะอยู่ตรงกลางขณะเกิดการแปรสภาพแบบยูเทคติค และกราไฟต์ขนาดใหญ่จะอยู่รอบตามแนวรัศมี กราไฟต์ประเภทนี้จะเกิดตรงบริเวณใจกลางของชิ้นงานหล่อที่บางหรือเหล็กหล่อที่ทำให้ผิวเย็นเร็ว (Chilled Cast Iron) ขนาดของ
กราไฟต์ยูเทคติคนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมและอัตราการเย็นในบางกรณีจะไม่พบกราไฟต์ยูเทคติค จะมีแต่เฉพาะกราไฟต์ที่เกิดตามแนวรัศมี

2.3.3 <u>ประเภท C</u> ลักษณะของกราไฟต์มีทั้งขนาดใหญ่ (Primary or Kish Graphite) และขนาดเล็ก (Eutectic) เกิดสลับกัน การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ โครงสร้างประเภทนี้เกิดในเหล็กหล่อที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนและซิลิกอนสูง คือค่า Carbon Equivalent มากกว่า 4.3 % เป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมไฮเปอร์ยูเทคติค อัตราการเย็นตัวอยู่ในเกณฑ์ช้าทำให้มีความต้านทานแรงดึงต่ำ

2.3.4 <u>ประเภท D</u> ลักษณะของกราไฟต์จะเป็นเกร็ดเล็ก ๆ เช่นเดียวกับกราไฟต์ยูเทคติค แต่จะเกิดอยู่ตามขอบเกรน การเรียงตัวจะไม่เป็นระเบียบ โครงสร้างประเภทนี้จะพบในเหล็กที่มีอัตราการเย็นตัวสูงและเกิดกับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมเป็นไฮเปอร์ยูเทคติค คือมีค่า Carbon Equivalent ต่ำ ถ้าปล่อยให้เหล็กเย็นช้าจะไม่เกิดกราไฟต์ประเภทนี้

2.3.5 <u>ประเภท E</u> จะมีลักษณะเช่นเดียวกับประเภท D แต่จะแยกต่างกันที่ประเภท E การเรียงตัวของกราไฟต์มีระบบอยู่บ้าง (Preferred Orientation) ทั้งประเภท D และ E ถ้าเกิดขึ้นในเหล็กหล่อจะทำให้เหล็กเปราะและแตกหักได้ง่าย



รูปที่ 2.3.1 ลักษณะการกระจายตัวของกราไฟต์แบบต่าง ๆ ในเหล็กหล่อสีเทา (จาก หล่อโลหะ , หริส สูตะบุตร และเคนชิ จิชิอิวา , KINMEI PRINTING CO.,LTD.,2517)

2.4 <u>คุณสมบัติของเหล็กหล่อสีเทา</u>

2.4.1 <u>คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อสีเทา</u>

1. ความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทาขึ้นอยู่กับโครงสร้างหลักและรูปร่างของกราไฟต์ รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค.
2. การยืดตัวก่อนขาดของเหล็กหล่อสีเทาประมาณ 0.3 - 1.2 %
3. ความแข็งตัวของเหล็กหล่อสีเทามีค่า 130 - 270 HB
4. ความต้านทานแรงอัด จะมีค่าเท่ากับ 3 - 5 เท่าของความต้านทานแรงดึง
5. ความต้านทานต่อแรงกระแทกของเหล็กหล่อสีเทาค่อนข้างต่ำ ถ้ามีปริมาณคาร์บอน ซิลิกอน และฟอสฟอรัสสูง ก็จะทำให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำ

2.4.2 <u>คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเหล็กหล่อสีเทา</u>

1. ความถ่วงจำเพาะที่อุณหภูมิห้องประมาณ 7.1 - 7.3 ในสภาพน้ำเหล็กประมาณ 6.75 - 6.95
2. สัมประสิทธิการขยายตัวทางความร้อน อยู่ระหว่าง 11×10^{-6} ถึง 14×10^{-6} / °C
3. ในปริมาณกราไฟต์ที่เท่ากันกราไฟต์หยาบจะนำไฟฟ้าได้ต่ำกว่ากราไฟต์ละเอียด
4. ความสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากมากไปน้อย คือ ซีเมนไตต์ เพอไลท์ และเฟอร์ไรท์ ตามลำดับ

5. ส่วนผสมต่าง ๆ ในเหล็กหล่อสีเทา มีดังนี้

คาร์บอน ในรูปของกราไฟต์	3 - 3.5 %
ซิลิกอน มีอยู่ประมาณ	1 - 2.75 %
แมงกานิส มีอยู่ประมาณ	0.4 - 1 %
ฟอสฟอรัส มีประมาณ	0.15 - 1 %
ซัลเฟอร์ มีประมาณ	0.02 - 0.15 %

<u>หมายเหตุ</u> : คุณสมบัติของเหล็กหล่อสีเทา ตามมาตรฐานต่าง ๆ มีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ค.

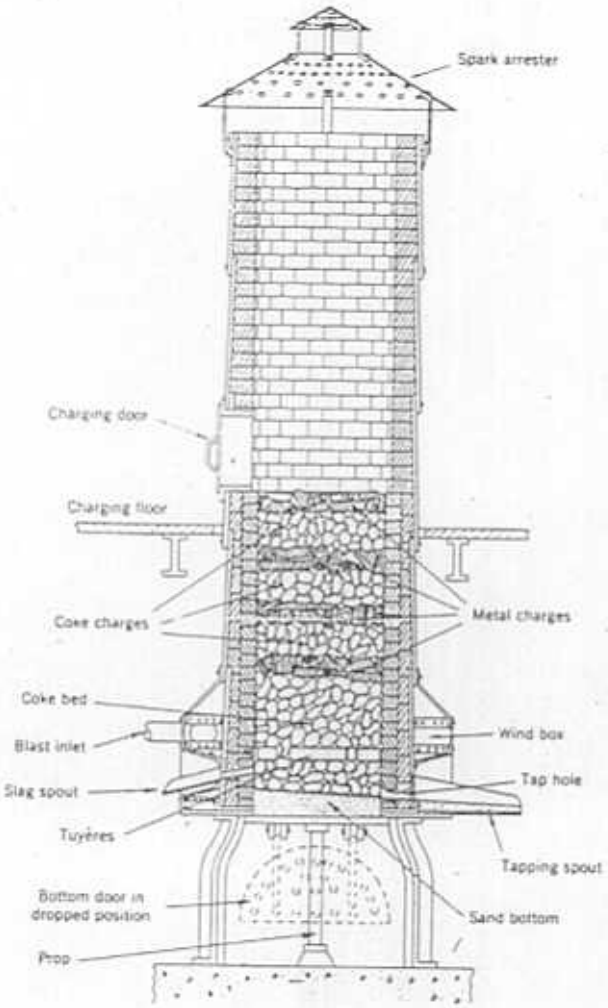
2.5 <u>การหลอมเหล็กหล่อ</u>

2.5.1 <u>เตาคิวโปลา (Cupola)</u>

คิวโปลาเป็นเตาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการหล่อ ลักษณะของเตาประกอบด้วยปลอกเหล็กเหนียวรูปทรงกระบอกวางในแนวตั้ง ภายในกรุด้วยอิฐทนไฟโดยรอบ เมื่อใส่วัตถุดิบลงไปทางช่องบรรจุ (Charging Door) แล้วเป่าลมเข้าไปเพื่อช่วยในการลุกไหม้ทางรูลม (Tuyeres) ทำให้โลหะหลอมละลาย น้ำเหล็กและขี้ตระกรัน (Slag) จะไหลออกจากเตาทางรูเจาะ (Tap Hole) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ขนาดของเตาโดยทั่วไปมีความสูงตั้งแต่ 12 - 24 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.6 - 3.0 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.4 - 2.5 เมตร ปริมาณของเหล็กหล่อที่หลอมได้ประมาณ 1 - 35 ตัน/ชั่วโมง

2.5.2 <u>วัตถุดิบที่ใช้ในการหล่อโดยคิวโปลา</u>

1. เหล็กพิก (Pig Iron)
2. เศษเหล็กเหนียว (Steel Scrap)
3. เศษเหล็กหล่อที่ใช้แล้ว (Return Scrap)
4. หินปูน (Limestone) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ (Flux)
5. ถ่านโค้ก



รูปที่ 2.5 รูปร่างของคิวโปลา

(จาก , วัสดุช่าง ,ดอกธูป พุทธมงคล และคณะ , พิทักษ์อักษร , กรุงเทพ ฯ 2534)

2.5.3 การทำงานของคิวโปลา

เมื่อเริ่มติดเตาครั้งแรกจะใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงก่อไว้ที่ก้นเตาแล้วจึงเติมถ่านโค้กลงไป ในขั้นตอนนี้ รูลม รูเจาะน้ำเหล็ก รูเจาะขี้ตระกรัน จะเปิดอยู่ ถ้าถ่านโค้กอยู่สูงเกินไปจะทำให้น้ำเหล็กไหลออกช้าและน้ำเหล็กจะมีซัลเฟอร์มาก ถ้าถ่านโค้กอยู่ต่ำเกินไปจะทำให้สูญเสียซิลิกอนและแมงกานิส จากน้ำเหล็กมากเกินไป เมื่อเติมถ่านโค้กจนได้ปริมาณพอเหมาะแล้วจึงเป่าลมเข้าเตา จากนั้นจึงเติมวัตถุดิบต่าง ๆ ลงไปจนเต็มถึงระดับช่องเติมวัตถุดิบแล้วจึงปิดรูเจาะน้ำเหล็ก รูเจาะขี้ตะกรัน แล้วเพิ่มลมเป่าเข้าเตาจนเหล็กหลอมละลาย หลังจากนั้นน้ำเหล็กก็ไหลลงสู่ส่วนล่างของเตา จำนวนวัตถุดิบในเตาลดลงจึงต้องมีการเติมวัตถุดิบลงไปอย่างต่อเนื่องในเตาให้ถึงระดับช่องเติมวัตถุ ตรวจดูปริมาณน้ำเหล็กจากช่องมอง

ข้างเตา เมื่อได้น้ำเหล็กพอประมาณ ให้เจาะเอาขี้ตะกรันออกก่อน จึงเจาะเอาน้ำเหล็กออกโดยนำเบ้ามารองเพื่อนำน้ำเหล็กที่ได้ไปเทลงในแบบต่อไป

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ใช้สำหรับวัดขนาดของชิ้นตัวอย่างที่หล่อจากแบบทราย ตามมาตรฐานที่กำหนดก่อนนำไปตรวจสอบจุลโครงสร้างและสมบัติทางกลต่อไป

3.1.2 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.1.1

3.1.3 เครื่องทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 3.1.2

3.1.4 เครื่องทดสอบแรงกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 3.1.3

3.1.5 เครื่องทดสอบความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.1.4

3.1.6 เครื่องเตรียมและตรวจสอบจุลโครงสร้างของเหล็กหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.1.5 และ 3.1.6

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 รวบรวมข้อมูลและศึกษาประเภทของเตาที่ใช้หล่อ ตลอดจนวัตถุดิบที่ใช้สำหรับโรงหล่อในจังหวัดอุบลราชธานี

3.2.2 เก็บตัวอย่างเหล็กหล่อโดยนำน้ำเหล็กเทลงในแบบหล่อทรายที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน มอก. 536 - 2527 เหล็กหล่อสีเทา เป็นชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ± 1.5 มิลลิเมตร มีความยาวไม่น้อยกว่า 230 มิลลิเมตร ลักษณะการเทน้ำเหล็กและแบบหล่อทราย ดังแสดงในรูปที่ 3.2.1 และ 3.2.2 เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงและนำชิ้นตัวอย่างออกจากแบบ จะได้ชิ้นตัวอย่างที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.2.3

3.2.3 วัดขนาดของชิ้นตัวอย่าง เพื่อให้ได้ขนาดตามมาตรฐานที่กำหนดในข้อ 3.2.2

3.2.4 วิเคราะห์ชนิดของเหล็กหล่อตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

3.2.5 หาปริมาณของธาตุในเหล็กหล่อด้วย Spark Optical Emission Spectrometer ดังแสดงในรูปที่ 3.2.4

3.2.6 เตรียมชิ้นตัวอย่างด้วยเครื่องกลึง เพื่อทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน มอก. 244 เล่ม ที่ 4 ถึง 7 - 2525 ดังแสดงในรูปที่ 3.2.5 แล้วนำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบความต้านทานแรงดึงโดยเครื่องทดสอบแรงดึง

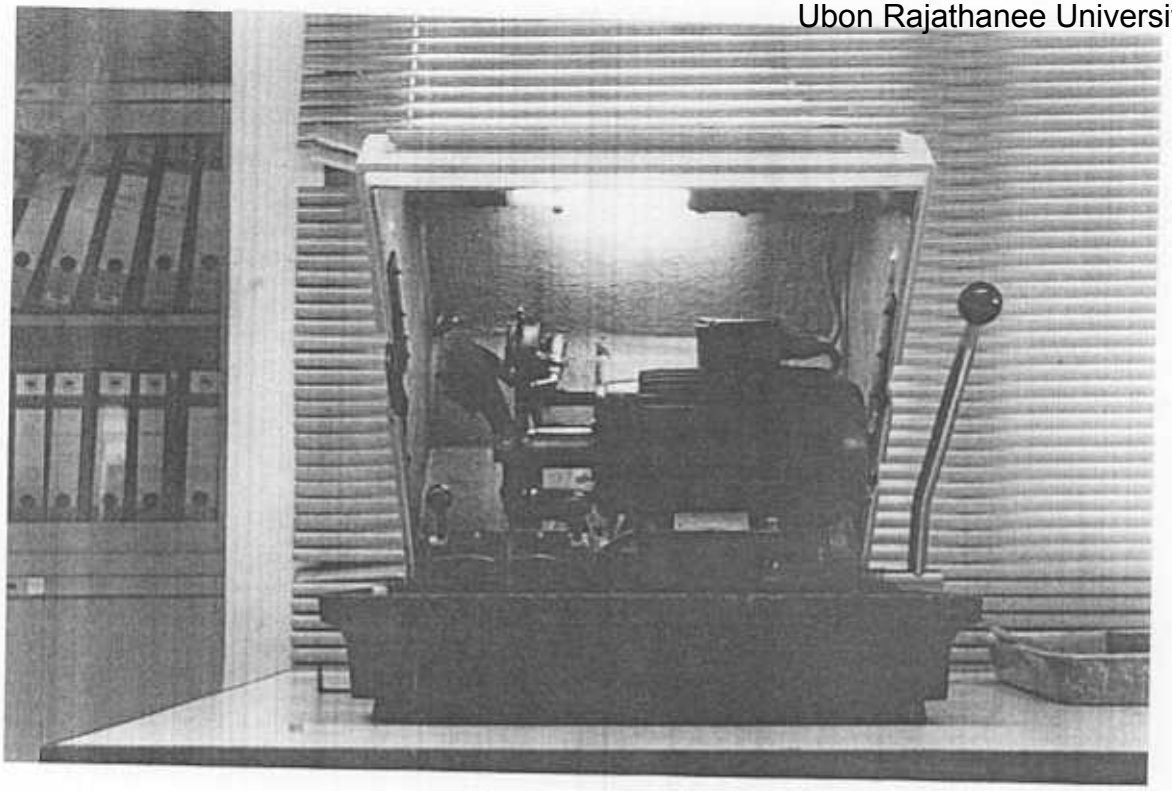
3.2.7 เตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงกระแทก ตามมาตรฐาน มอก. 244 เล่ม 8 - 2522 ดังแสดงในรูปที่ 3.2.6 แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบ

