

การศึกษาอิทธิพลของแบบหล่อที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค  
ของเหล็กหล่อสีเทา (FC 25)

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



โครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2543

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์

การศึกษาอิทธิพลของแบบหล่อที่มีต่อสมบัติ  
ทางกล และโครงสร้างจุลภาคของ  
เหล็กหล่อ สีเทา (FC25)

โดย

นายตระกูลศักดิ์ สุทธิ  
นายวรรณชัย อาทรวีรียกุล  
นายสมชาย เนตร์วิจิตร  
นายเอกชัย มุติมาลัย

ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. จักรชัย ลักษานนท์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ. กันต์วีริชญ์ พลูปราชญ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติ ให้นำโครงการ  
วิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

( รองศาสตราจารย์ ศักดิ์ กองสุวรรณ )

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

จักรชัย ลักษานนท์

ประธานกรรมการ

( อาจารย์จักรชัย

ลักษานนท์ )

กันต์วีริชญ์

กรรมการ

( ผศ. กันต์วีริชญ์

พลูปราชญ์ )

เกียรติชัย

กรรมการ

( อาจารย์เกียรติชัย

รักษาชาติ )



การศึกษาอิทธิพลของแบบหล่อที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของ

เหล็กหล่อสีเทา FC 25

ปีการศึกษา 2543

โดย

นายตระกูลศักดิ์ สุขวี

นายวรรณชัย อาทรวิริยกุล

นายสมชาย เนตรวิจิตร

นายเอกชัย มุติมาลัย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์จักรชัย ลิขชนนัท

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ศส. กันจวีร์วิชญ์ พลุประชญ์

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลการนำความร้อนของแบบหล่อที่มีต่อโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านทานแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทา (FC 25) แบบหล่อที่ใช้มี 3 ชนิด คือ แบบหล่อที่ทำจากเหล็กเหนียว (Steel mold) , ที่ทำจากทรายคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> mold) และที่ทำจากเรซิน (Shell mold) แบบหล่อเป็นรูปทรงกระบอกเรียว สูง 215 มม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายในด้านบน 96 มม. และเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่าง 60 มม.

จากการทดลองพบว่า แบบหล่อที่ทำจากเหล็กเหนียว SC 46 มีอัตราการนำความร้อนออกจากชิ้นงานเหล็กหล่อสีเทา (FC 25) สูงสุด รองลงมาคือแบบหล่อที่ทำจากทรายคาร์บอนไดออกไซด์ และแบบหล่อที่ทำจากเรซิน ตามลำดับ แบบหล่อทั้ง 3 ชนิด นี้ปริมาณความร้อนจะถูกถ่ายเทอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณขอบนอกของชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณด้านใน ซึ่งในบริเวณขอบนอกของชิ้นงานจะเกิดกราฟฟิคเล็กและสั้น ได้เกรนของเพอร์ไลต์ที่ละเอียด

จากการทดลองค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานจากแบบหล่อเหล็กเหนียว, คาร์บอนไดออกไซด์, เรซิน เท่ากับ 346.61 HV, 220.12 HV, 212.48 HV ตามลำดับ

การทดลองทดสอบความต้านทานแรงดึงพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงจะแปรผันตามความแข็งของชิ้นงาน ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานจากแบบหล่อ เหล็กเหนียว, คาร์บอนไดออกไซด์, เรซิน เท่ากับ  $38.2575 \text{ Kg/mm}^2$ ,  $24.9664 \text{ Kg/mm}^2$ ,  $23.5689 \text{ Kg/mm}^2$  ตามลำดับ

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา (FC 25) ที่ได้จากแบบหล่อเหล็กเหนียว ประกอบด้วยเหล็กคาร์ไบต์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ที่บริเวณขอบนอกชิ้นงานลึกเข้าไป 5 มม. ส่วนบริเวณกลางชิ้นงานเกิดเพอร์ไลต์ละเอียด และมีกราไฟท์ชนิด D และ E ขนาด 7-8 ASTM โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากแบบหล่อทรายคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณขอบนอกของชิ้นงานประกอบด้วยเพอร์ไลต์ละเอียด และกราไฟท์ชนิด B, ชนิด D ขนาด 5-6 ASTM ส่วนบริเวณกลางชิ้นงานเกิดกราไฟท์ชนิด A และ B ขนาด 3-5 ASTM โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากแบบหล่อเรซินที่บริเวณขอบนอกของชิ้นงานเกิดกราไฟท์ชนิด B และ D ขนาด 4-5 ASTM ส่วนบริเวณกลางชิ้นงานเกิดกราไฟท์ชนิด A, B และ C เล็กน้อย ขนาด 3-5 ASTM ได้เพอร์ไลต์หยาบที่สุด



**STUDY OF THE EFFECTS OF THE MOLD MATERIALS ON THE MECHANICAL  
PROPERTIES AND THE MICROSTRUCTURES OF  
THE GRAY CAST IRON ( FC 25 )  
ACADEMIC 2000**

BY

Mr. Trakulsak Sukree

Mr. Wanchai Arthonwiriyaikul

Mr. Somchai Nantvitjit

Mr. Akachai Mutiman

Project Report Adviser

Mr. Jackchai Lutchanont

Asst Professor

Mr. Gunwarich Pluphrach

**ABSTRACT**

The objective of the engineering project 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 , CO<sub>2</sub> 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 , CO<sub>2</sub> 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,CO<sub>2</sub> mold ,and the shell mold are 38.2575 Kgf/mm,24.9664 Kgf/mm,and 23.5689 Kgf/mm respectively.The microstructure of the Gray Cast Iron FC 25 from the Cast steel mold consists of iron carbide (Fe<sub>3</sub> 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

CO<sub>2</sub> 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.





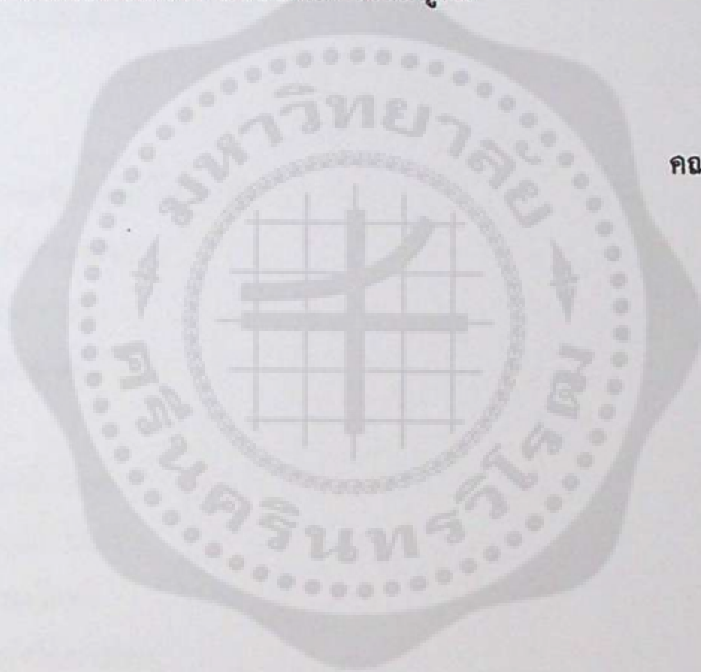
## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้ สำเร็จได้โดยอาจารย์หลายท่านที่ได้ให้การอบรมสั่งสอนแต่แรกจนถึงปัจจุบัน

คณะผู้จัดทำโครงการวิศวกรรมนี้ ขอขอบคุณ อาจารย์จักรชัย ลัษณานนท์ อาจารย์กัณฑ์วิรัชญ์ พูลปราชญ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ท่านได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบ โครงการวิศวกรรมฉบับนี้ให้สมบูรณ์ขึ้น

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา และอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และอบรมสั่งสอน จนกระทั่งโครงการฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ



## สารบัญ

|                              | หน้า |
|------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย              | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ           | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ              | ช    |
| สารบัญ                       | ซ    |
| สารบัญตาราง                  | ฅ    |
| สารบัญรูป                    | ฉ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ    | ณ    |
| บทที่                        |      |
| 1. บทนำ                      |      |
| ความสำคัญและที่มาของโครงการ  | 1    |
| วัตถุประสงค์ของโครงการ       | 1    |
| ขอบเขตของโครงการ             | 2    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ    | 2    |
| 2. ทฤษฎี                     |      |
| คุณสมบัติของน้ำโลหะ          | 3    |
| ความหนืดของน้ำโลหะ           | 3    |
| การแข็งตัวของโลหะ            | 7    |
| การแข็งตัวของโลหะผสม         | 8    |
| การแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ     | 8    |
| คุณลักษณะของแผนภูมิสมดุล     | 12   |
| Thermal-Equilibrium-Diagrams | 16   |
| เหล็กหล่อ                    | 28   |
| เหล็กหล่อสีเทา               | 29   |
| คุณสมบัติของเหล็กหล่อสีเทา   | 30   |
| ส่วนผสมของเหล็กหล่อ          | 35   |
| อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อ  | 38   |



## สารบัญ(ต่อ)

|                                                    | หน้า |
|----------------------------------------------------|------|
| บทที่ 2 (ต่อ)                                      |      |
| การตกผลึกหรือการฟอร์มของกราไฟท์                    | 40   |
| การควบคุมคุณภาพของเหล็กหล่อสีเทา                   | 42   |
| โครงสร้างและคุณสมบัติของชิ้นงานหล่อ                | 43   |
| คุณสมบัติของชิ้นงานเหล็กหล่อ                       | 46   |
| เหล็กหล่อกราไฟท์กลมหรือเหล็กหล่อเหนียว             | 52   |
| สมบัติเชิงวิศวกรรมของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมชนิดต่าง ๆ | 53   |
| เหล็กหล่อขาว                                       | 56   |
| เหล็กหล่ออบเหนียว                                  | 57   |
| อิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กหล่อ                       | 59   |
| ธาตุที่ไม่ควรมีในเหล็กหล่อ                         | 68   |
| 3. การคำนวณและการออกแบบ                            |      |
| การนำความร้อน                                      | 70   |
| การนำความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา                 | 72   |
| ขนาดขั้นต่ำทดสอบการต้านแรงดึง                      | 76   |
| 4. การทดลอง                                        |      |
| การทำแบบหล่อ                                       | 78   |
| การใช้น้ำแก้วและผงโลหะ                             | 81   |
| การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์                        | 81   |
| ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล                              | 83   |
| อุปกรณ์การทดลอง                                    | 85   |
| วัสดุใช้สำหรับหลอมในการทดลอง                       | 85   |
| ขั้นตอนในการทดลอง                                  | 85   |
| การเก็บข้อมูลจากการทดลอง                           | 86   |
| ผลการทดลอง                                         | 87   |
| ส่วนผสม                                            | 104  |

## สารบัญ(ต่อ)

| บทที่                               | หน้า |
|-------------------------------------|------|
| 5. สรุปผลการทดลอง                   |      |
| สรุปผลการทดลอง                      | 105  |
| ข้อเสนอแนะ                          | 106  |
| บรรณานุกรม                          | 107  |
| ภาคผนวกที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง        | 108  |
| ภาคผนวกที่ 2 แบบวิศวกรรมแบบหล่อโลหะ | 111  |





## สารบัญตาราง

|                                                                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่                                                                                                       |      |
| 2.1 สัมประสิทธิ์ของความหนืดและความตึงผิวของโลหะ                                                                | 4    |
| 2.2 มาตรฐานของเหล็กหล่อสีเทาของประเทศต่างๆ                                                                     | 31   |
| 2.3 แสดงคุณสมบัติของเหล็กสีเทา                                                                                 | 33   |
| 2.4 แสดงคุณสมบัติต่างๆของเหล็กหล่อเกรไฟด์กลม                                                                   | 54   |
| 4.1 มาตรฐานของขั้นตอนทดสอบแรงดึง แบ่งตามความหนาของชิ้นงานที่ทำจากเหล็กหล่อเทา                                  | 82   |
| 4.2 ตารางบันทึกผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ mold 3 ชนิด                                     | 87   |
| 4.3 ตารางบันทึกผลการทดลองความแข็งแรงตามแนวรัศของขั้นตอนทดสอบซึ่งใช้แบบหล่อต่างกัน<br>(แต่ละจุดห่างกัน 2 mm.)   | 96   |
| 4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองความแข็งแรงตามแนวรัศของขั้นตอนทดสอบซึ่งใช้แบบหล่อต่างกัน<br>(แต่ละจุดห่างกัน 3.6 mm.) | 96   |

## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                      | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเหล็กหล่อ                                                  | 4    |
| 2.2 แสดงความหนืดของโลหะ                                                                     | 4    |
| 2.3 แสดงอัตราความเร็วของของเหลวที่ไหลออกจากผนัง                                             | 5    |
| 2.4 แสดงแรงที่เกิดจากของเหลวชนผนัง                                                          | 5    |
| 2.5 แสดงรูปเค้าโครงแสดงการแข็งตัวของโลหะ                                                    | 7    |
| 2.6 แสดงโครงสร้างกิ่งไม้                                                                    | 9    |
| 2.7 แสดงระยะเวลาการแข็งตัวของหน้าตัดต่างๆกัน                                                | 9    |
| 2.8 แสดงความแตกต่างระหว่างการแข็งตัวจากน้ำใต้แบบและจากผิวนอกเหล็กหล่อ<br>1300°C แบบทรายแห้ง | 10   |
| 2.9 แผนภาพสมดุลย์ เหล็กคาร์บอน                                                              | 11   |
| 2.10 แสดงแผนภูมิสมดุลย์ของโลหะผสม 2 ธาตุ                                                    | 12   |
| 2.11 แสดงแผนภูมิกระบวนการสมดุลย์ของโลหะผสม 2 ธาตุ                                           | 13   |
| 2.12 แสดงแผนภูมิสมดุลย์ของเหล็กคาร์บอน                                                      | 15   |
| 2.13 แสดง Binary Equilibrium Diagrams ชนิดต่าง ๆ ของโลหะผสม                                 | 17   |
| 2.14 แสดง Cool curve ทั่วๆ ไปของโลหะบริสุทธิ์                                               | 18   |
| 2.15 แสดง Cool curve ของโลหะผสม 2 ชนิด                                                      | 18   |
| 2.16 แสดงการสร้าง Equilibrium Diagram ชนิด Simple Eutectic Type จาก<br>Cooling curves       | 18   |
| 2.17 แสดง Thermal Equilibrium Diagrams ชนิด Simple Eutectic Type                            | 20   |
| 2.18 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมระหว่างบิสัมกับแคลเมียม                             | 20   |
| 2.19 แสดงการจัดตัวของอะตอมของโลหะผสมประเภท Substitutional Solid Solution                    | 21   |
| 2.20 แสดงการจัดตัวของอะตอมของโลหะผสมประเภท Interstitial Solid Solution                      | 21   |
| 2.21 การสร้าง Thermal Equilibrium Diagram ชนิด Solid Solution Type<br>จาก Cooling Curves    | 22   |



## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่                                                                                                                                       | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.22 ผลของการ Annealing ที่มีต่อลักษณะ โครงสร้างของโลหะผสม ชนิด Solid SolutionType ที่ผ่านมามาหลอมมาแล้ว                                     | 23   |
| 2.23 Equilibrium Diagram ของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล                                                                                   | 24   |
| 2.24 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมสองชนิดซึ่งละลายเข้าเป็นของแข็ง เนื้อเดียวเพียงบางส่วน                                               | 24   |
| 2.25 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมของเงินกับทองแดง                                                                                     | 25   |
| 2.26 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่ว                                                                                | 25   |
| 2.27 แสดง Equilibrium Diagram ส่วนหนึ่งของโลหะผสมสองชนิด ซึ่งมี Peritectic Reaction                                                          | 26   |
| 2.28 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมสองชนิด แสดง Intermetallic Compound ที่เกิดขึ้น                                                      | 27   |
| 2.29 Equilibrium Diagram ของโลหะผสมระหว่างแมกนีเซียมกับตะกั่ว                                                                                | 28   |
| 2.30 แสดงปฏิกิริยาอุทกสถิตสามเฟส                                                                                                             | 36   |
| 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size of casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand mold) | 38   |
| 2.32 โครงสร้างที่ได้จากกราฟคาร์บอนซิลิกอน                                                                                                    | 39   |
| 2.33 แสดงการสลายตัวของกราไฟต์                                                                                                                | 41   |
| 2.34 แสดงการบรรจุสารอินเนอร์คูแลนท์                                                                                                          | 42   |
| 2.35 แสดงรูปร่างต่าง ๆ กัน 5 อย่างของชิ้นกราไฟท์ที่เกิดขึ้นในเหล็กหล่อเทา                                                                    | 44   |
| 2.36 แสดงปริมาณคาร์บอนที่มีผลต่อความแข็งแรงทางดึง                                                                                            | 47   |
| 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งเป็นบริเนลล์และความแข็งแรงทางดึง                                                                             | 48   |
| 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงทางดึง                                                                                                    | 48   |
| 2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความถ่วงจำเพาะของเหล็กหล่อ                                                                            | 49   |
| 2.40 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ทำด้วยเหล็กหล่อเทา                                                                                                    | 51   |
| 2.41 ลักษณะการกระจายตัวของแกรไฟต์ที่ปรากฏให้เห็นในเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม                                                                        | 53   |
| 2.42 แสดงคูกาเพลลาทำยรบบรรทุกที่หล่อด้วยเหล็กแกรไฟต์กลม                                                                                      | 54   |



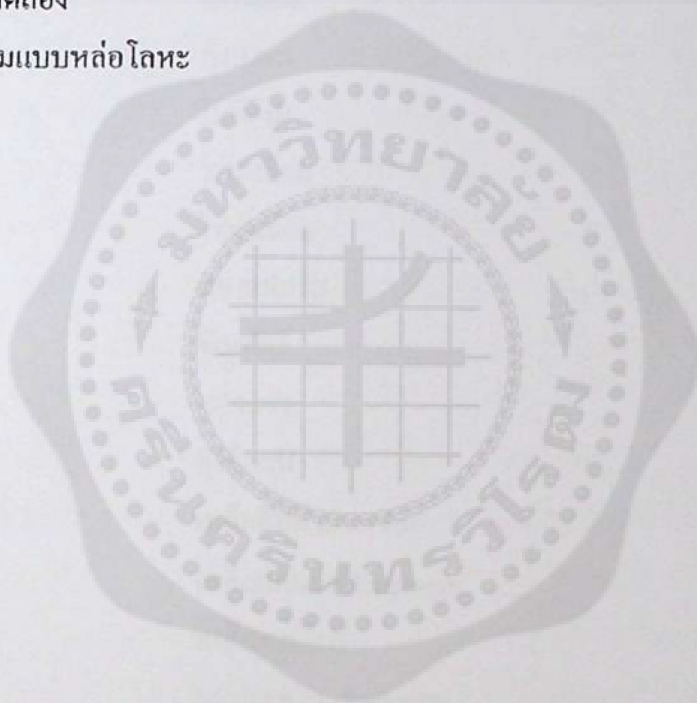
## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่                                                                                                  | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.43 ลูกรีดโลหะทำจากเหล็กหล่อขาวพิเศษที่ทำให้แข็งแรงบริเวณผิว<br>โดยใช้กรรมวิธีทุบเย็น                  | 56   |
| 2.44 แสดงกราฟแสดงคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กหล่ออบเหนียว                                                    | 59   |
| 3.1 แสดงอุณหภูมิที่ผนังแบบหล่อ                                                                          | 72   |
| 3.2 กราฟการนำความร้อนที่สัมพันธ์กับเวลา                                                                 | 74   |
| 3.3 ขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS-Z-2201                                                                      | 76   |
| 4.1 แสดงกระบวนการทำแบบหล่อเปลือกโดยใช้เครื่องทำแบบหล่อเปลือกที่ใช้หีบเท<br>(dump box)                   | 78   |
| 4.2 แสดงการทำเบ้า CO <sub>2</sub>                                                                       | 80   |
| 4.3 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทดลองและทดสอบ                                                                  | 84   |
| 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ Mold 3 ชนิด                                           | 91   |
| 4.5 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของ Steel mold                                                                  | 92   |
| 4.6 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของ Shell mold                                                                  | 93   |
| 4.7 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของ CO <sub>2</sub> mold                                                        | 94   |
| 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดึงของชิ้น Test piece ทั้ง 3 ชนิด                                          | 95   |
| 4.9 แสดงโครงสร้างของเหล็กก่อนกัดกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดย<br>แบบหล่อที่ใช้เป็น CO <sub>2</sub>  | 97   |
| 4.10 แสดงโครงสร้างของเหล็กหลังกัดกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดย<br>แบบหล่อที่ใช้เป็น CO <sub>2</sub> | 98   |
| 4.11 แสดงโครงสร้างของเหล็กก่อนกัดกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดย<br>แบบหล่อที่ใช้เป็น Steel           | 99   |
| 4.12 แสดงโครงสร้างของเหล็กหลังกัดกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดย<br>แบบหล่อที่ใช้เป็น Steel           | 100  |
| 4.13 แสดงโครงสร้างของเหล็กก่อนกัดกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดย<br>แบบหล่อที่ใช้เป็น Shell           | 101  |



## สารบัญรูป(ต่อ)

|                                                                                               | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่                                                                                        |      |
| 4.14 แสดงโครงสร้างของเหล็กหลังกัศกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดย<br>แบบหล่อที่ใช้เป็น Shell | 102  |
| 4.15 แสดงภาพการวัดความหยาบละเอียดของเพอไลต์                                                   | 103  |
| รูปภาคผนวกที่                                                                                 |      |
| 1.1 อุปกรณ์การทดลอง                                                                           | 109  |
| 2.1 แบบวิศวกรรมแบบหล่อโลหะ                                                                    | 112  |



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| สัญลักษณ์    | ความหมาย                                                                        | หน่วย |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Ni           | นิกเกิล                                                                         | -     |
| Si           | ซิลิกอน                                                                         | -     |
| Al           | อลูมิเนียม                                                                      | -     |
| Zr           | ซีโคเนียม                                                                       | -     |
| Mn           | แมงกานีส                                                                        | -     |
| Cr           | โครเมียม                                                                        | -     |
| W            | ทังสเตน                                                                         | -     |
| Mo           | โมลิบดีนัม                                                                      | -     |
| V            | วานาเดียม                                                                       | -     |
| Ti           | ไทเทเนียม                                                                       | -     |
| P            | ฟอสเฟอรัส                                                                       | -     |
| S            | ซัลเฟอร์                                                                        | -     |
| Cu           | ทองแดง                                                                          | -     |
| C            | คาร์บอน                                                                         | -     |
| $\alpha$ -Fe | เหล็กอัลฟา(Ferrite)                                                             | -     |
| $\gamma$ -Fe | เหล็กแกมมา(Austenite)                                                           | -     |
| Fe,C         | เหล็กคาร์ไบด์                                                                   | -     |
| E            | Modulus of elasticity                                                           | -     |
| $\epsilon$   | ความเครียด(strain)                                                              | -     |
| $\sigma$     | ความเค้น(Stress)                                                                | Mpa   |
| JIS          | มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น<br>(Japan Industrial Standard)                         | -     |
| ANSI         | สมาคมทดสอบวัสดุของอเมริกา<br>(American National Standard Institute)             | -     |
| DIN          | มาตรฐานอุตสาหกรรมของเยอรมัน<br>(International Organization for Standardization) | -     |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความสำคัญและที่มาของโครงการ

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) และเหล็กหล่อกราฟไฟต์กลม (Nodular cast iron) ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า (Ductile cast iron)

ในชิ้นงานเหล็กหล่อนั้น แม้ว่าจะมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกันทุกประการมีอุณหภูมิหลอมละลาย และอุณหภูมิการเทที่เท่ากัน ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานเหมือนกัน ก็อาจมีคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัน ได้ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในแบบหล่อเป็นสำคัญ การเลือกวัสดุที่จะใช้ทำแบบหล่อจำเป็นต้องทราบถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แท้จริงของเหล็กหล่อชนิดนั้น ๆ ในแบบหล่อที่นำมาทดลอง เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบและตัดสินใจเลือกวัสดุที่จะนำมาทำแบบหล่อ

#### วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการแข็งตัวรวมทั้งทฤษฎีทางโลหะวิทยาและคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทาชั้นคุณภาพ FC 25
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของแบบหล่อที่ทำจากวัสดุที่ต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กเหนียว SC 46 ทรายผสมเรซิน และทรายคาร์บอนไดออกไซด์

### ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาถึงลักษณะการแข็งตัว อัตราการเย็นตัว โครงสร้างทางโลหะวิทยา คุณสมบัติทางกล และการแตกหักจากการรับแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทา (Gray Cast Iron) ตามมาตรฐานญี่ปุ่น (JIS) ชั้นคุณภาพ FC 25จากการปล่อยให้เย็นตัวในแบบหล่อ 3 ชนิด คือ

1. แบบหล่อเหล็กเหนียวชนิด SC 46 ( Steel mold )
2. แบบหล่อเรซิน ( Shell mold )
3. แบบหล่อทรายคาร์บอนไดออกไซด์ (  $\text{CO}_2$  mold )

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงลักษณะการแข็งตัว อัตราการเย็นตัว โครงสร้างทางโลหะวิทยา คุณสมบัติทางกล และการแตกหักจากการรับแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทาชั้นคุณภาพ FC 25
2. สามารถเลือกใช้แบบหล่อให้เหมาะสมกับชนิดของเหล็กหล่อเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกล โครงสร้างทางโลหะวิทยาและความต้านทานต่อการแตกหักจากแรงดึงตามที่ต้องการได้อย่างถูกต้องหรือใกล้เคียงที่สุด
3. ได้ทราบถึงวิธีการทดสอบวัสดุแบบแรงดึง (Tensile Test) การกดความแข็ง (Hardness Test) การตรวจดูโครงสร้าง (Micro – Structure Test) ด้วยกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด ( Scanning Electron Microscope)
4. ได้ทราบถึงวิธีการทดสอบหาส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer)



## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### คุณสมบัติของน้ำโลหะ

ความแตกต่างระหว่างน้ำโลหะและน้ำ

น้ำโลหะเป็นของเหลวเช่นเดียวกับน้ำ แต่แตกต่างจากน้ำในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้  
ประการแรก ความเหลว (Fluidity) ของโลหะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก น้ำโลหะจะเป็นของเหลวเต็มที่อยู่อุณหภูมิสูง แต่จะกลายจากการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เกิดมีจุดเริ่มต้นการตกผลึก (Crystal nuclei)

ประการที่สอง น้ำโลหะมีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำ ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ  $1.0\text{gm/cm}^3$  แต่ของเหล็กหล่ออยู่ระหว่าง 6.8~7.0 ของอลูมิเนียมผสมอยู่ระหว่าง 2.2~2.3 และของดีบุกผสมอยู่ระหว่าง 6.6~6.8 ดังนั้นลักษณะการไหลของน้ำและของน้ำโลหะจะต่างกันมาก การไหลของโลหะจะมีความเฉื่อย (Inertia) มากกว่าและทำให้เกิดแรงกระแทกสูงกว่า

ประการที่สาม น้ำทำให้ผิวของภาชนะเปียก แต่น้ำโลหะไม่ทำให้เปียก ดังนั้นเมื่อน้ำโลหะไหลผ่านผิวแบบทราย มันจะไม่ซึมเข้าไปในทรายถ้าระยะระหว่างเม็ดทรายน้อยพอความแตกต่างดังกล่าวทำให้การไหลของน้ำโลหะในแบบหล่อต่างจากการไหลของน้ำ

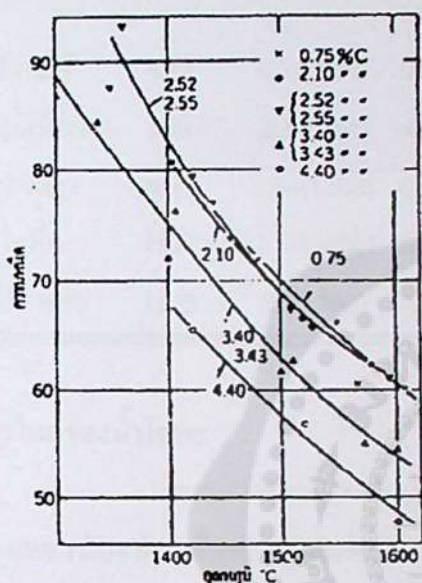
#### ความหนืด (Viscosity) ของน้ำโลหะ

การไหลของน้ำโลหะขึ้นกับความหยาบของผิวแบบหรือขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำผิวแบบ และขึ้นกับความหนืดของน้ำโลหะมากกว่าอย่างอื่น ความหนืดขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงความหนืดจะต่ำ และเมื่ออุณหภูมิต่ำ ความหนืดจะสูง รูปที่ 2.1 แสดงคุณลักษณะนี้สำหรับโลหะที่หลอมเหลวโดยสมบูรณ์ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนค่าสูงสุดของความหนืดเป็น 2~3 เท่าของค่าต่ำสุดของความหนืด ถ้าน้ำโลหะเย็นพอจะเกิดมีจุดเริ่มต้นการตกผลึก (Crystal nuclei) และความหนืดจะเพิ่มขึ้นได้มาก ทั้งนี้ขึ้นกับจำนวนของจุดเริ่มต้น (Nuclei) ในช่วงที่จุดเริ่มต้นการตกผลึกยังต่ำกว่า 20% โดยปริมาตร ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของจุดเริ่มต้นแต่เมื่อจุดเริ่มต้นมี

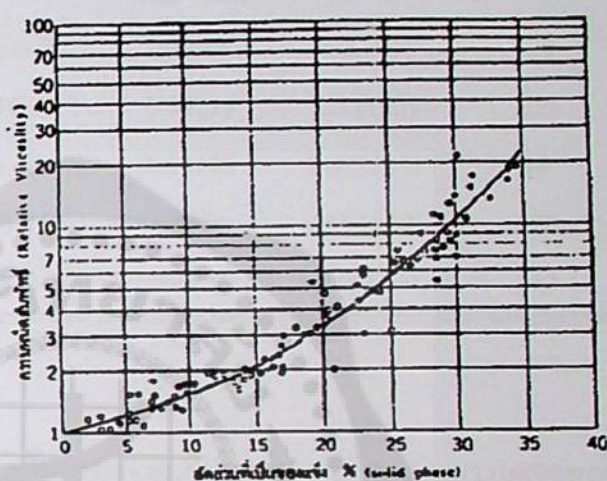


เกิน 30% ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เช่นมากเป็น 10 เท่าของความหนืดเดิม รูป 2.2 แสดงความสัมพันธ์เหล่านี้ ความหนืดสูงจะทำให้โลหะเสียความสามารถในการไหล (Flow-ability)

ความหนืดขึ้นกับชนิดของโลหะ ตาราง 2.1 แสดงค่าของความหนืดของโลหะต่าง ๆ ที่หลอมเหลวโดยสมบูรณ์เทียบกับความหนืดของน้ำ ตารางนี้แสดงให้เห็นว่าโลหะบางชนิดมีความหนืดเท่ากับหรือต่ำกว่าน้ำ



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเหล็กหล่อ



รูปที่ 2.2 แสดงความหนืดของโลหะ (ตะกั่ว 80.8 % ดีบุก 19.2 %)

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ของความหนืดและความตึงผิวของโลหะ

| ชนิดของสาร | จุดหลอมละลาย (C) | ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> ) | สัมประสิทธิ์ของความหนืด (g/cm.sec) | สัมประสิทธิ์ของความหนืด (คินแมติก (cm <sup>2</sup> /sec)) | ความตึงผิว (dyn/cm) | ความตึงผิว / ความหนาแน่น (cm <sup>3</sup> /sec <sup>2</sup> ) |
|------------|------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------|
| น้ำ        | 0                | 0.9982(20°C)                     | 0.0100476(20°C)                    | 0.010064                                                  | 72(20°C)            | 72                                                            |
| ปรอท       | -38.9            | 13.56(20)                        | 0.01547(20)                        | 0.00114                                                   | 465(20)             | 34.5                                                          |
| ดีบุก      | 232              | 5.52(232)                        | 0.01100(250)                       | 0.00199                                                   | 540(247)            | 97.8                                                          |
| ตะกั่ว     | 327              | 10.55(440)                       | 0.01650(400)                       | 0.00156                                                   | 450(330)            | 42.6                                                          |



ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ของความหนืดและความตึงผิวของโลหะ(ต่อ)

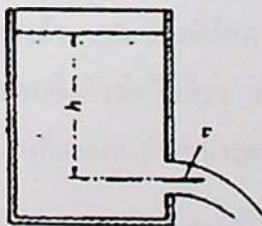
| ชนิดของ<br>สาร | จุดหลอม<br>เหลว<br>(C) | ความ<br>หนาแน่น<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | สัมประสิทธิ์<br>ของความ<br>หนืด<br>(g/cm.sec) | สัมประสิทธิ์<br>ของความหนืด<br>คิเนแมติก<br>(cm <sup>2</sup> /sec) | ความ<br>ตึงผิว<br>(dyn/ cm) | ความตึงผิว /<br>ความหนาแน่น<br>(cm <sup>3</sup> /sec <sup>2</sup> ) |
|----------------|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| สังกะสี        | 420                    | 6.21(420)                               | 0.03160(420)                                  | 0.00508                                                            | 750(500)                    | 120                                                                 |
| อลูมิเนียม     | 660                    | 2.35(760)                               | 0.0055(760)                                   | 0.00234                                                            | 520 (750)                   | 220                                                                 |
| ทองแดง         | 1083                   | 7.84(1200)                              | 0.0310(1200)                                  | 0.00395                                                            | 581(1200)                   | 74                                                                  |
| เหล็ก          | 1537                   | 7.13(1600)                              | 0.0400(1600)                                  | 0.0056                                                             | 970(1600)                   | 136                                                                 |
| เหล็กหล่อ      | 1170                   | 6.9(1300)                               | 0.016(1300)                                   | 0.0023                                                             | 1150(1300)                  | 167                                                                 |

### การไหลของน้ำโลหะ

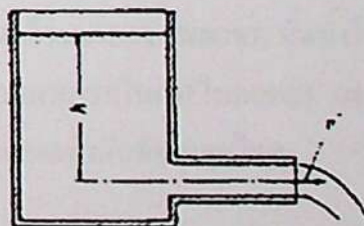
สมมุติว่าของเหลวในภาชนะไหลออกจากรูข้างภาชนะ ให้  $h$  เป็นความสูงของผิวของเหลวนับจากระดับของจุดศูนย์กลางของรู ความเร็วของการไหลจะแทนได้ด้วยสมการข้างล่าง

$$v = C\sqrt{2gh}$$

โดยที่  $g$  คือความเร่งที่เกิดจากความถ่วง (Gravity) และ  $C$  คือสัมประสิทธิ์ของความเร็ว (ดูรูป 2.3)

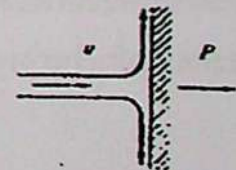


$$v = C\sqrt{2gh}$$



$$v' = C'\sqrt{2gh}$$

$$v' < v$$



$$P = \frac{\gamma}{g} Q v$$

รูปที่ 2.3 แสดงอัตราความเร็วของของเหลวที่ไหลออกจากผนัง

รูปที่ 2.4 แสดงแรงที่เกิดจากเหลวชนผนัง



ในกรณีที่ทางออกเป็นท่อแทนที่จะเป็นรู จะมีแรงต้านการไหลซึ่งเกิดจากความเสียดทานของท่อ ดังนั้นท่อที่ขรุขระและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะทำให้ความเร็วของการไหลออกจากภาชนะลดลง

ถ้าท่อไถ้ความเร็วของการไหลก็จะลดลง เพราะพลังงานของของเหลวจะเสียไปเนื่องจากการเปลี่ยนในทิศทางการไหล ค่า  $C$  ในสูตรข้างบนจะลดลง การเปลี่ยนแปลงในค่า  $C$  นี้ไม่ขึ้นกับชนิดของโลหะถ้าโลหะอยู่ในสภาพหลอมเหลวโดยสมบูรณ์ ดังนั้นไม่จำเป็นต้องคิดถึงน้ำหนักจำเพาะ (หรือความหนาแน่น) และไม่ต้องคิดว่าเป็นโลหะชนิดใด เราอาจใช้สูตรเดียวกับสูตรที่ใช้กับน้ำได้

ถ้าของเหลวที่ออกจากภาชนะนั้นวิ่งเข้าชนกำแพงซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของความเร็ว  $v$  (ดูรูป 2.4) ให้  $Q$  แทนอัตราการไหล  $\gamma$  แทนน้ำหนักจำเพาะของของเหลว และ  $g$  แทนอัตราความเร่งเนื่องจากความถ่วงจะได้  $P$  ซึ่งเป็นแรงที่กำแพงได้รับดังนี้

$$P = \frac{\gamma}{g} Q \cdot v$$

จะเห็นว่าแรง  $P$  ของโลหะจะสูงกว่าของน้ำ เพราะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่น ในการทำการไหลตรง ๆ ให้ไถ้ดังนั้นต้องใช้แรงซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักจำเพาะ ดังนั้นเมื่อจะคิดเรื่องแรงที่เกิดจากการที่น้ำโลหะวิ่งเข้าชนกำแพงของแบบ จะต้องคิดถึงน้ำหนักจำเพาะ (ความหนาแน่น) ของโลหะด้วย

เมื่อน้ำโลหะวิ่งผ่านช่องว่างภายในแบบนี้ ไม่จำเป็นว่าโลหะจะต้องเป็นของเหลวทั้งหมด ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวมาก ๆ จะไม่มีโลหะที่แข็งตัวติดอยู่กับผิวของแบบ แต่ถ้าอุณหภูมิใกล้เคียงจุดหลอมเหลวหรือถ้าแบบรับความร้อนจากน้ำโลหะได้ดี ส่วนที่ติดกับผิวของแบบจะแข็งตัว และช่องที่โลหะไหลผ่านก็จะแคบลง นอกจากนั้นน้ำโลหะที่ไหลผ่านจะพาผลึกที่เกิดจากการแข็งตัวต่อไปด้วย ทำให้ความสามารถในการไหลลดลง และเมื่อช่องสำหรับที่น้ำโลหะจะไหลผ่านก็แคบลงด้วย บางครั้งน้ำโลหะจะถึงกับต้องหยุดไหล

#### ความตึงผิว (Surface tension) ของน้ำโลหะ

เมื่อผิวของเหลวอยู่ตามลำพัง จะเกิดปรากฏการณ์ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับมีเชือกบาง ๆ มาหุ้มของเหลวนั้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าความตึงผิว ตารางที่ 2.1 แสดงความตึงผิวของน้ำโลหะ ความตึงผิวของน้ำโลหะมีค่าสูงกว่าความตึงผิวของน้ำ นอกจากนั้นน้ำจะเกาะติดกำแพงโดยง่าย แต่



โลหะจะไม่เกาะติดกำแพงและจะกลายเป็นเม็ดกลม (เช่นเม็ดปรอท) ดังนั้นเมื่อน้ำโลหะสัมผัสกับบรรยากาศจะมีแรงต้านทานไม่ให้น้ำโลหะซึมผ่านผิวกับน้ำ

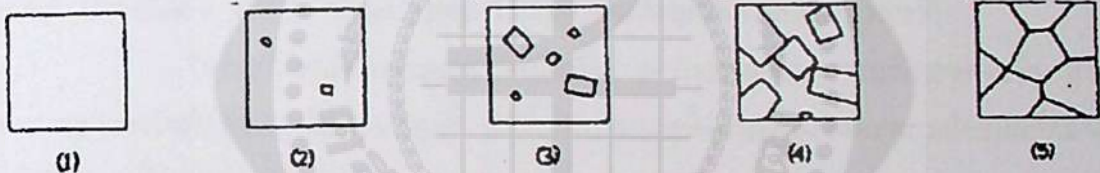
### การแข็งตัวของโลหะ

#### การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์

เมื่อน้ำโลหะบริสุทธิ์ค่อย ๆ เย็นลง จะเกิดการแข็งตัวขึ้นที่อุณหภูมิหนึ่งและการแข็งตัวจะเสร็จสิ้นลงที่อุณหภูมินั้น เราเรียกอุณหภูมินี้ว่าจุดแข็งตัว ซึ่งจะต่างกันสำหรับโลหะต่าง ๆ ทองแดงแข็งตัวที่  $1,083^{\circ}\text{C}$  เงินที่  $961^{\circ}\text{C}$  อลูมิเนียมที่  $660^{\circ}\text{C}$  และดีบุกที่  $232^{\circ}\text{C}$  เป็นต้น

#### กระบวนการแข็งตัวของโลหะมีดังนี้

ในอันดับแรกจะเกิดมีจุดเริ่มต้นการตกผลึก แล้วผลึกก็ จะโตขึ้นจากจุดเริ่มต้น ในขณะเดียวกันจุดเริ่มต้นใหม่ ๆ ก็เกิดขึ้น ในที่สุดน้ำโลหะทั้งหมดก็จะกลายเป็นเม็ดผลึก (Grains) และจะมีขอบคั่นระหว่างเม็ดผลึก เรียกว่าขอบเม็ดผลึก (Grain boundaries) (ดูรูป 2.5)



- (1) ในสถานะของเหลว
- (2) มีจุดเริ่มต้นเริ่มเกิดขึ้น
- (3) ผลึกค่อย ๆ โตขึ้นจาก ๆ จุดเริ่มต้น จุดเริ่มต้นใหม่เกิดขึ้นต่อไป
- (4) ผลึกใกล้เคียงกันขัดติดกันและหยุดเติบโต
- (5) แข็งตัวสมบูรณ์แล้วมีโครงสร้างหลายผลึก (Multicrystal) ในก้อนเดียวกัน

รูปที่ 2.5 แสดงรูปเค้าโครงแสดงการแข็งตัวของโลหะ

ขนาดของเม็ดผลึกขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มของจุดเริ่มต้น และอัตราการโตขึ้นของผลึก ถ้าอัตราการโตชนะอัตราการเพิ่มก็จะเกิดเม็ดผลึกขนาดใหญ่ และถ้าอัตราการเพิ่มชนะอัตราการเติบโตก็จะเกิดเม็ดผลึกขนาดเล็ก



### การแข็งตัวของโลหะผสม

เมื่อโลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุมากกว่าหนึ่งชนิดเย็นลงจากสภาพของเหลวมีผลึกที่เกิดขึ้นจะต่างจากเม็ดผลึกของโลหะบริสุทธิ์ ถ้าโลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุ A และธาตุ B แข็งตัว เม็ดผลึกที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่เม็ดผลึก A และเม็ดผลึก B แยกกันอยู่จะได้เม็ดผลึกซึ่งประกอบด้วย A และ B ผสมกัน เมื่อศึกษาละเอียดลงไปจะพบว่ามีการที่ A ถูกกลืนเข้าไปใน B หรือ B ถูกกลืนเข้าไปใน A และกรณีที่มีทั้ง A และ B เป็นอัตราส่วนที่แน่นอน สองกรณีแรกคือสารละลายของแข็ง (Solid solution) และกรณีหลังคือสารประกอบระหว่างโลหะ (Intermetallic compound)