3.2.8 เตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน มอก. 244 เล่ม 1 ถึง 3 - 2520 ดังแสดงในรูปที่ 3.2.7 แล้วนำชิ้นตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบ

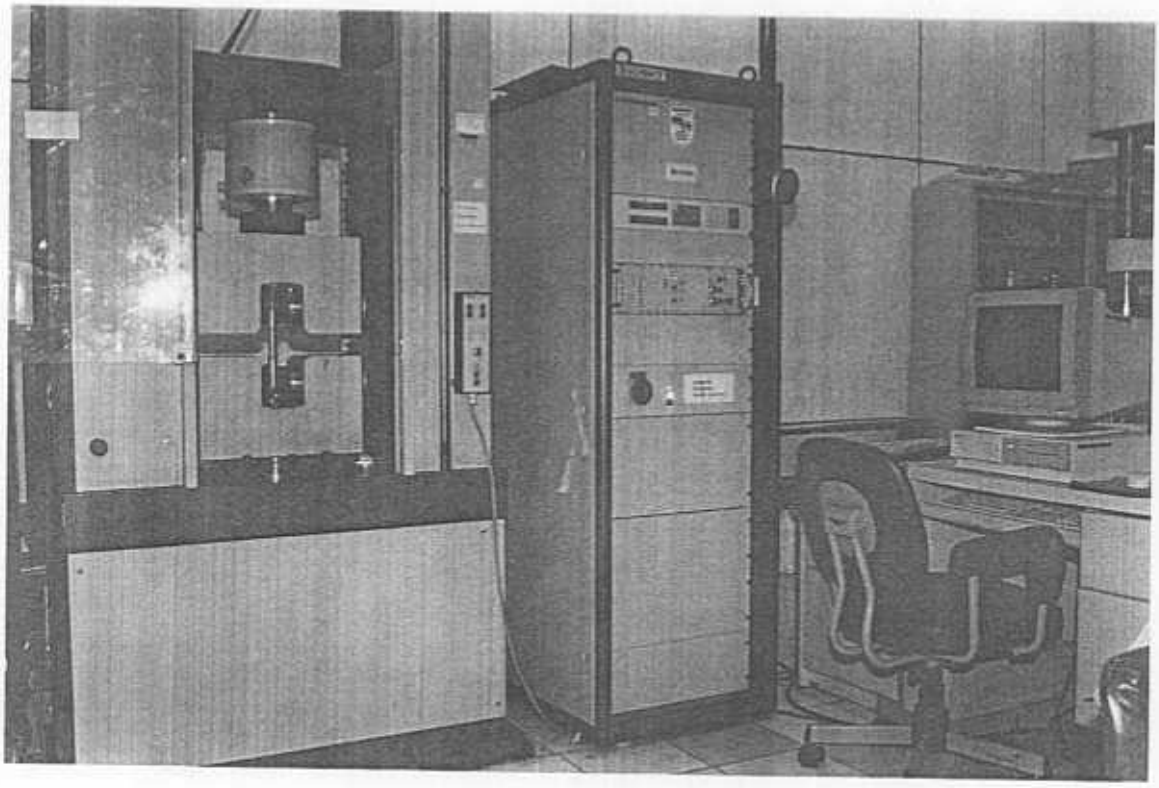
3.2.9 เตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อตรวจสอบจุลโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ กัดกรดด้วย 3% Nital ดังแสดงในรูปที่ 3.2.8

3.2.10 รวบรวมข้อมูลที่ได้ สรุปผลและเขียนรายงาน

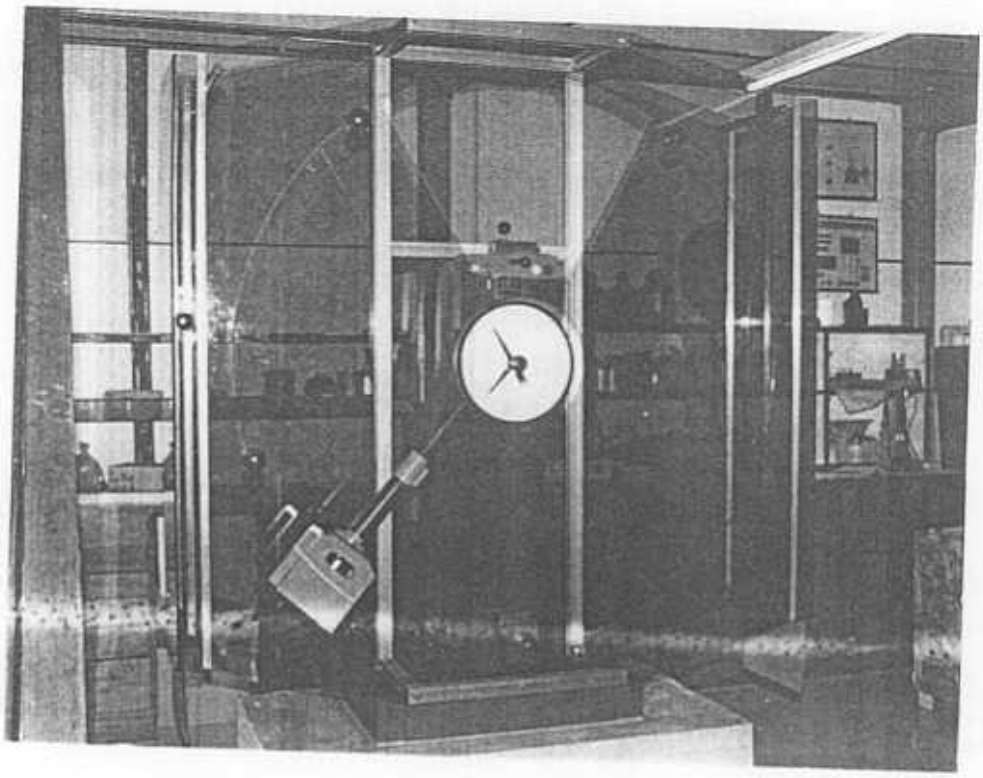
<u>หมายเหตุ</u> : จากการตรวจสอบและข้อมูลที่ได้จาก ทำเนียบโรงงานอุตสาหกรรมจังหวัดอุบลราชธานี โดยสำนักงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ปรากฏว่ามีโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการหล่อผ่านไถนาผลิตเครื่องสีข้าว คันไถเหล็ก เพียง 1 โรงงานเท่านั้น รายละเอียดของโรงงานอยู่ในภาคผนวก ง.



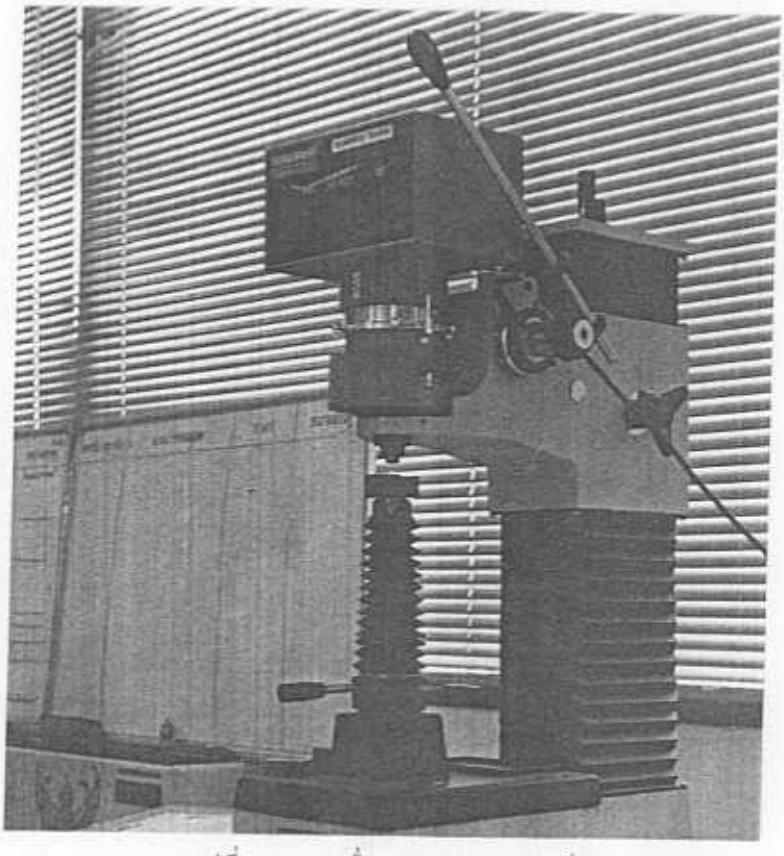
รูปที่ 3.1.1 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่าง



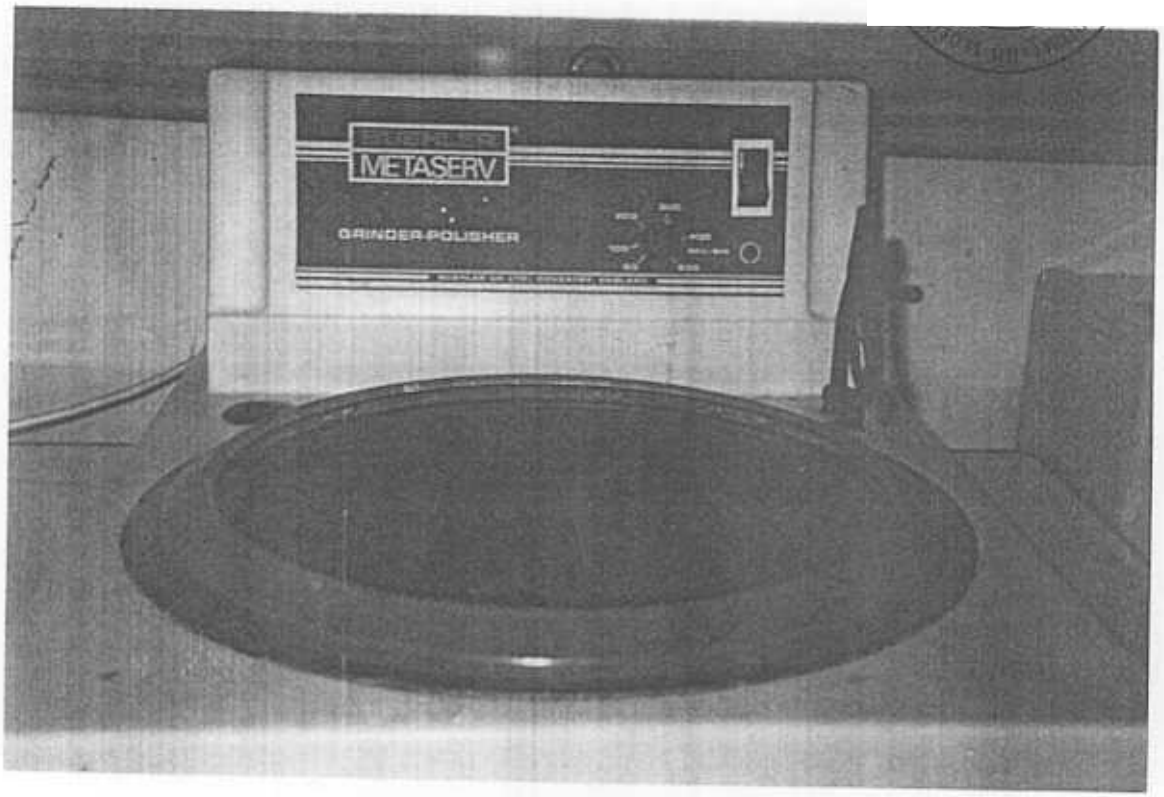
รูปที่ 3.1.2 เครื่องทดสอบแรงดึง



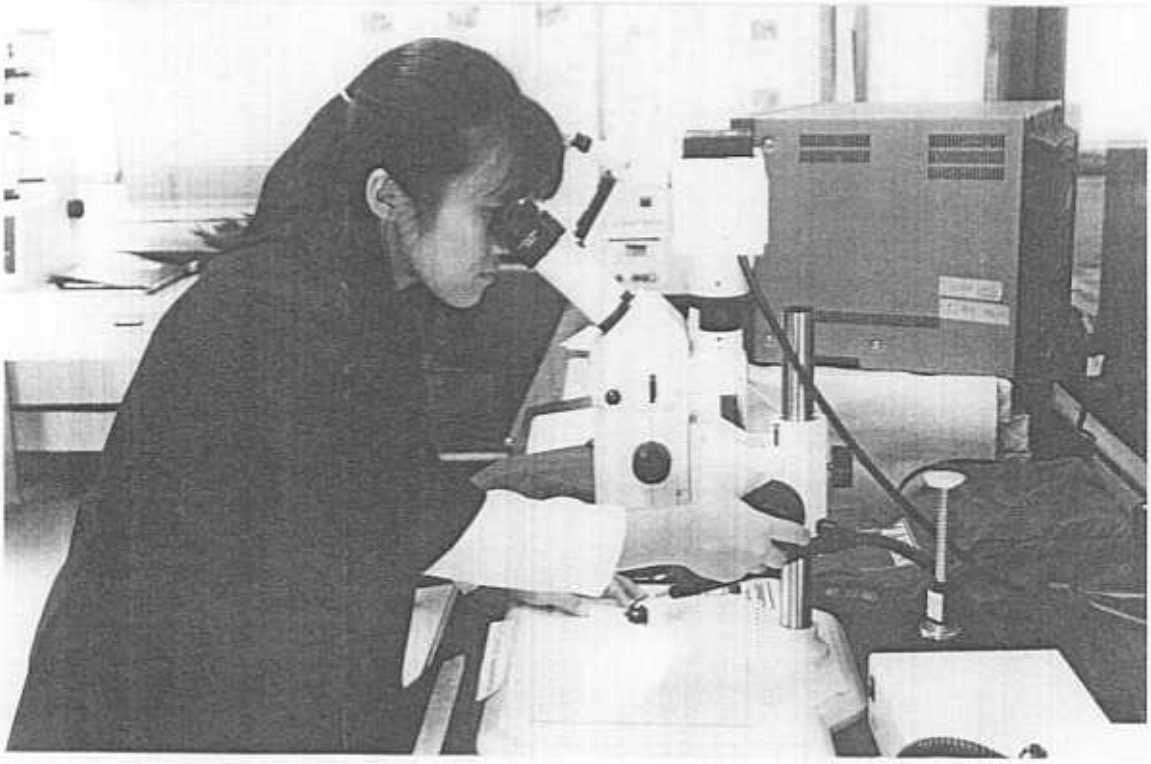
รูปที่ 3.1.3 เครื่องทดสอบแรงกระแทก



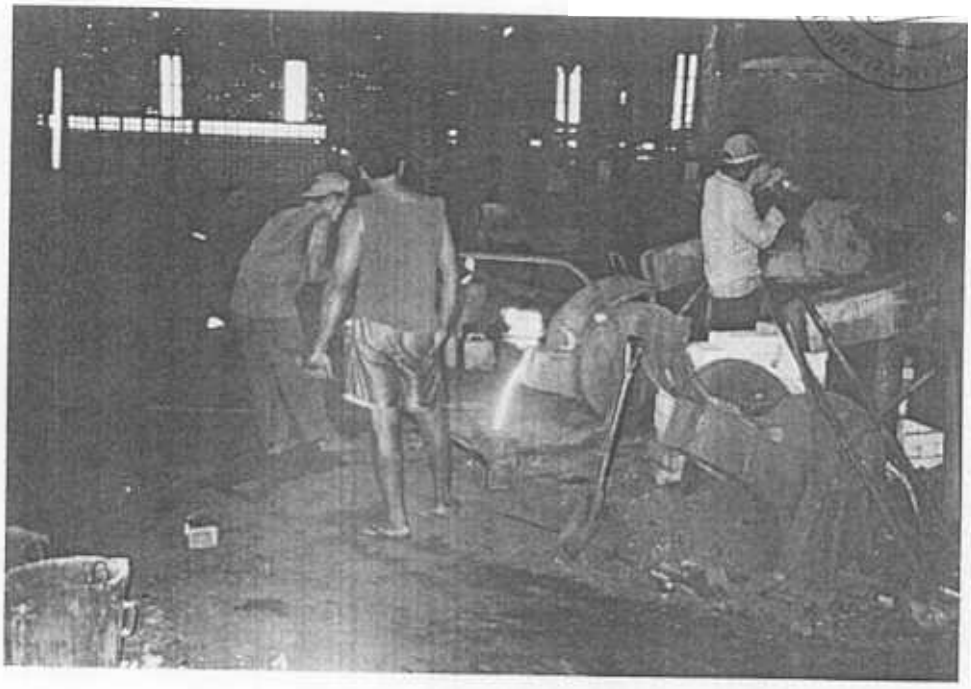
รูปที่ 3.1.4 เครื่องทดสอบความแข็ง



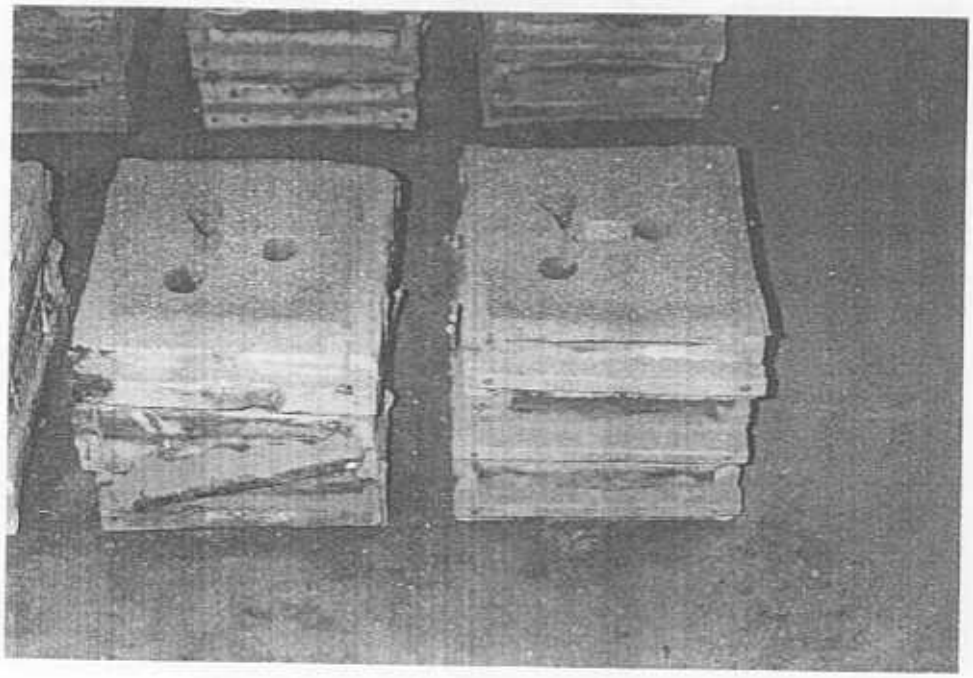
รูปที่ 3.1.5 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.1.6 เครื่องตรวจสอบจุลโครงสร้างเหล็ก

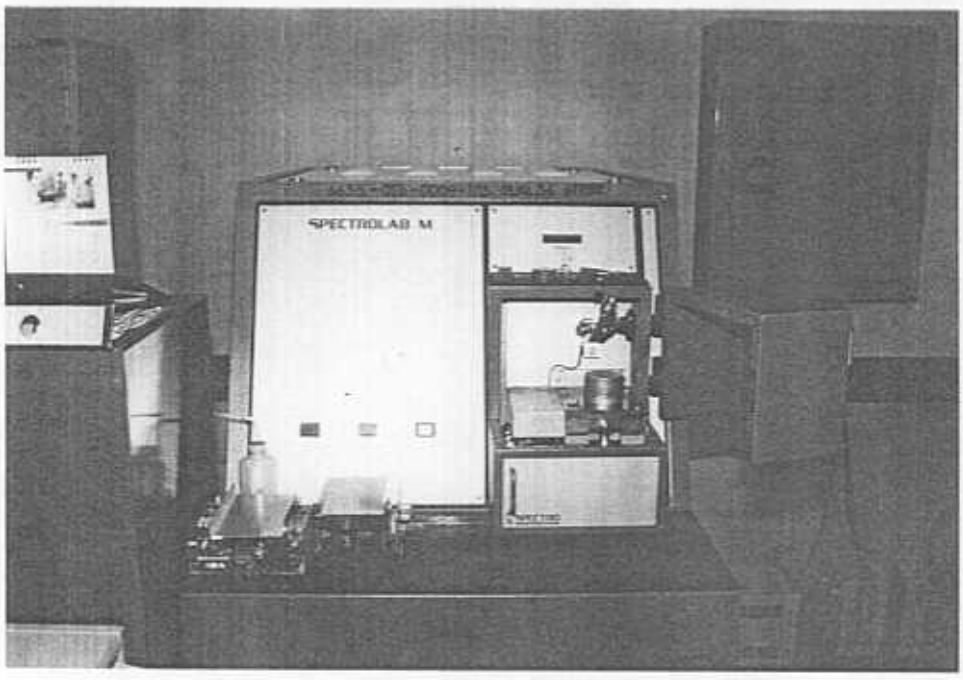


รูปที่ 3.2.1 ลักษณะการเทน้ำเหล็ก

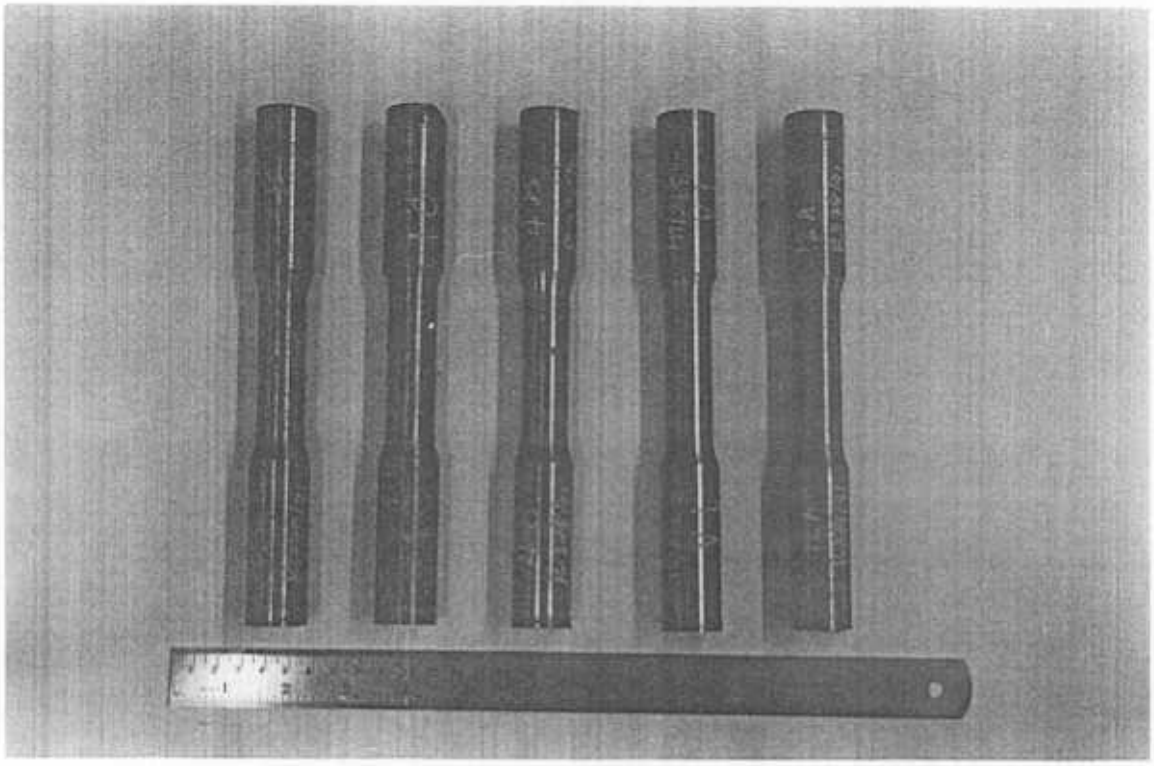


รูปที่ 3.2.2 แบบหล่อทราย

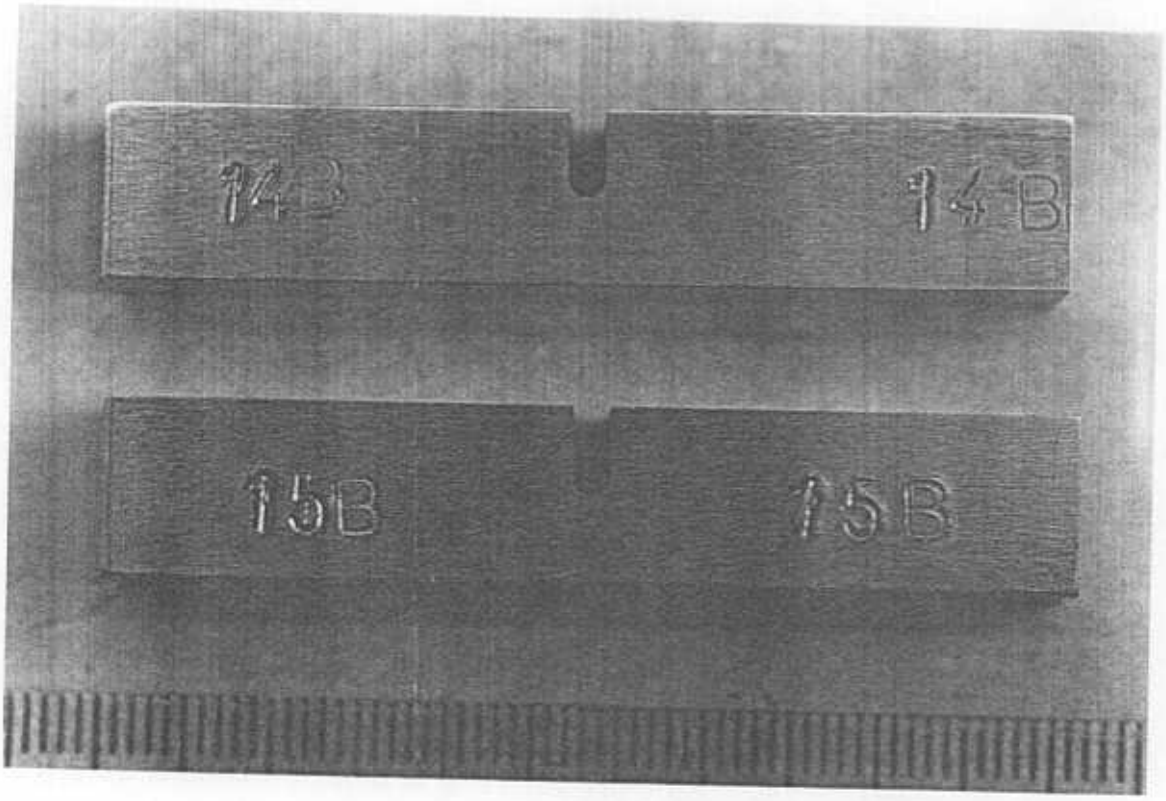
รูปที่ 3.2.3 ชิ้นตัวอย่างที่ได้เมื่อหล่อเสร็จ



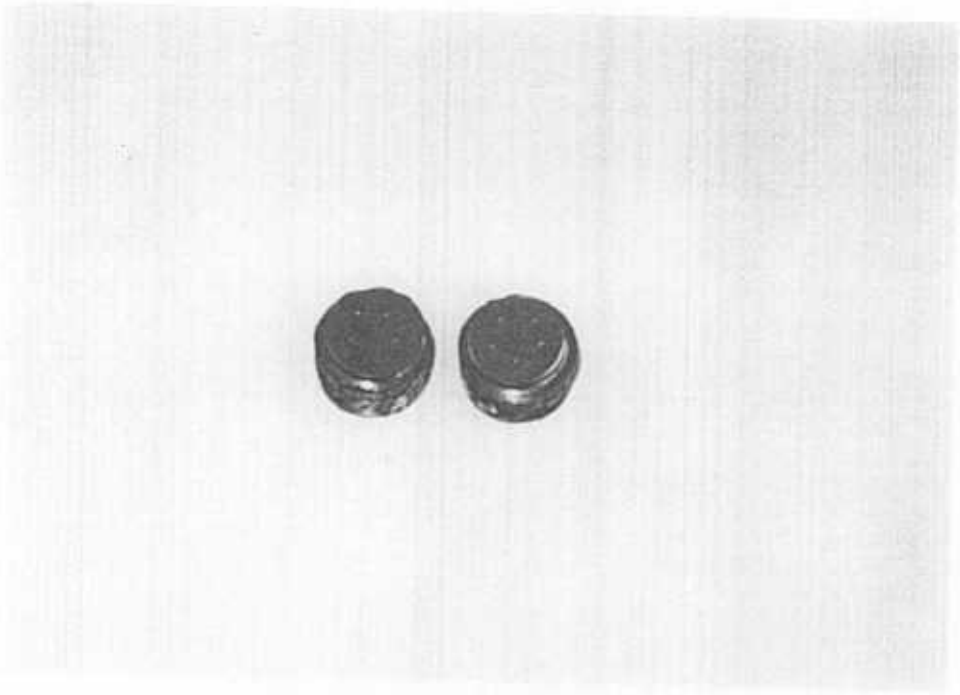
รูปที่ 3.2.4 เครื่อง Spark Optical Emission Spectrometer



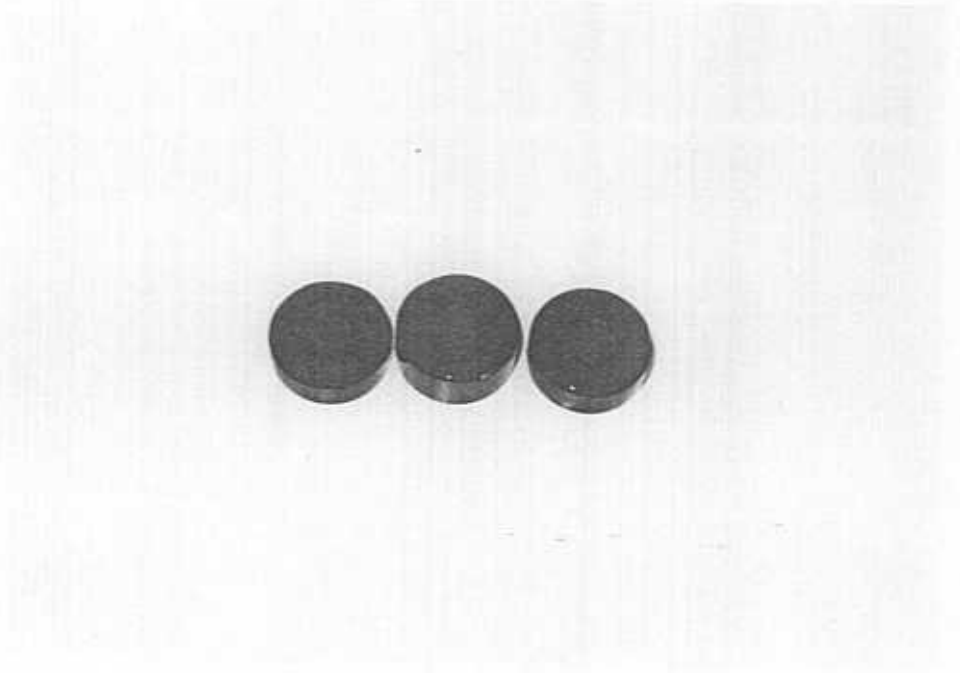
รูปที่ 3.2.5 ขนาดของชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.2.6 ขนาดของชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 3.2.7 ชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบความแข็ง