สารละลายของแข็งคือโลหะในสภาพที่อะตอมของ B เข้าไปแทนบางอะตอมของ A หรือที่อะตอมของ B เข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของ A สารละลายของแข็งจึงหมายถึงสิ่งที่มีการผสมกันในระดับอะตอม ไม่ใช่เป็นการผสมกันทางกล

สารประกอบระหว่างโลหะประกอบด้วยอะตอมของ A และของ B ในสัดส่วนที่แน่นอนและมีระบบของอะตอมในผลึกที่ต่างจากระบบของทั้ง A และของ B

นอกจากสารละลายและสารประกอบระหว่างโลหะแล้วยังมีการที่นาน ๆ จะพบสักครั้ง คือกรณีที่ A หรือ B หรือทั้ง A และ B ปรากฏเป็นก้อนผลึกในสภาพบริสุทธิ์

โครงสร้างของโลหะผสมแยกออกเป็น 3 ประเภทคือ สารละลายของแข็ง สารประกอบระหว่างโลหะและโลหะบริสุทธิ์ ถ้าเพิ่มจำนวนธาตุที่ผสมอยู่ในโลหะผสมก็จะมีผลึกมากขึ้น และโครงสร้างก็จะซับซ้อน

ในวิชาโลหะวิทยาแต่ละส่วนที่มีโครงสร้างเหมือนกันเรียกว่าสภาพ (Phase) ดังนั้นโลหะผสมจะประกอบด้วยสภาพซึ่งเป็นประเภทสารละลายของแข็ง สารประกอบระหว่างโลหะและโลหะบริสุทธิ์ สำหรับเหล็กหล่อของผสมที่สำคัญคือเหล็ก คาร์บอนและซิลิกอน และมีสภาพต่าง ๆ ดังนี้ สารละลายของแข็งซึ่งประกอบด้วยเหล็กเป็นส่วนใหญ่ (ในกรณีนี้ซิลิกอนทั้งหมดและคาร์บอนบางส่วนถูกกลืนอยู่ในเหล็ก) สารประกอบ  $Fe_3C$  เรียกว่าซีเมนไทต์ (Cementite) และกราไฟท์บริสุทธิ์

### การแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ

การแข็งตัวของชิ้นงานหล่อเริ่มจากส่วนของน้ำโลหะที่สัมผัสแบบหล่อเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกแบบหล่อดึงไป และโลหะตรงส่วนนั้น ๆ เย็นลงจนถึงจุดแข็งตัว และจุดเริ่มต้นการตกผลึก (Crystal nuclei) โดขึ้น ภายในของชิ้นงานหล่อก็จะเย็นลงด้วย แต่เย็นช้ากว่าภายนอก ผลึกจะขยายจากจุดเริ่มต้นซึ่งอยู่ริมนอกเข้าสู่ภายใน ทำให้ผลึกมีลักษณะเรียวยาว (Columnar) เรียกว่าโครงสร้างเสาเข็ม (Columnar structure) จะเกิดโครงสร้างประเภทนี้อ่างชัดเจนถ้ามีความแตกต่าง

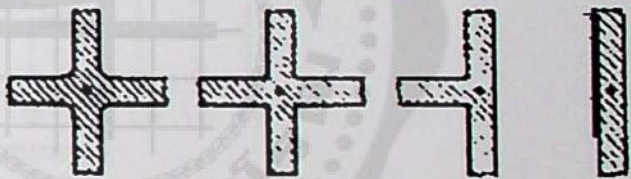


ต่างในอุณหภูมิมากจากผิวถึงภายใน เช่นการหล่อที่ใช้แบบหล่อทรายจะทำให้มีความแตกต่างในอุณหภูมิน้อย ดังนั้นจะไม่เกิดโครงสร้างเสาเข็มประเภทที่เห็นได้ชัด

บริเวณตรงกลางของชิ้นงานหล่อจะมีการเปลี่ยนแปลงในอุณหภูมิน้อย และจะเกิดเป็นผลึกรูปหลายเหลี่ยมที่ไม่แสดงการโน้มเอียงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

ในระหว่างที่น้ำโลหะกำลังแข็งตัว และบางส่วนของโลหะแข็งตัวไปแล้วถ้าเทโลหะที่ยังไม่แข็งตัวออก จะเห็นว่าผิวหน้าของส่วนที่แข็งแล้วมีลักษณะแยกออกได้เป็นสองแบบคือแบบเรียบและแบบขรุขระ ถ้าเป็นโลหะที่มีช่วงอุณหภูมิระหว่างการแข็งตัวแคบ (หมายถึงช่วงอุณหภูมิระหว่างจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดการแข็งตัว) ผิวหน้าจะเรียบและถ้าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวกว้าง ผิวหน้าจะขรุขระ

นอกจากนั้นแบบหล่อที่เป็นโลหะจะทำให้เกิดผิวหน้าที่เรียบและแบบหล่อทรายทำให้เกิดผิวหน้าที่ขรุขระในกรณีที่ช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวกว้าง จะเกิดมีผลึกที่มีลักษณะเป็นกิ่งไม้ (Dendritic crystals) เติบโตขึ้นจากจุดเริ่มต้น (รูป 2.6) และในที่สุดการแข็งตัวจะสิ้นสุดเมื่อบรรดาโครงสร้างรูปกิ่งไม้มาบรรจบกัน

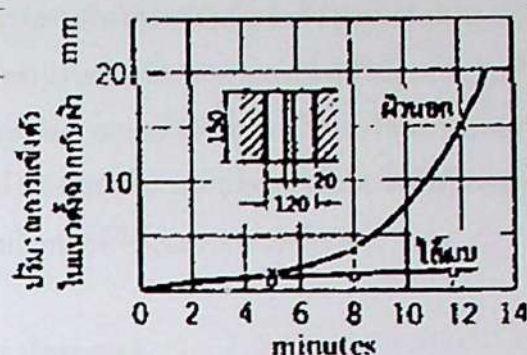


รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างกิ่งไม้

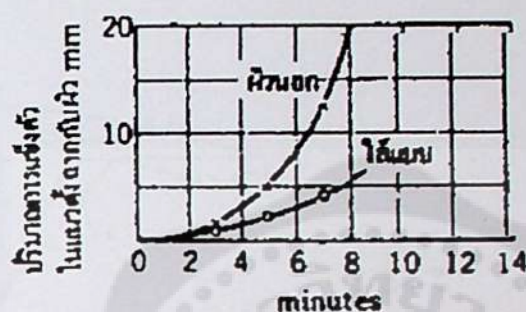
รูปที่ 2.7 แสดงระยะเวลาการแข็งตัวของหน้าตัดต่างๆกัน

การที่พบว่าผิวหน้าที่เหลือขรุขระหลังจากที่เทน้ำโลหะที่ยังไม่ทันแข็งตัวออกนั้นก็เพราะว่าน้ำโลหะที่อยู่ระหว่างโครงสร้างรูปกิ่งไม้ไหลออกมา ทำให้เห็นโครงสร้างรูปใบไม้ที่แข็งตัวแล้ว ผิวหน้าจึงขรุขระ บรอนซ์และเหล็กหล่อมีช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวกว้างดังนั้นผิวหน้าที่เห็นหลังจากเทน้ำโลหะออกจึงขรุขระ อลูมิเนียมบริสุทธิ์แข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่ แต่ความร้อนแฝงที่ได้รับปลดปล่อยออกในระหว่างการแข็งตัวมีมากจนทำให้ผิวหน้าขรุขระ ทั้งนี้สำหรับการหล่อที่ใช้แบบทราย ส่วนเหล็กเหนียวหล่อนั้นมีคาร์บอนเป็นปริมาณค่อนข้างต่ำ (0.5~2.0%) มีช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวแคบ ดังนั้นผิวหน้าที่เหลือจากการเทจะเรียบ

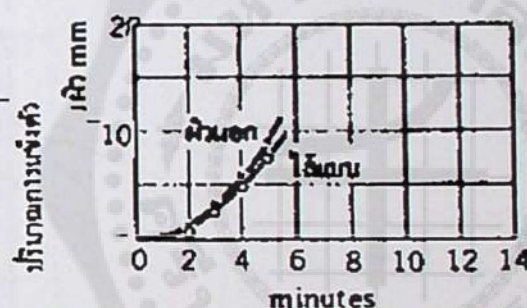




เส้นผ่าศูนย์กลางไส้แกน 20 mm.  
เส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงาน 120 mm.



เส้นผ่าศูนย์กลางไส้แกน 40 mm.  
เส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงาน 120 mm.



เส้นผ่าศูนย์กลางไส้แกน 60 mm.  
เส้นผ่าศูนย์กลางชิ้นงาน 120 mm.

รูปที่ 2.8 แสดงความแตกต่างระหว่างการแข็งตัวจากหน้าไส้แบบและจากผิวนอกเหล็กหล่อ  
1300°C แบบทรายแห้ง

การแข็งตัวของชิ้นงานโลหะค่อย ๆ เริ่มจากผิวนอกไปจนถึงตรงกลาง เวลาทั้งหมดในระหว่างการแข็งตัวจากผิวนอกถึงตรงกลางเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $V/S$  อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของชิ้นงาน  $V$  และพื้นที่ผิวนอก  $S$  ซึ่งเป็นส่วนของชิ้นงานที่ส่งความร้อนให้สิ่งแวดล้อม

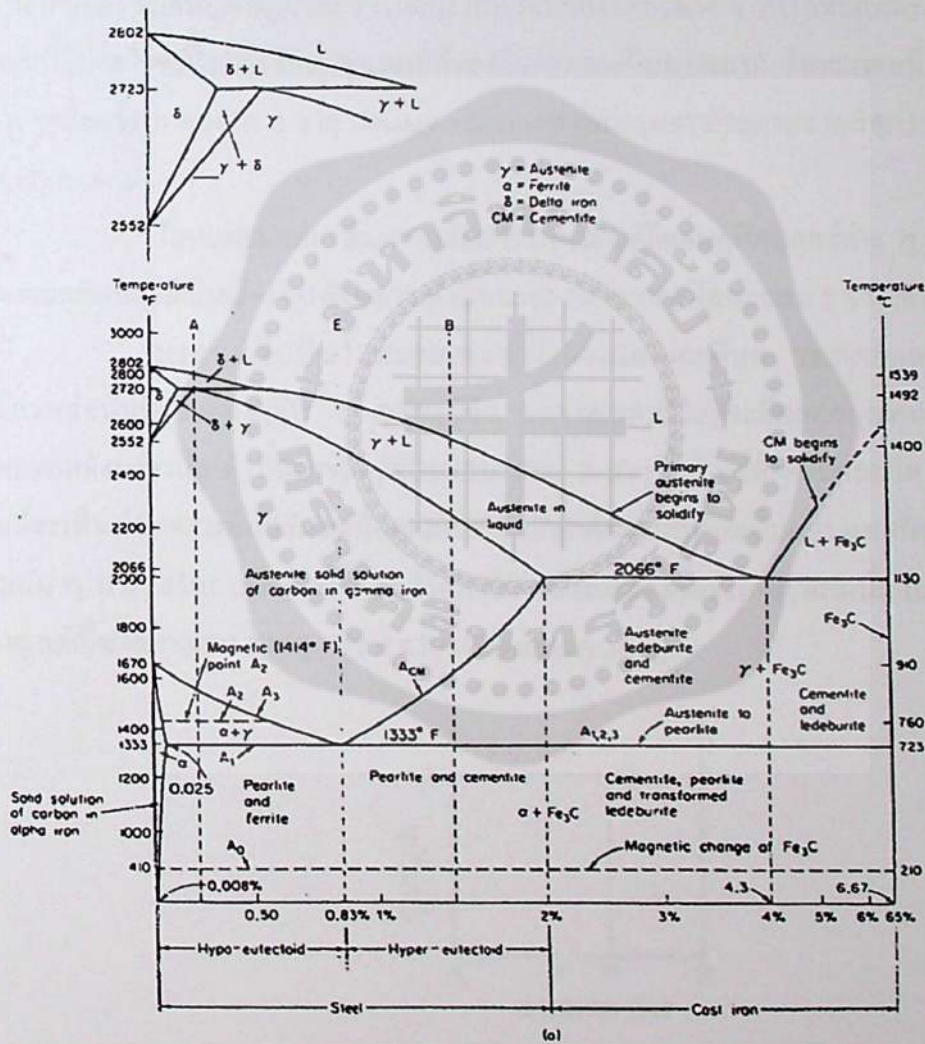
เพราะฉะนั้นไม่ว่ารูปร่างของชิ้นงานจะเป็นอย่างไร เช่นเป็นสี่เหลี่ยมตามเหลี่ยมหรือทรงกระบอก เวลาที่ต้องใช้ในการแข็งตัวจะเท่ากันถ้าค่า  $V/S$  เท่ากัน

ชิ้นส่วนที่มีรูปร่างเป็นกากะบาด มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ แต่มีพื้นที่ให้ความร้อนออกน้อย ยิ่งไปกว่านั้นแบบหล่อของชิ้นส่วนรูปร่างเช่นนี้จะร้อน ทำให้อัตราการดึงความร้อนจากงานหล่อต่ำ ดังนั้นเวลาทั้งหมดในระหว่างการแข็งตัวจึงมาก รูป 2.7 แสดงว่าเวลาในการแข็งตัวขึ้นกับขนาดและรูปร่างอย่างไร รูปแสดงเวลาในการแข็งตัวของเหล็กหล่อชนิดคุณภาพดีพิเศษ



อัตราการเติบโตของชั้นที่แข็งตัว (Solidified layer) ของโลหะจะสูงสำหรับส่วนที่อยู่ติดผิวนอกและจะต่ำสำหรับส่วนที่อยู่ภายใน แต่ถ้าใช้ไส้แบบจะไม่เป็นดังที่ว่านี้ถ้าใช้ไส้แบบที่เล็กตัวไส้แบบเองจะร้อนจัดและไม่สามารถดึงความร้อนไปจากโลหะ ดังนั้นการแข็งตัวจะเริ่มจากผิวนอกและต่อไปจนถึงไส้แบบ รูป 2.8 แสดงว่าการเติบโตของชั้นที่แข็งตัวกับขนาดของไส้แบบอย่างไร ตัวเลขที่แสดงเป็นตัวเลขสำหรับเหล็กหล่อที่ใช้แบบทราย (แห้ง) หล่อ

### แผนภูมิสมดุลของโลหะผสม



รูปที่ 2.9 แผนภาพสมดุลเหล็กคาร์บอน (Iron - carbon equilibrium diagram)



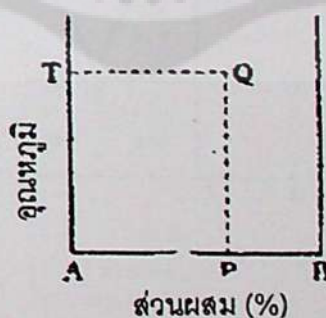
ความสัมพันธ์ในสภาพสมดุลตามธรรมชาติระหว่างเหล็กและคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุผสมที่มีใช้งานมากที่สุด ในแผนภาพ Fe-C equilibrium จะบอกถึงส่วนผสมของคาร์บอนในระดับปริมาณต่าง ๆ ในเนื้อเหล็ก

### คุณลักษณะของแผนภูมิสมดุล

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนก่อน ๆ โลหะผสมนั้นอาจประกอบด้วยสารละลายของแข็ง สารประกอบระหว่างโลหะและโลหะบริสุทธิ์ แผนภูมิสมดุลจะแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงในสภาพ (Phase) ขึ้นกับอุณหภูมิและส่วนผสม (สัดส่วนของโลหะต่าง ๆ ในโลหะผสม) อย่างไร แผนภูมินี้มีประโยชน์ในการศึกษาคุณสมบัติของโลหะผสมเป็นอย่างมาก โลหะผสมที่ประกอบด้วยสองธาตุเรียกว่าโลหะผสม 2 ธาตุ (Binary alloy) และถ้าประกอบด้วยสามธาตุเรียกว่าโลหะผสม 3 ธาตุ (Ternary alloy)

โลหะผสมแต่ละอันและแต่ละประเภทต่างก็มีแผนภูมิสมดุลต่าง ๆ กันไป เนื่องจากแผนภูมิสมดุลเป็นเรื่องซับซ้อนมาก ดังนั้นจะกล่าวถึงเฉพาะโลหะผสม 2 ธาตุเท่านั้น

บรอนซ์ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงและดีบุก และเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียวหล่อนั้นทั้งจริงมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่อีก แต่ธาตุเหล่านี้ไม่สู้จะมีผลต่อคุณสมบัติสำคัญของโลหะผสมดังกล่าวนัก ดังนั้นอาจถือว่าเป็นโลหะผสม 2 ธาตุนี้ได้ แต่ถ้าส่วนผสมใด ๆ ของโลหะถึงแม้จะเป็นส่วนผสมที่มีปริมาณน้อยแต่ถ้ามีอิทธิพลต่อคุณสมบัติเป็นอย่างมากก็จะต้องนำส่วนผสมนั้น ๆ มารวมในการพิจารณาด้วย ในกรณีดังกล่าวจะต้องถือว่าเป็นโลหะผสมนั้นไม่ใช่โลหะผสม 2 ธาตุ แต่เป็นโลหะผสม 3 ธาตุ หรือ 4 ธาตุ (Quaternary alloy)



รูปที่ 2.10 แสดงแผนภูมิสมดุลของโลหะผสม 2 ธาตุ

สำหรับแผนภูมิสมดุลของโลหะผสม 2 ธาตุ แกนตั้งคืออุณหภูมิและแกนออกแสดงอัตราส่วนผสมของโลหะผสม ดังนั้นรูป 2.9 จุด A และจุด B หมายถึงโลหะบริสุทธิ์ A และโลหะบริสุทธิ์ B จุด P ซึ่งอยู่ระหว่างจุด A และจุด B หมายถึงโลหะผสมที่มีโลหะ A อยู่ PB/AB







ดังนั้นเมื่อดูแผนภูมิสมมูลจะรู้ได้ทันทีว่าโลหะผสมที่แต่ละอุณหภูมิประกอบด้วยสภาพอะไรบ้าง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในสภาพต่างกันมาก แล้วแต่ชนิดของโลหะผสม ดังนั้นโลหะผสมแต่ละชนิดจึงมีแผนภูมิสมมูลของตัวเอง รูป 2.11 แสดงแผนภูมิสมมูลลักษณะต่าง ๆ ของโลหะผสม 2 ธาตุ ในรูปนี้จุดยูเทคติก (Eutectic point) หมายถึงสภาวะที่โลหะผสมเริ่มแข็งตัวและแข็งตัวเสร็จที่อุณหภูมิเดียว

สารละลายของแข็ง  $\alpha$  (แอลฟา) คือสารละลายของแข็งที่โลหะบริสุทธิ์ B ถูกกลืนอยู่ในโครงสร้างของโลหะบริสุทธิ์ A และสารละลายของแข็ง  $\beta$  (เบตา) คือสารละลายของแข็งที่โลหะบริสุทธิ์ A ถูกกลืนอยู่ในโครงสร้างของโลหะบริสุทธิ์ B

การเปลี่ยนแปลงแบบเพริเทคติก (Peritectic transformation) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่มีสภาพของแข็งใหม่เกิดขึ้นจากของเหลวและของแข็ง (ของแข็ง B ในรูป 2.11 (5) และสารละลายของแข็ง  $\beta$  ในรูป 2.11(6) ในขณะที่โลหะผสมสูญเสียความร้อน (cooling) ส่วนที่แข็งตัวก่อนจะมีสภาพเป็น B หรือ  $\beta$  และส่วนที่แข็งที่เหลือจะมีสภาพเป็นของแข็งที่เกิดขึ้นใหม่ โครงสร้างที่เกิดจากการแข็งตัวตามแบบนี้เรียกว่าโครงสร้างเพริเทคติก

ลำดับการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของเหล็กหล่อจากของเหลวจนเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง

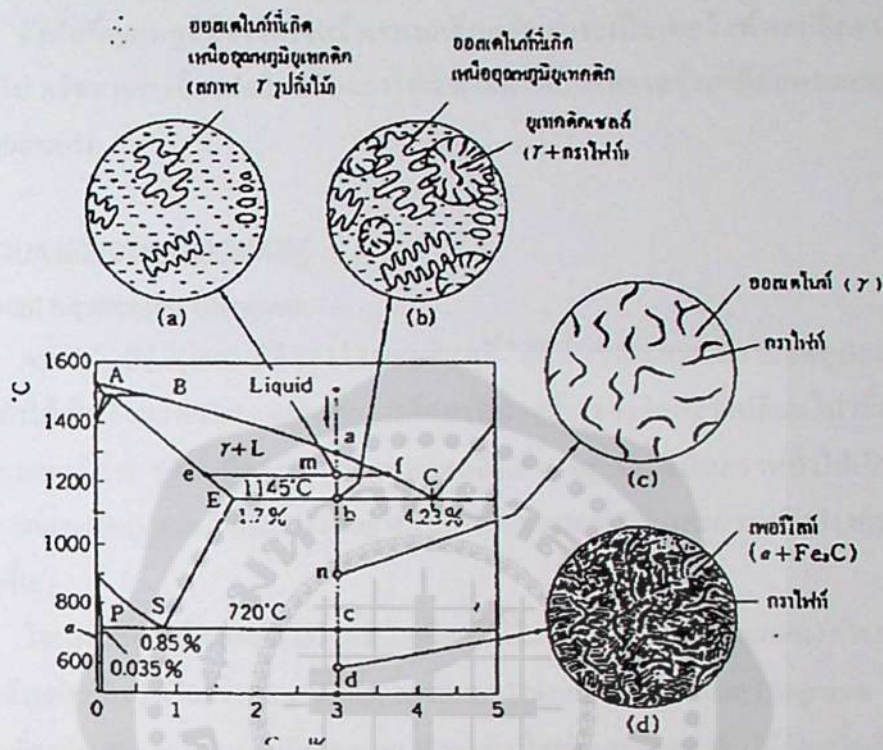
โครงสร้างของเหล็กหล่อขึ้นกับส่วนผสมระหว่างเหล็กและคาร์บอน รูป 2.12 เป็นแผนภูมิสมมูลของเหล็กคาร์บอน จะได้ศึกษาการแปลงในสภาพของเหล็กหล่อและศึกษาว่าโครงสร้างอะไรเกิดขึ้นเมื่อไร โดยเลือกพิจารณาเหล็กหล่อที่มีคาร์บอน 3% ตั้งแต่เริ่มแข็งตัวจนกระทั่งเย็นถึงอุณหภูมิห้อง

การแข็งตัวเริ่มต้นที่จุด a และสิ้นสุดลงที่จุด b ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิไม่คงที่ในขณะที่เกิดการแข็งตัว (Dendritic crystals) อยู่กับของเหลว สภาพของแข็งในสภาวะนี้คือสารละลายของแข็ง  $\gamma$  (แกมมา) ซึ่งมีสภาวะแทนได้ด้วยจุด c สารละลายของแข็งนี้เรียกว่าออสเตไนต์ (Austenite) ผลึกลักษณะรูปกิ่งไม้เกิดขึ้นก่อนผลึกชนิดอื่น จึงมีชื่อว่าผลึกไพรมารี (Primary crystals)

จุด c แสดง % ของคาร์บอนของออสเตไนต์ และจุด f แสดง % ของคาร์บอนของของเหลว เมื่ออุณหภูมิตกลงถึงจุด b จุด c จะแสดง % ของคาร์บอนของออสเตไนต์ และจุด c แสดง % ของคาร์บอนของของเหลว เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าจุด b ของเหลวที่เหลือจะเริ่มแข็งตัว เม็ดผลึกที่เกิดจากการแข็งตัวของของเหลวที่เหลือจะเป็นกราฟไฟต์ขึ้นเล็กน้อยกับออสเตไนต์ ดังที่เห็นในรูป b ผลึกที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เรียกว่า ผลึกยูเทคติกและเม็ดผลึกยูเทคติกที่เกิดขึ้นที่ละอานสองเรียกว่า



eutectic cell เมื่อผลึกยูเทคติกเหล่านี้ใหญ่ขึ้นเป็นลำดับ จนกระทั่งสัมผัสกับเม็ดยูเทคติกที่อยู่ข้าง ๆ เมื่อเสร็จสิ้นการแข็งตัว ในระหว่างการแข็งตัวอุณหภูมิจะคงที่ (ประมาณ  $1,145^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 2.12 แสดงแผนภูมิสมดุลของเหล็กคาร์บอน

โครงสร้างยูเทคติก (Eutectic structure) เกิดจากการที่โลหะผสมในสภาพของเหลว แข็งตัวที่อุณหภูมิเดียวกันทั้งหมด กล่าวโดยทั่วไปสภาพทั้งสองที่เกิดขึ้นจะอยู่สลับกันอย่างละเอียด แต่ว่าสำหรับเหล็กหล่อที่คาร์บอนจะมากขึ้นด้วยในขณะที่เม็ดผลึกยูเทคติกโตขึ้น ทำให้โครงสร้างกิ่งไม้ของออสเตไนต์ (ที่มีอยู่เดิม) เห็นไม่ชัดเจนนั้นในที่สุดโครงสร้างจะกลายเป็นออสเตไนต์โดยมีกราฟไฟต์กระจายอยู่ทั่วไป ดังในรูป (c)

เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า  $720^{\circ}\text{C}$  หลังจากที่ได้กลายเป็นของแข็งทั้งหมด สารละลายของแข็ง  $\gamma$  จะแตกออกเป็นสองสภาพคือสารละลายของแข็ง  $\alpha$  และ  $\text{Fe}_3\text{C}$  (Iron carbide) ปฏิกิริยานี้เรียกว่าการแปรสภาพแบบยูเทคตอยด์ (Eutectoid transformation) และมีชื่อเรียกเฉพาะว่าการแปรสภาพ A สำหรับโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน



สารละลายของแข็ง  $\alpha$  ที่เกิดจากการแปรสภาพนี้เรียกว่าเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และ ไอน์คาร์ไบด์ (Iron carbide)  $\text{Fe}_3\text{C}$  เรียกว่าซีเมนต์ไท์ (Cementite) ทั้งสองอย่างนี้เกิดเป็นชั้นสลับกันทำให้มีลักษณะเป็นลายเป็นสารละลายของแข็ง  $\alpha$  และกราไฟท์

ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องโครงสร้างของเหล็กหล่อเทาจะเป็นเฟอไรต์ และมีกราไฟท์กระจายอยู่ทั่วไป หรืออาจจะเป็นเฟอไรต์กับกราไฟท์ หรืออาจเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลาง ๆ ระหว่างทั้งสองอย่างแรก

## THERMAL-EQUILIBRIUM –DIAGRAMS

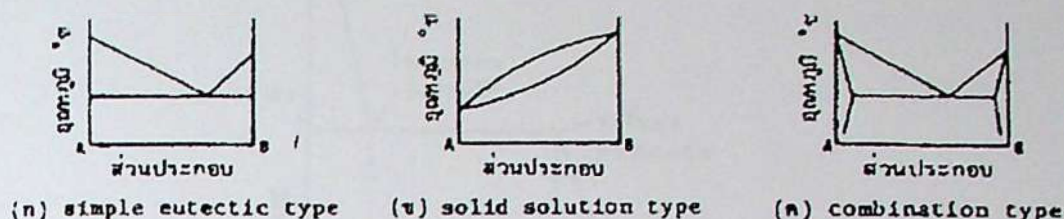
### การสร้าง Thermal Equilibrium Diagrams

การปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะบริสุทธิ์ ให้ดีขึ้นมีคุณสมบัติตามวัตถุประสงค์ อาจทำได้โดยทำให้เป็นโลหะผสม (Alloy) จากการศึกษาโครงสร้างของโลหะที่เปลี่ยนไป เมื่อองค์ประกอบและอุณหภูมิต่าง ๆ กัน เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟทำให้เกิดเป็น Thermal Equilibrium Diagrams ใช้เป็นบรรทัดฐานในการศึกษาคุณสมบัติ และการปรับปรุงคุณภาพของโลหะผสมขึ้น

โลหะผสมซึ่งประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด ทั้งนี้ไม่นับสิ่งเจือปน (Impurities) ต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการ โลหะดังกล่าวนี้เราเรียกว่า Binary alloy การศึกษา Thermal Equilibrium Diagrams ในขั้นต้นนั้นจะศึกษาเกี่ยวกับ Binary alloy เท่านั้น binary alloy ส่วนใหญ่จะละลายเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่ออยู่ในสภาวะของเหลว เมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง ถ้าโลหะทั้งสองไม่รวมตัวกัน เกิดเป็นการประกอบขึ้น โลหะผสม นั้นก็อาจอยู่ในสภาวะได้ 3 แบบคือ

1. โลหะทั้งสองต่างแยกตัวออกจากกันและกัน โดยเด็ดขาดเมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง Thermal Equilibrium Diagrams ของโลหะผสมชนิดนี้จะเป็นชนิด Simple eutectic
2. โลหะทั้งสองละลายเป็นเนื้อเดียวกันเมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง Thermal Equilibrium Diagrams ของโลหะผสมชนิดนี้จะเป็นชนิด Solid-solution
3. โลหะทั้งสองละลายเข้ากันเป็นเนื้อเดียวบางส่วนเมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง Thermal Equilibrium Diagrams ของโลหะผสมชนิดนี้ จะเป็นแบบ Combination ดังแสดงตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด ในรูปที่ 2.13

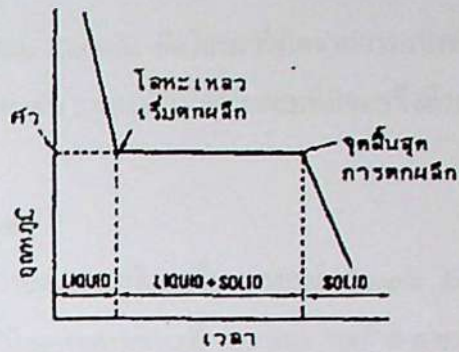




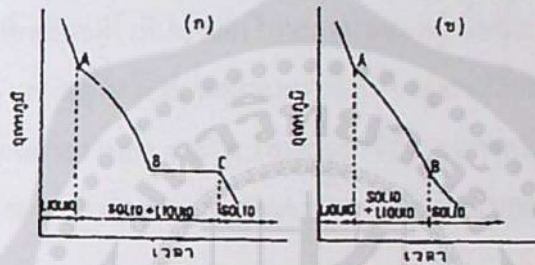
รูปที่ 2.13 แสดง Binary Equilibrium Diagrams ชนิดต่าง ๆ ของโลหะผสม

การสร้าง Thermal Equilibrium Diagrams อาจสร้างได้จาก Cooling curves ของโลหะและโลหะผสมที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ กัน Cooling curve ของโลหะบริสุทธิ์ จะมีจุดเริ่มแข็งตัวและจุดสิ้นสุดการแข็งตัว ณ อุณหภูมิเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.13 ส่วน Cooling curve ของโลหะผสมจะมีการแข็งตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าโลหะผสมที่มี Thermal Equilibrium Diagrams ชนิดที่มีจุด Eutectic จะมีการแข็งตัวโดยอุณหภูมิคงที่ ณ จุด Eutectic นั้น ตัวอย่างการสร้าง Thermal Equilibrium Diagrams จาก Cooling curve ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 โลหะผสมที่นำมาหา Cooling curve ในที่นี้คือ โลหะผสมที่มีองค์ประกอบของ A และ B เป็น 80% A 20% B 60% A 40% B 40%A60%B และ 20%A80%B จาก Cooling curve เหล่านี้เมื่อโยงจุดที่โลหะเริ่มแข็งตัวเข้าด้วยกันจะได้เส้น Liquidus curves ซึ่งเป็นเส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของโลหะจากของเหลวเป็นของแข็ง และเมื่อโยงจุดที่สิ้นสุดการแข็งตัวของโลหะเข้าด้วยกันจะได้เส้น Solidus curves โลหะที่อยู่ระหว่างเส้น Liquidus curves และ Solidus curves จะเป็นของแข็งปนกับของเหลว ส่วนโลหะที่อยู่ใต้เส้น Solidus curves จะเป็นของแข็งทั้งหมด จากเส้น Liquidus curves AC จะเห็นว่าเมื่อ % B เพิ่มขึ้น อุณหภูมิแข็งตัวของโลหะจะลดลง ในทำนองเดียวกันทางด้านเส้น Liquidus curve CB จะเห็นว่าเมื่อ % A เพิ่มขึ้น อุณหภูมิแข็งตัวของโลหะก็จะลดลงเช่นกัน โลหะผสมที่มีองค์ประกอบ ณ จุด C จะมีอุณหภูมิในการแข็งตัวต่ำที่สุด โลหะผสมดังกล่าวนี้เราเรียกว่าพร้อมกันโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง เกิดเป็นผลึกของโลหะ A บริสุทธิ์และโลหะ B บริสุทธิ์ ตกกลับกันไปมา ด้วยสัดส่วนของโลหะ A และ B ณ จุด Eutectic นั้น การแข็งตัวของโลหะผสม ณ จุด Eutectic นี้ นอกจากแข็งตัวในลักษณะดังกล่าวแล้ว อาจจะมีแข็งตัวในลักษณะเป็นโลหะผสมเนื้อเดียวกันตลอดหรืออาจจะแข็งตัวในลักษณะเป็นสารประกอบก็เป็นได้





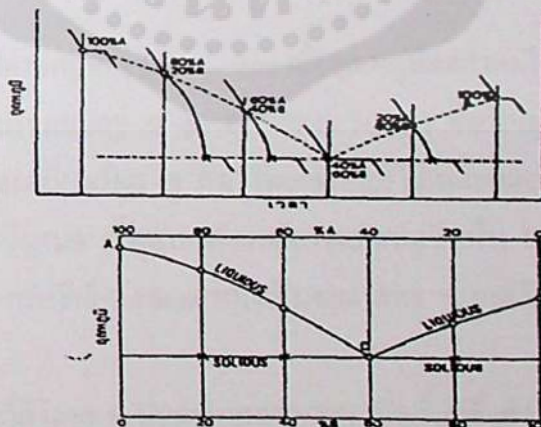
รูปที่ 2.14 แสดง Cool curve ทั่วไปของโลหะบริสุทธิ์



รูปที่ 2.15 แสดง

(ก) Cooling curve ของโลหะผสม 2 ชนิดที่มี Equilibrium Diagrams แบบ Eutectic Type

(ข) Cooling curve ของโลหะผสม 2 ชนิดที่มี Equilibrium Diagrams แบบ Solid solution Type



รูปที่ 2.16 แสดงการสร้าง Equilibrium Diagram ชนิด Simple Eutectic Type จาก Cooling curves



โลหะผสม Eutectic คือโลหะที่เกิดจากการแข็งตัวโดยมีอุณหภูมิคงที่เป็นของแข็งที่มี Phase มากกว่า หรือเท่ากับ 2 และเป็นโลหะผสมที่มีจุดแข็งตัวต่ำที่สุดในโลหะผสมชนิดนั้น ๆ

### Simple Eutectic Diagram

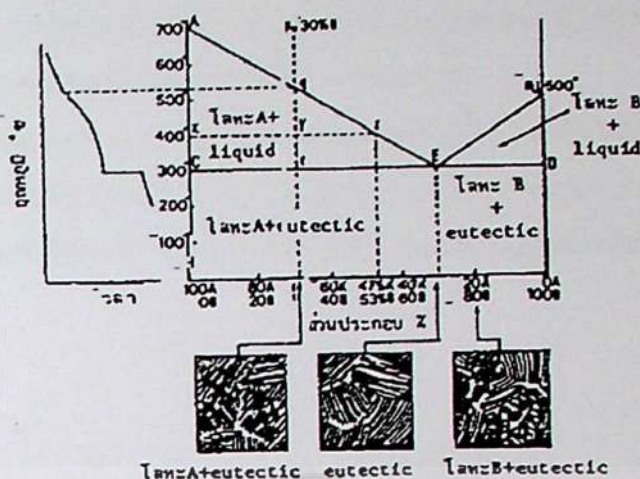
เพื่อให้เข้าใจต่อการอธิบายจึงขอสมมุติ Simple Eutectic Diagram ที่ประกอบด้วยโลหะ A และโลหะ B ที่มีจุดหลอมเหลวที่  $700^{\circ}\text{C}$  และ  $500^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ โลหะทั้งสองเกิดเป็นโลหะ Eutectic ซึ่งมีจุดหลอมเหลว  $300^{\circ}\text{C}$  และมีองค์ประกอบ เป็น 70% B 30% A ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ถ้าพิจารณาโลหะหลอมเหลวที่มีองค์ประกอบ 30% B 70% A เมื่ออุณหภูมิค่อย ๆ ลดต่ำลงจนถึงจุด q บนเส้น Liquidus curve โลหะ A จะเกิดตกผลึกขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงผลึกของโลหะ A จะเกิดมากยิ่งขึ้น โลหะเหลวที่เหลืออยู่จึงมี % ของโลหะ B ผสมอยู่เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อย ๆ สัดส่วนของโลหะ B ที่มีอยู่ในโลหะหลอมเหลวที่เหลืออยู่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้น Liquidus curve qE เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึง  $400^{\circ}\text{C}$  โลหะผสมที่พิจารณาจะมีผลึกของโลหะ A ปนกับของเหลวที่มีองค์ประกอบ ณ จุด Z คือ 53% B 47% A น้ำหนักสัมพัทธ์ของของแข็ง ต่อของเหลว อาจหาได้โดย

$$\frac{\text{น้ำหนักของของแข็ง}}{\text{น้ำหนักของของเหลว}} = \frac{yz}{xy} = \frac{23}{30}$$

ทั้งนี้เป็นไปตามกฎของ Lever – arm เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงไปเรื่อย ๆ จนถึง  $300^{\circ}\text{C}$  ของเหลวที่เหลืออยู่จะมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด E (70%B 30%A) ซึ่งเป็นจุด eutectic ณ จุดนี้ทั้งโลหะ A และโลหะ B จะตกผลึกพร้อม ๆ กัน โดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงด้วยสัดส่วน 70%B 30%A เรื่อยไปจนเป็นของแข็งหมด เมื่อนำมาส่องกล้องจุลทรรศน์จึงเห็น Dendrites ของโลหะ A และ Eutectic Eutectic นี้ต้องนับว่ามี 2 Phase หนึ่งเป็นของโลหะ A และอีก Phase หนึ่ง เป็นของโลหะ B

โลหะผสมที่มีโลหะ B ปนอยู่มากกว่า 70% เมื่อเริ่มแข็งตัว โลหะ B จะตกผลึกเป็นของแข็งออกมาก่อน โลหะเหลวที่เหลือจะมี % ของโลหะ A เพิ่มขึ้น ๆ เมื่ออุณหภูมิลดลง ๆ โลหะเหลวที่เหลือจะมีองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไปตามเส้น Liquidus curve EB จนกระทั่งถึงจุด Eutectic E ณ จุดนี้ โลหะเหลวที่เหลือจะแข็งตัวโดยตกเป็นผลึกของโลหะ A และโลหะ B โดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงและด้วยสัดส่วนดังกล่าว

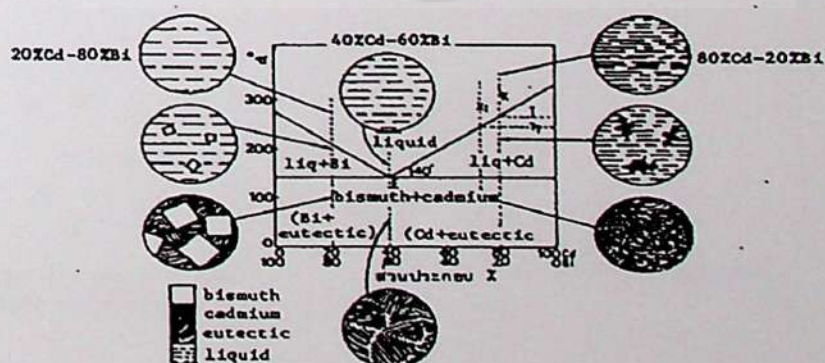




รูปที่ 2.17 แสดง Thermal Equilibrium Diagrams ชนิด Simple Eutectic Type

การประมาณค่าองค์ประกอบของโลหะผสมอาจทำได้โดยตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ เช่นในกรณีนี้ ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าปริมาณโลหะ A และ eutectic เท่า ๆ กัน อาจกล่าวได้ว่าโลหะผสมมีองค์ประกอบอยู่กึ่งกลางระหว่าง 0 และ 70% B นั่นคือมีองค์ประกอบ เป็น 35% B 65% A

ตัวอย่างโลหะผสมที่มี Thermal Equilibrium Diagrams แบบ Simple eutectic คือ โลหะผสมระหว่างบิสมัทกับแคดเมียม ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และโลหะผสมระหว่างสังกะสี กับ ดีบุก โลหะผสม Eutectic ส่วนใหญ่นำมาใช้กันกว้างขวางในการบัดกรีอ่อน การบัดกรีแข็ง และการหล่อ

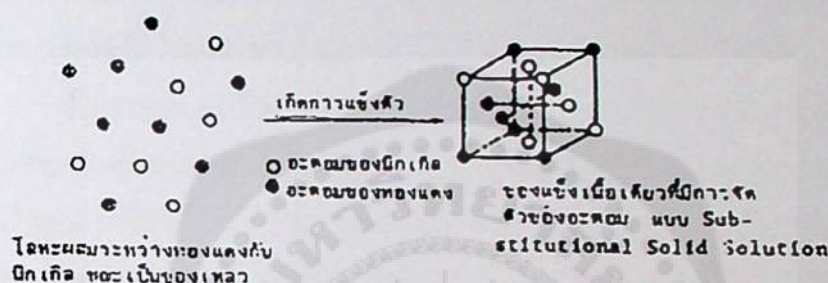


รูปที่ 2.18 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมระหว่างบิสมัทกับแคดเมียม



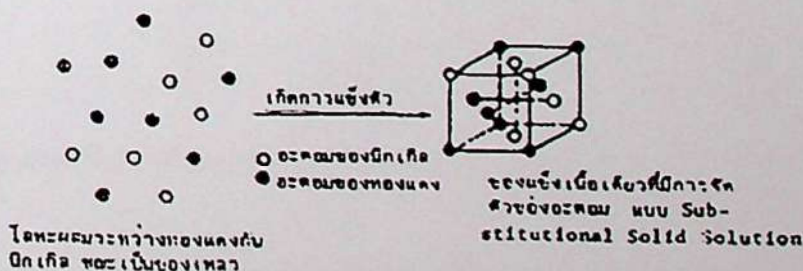
โลหะผสมชนิด Solid – solution เนื้อโลหะจะเป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด ถึงแม้จะนำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ตรวจพิจารณาาก็ไม่อาจสังเกตเห็นความแตกต่าง เนื่องจาก โลหะทั้งสองรวมตัวเป็น phase เดียว โลหะผสมชนิดนี้อาจแยกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. Substitutional Solid Solutions โลหะผสมชนิดนี้จะละลายเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันตลอด โดยอะตอมของโลหะที่ผสมจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเกือบเท่ากันกับอะตอมของโลหะหลัก (base metal) และจะเข้าไปแทนที่อะตอมของโลหะหลักในผลึก ดังแสดงให้เห็นชัดเจนในรูป 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงการจัดตัวของอะตอมของโลหะผสมประเภท Substitutional Solid Solution