รูปที่ 3.2.8 ชิ้นตัวอย่างเพื่อตรวจสอบจุลโครงสร้าง

บทที่ 4

ผลการตรวจสอบจุลโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ

4.1 ประเภทของเตาที่ใช้หล่อและข้อมูลต่าง ๆ ในการหล่อ

การหลอมเหล็กหล่อโดยใช้คิวโปลา (Cupola) ที่หล่อชิ้นตัวอย่างโดยข้อมูลการหล่อเหล็ก มีรายละเอียดดังนี้

วัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละครั้งที่เทลงในเตา

เศษเหล็กหล่อ	ประมาณ	115	กิโลกรัม
เหล็กพิค	ประมาณ	130	กิโลกรัม
ถ่านโค้ก	ประมาณ	38	กิโลกรัม
หิน	ประมาณ	1	กิโลกรัม

ดังนั้น อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้คือ

เหล็ก : ถ่านโค้ก : หิน = 6 : 1 : 1

ข้อมูลเวลาในการหล่อเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.1.1 และ 4.1.2

ตารางที่ 4.1.1 ข้อมูลในการหล่อเหล็ก

เวลา	ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ (กิโลกรัม)			
	เศษเหล็กหล่อ	เหล็กพิด	ถ่านโค้ก	หิน
9.00 น.	115	130	38	1
9.20 น.	115	130	38	1
9.30 น.	115	130	38	1
9.40 น.	115	130	38	1
9.50 น.	115	130	38	1
10.00 น.	115	130	38	1
10.10 น.	115	130	38	1
10.20 น.	115	130	38	1
10.30 น.	115	130	38	1
10.40 น.	115	130	38	1
10.50 น.	115	130	38	1
11.00 น.	115	130	38	1
11.20 น.	115	130	38	1

ตารางที่ 4.1.2 ข้อมูลการเทน้ำเหล็กลงในแบบหล่อ

ครั้งที่	เวลาในการเทน้ำเหล็ก
1	9.35 น.
2	9.45 น.
3	10.05 น.
4	10.15 น.
5	10.35 น.
6	10.45 น.
7	11.05 น.
8	11.25 น
9	11.40 น.
10	11.55 น.
11	12.10 น.
12	12.25 น.
13	12.40 น.

4.2 <u>วิเคราะห์ประเภทของเหล็กหล่อ</u>

นำเหล็กหล่อที่ได้มาวิเคราะห์ชนิด ปรากฏว่าเหล็กหล่อที่ได้จากโรงเป็นเหล็กหล่อสีเทา โดยเปรียบเทียบจากมาตรฐาน มอก. 536 - 2537 ดังแสดงในรูปที่ 2.3.1 , 4.7.1 , 4.7.2 , 4.7.4 , 4.7.5 , 4.7.7 , 4.7.9 ,.4.7.10 , 4.7.12 , 4.7.13 , 4.7.13 , 4.7.15 , 4.7.16 , 4.7.18 , 4.7.19

4.3 <u>หาปริมาณของธาตุในเหล็กหล่อ</u>

เนื่องจากเหล็กหล่อเป็นโลหะผสมมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกล การหาปริมาณของธาตุในเหล็กหล่อด้วย Spark Optical Emission Spectrometer ดังแสดงในตารางที่ 4.3.1

ตารางที่ 4.3.1 ปริมาณของธาตุในเหล็กหล่อ

ชิ้นตัวอย่างที่	ปริมาณธาตุ (%)				
	C	Si	Mn	P	S
1	3.25	3.24	0.306	0.164	0.073
2	3.30	3.29	0.307	0.141	0.065
3	3.29	3.29	0.284	0.194	0.067
4	3.23	3.33	0.307	0.165	0.070
5	3.28	3.35	0.306	0.160	0.073
6	3.08	3.14	0.261	0.165	0.086
7	3.15	3.47	0.288	0.120	0.076
8	3.15	3.33	0.347	0.132	0.059
9	3.10	3.25	0.338	0.156	0.065
ค่าเฉลี่ย	3.20	3.30	0.305	0.155	0.070

4.4 <u>การทดสอบแรงดึง</u>

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทาตามมาตรฐาน มอก. 244 เล่มที่ 4 ถึง 7 - 2525 ดังแสดงในตารางที่ 4.4.1

ตารางที่ 4.4.1 ผลการทดสอบแรงดึง

ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	พื้นที่ภาคตัดขวาง (mm^2)	แรงดึงที่ความเค้นคราก 0.2% (N)	แรงดึงสูงสุด (N)	ความเค้นครากที่ 0.2 % (N/mm^2)	ความต้านแรงดึงสูงสุด (N/mm^2)	การยืดตัว (%)
1	19.80	307.91	-	50,220	-	163	0.40
2	19.80	307.91	-	58,300	-	189	0.60
3	20.60	333.29	52,980	63,850	159	192	0.60
4	20.00	314.16	-	45,700	-	145	0.50
5	19.80	307.91	-	50,460	-	164	0.70
6	20.00	314.16	-	50,620	-	161	0.80
7	19.90	311.03	-	55,040	-	177	0.60
8	20.00	314.16	-	56,760	-	181	0.70
9	19.90	311.03	-	54,620	-	176	0.60
10	20.65	334.91	63,475	67,550	190	202	0.50
11	19.80	307.91	58,777	62,420	191	203	0.70
12	19.90	311.03	42,543	50,080	137	161	0.80
13	19.90	311.03	-	48,320	-	155	0.80
14	19.90	311.03	46,328	46,380	149	149	0.80
15	20.00	314.16	45,167	46,100	144	147	0.80
16	19.90	311.03	34,546	40,880	111	131	0.60
17	19.90	311.03	36,073	43,980	116	141	0.70
18	19.90	311.03	-	34,660	-	111	0.50
19	19.80	307.91	46,753	46,780	152	152	0.60
20	19.80	307.91	44,678	46,360	145	151	0.60
21	19.90	311.03	47,485	48,180	153	155	0.80
22	19.80	307.91	47,224	51,320	153	167	0.60
23	19.80	307.91	49,438	50,100	161	163	0.60
24	20.00	314.16	43,703	48,140	139	153	0.80
25	20.00	314.16	18,067	38,720	58	123	0.60
26	19.80	307.91	44,250	48,580	144	158	0.50
27	19.90	311.03	44,067	47,320	142	152	0.80

ตารางที่ 4.4.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	พื้นที่ภาคตัดขวาง (mm^2)	แรงดึงที่ความเค้นคราก 0.2% (N)	แรงดึงสูงสุด (N)	ความเค้นครากที่ 0.2 % (N/mm^2)	ความต้านแรงดึงสูงสุด (N/mm^2)	การยืดตัว (%)
28	19.90	311.03	48,462	54,040	156	174	0.90
29	19.80	307.91	48,585	53,280	158	173	0.70
30	19.80	307.91	48,034	54,020	156	175	0.80
31	19.80	307.91	20,140	32,940	65	107	0.80
32	20.00	314.16	45,104	47,300	144	151	0.60
33	19.80	307.91	44,555	47,040	145	153	0.60
34	19.80	307.91	45,592	49,780	148	162	0.90
35	19.80	307.91	45,959	50,620	149	164	0.80
36	19.80	307.91	45,349	49,320	147	160	0.90
37	20.00	314.16	53,649	59,940	171	191	0.70
38	19.90	311.03	51,696	51,920	166	167	1.20
39	19.90	311.03	52,673	53,740	169	173	0.90
40	19.90	311.03	68,454	68,550	220	220	0.60
41	19.90	311.03	57,068	60,520	183	195	0.60
42	20.00	314.16	53,712	58,580	171	186	0.60
43	20.00	314.16	60,912	68,850	194	219	0.70
44	19.90	311.03	55,360	60,220	178	194	0.60
45	19.90	311.03	55,665	61,340	179	197	0.60
46	19.90	311.03	65,857	73,850	212	237	0.80
47	19.90	311.03	57,618	64,300	185	207	0.80
48	20.00	314.16	56,945	61,820	181	197	0.70
49	19.90	311.03	50,356	55,140	162	177	0.60
50	19.90	311.03	55,360	63,750	178	205	0.60
51	19.90	311.03	41,992	44,380	135	143	0.60
52	19.90	311.03	49,205	49,220	144	158	0.60
53	20.10	317.31	43,395	43,340	137	137	0.50

4.5 <u>การทดสอบแรงกระแทก</u>

ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของเหล็กหล่อสีเทา ตามมาตรฐาน มอก. 244 เล่ม 8 - 2522 ดังแสดงในตารางที่ 4.5.1

<u>ตารางที่ 4.5.1</u> ผลการทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นตัวอย่าง	ความลึก D (มม.)	ความลึกของรอยบาก N (มม.)	ความกว้าง W (มม.)	ค่าพลังงาน (จูล)
1	10.00	5.00	10.00	2
2	10.00	5.00	10.00	2
3	10.00	5.00	10.00	2
4	10.00	5.00	10.00	2
5	10.00	4.98	10.00	2
6	10.00	4.98	10.00	2
7	10.00	5.00	10.00	2
8	10.00	5.00	10.00	2
9	10.00	5.00	10.00	2
10	10.00	5.00	10.00	2
11	10.00	5.00	10.00	2
12	10.00	5.00	10.00	2
13	10.00	5.00 -	10.00	2
14	10.00	5.00	10.00	2

ค่าพลังงานเฉลี่ย = 2 จูล

<u>หมายเหตุ</u> : ขีดจำกัดของเครื่องมือ : 300 จูล

รูปแบบของชิ้นงาน : รอยบากยู (U)

อุณหภูมิที่ทดสอบ : ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (25°C)

4.6 <u>การทดสอบความแข็ง</u>

ผลการทดสอบความแข็งของเหล็กหล่อสีเทา ตามมาตรฐาน มอก.244 เล่ม 1 ถึง 3 - 2522 โดยการทดสอบในหน่วยค่าความแข็งบริเนลล์จากเหล็กหล่อสีเทา 2 ชุด ดังแสดงในตารางที่ 4.6.1 และ 4.6.2

<u>ตารางที่ 4.6.1</u> ผลการทดสอบความแข็งจากเหล็กหล่อสีเทา ชุดที่ 1

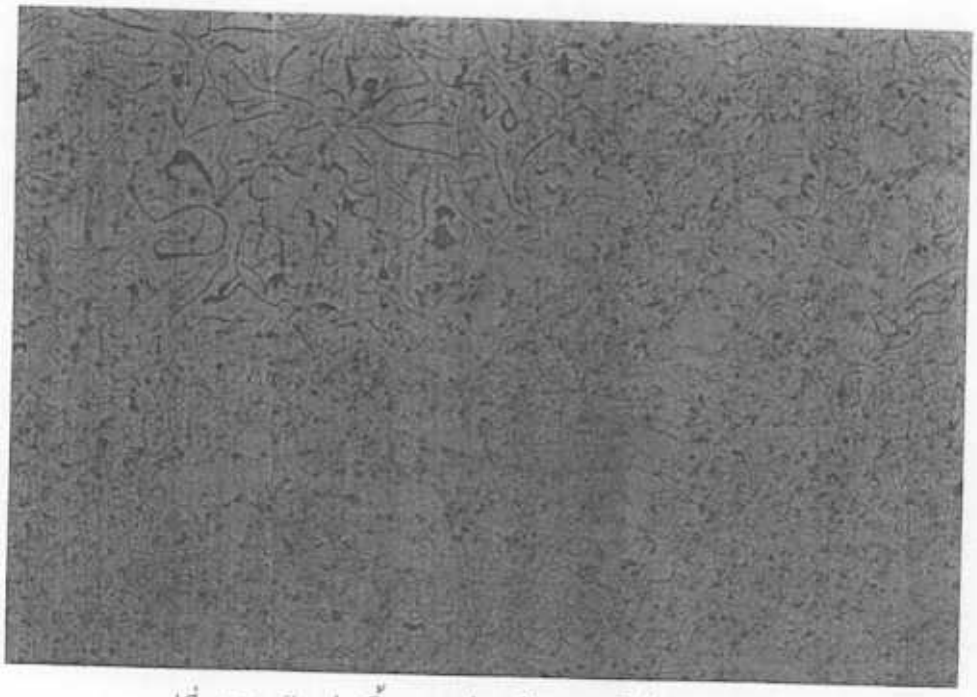
ชิ้นตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (HB 2.5/187.5)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
1	248	252	251	250.33
2	211	212	213	212
3	222	221	223	222
4	216	220	220	218.67
5	276	274	278	276
6	224	222	220	222
7	236	236	233	235
8	234	240	237	237

<u>ตารางที่ 4.6.2</u> ผลการทดสอบความแข็งจากเหล็กหล่อสีเทา ชุดที่ 2

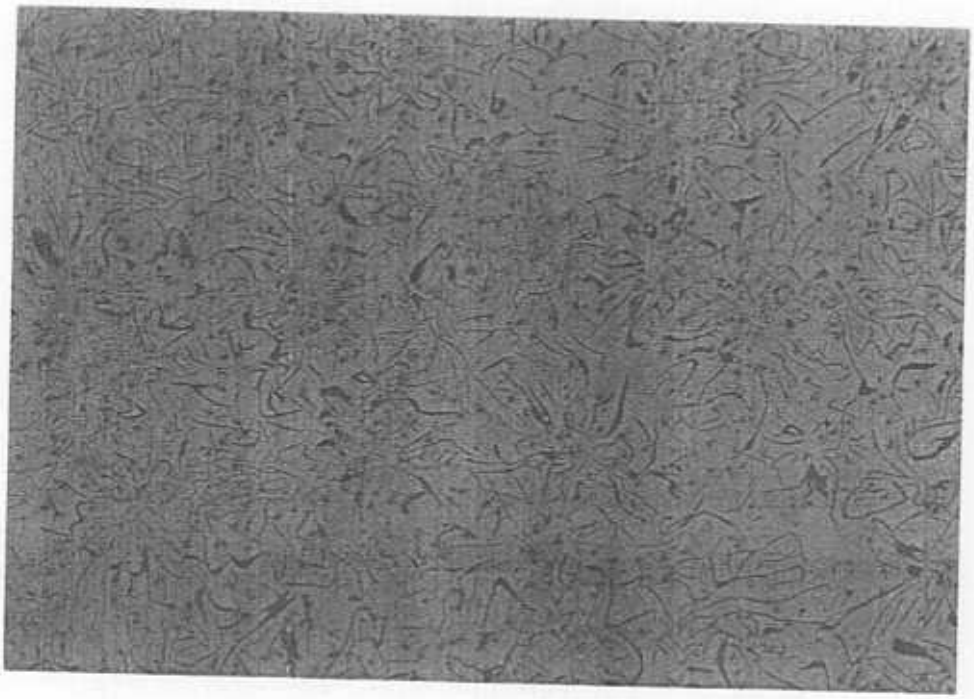
ชิ้นตัวอย่าง	ค่าความแข็ง (HB 2.5/187.5)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
1	223	225	223	223.67
2	229	226	227	227.33
3	220	225	227	222

4.7 <u>การตรวจสอบจุลโครงสร้าง</u>

ผลการตรวจสอบจุลโครงสร้างเหล็กหล่อสีเทา 2 ชุด ๆ ละ 42 ตัวอย่าง และเลือกมาแสดงเฉพาะบางตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.7.1 ถึง 4.7.20



รูปที่ 4.7.1 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X 100



รูปที่ 4.7.2 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกันกรด กำลังขยาย X 100

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา

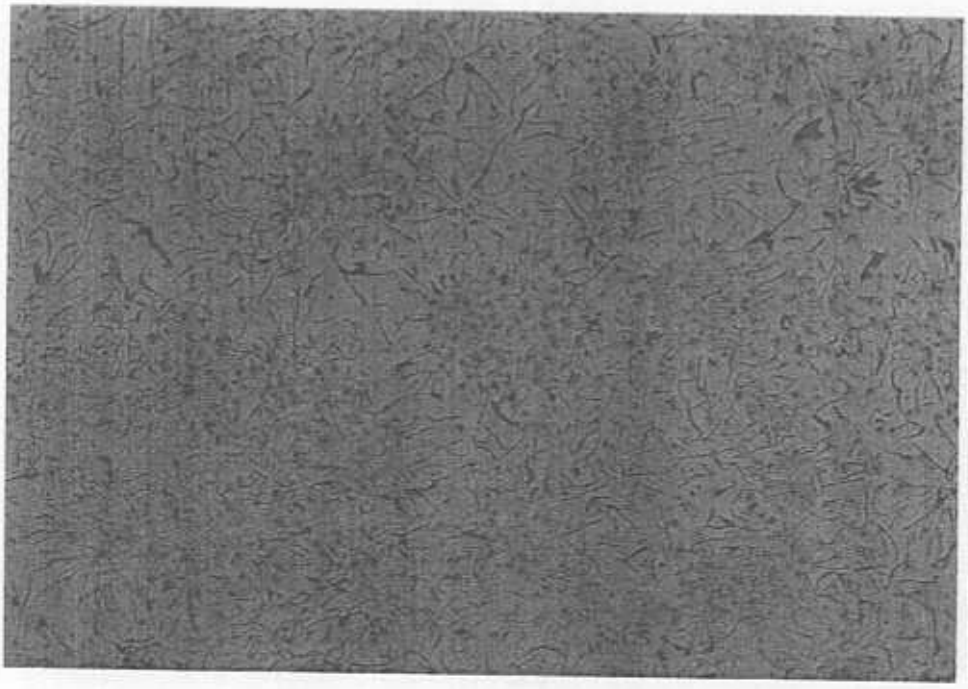
- เกล็ดกราไฟต์ (Graphite Flake))ประเภท B,D,E และ A , C เล็กน้อย

รูปที่ 4.7.3 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกันกรด 3 % Nital กำลังขยาย X 500

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา ที่กำลังขยายสูง

- เกร็ดกราไฟต์
- โครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ (Lamellar Pearlite) , เฟอร์ไรท์อิสระ (Free Ferrite) และเหล็กฟอสไฟด์ (Steadite)

รูปที่ 4.7.4 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกันกรด กำลังขยาย X 100



รูปที่ 4.7.5 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกันกรด กำลังขยาย X 100

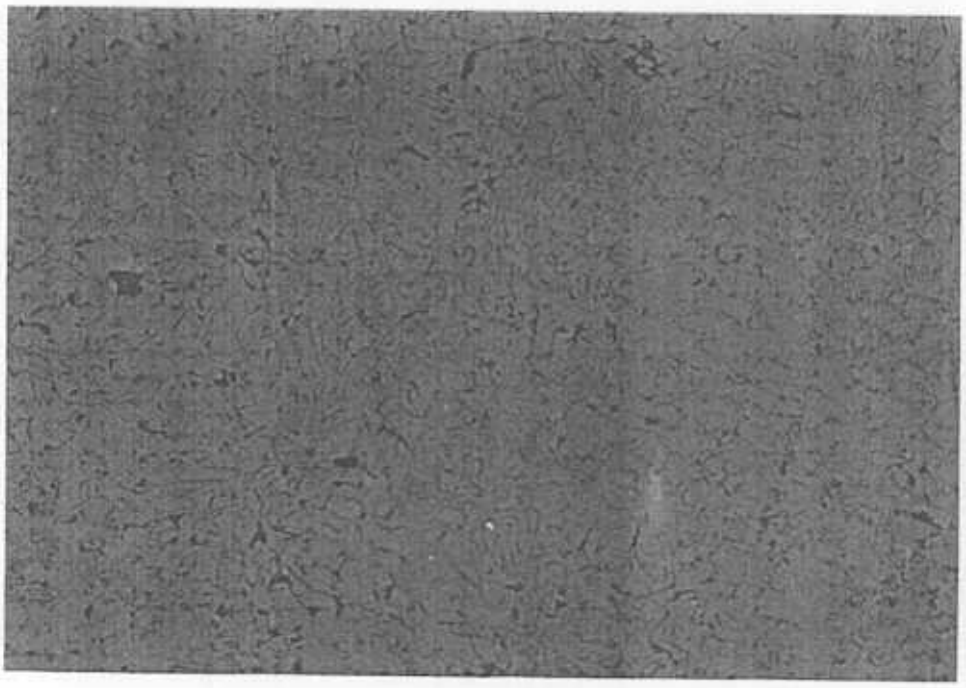
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา

- เกรดกราไฟต์ ประเภท A , B , C และ D

รูปที่ 4.7.6 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกันกรด 3 % Nital กำลังขยาย X 500

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา ที่กำลังขยายสูง

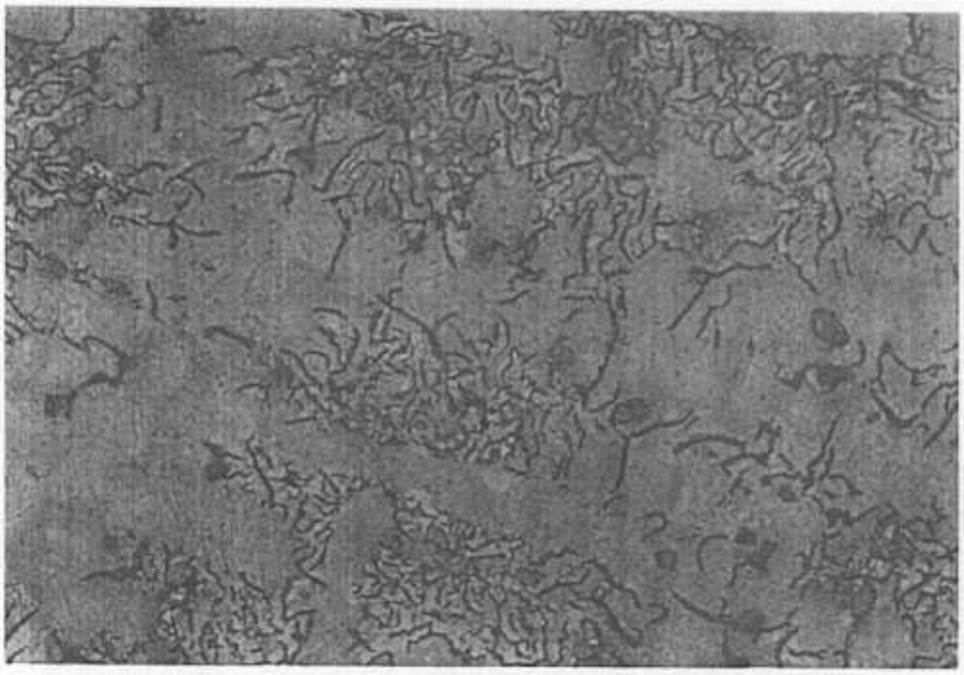
- เกล็ดกราไฟต์
- โครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ (Lamellar Pearlite) , เฟอร์ไรท์อิสระ (Free Ferrite) และ เหล็กฟอสไฟด์ (Steadite)



รูปที่ 4.7.7 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกันกรด กำลังขยาย X 100

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กสีเทา

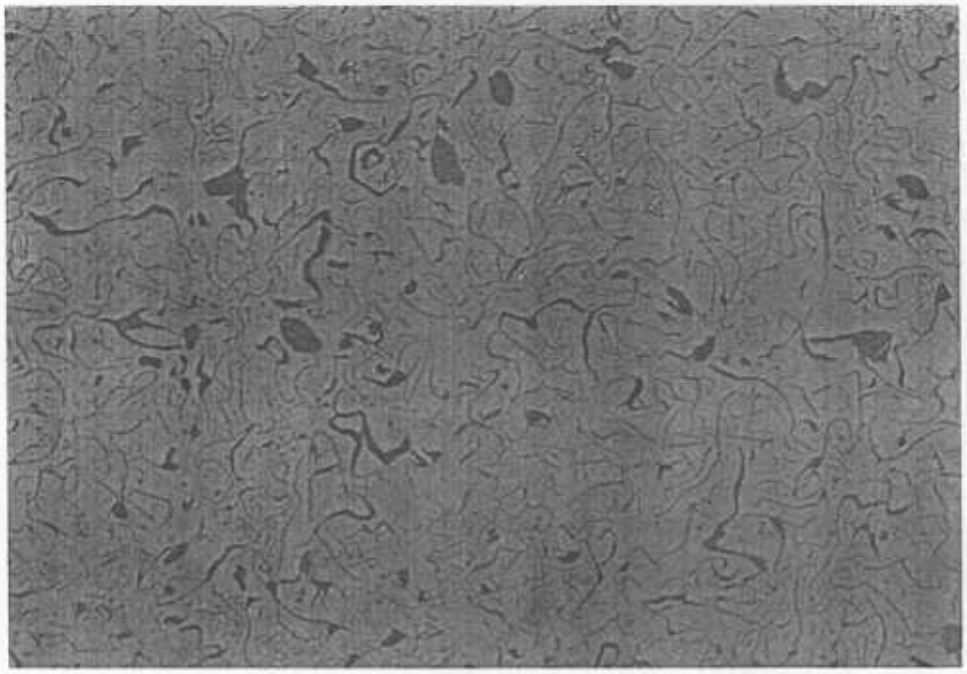
- เกล็ดกราไฟต์ ประเภท D , E และ A , C เล็กน้อย



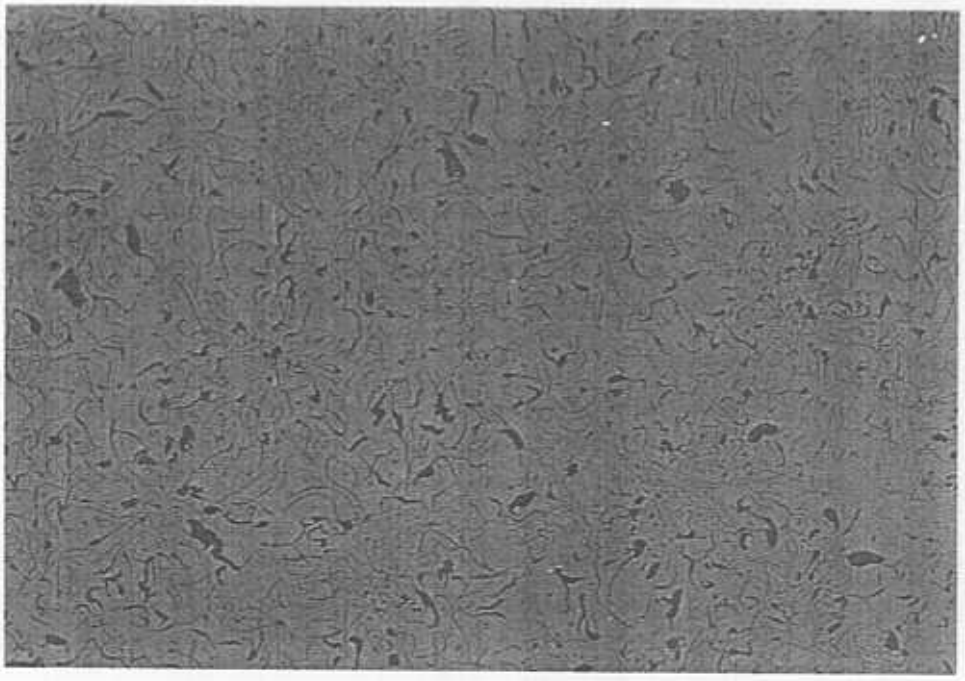
รูปที่ 4.7.8 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด 3 % Nital กำลังขยาย X 100

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา

- เกร็ดกราไฟต์
- โครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ (Lamellar Pearlite) , เฟอร์ไรท์อิสระ (Free Ferrite) และ เหล็กฟอสไฟต์ (Steadite)



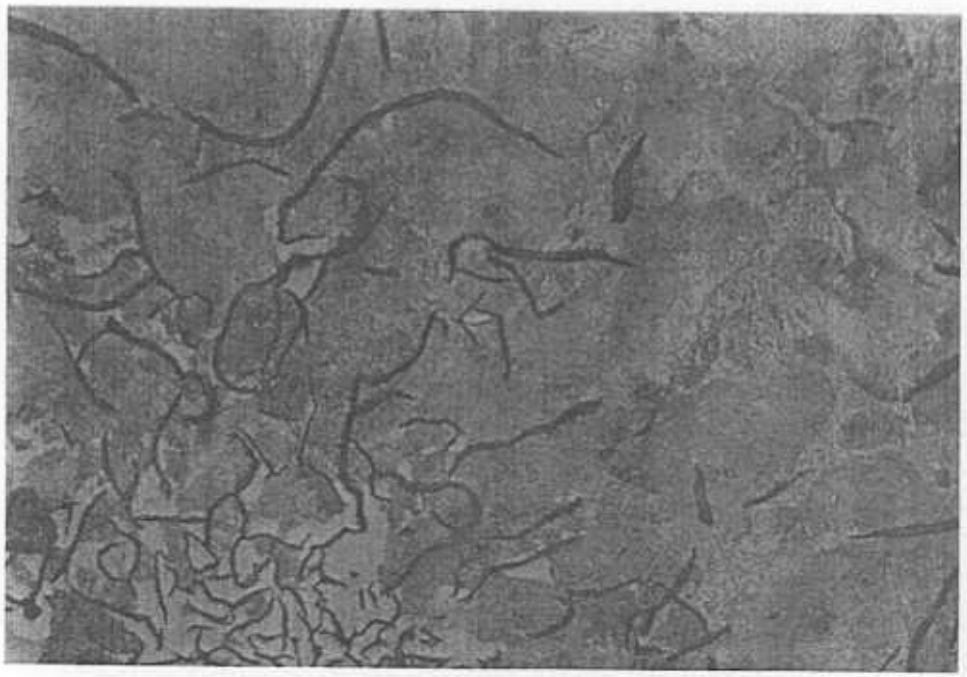
รูปที่ 4.7.9 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X100