2. Interstitial Solid Solution โลหะผสมชนิดนี้อะตอมของโลหะที่ผสมจะมีขนาดเล็กกว่าอะตอมของโลหะหลักมาก และอะตอมดังกล่าวจะแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างอะตอมของผลึกโลหะหลัก ตัวอย่างการละลายในลักษณะนี้ได้แสดงให้เห็นชัดเจนขึ้นในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงการจัดตัวของอะตอมของโลหะผสมประเภท Interstitial Solid Solution

ในโลหะผสมที่มีโลหะมากกว่า 2 ชนิดมาผสมกันอยู่ ลักษณะการละลายอาจเกิดได้ทั้งสองแบบตัวอย่างเช่น Austenitic manganese steel โลหะ Manganese จะละลายอยู่ในเหล็ก ใน

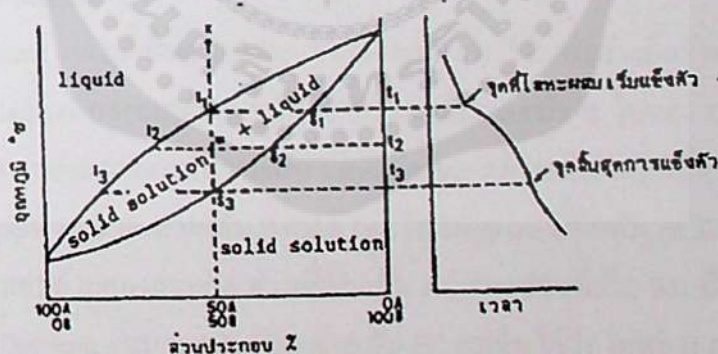


ลักษณะ Substitutional solid solution ส่วนคาร์บอนจะละลายอยู่ในเหล็กแบบ Interstitial solid solution

### Solid – Solution Diagram

การสร้าง Diagram แบบ Solid – solution นี้ก็สร้างมาจาก Cooling curve ในลักษณะเดียวกับ การสร้าง Simple – eutectic diagram ลักษณะโดยทั่ว ๆ ไปของ Solid solution diagram ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 โดยการโยงจุดที่โลหะผสมเริ่มแข็งตัวซึ่งแสดงใน Cooling curve เข้าด้วยกันจะได้ เส้นโค้งทางด้านบนคือเส้น Liquidus curve ส่วนเส้นทางด้านล่างคือเส้น Solidus curve ได้จากการโยงจุดที่โลหะผสมสิ้นสุดการแข็งตัวใน Cooling curve เข้าด้วยกัน

ถ้าพิจารณาการเย็นตัวของโลหะผสม ณ จุด  $x$  ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น 50% A 50%B เมื่อโลหะผสมเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิ  $t_1$  โลหะผสมที่มีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด  $s_1$  จะกลายเป็นของแข็งโลหะที่แข็งที่เกิดขึ้น จะมีสัดส่วนของโลหะ B ผสมอยู่มากกว่าเดิม เมื่ออุณหภูมิลดการแข็งตัวของโลหะจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ สัดส่วนของโลหะ B ในโลหะเหลวที่เหลืออยู่จะลดลงไปเรื่อย ๆ ตามเส้น Liquidus curve ส่วนโลหะแข็งที่เกิดขึ้นก็จะมีสัดส่วนของโลหะ B ลดลงไปตามเส้น Solidus curve เช่นกันเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิ  $t_2$  โลหะแข็งที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบ ณ จุด  $s_2$  คือ 50% A 50% B โลหะเหลวหยุดสุดท้ายที่เหลืออยู่จะมีองค์ประกอบ ณ จุด  $l_2$



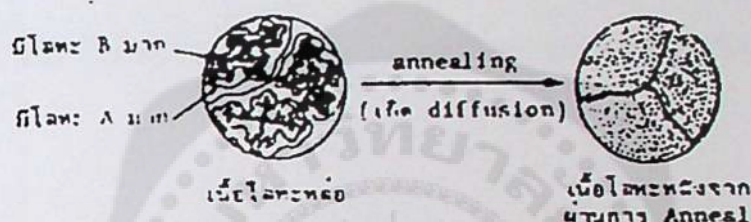
รูปที่ 2.21 การสร้าง Thermal Equilibrium Diagram ชนิด Solid Solution Type จาก Cooling Curves

ในขณะที่อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิ  $t_2$  โลหะเหลวบางส่วนจะอยู่ในสภาพของแข็ง น้ำหนักสัมพัทธ์ระหว่างโลหะแข็งและโลหะเหลวที่เหลืออยู่อาจหาได้จาก

$$\frac{\text{น้ำหนักของโลหะที่แข็งตัว}}{\text{น้ำหนักของโลหะเหลวที่เหลืออยู่}} = \frac{l_2}{s_2}$$



จากลักษณะการกลายเป็นของแข็งของโลหะเหลวดังกล่าว จะเห็นได้ว่าอัตราการเย็นตัวมีผลต่อลักษณะเนื้อของโลหะหล่อ ถ้าโลหะเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ทำให้อะตอมของโลหะผสมแพร่กระจายไปในเนื้อโลหะหลักได้ทันเนื้อโลหะหล่อจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันตลอด แต่อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติมักไม่อาจเป็นไปดังกล่าวได้ เนื่องจากโลหะจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เนื้อโลหะค้ำยมีแกนอยู่ภายในดังแสดงในรูปที่ 2.21 แกนดังกล่าวอาจทำให้หายไปได้โดยนำโลหะมาทำ Annealing เพื่อให้อะตอมของเนื้อโลหะแพร่กระจายเข้ากัน ตัวอย่างของโลหะผสมที่มี Diagram แบบนี้ได้แก่ โลหะผสมของทองแดงกับนิกเกิล ดังแสดงในรูปที่ 2.22 บิสมัทกับแอนนิโมนี และทองกับเงิน

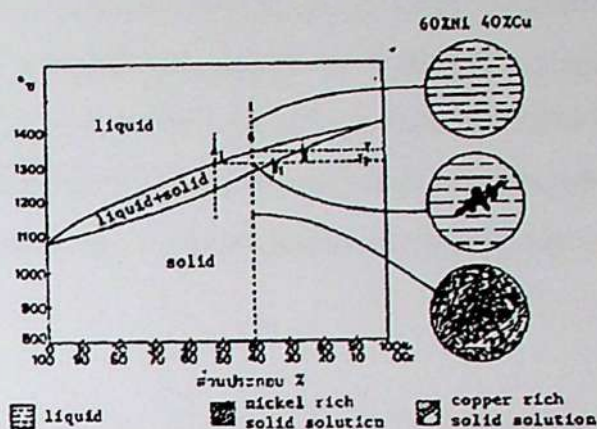


รูปที่ 2.22 ผลของการ Annealing ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างของโลหะผสม ชนิด Solid SolutionType ที่ผ่านมาหล่อมาแล้ว

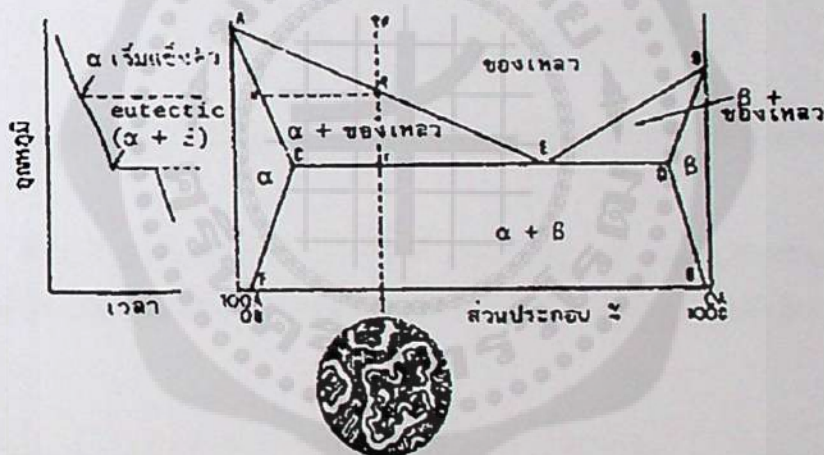
### Combination-Type Diagram

Diagram แบบนี้เป็นแบบผสมของสองแบบแรก วิธีการสร้างก็สร้างจาก Cooling curve เช่นเดียวกับ Diagram สองแบบแรก รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะทั่ว ๆ ไปของ Diagram แบบ Combination-type จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่ามีส่วน Liquidus line คล้ายคลึงกันกับเส้น Liquidus line ใน Diagram แบบ Dimple eutectic ส่วนเส้น Solidus line ใน Diagram นี้คือเส้น ACEDB จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นเส้น AC และส่วนที่เป็น BD ซึ่งคล้ายคลึงกับเส้น Solidus line ใน Diagram แบบ Solidus line จากเส้น FC จะเห็นว่า โลหะ B สามารถละลายได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิของ Eutectic ในทำนองเดียวกัน จากเส้น GD ก็ จะเห็นว่า โลหะ A สามารถละลายได้มากขึ้นเช่นกัน ถ้ากำหนดให้  $\alpha$  เป็นตัวแทนโลหะผสมเนื้อเดียว ที่มีโลหะ A ผสมอยู่มากและ  $\beta$  เป็นตัวแทนโลหะผสมเนื้อเดียวที่มีโลหะ B ผสมอยู่มาก โลหะผสม Eutectic ที่มีองค์ประกอบ ณ จุด E จึงประกอบด้วย  $\alpha$  และ  $\beta$  ดังแสดงในรูปที่ 2.23





รูปที่ 2.23 Equilibrium Diagram ของโลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล

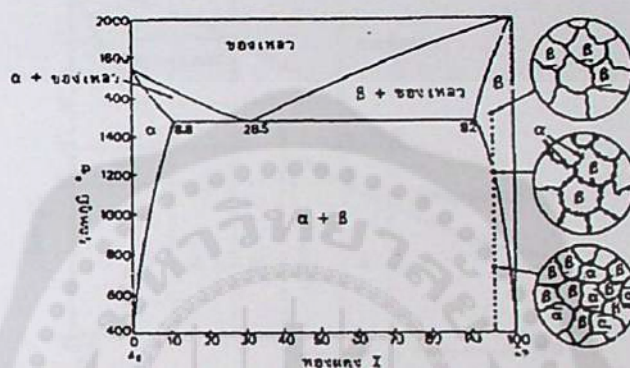


รูปที่ 2.24 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมสองชนิดซึ่งละลายเข้าเป็นของแข็งเนื้อเดียวเพียงบางช่วง

ถ้าพิจารณาการเย็นตัวของโลหะผสมที่มีองค์ประกอบ ณ จุด p เมื่ออุณหภูมิของโลหะผสมเย็นตัวลงจนถึงจุด q บนเส้น Solidus line โลหะผสมเนื้อเดียวที่มีองค์ประกอบ ณ จุด s จะตกเป็นของแข็ง เมื่ออุณหภูมิต่ำลงเรื่อย ๆ องค์ประกอบของของแข็งที่เกิดขึ้นจะเลื่อนไปตามเส้น AC ในขณะที่โลหะเหลวที่เหลือจะเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบไปตามเส้น AE เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนถึงจุด E ซึ่งเป็นอุณหภูมิ Eutectic โลหะผสมจะประกอบด้วย  $\alpha$  ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นของแข็งกับโลหะเหลวที่เหลือที่มีองค์ประกอบ ณ จุด E โลหะผสมจะแข็งตัวเป็น  $\alpha$  และ  $\beta$  = ED : CE เมื่อ

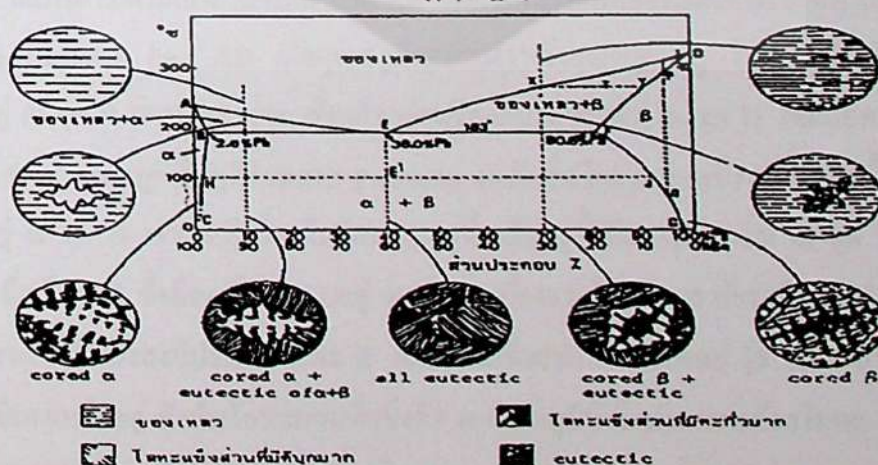


อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ Eutectic โลหะผสม  $\alpha$  และ  $\beta$  จะมีปริมาณโลหะ A และโลหะ B ผสมอยู่น้อยลงตามลำดับ ณ อุณหภูมิห้องโลหะผสม  $\alpha$  และ  $\beta$  จะมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด F และ G ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในโลหะผสมเมื่ออุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ Eutectic จะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้น CF และ DG และระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามเส้น CF  $\beta$  จะแยกตัวออกมา ในทำนองเดียวกันระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามเส้น DG  $\alpha$  ก็จะแยกตัวออกมาเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมของเงินกับทองแดง

ตัวอย่างของโลหะผสมที่รวมตัวกันโดยมี Diagram ของโลหะผสมของเงินกับทองแดง ได้แก่ โลหะผสมระหว่างตะกั่วกับดีบุก ดังแสดงในรูป 2.26 ทองแดงกับเงิน และบิสมาท์กับดีบุก

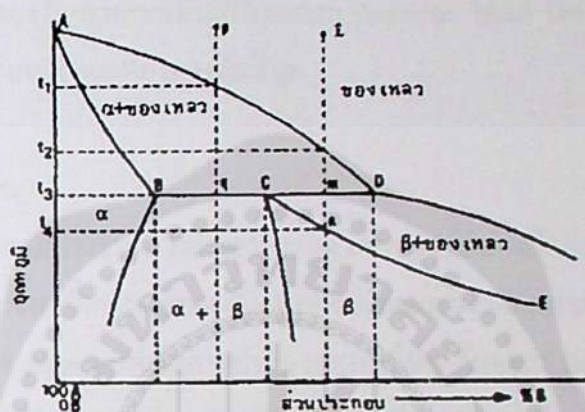


รูปที่ 2.26 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมระหว่างดีบุกกับตะกั่ว



### Peritectic Reactions

โลหะผสมบางชนิดเมื่อเย็นตัวลง โลหะแข็งที่เกิดขึ้นอาจทำปฏิกิริยากับโลหะเหลวที่เหลืออยู่เกิดเป็นโลหะผสมเนื้อเดียวชนิดใหม่ หรือเกิดเป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบอยู่ระหว่างโลหะต้นแบบทั้งสองนั้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเรียกว่า Peritectic transformation และเกิดขึ้นโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างของ diagram ที่มี Peritectic transformation ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดง Equilibrium Diagram ส่วนหนึ่งของโลหะผสมสองชนิด ซึ่งมี Peritectic Reaction

เมื่อพิจารณาการเย็นตัวลงของโลหะผสมที่มีองค์ประกอบ ณ จุด p เมื่ออุณหภูมิของโลหะเหลวลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิ  $T_1$   $\alpha$  ที่มีองค์ประกอบ ณ จุด s จะแข็งตัว องค์ประกอบของ  $\alpha$  จะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้น Solidus line AB โลหะเหลวที่เหลือจะมีองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไปตามเส้น Liquidus line AD เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิ  $T_2$  โลหะที่แข็งตัวจะมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด B ส่วนโลหะเหลวที่เหลืออยู่จะมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด D โดยมีอัตราส่วนเท่ากับ  $qD : qB$  ณ อุณหภูมินี้ปฏิกิริยาแบบ Peritectic จะเกิดขึ้นโดยโลหะแข็ง  $\alpha$  ที่เกิดขึ้นซึ่งมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด B จะทำปฏิกิริยากับโลหะเหลวที่เหลืออยู่ซึ่งมีองค์ประกอบ ณ จุด D เกิดเป็นโลหะแข็งเนื้อเดียว  $\beta$  ซึ่งมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด C เนื่องจากโลหะเหลวที่เราพิจารณาการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่เย็นตัวลงมีปริมาณโลหะ B ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดโลหะ  $\beta$  หหมด บางส่วนของโลหะ  $\alpha$  จึงคงเหลืออยู่ ดังนั้นโลหะผสมที่แข็งตัว ณ อุณหภูมินี้ จึงประกอบด้วยโลหะ  $\alpha$  และ  $\beta$  ซึ่งมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด B และ C ตามลำดับ

ในทำนองเดียวกันถ้าพิจารณาโลหะผสมที่มีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด l จะเห็นว่าโลหะผสม มีปริมาณโลหะ B มากเกินพอที่จะทำให้เกิดโลหะ  $\beta$  หหมด เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึง

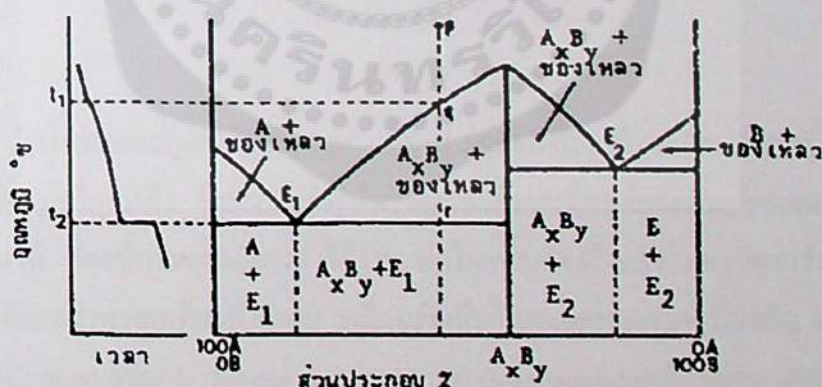


อุณหภูมิ  $t_2$  โลหะบางส่วนจะแข็งตัว เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึง  $t_2$  โลหะเนื้อเดียว  $\alpha$  ที่แข็งตัว จะมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด B ส่วนโลหะเหลวที่เหลือจะมีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด D อัตราส่วนระหว่างของแข็ง : โลหะเหลวจะเท่ากับ  $mD : mB$  ณ อุณหภูมินี้ ปฏิกริยา Peritectic จะเกิดขึ้นต่อเนื่องไปจนกระทั่งโลหะเนื้อเดียว  $\alpha$  หหมด เหลือโลหะเนื้อเดียว  $\beta$  และโลหะเหลวบางส่วน เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงต่อไป โลหะ  $\beta$  จะเกิดขึ้นโดยมีองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไปตามเส้น Solidus line CE เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิ  $t_1$  โลหะทั้งหมดจะแข็งตัวโดยมีองค์ประกอบ ณ จุด I

ตัวอย่างของโลหะผสมที่มีปฏิกริยาแบบ Peritectic ได้แก่ โลหะผสมระหว่างเหล็กกับคาร์บอน ทองแดงกับสังกะสี และทองแดงกับดีบุก

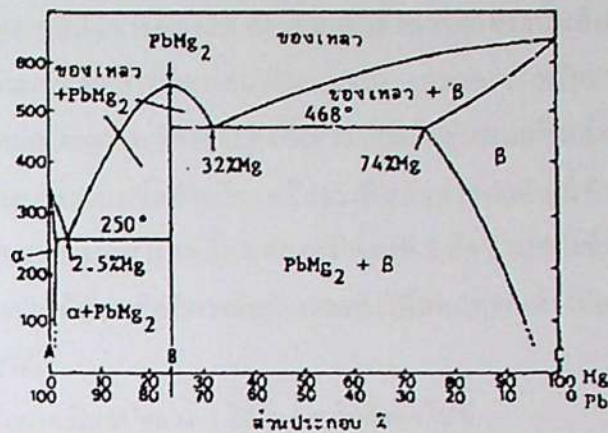
### Intermetallic Compounds

ในโลหะผสมบางชนิด โลหะอาจรวมตัวกันทางเคมีเกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า Intermetallic Compounds ขึ้น เมื่อนำมาต้องกลึงจุดที่สนิมมักจะพบว่ามีลักษณะเป็นชั้นดีหุ้มผิวน้ำ รูปที่ 3.16 เป็นตัวอย่าง diagram ที่เกิดสารประกอบแบบนี้ขึ้น ลักษณะ Diagram อาจจะเห็นได้ว่าคล้ายกันมี Simple eutectic diagram 2 อัน มาวางต่อกัน สารประกอบและโลหะเมื่อเป็นของแข็งจะไม่ละลายกันและกันโดยเด็ดขาด ตัวอย่าง Diagram แบบนี้ได้แก่ Diagram ของโลหะผสมระหว่างแมกนีเซียมกับซิลิคอน และแมกนีเซียมกับตะกั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดง Equilibrium Diagram ของโลหะผสมสองชนิด แสดง Intermetallic Compound ที่เกิดขึ้น





รูปที่ 2.29 Equilibrium Diagram ของโลหะผสมระหว่างแมกนีเซียมกับตะกั่ว

เมื่อพิจารณาการเย็นตัวของโลหะผสมที่มีองค์ประกอบอยู่ ณ จุด  $p$  ผลึกของสารประกอบ  $A_xB_y$  จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิ  $t_1$  เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงต่อมาสสารประกอบที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณโลหะ A เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่เกิดขึ้น จะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้น Solidus line จนถึงจุด eutectic ถ้าอุณหภูมิลดต่ำลงต่อมาถึงโลหะ A และสารประกอบ  $A_xB_y$  จะเกิดเป็นของแข็งพร้อมกันโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสารประกอบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นสั้เหลี่ยมละเอียดก็จะแข็งแรงขึ้น

### เหล็กหล่อ

ในโลหะตระกูลเหล็กทั้งหมด เหล็กหล่อจะเป็นเหล็กที่นิยมใช้มากที่สุด ทั้งนี้ นอกจากจะมีราคาถูกที่สุดแล้ว ชิ้นงานหล่อรูปพรรณที่ทำด้วยเหล็กหล่อยังสามารถออกแบบให้มีลักษณะซับซ้อนได้ โดยที่การหล่อยังคงทำได้ง่าย แม้โดยข้อเท็จจริงแล้วโลหะวิทยาว่าด้วยเหล็กหล่อจะสลับซับซ้อนกว่าพวกเหล็กกล้าก็ตาม เหล็กหล่อเป็นโลหะผสมของธาตุที่สำคัญ 4 ชนิด คือ เหล็ก คาร์บอน (Carbon) ซิลิกอน (Silicon) และแมงกานีส (Manganese) เหล็กหล่อบางชนิดที่นำไปใช้ในงานเฉพาะอย่างอาจจะมีโลหะอื่นผสมอยู่ด้วยก็ได้

โดยที่รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่จะหล่อมีส่วนควบคุมอัตราการแข็งตัว (Solidification rate) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติด้านเทนไซล์สเตร้ง (Tensile strength) ของเหล็กหล่อ การเลือกชนิดและข้อกำหนดจึงต้องพิจารณาทั้งการออกแบบของชิ้นงานและขบวนการหล่อด้วย ในขณะที่งานหล่อด้วยโลหะอื่นมักจะกำหนดในสเปคด้วยสัดส่วนประกอบทางเคมี แต่สำหรับเหล็กหล่อแล้วแม้จะมีส่วนประกอบทางเคมีเหมือนกันทุกประการก็อาจจะมีคุณสมบัติทาง



กลต่างกันได้ ทั้งนี้ขึ้นกับขบวนการผลิต รูปร่างและขนาดของชิ้นงาน ดังนั้น ข้อกำหนดของเหล็กหล่อจึงมักกำหนดด้วยคุณสมบัติทางกล เช่น การทนแรงดึงความแข็ง เป็นต้น สำหรับงานหล่อที่จะนำไปใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น ทนการสึกกร่อน (Corrosion resistance) หรือทนการสึกหรอ (Wear resistance) ก็อาจจะกำหนดโลหะที่จะต้องผสมลงไปด้วย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเหล่านั้น

ปริมาณคาร์บอนหรือถ่านในเหล็กจะเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เหล็กหล่อบริเวณคุณสมบัติต่าง ๆ กัน ปริมาณคาร์บอนในเหล็กหล่อจะมีตั้งแต่ 2 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ถ้าปริมาณคาร์บอนสูง ก็จะทำให้เหล็กมีความเหนียวมากทำให้มันแทรกเข้าไปตามช่องเล็กช่องน้อยหรือช่องบาง ๆ และแคบได้ดี

เหล็กหล่อยังแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ถึง 5 ชนิดดังต่อไปนี้

1. เหล็กหล่อเทา (Gray iron)
2. เหล็กหล่อขาว (White iron)
3. เหล็กหล่อเหนียว (Ductile iron) หรือเหล็กหล่อเกรนไฟต์กลม (Nodular iron)
4. เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable iron)
5. เหล็กหล่อโลหะผสม (Alloy cast iron)

#### เหล็กหล่อสีเทา (Gray cast iron)

เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมและโครงสร้างใกล้เคียงกับเหล็กดิบ (Pig iron) ที่ถลุงจากเตาสูง (Blast furnace) ในบางโอกาสอาจจะผลิตเหล็กหล่อสีเทาจากเหล็กดิบโดยตรง โดยปราศจากการปรับปรุงส่วนผสมใด ๆ หรือไม่ก็อาจจะนำเหล็กดิบมาหลอมใหม่ในเตาพ่นลม (Cupola) หรือเตาไฟฟ้า แล้วปรับปรุงส่วนผสมบ้างเล็กน้อย เพื่อให้เหล็กหล่อบริเวณคุณภาพดีขึ้น ทำให้เหล็กหล่อสีเทามีราคาถูกเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ นอกจากนี้เหล็กหล่อสีเทายังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมอีกหลายประการ เช่น

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



ที่เรียกว่าเหล็กหล่อสีเทาเพราะเหล็กหล่อชนิดนี้เมื่อตีหักดูเนื้อเหล็กตรงรอยหักจะมีลักษณะเป็นสีเทาซึ่งต่างกับเหล็กสีขาว ซึ่งความจริงเหล็กหล่อสีเทาที่เป็นเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับเหล็กหล่อสีขาว ผิดกันตรงที่เหล็กหล่อสีเทาในขณะที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะเป็นระบบสเทเบิล (Stable) กล่าวคือปริมาณคาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์ แยกตัวออกมารวมเป็นแผ่น (Flakes) ซึ่งเรียกว่า กราไฟไฟต์ และกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเหล็ก ทำให้มองดูรอยหักเป็นสีเทา จากแผนภาพ Equilibrium (ภาพที่ 1) เส้นไขปลาจะเป็นระบบสเทเบิล ระหว่างเหล็กกับคาร์บอน ซึ่งจุดต่าง ๆ ของแผนภาพที่ปรากฏจะแตกต่างไปจากระบบเมตาสเทเบิลเล็กน้อย แต่การศึกษาโครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทาจะไม่อาจศึกษาได้โดยตรงจากแผนภาพ เพราะในทางปฏิบัติการเย็นตัวของเหล็กหล่อที่จะให้เป็นตามแผนภาพเป็นไปได้ยากเพราะเหล็กจะต้องเย็นตัวช้ามาก ถึงแม้ว่าเหล็กจะถูกปล่อยให้เย็นตัวในแบบทราย อัตราการเย็นตัวก็ยังช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในสถานะสมดุล (Equilibrium cooling rate) และอีกประการหนึ่งในเหล็กหล่อสีเทามีธาตุอื่น ๆ นอกเหนือจากคาร์บอนผสมอยู่ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของเหล็กหล่ออยู่มาก การศึกษาคุณสมบัติของเหล็กหล่อจึงต้องกระทำในลักษณะที่เน้นหนักไปทางด้านปฏิบัติมากกว่าทางด้านทฤษฎี

#### คุณสมบัติของเหล็กหล่อสีเทา (Mechanical properties)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ และคาร์บอนส่วนใหญ่เกิดอยู่ในรูปของกราไฟต์ ส่วนคาร์บอนที่เหลือจะเกิดอยู่ในรูปของสารประกอบกับเหล็กที่เรียกว่า ซีเมนไต์ (Cementite) เพราะฉะนั้นมาตรฐานเหล็กหล่อสีเทาจึงมีหลายเกรด ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเหล็กหล่อ ตัวอย่างที่จะนำมากล่าวต่อไปนี้เป็นมาตรฐานของประเทศต่าง ๆ ซึ่งแบ่งเกรดของเหล็กหล่อสีเทาออกเป็นหลายชั้นคุณภาพดังนี้



**ตารางที่ 2.2** มาตรฐานของเหล็กหล่อสีเทาของประเทศต่างๆ

**มาตรฐานอังกฤษ (BS 1452 : 1961)**

| ชั้นคุณภาพ                                        | 10   | 12   | 14 | 17   | 20   | 23   | 26 |
|---------------------------------------------------|------|------|----|------|------|------|----|
| ความเค้นแรงดึง<br>(ต่ำสุด) (Ton/in <sup>2</sup> ) | 10   | 12   | 14 | 17   | 20   | 23   | 26 |
| (Kg/mm <sup>2</sup> )                             | 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<br>(ต่ำสุด) (Ton/in <sup>2</sup> ) | 6.4 | 9.6 | 12.7 | 15.9 | 19 | 22.2 | 25.4 |
| (Kg/mm <sup>2</sup> )                             | 10  | 15  | 20   | 25   | 30 | 35   | 40   |

**มาตรฐานฝรั่งเศส (AFNOR A 32-10)**

|                                                   |     |      |    |      |    |
|---------------------------------------------------|-----|------|----|------|----|
| ชั้นคุณภาพ (Ft)                                   | 14  | 18   | 22 | 26   | 30 |
| ความเค้นแรงดึง<br>(ต่ำสุด) (Ton/in <sup>2</sup> ) | 8.9 | 11.4 | 14 | 16.5 | 19 |
| (Kg/mm <sup>2</sup> )                             | 14  | 18   | 22 | 26   | 30 |

**มาตรฐานอเมริกา (ASTM A 48-60 T)**

|                                                        |     |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| ชั้นคุณภาพ                                             | 20  | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 60   |
| ความเค้นแรงดึง (ต่ำสุด)<br>(1,000 lb/in <sup>2</sup> ) | 20  | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 60   |
| (Ton/in <sup>2</sup> )                                 | 8.9 | 11.1 | 13.4 | 15.6 | 17.9 | 20.1 | 22.3 | 26.8 |
| (Kg/mm <sup>2</sup> )                                  | 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<br>(ต่ำสุด) (Ton/in <sup>2</sup> ) | 7.6   | 9.5   | 11.4  | 13.3  | 15.2  | 17.8  | 20.3  | 22.2  | 24.1  |
| (Kg/mm <sup>2</sup> )                             | 12    | 15    | 18    | 21    | 24    | 28    | 32    | 35    | 38    |

(ตัวเลขที่ตามมาข้างหลังคือ ค่า Bending stress เป็น Kg/mm<sup>2</sup>)

### มาตรฐานญี่ปุ่น (JIS)

| ชั้นคุณภาพ (Fc)                                  | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
|--------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| ความเค้นแรงดึง<br>(ต่ำสุด) (Kg/mm <sup>2</sup> ) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |

### มาตรฐานไทย

| ชั้นคุณภาพ (GCI)                 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ความเค้นแรงดึง<br>(ต่ำสุด) (Mpa) | 98  | 147 | 196 | 245 | 294 | 343 | 395 |
| (Kg/mm <sup>2</sup> )            | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  |









ความแข็งแรงและความแข็งของเหล็กหล่อขึ้นอยู่กับการแปรสภาพที่สำคัญ 3 ประการ คือ

1. ส่วนผสมของเหล็กหล่อ
2. อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อภายในแบบหล่อ
3. การตกผลึกหรือฟอร์มของกราฟไฟต์

#### ส่วนผสมของเหล็กหล่อ (Chemical composition of the iron)

จากที่เราทราบมาแล้วเหล็กหล่อเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมทั่ว ๆ ไป จะมีคาร์บอนระหว่าง 2.5 - 4% ซึ่งคาร์บอนนี้จะตกผลึกเกิดเป็นกราฟไฟต์แทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก ขณะที่เหล็กหล่อเย็นตัวลงจากสภาพหลอมเหลวจนแข็งตัว นอกจากธาตุคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่น ๆ เช่น ซิลิกอน, ฟอสฟอรัส และอื่น ๆ ซึ่งธาตุต่าง ๆ นี้ มีบทบาทสำคัญมากเกี่ยวกับคุณสมบัติของเหล็กหล่อ เราแบ่งธาตุต่าง ๆ นอกเหนือไปจากคาร์บอนออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. ประเภทช่วยให้เกิดกราฟไฟต์ (Graphite-forming elements) ได้แก่ ซิลิกอน, ฟอสฟอรัส, อลูมิเนียม, นิกเกิล, ทองแดง และอื่น ๆ ธาตุที่มีอิทธิพลในการช่วยให้เกิดกราฟไฟต์มากที่สุดก็คือ ซิลิกอน ถ้าซิลิกอนไปเป็นฟอสฟอรัส และอลูมิเนียมตามลำดับ เหตุผลที่จะพอสรุปถึงอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ได้มีดังนี้ ปกติธาตุคาร์บอนกับเหล็กสามารถรวมกันให้ซีเมนไตต์ได้ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) แต่ถ้ามีซิลิกอนอยู่ด้วยแล้ว จะปรากฏว่าธาตุซิลิกอนมีความดึงดูด (Affinity) ระหว่างเหล็กสูงกว่าคาร์บอน ดังนั้นซิลิกอนจะรวมกับเหล็กก่อนและให้สารประกอบในขณะที่เหล็กยังอยู่ที่อุณหภูมิสูงหรืออยู่ในสภาพหลอมเหลว ดังนั้นธาตุคาร์บอนจึงหมดโอกาสที่จะรวมกับเหล็กเกิดซีเมนไตต์ เมื่อเป็นเช่นนี้อะตอมของธาตุคาร์บอนจึงจับรวมกันเข้าเป็นกลุ่มเป็นก้อนกลายเป็นกราฟไฟต์ซึ่งฟอร์มของกราฟไฟต์ปกติจะเกิดเป็นแผ่นบาง ๆ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปบ้างขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์บางอย่างซึ่งจะกล่าวในภายหลัง

ฟอสฟอรัสและอลูมิเนียมก็เช่นเดียวกัน จะมีแรงดึงดูด (Affinity) กับเหล็กสูงกว่าคาร์บอนเหมือนกัน เมื่อเป็นเช่นนี้จึงรวมกับเหล็กให้สารประกอบที่อุณหภูมิสูง ทำให้ธาตุคาร์บอนต้องแยกตัวออกมารวมกันเป็นกราฟไฟต์ จากตารางข้างล่างแสดงถึงอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ซิลิกอน ฟอสฟอรัส และอลูมิเนียมจะรวมตัวกับเหล็กให้สารประกอบ

|                        |       |                          |       |                 |       |                 |       |
|------------------------|-------|--------------------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| $\text{Fe}_3\text{Si}$ | 1250° | $\text{Fe}_5\text{Si}$   | 1280° | $\text{FeSi}$   | 1410° | $\text{FeSi}_2$ | 1220° |
| $\text{Fe}_3\text{P}$  | 1160° | $\text{Fe}_2\text{P}$    | 1365° |                 |       |                 |       |
| $\text{FeAl}_2$        | 1165° | $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ | 1173° | $\text{FeAl}_3$ | 1160° |                 |       |



สำหรับฟอสฟอรัส นอกจากจะเป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดกราไฟต์แล้ว ฟอสฟอรัสยังมีส่วนช่วยให้น้ำเหล็กหล่อไหลและไหลได้ดี เพราะฟอสฟอรัสช่วยลดอุณหภูมิยูเทคติกให้ต่ำลง โดยทำให้เกิดปฏิกิริยายูเทคติกสามเฟสหรือเรียกว่า Ternary Eutectique ซึ่งได้แก่  $\text{Fe}_3\text{C}-\text{Fe}_3\text{P}$ - ออสเทนไนต์ เกิดเป็นจุดเล็ก ๆ สลับกันเช่นเดียวกับโครงสร้างยูเทคติกซึ่งมีชื่อเรียกว่า Steadite เป็นโครงสร้างที่เปราะแตกง่าย ดังนั้นถ้ามีฟอสฟอรัสมาก จะทำให้เหล็กหล่อขาดคุณสมบัติอ่อนตัว (Ductility) ในทางปฏิบัติ จะผสมฟอสฟอรัสระหว่าง 0.7-1.2% และใช้เฉพาะในกรณีที่ต้องการหล่อสิ่งที่มีความบางมาก ๆ เพื่อช่วยให้เหล็กหล่อไหลได้ดี



รูปที่ 2.30 แสดงปฏิกิริยายูเทคติกสามเฟส

อลูมิเนียมนับว่าเป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดกราไฟต์ได้ดี แต่ในทางปฏิบัติมักไม่ใช้อลูมิเนียม เนื่องจากอลูมิเนียมออกไซด์ได้ง่าย ทำให้กลายเป็นออกไซด์ เป็นเหตุให้เหล็กหล่อเสียคุณภาพทางด้านการไหลง่าย (Fluidity)

สำหรับนิกเกิลและทองแดง จัดว่าเป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดกราไฟต์อยู่ในระดับปานกลาง จะใช้นิกเกิลและทองแดงผสมในเหล็กหล่อ เฉพาะในกรณีที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กหล่อเท่านั้น เพราะนิกเกิลมีราคาแพง และทองแดงมีขอบเขตของการละลายในเหล็กจำกัด ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในภายหลัง

2. ประเภทรวมตัวกับคาร์บอน (Carbide-forming elements) ได้แก่ ธาตุแมงกานีส, โครเมียม, ดังสเตน, วาเนเดียม, โมลิบดีนัม และอื่น ๆ ธาตุเหล่านี้จะไม่รวมกับเหล็ก เพื่อให้คาร์บอนแยกตัวไปรวมกันเกิดกราไฟต์ แต่ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์และคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพ เมื่อเป็นเช่นนี้ ถ้าในเหล็กหล่อมีธาตุเหล่านี้อยู่ เหล็กหล่อจะมีโอกาสเป็นเหล็กหล่อสีเทา



ได้ยาก ยกเว้นในกรณีที่ต้องการทำให้เหล็กหล่อสีขาวเพื่อต้องการให้เหล็กแข็ง ทนต่อการสึกหรอจึงจะผสมธาตุเหล่านี้ลงไป ปกติคาร์ไบด์ที่เกิดจากธาตุเหล่านี้มักจะเปราะแตกง่าย ถึงจะมีความแข็งสูงก็ตาม

โดยทั่วไปในเหล็กหล่อสีเทาจะมีผสมแมงกานีสลงไประหว่าง 0.5 ถึง 0.8% ด้วย เหตุผลที่จะให้แมงกานีสไปตั้งเฝ้าก่อกำมะถันออกจากเหล็ก เพราะในเหล็กหล่อถ้ามีกำมะถันมาก กำมะถันจะไปรวมกับเหล็กกลายเป็นเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะทำให้เหล็กเสียคุณสมบัติที่ดีไป กล่าวคือกำมะถันทำให้เหล็กเปราะที่อุณหภูมิสูงแมงกานีสนอกจากจะช่วยตั้งเฝ้าก่อกำมะถันแล้ว แมงกานีสยังจะช่วยให้เกิดเฟอไรต์ที่ละเอียด คอนที่เหล็กหล่อเย็นลงถึงอุณหภูมิยูเทคตอยด์

เนื่องจากอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเหล็กหล่อ เป็นเหตุหนึ่งที่ทำให้จุดต่าง ๆ ของ Equilibrium Diagram ของเหล็กกับคาร์บอนเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะจุดยูเทคตอยด์จะเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของ Diagram จะดูจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็กหล่ออย่างเฉียวไม่ได้ จะต้องหาเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนโดยบวกกับอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ เข้าไปด้วย ซึ่งเราเรียกว่า Carbon equivalent เขียนย่อว่า C.E ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$C.E = C\% + 0.31 Si\% + 0.27P\% + 0.078 (1.85 - Mn\%) + 0.156 Al + 0.125 Ti + 0.109 Ni + 0.0935 Cu - 0.0935 Mo - 0.312 Cr - 0.624V.$$

แต่ในทางปฏิบัติเกี่ยวกับเหล็กหล่อสีเทา จะคิดเพียงแค่อิทธิพลของฟอสฟอรัส เพราะธาตุอื่น ๆ ถือว่ามีน้อยดังนี้

$$C.E = C\% + 0.31 Si\% + 0.27 P\%$$

$$\text{หรือ } C.E = Total carbon \% + \left( \frac{Silicon \% + Phosphorus \%}{3} \right)$$

ตัวอย่าง เหล็กหล่อชนิดหนึ่งมี C 3%, Mn 0.5%, Si 1.8% และ P 0.1%

$$C.E = 3 + 0.31 \times 1.8 + 0.27 \times 0.1$$

$$= 3.6\%$$

การพิจารณาค่า C.E ก็เหมือนกับค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนปกติ ถ้าค่า C.E มีค่ามากกว่า 4.3% จะถือว่าเหล็กหล่อนั้นเป็นไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ถ้าน้อยกว่า 4.3% เป็นไฮโปยูเทคตอยด์

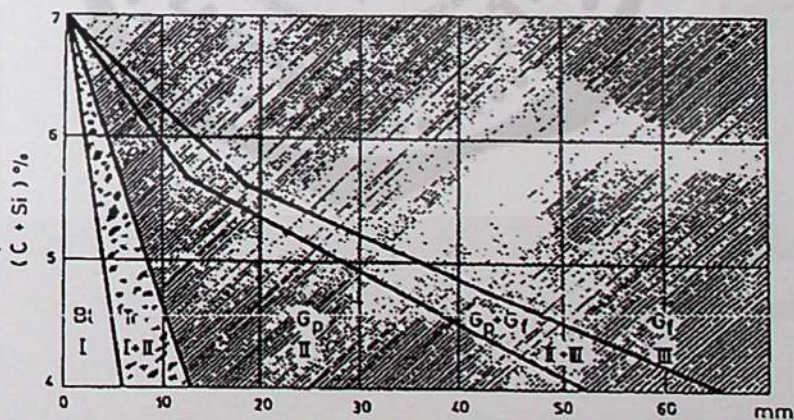


### อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อ (Cooling rate)

เราจะเห็นว่า จาก Equilibrium diagram ของเหล็กกับคาร์บอน การเย็นตัวของเหล็กหล่อจะให้การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิยูเทคติก เป็นออสเตนไนต์กับกราไฟต์ ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดได้จะต้องใช้เวลานานมาก เพื่อให้อะตอมของคาร์บอนมีเวลาพอที่จะรวมกลุ่มกันและมีการขยายตัวโดยอิสระ สำหรับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมแน่นอนชนิดหนึ่งนั้น 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)

แฟกเตอร์ทั้งสี่ประการดังกล่าวมาแล้วนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเหล็กหล่อ กับความร้อนแฝงของเหล็กหล่อ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเหล็กหล่อโดยตรง แต่ตัวนำความร้อนของแบบหล่อ และขนาดของเหล็กหล่อเป็นแฟกเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างขวางมาก ในการศึกษาเรื่องนี้ มีผู้ได้พยายามสร้างแผนภาพกราฟที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size of casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand mold)

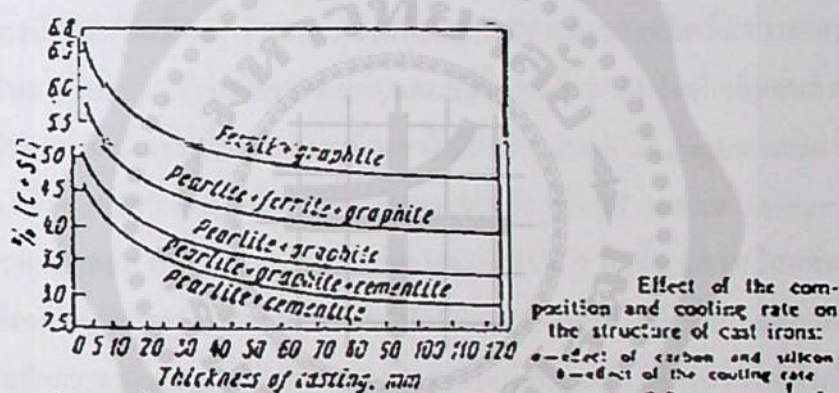


รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size of casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand mold)



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

- โซน I แสดงถึงโครงสร้าง เป็น เหล็กหล่อขาว (Ledeburite + pearlite)
  - โซน I + II แสดงถึงโครงสร้าง เป็น เหล็กหล่อ Mottled (Ledeburite + pearlite + graphite)
  - โซน II แสดงถึงโครงสร้าง เป็น เหล็กหล่อสีเทาประเภท pearlitic cast iron
  - โซน II + III แสดงถึงโครงสร้าง เป็น เหล็กหล่อสีเทาประเภท Ferritic – pearlitic
  - โซน III แสดงถึงโครงสร้าง เป็น เหล็กหล่อสีเทาประเภท Ferritic
- (ดูภาพประกอบ)



รูปที่ 2.32 โครงสร้างที่ได้จากกราฟคาร์บอนซิลิกอน

จากแผนภาพจะเห็นว่า ถ้าเหล็กหลอมมีคาร์บอน 3% และซิลิกอน 2% ซึ่งปกติเหล็กหล่อประเภทนี้ (ดูจากรูป 2.32) จะเป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภทเพิร์ลิติก แต่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กหล่อกว่า 10 มม. โครงสร้างอาจจะเป็นมอดเดิล หรือเหล็กหล่อขาวก็ได้

แบบที่สอง ใช้แกนตั้ง (Y-axis) แทนส่วนผสม (C+Si)% เหมือนกันกับแบบแรก แต่แกนนอน (X-axis) แทนความหนาของงานหล่อเป็นมิลลิเมตร แผนภาพแสดงโครงสร้างแบ่งเป็น อาณาเขต คือจะมีอาณาเขตของเหล็กหล่อสีขาว (pearlite + cementite) อยู่ทางตอนล่าง เหนือขึ้นไปเป็นเหล็กหล่อมอดเดิล (pearlite + cementite + graphite) อาณาเขตช่วงที่ 3 เป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภทเพิร์ลิติก อาณาเขตช่วงที่ 4 เป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภทเฟอร์ริโต-เพิร์ลิติก และช่วงสุดท้าย



เป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภทเฟอร์ริติก จากแผนภาพจะเห็นว่าเหล็กหล่อ 3% C และ 2% Si ถ้าความหนาแน่นน้อยกว่า 5 ม.ม. โครงสร้างจะเป็นมอดเดิล

จากแผนภาพทั้งสองแบบนี้จะแสดงโครงสร้างอย่างคร่าว ๆ พอเป็นแนวทางให้ศึกษาได้เท่านั้น จะเอาค่าที่แน่นอนไม่ได้ เพราะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนรวมกับเปอร์เซ็นต์ซิลิกอน ทำให้ได้ค่าไม่แน่นอน ดังตัวอย่างเช่นเหล็กหล่อสองชนิด คือ 3% C, 2% Si กับ 4% C, 1% Si ซึ่งรวมกันได้ 5 เท่ากัน แต่เหล็กหล่อทั้งสองนี้จะให้โครงสร้างแตกต่างกันได้

### การตกผลึกหรือฟอร์มของกราฟไฟต์ (Factor of graphitisation)

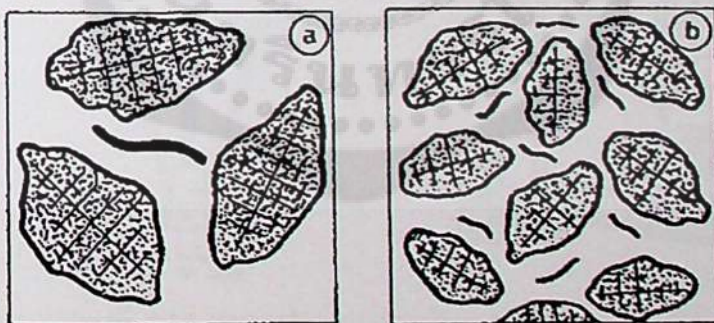
จากที่เราได้ศึกษามาถึงเรื่องของส่วนผสม และการเย็นตัวของเหล็กหล่อ ซึ่งเป็นแฟคเตอร์ที่มีส่วนทำให้เหล็กหลอมมีคุณสมบัติแตกต่างกันมาแล้ว ยังมีแฟคเตอร์อีกอย่างหนึ่ง ที่มีส่วนทำให้เหล็กหล่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปได้ คือลักษณะการตกผลึกหรือฟอร์มของกราฟไฟต์ ผลจากการทดลองที่ยืนยันในเรื่องนี้ คือการทดลองที่นำเอาเหล็กหล่อสองชนิดที่มีส่วนผสมเหมือนกัน และทำให้เย็นภายในแบบหล่อเหมือนกัน แต่คุณสมบัติของเหล็กภายหลังเมื่อเย็นจนถึงอุณหภูมิปกติแล้วไม่เหมือนกัน ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะการเกิดกราฟไฟต์ หรือ power of graphitisation ไม่อยู่ในลักษณะเดียวกัน ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจจะเนื่องมาจากลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาหล่อ (nature of raw material) วิธีการหล่อหลอม (Melting method) และอาจจะมีสิ่งอื่น ๆ อีกที่มากับเหล็กหล่อ การเกิดกราฟไฟต์ของเหล็กหลอมขณะหลอมเหลวนั้น อาจจะทำให้ลักษณะของกราฟไฟต์ ปริมาณของกราฟไฟต์ ตลอดจนการกระจายกระจายของกราฟไฟต์ภายในเนื้อเหล็กหล่อที่ต่างกัน ได้ สิ่งเหล่านี้ยังเป็นเรื่องที่พิศุจน์หรือหาเหตุผลมาประกอบได้ยาก เพียงแต่มีการทดลองและตั้งสมมติฐานไว้ต่าง ๆ กัน ซึ่งก็ยังไม่มีการยอมรับกันเป็นเอกฉันท์

มีการทดลองอันหนึ่งที่พอจะยกมาประกอบ เพื่อชี้ให้เห็นความสำคัญของการเกิดกราฟไฟต์ที่ให้คุณสมบัติแตกต่างของเหล็กหล่อ

จากเหล็กหล่อที่กำลังหลอมเหลวสองเบ้า เบ้าแรกมีปริมาณของซิลิกอน 1.6% อีกเบ้าหนึ่งมีซิลิกอน 1.4% ส่วนธาตุที่ผสมอยู่ในเหล็กหล่ออื่น ๆ เท่ากัน ก่อนที่จะเทลงแบบที่ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน เอาเฟอร์โรซิลิกอนที่เป็นผงละเอียดเทลงไปในเบ้าที่สอง เพื่อให้ปริมาณของซิลิกอนในเบ้าที่สองเท่ากับ 1.6% คือเท่ากับเบ้าแรก เมื่อคนให้เฟอร์โร-ซิลิกอนละลายลงในน้ำเหล็กหล่อดีแล้ว จึงเทน้ำเหล็กหล่อทั้งสองเบ้าลงในแบบหล่อที่เตรียมไว้ทั้งสองแบบ ปรากฏว่าคุณสมบัติของเหล็กหล่อจากเบ้าที่สองดีกว่าเบ้าแรก โดยให้ฟอร์มของกราฟไฟต์ที่ละเอียดและกระจายอย่างสม่ำเสมอภายในเนื้อเหล็ก จากการทดลองนี้มีผู้ให้เหตุผลว่า การที่ใส่เฟอร์โรซิลิกอน ลงไปในน้ำเหล็กหล่อ ซิลิกอนอาจจะมีการออกซิไดซ์และกลายเป็นผงเล็ก ๆ ของ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งมีจุดหลอมตัวสูง



ลอยอยู่ในน้ำเหล็ก และทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียม ให้กำเนิดการตกผลึกและรวมตัวของคาร์บอนจนเป็นกราไฟต์ได้ เพราะจากการทดลอง ถ้าใช้เฟอร์โร-ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์มากกลับให้ผลในการให้กำเนิดนิวเคลียสได้น้อยกว่าการใช้เฟอร์โร-ซิลิกอนที่ผลิตขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะมีธาตุหรือสารเจือปน (Impurities) อื่น ๆ เช่น อลูมิเนียม, แมกนีเซียม หรือแคลเซียม ปนมาด้วย ทำให้เพิ่มปริมาณนิวเคลียสของกราไฟต์ ข้อสมมติฐานอันนี้มีทางเป็นไปได้อีกหนึ่งกรณีหนึ่ง กล่าวคือเมื่อปรากฏมีผงเล็ก ๆ ของซิลิกอนไดออกไซด์หรืออื่น ๆ ที่ลอยอยู่ในเหล็กหลอมเหลว ก็อาจจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้เกิดผลึกของออสเตนไนต์จำนวนมากก็ได้ เพราะเมื่อเกิดผลึกของออสเตนไนต์จำนวนมากในน้ำเหล็กที่ยังไม่แข็งตัวหมดนี้ ตำแหน่งการเกิดนิวเคลียสของกราไฟต์ก็จะอยู่ตามบริเวณเหล็กหลอมที่ล้อมรอบผลึกของออสเตนไนต์ เมื่อเกิดการขยายตัวของกราไฟต์ก็จะเป็นไปได้ยาก เพราะอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ตามบริเวณเหล็กหลอมมีจำนวนจำกัด จะเคลื่อนที่มาจากบริเวณอื่นได้ยากเช่นกัน เพราะจะติดผลึกของออสเตนไนต์ ซึ่งติดกับเหล็กที่มีผลึกของออสเตนไนต์จำนวนน้อย แม้ว่าปริมาณของเหล็กหลอมจะเท่ากันก็ตาม การขยายตัวของกราไฟต์จะเป็นไปโดยสะดวกทำให้ได้กราไฟต์ขนาดใหญ่ ดังภาพแสดงเปรียบเทียบ ในภาพ (a) มีผลึกออสเตนไนต์เพียง 3 ผลึก การขยายตัวของกราไฟต์จะเป็นไปได้ดีเกิดกราไฟต์ขนาดใหญ่ แต่ในภาพ (b) เหล็กมีปริมาณเท่ากัน แต่มีผลึกของออสเตนไนต์จำนวน 9 ผลึก การเกิดกราไฟต์จะมีจำนวนมากกว่า แต่ขยายตัวได้น้อยทำให้กราไฟต์ขนาดเล็ก และกระจัดกระจาย

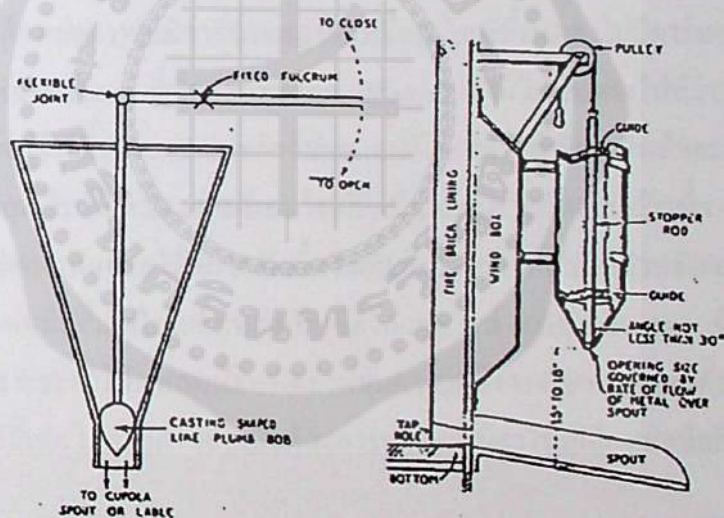


รูปที่ 2.33 แสดงการสลายตัวของกราไฟต์

จากการทดลองที่ปรากฏผลแตกต่างของการเกิดกราไฟต์ตามที่กล่าวมานี้ ทำให้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปถึงกรรมวิธีการผลิตเหล็กหล่อคุณภาพสูง โดยการใช้ผงเฟอร์โรซิลิกอนผสมในเหล็กหล่อหลอมเหลวก่อนเทลงแบบหล่อ เรียกระบบวิธีปรับปรุงคุณภาพเหล็กหล่อนี้ว่า Inoculation ซึ่งภายหลังได้พัฒนาวิธีการแตกต่างออกไปจากวิธีเดิม กล่าวคือนอกจากจะใช้โลหะผง



เฟอร์โรซิลิกอนแล้วยังใช้โลหะผสมชนิดอื่น ๆ อีก เช่น แคลเซียมซิลิไซด์, ซิลิกอนแมงกานีส, ซิลิกอนเซอร์โคเนียม เป็นต้น นอกจากวิธีผสมลงไปเป็นเหล็กหล่อหลอมเหลวโดยวิธีธรรมดาแล้วยังพัฒนาวิธีการผสมเพื่อให้สารอินนอคูลแลนต์ (Inoculant) ผสมกับเหล็กหล่อหลอมเหลวอย่างทั่วถึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผสม โดยเฉพาะน้ำเหล็กหล่อจากเตาควิปล่า ใช้วิธีผสมตรงบริเวณทางไหล (Tapping Spout) ขณะเจาะน้ำเหล็กหล่อออกจากเตา โดยมีถังบรรจุสารอินนอคูลแลนต์อยู่เหนือทางไหลของน้ำเหล็ก ตรงกับถังบรรจุจะมีรูและอุปกรณ์ควบคุมปริมาณการไหลของสารอินนอคูลแลนต์ เพื่อให้การไหลของอินนอคูลแลนต์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ บางครั้งอาจจะมีเครื่องสั่นมาติดไว้ที่ถังบรรจุเพื่อช่วยให้สารอินนอคูลแลนต์ไหลออกทางรูได้สม่ำเสมอ (ดังภาพแสดง) ภายหลังการผสมสารอินนอคูลแลนต์แล้วจะต้องรีบเทเหล็กหล่อลงแบบภายในเวลา 15-30 นาที เพราะถ้าทิ้งไว้นานกว่านี้การทำอินนอคูลแลนต์จะไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร อาจเนื่องมาจากผงที่เป็นของแข็งที่เกิดจากสารอินนอคูลแลนต์ซึ่งเบากว่าน้ำเหล็กจะลอยตัว ทำให้การเกิดกราฟไฟต์ไม่อยู่ในลักษณะที่ดี



รูปที่ 2.34 แสดงการบรรจุสารอินนอคูลแลนต์

#### การควบคุมคุณภาพของเหล็กหล่อสีเทา

เพื่อให้เหล็กหล่อสีเทาที่ผลิตมีคุณภาพสูง จำเป็นจะต้องควบคุมส่วนผสมของเหล็กซึ่งจะเกี่ยวข้องไปถึงโครงสร้างพื้นฐาน และลักษณะของกราฟไฟต์ที่เกิด เพื่อความเข้าใจจะขอกล่าวถึงลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานและลักษณะของกราฟไฟต์ดังนี้

โครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ของเหล็กหล่อสีเทามีสามประเภทคือ เฟอร์ริต, เพริลิต และเฟอร์ไรโตเพริลิต โดยหลักทางโลหวิทยาจะถือว่าโครงสร้างเพริลิตเป็นโครงสร้างที่ทำให้



คุณสมบัติทนแรงดึงได้สูงที่สุด ส่วนเฟอร์ไรต์-เพิร์ลลิต และเฟอร์ไรต์ ก็จะทำให้คุณสมบัติทนแรงดึงลดทอนลงไปตามปริมาณของเพิร์ลไลท์ เพราะฉะนั้นถ้าจะให้ได้เหล็กหล่อคุณภาพดีจะต้องควบคุมส่วนผสมโดยเฉพาะปริมาณของคาร์บอนและซิลิกอน ซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน จากภาพที่ 2.2, 2.3 แสดงไว้พอเข้าใจ เช่นเหล็กมีคาร์บอน 3.0% ซิลิกอน 1.5% ถ้าจะให้ได้โครงสร้างเพิร์ลไลท์จะต้องมีความหนาไม่เกิน 25 มม. (ใช้ทรายเป็นวัสดุทำแบบหล่อ)

### โครงสร้างและคุณสมบัติของชิ้นงานหล่อ

#### โครงสร้างของชิ้นงานเหล็กหล่อเทา

##### (1) โครงสร้างของเหล็กหล่อ

โครงสร้างพื้นฐานของเหล็กหล่อประกอบด้วยกราไฟท์ เฟอไรต์ ซีเมนไทต์และเพอไลต์ เหล็กหล่อชนิดที่ใช้งานมากที่สุดคือเหล็กหล่อเทาซึ่งมีกราไฟท์หรือคาร์บอนอิสระกระจายอยู่ในรูปเกล็ด

ในบางกรณีก็ใช้เหล็กหล่อกราไฟท์กลมซึ่งมีกราไฟท์ที่มีรูปกลม (Spheroids) แทนที่จะเป็นรูปเกล็ดหรือใช้เหล็กหล่อขาวซึ่งมีคาร์บอนอยู่ในรูปซีเมนไทต์ทั้งหมด ไม่มีคาร์บอนอิสระ โครงสร้างที่ประกอบด้วยสภาพต่าง ๆ นี้เรียกว่าเมทริกซ์ (Matrix) ทั้งนี้ไม่นับกราไฟท์ว่าเป็นส่วนหนึ่งของเมทริกซ์ และโครงสร้างพื้นฐานของเมทริกซ์ประกอบด้วยเฟอไรต์ ซีเมนไทต์และเพอไลต์ เพอไลต์เป็นโครงสร้างที่มีเฟอไรต์ที่เหนียวและซีเมนไทต์ที่แข็งและเปราะเรียงกันเป็นชั้น ๆ ทนต่อการกระแทกได้ดี และทนต่อการสึกหรอได้ดีมาก ดังนั้นจึงเป็นโครงสร้างที่จำเป็นสำหรับเหล็กหล่อชนิดคุณภาพดีพิเศษเฟอไรต์ชนิดที่เกิดในเหล็กหล่อเป็นซิลิโก-เฟอไรต์ (Silico-ferrite) ซึ่งเหนียวแต่ถ้ามีมากนั้นก็ไม่ได้ เพราะจะทำให้คุณสมบัติบางอย่างเช่นความแข็งแรงในทางดึงดัดลดลงแต่ในบางกรณีก็อาจต้องการให้มีเฟอไรต์มาก เช่นเมื่อต้องการความเหนียวในเหล็กหล่อมัลลิเบิลหรือเหล็กหล่อกราไฟท์กลม

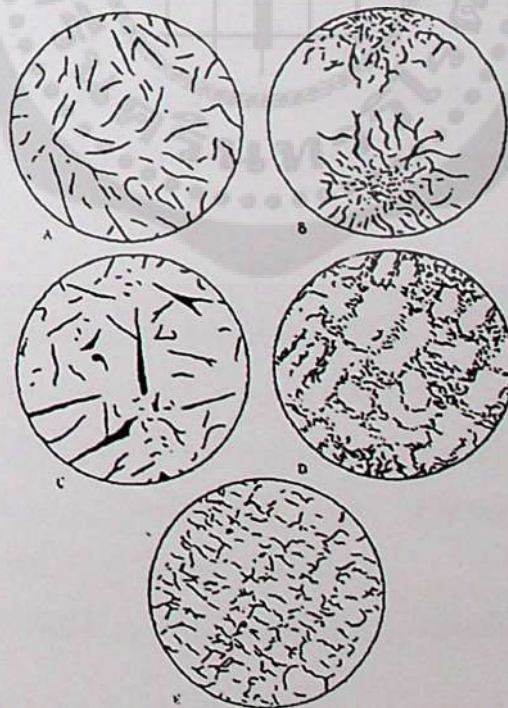
ซีเมนไทต์จะไม่อยู่ในเมทริกซ์แต่ถ้าพียง แต่จะแยกมาอยู่เป็นสภาพหนึ่งในเมทริกซ์หรืออยู่รวมในโครงสร้างยูเทคติกกับออสเตไนต์ หรืออยู่ร่วมกับไอเอนฟอสไฟด์ (Iron phosphide) เป็นสเตดไต์ (Steadite) ซีเมนไทต์แข็งแรงมาก และทำให้ความสามารถในการรับการปอกด้วยเครื่องกลโรงงาน (Machinability) ลดลง ดังนั้นจึงควรเลี่ยงการเกิดซีเมนไทต์ ยกเว้นเมื่อต้องการให้ทนต่อการสึกหรอ



## (2) โครงสร้างของกราไฟท์

กราไฟท์เป็นผลึกที่นุ่มและเปราะของคาร์บอน มีความแข็งบริเนล (Brinell hardness)  $H_B$  ประมาณ 1 มีความแข็งแรงในทางดึงประมาณ  $2\text{kg/mm}^2$  หรือประมาณ  $20\mu\text{Pa}$  และความหนาแน่นประมาณ  $2.2\text{ kg/cm}^3$  สำหรับโครงสร้างของเหล็กหล่อที่ใช้กันส่วนมาก 85% ของคาร์บอนทั้งหมดจะอยู่ในสภาพกราไฟท์ โครงสร้างละเอียดของกราไฟท์ยังแยกออกได้ตามรูปร่างและขนาด เช่น เล็กหรือใหญ่ เก็ดหรือมีแฉกอยู่โดยรอบ (Asteroïdal) เป็นก้อน ๆ หรือกลม (Spheroidal) สภาพของชั้นกราไฟท์มีผลเป็นอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ตัวอย่างเช่นเหล็กหล่อเทาซึ่งมีคาร์บอนอยู่ 3.6% และมีซิลิกอนอยู่ 2.1% มีกราไฟท์ในรูปเก็ดมีความแข็งแรงทางดึงถึง  $1.8\text{kg/mm}^2$  หรือประมาณ  $180\mu\text{Pa}$  เทียบกับเหล็กหล่อกราไฟท์กลมที่มีปริมาณคาร์บอนและซิลิกอนเท่ากัน แต่มีกราไฟท์เป็นรูปกลม ปรากฏว่าเหล็กหล่อชนิดหลังนี้มีความแข็งแรงทางดึงถึง  $55\text{--}70\text{ kg/mm}^2$  หรือประมาณ  $550\text{--}700\mu\text{Pa}$  ความแตกต่างนี้เนื่องมาจากรูปร่างของชั้นกราไฟท์ต่างกัน กราไฟท์ในรูปเก็ดทำให้เกิดการเพิ่มความเค้น (stress concentration) ที่ตรงปลายแหลมของเก็ดถ้ามีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของเก็ด สำหรับกราไฟท์รูปกลมนั้นจะมีการเพิ่มความเค้นน้อยกว่ามาก

## (3) รูปร่างของชั้นกราไฟท์ในเหล็กหล่อเทา



รูป 2.35 แสดงรูปร่างต่าง ๆ กัน 5 อย่างของชั้นกราไฟท์ที่เกิดขึ้นในเหล็กหล่อเทา



ชนิด A : กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (random orientation)

กราฟไฟต์ชนิดนี้ปรากฏในเหล็กหล่อชนิดคุณภาพดีพิเศษ โครงสร้างส่วนใหญ่คือ เพลอไลท์ และกราฟไฟต์มีขนาดที่เหมาะสม นอกจากนั้นการที่กราฟไฟต์มีรูปร่างโค้งทำให้เหล็กหล่อ เถามีความแข็งแรงสูง กราไฟต์มีขนาดที่เหมาะสม นอกจากนั้นการที่กราฟไฟต์มีรูปร่างโค้งทำให้ เหล็กหล่อเถามีความแข็งแรงสูง กราไฟต์จะโค้งได้ก็เพราะออกสเตไนท์ที่มีรูปร่างเป็นกิ่งไม้ (dendritic) ที่ตกผลึกก่อนอุณหภูมิยูเทคติก (proeutectic) หรือที่เรียกว่าผลึกไพรมารี กราไฟต์จะถูก คัดไปตามแนวของรูปร่างกิ่งไม้ของออกสเตไนท์ ดังนั้นถ้าต้องการให้มีกราฟไฟต์รูปร่างโค้งให้มากที่สุด ก็ต้องมีการกระทำให้มีผลึกไพรมารีมาก ๆ น้ำโลหะที่มี % คาร์บอนสูงจะมีกราฟไฟต์โค้งอยู่น้อย เพราะมีผลึกไพรมารีน้อย เพื่อให้มีผลึกไพรมารีมาก ๆ จะต้องใส่ (inoculate) สารเคมีที่ทำหน้าที่ลด ออกซิเจน (deoxidization) และช่วยในการเกิดกราฟไฟต์ (graphitization) เข้าไปในน้ำโลหะ

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

กราฟไฟต์ชนิดนี้ประกอบด้วยก้อนยูเทคติก (eutectic cells) ซึ่งมีกราฟไฟต์ชิ้นเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นขณะเกิดการแปรสภาพแบบยูเทคติก กราไฟต์เล็ก ๆ เหล่านี้อยู่ตรงกลาง และกราฟไฟต์ ขนาดใหญ่กว่าอยู่รอบ ๆ เรียงตามแนวรัศมี กราไฟต์ประเภทนี้มักเกิดตรงส่วนบาง ๆ ของชิ้นงาน หล่อ ส่วนขนาดเนื้อที่ของกราฟไฟต์ยูเทคติกนั้นขึ้นกับอัตราส่วนผสมและอัตราการเย็น ในบางกรณี ก็ไม่มีกราฟไฟต์ยูเทคติกเลย มีแต่กราฟไฟต์ที่เกิดตามแนวทางรัศมี

ถ้าน้ำโลหะมีออกซิเจนละลายอยู่เกินเกณฑ์ปกติจะมีกราฟไฟต์ยูเทคติก แต่ถ้าอัตราการเย็นสูงหรือมีซิลิกอนอยู่มากจะมีแต่เฟอไรท์อยู่กลางกลุ่มกราฟไฟต์ กราไฟต์ในลักษณะนี้มักเกิด ร่วมกับ กราไฟต์ชนิด A ในชิ้นงานหล่อบาง ๆ

ถ้าต้องการให้ชิ้นงานหล่อมีความแข็งแรงทางดึงประมาณ 25~30% หรือประมาณ 250~300  $\mu$  Pa จะต้องมีกราฟไฟต์ชนิด B ที่มีกราฟไฟต์ยูเทคติกน้อย ๆ ไม่เกิน 20~30%

กราฟไฟต์ชนิด B นี้จะมีอยู่หนาแน่นในเหล็กหล่อที่มี % คาร์บอนสูง เพราะมีการ ตกผลึกของกราฟไฟต์มาก ดังนั้นจะทำให้ชิ้นงานหล่ออ่อนแอ บางครั้งจะขาดครึ่งตอนขณะกระทำ ด้วยเครื่องกลโรงงาน และถ้าดูตรงที่ขาดจะเห็นเป็นรู ๆ เล็ก ๆ เหมือนเจาะด้วยเข็ม ถ้ายังมีเฟอไรท์ อยู่ตรงกลางแทนที่จะมีกราฟไฟต์ยูเทคติกด้วยแล้วจะยิ่งหักง่าย

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

โครงสร้างชนิดนี้เกิดขึ้นสำหรับเหล็กหล่อที่มี % คาร์บอนมากกว่า % คาร์บอน ของเหล็ก หล่อที่มีส่วนผสมยูเทคติก (เกิน 4.25%C) (hyper-eutectic) คาร์บอนที่มีอยู่จะอยู่ใน



สภาพกราฟไฟต์เสียมมาก จนกระทั่งที่เหลือจะเป็นเฟอไรต์เป็นส่วนมาก มีซิเมนไทต์น้อย กราไฟต์ชนิด C นี้จะมีผลึกกราฟไฟต์ไพรมารีที่ยาวและกว้าง และมีเกล็ดที่เกิดที่อุณหภูมิยูเทคติกมาทับหรือล้อมรอบกรอบกราฟไฟต์ไพรมารี โครงสร้างประเภทนี้เมื่อยังมีเฟอไรต์อยู่มากด้วยจะอ่อนแอมาก ใช้ประโยชน์อะไรไม่ได้

**ชนิด D : เกล็ดกราฟไฟต์เกิดระหว่างออสเตไนต์ไพรมารีรูปกิ่งไม้ (Interdendritic segregation)**

**การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Random orientation)**

สำหรับโครงสร้างแบบนี้กราฟไฟต์ชิ้นเล็กที่ตกผลึกที่อุณหภูมิยูเทคติกจะเกิดขึ้นระหว่างออสเตไนต์ไพรมารีรูปกิ่งไม้ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อมีสถานการณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดแข็งแต่น้ำโลหะยังไม่แข็งตัว (Super-cooling) เมื่ออุณหภูมิอยู่แถบอุณหภูมิยูเทคติก เงื่อนไขอันหนึ่งที่จะทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้นคือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำโลหะและออกซิเจน (Oxidation) ถ้าใส่สารเคมีเข้าไปในน้ำโลหะเพื่อช่วยในการเกิดกราฟไฟต์ (Graphitizing inoculation) จะช่วยลดความเสี่ยงมิให้เกิดการแข็งตัวช้าได้บ้างแต่ช่วยไม่มากถ้ามีออกซิเจนอยู่มากขนาดเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย กราไฟต์ชนิด D บางครั้งก็เกิดตรงกลางของกราฟไฟต์ชนิด B และบางครั้งก็ไปเกิดตรงกลางของชิ้นงานหล่อหนา ๆ ที่แข็งตัวที่หลังส่วนอื่น โครงสร้างชนิดนี้มักมีเฟอไรต์เป็นพื้นทำให้อ่อนแอ

**ชนิด E : เกล็ดกราฟไฟต์เกิดระหว่างออสเตไนต์ไพรมารีรูปกิ่งไม้ (Interdendritic segregation)**

**การเรียงตัวมีระเบียบอยู่บ้าง (Preferred orientation)**

กราฟไฟต์ชนิดนี้เกิดขึ้นเมื่อ % คาร์บอนค่อนข้างต่ำ จะเกิดการลดความแข็งแรงเพราะชิ้น กราไฟต์อยู่ติด ๆ กัน เช่นเดียวกับชนิด D แต่บางครั้งความแข็งแรงก็สูงเพราะ % คาร์บอนต่ำจึงมี กราไฟต์น้อย

### คุณสมบัติของชิ้นงานเหล็กหล่อ

#### **(1) คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กหล่อเทา**

จากการพิจารณาคุณสมบัติทางกล จะรู้ถึงความเหมาะสมของเหล็กหล่อชนิดต่าง ๆ ในการที่ใช้ทำชิ้นเครื่องกล คุณสมบัติดังกล่าวมีความแข็งแรงทางดึง (Tensile strength) การยืดตัวก่อนขาด (Elongation) ความแข็ง (hardness) ความแข็งแรงทางอัด (Compressive strength) ความแข็งแรงทางด้านกระแทก (Impact strength) ความแข็งแรงทางดัด (Bending strength) ความแข็งแรงทางด้านการล้า (Fatigue strength) ความทนต่อการสึกหรอ (Wear resistance) ความสามารถในการรับการกระทำด้วยเครื่องมือกล (Machinability) และการลดความสะเทือน (Damping capacity) ฯลฯ จะได้ว่าถึงเฉพาะคุณสมบัติที่สำคัญ ๆ สำหรับเหล็กหล่อเท่านั้น

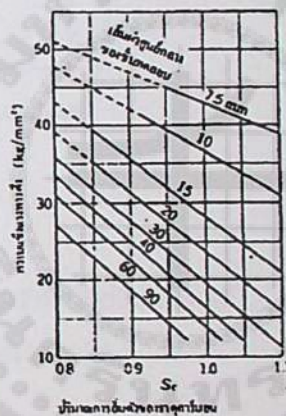


(a) ความแข็งแรงทางดึงและการยึดตัวก่อนขาด

คาร์บอนมีผลกระทบกระเทือนอย่างมากต่อความแข็งแรงทางดึง ถ้ามีคาร์บอนน้อยความแข็งแรงจะเพิ่มซิลิกอนมีผลกระทบกระเทือนคล้าย ๆ กับคาร์บอน แต่น้อยกว่า รูป 2.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับการอิ่มตัวของคาร์บอน (Degree of saturation of carbon) และความแข็งแรงทางดึง

$$Sc = \frac{C\%}{4.23 - 0.312Si\%}$$

เหล็กหล่อเทาจะอ่อนแอถ้ามีซิลิกอนเกิน 2% เพราะจะมีซิลิโก-เฟอไรต์ในโครงสร้างและจะเปราะมากถ้ามีซิลิกอนถึง 2.2~2.5% หรือมากกว่านี้ ถ้ามีแมงกานีสต่ำกว่า 1.2% จะทำให้เหล็กหล่อเทาแข็งแรงขึ้น ฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์นั้นถ้าปริมาณไม่เกินระดับปกติก็ไม่ส่งผลกระทบกระเทือนต่อเหล็กหล่อเทา



รูปที่ 2.36 แสดงปริมาณคาร์บอนที่มีผลต่อความแข็งแรงทางดึง

การยึดตัวก่อนขาดของเหล็กหล่อเทาประมาณ 0.3~1.2% ถ้าความแข็งแรงทางดึงสูงขึ้น การยึดตัวก่อนขาดจะลดลง

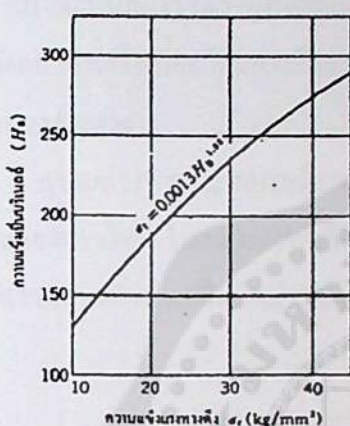
(b) ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของเหล็กหล่อเทาเท่ากับ 130~270 ตามระบบบริเนล (Brinell Hardness) ความแข็งจะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับโครงสร้าง กราฟที่หาพบในโครงสร้างพื้นที่เป็นเฟอไรต์จะทำให้ความแข็งต่ำ และถ้ากราฟที่ละเอียดและมีอยู่เล็กน้อยความแข็งจะสูง นอกจากนั้นความแข็งยังเป็นสัดส่วนกับความแข็งแรงทางดึง ดังในรูป 2.37 ดังนั้นจากการวัดความแข็งซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย จะทำให้รู้ความแข็งแรงทางดึงได้

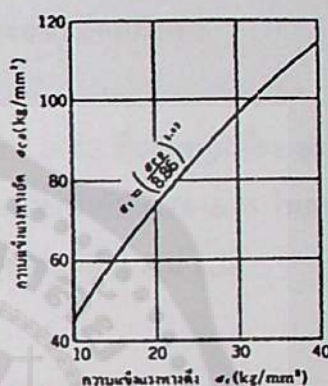


## (c) ความแข็งแรงทางอัด (Compressive Strength)

ความแข็งแรงทางอัดของเหล็กหล่อเทาเท่ากับ 3-5 เท่าของความแข็งแรงทางดึง และมักจะสูงกว่าความแข็งแรงทางอัดของเหล็กเหนียว ถ้าความแข็งแรงทางดึงสูงขึ้นอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงทางอัดและความแข็งแรงทางดึงจะลดลง รูป 2.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงทางอัดและความแข็งแรงทางดึง



รูปที่ 2.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงเป็นบริเนลล์ ความ และความแข็งแรงทางดึง



รูปที่ 2.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความแข็งแรงทางดึง

## (d) ความทนต่อการกระแทก (Impact Strength)

เหล็กหล่อเทาเปราะทนการกระแทกไม่ใคร่ได้ ถ้ายังมีคาร์บอน ซิลิกอนหรือฟอสเฟอรัสสูง ความทนต่อการกระแทกจะยิ่งน้อย การมีซีเมนไทท์และเสดไคท์ก็จะทำให้ความทนต่อการกระแทกลดลงด้วย

## (e) ความสามารถในการรับกระทำด้วยเครื่องกลโรงงาน (Machinability) และความทนต่อการสึกหรอ (Wear Resistance)

เหล็กหล่อเทานั้นเป็นที่รู้กันว่าเป็นวัสดุที่กระทำด้วยเครื่องกลโรงงานได้สะดวก และทั้งทนต่อการสึกหรอ กราไฟท์ทำหน้าที่หล่อลื่นทำให้กระทำด้วยเครื่องกลโรงงานได้สะดวก การที่มีความแข็งต่ำและความแข็งแรงทางดึงต่ำก็ทำให้กระทำด้วยเครื่องกลโรงงานได้ดีด้วย

โครงสร้างที่เป็นเพอไลท์ทนต่อการสึกหรอได้ดีกว่าโครงสร้างที่เป็นเฟอไรท์ โดยทั่วไปการที่มีความแข็งสูงจะทำให้ทนต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น เหล็กหล่อ โครงสร้างเพอไลท์ที่มีความ



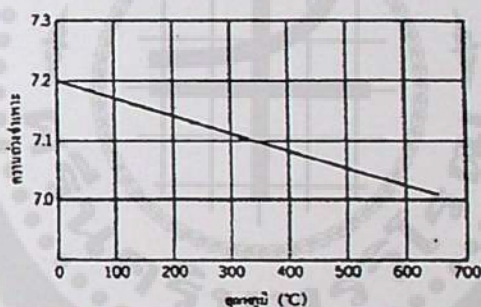
แข็ง 180–200 ตามระบบบริเนล จะทนต่อการสึกหรอได้ดี เนื่องจากเฟอรัสทำให้เกิดสเตไดต์ ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ฟอสเฟอไรต์เข้าผสมเพื่อเพิ่มความทนต่อการสึกหรอ นอกจากนั้นยังอาจเพิ่มความทนต่อการสึกหรอได้มากถ้าเติมโครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัมและทองแดง ฯลฯ เข้าไปเป็นส่วนผสม

## (2) คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical) และทางเคมีของชิ้นงานเหล็กหล่อเทา

โครงสร้างของเหล็กหล่อเทาเป็นส่วนผสมของสภาพ (Phase) ต่าง ๆ เช่นกราไฟท์ เฟอร์ไรท์ เพอไลต์ ซิเมนไทท์ และนอกจากนั้นยังมีสเตไดต์ และแมงกานีสซิลไฟด์แต่ละสภาพมีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน ดังนั้นกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของเหล็กหล่อเปลี่ยนตามอัตราส่วนของการผสมของสภาพต่าง ๆ ดังกล่าว ต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงคุณสมบัติเฉลี่ยของเหล็กหล่อเทา

### (a) ความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะของเหล็กหล่อเทาเท่ากับ 7.1–7.3 ที่อุณหภูมิห้อง จะขึ้นเป็นอย่างมากต่อปริมาณของกราไฟท์ ในสภาพน้ำเหล็กความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 6.75–6.95 ในสภาพของแข็ง การลดลงของความถ่วงจำเพาะเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มในอุณหภูมิดังในรูป 2.39



รูปที่ 2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความถ่วงจำเพาะของเหล็กหล่อ

### (b) การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กหล่อเทาเท่ากับประมาณ  $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ซึ่งต่ำกว่าของเหล็กเหนียวเล็กน้อย สัมประสิทธิ์การขยายตัวนี้ขึ้นกับส่วนผสม โครงสร้างและอุณหภูมิ เมื่อเทียบกับเหล็กหล่อขาว ของเหล็กหล่อเทาจะสูงกว่า ถึงแม้ว่าจะไม่ขึ้นกับส่วนผสมมากเท่าคุณสมบัติทางกายภาพอื่น แต่ก็กล่าวได้ว่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจะลดถ้ามีปริมาณคาร์บอนมาก สำหรับส่วนผสมอื่น ๆ นั้นถ้ามีอยู่ในอัตราปกติ ก็แทบจะไม่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวเลย



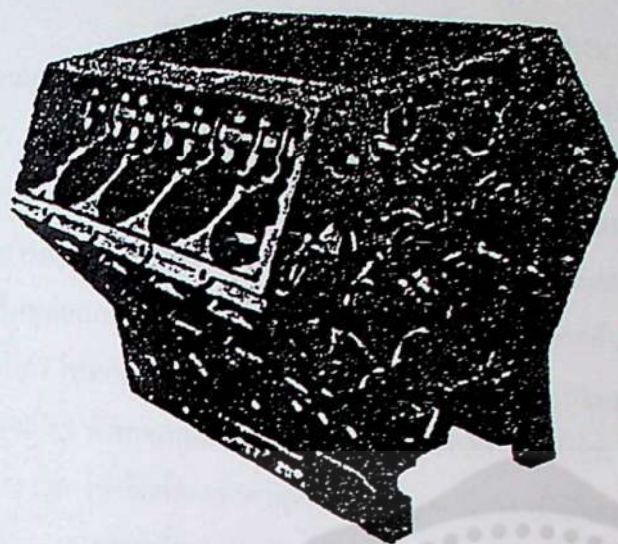
(c) ความนำไฟฟ้า (Electric Conductivity)

กราไฟท์มีความต้านทานไฟฟ้ามากที่สุดในบรรดาสภาพ (Phase) ทั้งหลายนั่น ปริมาณ กราไฟท์ ลักษณะการกระจายตัว ตลอดจนรูปร่างของกราไฟท์จึงมีผลเป็นอย่างมากต่อ ความนำไฟฟ้า ถ้าเพิ่มคาร์บอนและซิลิกอนจะช่วยให้เกิดกราไฟท์มากขึ้น และดังนั้นจะลดความนำ ไฟฟ้า ถ้ามีปริมาณกราไฟท์เท่ากัน กราไฟท์หยาบจะทำให้ความนำไฟฟ้าต่ำกว่ากราไฟท์ละเอียด

(d) ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

เฟอไรท์ถูกกัดกร่อนทางเคมี (Chemical corrosion) มากที่สุด เฟอไรท์จะทนการ กัดกร่อนได้ดีกว่า ส่วนซีเมนไทท์นั้นมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงมาก เหล็กหล่อสูงเหล็กเหนียว ไม่ได้ในด้านทานกรดกัดกร่อน เพราะเหล็กและกราไฟท์เป็นขั้วของเซลล์ไฟฟ้า ทำให้เกิดการกัด กร่อนด้วยวิธีกัลวานิก (Galvanic corrosion) แต่เหล็กหล่อทนต่อสนิมและน้ำทะเลได้ดีกว่าเหล็ก เหนียว โครงสร้างที่ละเอียดและที่มีกราไฟท์ละเอียดทนการกัดกร่อนได้ดีมาก ส่วนผสมอื่น ๆ นอก เหนือจากคาร์บอนและซิลิกอนแทบจะไม่มีผลกระทบต่อความต้านทานการกัดกร่อนเลย โครเมียม นิกเกิลและทองแดงเป็นส่วนผสมที่เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้อย่างมาก