รูปที่ 4.7.10 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X 100

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา

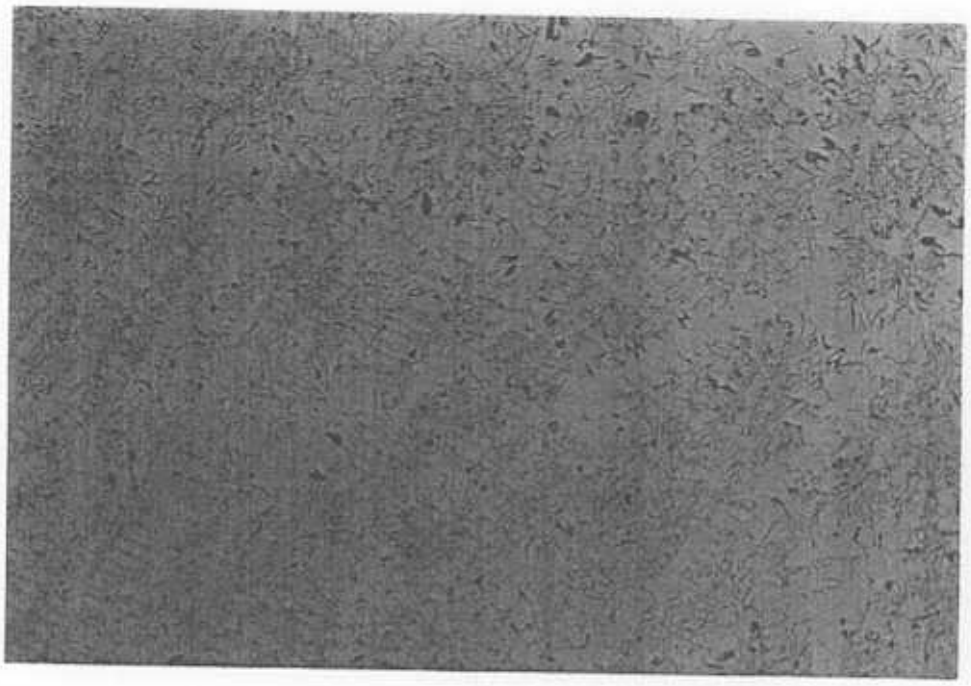
- เกร็ดกราไฟต์ ประเภท A, B , C และ E เล็กน้อย



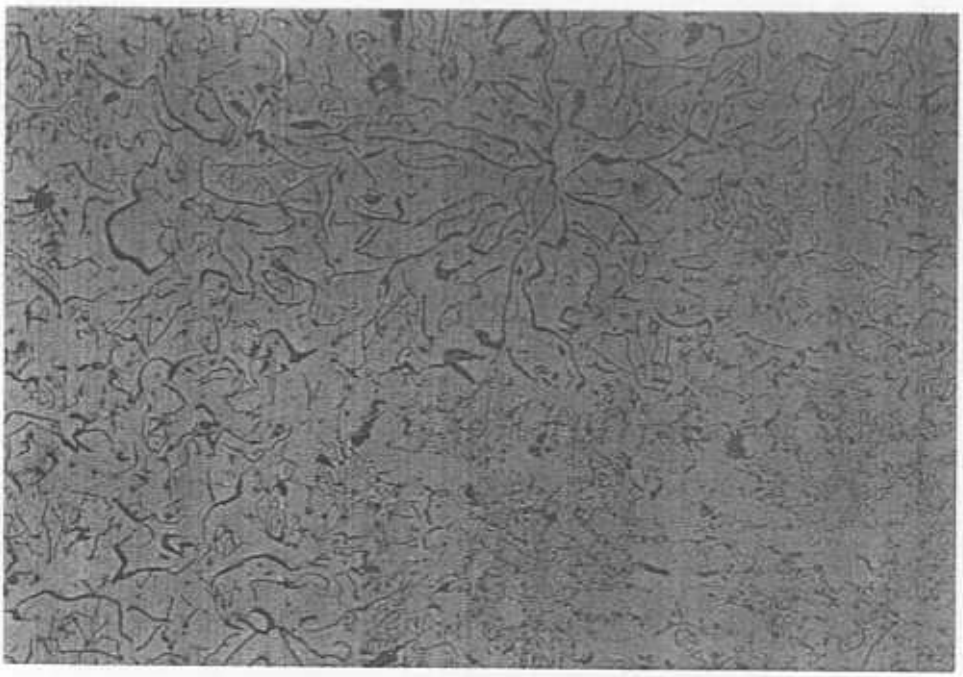
รูปที่ 4.7.11 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด 3 % Nital กำลังขยาย X 100

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา

- เกล็ดกราไฟต์
- โครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ (Lamellar Pearlite) , เฟอร์ไรท์อิสระ (Free Ferrite) และ เหล็กฟอส์ไฟต์ (Steadite)



รูปที่ 4.7.12 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X 100



รูปที่ 4.7.13 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X 100

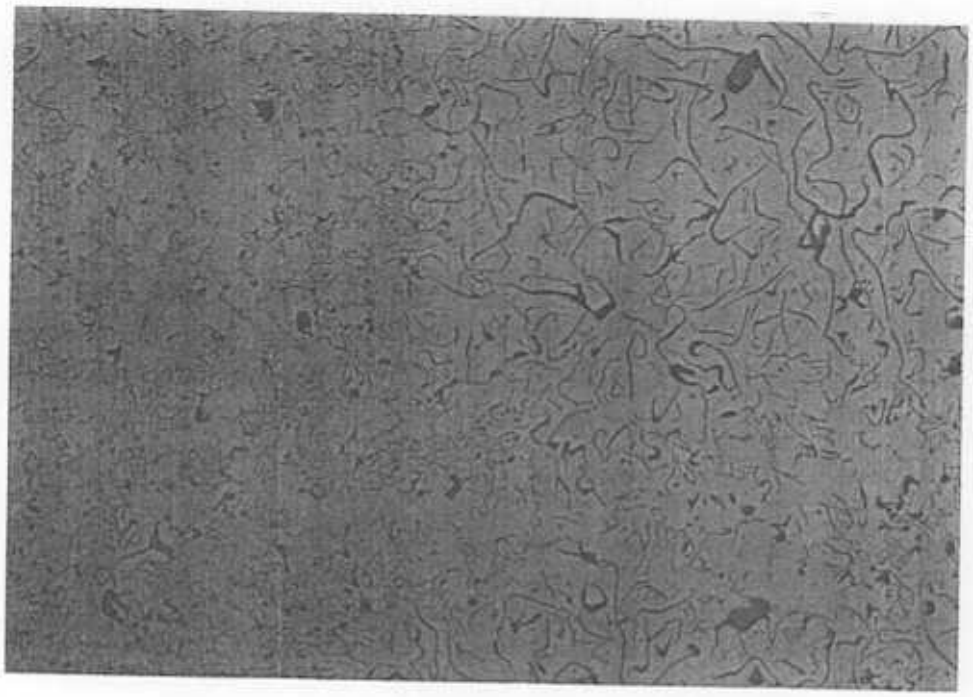
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา

- เกล็ดกราไฟต์ (Graphite Flake) ประเภท A , B , C , E และ D เล็กน้อย

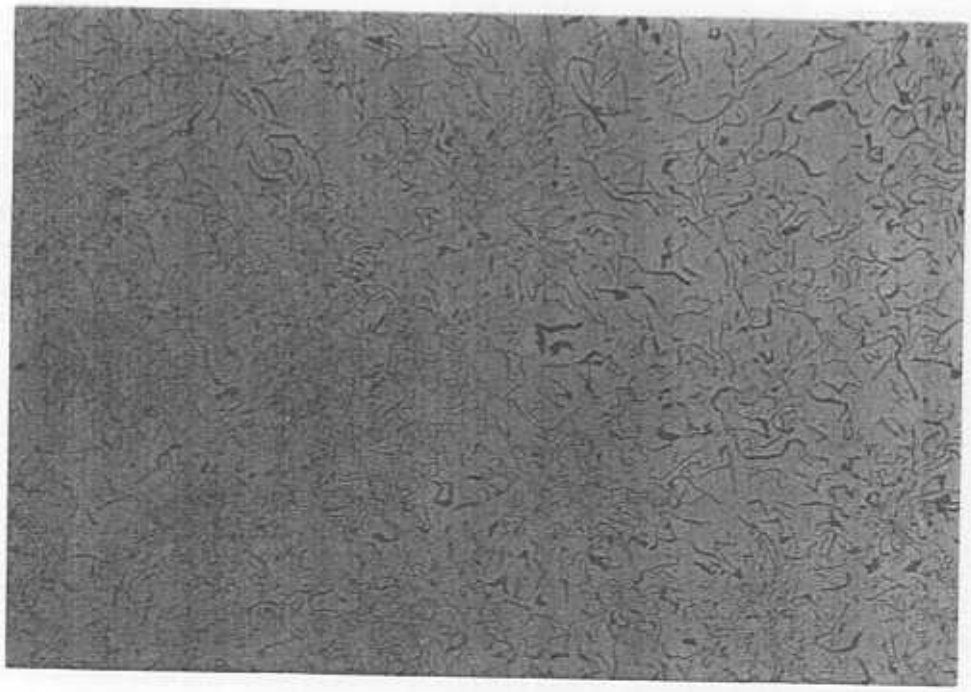
รูปที่ 4.7.14 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด 3 % Nital กำลังขยาย X 500

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา ที่กำลังขยายสูง

- เกล็ดกราไฟต์
- โครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ (Lamellar Pearlite) , เฟอร์ไรท์อิสระ (Free Ferrite) และ เหล็กฟอสไฟด์ (Steadite)



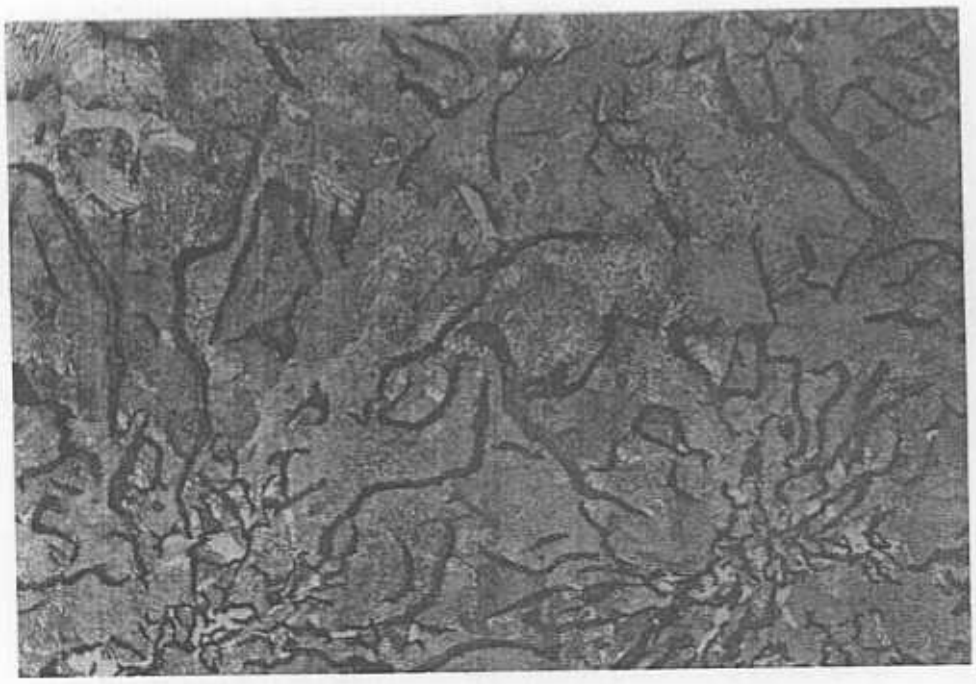
รูปที่ 4.7.15 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X 100



รูปที่ 4.7.16 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X 100

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา

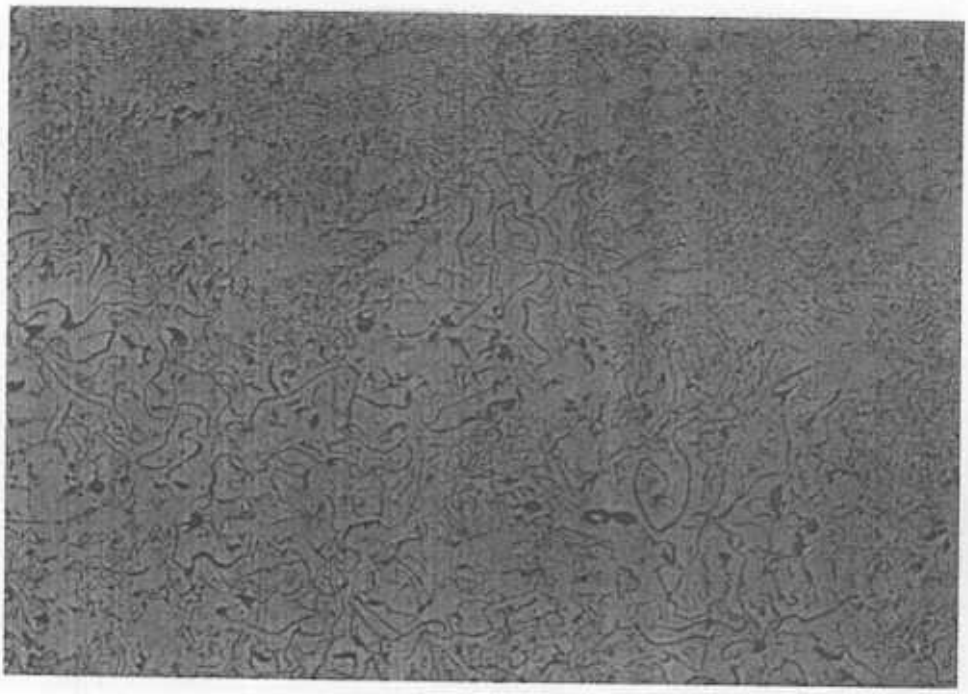
- เกล็ดกราไฟต์ ประเภท A , B , C , D และ E



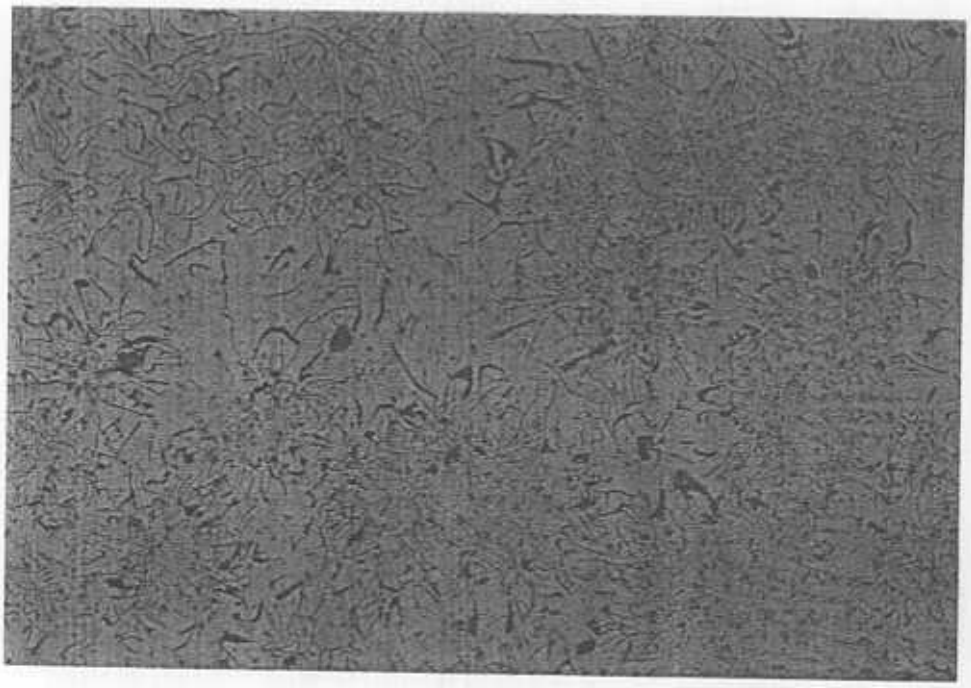
รูปที่ 4.7.17 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด 3% Nital กำลังขยาย X 500

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา ที่กำลังขยายสูง

- เกล็ดกราไฟต์
- โครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ (Lamellar Pearlite) , เฟอร์ไรท์อิสระ (Free Ferrite) และ เหล็กฟอสไฟต์ (Steadite)



รูปที่ 4.7.18 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X 100



รูปที่ 4.7.19 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด กำลังขยาย X 100