ก. ห้องเครื่องยนต์



ข. จานเบรค



ค. ล้อรถแทรกเตอร์



จ. กระบอกสูบ



ง. แคมชาร์ปของเครื่องยนต์

รูปที่ 2.40 ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ทำด้วยเหล็กหล่อเทา



### เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมหรือเหล็กหล่อเหนียว

เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมมีชื่อเรียกเป็นภาษาอังกฤษได้หลายชื่อ เช่น Nodular iron, Ductile iron หรือ Spheroidal graphite iron เป็นเหล็กหล่อเทาที่ผสมแมกนีเซียมลงไปในน้ำเหล็กเหลว ทำให้แกรไฟต์ตกผลึกเป็นเม็ดกลมเล็ก ๆ กระจายทั่วไป แทนที่จะเป็นแบบเกล็ดเหมือนในเหล็กหล่อเทาอื่น ๆ ลักษณะโครงสร้างที่มีเม็ดแกรไฟต์กลมนี้จะทำให้ความเหนียว ความแข็งแรง และการต้านแรงกระทำกะทันหันของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมดีกว่าเหล็กหล่อเทาธรรมดา นอกจากนี้เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมยังแสดงจุดยึดเหนี่ยวเหมือนในเหล็กกล้าอีกด้วย ดังนั้นการกำหนดคุณภาพของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมจึงเพิ่มยึดตึงตัวและการยืด (Elongation) รวมเป็นตัวเลขสามกลุ่ม เช่น 400-300-15 ตัวเลขกลุ่มแรกจะแสดงถึงเทนไซล์ตึงตัว มีค่า 400 นิวตัน/มิลลิเมตร ตัวเลขตัวกลางจะแสดงค่ายึดตึงตัวตึงตัวเท่ากับ 300 นิวตัน/มิลลิเมตร<sup>2</sup> ส่วนตัวเลขตัวสุดท้ายหมายถึงการยืดเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความยาวพิ้งค์เท่ากับ 50 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับเหล็กหล่อเทาที่สมบัติต่าง ๆ ของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคกล่าวคือหากเม็ดแกรไฟต์ฝังอยู่ในโครงสร้างที่มีเฟอร์ไรต์มาก เหล็กหล่อนี้ก็จะมีค่าความแข็งแรงต่ำแต่การยืดจะมาก ทำนองกลับกัน หากเม็ดแกรไฟต์ฝังอยู่ในโครงสร้างพื้นฐานที่เพอร์ไลต์ก็จะมีค่าความแข็งแรงสูงแต่การยืดต่ำ

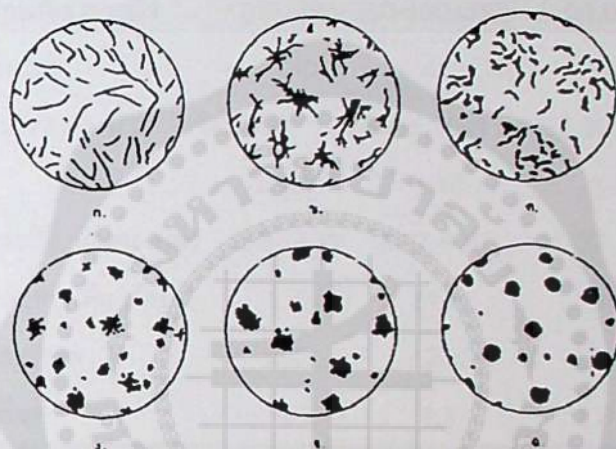
เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่ผลิตโดยบริษัท นวโลหะไทย จำกัด เป็นการผลิตตามกรรมวิธีของ มีฮาโนต์และกำหนดคุณภาพเป็น SF400, SP500 และ SH600 มีลิขสิทธิ์ทางการค้าว่า Meehanite ductliron ความหมายของแต่ละชนิดก็คล้ายกับข้อกำหนดมาตรฐานทั่วไป กล่าวคือ S หมายถึง Spheroidal graphite, F หมายถึงโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์ P หมายถึงโครงสร้างพื้นฐานเป็นเพอร์ไลต์ และ H หมายถึงคุณสมบัติที่สามารถทำให้แข็งได้ (Hardenability) ส่วนตัวเลขท้ายตัวอักษรแสดงค่าหน่วยต้านแรงดึงต่ำสุดเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ดังนั้น SF 400 จึงหมายถึงเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์และมีค่าหน่วยต้านแรงดึงได้ต่ำสุดเป็น 400 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรเป็นต้น

รูปร่างของแกรไฟต์กลมไม่ว่าจะเหมือนกันทุกครั้งที่เคียว ทั้งนี้เพราะกรรมวิธีการผลิตยุ่งยากกว่าการผลิตเหล็กหล่อเทา และในบางครั้งอาจจะได้ผลเป็นเหล็กเทาแทนก็ได้ รูปร่างได้แกรไฟต์กลมจึงอาจจะเป็นไปได้หลายแบบดังแสดงในรูปที่ 6.4 และจะถือว่ารูปร่างที่ได้มาตรฐานเริ่มจากรูป ค. ส่วนรูป ก. และข. ถือว่าเป็นเหล็กหล่อเทา ถึงแม้ว่ารูปร่างของแกรไฟต์ที่ไม่ใช่รูปกลมจะทำให้คุณสมบัติทางกลต่ำลง แต่เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีรูปร่างดังเช่นในรูป ค. ก็ยังแข็งแรงกว่าเหล็กหล่อเทาและจัดอยู่ในกลุ่มเหล็กหล่อคอมแพ็คแกรไฟต์ (Compact graphite iron) ส่วนการจะให้ได้เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมที่มีรูปร่างแกรไฟต์กลมจริง ๆ นั้นก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตอย่างใกล้ชิด



โดยที่เหล็กหล่อเกรไฟต์กลมมีแมกนีเซียมผสมอยู่ด้วย จึงทำให้มันมีความแข็งแรงและรับแรงกระแทกโดยกะทันหัน (Shock load) ได้ดีกว่าเหล็กหล่อเทาธรรมดา อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเหล็กชนิดนี้จะมีความเหนียวกว่า แต่แข็งกว่า คานาซีตีและการนำความร้อนมีน้อยกว่าเหล็กหล่อเทาธรรมดา

ในด้านราคาเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมจะมีราคาแพงกว่าเหล็กหล่อเทาเล็กน้อย แต่ก็ยังมีราคาต่ำกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ตัวอย่างการใช้งานก็ได้แก่ เพลาข้อเหวี่ยง (Crankshaft) เกียร์ บานพับประตูดยสนัด ตุ๊กตาเพลาท้ายรถบรรทุก



**รูปที่ 2.41** ลักษณะการกระจายตัวของเกรไฟต์ที่ปรากฏให้เห็นในเหล็กหล่อเกรไฟต์กลม

#### สมบัติเชิงวิศวกรรมของเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมชนิดต่าง ๆ

เหล็กหล่อเกรไฟต์กลมชั้นคุณภาพ (SF 400 Meehanite ductliron) เป็นเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมที่มีความเหนียวมากเป็นพิเศษ และรับแรงกระแทกโดยกะทันหันได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถรับการกลึงไสและแต่งขึ้นรูปดี โครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์ จึงทำให้ SF400 ไม่อาจที่จะชุบผิวแข็งโดยเปลวไฟ (Flame hardening) ได้

เหล็ก SF400 นี้ เทียบได้ชั้นมาตรฐานดังต่อไปนี้

ASTM-A 536-70

MIL-1-11466 A

MIL-1-17166

ASTM A 395-70

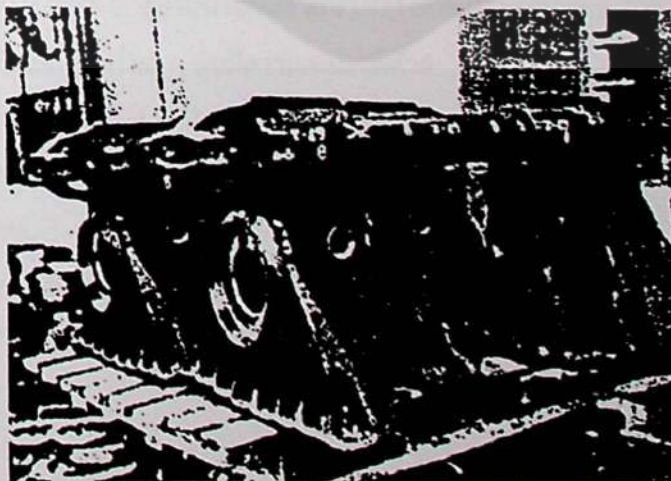
ASM 5351



การใช้งาน นำไปใช้กับชิ้นส่วนที่ได้รับทั้งแรงกระแทกและอุณหภูมิสูงกะทันหัน (Thermal and mechanical shock) และในงานที่รับความดัน เช่น กระบอกวาล์ว ชิ้นส่วนของ เครื่องยนต์เครื่องมือกล-อุปกรณ์ของเรือ และใช้แทนงานหล่อที่เดิมเป็นเหล็กเหนียว (Steel castings) เหล็กกล้าที่เชื่อมชิ้นรูป (Steel weld ments) และเหล็กหล่ออบเหนียว

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กหล่อเกรดไฟด์กลม

| ชั้นคุณภาพ                                                                     | SF 400             | SP 600                  | SH 700             | SH 800                   |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| หน่วยต้านแรงดึง, นิวตัน/มม <sup>2</sup><br>(tensile strength), ปอนด์/ตารางนิ้ว | >400<br>(60,000)   | 550/700<br>(80-100,000) | >700<br>(100,000)  | 700/1190<br>(100/170,00) |
| หน่วยแรงจํานน, นิวตัน/มม <sup>2</sup><br>(yield strength), ปอนด์/ตารางนิ้ว     | >310<br>(45,000)   | 410/530<br>(60/75,000)  | >450<br>(65,000)   | 480/900<br>(70/130,000)  |
| ความยืด, เปอร์เซนต์                                                            | 15-20              | 3-10                    | 1-5                | 1-5                      |
| การต้านแรงกระแทกชาร์ปี, นิวตัน-เมตร<br>(charpy impact strength), ฟุต-ปอนด์     | 1.37-4.12<br>(1.3) | 1.37-6.87<br>(1-5)      | 1.37-1.42<br>(1.3) | 1.37-4.12<br>(1-3)       |
| ความแข็งหน่วยบริเนล (BHN)                                                      | 160                | 200                     | 240                | 263/600                  |
| การเผื่อหดตัว, เปอร์เซนต์                                                      | 1.3                | 1.3                     | 1.3                | 1.3                      |



รูปที่ 2.42 แสดงตุ้กดึงเพลาท้ายรถบรรทุกที่หล่อด้วยเหล็กเกรดไฟด์กลม



เหล็กหล่อเกรไฟต์กลมชั้นคุณภาพ (SP 600 Meehanite Ductliron) เป็นเหล็กหล่อที่มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กหล่อเทาถึง 2 เท่า ในขณะที่เดียวกันก็มีความเหนียวดีด้วย โครงสร้างพื้นฐานจะเป็นเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่ และมีความสามารถรับการกลึงไสแต่งขึ้นรูปได้ดี นอกจากนี้ยังอาจถูกทำให้แข็งเฉพาะผิวเหนียวนำไฟฟ้า

เหล็กหล่อ SP 600 ตรงกับชั้นคุณภาพมาตรฐานดังต่อไปนี้

ASTM-A 536-70

MIL-1-11466 A

การใช้งาน อุปกรณ์ที่ต้องรับแรงกระแทก (Stress shock) หรือที่ต้องรับแรงดันภายในสูง เช่น เกียร์ที่ใช้ในงานหนัก ซี่เฟือง (sprockets) เฟลาข้อเหวี่ยง ก้านลูกสูบ แคม (Cam) หม้อเพลารถยนต์ (Car journal boxes) กระบอกคอมเพรสเซอร์ ส่วนประกอบของเครื่องยนต์ดีเซล ฯลฯ

คุณสมบัติอื่น ๆ ดูได้ในตารางที่ 2.4

เหล็กหล่อเกรไฟต์กลมชั้นคุณภาพ (SH 700 Meehanite ductliron) เป็นเหล็กหล่อเกรไฟต์กลมที่สามารถทำให้แข็ง (Hardenability) ได้ดี เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงมากและงานหล่อที่มีความหนามาก ในสภาพหล่อ เหล็กหล่อ SH 700 จะมีโครงสร้างพื้นฐานทั้งหมดเป็นเพอร์ไลต์

สำหรับความแข็งของเหล็กหล่อ SH 700 นี้จะมีค่าเท่าใดนั้นจะขึ้นอยู่กับกรรมวิธีอบชุบ หากอบอ่อนก็จะสามารถกลึงไสแต่งได้ง่ายเพราะความแข็งต่ำ หากอบชุบแข็งก็อาจจะมี ความแข็งสูงเท่าเหล็กกล้าทำเครื่องมือ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีอบชุบแข็งว่าเป็นวิธีใด ถ้าหากอบเหล็กหล่อ SH 700 ที่ 900°C ชุบในน้ำมันแล้วลึนไฟ (Temper) ที่อุณหภูมิ 400°C มันก็จะมี ความแข็งแรงและการต้านแรงดึงสูงพร้อม ๆ กับมีความเหนียวดีด้วย

เหล็กหล่อ SH 700 ตรงกับชั้นคุณภาพมาตรฐานดังต่อไปนี้

ASTM-A 536-70

MIL-1-11466 A

การใช้งาน งานหล่อประเภททนความสึกหรอพร้อมกับต้องการให้มีความแข็งแรง และความแข็งสูงกว่าในสภาพหล่อ เช่น เกียร์ที่ใช้กับงานหนัก เสือปั๊ม ลูกกลิ้ง แม่พิมพ์ (Dies) งานกลัดซ์ งานเบรค



### เหล็กหล่อขาว

เหล็กหล่อขาวได้แก่เหล็กหล่อที่มีคาร์บอนทั้งหมดอยู่ในลักษณะที่เป็นคาร์ไบด์ หรือซีเมนไทด์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ที่แข็งและเปราะ ดังนั้นเหล็กหล่อขาวจึงมีความแข็ง (Hardness) สูงและเปราะมาก ส่วนผสมของเหล็กหล่อชนิดนี้ต่างจากเหล็กหล่อเทาเล็กน้อย กล่าวคือมีปริมาณคาร์บอน 2.0 ถึง 3.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักและมีซิลิคอนต่ำเพียง 0.5 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อหล่อในแบบทรายแล้วปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ก็จะได้เหล็กหล่อขาวที่คาร์บอนไม่ตกผลึกออกมาในรูปของแกรไฟต์ การเลือกส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับความหนาของงานหล่อด้วย

เหล็กหล่อขาวที่ปล่อยให้เย็นลงช้า ๆ ในแบบหล่อ จะมีโครงสร้างเล็ก ๆ เป็นเพอร์ไลต์และซีเมนไทด์อิสระ (ที่ไม่รวมกับเฟอร์ไรต์เป็นเพอร์ไลต์) คล้ายกับที่เกิดในเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ต่างกันเพียงแต่ว่าในเหล็กสีขาวจะมีปริมาณซีเมนไทด์อิสระมากกว่า

โดยที่เหล็กหล่อสีขาวมีความแข็งสูงมาก จึงเหมาะสำหรับที่จะนำไปใช้ในงานที่มีการเสียดสี (Abrasive) เช่น เหล็กบุผนังเครื่องโม่ (Mill liners) หัวพ่นในเครื่องยิงทราย (Short-blasting nozzle) ผ้าเบรครถไฟ (Rail road brake-shoes) แผ่นกันสึกอุปกรณ์ผสมโคลน อุปกรณ์ทำอิฐ อุปกรณ์ในเครื่องบดและเครื่องปั่น ฯลฯ

เหล็กหล่อขาวยังอาจจะผลิตได้จากเหล็กที่มีส่วนผสมเหมือนของเหล็กหล่อเทา โดยการบังคับให้เหล็กหล่อเย็นลงอย่างรวดเร็วและไม่เปิดโอกาสให้คาร์บอนตกผลึกเสียก่อน นอกจากนี้โครงสร้างเล็ก ๆ จะมีขนาดเล็กละเอียดมากทำให้มันมีความแข็งเพิ่มขึ้นอีกด้วย การทำเหล็กหล่อสีขาวด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับงานหล่อที่มีขนาดบางมาก ๆ เพราะอัตราการเย็นตัวจะสูงอยู่แล้ว การบังคับให้เหล็กแข็งตัวอย่างรวดเร็วอาจทำได้โดยใช้ทุ่นเย็น (Chillers) ฝังลงในแบบทรายบริเวณผิวที่จะสัมผัสกับน้ำเหล็ก



รูปที่ 2.43 ลูกรีดโลหะทำจากเหล็กหล่อขาวพิเศษที่ทำให้แข็งเฉพาะบริเวณผิวโดยใช้กรรมวิธีทุ่นเย็น



โดยกรรมวิธีใช้ทุนเย็น ก็อาจจะให้งานหล่อด้วยเหล็กมีความแข็งแรงเฉพาะแห่งได้ โดยการวางทุนเย็นที่มีขนาดพอเหมาะลงในตำแหน่งที่ต้องการให้มีความแข็งแรงมาก เมื่อหล่อเสร็จบริเวณนั้นก็จะเป็เหล็กหล่อขาว ส่วนบริเวณอื่น ๆ จะยังคงเป็นเหล็กหล่อเทาที่ยังสามารถรับการแต่งไสขึ้นรูปได้ดี งานหล่อเหล่านี้ได้แก่ ลูกกลิ้งของโรงงานรีดเหล็ก ลูกล้อรถไฟ ฯลฯ ซึ่งจะมี ความแข็งแรงที่ผิวนอกเท่านั้นส่วนภายในยังคงเป็นเหล็กหล่อเทาที่สามารถรับแรงอัดได้ดี อย่างไรก็ตามการที่เหล็กหล่อที่หล่อด้วยกรรมวิธีใช้ทุนเย็นและทำให้งานหล่อมีความแข็งแรงเฉพาะที่ผิวนั้นแตกต่างจากเหล็กหล่อที่ทำผิวแข็งด้วยกรรมวิธีชุบแข็งเฉพาะผิว (Surface hardening) ทั้งทางโลหะวิทยาและกรรมวิธีการผลิตอย่างสิ้นเชิง

เหล็กหล่อขาวมีข้อเสียที่สำคัญอย่างหนึ่งคือมีความเปราะมาก จึงยากแก่การขนย้ายเพราะแตกหักได้ง่าย การแก้ไขที่พอทำได้ก็คือการลดปริมาณคาร์บอนลงหรือทำการเผาอบชุบให้พวกคาร์ไบด์เรียงตัวกันใหม่เป็นเม็ดกลมฝังในโครงสร้างพื้นฐาน ทำให้ความเปราะลดลงได้บ้าง แต่ก็ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นด้วย

สำหรับเหล็กหล่อขาวที่ผลิตโดยบริษัท นวโลหะไทย จำกัด มีชื่อว่า WCI ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

เทนไซล์สเตร้ง (Tensile strength) 28 กิโลกรัม/มิลลิเมตร<sup>2</sup>

ความแข็ง (Brinell hardness) 500-600

การหดตัว (Pattern maker shrinkage) 1.5 เปอร์เซนต์

เหล็กหล่อขาวนี้ตรงกับคุณภาพ W<sub>1</sub> ของมีธาไนต์และจัดอยู่ในกลุ่ม Meehanite Almanite ซึ่งประกอบด้วยเหล็กหล่อ W<sub>2</sub>, W<sub>4</sub>, WS และ WSH

การใช้งาน ใช้ในงานหล่อที่นำไปใช้ในงานที่มีการเสียดสี เช่น เครื่องบดถ่านหิน (Coal pulverizer) ใบมีดต่าง ๆ (Knife blades) ใบพัดของเครื่องดูดทราย ฯลฯ

### เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron)

เหล็กหล่ออบเหนียว คือเหล็กหล่อขาวที่แข็งเปราะซึ่งได้ถูกเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นเหล็กหล่อที่อ่อนและเหนียว โดยกรรมวิธีการอบในบรรยากาศพิเศษทำให้พวกคาร์ไบด์ที่แข็งเปราะสลายตัวเป็นผลึกคาร์บอนเม็ดกลมกับเฟอร์ไรต์หรือเพอร์ไลต์ ทำให้เหล็กหล่อชนิดนี้มีคุณสมบัติเหมือนเหล็กกล้าตรงที่มีความเหนียวคือแสดงจุดยืด เมื่อทำการทดสอบแรงดึง

ปกติเหล็กหล่ออบเหนียวจะมีส่วนผสมดังนี้ คาร์บอน 2.30-2.65 เปอร์เซนต์ แมงกานีส 0.30-0.40 เปอร์เซนต์ ซิลิคอน 1.00-1.70 เปอร์เซนต์ กำมะถัน 0.07-0.15 เปอร์เซนต์ และ ฟอสฟอรัส 0.05-0.12 เปอร์เซนต์ เหล็กหล่อเหนียวจะมีโครงสร้างต่างจากเหล็กหล่อชนิดอื่นตรงที่มี



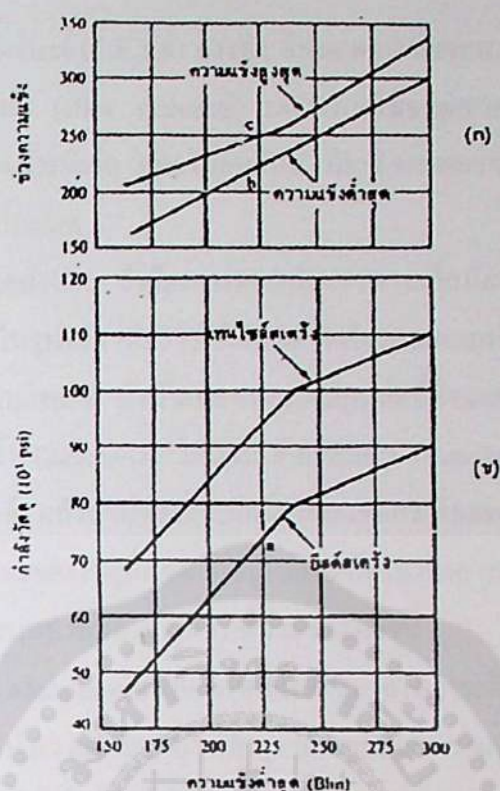
ผลึกแกรไฟต์กลมหรือค่อนข้างกลมที่เกิดจากการอบ (ธรรมชาติของการเกิดผลึกแกรไฟต์ต่างจากผลึกแกรไฟต์กลม) เหล็กหล่ออบเหนียวมักจะถูกนำไปใช้งานมากกว่าเหล็กหล่อคาร์บอนธรรมดา ก็เพราะนอกจากจะมีความเหนียวเหมือนกันแล้วก็มีคุณสมบัติที่สำคัญที่เหนือกว่าก็คือการต้านแรงกระแทก (Impact resistance) การต้านความล้า (Fatigue resistance) ด้านการสึกหรอ (Wear resistance) และความสามารถรับการกลึงไสแต่งขึ้นรูปดีกว่า กล่าวโดยสรุปเหล็กหล่ออบเหนียวรวบรวมคุณสมบัติที่สำคัญของเหล็กหล่อสีเทากับเหล็กกล้าเข้าไว้ด้วยกันนั่นเอง อย่างไรก็ตามเหล็กหล่ออบเหนียวจะมีราคาต่ำกว่าเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมเล็กน้อย

เหล็กหล่ออบเหนียวจะแบ่งตามชนิดเป็นเหล็กหล่อเหนียวเฟอร์ริติกกับเหล็กหล่อเพอร์ลิติก ชนิดเพอร์ลิติกจะเหนียวและดกแต่งกลึงไสได้ง่ายกว่า ส่วนชนิดเพอร์ลิติกจะมีความแข็งและความแข็งแรงสูงกว่า การผลิตจริงจะมีชนิดหนึ่งชนิดผสมระหว่างเพอร์ลิติกและเฟอร์ริติก คือในโครงสร้างจะมีทั้งผลึกแกรไฟต์กลมเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์รวมกันอยู่ นอกจากนี้ยังมีชนิดที่น่าจะกล่าวถึงก็คือ ชนิดมาร์เทนซิดิกเกรดได้แก่เหล็กหล่ออบเหนียวชนิดโคชนิดหนึ่งทีกล่าวนำข้างต้นถูกนำไปอบชุบแข็งให้มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซด์ แต่โดยปกติชนิดมาร์เทนซิดิกมักจะรวมเป็นชนิดเดียวกับเพอร์ลิติกที่มีความแข็งแรงสูงเป็นพิเศษ

ข้อแตกต่างที่สำคัญอีกข้อหนึ่งระหว่างเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ลิติกกับชนิดเพอร์ลิติกก็คือเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ลิติกจะมีคาร์บอนที่รวมกับเหล็กเป็นคาร์ไบด์ประมาณ 0.3 ถึง 0.8 เปอร์เซ็นต์ (ซึ่งอยู่ในรูปของเพอร์ไลต์) และส่วนผสมนี้สามารถทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นได้ โดยการอบและชุบแข็งซึ่งความแข็งบริเวณผิวอาจจะสูงถึง 60  $R_c$  (Rockwell hardness)

การกำหนดคุณภาพสำหรับงานหล่อด้วยเหล็กหล่ออบเหนียวชนิดเพอร์ลิติก จะกำหนดด้วยความแข็งในหน่วยความแข็งบริเนลเป็นหลัก เพราะเป็นคุณสมบัติที่สามารถกำหนดและควบคุมการผลิตได้ง่ายการกำหนดความแข็งจะอาศัยรูปกราฟที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.7 เป็นหลัก เพื่อเทียบกับค่าการต้านแรงดึงของชิ้นงาน แรกทีเดียวก็กำหนดหรือคำนวณค่าเทนไซล์สแตนด์สำหรับชิ้นงานที่จะหล่อเพื่อนำไปใช้งานเสียก่อน ในที่นี้ขอสมมติว่าค่าyield strength เป็น 74,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากกราฟรูป (ก) จะได้ความแข็งของชิ้นงานเป็น 225 หน่วย Bhn (จุด a) ส่วนการกำหนดช่วงความแข็งกระทำโดยใช้กราฟรูป (ข) โดยลากเส้นขนานกับแกน นอกจากจุดความแข็ง 220 หน่วย Bhn จะไปตัดเส้นความแข็งต่ำสุดที่สุด b แล้วลากเส้นตั้งไปตัดเส้นความแข็งสูงสุดที่จุด c ซึ่งอ่านได้ 250 หน่วย Bhn นั่นคือช่วงความแข็งที่จะกำหนดควรเป็น 220 ถึง 250 หน่วย Bhn





รูปที่ 2.44 แสดงกราฟแสดงคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กหล่อเหนียว

ในกรณีที่เหล็กหล่อเหนียวชนิดนี้จะนำไปใช้งานที่ทนการสึกหรอ การกำหนดคุณภาพกระทำได้โดยใช้กราฟรูป (ข) เพียงอย่างเดียว

การใช้งาน เหล็กหล่อเหนียวชนิดเพอร์ลิติกส่วนใหญ่ใช้ในงานหนัก เช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์ รถไฟและรถแทรกเตอร์

นับแต่วิกฤติการณ์น้ำมันเป็นต้นมา ความนิยมของเหล็กหล่อเหนียวลดลงไปมาก เนื่องจากต้นทุนด้านการบดค่อนข้างสูง เพราะเชื้อเพลิงราคาสูงขึ้นมาก ผู้คนจึงหันไปนิยมเหล็กหล่อเหนียวมากขึ้น

#### อิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กหล่อ (Effects of alloy addition in cast iron)

การผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กหล่อส่วนใหญ่เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มคุณสมบัติทางด้านความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการกัดกร่อน และความต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิให้กับเหล็กหล่อสำหรับคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงคั้นนั้น เหล็กหล่อจะสามารถเพิ่มได้จนถึงประมาณ 22 ton/in<sup>2</sup> หรือ 340 N/mm<sup>2</sup> โดยเหล็กยังมีคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการกลึง-ไสดี สามารถกระทำได้โดยการ Inoculated ด้วย เฟอร์โรซิลิกอน หรือแคลเซียมซิลิไซด์



กับเหล็กที่มีค่า Carbon equivalent (C.E.) ต่ำ การทำ อินนอคูลูเลชั่นจะสามารถให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงโดยไม่ต้องอาศัยธาตุผสม (alloy elements) เพราะการใช้ธาตุผสมจะทำให้เหล็กมีราคาแพง และธาตุผสมบางธาตุ โดยเฉพาะนิเกิล และโมลิบดีนัม มีราคาแพงเพราะประเทศของเราไม่มีโรงงานผลิต ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ

การผสมธาตุต่าง ๆ ถ้าต้องการผสมเพียงจำนวนเล็กน้อยจะผสมในเบ้า (Ladle) และธาตุผสมส่วนมากจะอยู่ในรูปของ เฟอร์โร-อัลลอยด์ ถ้าต้องการผสมปริมาณสูงจะต้องใส่ในเตาหลอม ซึ่งจะมีการสูญเสียจำนวนมาก ดังนั้นการหลอมเหล็กหล่อที่ต้องผสมธาตุบางตัว ปริมาณสูง จะกระทำโดยเตาหลอมไฟฟ้า (Induction) ไม่นิยมใช้เตาพ่นลม (Cupola) ในบางกรณีอาจต้องทำการหลอม เฟอร์โร-อัลลอยด์ แล้วนำมาผสมกับเหล็กหลอมเหลวเพื่อลดการสูญเสีย หรือบางครั้งอาจต้องใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณของธาตุที่ต้องการอยู่ในเกณฑ์สูงมาทำการหลอมแล้วจึงเติมธาตุผสมลงไปอีกเล็กน้อยในภายหลังขั้นตอนของธาตุผสมที่น่าสนใจมีดังนี้

อลูมิเนียม (Aluminium) มีบทบาทที่สำคัญมากในการเพิ่มคุณสมบัติทางด้านความต้านทานที่อุณหภูมิสูง และให้ ความต้านทานไฟฟ้าสูง แต่อลูมิเนียม สามารถยอมให้แก๊สไฮโดรเจนละลายได้ดี ดังนั้นจะมีส่วนทำให้เหล็กเกิดโพรงอากาศเล็ก ๆ (Pin hole) ในเนื้อเหล็ก ปริมาณอลูมิเนียมที่จะทำให้เกิดโพรงอากาศเล็ก ๆ มีเพียงแค่ 0.01 – 0.2% Al เท่านั้น

อลูมิเนียม ทำให้อุณหภูมิการเกิดยูเทคตอยด์ สูงขึ้นประมาณ  $16^{\circ}\text{C}$  สำหรับเหล็กที่มี 2% Al และจะเพิ่มขึ้นเป็น  $96^{\circ}\text{C}$  สำหรับเหล็กที่มี 6.2% Al และทำให้ Freezing point สูงขึ้น  $16^{\circ}\text{C}$  ทุก ๆ 1% Al จนถึงประมาณ 5.75% Al

ในเหล็กหล่อทั่ว ๆ ไป จะไม่ใส่อลูมิเนียม จะใส่เฉพาะในเหล็กหล่อขาว เพื่อจะนำไปทำ Annealing เพื่อเปลี่ยนเป็นเหล็กหล่ออบเหนียว ซึ่งจะใส่ประมาณ 0.001-0.03% Al

เหล็กหล่อผสมอลูมิเนียม ตามมาตรฐานมีอยู่ 4 กลุ่ม ที่จัดไว้เป็นเหล็กหล่อทนความร้อนสูงคือ

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| เหล็กหล่อ | Pearlitic 9% Al         |
|           | White 11 – 9% Al        |
|           | Ferritic 21 – 26% Al    |
|           | Ledeburitic 28 – 32% Al |

บิสมัท (Bismuth) ปกติในเหล็กหล่อจะไม่ผสมบิสมัท ยกเว้นอาจจะคิดมากับเศษเหล็ก ซึ่งจะมีบทบาทช่วยให้เกิด Widmanstatten graphite มีส่วนทำให้ความเค้นแรงดึงลดลง นอกจากนี้จะไปทำลายบทบาท ของแมกนีเซียมในเหล็กหล่อกราฟไฟต์กลมคล้ายกับ ตะกั่ว, โพแทสเซียม



และแอนติโมมี ในการทำเหล็กหล่ออบเหนียวจะผสมบิสมัท ระหว่าง 0.002-0.01% เพื่อช่วยควบคุมผิวแข็ง (Chill) และ Annealability

โบรอน (Boron) เป็นธาตุที่ไม่ผสมในเหล็กหล่อสีเทา เพราะโบรอน เป็นธาตุที่เพิ่มเสถียรภาพให้กับคาร์ไบด์ (Carbide stabiliser) แต่โอกาสที่จะมีอยู่ในเหล็กหล่อได้ตั้งแต่ 0.002-0.006% โดยคิดมาจากพวกเศษเหล็ก ที่มีการเคลือบ (Enamel) หรือจากวัสดุทนความร้อนที่ใช้โบรอนเป็นตัวประสาน ซึ่งจะไปมีผลต่อการควบคุมผิวแข็ง (Chill control) ของเหล็กหล่อ ในเหล็กหล่ออบเหนียว จะผสมโบรอน ประมาณ 0.002% ร่วมกับ บิสมัทประมาณ 0.008% ซึ่งจะช่วยควบคุมคุณสมบัติ Annealability ให้กับเหล็ก ถ้าในเหล็กมีโครเมียม ซึ่งจะทำให้การแตกตัวเป็นกราไฟต์ยาก แต่ถ้ามีโบรอน จะไปดึงเอาโครเมียม มารวมเป็นโครเมียมโบไรด์ ทำให้ไม่เกิดคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง การทำอบเหนียวจะไม่เกิดอุปสรรค

โครเมียม (Chromium) เป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดคาร์ไบด์ก่อนข้างแรง ซึ่งจะไปทำให้การเกิด กราไฟต์เป็นไปได้ยาก ถ้ากำหนดให้ซิลิกอนเป็น Graphitiser มีค่าเท่ากับ 1 โครเมียมจะมีค่าตรงข้ามกับซิลิกอนและจะมีค่า -1.2 นอกจากนี้โครเมียมยังมีบทบาทลดปริมาณของคาร์บอนที่จุดยูเทคติก ลงประมาณ 0.06-0.5% ทุก ๆ 1% Cr ที่ผสมในเหล็ก และถ้าโครเมียมสูงถึง 3% โครงสร้างของเหล็กหล่อทุกส่วนผสมจะเป็นมีโครงสร้างเป็นเหล็กหล่อขาว โครเมียมทำให้จุดหลอมเหลวของเหล็กสูงขึ้น  $1-1.5^{\circ}\text{C}$  ทุก ๆ 1% Cr

โครเมียมมีบทบาทอีกประการหนึ่งคือ จะลดอาณาเขตของ  $\gamma$  ให้แคบลงและทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง  $\alpha \rightleftharpoons \gamma$  สูงขึ้น อาณาเขตของ  $\gamma$  จะหายไปเมื่อผสมโครเมียมถึง 20% แต่จะลดอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical cooling rate) ซึ่งเท่ากับเป็นการช่วยให้เหล็กหล่อมีความสามารถในการชุบแข็งดีขึ้น

สำหรับเหล็กหล่อสีเทา, โครเมียมสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ถึงประมาณ 3% และเพิ่มความแข็งประมาณ 6-10 Point brinell ทุก ๆ ปริมาณของโครเมียมที่เพิ่มขึ้น 0.1% ในการเพิ่มความแข็งแรง และความแข็งของโครเมียม จากการศึกษาพบว่า โครเมียมจะทำให้โครงสร้างเป็นเฟอไรต์อิสระและ โครเมียมยังมีบทบาททำให้เฟอไรต์ มีเสถียรภาพสูง เมื่อถูกความร้อนถึงประมาณ  $450-650^{\circ}\text{C}$  โดยผสมโครเมียมเพียง 1% เป็นการเพิ่มคุณสมบัติด้านทานการเกิด การพองตัว (Growth) ได้ดีขึ้น

คุณสมบัติทางด้านการกลึง-ไส (Machinability) ของเหล็กหล่อผสมโครเมียมจะลดลงเพราะจะเกิดคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานด้วย

ในกรณีที่เหล็กมีฟอสฟอรัสอยู่ในเกณฑ์สูง โครเมียมจะสามารถฟอร์มคาร์ไบด์ร่วมกับ ฟอสฟอรัสให้ยูเทคติก กับเหล็กฟอสไฟด์ ซึ่งทำให้เหล็กแข็งและเปราะ



เหล็กทนการสึกหรอมักจะผสมโครเมียมประมาณ 0.5-1.5% ร่วมกับ นิกเกิล 4-5% จะได้เหล็กที่มีความแข็งแรงสูง มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ เรียกชื่อเหล็กนี้ว่า Ni-hard

ทองแดง (Copper) จัดเป็นธาตุอยู่ในกลุ่มช่วยทำให้เกิดกราฟไฟต์ (Graphitiser) มีค่าประมาณ  $\frac{1}{3}$  ของซิลิกอน ทองแดงสามารถละลายในเหล็กที่อุณหภูมิประมาณ 3-3.5% ถ้าผสมทองแดงลงไปมากกว่านี้ ทองแดงจะแยกตัวและจับกลุ่มเป็นทองแดงอิสระ (Free copper) ทองแดงเมื่อผสมในเหล็กหล่อจะมีผลช่วยทำให้เกิดกราฟไฟต์ และจะไม่มีส่วนทำให้เกิดคาร์ไบด์ ทองแดงมีบทบาทที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ช่วยทำให้เกิดเฟอไรต์ และไม่ให้เกิดเฟอร์ไรท์ ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติสม่ำเสมอคือเป็นเฟอไรต์

จากการศึกษาพบว่าในการหล่อเหล็กทั่ว ๆ ไปปรากฏว่าจะเกิดคาร์ไบด์ ตามส่วนของงานหล่อ ที่บางและจะเกิดเฟอร์ไรท์ ตามส่วนที่หนา แต่ถ้าผสมทองแดงลงไปในเหล็กประมาณ 2% จะพบว่าโครงสร้างของเหล็กจะเป็นเฟอไรต์หมด และในส่วนที่บางจะได้เฟอไรต์ที่ละเอียด

ทางด้านคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเทา จากการศึกษาลูกเหล็กหล่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง  $\frac{1}{2}$  - 6 นิ้ว ในเหล็กที่มีส่วนผสมยูเทคติก พบว่าคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความหนา และปริมาณของ ทองแดง ซึ่งผลจากการทดลองจะเป็นดังนี้

ที่ 1% Cu ความแข็งแรงจะสูงขึ้นประมาณ 15-35 Point brinell และความเค้นแรงดึงจะสูงขึ้นประมาณ 2-4 kg/mm<sup>2</sup>

ที่ 2% Cu ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นประมาณ 30-45 Point brinell และความเค้นแรงดึงจะเพิ่มขึ้นประมาณ 4.5-7 kg/mm<sup>2</sup>

โดยสรุปจะพบว่าการผสมทองแดง ในเหล็กหล่อจะทำให้ไม่เกิดเฟอร์ไรท์ แต่กลับจะเพิ่มความแข็งแรงและความเค้นแรงดึง โดยทองแดง จะทำให้ได้เฟอไรต์ ที่มีเกรนละเอียด แต่การเพิ่มทองแดง จะต้องไม่สูงเกิน 2.5% ถ้าสูงกว่านี้ค่าความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงที่ได้จะกลับลดลง

ในการผสมทองแดง ปริมาณสูงมักจะผสมร่วมกับนิกเกิล เพราะปรากฏว่านิกเกิลจะช่วยเพิ่มอัตราการละลายให้กับทองแดง ถ้าผสมนิกเกิล 1% ค่าอัตราการละลายของทองแดง จะเพิ่มขึ้น 0.4%

ทองแดง ไม่มีส่วนในการเพิ่มเสถียรภาพให้กับเฟอไรต์ ที่อุณหภูมิสูงเกิน 450°C จะทำให้เหล็กเกิดการพองตัวได้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่านี้

ทางด้านความสามารถในการกลึง-ไส และการผสมทองแดง มีส่วนช่วยทำให้ดีขึ้น



สิ่งที่ต้องระมัดระวังที่สุดก็คือ ไม่ควรใช้ทองแดง ที่ไม่ทราบแหล่งที่มาในการผสม เหล็กหล่อ เพราะอาจจะมีธาตุที่เป็นอันตราย เช่น ตะกั่ว และแอนติโมนี คิดมาด้วยควรใช้ทองแดงที่เป็นเศษมาจาก ทองแดงสายไฟหรือทองแดงอิเล็กทรอนิกส์

แมงกานีส (Manganese) จัดเป็นธาตุที่มีบทบาททางด้านเพิ่มเสถียรภาพให้กับ ออสเตนไนต์ และเป็นธาตุรวมกับการบ่อนให้คาร์ไบด์ ในหนังสือหลายเล่มไม่ได้กล่าวถึงบทบาทของแมงกานีสในเหล็กหล่อไว้เลยอาจจะเป็นเพราะสาเหตุที่แมงกานีสแยกตัวได้ง่ายและอีกประการหนึ่งสามารถรวมกับกำมะถันในเหล็กได้เป็นอย่างดี แมงกานีส จึงกลายเป็นธาตุที่ใช้สำหรับลดกำมะถันในเหล็กหล่อ (โดยจะใช้ประมาณ 1.7 เท่าของกำมะถันและบวกอีก 0.3%) ซึ่งเมื่อรวมกับกำมะถันแล้ว จะได้แมงกานีสซัลไฟด์ มีความด่างจำเพาะน้อยกว่าเหล็กหลอมเหลว

ในกรณีผสมแมงกานีสมากเกินไปปริมาณที่จะได้ดิ่งกำมะถัน แมงกานีสมีบทบาทช่วยให้เกิดเฟอไรต์และเพิ่มความแข็ง เพราะแมงกานีสมีแนวโน้มทำให้เกิดคาร์ไบด์ (Free carbide) ทำให้เหล็กเปราะแตกง่าย แมงกานีสมีบทบาทลดอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง  $\gamma \rightarrow \alpha$  ลง  $25^{\circ}\text{C}$  ทุก ๆ 1% แมงกานีส

แมงกานีสมีบทบาทอีกประการหนึ่งที่คล้ายนิเกิล คือช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับ ออสเตนไนต์ ดังนั้นจึงผสมในเหล็กหล่อปริมาณสูงประมาณ 6-15% เพื่อต้องการคุณสมบัติแม่เหล็กไม่ดูดติด และความต้านทานไฟฟ้าสูง

ปริมาณของแมงกานีสที่จะต้องผสมในเหล็กหล่อสีเทา เพื่อความมุ่งหมายในการลดกำมะถัน และเพื่อควบคุมโครงสร้างพื้นฐาน ก็ได้จากสูตร ดังนี้

1. ปริมาณเพื่อลดกำมะถันให้อยู่ในรูปแมงกานีสซัลไฟด์  $\% \text{Mn} = 1.7\% \text{S}$  ในเหล็ก
2. ปริมาณของแมงกานีสที่หลังจากดิ่งกำมะถันแล้ว จะละลายได้ในเฟอร์ไรต์  
 $\text{หมด } \% \text{Mn} = 1.7\% \text{S} + 0.30$
3. ปริมาณของแมงกานีสหลังจากดิ่งกำมะถันแล้ว จะช่วยทำให้ได้โครงสร้างเป็นเฟอไรต์  $\% \text{Mn} = 1.7\% \text{S} + 0.30$

โมลิบดีนัม (Molybdenum) เป็นธาตุที่มีบทบาทช่วยให้เกิดคาร์ไบด์ ซึ่งมีผลตรงกันข้ามกับซิลิกอนประมาณ -0.35 ในขณะที่เหล็กหล่อแข็งตัวโมลิบดีนัม จะมีบทบาททำให้เกิดยูเทคติก ระหว่าง ออสเตนไนต์กับคาร์ไบด์ และในขณะเดียวกันจะช่วยทำให้เกิดเฟอไรต์ ซึ่งจัดว่าโมลิบดีนัม เป็นธาตุที่ช่วยให้เฟอไรต์มีเสถียรภาพจนถึงอุณหภูมิระหว่าง  $350-650^{\circ}\text{C}$  ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติต้านทานการพองตัวที่อุณหภูมิสูง



ผสมกับโมลิบดีนัม ประมาณ 0.5% ในเหล็กหล่อ จะทำให้เฟอร์ไรต์อิสระถูกกำจัดหมด ทุก ๆ 0.1% Mo ที่เพิ่มความเค้นแรงดึง ประมาณ 3.5-4% และจะเพิ่มค่าความแข็งประมาณ 40 Point brinell ทุก ๆ 1% - Mo ที่เพิ่ม

เนื่องจากโมลิบดีนัมมีบทบาทในการเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็ก ดังนั้น เหล็กหล่อที่ผสมโมลิบดีนัมประมาณไม่เกิน 1% และปล่อยให้เย็นตัวในแบบทราย จะได้โครงสร้างที่เป็นเบนไนท์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Acicular cast iron

สิ่งที่ต้องระวังมากก็คือ ในเหล็กหล่อที่ต้องการผสมโมลิบดีนัม ควรจะมีฟอสฟอรัสต่ำ ไม่เกิน 0.15% เพราะถ้ามีปริมาณฟอสฟอรัสสูง จะเกิด Quaternary eutectic และจะเกิดคาร์ไบด์ที่เป็นกลุ่มก้อน (Massive carbide) ซึ่งมีความแข็งสูง มีผลต่อคุณสมบัติการกลึง-ไส

ในทางปฏิบัติจะผสมโมลิบดีนัม ในเหล็กหล่อไม่เกิน 1% และจะผสมร่วมกับนิกเกิล หรือทองแดง เพื่อต้องการให้โครงสร้างที่ได้เป็น อซิคูล่า เบนไนท์ (Acicular bainite) เป็นเหล็กที่มีความเค้นแรงดึงสูง และความแข็งสูงประมาณ 320 HB.

นิกเกิล (Nickel) เป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดกราฟไฟต์ เปรียบเทียบกับซิลิกอนจะมีค่าประมาณ + 0.3 นอกจากนี้ยังเป็นธาตุที่ช่วยให้ออสเตนไนท์มีเสถียรภาพ ดังนั้น จึงนิยมใช้นิกเกิลผสมในเหล็กหล่อทั่วไป จะผสมตั้งแต่ประมาณ 1% สำหรับเหล็กหล่อผสมต่ำจนถึง 20% Ni สำหรับเหล็กหล่อผสมสูง ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานจะเป็นออสเตนไนท์

นอกจากนี้นิกเกิลมีอิทธิพลทำให้อุณหภูมิยูเทคติก เพิ่มขึ้นประมาณ  $6^{\circ}\text{C}$  ทุก ๆ 1% ของ Ni และปริมาณคาร์บอน ที่จุดยูเทคติกจะลดลงประมาณ 0.41% ทุก ๆ 5% ของ Ni ที่ผสมให้เหล็กปริมาณของคาร์บอนที่จุดยูเทคติกจะลดลงประมาณ 0.04% ทุก ๆ 1% Ni และทำให้ปฏิกิริยายูเทคติกคอยด์ ต่ำลง ซึ่งผลอันนี้ทำให้เหล็กหลอมมีแนวโน้มที่จะได้โครงสร้างเป็นเฟลไรท์ที่ละเอียดในเหล็กหล่อผสมต่ำและจะยิ่งละเอียดมากยิ่งขึ้นเมื่อปริมาณของนิกเกิลเพิ่มขึ้น และเมื่อผสมนิกเกิล สูงประมาณ 6-8% การเกิดปฏิกิริยายูเทคติกคอยด์ จะเป็นไปได้ยาก และจะทำให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ขึ้นมาแทน

นิกเกิลสามารถเพิ่มความเค้นแรงดึง 5-10% และจะเพิ่มความแข็งประมาณ 10-20 point Brinell ทุก ๆ 1% Ni ที่เพิ่ม ซึ่งผลที่ได้เมื่อเทียบกับทองแดงแล้วจะได้ผลน้อยกว่า

นิกเกิลไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของเฟลไรท์ ไว้ได้ที่อุณหภูมิเกินกว่า  $450^{\circ}\text{C}$

ฟอสฟอรัส (Phosphorus) จัดเป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กหล่อทั่ว ๆ ไปธาตุหนึ่ง (Common element) ซึ่งไม่จัดเป็นธาตุผสม ความจริงฟอสฟอรัสเป็นธาตุอยู่ในกลุ่มช่วยให้เกิดกราฟไฟต์ใกล้เคียงกับซิลิกอน คือมีค่าประมาณ + 1 แต่เนื่องจากฟอสฟอรัส เมื่อรวมกับเหล็กเป็นเหล็กฟอสไฟด์แล้วจะทำให้เกิด Ternary eutectic ระหว่างออสเตนไนท์  $\text{Fe}_3\text{C}$  และ  $\text{Fe}_3\text{P}$  ซึ่งจะเกิด



อยู่ตามขอบเกรน เมื่อเหล็กเย็นตัวทำให้เหล็กมีความแข็งแรงและเปราะ มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำ จะใช้ประโยชน์ได้ในขอบเขตจำกัด เช่น ใช้ทำเบรค (Brake shoes) ของรถไฟ

ฟอสฟอรัส เป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล (Fluidity) ให้กับเหล็กหล่อมาก ดังเช่นในเหล็กส่วนผสมไฮเปอร์ (Hyper eutectic) ถ้าเพิ่มฟอสฟอรัสประมาณ 0.2% จะทำให้เหล็กหล่อหลอมเหลวมีความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น เท่ากับเหล็กหล่อที่หลอมละลายที่อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ  $15^{\circ}\text{C}$  หรือเท่ากับเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้น 0.1%

คุณสมบัติที่ ฟอสฟอรัส มีส่วนเพิ่มอีกประการหนึ่งก็คือ เพิ่มสมบัติการถ่ายเทความร้อน และค่านำไฟฟ้า (Electrical conductivity) เมื่อผสมร่วมกับ ซิลิกอน

ในเหล็กหล่อที่ใช้ทำกริดต้านทานไฟฟ้า (Electric resistance grid) สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าจะใช้เหล็กหล่อที่ผสมฟอสฟอรัส และซิลิกอน ปริมาณสูง

นอกจากนี้ ฟอสฟอรัส มีบทบาทในการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน ต่อกรดเกลือ กำมะถัน และกรดเซตติค

เหล็กหล่อที่ใช้ทำแบบหล่อ (Ingot mould) ของเหล็กกล้า มักจะผสมฟอสฟอรัสประมาณ 0.35-0.45% จะทำให้อายุใช้งานของแบบหล่อเหล็กทนทานขึ้น

ซิลิกอน (Silicon) เป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กหล่อแทบทุก ๆ ไปอีกธาตุหนึ่ง (Common element) ซึ่งไม่จัดเป็นธาตุผสม ถ้ามีอยู่ในเหล็กหล่อไม่เกิน 3% และจะผสมซิลิกอนเกิน 3% เฉพาะในกรณีที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ โดยเฉพาะใช้งานที่อุณหภูมิสูง

ซิลิกอนเป็นธาตุที่จัดอยู่ในกลุ่มช่วยให้เกิดกราฟไฟต์ อันดับแรก, ในเหล็กหล่อเทาจะต้องมีซิลิกอน, การศึกษาคุณสมบัติของเหล็กหล่อเทา จะพิจารณาร่วมกับคาร์บอน ซึ่งจะเปลี่ยนโครงสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณของ Si กับ C และอัตราการเย็นตัวในแบบหล่อ (ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุทำแบบหล่อขนาดความหนาของงานหล่อ)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ถ้าผสมซิลิกอนในเหล็กสูงกว่า 3% ในกรณีต้องการคุณสมบัติทนความร้อนของเหล็กหล่อ เช่นผสมซิลิกอน 5-7% (matrix เป็น Ferritic) จะทนความร้อนได้สูงถึง  $750^{\circ}\text{C}$  ในกรณีกราฟไฟต์มีลักษณะเป็นเกล็ด (flake) และจะทนได้สูงถึง  $850^{\circ}\text{C}$  เมื่อกราฟไฟต์เป็นรูปกลม (Nodule) ซึ่งเรารู้จักเหล็กหล่อชนิดนี้ในนามของซิลาล (Sial) และถ้าผสมนิเกิล ประมาณ 18% โครเมียมประมาณ 2-15% ซึ่งจะได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนท์ จะทนความร้อนได้สูงถึง  $1000^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเรารู้จักเหล็กหล่อชนิดนี้ในนามนิโคร-ซิลาล (Nicro-Sial)

คุณสมบัติทางด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน ปรากฏว่าเหล็กหล่อที่ผสมซิลิกอนประมาณ 15-18% สามารถทนกรดกำมะถัน, กรดเกลือ และกรดไนตริก ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 10% ได้ เหล็กหล่อที่เรียก Duriron เป็นเหล็กที่มี Si 14% คาร์บอน 0.4-1% และแมงกานีส 0.3-0.5%



สามารถทนกรดกำมะถัน และกรดไนตริกเจือจางได้ แต่ Duriron จะเปราะแตกง่ายมีโครงสร้างเป็นเหล็กหล่อขาว เพราะมีคาร์บอนต่ำ

กำมะถัน (Sulphur) จัดเป็นธาตุที่พบในเหล็กหล่อทั่ว ๆ ไป อีกธาตุหนึ่ง (Common element) ในเหล็กหล่อสีเทาจะมีไม่เกิน 0.25% กำมะถันจัดเป็นธาตุที่ช่วยทำให้เหล็กคาร์ไบด์ มีเสถียรภาพ แต่ไม่รวมกับคาร์บอนกำมะถันไม่ช่วยให้เกิดกราฟไฟต์มีผลตรงข้ามกับซิลิกอน ในเหล็กหล่อสีเทาที่มีปริมาณกำมะถันสูง จะมีส่วนทำให้ได้โครงสร้างเพิร์ไลต์แต่ถ้ามีปริมาณสูงเกินกว่า 0.25% จะมีส่วนทำให้เกิดคาร์ไบด์อิสระ ทำให้เหล็กมีความแข็งและเปราะ กลึงไสยากขึ้น ในเหล็กหล่อจำเป็นต้องผสมแมงกานีสเพื่อไปลดปริมาณของกำมะถัน ดังได้กล่าวมาแล้วในเรื่อง บทบาทของแมงกานีส ถ้าไม่มีแมงกานีสในเหล็กหล่อ กำมะถันจะรวมตัวกับเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งมีแนวโน้มจะแยกตัวอยู่ตามขอบเกรนในช่วงสุดท้ายของการแข็งตัวของเหล็ก เพราะเหล็กซัลไฟด์มีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ  $930^{\circ}\text{C}$  ทำให้เหล็กเปราะแตกง่ายที่อุณหภูมิสูง เรียกว่า Red short นอกจากนี้ถ้าในเหล็กมีกำมะถันสูง จะทำให้เหล็กหลอมเหลวมีความสามารถในการไหล (Fluidity) ต่ำ ทำให้งานหล่อเกิดข้อเสียได้ง่าย สรุปแล้วผลในแง่ดีของกำมะถันมีน้อยควรจะต้องควบคุมปริมาณให้อยู่ในขอบเขตต่ำคือไม่ควรเกิน 0.25%

ดีบุก (Tin) จัดเป็นธาตุที่มีอิทธิพลมากต่อเสถียรภาพของเพิร์ไลต์ แม้ว่าเหล็กหล่อจะมีค่า carbon equivalent (C.E) สูงถึง 4.7% ซึ่งตามปกติมักจะเกิดเฟอร์ไรต์อยู่รอบ ๆ กราไฟต์ แต่ถ้าผสมดีบุกประมาณ 0.15% จะได้เหล็กที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเพิร์ไลต์โดยสมบูรณ์

ในเหล็กหล่อเทาทั่ว ๆ ไป ถ้าผสมดีบุกประมาณ 0.1% และเหล็กมีความหนาแน่นน้อยกว่า  $1\frac{1}{2}$ " โครงสร้างที่ได้ก็ยังคงเป็นเพิร์ไลต์ และจะได้ค่าความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้นประมาณ 7% และความแข็งประมาณ 30 point Brinell โดยจะลดค่าความเค้นแรงกระแทก (Impact strength) ลงประมาณ 0.15%

โดยทั่ว ๆ ไปดีบุกจะไม่ช่วยทำให้เกิดคาร์ไบด์อิสระ และไม่เกิดเฟอร์ไรต์จะช่วยให้เกิดเพิร์ไลต์ทั้งในเหล็กหล่อเทาธรรมดา และเหล็กหล่อกราไฟต์กลม แม้ว่าเหล็กหล่อจะมีส่วนผสมเป็นไฮเปอร์ก็ตาม

ในเหล็กหล่อกราไฟต์กลม ดีบุก จะไม่มีผลต่อการฟอร์มของกราฟไฟต์ แต่จะช่วยเพิ่มความเค้นแรงดึง โดยสูญเสียความเหนียวเล็กน้อย ถ้าผสมดีบุกในเหล็กหล่อกราไฟต์กลมประมาณ 0.085% จะทำให้เกิดเพิร์ไลต์มีเสถียรภาพสูงจนถึงอุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลานาน ซึ่งจะทำให้ข้อด้านการเกิดการพองตัวได้ดี ในกรณีที่ต้องการทำเหล็กหล่อชนิดเฟอร์ริติก จะต้องไม่ผสมดีบุกในเหล็กเลย



การผสมดีบุกในเหล็กหล่อจะกระทำในเบ้า จากการทดลองพบว่าเศษเหล็กหล่อที่ได้จากเหล็กผสมดีบุก เมื่อนำกลับมาหลอมใหม่แม้หลอมด้วยเตา cupola จะปรากฏว่าไม่มีการสูญเสียดีบุกเลย

ไทเทเนียม (Titanium) เป็นธาตุที่แสดงบทบาทได้หลายประการในเหล็กหล่อ เพราะไทเทเนียมมี affinity สูง กับไนโตรเจน, ออกซิเจน และคาร์บอน โดยเฉพาะแก๊สทั้งสองมันจะมีผลอยู่ในเหล็กหล่อ มีผู้ทำการศึกษาคุณสมบัติของเหล็กหล่อที่ผสมไทเทเนียมไว้หลายด้าน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า

ถ้าผสมไทเทเนียมในเหล็กหล่อประมาณ 0.05-0.25% ไทเทเนียมจะมีผลทำให้เกิดกราฟไฟต์ ตั้งแต่ลักษณะที่ละเอียดมาก จนถึงขนาดที่ละเอียดปานกลาง โดยจะมีลักษณะตั้งแต่เป็นเกล็ด กราไฟต์ละเอียด และเล็กลงจนถึงขนาดที่เกิดตามขอบเกรน หรือ undercooled ประเภท D ผลที่ได้รับนี้อาจเกิดจากการที่ไทเทเนียม มีโลหะลูมิเนียมซึ่งมีเสถียรภาพสูง และเคลือบผิวผสมอยู่ในเฟอร์ไรต์-ไทเทเนียมหรืออาจจะเกิดจากโลหะไทเทเนียม รวมตัวกับไนโตรเจน หรือกำมะถันในเหล็ก และทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียม (Heterogeneous nucleus) บทบาทของไทเทเนียมในที่นี้จะมีส่วนลดความหนาของผิวแข็ง (chill depth)

ถ้าผสมไทเทเนียมมากกว่า 0.25% จะมีผลให้ทำให้เกิดไทเทเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง ไม่แตกตัวได้ง่ายเมื่อทำการอบชุบด้วยความร้อน ดังนั้นในเหล็กหล่ออบเหนียวจะต้องไม่ผสมไทเทเนียม ปริมาณมากกว่า 0.25% ถ้าผสมปริมาณต่ำ ๆ ไทเทเนียม จะมีผลช่วยทำให้เกิดกราฟไฟต์ขั้นแรก (first-stage graphitisation) ได้ง่าย และจะช่วยลดอาการแตกร้าวของเหล็กหล่อขาว

ไทเทเนียม มีผลในการทำลายการฟอร์มกราฟไฟต์กลมของเหล็กหล่อเหนียว ปริมาณที่ไม่มีผลต่อเหล็กกราฟไฟต์กลม จะต้องไม่มากเกินไป 0.04%

ในเหล็กหล่อเทาทั่ว ๆ ไปจะผสมไทเทเนียมมากไม่เกิน 0.25% เพื่อผลิตเหล็กหล่อที่มีกราฟไฟต์ละเอียดชนิด undercooled graphite

ไทเทเนียม มีส่วนทำให้อุณหภูมิยูเทคติกสูงขึ้น แต่ทำให้ปริมาณคาร์บอนที่จุดยูเทคติกกลับลดลง

ทังสเตน (Tungsten) เป็นธาตุที่มีบทบาทคล้ายคลึงกับ โมลิบดีนัม ใช้ทังสเตนเป็นธาตุผสมในเหล็กหล่อเพื่อต้องการผลิตเหล็กหล่ออจุลค่า แต่ผลของทังสเตนจะมีน้อยกว่าโมลิบดีนัม ประมาณครึ่งหนึ่ง และที่สำคัญก็คือต้องมีฟอสฟอรัสต่ำกว่าที่มีในเหล็กอจุลค่า ที่ใช้โมลิบดีนัม เป็นธาตุผสม คือต้องมีฟอสฟอรัส ไม่เกิน 0.1% และปริมาณของทังสเตน ที่ต้องใช้ผสมจะสูงประมาณ 2% และถ้าจะให้ได้เหล็กอจุลค่าที่สม่ำเสมอเหล็กควรจะมีความหนาไม่เกิน 2.5 ซม.



การผสมทั้งสแตน จะกระทำในเบ้า หรือบริเวณทางไหลจากเตาหลอม (Tapping spout) ในรูปของเฟอร์โรทั้งสแตน การสูญเสียจะเกิดขึ้นประมาณไม่เกิน 20%

วานาเดียม (Vanadium) เป็นธาตุอยู่ในกลุ่มสนับสนุนให้เกิดคาร์ไบด์และมีเสถียรภาพ มีค่าตรงข้ามกับซิลิกอน ประมาณ 1.75 ถ้าผสมปริมาณต่ำระหว่าง 0.15-0.35% จะช่วยทำหน้าที่ยุติการเสถียรภาพของเพิร์ไลต์จนถึงอุณหภูมิระหว่าง  $450^{\circ}\text{C}$ - $650^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้ยังมีบทบาทในการทำให้ กราไฟไฟต์ที่เกิดมีขนาดเล็กสม่ำเสมอและจะมีแนวโน้มให้เกิดกราฟไฟต์ในลักษณะดอกไม้นี้ (Rosettes) ประเภท B

วานาเดียม ที่ผสมลงในเหล็กหล่อ 0.1% จะเพิ่มความเค้นแรงดึงประมาณ  $10\text{ MN/m}^2$  และความแข็งประมาณ 8-10 point Brinell ในอุตสาหกรรมผลิตกระบอบสูบเครื่องยนต์ดีเซล นิยมใช้วานาเดียม เป็นธาตุผสม บางครั้งจะใช้ปริมาณสูงถึง 1%

การผสมวานาเดียม จะใช้ในรูปแบบเฟอร์โร-วานาเดียม (35-40% V) ผสมในเบ้า หรือบริเวณทางไหลในบางกรณีอาจจะใช้เหล็กดิบที่มีวานาเดียมมาหลอมแต่ส่วนมากคาร์บอนจะสูง (Hypereutectic) ทำให้ควบคุมปริมาณคาร์บอนลำบาก

เซอร์โคเนียม (Zirconium) เป็นธาตุที่รวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย จึงมักจะใช้เป็นตัวไล่แก๊ส (Deoxidizer) โดยกระทำในเบ้า และเซอร์โคเนียมที่ใช้ จะอยู่ในรูปซิลิโก-เซอร์โคเนียม (37% Zr, 50% Si) ผสมในเหล็กหล่อประมาณ 0.25% จะมีบทบาทลดความหนาของผิวแข็ง มีลักษณะคล้าย ๆ เป็นตัวช่วยให้เกิดกราฟไฟต์แต่จะมีแนวโน้มทำให้ได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์ นอกจากนี้เซอร์โคเนียมรวมกับกำมะถันได้ดีจึงมีบทบาทคล้ายคลึงกับแมงกานีส

### ธาตุที่ไม่ควรให้มีในเหล็กหล่อ

พลวง (Antimony) เป็นธาตุที่มีส่วนช่วยให้เพิร์ไลต์ มีเสถียรภาพแต่จะทำให้ความเค้นแรงดึง และความเค้นแรงกระแทก ลดลง แต่จะเพิ่มความแข็งถ้าในเหล็กมีพลวงประมาณ 0.1% อาจจะทำให้ค่าความเค้นแรงกระแทกลดลงถึง 30-50% และนอกจากนี้ยังมีส่วนทำให้เหล็กหล่อ บาง ๆ เกิดรอยแตกได้ง่าย

ปกติพลวงมักจะติดมากับเหล็กดิบประมาณ 0.02% และประมาณ 0.3-0.5% จากเศษเหล็กประเภทเคลือบ

อาร์เซนิก มักจะติดมากับเหล็กดิบประมาณ 0.1% ซึ่งจะไม่มีผลอย่างไรกับเหล็กหล่อเทา แต่สำหรับเหล็กหล่อกราฟไฟต์กลมแล้ว อาร์เซนิก จะมีผลไปทำลายผลของแมกนีเซียมในการฟอรั่มกราฟไฟต์กลมแต่อาจจะไม่มีผลในกรณีนี้ ถ้าในเหล็กมีซีเรียม จากการศึกษาพบว่าอาร์เซนิก มีส่วนช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้แก่เพิร์ไลต์และรักษาความเค้นแรงดึง ที่อุณหภูมิสูง



ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุที่ไม่ควรจะให้มียูอยู่ในเหล็กหล่อเลย เพราะมีบทบาทในการทำให้เกิดกราฟิ์ชนิด Widmanstatten แม้มีปริมาณเพียง 0.007% และยังในกรณีที่มีอุมิเนียม และไฮโดรเจน อยู่ด้วยปริมาณของตะกั่วเพียง 0.001% ก็จะทำให้เกิดกราฟิ์ชนิด Widmanstatten ซึ่งมีผลอย่างรุนแรงต่อการสูญเสียความแข็งแรง ซึ่งการเกิดกราฟิ์ชนิดนี้ และมักจะเกิดกับเหล็กหล่อที่มีความหนาตั้งแต่ 13-25 มม.

นอกจากนี้ถ้าในเหล็กหล่อมีอุมิเนียม และเทลลูเรียมผสมอยู่ ตะกั่วจะมีส่วนทำให้เกิดกราฟิ์ชนิดโต ซึ่งมีก็มีส่วนลดความแข็งแรงลงถึงค่าต่ำกว่า  $93 \text{ N/mm}^2$

ปกติตะกั่วมักจะติดมากับเหล็กดิบ หรือเศษเหล็ก หรือเศษทองแดง ที่จะนำมาผสมในเหล็กหล่อ ในเหล็กดิบจะมีตะกั่วประมาณ 0.003%

เทลลูเรียม (Tellurium) เป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดผิวแข็ง (Chill) อย่างรุนแรง ส่วนใหญ่จะผสมในเหล็กหล่อขาว เพื่อนำไปอบเหนียว เป็นเหล็กหล่ออบเหนียวสำหรับเหล็กหล่อเทาจะไม่ผสมเลย ยกเว้นในกรณีที่ต้องการให้เหล็กมีผิวแข็งสำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น

ปริมาณของเทลลูเรียม ประมาณ 0.0007% จะทำให้เกิดกราฟิ์ชนิด Widmanstatten ในงานหล่อมีความหนามากกว่า 13 มม. ซึ่งจะมีส่วนทำให้สูญเสียความแข็งแรง



### บทที่ 3

#### การคำนวณและการออกแบบ

##### การนำความร้อน

เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของความร้อน จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในตัวกลางต่าง ๆ โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีความเคลื่อนไหวของโมเลกุลในตัวกลางนั้น แม้ว่า การนำความร้อนแบบนี้ จะเกิดขึ้นได้ทั้งในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แต่ปรากฏว่า ความร้อนถูกส่งผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งได้ดีที่สุด และในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นโดยการนำความร้อนเป็นส่วนใหญ่ หากตัวกลางเป็นวัตถุทึบแสง

การนำความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลของของแข็ง ที่ได้รับความร้อนแล้วถ่ายความร้อนให้แก่โมเลกุลในชั้นถัดไป ในลักษณะของพลังงานการสั่นสะเทือน (Vibrational Energy) ความสามารถในการวัดค่าการนำความร้อน มีหลักการคำนวณซึ่งถูกตั้งขึ้นโดยโจเซฟ โฟริเออร์ (Joseph Fourier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส จากการเก็บข้อมูลของการทดลองได้พบว่า การถ่ายเทความร้อนแปรผันโดยตรงกับค่าการนำความร้อนของตัวกลาง แปรผันกับพื้นที่ที่ตัดฉากของไหล และแปรผันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง ในกรณีที่ค่าการนำความร้อนมีค่าคงที่ โฟริเออร์ได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการนำความร้อน ซึ่งเรียกว่าสมการของโฟริเออร์ดังนี้

$$Q_x = -kA\left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (3.1)$$

สมการของโฟริเออร์ อาจเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราการถ่ายเทความร้อน ต่อหน่วยพื้นที่ได้ดังนี้

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k\left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (3.2)$$



จากสมการ  $Q_x = -KA \left( \frac{dT}{dx} \right)$  แสดงว่าความร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางของ  $x$  โดยที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในทิศทางของ  $x$  เท่านั้น โดยทั่ว ๆ ไปแล้วอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงทั้งสามทิศทางคือ เปลี่ยนแปลงในทิศทาง  $x, y$  และ  $z$  ดังนั้นการเคลื่อนที่ของความร้อนจึงเกิดขึ้นทั้งสามทิศทาง ในการหาอัตราการนำความร้อนในทิศทางเหล่านี้ เราอาจสมมติว่า ตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านมีค่าการนำความร้อน ( $k$ ) คงที่ ดังนั้นอัตราการนำความร้อนทั้งสามทิศทางสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$q_x = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.3)$$

$$q_y = -k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.4)$$

$$q_z = -k \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.5)$$

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ กับระบบปริมาตรควบคุมจะได้สมการการนำความร้อนที่อยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.6)$$

ปัญหาที่พบในงานด้านวิศวกรรมส่วนใหญ่แล้วค่า  $k$  จะกำหนดเป็นค่าคงที่และสมการ (2.6) ลดรูปได้ดังนี้ โดยที่  $\alpha = \frac{k}{\rho C}$  คือ ค่าการแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusivity)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (3.7)$$

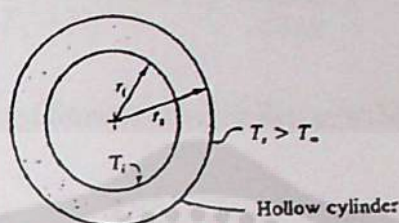
การนำความร้อนของชิ้นงานออกไปสู่แบบหล่อ นั้น มีผลต่อโครงสร้างของชิ้นงานอันเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อน ดังนั้นการสูญเสียความร้อนจากชิ้นงานรูปทรงกระบอกจะหาได้จากสูตร

$$q \approx -k (2\pi_s l) \left( \frac{T_s - T_i}{r_s - r_i} \right) = k (2\pi_s l) \left( \frac{T_i - T_s}{L} \right) \quad (3.8)$$



ซึ่ง  $l$  คือ ความยาวของทรงกระบอกที่เรากำลังพิจารณา และ  $L$  คือความหนาของวัสดุที่เรา  
กำลังพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นผิวด้านนอกโดยการพาคำนวณได้ดังนี้

$$q = \bar{h} (2 \pi r_o l) (T_s - T_\infty) \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิที่ผนังแบบหล่อ

#### การนำความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแบบมิติ  
เดียว การวิเคราะห์ปัญหาสามารถใช้สมการที่ลดรูปมาจากสมการที่(2.7)กับการนำความร้อนในรูปทั่ว ๆ  
ไปคือ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \left( \frac{1}{\alpha} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (3.10)$$

โดยที่  $\alpha = \frac{k}{\rho C}$  คือ ค่าการแพร่กระจายความร้อน(thermal diffusivity)

พิจารณาวัตถุ ณ สภาวะเริ่มต้นที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ  $T_i$  รวมถึงพื้นที่ผิว ณ ที่ค่า  
 $x = 0$  นั้น ค่าอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงฉับพลัน ไปเป็นค่าอุณหภูมิ  $T_s$  ที่ทุก ๆ ช่วงเวลาซึ่งมีค่ามาก  
ขึ้นบริเวณพิสัย  $x = 0$  ด้วย  $t = 0$  อุณหภูมิดังกล่าวเป็นไปตามสมการที่ (2.10) ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้



$$\text{เงื่อนไขขอบเขต } T(0,t) = T_i \text{ โดยที่ } t > 0 \quad (3.11)$$

$$T(\infty,t) = T_s \text{ โดยที่ } t > 0 \quad (3.12)$$

$$\text{เงื่อนไขของเวลา } T(x,0) = T_i \quad (3.13)$$

ดังนั้น รูปสมการคำตอบคือ :

$$\frac{T(x,t) - T_s}{T_i - T_s} = \text{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \quad (3.14)$$

โดยที่ฟังก์ชันของค่าความผิดพลาดของเกาส์เซียน จะหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

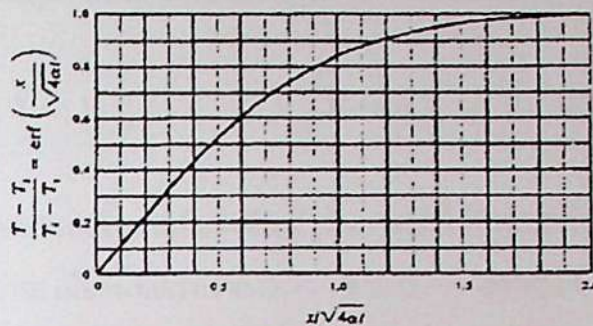
$$\text{erf } u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\eta^2} d\eta \quad (3.15)$$

สำหรับค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันแสดงค่าความผิดพลาด จาก 0 ถึง 2 อาจจะหาจากรูปที่ 3.2 แต่ถ้าต้องการหาค่าให้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น สามารถเปิดตารางข้อมูลทางคณิตศาสตร์ (mathematical table) เพื่อหาค่าที่ถูกต้องได้ แต่ค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นนั้น มักจะไม่จำเป็นต่อการพิจารณาในปัญหาการนำความร้อนที่กำลังกล่าวถึง ในขณะที่เกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงความร้อนและค่าต่างๆ ที่สภาวะอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากนี้อาจจะให้ค่าความผิดพลาด (errors) มากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบที่เกี่ยวข้อง

สิ่งที่น่าสนใจ ณ จุดนี้ คือ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่พิจารณา ณ ตำแหน่งในแนวแกน  $x$  ที่กำหนดให้ ซึ่งอยู่ภายใต้วัตถุเคมี-อินโฟไนต์ ณ เวลาที่กำหนดค่าหนึ่ง (a specified time) ลองพิจารณาสมการที่ (2.14) จะพบว่า :

$$T(x,t) = T_s + (T_i - T_s) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-\eta^2} d\eta$$





รูปที่ 3.2 กราฟการนำความร้อนที่สัมพันธ์กับเวลา

ซึ่งอาจจะทำการดิฟเฟอเรนเชียล โดยอาศัยกฎของ Leibniz จะได้ว่า :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_i - T_s}{\sqrt{\pi \alpha t}} e^{-\frac{x^2}{4 \alpha t}}$$

แทนค่าความลาดชันดังกล่าวนี้ ลงในสมการกฎของฟูเรียร์ จะได้ค่าฟลักซ์ความร้อนอยู่ในรูป :

$$\frac{q}{A} = \frac{k (T_s - T_i)}{\sqrt{\pi \alpha t}} e^{-\frac{x^2}{4 \alpha t}} \quad (3.16)$$

บ่อยครั้งที่มักสนใจ ค่าของฟลักซ์ความร้อน ณ ตำแหน่ง  $x=0$  นั่นคือ :

$$\left. \frac{q}{A} \right|_{x=0} = \frac{k (T_s - T_i)}{\sqrt{\pi \alpha t}} \quad (3.17)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{k}{\rho C}$  ลงในสมการที่(3.17) จะได้ :

$$\left( \frac{q}{A} \right)_{x=0} = - \sqrt{\frac{k \rho C}{\pi t}} (T_s - T_i) \quad (3.18)$$



สมการ (3.18) กำหนดให้  $C$  คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ ดังนั้น ความร้อนที่ไหลเข้าสู่ผนังของแบบหล่อ จากส่วนที่ห่อหุ้มละลายของชิ้นงาน และกำลังที่จี้แข็งตัวนั้น เมื่อได้กำหนดค่าของอุณหภูมิที่ห่อหุ้มละลายอย่างถูกต้องแล้วสมการใหม่ที่เกิดขึ้นจะเป็น

$$\left( \frac{q}{A} \right) \Big|_{x=0} = -p, H \left( \frac{\partial s}{\partial t} \right) \quad (3.19)$$

ความหนาของชิ้นงานที่แข็งตัวแล้วนั้น หากว่าได้กำหนดสัญลักษณ์เป็น  $S$  การรวมสมการที่ (2.18) และ (2.19) เมื่ออินทิเกรตจาก  $0 \rightarrow s, 0 \rightarrow t$  จะได้

$$s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \underbrace{\left( \frac{T_s - T_i}{\rho_s H} \right)}_{\text{Mass}} \underbrace{\left( \sqrt{K \rho C} \sqrt{t} \right)}_{\text{Moist}} \quad (3.20)$$

หากแทนค่า  $S$  ด้วย  $V/A$  โดย  $V$  คือปริมาณที่แข็งตัวแล้ว ณ เวลา  $t$  และ  $A$  คือพื้นที่ผิวสัมผัสของแบบหล่อกับชิ้นงาน  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวทั้งหมดของปริมาตรชิ้นงานที่หล่อ ( $V$ ) ดังนั้นจะได้เป็นสมการ

$$\frac{V}{A} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_s - T_i}{\rho_s H} \right) \sqrt{K \rho C} \sqrt{t} \quad (3.21)$$

และ

$$t = C_r \left( \frac{V}{A} \right)^2 \quad (3.22)$$

โดย  $C_r$  คือค่าของอุณหภูมิคงที่สำหรับวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ ซึ่งกรณีของสมการ (3.22) นั้น เป็นการแสดงถึงเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อแบบง่าย ๆ

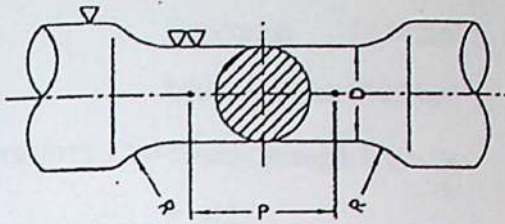
เมื่อให้รูปร่างของชิ้นงานมีลักษณะเป็นทรงกระบอก,  $r$  เป็นรัศมีของงาน,  $n$  มีค่าเป็น 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของสมการ (3.21) จะเป็น

$$\frac{V}{A} = \left( \frac{T_s - T_i}{\rho_s H} \right) \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{K \rho C} \sqrt{t} + \frac{n K t}{2r} \right) \quad (3.23)$$



### ขนาดของชิ้นทดสอบการต้านแรงดึง

กึ่งตามมาตรฐาน JIS-Z-2201 (1989) NO.8



| Type of test piece | Casting dimensions of test coupon (diameter) | Parallel length P | Diameter D      | Radius of fillet R |
|--------------------|----------------------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| 8A                 | 13 approx.                                   | 8 approx.         | $8.00^{+0.04}$  | 16 min             |
| 8B                 | 20 approx.                                   | 12.5 approx.      | $12.50^{+0.04}$ | 25 min             |
| 8C                 | 30 approx.                                   | 20 approx.        | $20.00^{+0.04}$ | 40 min             |

รูปที่ 3.3 ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน JIS-Z-2201

### สูตรที่ใช้ในการคำนวณความต้านทานแรงดึง

สูตรหาความต้านแรงดึงสูงสุด

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A} \quad (3.24)$$

$\sigma_u$  = ความต้านทานแรงดึงสูงสุด

$F_u$  = แรงดึงสูงสุด

$A$  = พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดึงที่จุดสูงสุด



### ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดึง

เหล็กหล่อ (FC 25)

Dimension , 12.54 mm

Ultimate Force 4725 kgf

จากสมการ(3.24) Tensile Strength  $\sigma_u = \frac{F_u}{A}$

$$= \frac{4725}{[3.14/(12.54)^2]}$$

$$= 38.2575 \text{ kgf/mm}^2$$

### สูตรที่ใช้คำนวณความแข็งแบบวิกเกอร์

$$HV = 0.189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3.25)$$

HV = ความแข็งวิกเกอร์

F = แรงที่ใช้กดเป็น kg

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

d = เส้นทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกดเป็น มม.