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา

- เกล็ดกราไฟต์ ประเภท A , B , C , D และ E

รูปที่ 4.7.20 ตัวอย่างชิ้นงาน ก่อนกัดกรด 3% Nital กำลังขยาย X 500
โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา ที่กำลังขยายสูง
- เกล็ดกราไฟต์
- โครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ (Lamellar Pearlite) , เฟอร์ไรท์อิสระ (Free Ferrite) และ เหล็กฟอสไฟด์ (Steadite)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประเภทของเตาที่ใช้กับเหล็กหล่อ และการตรวจสอบจุลโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 536 - 2527 ผลการตรวจสอบจะได้ว่า เป็นเหล็กหล่อสีเทามีเกล็ดกราไฟต์ (Graphite Flake) ประเภท A,B,C,D และ E ปนกันอยู่ในปริมาณที่ต่างกัน ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.7 ซึ่งโครงสร้างของเหล็กหล่อที่ได้ประกอบด้วย เกล็ดกราไฟต์ มีโครงสร้างพื้นเป็นเพิร์ลไลท์ (Lamellar Pearlite), เฟอร์ไรท์อิสระ (Free Ferrite) และเหล็กฟอสไฟต์ (Setadite)

การหาปริมาณของธาตุในเหล็กหล่อด้วย Spark Optical Emission Spectrometer มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญโดยเฉลี่ยดังนี้ 3.20 % C , 3.30 % Si ,0.305 % Mn , 0.155 % P และ 0.70 % S เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของอเมริกา ASTM A 159 - 72 ปรากฏว่า ปริมาณคาร์บอนและฟอสฟอรัสอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ปริมาณซิลิกอนและซัลเฟอร์สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับปริมาณแมงกานิสต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทา จากชุดที่ 1 ได้แรงดึงสูงสุด 73850 N , ความต้านทานแรงดึงสูงสุด 237 N/mm^2 , การยืดตัว 0.40 - 1.20 % จากชุดที่ 1 ได้แรงดึงสูงสุด 67550 N ,ความต้านแรงดึงสูงสุด 203 N/mm^2 , การยืดตัว 0.50 - 0.80 %

ความต้านทานต่อแรงกระแทกของเหล็กหล่อสีเทาที่มีค่า 2 จูล เมื่อพิจารณากับมาตรฐานจากตาราง ค.13 ค่าที่ได้จะต่ำซึ่งความต้านทานต่อแรงกระแทกของเหล็กหล่อสีเทานี้ด้วย

ความแข็งบริเนล์ของเหล็กหล่อสีเทาทั้ง 2 ชุด อยู่ในช่วง 212 HB - 276 HB ซึ่งอยู่ในช่วงที่กำหนดเมื่อพิจารณาจากตาราง ค.1.3

จากการตรวจสอบจุลโครงสร้าง คุณสมบัติทางกลและปริมาณของธาตุที่ผสมอยู่ในเหล็กหล่อจากโรงงานนี้ สรุปได้ว่าอยู่ในเกณฑ์ของเหล็กหล่อสีเทา และเมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่ได้สามารถนำเหล็กหล่อสีเทาที่ผลิตขึ้นไปใช้งานให้เหมาะสม และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กหล่อสีเทาต่อไป

บรรณานุกรม

1. ดอกรูป พุทธมงคลและคณะ ,วัสดุช่าง ,สำนักพิมพ์พิทักษ์อักษร ,กรุงเทพฯ ,2534
2. ประเสริฐ มหาศรานนท์ ,วัสดุอุตสาหกรรม ,สำนักพิมพ์พิทักษ์อักษร ,กรุงเทพฯ ,2534
3. มนัส สถิรจินดา ,เหล็กหล่อ ,พิมพ์ครั้งที่ 2, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย , โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,กรุงเทพฯ , 2533
4. มานพ ตันตระบัณฑิตย์ ,งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม ,พิมพ์ครั้งที่ 1 ,สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) ,เอช - เอน การพิมพ์ ,กรุงเทพฯ , 2531
5. หริส สูตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา ,หล่อโลหะ , KINMEI PRINTING CO.,LTD.,2517
6. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ,มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กหล่อสีเทา มอก.536 - 2527 , กระทรวงอุตสาหกรรม ,กรุงเทพฯ
7. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ,มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมการทดสอบแรงดึง มอก. 244 เล่มที่ 4 ถึง 7 - 2525 ,กระทรวงอุตสาหกรรม ,กรุงเทพฯ
8. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ,มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การทดสอบแรงกระแทก มอก. 244 เล่มที่ 8 - 2522 ,กระทรวงอุตสาหกรรม ,กรุงเทพฯ
9. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ,มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 244 เล่ม 1 ถึง 3 2520 ,กระทรวงอุตสาหกรรม ,กรุงเทพฯ
10. สำรวจ อินแบน และ ศุภชัย ประเสริฐกุล ,การทดสอบคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ที่ผลิตจากโรงงานสินพื้นเมือง จังหวัดขอนแก่น ,มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2530
11. Herman.W.Pollack ., Materials Science and Metallurgy ., Fourth Edition , Prentic - Hall Internal Editions.
12. Lawrence H. Van Vlack ., Elements of Materials Science and Engineering ,Fifth Edition USA, 1985
13. L.Bjerregard , K. Geels , B.Ottesen and M. Ruckert ., Metalog Guide , Struers , 1992
14. William D. Callister , JR ., Materials Science and Engineering , Second Edition , John Wiley & Sons , Inc ., USA , 1991
15. William F.Smith , Principles of Materials Science and Engineering , Second Edition, Singapore , 1990

ภาคผนวก ก

ก. อิทธิพลของธาตุต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ

เนื่องจากเหล็กหล่อมีส่วนผสมของธาตุหลายชนิด ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กหล่อ เช่น สมบัติทางกลต่าง ๆ ความสามารถในการขึ้นรูป การเชื่อม และการตัดเฉือน เป็นต้น สำหรับเหล็กหล่อสีเทามีธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ 5 ธาตุที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเหล็กหล่อสีเทา ดังนี้

ก. 1. คาร์บอน (C)

เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณที่สูง จึงเป็นธาตุที่สำคัญและมีอิทธิพลมากที่สุดต่อเหล็กสามารถอยู่ในเนื้อเหล็กได้ 2 รูปแบบ คือ รูปของกราไฟต์เป็นคาร์บอนอิสระ และอยู่ในรูปของสารประกอบกับเหล็ก เรียกว่าซีเมนไตต์ (Cementite) รูปแบบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากซิลิกอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก

ปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กจะมีผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นโดยความแข็งของเหล็กจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอนพร้อมกับการหลอมละลายของเหล็กลดลง ความแข็ง ของเหล็กเป็นผลมาจากเหล็กคาร์ไบด์ที่แทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก และมีปริมาณที่เปลี่ยนไปตามปริมาณของคาร์บอน คือ

คาร์บอน %	0.38	0.7	2.0
เหล็กคาร์ไบด์ %	5.0	10	30

เหล็กคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้การยืดตัวของเหล็กลดลง Reduction of Area ลดลงและทำให้ Impact Strength ลดลง และยังมีผลทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในเหล็กเพิ่มขึ้น มีความหนาแน่นเพิ่มอีกด้วย

ก.2. ซิลิกอน (Si)

ซิลิกอนมีจุดหลอมเหลวที่ 1410 °C ซิลิกอนที่มีอยู่ในเนื้อเหล็กจะทำให้มี Yield Strength สูงขึ้น เกิดการแข็งเปราะขึ้นและมีผลทำให้คาร์บอนจับกับเหล็กกลายเป็นคาร์ไบด์ได้ยาก ซึ่งคาร์บอนจะแยกตัวออกมาเป็นกราไฟต์

ก.3. แมงกานีส (Mn)

แมงกานีสมีจุดหลอมเหลว 1244 °C แมงกานีสจะช่วยลดปริมาณซัลเฟอร์ในเหล็กโดยรวมตัวกับซัลเฟอร์อยู่ในรูปแมงกานีสซัลไฟด์ ทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากแมงกานีสช่วยให้การทำให้เกิดคาร์ไบด์โดยรวมตัวกับเหล็กอยู่ในรูปแมงกานีสคาร์ไบด์ และยังช่วยเหล็กมีความสามารถในการรีดร้อนได้ง่ายขึ้นด้วย

ก.4. <u>ซัลเฟอร์</u> (S)

ซัลเฟอร์มีจุดหลอมเหลว 118°C เมื่อผสมอยู่ในเหล็กจะรวมตัวอยู่ในรูปเหล็กซัลไฟด์ ซึ่งจะไม่ละลายในเนื้อเหล็กโครงสร้างนี้จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่(988 °C)ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำมากก็ตาม เหล็กซัลไฟด์จะเกิดขึ้นในขณะที่จะสิ้นสุดการแข็งตัวและจะแทรกตัวอยู่ที่ขอบเกรน เมื่อนำเหล็กที่ได้ไปรีดร้อนหรือดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1000 - 1200°C จะทำให้เหล็กแตกหรือขาดจากกันซึ่งเรียกว่า Hot Shortness หรือ Red Shortness

เหล็กซัลไฟด์จะมีผลทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของเหล็กลดลง เช่น Ductility , Plasticity และ ทำการเชื่อมได้ยาก ลดความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กลดลง

ก.5. <u>ฟอสฟอรัส</u> (P)

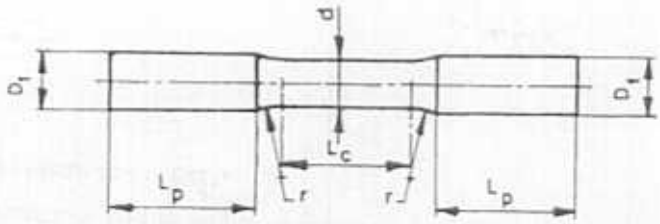
ฟอสฟอรัสมีจุดหลอมเหลว 44°C สามารถละลายในเหล็กได้ที่อุณหภูมิต่ำ (α- iron) และอุณหภูมิสูง (γ-iron) ซึ่งอยู่ในรูปของ Fe_2P หรือ Fe_3P ถ้าปริมาณฟอสฟอรัสมากซึ่งละลายอยู่ใน (α - iron) จะมีผลทำให้ Tensile Strength และ Yield Strength ของเหล็กสูงขึ้นแต่ Ductility และ Plasticity กลับลดลด และจะลดลงมากขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนในเหล็ก

ภาคผนวก ข.

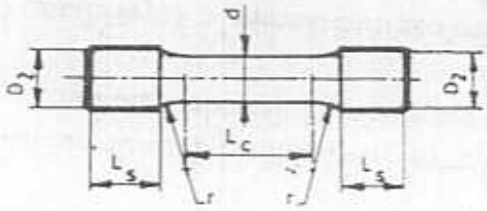
ข. การทดสอบคุณสมบัติทางกลและการตรวจสอบจุลโครงสร้าง

ข.1. การทดสอบแรงดึง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 536 - 2577 สำหรับเหล็กหล่อสีเทา การเตรียมชิ้นทดสอบทำโดยการนำตัวอย่างน้ำเหล็กมาเทในแบบทรายเป็นชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ± 1.5 มิลลิเมตร มีความยาวไม่น้อยกว่า 230 มิลลิเมตร แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึงให้ได้รูปร่างดังแสดงในรูปที่ ข. 1 และตารางที่ ข.1 โดยปราศจากตำหนิใด ๆ เช่น ร่อง หรือรอยแตกร้าวต่าง ๆ ส่วนโค้งของบ่าต้องเรียบ เมื่อได้ชิ้นทดสอบเรียบร้อยแล้วนำไปทดสอบตาม มอก. 244 เล่ม 4 - 2525 การทดสอบเหล็กกล้าโดยการดึง (ทั่วไป)



ชิ้นทดสอบแบบปลายเรียบ



ชิ้นทดสอบแบบปลายเกลียว

รูปที่ ข. 1. รูปร่างของชิ้นทดสอบแรงดึง

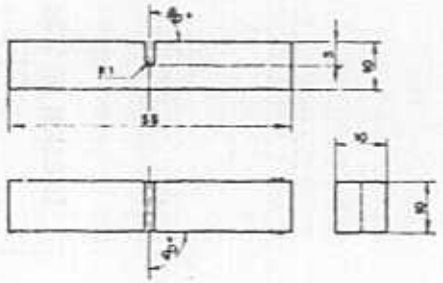
ตารางที่ ข.1. ขนาดของชิ้นทดสอบแรงดึง

หน่วยเป็นมิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาวส่วนขนาน	รัศมีบ่า	แบบปลายเรียบ		แบบปลายเกลียว	
			เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาวของส่วนที่ใช้จับ	เส้นผ่านศูนย์กลาง	ความยาวของส่วนที่ใช้จับ
	ต่ำสุด	ต่ำสุด		ต่ำสุด		ต่ำสุด
d	L_c	r	D_1	L_p	D_2	L_s
20 ± 0.5	55	25^{+5}_{0}	25	65	25	30

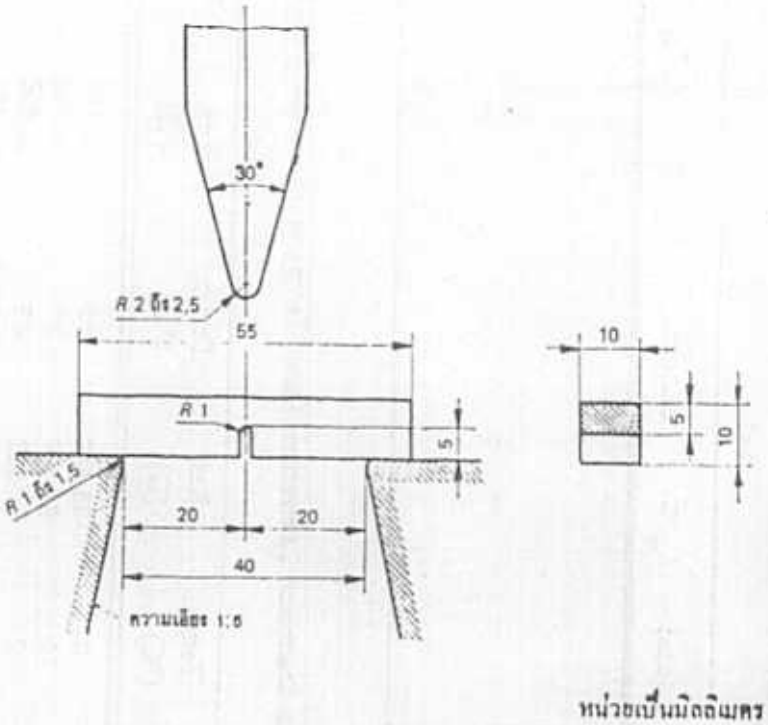
ข.2. การทดสอบแรงกระแทก

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 244 เล่ม 8-2522 เป็นการทดสอบการกระแทกชาร์บี รอยบากรูป U โดยการใช้ค้อนเหวี่ยงตีชิ้นทดสอบเพียงครั้งเดียวให้หักภายใต้ภาวะกำหนด ลักษณะของชิ้นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ ข.2.1 โดยตัดชิ้นทดสอบยาว 55 มิลลิเมตร หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ 10 มิลลิเมตร ตรงกลางของความยาวทำให้เป็นรอยบากรูป U ลึก 5 มิลลิเมตร ตรงก้นรอยบากเป็นรูปครึ่งวงกลม รัศมีความโค้ง 1 มิลลิเมตร และยึดแต่ละปลายให้แน่น แล้ววัดค่าพลังงานที่ชิ้นทดสอบได้รับ เมื่อชิ้นทดสอบหักขาดออกจากกัน ลักษณะการทดสอบการกระแทก ดังแสดงในรูปที่ ข.2.2



หน่วยเป็นมิลลิเมตร

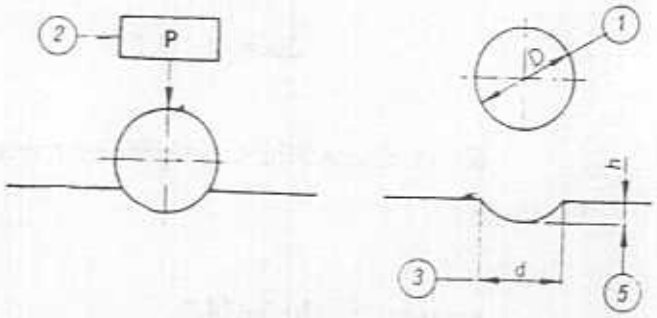
รูปที่ ข.2.1 รูปร่างของชิ้นทดสอบการกระแทกชาร์บี รอยบากรูป U



รูปที่ ข. 2.2 ลักษณะการทดสอบการกระแทก

ข.3. <u>การทดสอบความแข็ง</u>

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 244 เล่ม 2 - 2520 การทดสอบความแข็งบริเนนล์สำหรับเหล็กกล้าและเหล็กหล่อคือการให้ลูกเหล็กทรงกลมแข็งกดด้วยแรงที่แน่นอนลง บนชิ้นงาน พื้นที่รอยกดและแรงที่ใช้นำมาคำนวณหาความแข็ง ลักษณะของการกด สัญลักษณ์และข้อกำหนด ดังแสดงในรูปที่ ข. 3 และตารางที่ ข. 3



รูปที่ ข. 3 ลักษณะของการทดสอบความแข็งบริเนลล์

ตารางที่ ข. 3 สัญลักษณ์และข้อกำหนด

หมายเลข	สัญลักษณ์	ข้อกำหนด
1	D	เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมเหล็กกล้า เป็นมิลลิเมตร
2	P(F)	แรงกดเป็นนิวตัน (กิโลกรัมแรง)
3	d	เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม เป็นมิลลิเมตร
4	HB	ความแข็งบริเนลล์ $= \frac{0.102\,\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ตามผิวโค้งของรอยบุ๋ม}}$ (หรือ $\frac{\text{แรงกด}}{\text{พื้นที่ตามผิวโค้งของรอยบุ๋ม}}$ เมื่อแรงกดเป็นกิโลกรัมแรง) $= \frac{0.204P}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})}$ (หรือ $\frac{2F}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})}$
5	h	ความลึกของรอยบุ๋ม เป็นมิลลิเมตร

ข. 4 การตรวจสอบจุลโครงสร้าง

การตรวจสอบจุลโครงสร้างของโลหะ เป็นการศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อดูขนาดรูปร่างของเกรน การกระจายของเฟส ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการเตรียมชิ้นตัวอย่างก่อน ซึ่งมีขั้นตอนต่าง ๆที่ เป็นหลักสำคัญ ได้แก่ การตัด (Cutting) ,การทำเรือน (Mounting) การเตรียมชิ้นตัวอย่างด้วยวิธีกล (Mechanical Preparation)

การตัดชิ้นตัวอย่างขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง หรือความแข็งของวัสดุที่จะตัดระนาบ ความเรียบและผิวที่มีการแปรรูปหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยที่สุดซึ่งสามารถหล่อเย็นด้วยน้ำขณะทำการตัด และการตัดนั้นจะต้องให้ได้ชิ้นตัวอย่างที่เป็นเสมือนตัวแทนของชิ้นตัวอย่างทั้งหมด

การทำเรือนหุ้มชิ้นงานด้วยเรซิ่น เพื่อความสะดวกในการจับถือ และการเตรียมชิ้นตัวอย่างในตอนต่าง ๆ โดยการทำ Hot Mounting เรซิ่น จะถูกอัดด้วยแรงกดสูงและความร้อน จนแข็งตัวรอบชิ้นตัวอย่าง

การขัดระนาบ (Plane Grinding , PG) เป็นขั้นตอนแรกในการขัดผิวชิ้นตัวอย่างเพื่อให้มีระนาบผิวที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งผงขัดที่ใช้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่เตรียม หลังจากนั้นจึงเป็นการขัดละเอียด (Fine - Grinding ,FG) เพื่อให้ได้ผิวเรียบ ขณะทำการขัดจะใช้น้ำ และสารหล่อเย็นตลอดเวลาเพื่อระบายความร้อนซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของวัสดุ

การขัดมัน (Polishing) จะเหมือนกับการขัดละเอียด เพียงแต่ทำหน้าที่ขจัดผิวที่เสียหายเนื่องจากขั้นตอนก่อนออกไป ผงขัดที่ใช้จะมีความละเอียดสูง ซึ่งมีการขัดมัน 2 แบบ คือ ขัดมันด้วยผงขัดเพชรและขัดด้วยผงขัดออกไซด์

เมื่อผ่านขั้นตอนการขัดมันแล้ว จึงนำชิ้นตัวอย่างไปกัดกรด โดยส่วนที่อ่อนจะถูกกรดกัดเป็นรอยลึก แล้วนำชิ้นตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำกลั่นหรือแอกซอลล์ ต่อจากนั้นก็เป่าด้วยลมร้อน เสร็จแล้วจึงนำชิ้นตัวอย่างไปตรวจสอบจุลโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ต่อไป

ภาคผนวก ค.

ค.1 มาตรฐานเหล็กหล่อสีเทา

เนื่องจากเหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ในลักษณะที่แตกต่างกัน คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อจะขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างหลักและรูปร่างของกราไฟต์ ดังนั้นจึงทำให้มาตรฐานของเหล็กหล่อสีเทามีหลายเกรดตามมาตรฐานต่าง ๆ ได้แบ่งชั้นคุณภาพของเหล็กหล่อดังแสดงในตาราง ค.1.1

ตารางที่ ค.1.1 เหล็กหล่อสีเทาตามมาตรฐานต่าง ๆ

มาตรฐานอเมริกา (ASTM A 48 - 60 T)									
ชั้นคุณภาพ	20	25	30	35	40	45	50	60	
ความเค้นแรงดึง(ต่ำสูง)									
(1,000 lb/in^2)	20	25	30	35	40	45	50	60	
(Ton/in^2)	8.9	11.1	13.4	15.6	17.9	20.1	22.3	26.8	
(Kg/mm^2)	14	17.5	21.1	24.6	28.2	31.7	35.1	42.2	
มาตรฐานรัสเซีย (GOST 1412)									
ชั้นคุณภาพ (SCH)	12-28	15-32	18-36	21-40	24-44	28-48	32-52	35-56	38-60
ความเค้นแรงดึง									
(ต่ำสูง) (Ton/in^2)	7.6	9.5	11.4	13.3	15.2	17.8	20.3	22.2	24.1
(Kg/mm^2)	12	15	18	21	24	28	32	35	38
(ตัวเลขที่ตามมาข้างหลังคือ ค่า Bending Stress เป็น Kg/mm^2)									
มาตรฐานญี่ปุ่น (JIS)									
ชั้นคุณภาพ (Fc)	10	15	20	25	30	35			
ความเค้นแรงดึง									
(ต่ำสูง) (Kg/mm^2)	10	15	20	25	30	35			
มาตรฐานไทย									
ชั้นคุณภาพ (GCI)	100	150	200	250	300	350	400		
ความเค้นแรงดึง									
(ต่ำสูง) (Mpa)	98	147	196	245	294	343	395		
(Kg/mm^2)	10	15	20	25	30	35	40		

มาตรฐานอังกฤษ (BS 1452 : 1961)							
ชั้นคุณภาพ	10	12	14	17	20	23	26
ความเค้นแรงดึง							
(ต่ำสุด) (Ton/in²)	10	12	14	17	20	23	26
(Kg/mm²)	15.7	18.9	22	26.8	31.5	36.2	41
มาตรฐานเยอรมัน (DIN 1691)							
ชั้นคุณภาพ (GGL)	10	15	20	25	30	35	40
ความเค้นแรงดึง							
(ต่ำสุด) (Ton/in²)	6.4	9.6	12.7	15.9	19	22.2	25.4
(Kg/mm²)	10	15	20	25	30	35	40
มาตรฐานฝรั่งเศส (AFNOR A 32-10)							
ชั้นคุณภาพ (Ft)	14	18	22	26	30		
ความเค้นแรงดึง							
(ต่ำสุด) (Ton/in²)	8.9	11.4	14	16.5	19		
(Kg/mm²)	14	18	22	26	30		

(จากเหล็กหล่อ ,มนัส สถิรจินดา ,วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,กรุงเทพ 2533)

<u>ตารางที่ ค.1.2</u> **แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อสีเทาตามมาตรฐาน ASTM A 159-72**

Grade	C	Si	Mn	S (max)	P (max)	Approximate Carbon Equivalent
G 1800	3.40-3.70	2.80-2.30	0.50-0.80	0.15	0.25	4.25-4.5
G 2500	3.20-3.50	2.40-2.00	0.60-0.90	0.15	0.20	4.00-4.25
G 3000	3.10-3.40	2.30-1.90	0.60-0.90	0.15	0.15	3.90-4.15
G 3500	3.00-3.30	2.20-1.80	0.60-0.90	0.15	0.12	3.70-3.90
G 4000	3.00-3.30	2.10-1.80	0.70-1.00	0.15	0.10	3.70-3.90 (usually alloyed)

ภาคผนวก ง.

ง. ข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรม

ข้อมูลจากทำเนียบโรงงาน อุตสาหกรรม จังหวัดอุบลราชธานี โดยสำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัดอุบลราชธานี สำนักงานปลัดกระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

โรงหล่อจำพวกที่ 3 เป็นโรงงานที่การตั้งโรงงานจะต้องได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการก่อนจึงจะสามารถดำเนินการได้ ซึ่งตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

เงิน/คนงาน : 2,600,000 บาท / ชาย 50 คน หญิง 0 คน

วัตถุดิบ และกำลังการผลิต : เศษเหล็ก 400 ตัน ,ถ่านไม้ 1,000 กระสอบ ,ถ่านโค้ก 30 ตัน

ผลิตภัณฑ์ : ผ่านไถนา 60,000 ชิ้น ,เครื่องสีข้าว (สำเร็จรูปขนาดเล็ก) 200 เครื่อง ,คันไถเหล็ก 1,000 ตัน

ตารางที่ ค. 1.3 แสดงคุณสมบัติของเหล็กหล่อเทา

Summarized Data on Grey Cast Iron

Properties	Grade (B.S. 1452:1961)						
	10	12	14	17	20	23	26
Tensile strength (1.2 in. bar) (ton / in.^{2})	10	12	14	17	20	23	26
Transverse Strength modulus of rupture (ton / in.^{2})	19-24	22-26	25-29	29-32	32-36	36-41	40-45
Compression strength	approx. 40	approx. 40	approx. 50	approx. 50	approx. 65	up to 80	up to 80
Elastic modulus (approx.) in tension (lb. / in.2 x 10^6)	11-15	12-16	14-17	16-19	17-21	18-20	18-22
	(These are rough approximations) Elastic Modulus falls as graphite content increases and as stress rises						
Impact strength* (B.S. 1349) (ft.lb.)	6-10	6-10	6-12	10-17	12-23	18-35	18-35
Fatigue/tensile ratio	Varies from 0.35 to 0.47. Lower with higher strength						
Brinell hardness	160 to 300						
Torsion/tensile ratio (solid bar)	1.15 to 1.45						
Modulus of rigidity (lb./in.^{2})	3.35-0.38 of the modulus of elasticity in tension						
Shear strength/tensile ratio	Ratio varies from 1.10 to 1.5, the higher ratios being associated with lower strength iron						
Damping capacity	Decreases with increasing tensile strength						
Specific gravity	7.0 to 7.45						
Specific heat (cal/g deg C)	Varies between 0.11 to 0.13 at 100°C and 0.15 to 0.175 up to 1,000°C						
Coefficient of thermal expansion (per deg C)	Varies between 11 x 10^{-6} and 14 x 10^{-6} up to 600°C. rising with temperature						
Thermal conductivity (cal/cm s deg C)	Varies between 0.14 and 0.11. Increases with increasing graphite content; decreases with all alloy additions						
Electrical resistivity	Specific resistance varies from 50 to 100 microhms/cm cube and rises with temperature and graphite content						

* Unnotched 0.798 inch diameter test piece tested in an Izod machine (From The Physical and Engineering Properties of Cast Iron)

(จากเหล็กหล่อ, มนัส สถิรจินดา, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2523)

ตารางที่ ก.1.4 American Society for Testing and Material* ASTM.

American Society for Testing and Material* ASTM.

Cast iron	Structure	T.S. (ksi)	Y.S. (ksi)	% Elongation	Hardness BHN Range
Gray	Ferrite & pearlite	18			165
	Pearlite & ferrite	25			200
	Pearlite	30			215
	Fine pearlite	40			240
		Range	Range	Range	Range
Vermiculite graphite	Max 20% graph. In modular form	38-60	28-50	1-3	140-270
Ductile	Annealed ferrite	60	40	18	170
	Ferrite-pearlite	80	55	6	220
	Normalized pearlite	100	70	3	240
Malleable	Ferrite + tempered carbon	50/54	32/35	10/18	(max) 155
	Pearlite	60/105	40/90	1/10	150/320
	Annealed ferrite	50	32	10	(max) 155
High alloy	White iron				450/600
High alloy	Gray iron	20/30			100/250
High alloy	Ductile iron	55/60	28/30	6/20	120/275

* Consult the ASTM, or SAE, Standards Manual for values to be used in designs. The values are illustrative.

Source: SME Tool and Manufacturing Engineering Handbook, Vol. 3, 4th ed., Table 3-10, p. 3-13. By permission from the Society of Manufacturing Engineers.

(With Materials Science and Metallurgy, Herman W.Pollack, Prentice-Hall, International Editions.)

ตารางที่ ก. 1.5 **Designation, Minimum** Designations, Minimum Mechanical Properties, Approximate Compositions, and Typical Applications for Various Gray, Nodular, and Malleable Cast Irons

Grade	UNS Number	Composition (wt%)a C	Si	Othe	Matrix Structure	Mechanical Properties: Tensile Strength [psi x 10^3] (Mpa)]	Yield Strength [psi x 10^3] (Mpa)]	Ductility (% EL, in 2 in.)	Typical Applications
					Gray Iron				
SAE G2500	F10005	3.3	2.2	0.7 Mn	Pearlite + ferrite	25 (173)	-	-	Engine blocks, brake drums
SAE G4000	F10008	3.2	2.0	0.8 Mn	Pearlite + ferrite	40(276X	-	-	Engine cylinders and pistons
					Ductile (Nodular) Iron				
SATM A536									
60-40-18	F32800				Ferrite	60 (414)	40 (276)	18	Valve and pump bodies
100-70-03	F34800	3.5-3.8	2.0-2.8	0.05 Mg. <0.20 Ni, <0.10 Mo	Pearlite	100 (690)	70 (483)	3	High strength gears
120-90-02	F36200				Tempered martensite	120 (828)	90 (621)	2	Gears, rollers
					Malleable Iron				
32510	F22200	2.3-2.7	1.0-1.75	<0.55 Mn	Ferrite	50(345)	32(224)	10	General
45006		2.4-2.7	1.25-1.55	<0.55 Mn	Ferrite + pearlite	65 (448)	45 (310)	6	engineering service at room and elevated temperatures

* The balance of the composition is iron.

Source: Adapted from Metals Handbook: Properties and Selection: Irons and Steels, Vol. 1,9th edition, Bardes, B ed., American Society for Metals, 1978.

Ubon Rajathanee University