### ตัวอย่างการคำนวณแบบวิกเกอร์

$$F = 20 \text{ kg}$$

$$d_1 = 0.1319 \text{ mm}$$

$$d_2 = 0.1319 \text{ mm}$$

จากสมการ(3.25)ความแข็งวิกเกอร์  $HV = 0.189 \times [20/(0.1319)^2]$

$$= 217 \text{ HV}$$



## บทที่ 4

### การทดลอง

#### การทำแบบหล่อ

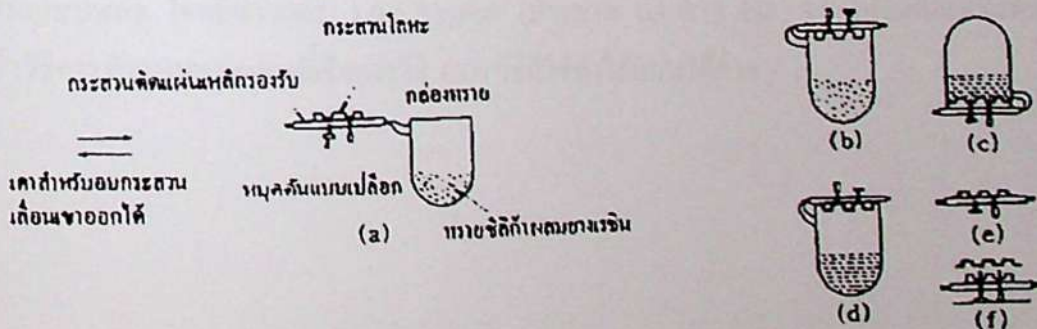
##### วิธีการทำ Mold เหล็กเหนียว (SC 46)

นำเหล็ก sc 46 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. ยาว 215 มม. ผ่าเป็น 2 ซีกแล้วกัดด้วยเครื่องกัดให้ได้ขนาดโตในเท่ากับขนาดของชิ้น Test piece พร้อมกับทำสลักยึด 2 ด้านเพื่อประกบ จากนั้นจึงนำไปกลึงเรียบด้านนอกให้ได้เท่ากับขนาดของ Shell mold และ CO<sub>2</sub> mold ตาม Drawing

##### วิธีการทำแบบหล่อเปลือก (Shell molds)

วิธีการทำแบบหล่อเปลือกมีดังนี้

ทำกระสวนโลหะให้ร้อนแล้วพรมทรายซิลิกาผสมตัวประสานฟีนอลิกเรซินลงบนกระสวน จะเกิดเป็นแบบหล่อเปลือกที่บางและแข็งเนื่องจากคุณสมบัติแข็งเข้ารูปเพราะความร้อน (thermo-setting) ของเรซิน เสร็จแล้วเทน้ำโลหะเข้าแบบหล่อเพื่อทำชิ้นงานหล่อ วิธีนี้เรียกว่าโครนิง (Croning) หรือวิธี C (C-process) ด้วย



รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการทำแบบหล่อเปลือกโดยใช้เครื่องทำแบบหล่อเปลือกที่ใช้หีบเท (dump box)



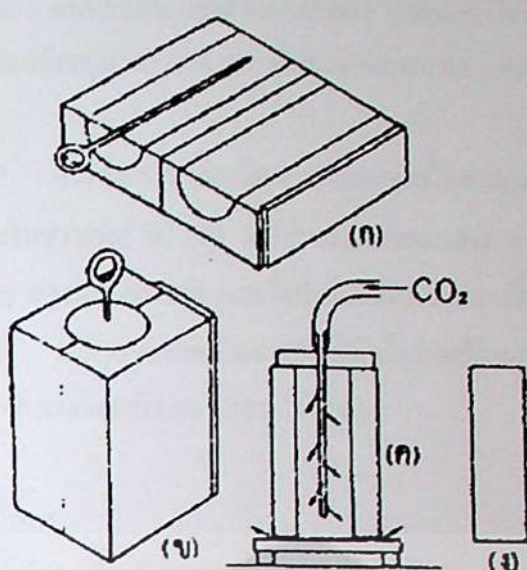
### กระบวนการทำแบบหล่อเปลือก

1. ใส่กระสวนทำด้วยเหล็กหล่อหรืออูมิเนียมซึ่งติดอยู่กับแผ่นโลหะไว้ในเตาอบ (ชนิดใช้ไฟฟ้าหรือแก๊ส) เพื่อทำให้ร้อนถึง 200 - 250 C ไว้ก่อน แล้วพ่นสารละลายซิลิโคน (silicone) ลงบนกระสวนเพื่อให้แกะแบบหล่อออกได้ง่าย
2. ประกอบแผ่นโลหะพร้อมกระสวนเข้ากับถังเท(dump box) แล้วปิดถังโดยใช้แผ่นโลหะนั้นเป็นฝา
3. จับถังเทกลับหัว ทราชจะลงไปกองบนกระสวนเนื่องจากผลของการแข็งตัวเข้ารูป (thermosetting) ของเรซินที่ผสมอยู่กับทราช จะเกิดเป็นเปลือกบางๆอยู่บนกระสวน
4. ทิ้งกระสวนไว้ในตำแหน่งเดิมเป็นเวลาสอง- สามหรืออาจถึงหลายวินาทีแล้วจึงพลิกกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิม ทราชที่ไม่เกาะตัวกันเป็นเปลือกแข็งจะตกลงกลับเข้าไปในหีบเท ส่วนเปลือกหนา 5-7 mm จะติดอยู่กับกระสวน
5. พลิกแผ่นกระสวนกลับอีกครั้งหนึ่งแล้วนำเข้าใส่ในเตาอบ เพื่ออบเปลือกนี้ที่ 200-300 C เปลือกทั้งอันจะแข็งในเวลา 2-3 นาที 200° C
6. นำแผ่นกระสวนออกจากเตาอบและถอดเปลือกออกจากแผ่นกระสวนโดยใช้หมุดคั้นแบบเปลือก (Stipping pint) ซึ่งติดอยู่กับกระสวนคลหะ เมื่อถึงขั้นนี้ครั้งหนึ่งของแบบหล่อเปลือกก็จะเสร็จเรียบร้อยแบบหล่ออีกครั้งหนึ่งก็ทำเหมือนกัน แล้วนำมาขัดกันด้วยปากจับหรือใช้เรซินเป็นตัวประสาน เสร็จแล้วเทน้ำโลหะลงไปแบบ

### วิธีการทำแบบหล่อโดยใช้ CO<sub>2</sub>

เคมีโซเดียมซิลิเกต (Water glass) ประมาณ 3-7 % เข้าไปกับทราชซิลิกาแล้วผสมกันอย่างดี แล้วใช้ทราชผสมนี้ทำแบบหล่อ โดยใช้มือหรือใช้เครื่อง แก๊ส CO<sub>2</sub> จะถูกปล่อยให้ผ่านแบบหล่อ โดยมีความดัน 1.0-1.5 kg/cm<sup>2</sup> (ประมาณ 0.1-0.15 Pa) แบบหล่อก็จะแข็งตัวโดยเร็ววิธีการทำแบบหล่อเช่นนี้เรียกว่าวิธี CO<sub>2</sub> วิธีนี้ใช้ได้แบบได้ด้วย





รูปที่ 4.2 แสดงการทำน้ำ CO<sub>2</sub>

#### ทรายแก้วสำหรับวิธี CO<sub>2</sub>

ผสมน้ำแก้ว (Water glass) 3-6 % ลงไปกับทรายซิลิกาที่มีดินเหนียวน้อยที่สุด แล้วผสมกันให้ดีโดยใช้เครื่องมือทราย เม็ดทรายที่เหมาะสมกับวิธีนี้จะต้องมีรูปร่างกลม น้ำแก้วควรมีจำนวนโมล (mole) ของ SiO<sub>2</sub> ต่อจำนวนโมลของ Na<sub>2</sub>O เกิน 2.5 ควรมีปริมาณความชื้นอิสระ (free moisture content) ต่ำกว่า 50 % และควรมีความหนืดต่ำ

เวลาที่ใช้ในการผสมควรต่ำกว่า 5 นาที จะต้องใส่ของผสม (mixture) ไว้ในภาชนะปิดไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศ

แบบหล่อหรือใส่แบบหล่อที่ทำด้วยทรายผสมน้ำแก้วจะสลายรูปยาก และทำให้แกะแบบยาก ดังนั้นจึงใส่ผงถ่านโค้กหรือผงยางมะตอย (pitch powder) และขี้เลื่อย (wooden powder) ลงไปด้วย ผงเหล่านี้จะไม่เมื่อโดนน้ำและทำให้แบบหล่อสลายรูปได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ผงยังแทรกไม่ให้น้ำแทรกเข้าไปในระหว่างเม็ดทรายทำให้ผิวงานหล่อเรียบ ใส่ผงยางมะตอย 0.5-2% และขี้เลื่อย 0.5-1.5 %

#### การใช้น้ำแก้วและขี้ตะกรัน

ทรายผสมด้วยตัวเติมเช่นขี้ตะกรัน (slag) หรือซีเมนต์จะแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง และจะมีความแข็งแรงพอสำหรับแบบหล่อเพราะขี้ตะกรันหรือซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นตัวให้แข็ง

ทรายผสมชนิดนี้ค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับชนิดอื่น และสลายรูปง่ายกว่าทรายที่แข็งโดยวิธี CO<sub>2</sub> ประเด็นที่ควรสังเกตเกี่ยวกับทรายผสมชนิดนี้มีดังนี้



1. แบบหล่อจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเทน้ำโลหะเลขทันทีที่เกิดรูปพูนที่ผิวเพราะยังมีความชื้นเหลืออยู่มากควรรอ 24 ชั่วโมงหลังการทำแบบหล่อเสร็จก่อนเทน้ำโลหะเข้าแบบ
2. ควรดึงกระสวนออกจากแบบหล่อบนในช่วงเวลา 40-60 นาทีหลังจากทำแบบหล่อเสร็จและในช่วงเวลา 90-120 นาทีสำหรับแบบหล่อล่าง จะต้องทาผิวกระสวนด้วยตัวทำให้จาก (parting agent) อย่างเพียงพอเพื่อกันไม่ให้ผิวกระสวนเปื้อน
3. ทาผิวแบบหล่อด้วยผงกราไฟท์หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน ถ้าไม่ทาจะทำให้แกะแบบหล่อยากและผิวงานหล่อจะไม่เรียบ

### การใช้น้ำแก้วและผงโลหะ

ทรายที่ผสมน้ำแก้วและผงโลหะ เช่น Si หรือ Al จะแข็งตัวด้วยปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดความร้อน (exothermic reaction) ปฏิกิริยานี้จะรุนแรงและจะดึงน้ำไปใช้ทำไฮโดเจน ดังนั้นจะได้แบบหล่อที่แข็งแรงและไม่มีความชื้น

กระบวนการประเภทที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือวิธีที่ใช้ผงเฟอโรซิลิกอนแทนผงซิลิกอนกระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการ N

### ประเด็นที่ควรสังเกตเกี่ยวกับการทำแบบหล่อชนิดนี้ดังนี้

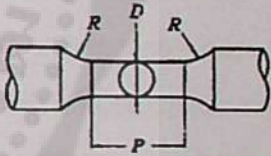
1. จะต้องให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเสียแต่เนิ่นๆ ก่อนเทน้ำโลหะ ถ้าเทน้ำโลหะเข้าแบบโดยไม่รอนานพอจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดแก๊สไฮโดเจนเพราะแบบหล่อได้รับความร้อนและอาจทำให้เกิดระเบิด
2. อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของบรรยากาศ ดังนั้นในการกำหนดส่วนผสมและเวลาที่ใช้ในการผสมจะต้องคำนึงถึงสภาพบรรยากาศ

### การทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์(Vicker)

วัดโดยใช้เครื่องมือวัดความแข็งแรงวิกเกอร์ ใช้เพชรปริมาตรรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่ราบทะแยงมุม ทำมุม 136 องศาเป็นหัวกด หลักการเหมือนกับความแข็งแรงแบบบรินเนลล์ ความแข็งแรงวิกเกอร์คือแรงที่กดหารด้วยเนื้อที่ที่เกิดจากการกดมีเครื่องวัดความแข็งแรงวิกเกอร์พิเศษขนาดเล็กใช้สำหรับวัดความแข็งแรงของโครงสร้างส่วนที่เกิดจากการแยกตัว(segregation)



ตารางที่ 4.1 มาตรฐานของชั้นทดสอบแรงดึง แบ่งตามความหนาของชิ้นงานที่ทำจากเหล็กหล่อเทา

| เกรดมาตรฐานของเหล็กเทา | ความหนาผนังของชิ้นงานหล่อ (mm) | ความแข็งแรงทางดึง     |                                         | มิติของชั้นทดสอบ (mm)           |                                    |                                                                                      |           |           |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
|                        |                                | สัญลักษณ์ของชั้นทดสอบ | ความแข็งแรงทางดึง (kg/mm <sup>2</sup> ) | เส้นผ่าศูนย์กลางในสภาพหล่อเสร็จ | มิติของชั้นทดสอบเมื่อกลึงเสร็จแล้ว |                                                                                      |           |           |
|                        |                                |                       |                                         |                                 | สัญลักษณ์                          | มิติของ D                                                                            | มิติของ P | มิติของ R |
| 10                     | 4 - 5                          | C                     | 10<                                     | 30                              | C                                  | 20.0                                                                                 | 20        | 40<       |
| 15                     | 4 - 8                          | A                     | 19<                                     | 13                              | A                                  | 8.0                                                                                  | 8         | 16<       |
|                        | 8 - 15                         | B                     | 17<                                     | 20                              | B                                  | 12.5                                                                                 | 12.5      | 25<       |
|                        | 15 - 30                        | C                     | 15<                                     | 30                              | C                                  | 20.0                                                                                 | 20        | 40<       |
|                        | 30 - 50                        | D                     | 13<                                     | 45                              | D                                  | 32.5                                                                                 | 32        | 64<       |
| 20                     | 4 - 8                          | A                     | 24<                                     | 13                              | A                                  | ชั้นทดสอบที่กลึงเสร็จ                                                                |           |           |
|                        | 8 - 15                         | B                     | 22<                                     | 20                              | B                                  |                                                                                      |           |           |
|                        | 15 - 30                        | C                     | 20<                                     | 30                              | C                                  |                                                                                      |           |           |
|                        | 30 - 50                        | D                     | 17<                                     | 45                              | D                                  |                                                                                      |           |           |
| 25                     | 4 - 8                          | A                     | 28<                                     | 13                              | A                                  |  |           |           |
|                        | 8 - 15                         | B                     | 26<                                     | 20                              | B                                  |                                                                                      |           |           |
|                        | 15 - 30                        | C                     | 25<                                     | 30                              | C                                  |                                                                                      |           |           |
|                        | 30 - 50                        | D                     | 22<                                     | 45                              | D                                  |                                                                                      |           |           |
| 30                     | 8 - 15                         | B                     | 31<                                     | 20                              | B                                  |                                                                                      |           |           |
|                        | 15 - 10                        | C                     | 30<                                     | 30                              | C                                  |                                                                                      |           |           |
|                        | 30 - 30                        | D                     | 27<                                     | 45                              | D                                  |                                                                                      |           |           |
| 35                     | 15 - 30                        | C                     | 35<                                     | 30                              | C                                  |                                                                                      |           |           |
|                        | 30 - 50                        | D                     | 32<                                     | 45                              | D                                  |                                                                                      |           |           |



## ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล

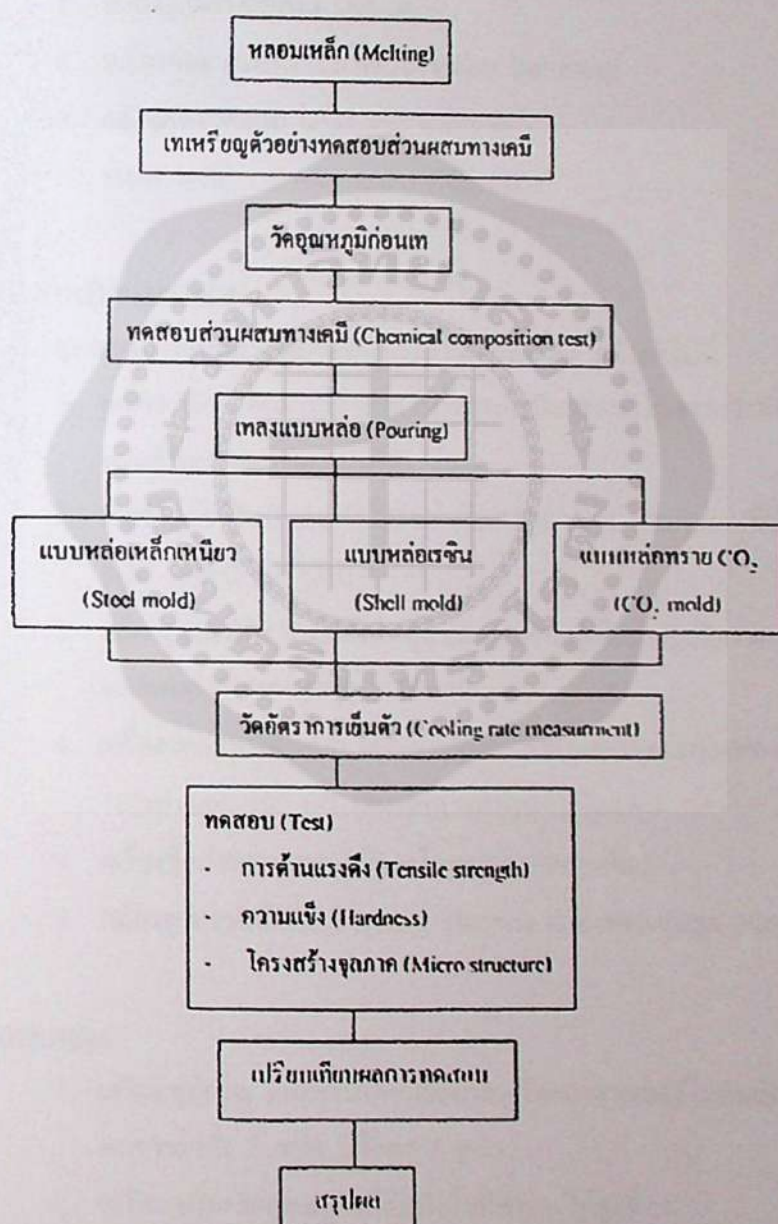
การแบ่งชนิดของเทอร์โมคัปเปิลในที่นี้ได้แบ่งตามมาตรฐานของ NBS (National Bureau of Standard) ดังนี้

1. ชนิด B (Platinum-Rhodium) ประกอบด้วย (70.4 Pt - 93.9 Pt + 6.1Rh) เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้มีความแข็งแรงทนทาน และสามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1704 C (ในสภาวะ Reducing หรือ Vacuum)
2. ชนิด E (Chromet - Constantan) ประกอบด้วย (90 Ni + 10Cr - 45Ni + 55Cu) เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิระหว่าง -100 C ถึง 1000 C และเหมาะสำหรับงานที่เป็น Oxidizing
3. ชนิด J (Iron - Constantan) ประกอบด้วย (99.5Fe-C, Mn,S - 45 Ni + 55 Cu) เทอร์โมคัปเปิลนี้สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิระหว่าง -200 C ถึง 750 C และเหมาะสำหรับงานที่เป็น Vacuum, Oxidizing หรือ Inert
4. ชนิด K (Ciron - Alumel) ประกอบด้วย (90Ni + 10Cr - 94Ni + 2Mn = 1so = 3Al) เทอร์โมคัปเปิลแบบนี้สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิระหว่าง -200 C ถึง 1400C เหมาะสำหรับงานที่เป็น Oxidizing หรือ Inert นอกจากนี้ หากนำไปใช้งานในสภาพที่เป็น Vacuum หรือที่มีไอของซัลเฟอร์ (ซัลเฟอร์จะทำลายโลหะทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิล) จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ
5. ชนิด R (Platinum-platinum Rhodium) ประกอบด้วย (87pt + 13Rh - 100Pt) เทอร์โมคัปเปิลแบบนี้สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิระหว่าง 0 C ถึง 1450 C และอาจใช้ในงายได้สูงสุดถึง 1700 C เหมาะสำหรับงานที่มีสภาพเป็น Oxidizing และ Inert แต่ไม่เหมาะกับงานในสภาพที่มีไอของโลหะหรือโลหะ
6. ชนิด S (Platinum-platinum Rhodium) ประกอบด้วย (90Pt + 10Rh - 100 Pt) เทอร์โมคัปเปิลแบบนี้สามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 1450 C และอาจใช้ในงานได้สูงสุดถึง 1700 C เหมาะสำหรับงานเช่นเดียวกันกับชนิด R
7. ชนิด T (Copper-constantan) ประกอบด้วย (100Cu - 45 Ni + 55 Cu) เทอร์โมคัปเปิลที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ระหว่าง -2500 C ถึง 350 C และอาจวัดอุณหภูมิสูงกว่า 370 C แล้วเกิด Oxide ของโลหะเทอร์โมคัปเปิลมากขึ้น สำหรับชนิด T นี้เหมาะที่จะใช้ในงานที่สภาพเป็น Vacuum, Oxidizing หรือ Inert ได้ดี



นอกจากที่กล่าวมาแล้วยังมีเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่นๆ อีกหลายชนิดที่สามารถใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูงๆ ได้ เช่น Chromel-Stainless steel , Platinum-Molybdenum , Platinum , tungsten-ungsten Iridium , Copper-Gold , cobalt เป็นต้น

ในการศึกษาอิทธิพลของแบบหล่อที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา (FC 25) ได้ทำการเลือกวัสดุที่นำมาทำแบบหล่อ 3 ชนิด โดยมีขั้นตอนการทดลองและทดสอบตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทดลองและทดสอบ



### อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาหลอมชนิเหนียวน้ำหนักสูง
2. เครื่อง View recorder และเทอร์โมคัปเปิล Type K
3. เครื่อง Spectrometer
4. เครื่องตัดตัวอย่าง
5. เครื่องทดสอบแรงดึง
6. เครื่องขัดตัวอย่างโครงสร้าง
7. กล้องจุลทรรศน์แบบ Optical
8. เครื่องกดความแข็งแบบ Micro Vicker hardness
9. กล้องจุลทรรศน์แบบ Scanning electron
10. Steel Mold , Shell Mold , CO<sub>2</sub> Mold

### วัสดุที่ใช้หลอมสำหรับการทดลอง

อุปกรณ์การวัดที่สำคัญสำหรับการใช้ในการทดลอง มีดังต่อไปนี้

1. เครื่อง View recorder สำหรับวัดอุณหภูมิและเวลาในการแข็งตัวของน้ำอัลโลหะอยู่ในแบบหล่อแต่ละชนิด
2. เทอร์โมคัปเปิล Type K รั้งต่อเข้ากับเครื่อง Viwe recorder มีช่วงการวัดอยู่ที่ -200 C ถึง 1390 C
3. กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งมีกล้องถ่ายรูปประกอบติดอยู่เพื่อถ่ายรูปโครงสร้างชิ้นส่วนทดสอบกำลังขยายสูงสุด 1000 เท่า
4. เครื่องวัดความแข็งแบบ Micro Vicker กำลังขยายของกล้องส่องรอยกด 100เท่า และ 400 เท่า ของระบบการอ่านค่าดิจิทัล
5. เครื่องวัดส่วนผสมทางเคมีของโลหะ(Spectrometer)
6. กล้องจุลทรรศน์แบบ Scaning electron กำลังขยายสูงสุด 200,000 เท่า

### ขั้นตอนในการทดลอง

1. เตรียมอุปกรณ์ และส่วนประกอบต่างๆ โดยนำสายเทอร์โมคัปเปิลติดตั้งบนแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 1 จุด
2. เตรียมเครื่องวัดอุณหภูมิพร้อมทั้งตั้งค่าต่างๆ ให้ถูกต้อง
3. เติมน้ำหล่อให้ร้อนประมาณ 50 C เพื่อไล่ความชื้นของแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด



4. หลอมเหล็ก FC 25 ในการทดสอบโดยใช้เตาไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) อุณหภูมิประมาณ 1400 C
5. ถ่ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมลงสู่เบ้าเท วัสดุอุณหภูมิหน้าเหล็กในเบ้า
6. ตักน้ำเหล็กด้วยถ้วยเทจากเบ้าลงใน Mold ทองแดงเพื่อใช้เป็นเหรียญตัวอย่างทดสอบส่วนผสมทางเคมี
7. ตักน้ำเหล็กด้วยถ้วยเท เทลงใน Mold ทั้ง 3 ชนิดในเวลาติดต่อกัน
8. ปลอบให้เหล็กแข็งตัวจน Mold ทั้ง 3 ชนิด เย็นลงใกล้กับอุณหภูมิห้อง
9. ทุบ Mold เพื่อนำไปทดสอบ

#### การเก็บข้อมูลจากการทดลอง

1. การวัดอุณหภูมิเมื่อเทน้ำลงในแบบหล่อ เครื่องวัดอุณหภูมิจะทำการวัดและเก็บค่าอุณหภูมิและเวลาทุกๆ 60 วินาที
2. การวัดความแข็ง
  - นำชิ้นทดสอบที่เย็นตัวแล้วลงไปตัดตามแนวหน้าตัด (Cross Section) ยาว 20 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม.
  - จัดผิวหน้าด้วยกระดาษทราย #40 , #220 , #400 , #600 และขัดมันด้วยผ้าสักหลาด
  - วัดความแข็งด้วยเครื่อง Micro Vicker จากผิวหน้าเข้าไปที่ศูนย์กลางและจากศูนย์กลางถึงผิวด้านนอก 9 จุด แต่ละจุดห่างกันประมาณ 2 มม.
3. การถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
  - นำชิ้นทดสอบขึ้น देखกันกับที่ใช้ทดสอบความแข็งของ Mold ทั้ง 3 ชนิดมาตรวจสอบโครงสร้างในบริเวณจุดกดความแข็งทั้ง 9 จุด
  - ถ่ายภาพโครงสร้างในตำแหน่งที่ 2 มม. , 4 มม. , 6 มม. , 8 มม. , 10 มม. ตามลำดับในสภาพก่อนกัดกรดเพื่อดูขนาดและชนิดของ Graphite
  - นำชิ้นทดสอบไปกัดกรดด้วยกรด Nitric 2% ในแอลกอฮอล์ เพื่อดูโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ในตำแหน่งที่ 2 มม. , 4 มม. , 6 มม. , 8 มม. , 10 มม.
4. การทดสอบการต้านแรงดึง นำชิ้นทดสอบไปกลึงขึ้นรูปตามมาตรฐาน JIS-Z-2201(1989) No.8 Type of Test piece 8B



## ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ mold 3 ชนิด

| เวลา<br>(min) | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) |            |          |
|---------------|----------------------------|------------|----------|
|               | Steel mold                 | Shell mold | CO2 mold |
| 1             | 141.7                      | 209.8      | 166.7    |
| 2             | 134.2                      | 204.8      | 157.6    |
| 3             | 137.4                      | 207.6      | 163.4    |
| 4             | 133.3                      | 203.1      | 155.4    |
| 5             | 134.5                      | 206.3      | 160.2    |
| 6             | 129.4                      | 198.9      | 149.3    |
| 7             | 134.0                      | 206.3      | 159.7    |
| 8             | 129.3                      | 198.8      | 148.6    |
| 9             | 131.1                      | 199.8      | 150.0    |
| 10            | 127.7                      | 197.3      | 144.9    |
| 11            | 130.4                      | 200.1      | 149.6    |
| 12            | 124.3                      | 189.2      | 142.6    |
| 13            | 127.8                      | 197.6      | 148.0    |
| 14            | 119.9                      | 179.8      | 136.5    |
| 15            | 124.7                      | 189.3      | 142.7    |
| 16            | 119.4                      | 177.8      | 135.4    |
| 17            | 120.9                      | 180.2      | 136.8    |
| 18            | 118.6                      | 172.3      | 127.8    |
| 19            | 120.8                      | 178.0      | 135.4    |
| 20            | 112.7                      | 160.5      | 120.8    |
| 21            | 118.6                      | 172.4      | 128.0    |
| 22            | 108.8                      | 151.3      | 107.2    |
| 23            | 112.8                      | 160.7      | 120.8    |
| 24            | 105.4                      | 143.4      | 102.7    |



ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ mold 3 ชนิด(ต่อ)

| เวลา<br>(min) | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) |            |          |
|---------------|----------------------------|------------|----------|
|               | Steel mold                 | Shell mold | CO2 mold |
| 25            | 108.9                      | 151.3      | 107.3    |
| 26            | 106.0                      | 139.7      | 101.4    |
| 27            | 108.3                      | 144.3      | 105.9    |
| 28            | 104.2                      | 136.0      | 97.7     |
| 29            | 107.2                      | 139.8      | 101.4    |
| 30            | 105.2                      | 133.7      | 97.7     |
| 31            | 107.2                      | 137.6      | 101.5    |
| 32            | 104.4                      | 130.1      | 98.0     |
| 33            | 105.7                      | 134.2      | 99.4     |
| 34            | 101.3                      | 123.7      | 95.2     |
| 35            | 104.7                      | 130.3      | 99.6     |
| 36            | 99.0                       | 118.5      | 90.6     |
| 37            | 101.5                      | 124.0      | 98.4     |
| 38            | 98.0                       | 115.8      | 86.8     |
| 39            | 100.5                      | 119.2      | 90.9     |
| 40            | 96.9                       | 112.0      | 83.4     |
| 41            | 98.4                       | 115.9      | 87.0     |
| 42            | 96.1                       | 108.5      | 83.5     |
| 43            | 97.8                       | 112.5      | 85.5     |
| 44            | 94.5                       | 104.8      | 81.0     |
| 45            | 96.3                       | 108.7      | 85.3     |
| 46            | 93.1                       | 102.2      | 78.4     |
| 47            | 95.0                       | 104.9      | 81.5     |
| 48            | 91.5                       | 99.0       | 77.5     |



ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ mold 3 ชนิด(ต่อ)

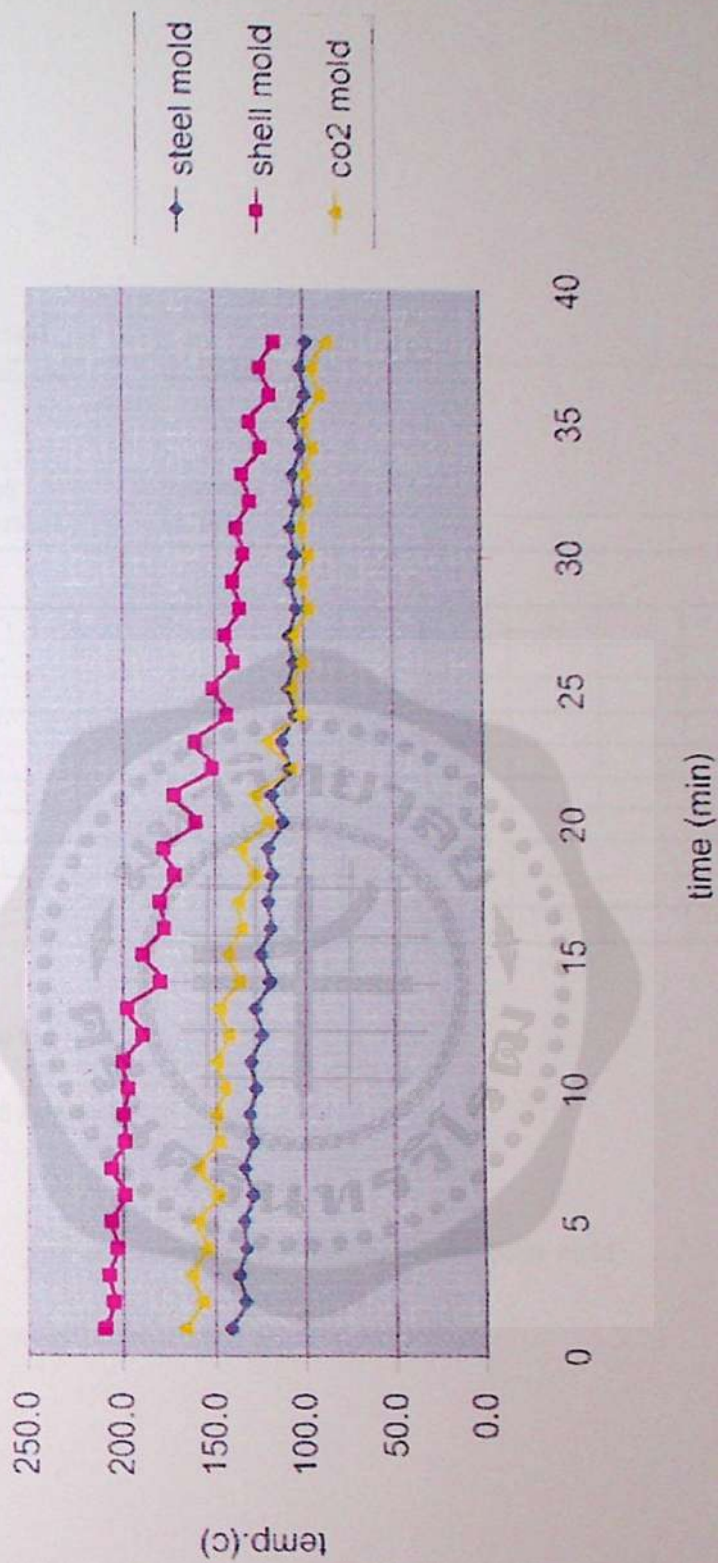
| เวลา<br>(min) | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) |            |          |
|---------------|----------------------------|------------|----------|
|               | Steel mold                 | Shell mold | CO2 mold |
| 49            | 93.5                       | 102.6      | 79.2     |
| 50            | 91.2                       | 96.6       | 74.8     |
| 51            | 91.7                       | 99.0       | 77.6     |
| 52            | 86.0                       | 90.6       | 70.8     |
| 53            | 90.3                       | 96.7       | 75.3     |
| 54            | 86.1                       | 89.8       | 70.0     |
| 55            | 87.5                       | 90.9       | 70.9     |
| 56            | 86.4                       | 87.7       | 69.6     |
| 57            | 87.5                       | 89.9       | 70.5     |
| 58            | 85.1                       | 85.1       | 68.9     |
| 59            | 86.7                       | 87.9       | 70.4     |
| 60            | 81.4                       | 80.0       | 64.6     |
| 61            | 85.5                       | 85.2       | 69.3     |
| 62            | 81.3                       | 79.1       | 93.9     |
| 63            | 82.1                       | 80.1       | 64.7     |
| 64            | 79.1                       | 75.3       | 61.3     |
| 65            | 81.7                       | 79.2       | 64.2     |
| 66            | 77.7                       | 73.8       | 60.1     |
| 67            | 79.4                       | 75.5       | 61.6     |
| 68            | 76.6                       | 72.0       | 58.6     |
| 69            | 79.6                       | 74.9       | 61.9     |
| 70            | 75.5                       | 70.4       | 56.7     |
| 71            | 76.9                       | 72.3       | 58.8     |
| 72            | 74.6                       | 68.7       | 56.1     |



ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ mold 3 ชนิด(ต่อ)

| เวลา<br>(min) | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) |            |          |
|---------------|----------------------------|------------|----------|
|               | Steel mold                 | Shell mold | CO2 mold |
| 73            | 75.8                       | 70.7       | 56.9     |
| 74            | 73.8                       | 67.4       | 55.5     |
| 75            | 74.9                       | 68.9       | 56.4     |
| 76            | 73.8                       | 66.4       | 55.2     |
| 77            | 74.5                       | 67.6       | 55.8     |
| 78            | 72.2                       | 64.6       | 54.1     |
| 79            | 74.0                       | 66.6       | 55.8     |
| 80            | 70.3                       | 62.8       | 52.1     |
| 81            | 72.5                       | 64.8       | 54.3     |
| 82            | 70.5                       | 70.5       | 62.7     |
| 83            | 71.2                       | 71.2       | 63.3     |
| 84            | 68.6                       | 68.6       | 60.4     |
| 85            | 71.1                       | 71.1       | 62.9     |
| 86            | 68.5                       | 68.5       | 60.3     |
| 87            | 69.8                       | 69.8       | 60.7     |
| 88            | 67.8                       | 67.8       | 58.6     |
| 89            | 69.6                       | 69.6       | 60.5     |
| 90            | 67.3                       | 67.3       | 57.6     |
| 91            | 68.6                       | 68.6       | 58.8     |
| 92            | 66.8                       | 66.8       | 56.8     |
| 93            | 67.8                       | 67.8       | 58.0     |





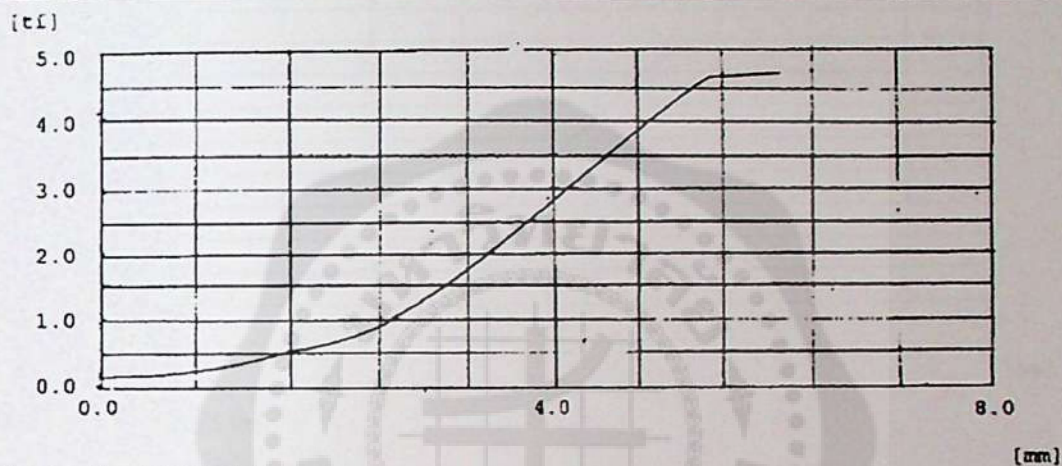
**รูปที่ 4.4** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ Mold 3 ชนิด



Shape: Rod  
Diameter: 12.54

Name: 1 test  
Remarks: steel mold

| Calc.     | Max-Load | Max-Stress             |
|-----------|----------|------------------------|
| CP1, CP2  |          |                        |
| CP Unit   |          |                        |
| Pass-Fail |          |                        |
| Unit      | [kgf]    | [kgf/mm <sup>2</sup> ] |
| No Name   | 4725.00  | 38.2575                |



รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของ Steel mold

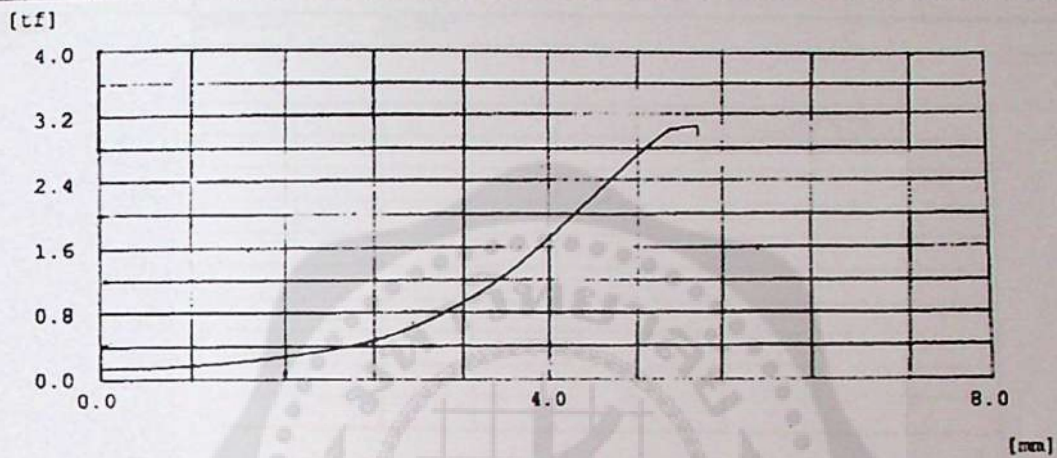


Shape: Rod  
Diameter: 12.51

Name: 2 test

Remarks: co2 mold

| Calc.     | Max-Load | Max-Stress             |
|-----------|----------|------------------------|
| CP1, CP2  |          |                        |
| CP Unit   |          |                        |
| Pass-Fail | -, -, -  | -, -, -                |
| Unit      | [kgf]    | [kgf/mm <sup>2</sup> ] |
| 2 test    | 3068.75  | 24.9664                |



Max-Load = 3068.75 kgf.

Max-Stress = 24.9664 kgf/mm<sup>2</sup>

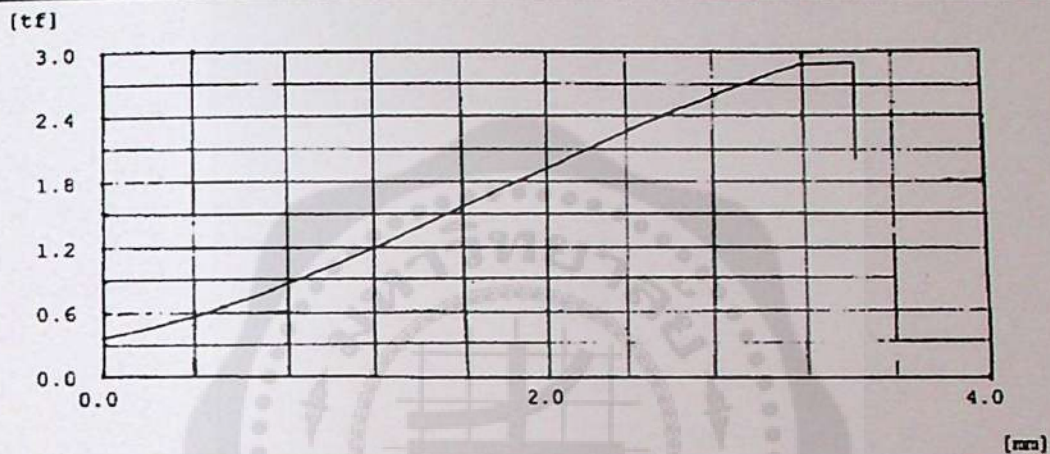
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของ Shell mold



Shape: Rod  
Diameter: 12.53

Name: 3 test  
Remarks: shell mould

| Calc.     | Max-Load | Max-Stress             |
|-----------|----------|------------------------|
| CP1, CP2  |          |                        |
| CP Unit   |          |                        |
| Pass-Fail |          |                        |
| Unit      | [kgf]    | [kgf/mm <sup>2</sup> ] |
| 3 test    | 2906.25  | 23.5689                |

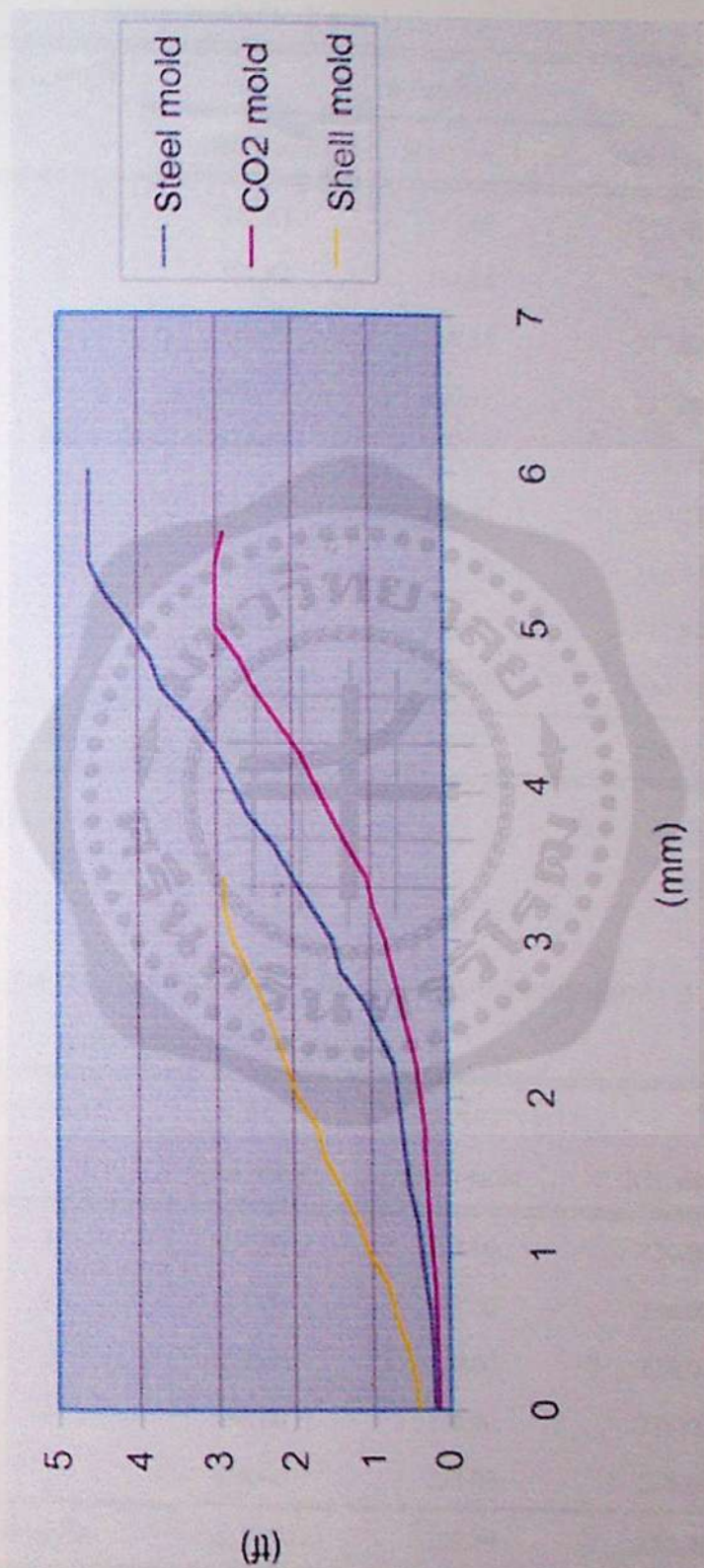


Max-Load = 2906.25 kgf.

Max-Stress = 23.5689 kgf/mm<sup>2</sup>

รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบแรงดึงของ CO2 mold





รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแรงดึงของชิ้น Test piece ทั้ง 3 ชนิด



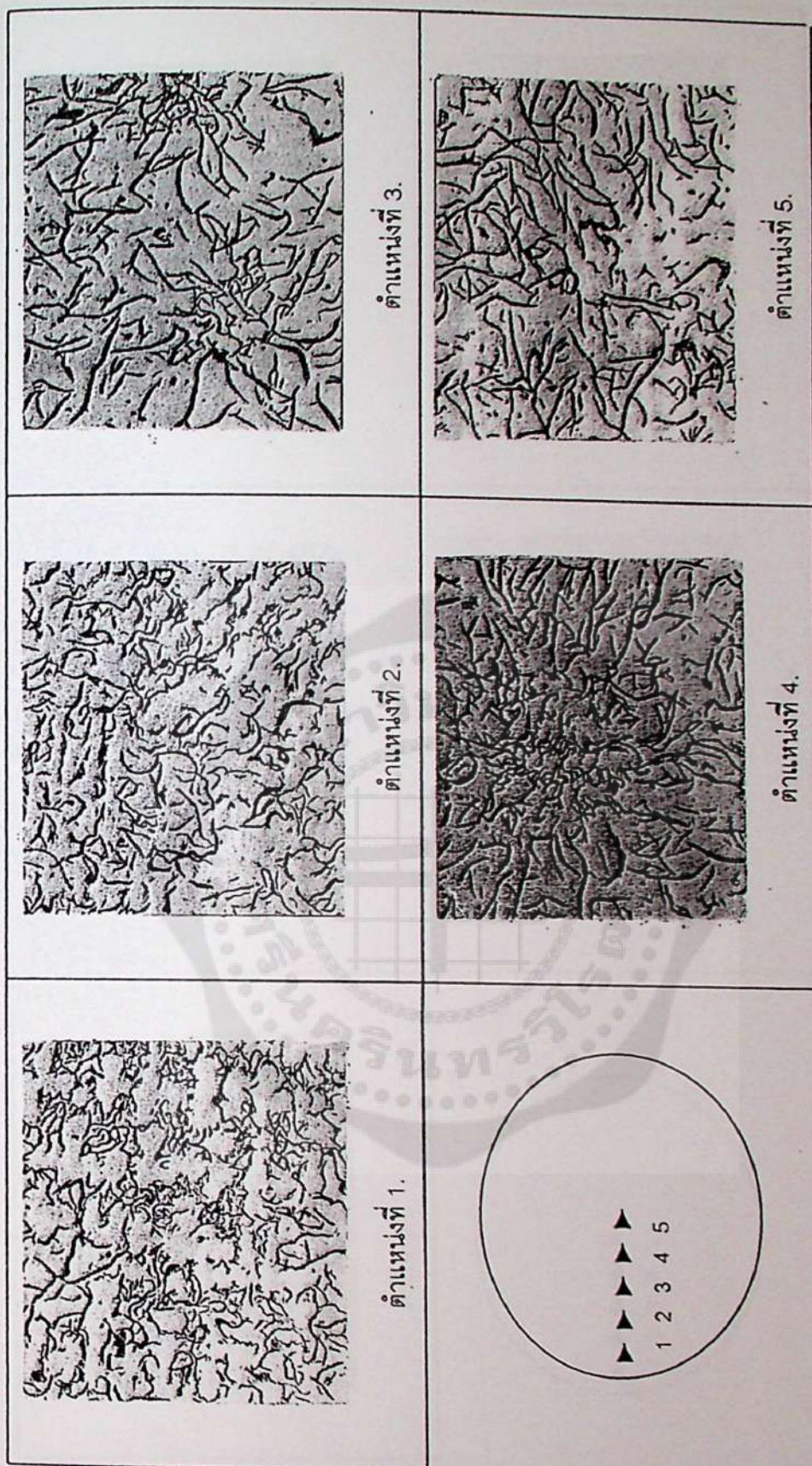
ตารางที่ 4.3 ความแข็งตามแนวรัศมีของชั้นทดสอบซึ่งใช้แบบหล่อต่างกัน  
(แต่ละจุดห่างกัน 2 m.m.)

| ตำแหน่งที่ | ความแข็ง(HV) |            |                      |
|------------|--------------|------------|----------------------|
|            | Steel mold   | Shell mold | CO <sub>2</sub> 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 4.4 ความแข็งตามแนวรัศมีของชั้นทดสอบซึ่งใช้แบบหล่อทั้ง 3 ชนิด  
(แต่ละจุดห่างกัน 3.6 m.m.)

| ตำแหน่งที่ | ความแข็ง(HV) |            |                      |
|------------|--------------|------------|----------------------|
|            | Steel mold   | Shell mold | CO <sub>2</sub> 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               |

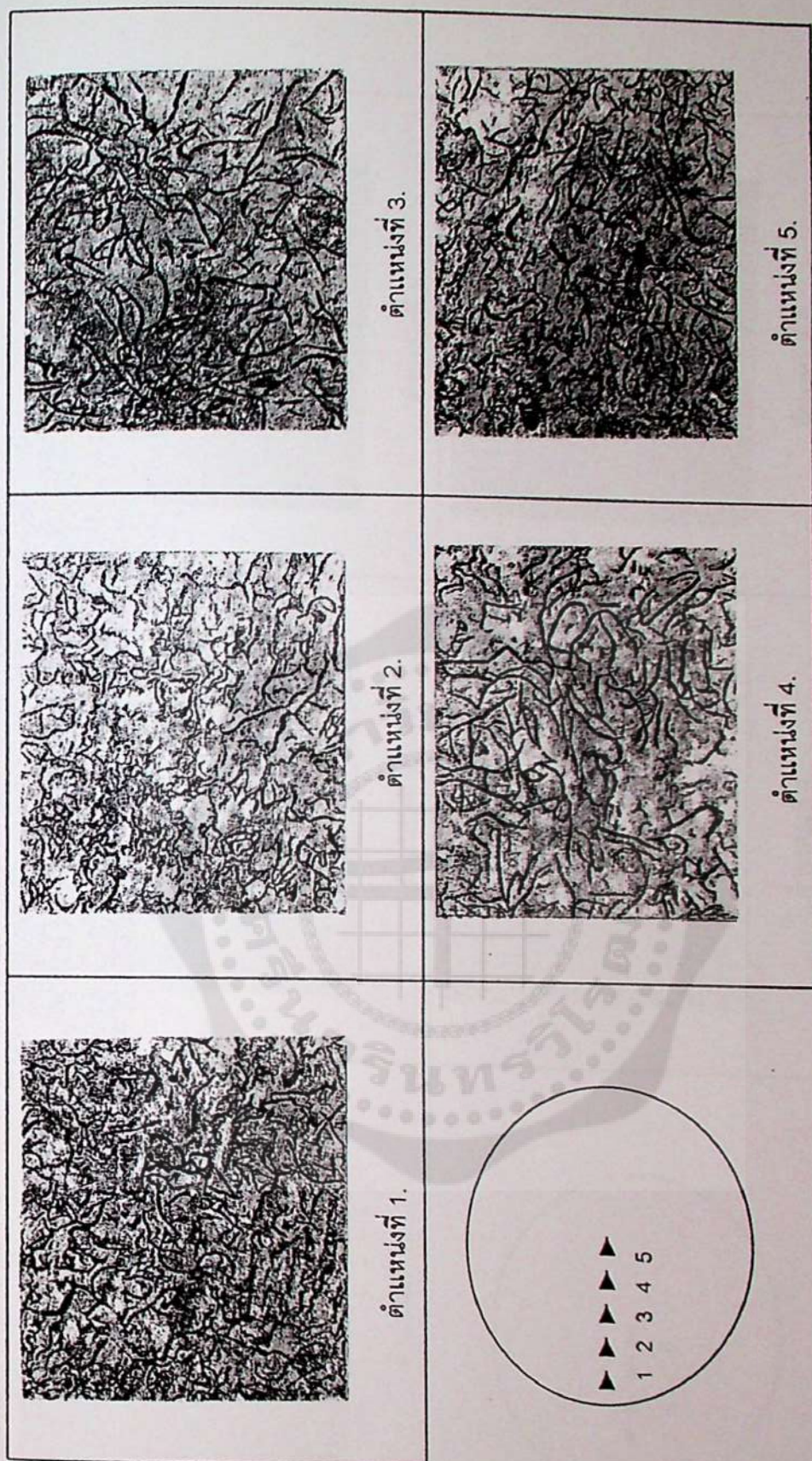




รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างของเกล็ดก่อนคัดกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น  $\text{CO}_2$

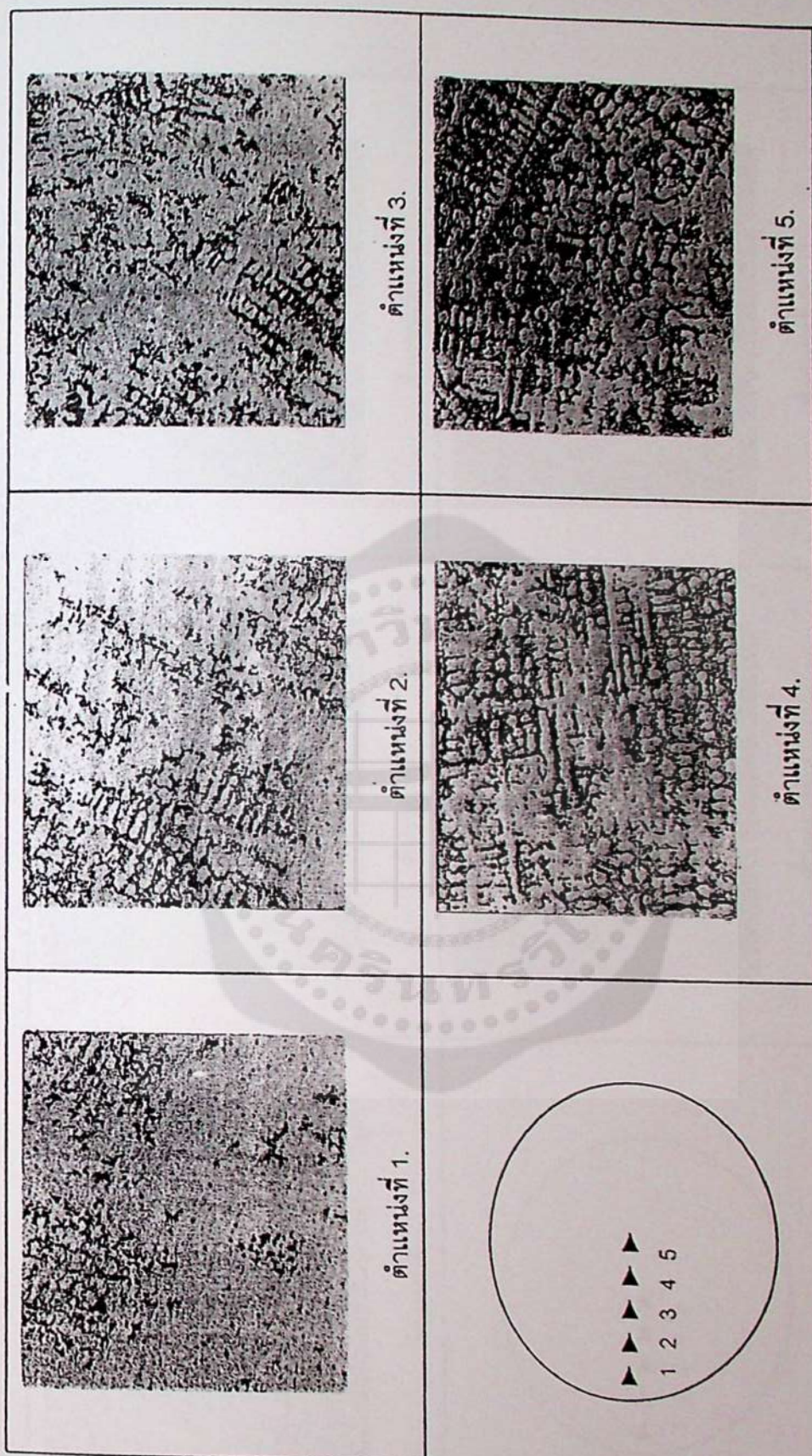


รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างของเหล็กหลังการกัดกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น  $\text{CO}_2$



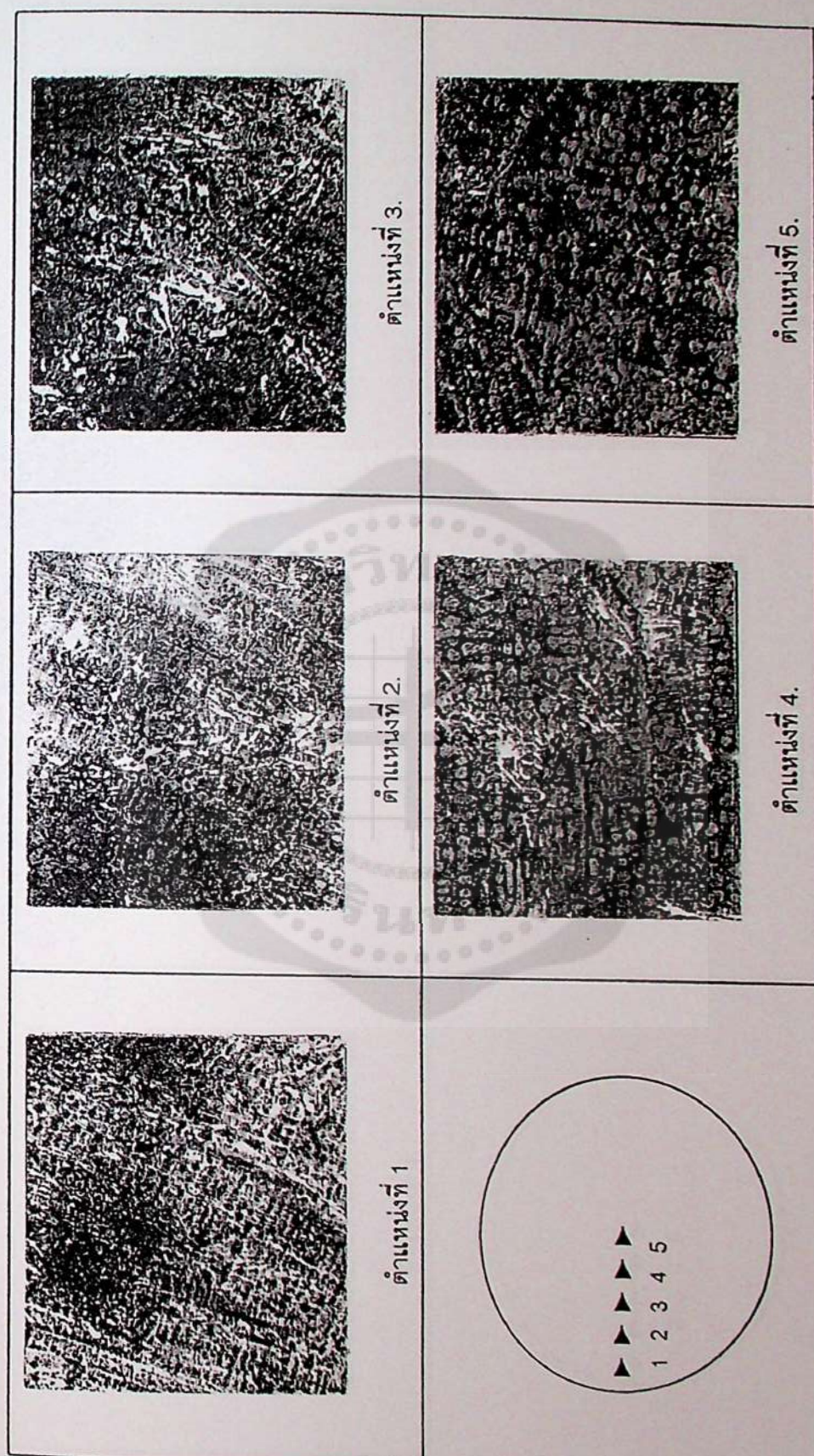
ขยาย 100 เท่า    กัดด้วย 2% Nitral





รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างของเหล็กก่อนการดัดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น Steel

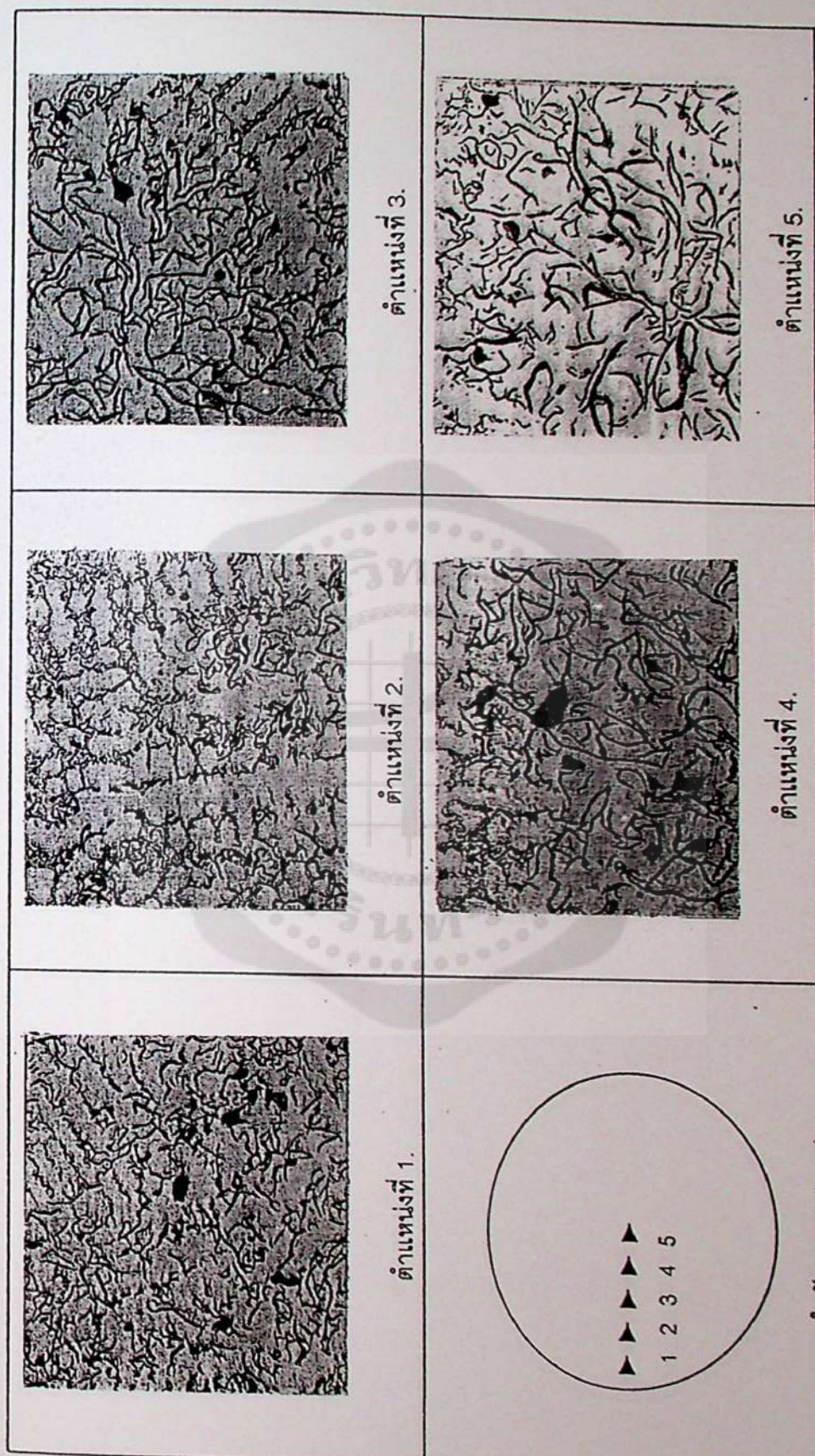




ขยาย 100 เท่า      กัดด้วย 2% Nitral

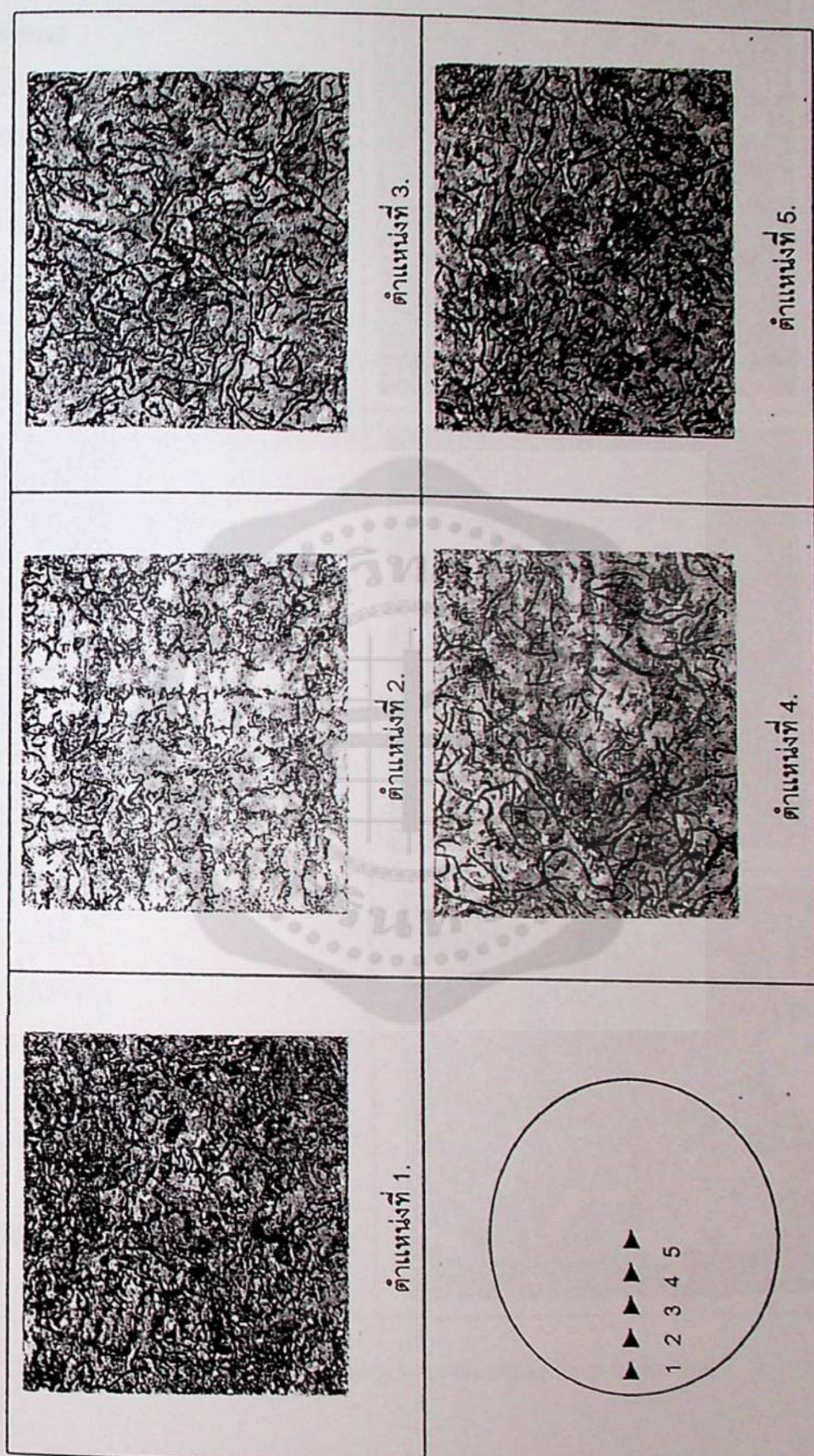
รูปที่ 4.12 แสดงโครงสร้างของเหล็กหลังกัดกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น Steel





รูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างของเปลือกก่อนกักกรดที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น Shell





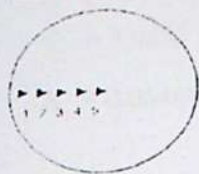
รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างของเปลือกหอยที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีโดยแบบหล่อที่ใช้เป็น Shell



แบบหล่อ Steel

กำลังขยาย 350 เท่า

กัดด้วยกรด 5% Picral



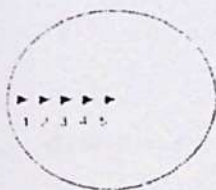
ตำแหน่งที่ 4



แบบหล่อ Shell mold

กำลังขยาย 350 เท่า

กัดด้วยกรด 5% Picral



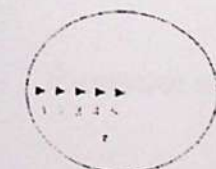
ตำแหน่งที่ 4



แบบหล่อ CO<sub>2</sub>

กำลังขยาย 350 เท่า

กัดด้วยกรด 5% Picral



ตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 4.15 แสดงภาพการวัดความหยาบละเอียดของเพอไลท์



### ส่วนผสม

ส่วนผสมน้ำเหล็กหล่อสีเทา (FC25) 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  $150 \pm 10$  กก.  
แป้งมัน  $1.5 \pm 0.2$  กก.  
น้ำแก้ว  $7 \pm 0.5$  กก.  
น้ำอ้อย  $0.3 \pm 0.1$  กก.  
น้ำ  $1 \pm 0.5$  กก.

### ส่วนผสมของแบบหล่อเรซิน (Sheel mold)

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



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### สรุปผลการทดลอง

##### 1. การแข็งตัวและการถ่ายเทความร้อนของน้ำโลหะในแบบหล่อ 3 ชนิด

ผลการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนของแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด จะได้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนของแบบหล่อที่ใช้เหล็กเหนียว (Steel mold) ถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด รองลงมาคือแบบหล่อที่ใช้ทราย (CO2 mold) และแบบหล่อที่ใช้เรซิน (Shell mold) มีอัตราการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ในการเย็นตัวของชิ้นงานจะเกิดการนำความร้อนเข้าสู่แบบหล่อ โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทออกสู่ผนังแบบหล่อบริเวณใกล้กับผนังแบบหล่อจะมีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว การแข็งตัวของโลหะจะเริ่มจากบริเวณที่อยู่ใกล้กับผนังแบบหล่อเข้าสู่จุดศูนย์กลางของชิ้นงาน ซึ่งอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกันนี้ มีผลทำให้เกิดความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาค ความแข็ง และความต้านแรงดึงของเหล็กหล่อสีเทา ทั้งนี้เกิดจากการกระจายตัวของส่วนผสมที่ไม่เท่ากันในระหว่างการเย็นตัวตามแผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับคาร์บอนของเหล็กหล่อสีเทาที่มีคาร์บอน 3.46% อุณหภูมิหลอมเหลวที่ 1390 °C การกระจายตัวของส่วนผสมนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่ไม่เท่ากันของแบบหล่อทั้ง 3 ชนิด

##### 2. ความแข็ง โครงสร้างจุลภาคตามแนวรัศมี และความต้านทานแรงดึง

จากการทดลองค่าความแข็งที่กดได้ตามแนวรัศมีของชิ้นทดสอบที่ได้จากแบบหล่อเหล็กเหนียว นั้นมีความแตกต่างกันกล่าวคือ บริเวณขอบนอกของชิ้นงานจะมีความแข็งมากที่สุด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้ได้โครงสร้างของกราฟไฟต์ที่เล็กและสั้น ลักษณะการเกิดของกราฟไฟต์มีทิศทางที่แน่นอน ได้ชนิดของกราฟไฟต์ชนิด D และ E ซึ่งการเกิดกราฟไฟต์ชนิดนี้จะให้ความแข็งที่สูงแต่จะขาดคุณสมบัติทางความเหนียว (Ductility) และได้เกรนของเพอร์ไลต์ละเอียดมาก เมื่อพิจารณาบริเวณที่ถัดเข้าพบว่าความแข็งลดลงเรื่อย ๆ จนถึงบริเวณกลางชิ้นทดสอบ ขนาดของเส้นกราฟไฟต์ก็จะยาวและใหญ่ขึ้นได้ชนิดกราฟไฟต์ชนิด A และ B ชิ้นทดสอบที่ได้จากเหล็กเหนียว (Steel mold) บริเวณผิวของชิ้นงานจะเกิดโครงสร้างคาร์ไบด์ (Fe<sub>3</sub>



C) เพอร์ไลต์ที่ละเอียดมาก รวมทั้งกราไฟท์ที่เล็กและสั้นชนิด D และ E ล็กจากผิวตามแนวรัศมีประมาณ 5 มิลลิเมตร ทำให้บริเวณนี้มีความแข็งแรงสูงมาก และจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงด้วย ค่าความแข็งและความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ได้จากแบบหล่อทราย CO2 (CO2 mold) จะมีค่าสูงรองลงมา โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีกราไฟท์ที่ยาวและใหญ่มากกว่าของแบบหล่อเหล็กเหนียว ชนิดของกราไฟท์ที่เกิดขึ้นในชิ้นทดสอบเป็นชนิด A และ B เกรนของเพอร์ไลต์จะมีความหยาบกว่าแบบหล่อเหล็กเหนียว ค่าความแข็งและความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบจากแบบหล่อเรซิน (Shell mold) จะมีค่าต่ำที่สุดทั้งนี้เนื่องจากแบบหล่อชนิดนี้มีการถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุด โครงสร้างทางจุลภาคที่เกิดขึ้นมีกราไฟท์ชนิด A, B และ C เล็กน้อย ในบริเวณกลางชิ้นงานเกรนของเพอร์ไลต์จะหยาบที่สุด

จากการศึกษาในการทดลองนี้พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และ โครงสร้างจุลภาค มีความสัมพันธ์กันคือ แบบหล่อที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงมีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึงสูง และโครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีเพอร์ไลต์ที่ละเอียด เส้นกราไฟท์เล็กและสั้น การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำ มีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็ง ความต้านทานแรงดึงต่ำ และมีโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีกราไฟท์ใหญ่และยาวได้เพอร์ไลต์ที่หยาบ

### ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน ควรหลีกเลี่ยงการกดความแข็งที่มีเส้นกราไฟท์ เนื่องจากจะ ได้ความแข็งที่ต่ำและไม่ถูกต้อง
2. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ ควรเลือกให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของชิ้นงานที่ต้องการ เช่น ถ้าต้องการชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง ควรเลือกแบบหล่อที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง เช่น วัสดุจำพวกโลหะ แต่ต้องมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าชิ้นงานที่ต้องการ และชิ้นงานที่ได้จากแบบหล่อชนิดนี้จะมีค่าความเหนียวต่ำ ถ้าต้องการชิ้นงานที่มีความแข็งต่ำแต่มีความเหนียวสูง ควรเลือกวัสดุที่เป็นแบบหล่อที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำได้แก่พวกโลหะ เช่น เรซิน, ทราย
3. เหล็กหล่อสีเทา (FC 25) โครงสร้างจุลภาคตามมาตรฐานของญี่ปุ่น (JIS) ชนิดของกราไฟท์ที่ต้องการมากที่สุดคือชนิด A แต่ชนิดของกราไฟท์ที่ยังยอมรับได้คือชนิด B และความแข็งแรงสูงสุดไม่เกิน 235 HB



### บรรณานุกรม

1. กัณฑ์วิชญ์ พลุประาษฎ์. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร , มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ , 2540 .
2. จงกล รัตสุข . โลหะวิทยาเบื้องต้นและวัสดุวิศวกรรม . กรุงเทพมหานคร , โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ , 2537 .
3. ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช , จูติเกียรติพงศ์ . วัสดุในงานวิศวกรรม . กรุงเทพมหานคร , บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2521 .
4. บัญชา ชนบุญสมบัติ , John T.H.Pearce. เทคโนโลยีวิทยาของเหล็กหล่อผสม . กรุงเทพมหานคร , ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) , 2542 .
5. มนต์ สกธิจินดา. เหล็กหล่อ . กรุงเทพมหานคร , วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ , พิมพ์ครั้งที่ 3 , 2536
6. แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา . วัสดุวิศวกรรม . กรุงเทพมหานคร , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร , 2536 .
7. หริส สุตะบุตร และ เคนยิ จิยธิวา . หล่อโลหะ . กรุงเทพมหานคร , สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ , 2540 .







รูปภาคผนวกที่ 1.1 อุปกรณ์การทดลอง



ภาพที่ 1. รับน้ำเหล็กจากเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 2. เบ้า Steel, Shell, CO<sub>2</sub>



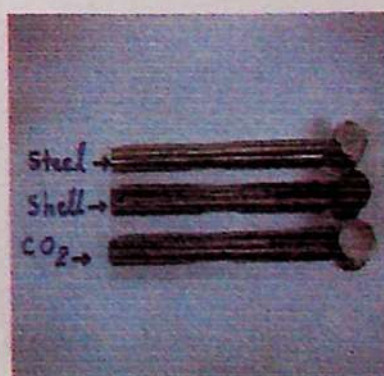
ภาพที่ 3. เทน้ำเหล็กลงเบ้าทั้ง 3 ชนิด



ภาพที่ 4. แกะชิ้นงานออกจากเบ้า



ภาพที่ 5. นำชิ้นงานไปกลึงเพื่อให้เป็นชิ้นทดสอบ



ภาพที่ 6. ชิ้นงานพร้อมนำไปทดสอบ



รูปภาณวนวทที่ 1.1 อุปกรณ์การทดลอง(ต่อ)



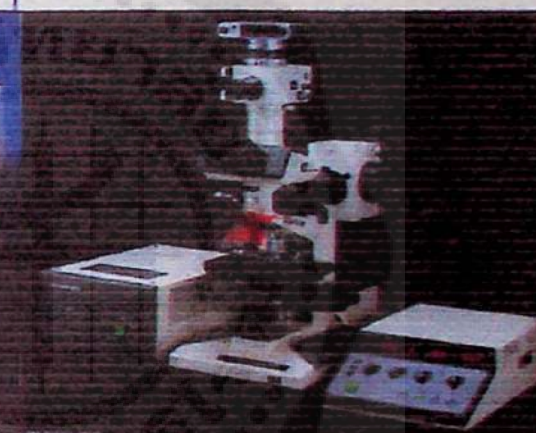
ภาพที่ 7. เครื่องSpectrometer



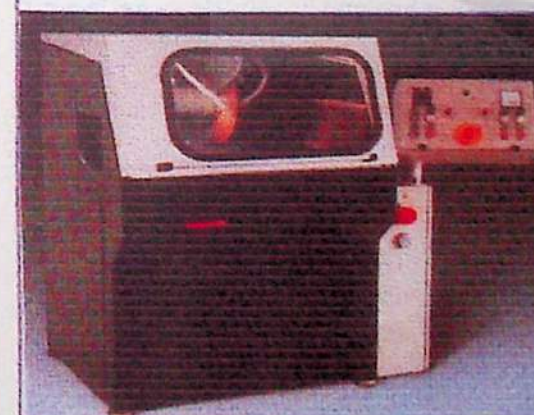
ภาพที่ 8. ทดสอบแรงดึง



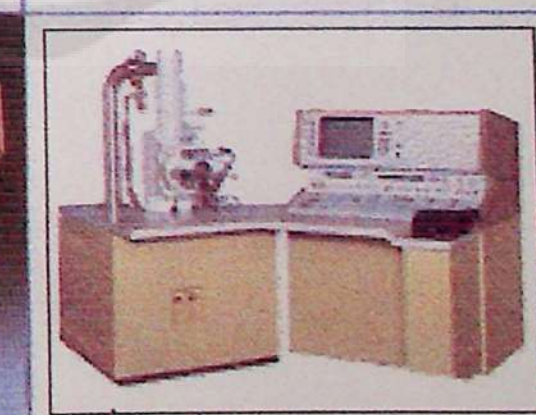
ภาพที่ 9. เครื่องวัดตัวอย่าง โครงสร้าง



ภาพที่ 10. กล้องจุลทรรศน์แบบ Optical



ภาพที่ 11. เครื่องตัดตัวอย่าง



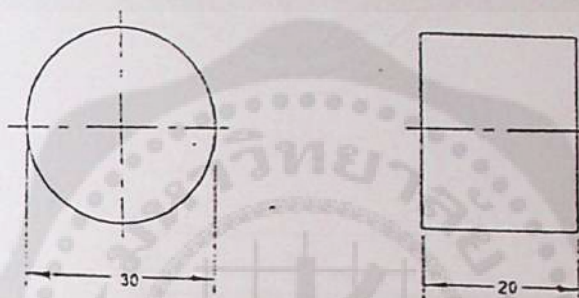
ภาพที่ 12. กล้องจุลทรรศน์แบบ  
Scanning electron





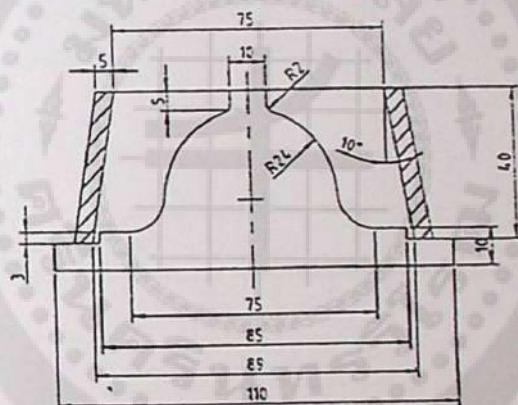
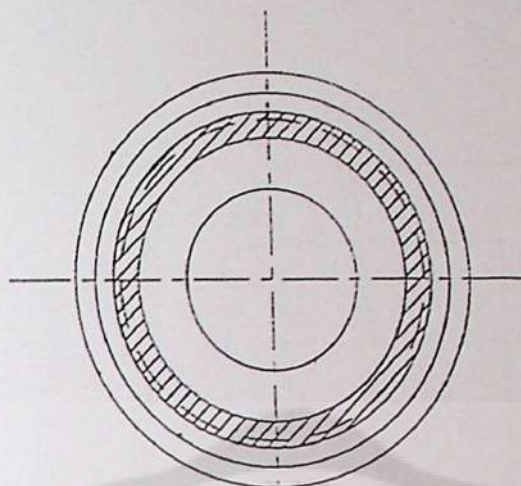
ภาคผนวกที่ 2  
แบบวิศวกรรมแบบหล่อโลหะ





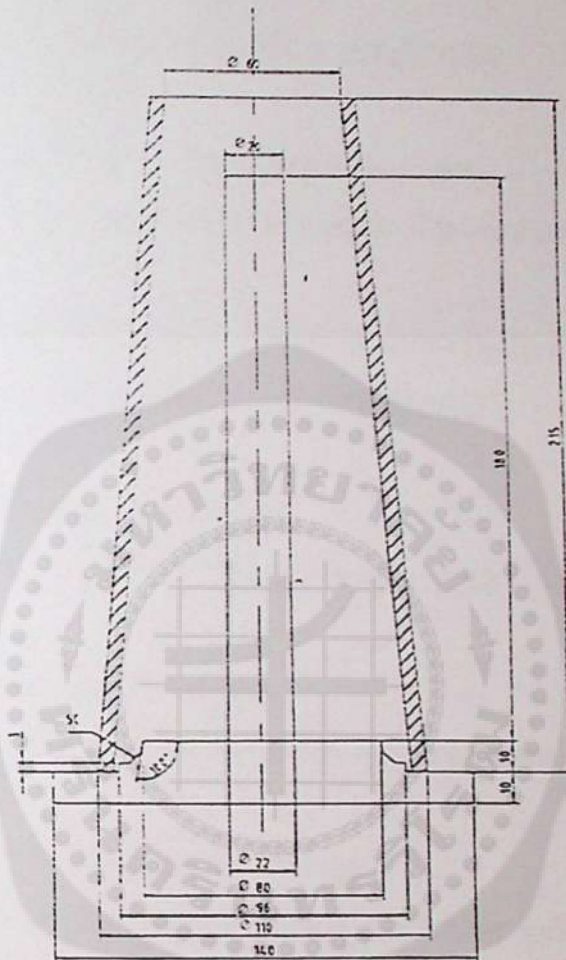
|            |                               |           |                                                                                   |       |            |       |
|------------|-------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|------------|-------|
| 1          | ชิ้นทดสอบ                     | 20 x 30   | JIS                                                                               | Fc25  | MT - 1     | 3     |
| ชั้นที่    | รายการ                        | ขนาดวัสดุ | มาตรฐาน                                                                           | วัสดุ | หมายเลขแบบ | จำนวน |
| ผู้เขียน   | นายเอกชัย มุติมาลย์           |           | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ |       |            |       |
| ผู้ตรวจ    | นายเอกชัย มุติมาลย์           |           |                                                                                   |       |            |       |
| ผู้อนุมัติ | อ. จักรชัย ลิขชานนท์          |           |                                                                                   |       |            |       |
| มาตราส่วน  | ชื่อชิ้นงาน                   |           |                                                                                   |       | หมายเลขแบบ |       |
| 1:1        | อุปกรณ์ในการทดลอง ชิ้นงานหล่อ |           |                                                                                   |       | MT - 1     |       |





|            |                      |                                                                                   |         |          |            |            |
|------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|------------|------------|
| 2          | แบบหล่อโลหะ          | 110 x 75                                                                          | JIS     | ทราย CO2 | MT - 2     | 3          |
| ชั้นที่    | รายการ               | ขนาดวัสดุ                                                                         | มาตรฐาน | วัสดุ    | หมายเลขแบบ | จำนวน      |
| ผู้เขียน   | นายเอกชัย มุติมาลย์  | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ |         |          |            |            |
| ผู้ตรวจ    | นายเอกชัย มุติมาลย์  |                                                                                   |         |          |            |            |
| ผู้อนุมัติ | อ. จักรชัย ถัสขานนท์ |                                                                                   |         |          |            |            |
| มาตราส่วน  | ชื่อชิ้นงาน          | อุปกรณ์ในการทดลอง ด้วยเท                                                          |         |          |            | หมายเลขแบบ |
| 1:2        |                      |                                                                                   |         |          |            | MT - 2     |





|            |                      |                                                                                     |         |                 |            |            |
|------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------|------------|------------|
| 3          | แบบหล่อโลหะ          | 140 x 215                                                                           | JIS     | CO2,Steel,Shell | MT - 3     | 3          |
| ชั้นที่    | รายการ               | ขนาดวัสดุ                                                                           | มาตรฐาน | วัสดุ           | หมายเลขแบบ | จำนวน      |
| ผู้เขียน   | นายเอกชัย มุติมาลย์  | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์ |         |                 |            |            |
| ผู้ตรวจ    | นายเอกชัย มุติมาลย์  |                                                                                     |         |                 |            |            |
| ผู้อนุมัติ | อ. จักรชัย ลัษณานนท์ |                                                                                     |         |                 |            |            |
| มาตราส่วน  | ชื่อชิ้นงาน          | อุปกรณ์ในการทดลอง เป้าหล่อ                                                          |         |                 |            | หมายเลขแบบ |
| 1:2        |                      |                                                                                     |         |                 |            | MT - 3     |



### ประวัติผู้จัดทำโครงการนวัตกรรม

ชื่อ นาย ตระกูลศักดิ์ สุขวี

ที่อยู่ปัจจุบัน 1 หมู่ 2 ต. บ้านครัว อ. บ้านหม้อ จ. สระบุรี 18270

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2532 ป.ว.ช. ช่างกลโลหะวิทยา วิทยาลัยเทคนิคอุบลราชธานี

พ.ศ. 2535 ป.ว.ส. ช่างโลหะ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2535-2536 บริษัท โซนี่แมคเนติก ประเทศไทย จำกัด (ลาดกระบัง)

พ.ศ. 2536-ปัจจุบัน บริษัท นวโลหะไทย จำกัด (โรงงานท่าหลวง)

ชื่อ นาย วรรณชัย อาทรวริยะกุล

ที่อยู่ปัจจุบัน 66 หมู่ 6 ต. คลองขุด อ. เมือง จังหวัด. สตูล 91000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2538 ป.ว.ช. ช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคสตูล

พ.ศ. 2538 ป.ว.ส. ช่างกลเรือ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2538 บริษัท โตโยต้าฟิซิคัลพานิช สาขาสตูล

พ.ศ. 2540-2542 บริษัท อิตาเลียนไทยดีเวลลอปเม้นท์ ประเทศไทย จำกัด

ชื่อ นาย สมชาย เนตรวิจิตร

ที่อยู่ปัจจุบัน 163 แขวง. บางพลัด เขต. บางพลัด จ. กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2535 ป.ว.ช. ช่างกลโลหะ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี

พ.ศ. 2538 ป.ว.ส. ช่างกลโลหะ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี

ชื่อ นาย เอกชัย มุคิมาลัย

ที่อยู่ปัจจุบัน 8 หมู่ 10 ต. เมืองเก่า อ. กบินทร์บุรี จ. ปราจีนบุรี 25240

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2537 ป.ว.ช. ช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคปราจีนบุรี

พ.ศ. 2539 ป.ว.ส. ช่างกลโรงงาน สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น