

PRO - MEC  
296  
2542  
1.2

การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อขนาดและรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทา  
A Comparative Study of Strengthening on Size and Shape of Graphite Gray Cast Iron



นาย จูติ นรเศรษฐีรกุล  
นาย สมพร จวบบุญ  
นาย อติศักดิ์ ส่องสว่าง

โครงการวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ. 2542

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์

การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรง  
ต่อขนาดและรูปร่างของแกรไฟต์ใน  
เหล็กหล่อสีเทา

โดย

นาย จูติ                      นรเศรษฐีรกุล  
นาย สมพร                      จวบบุญ  
นาย อติศักดิ์                      ส่องสว่าง

ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ กัณฑ์วิชญ์      พลูปราชญ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้นับโครงการ  
วิศวกรรมศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

\_\_\_\_\_ คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
( รองศาสตราจารย์ ดร. ศักดิ์ กองสุวรรณ )

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมศาสตร์

\_\_\_\_\_ ประธานกรรมการ  
( อาจารย์ กัณฑ์วิชญ์ พลูปราชญ์ )

\_\_\_\_\_ กรรมการ  
( อาจารย์ วิชิต บัวแก้ว )

\_\_\_\_\_ กรรมการ  
( อาจารย์ สมหวัง อริสริยวงศ์ )

\_\_\_\_\_ กรรมการ  
( อาจารย์ สำรวย กระเน้นท์ )



# การศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อขนาดและรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทา ปีการศึกษา 2542

โดย

นาย วุฒิ นรเศรษฐีกุล

นาย สมพร จวบบุญ

นาย อติศักดิ์ ส่องสว่าง

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์กัณฑ์วิชญ์ พลุประชาญ์

## บทคัดย่อ

ปัจจุบัน เหล็กหล่อสีเทา มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์และเครื่องจักร การศึกษาถึงอิทธิพลของขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของเหล็กหล่อสีเทา เมื่อเหล็กเย็นตัวโดยสมบูรณ์ภายในแบบหล่อทราย โดยพิจารณาถึงสมบัติทางกลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของธาตุซิลิกอน (Si) ครั้งละ 0.15% และ 0.5% ชิ้นงานทดสอบมีความยาว 500 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร เวลาเย็นตัวสมบูรณ์ในแบบหล่อทราย 0.883 นาที

จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมซิลิกอน ให้เพิ่มขึ้น ลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทา จะมีผลึกของแกรไฟต์ เป็นเส้นยาวและใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนด้วย และเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางกล พบว่าความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงจะลดลง โดยเหล็กที่มีความเค้นแรงดึงต่ำสุด คือ  $98.82 \text{ N/mm}^2$  เป็นเหล็กที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมของ (C) 2.61%, (Si) 2.17%, (P) 0.025% และเหล็กที่มีความเค้นแรงดึงสูงสุด คือ  $365.84 \text{ N/mm}^2$  และความแข็งสูงสุดคือ 220 (HB) เป็นเหล็กหล่อสีเทาที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมของ (C) 2.84%, (Si) 1.46% , (P) 0.025% ส่วนเหล็กที่มีความแข็งแรงต่ำสุด คือ 121 (HB) เป็นเหล็กหล่อสีเทาที่ประกอบไปด้วย ส่วนผสมของ (C) 3.47%, (Si) 3.79% , (P) 0.024% ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ลักษณะของผลึกแกรไฟต์ ที่มีขนาดเล็ก สั้น กระจายกันอย่างสม่ำเสมอ จะมีความแข็งแรงมากที่สุด และในทางตรงข้ามกัน ลักษณะของผลึกแกรไฟต์ ที่มีขนาดใหญ่ ยาว กระจายกันอย่างไม่สม่ำเสมอจะมีความแข็งแรงน้อยที่สุด



**A Comparative Study of Strengthening on Size and Shape of  
Graphite Gray Cast Iron  
Academic Year 1999**

By.

Mr. Thite Norrasetteerakul

Mr. Sompom Joubbon

Mr. Adisak Songsawang

Project Report Advisor

Mr. Ganwarich Pluphrach

**ABSTRACT**

At present, Gray Cast Iron is very important for industry, for example, the production of the parts mobile and machine. The study about an influence of the size and the shape of graphite which an effect on the strength of Gray Iron. When it is completely cool in a sand mould. When we consider the mechanical qualification, if the mixture ratio of silicon (Si) is changed by 0.15 % and 0.5 % each time, the experimental object is 500 mm. long, 30 mm. In diameter, and it takes 0.883 minute to be completely cool in the sand mould.

From the experiment, increasing the silicon mixture cause the structure of the Gray Iron change the crystal shape of Graphite to a longer and bigger one. It depends on the quantity of Carbon. When we experiment mechanical qualification, we find that strength and tensile stress decrease, and the Iron, the lowest tensile stress in  $98.82 \text{ N/mm}^2$ , is composed of (C) 2.61 %, (Si) 2.117%, (P) 0.025%, and the Iron, the highest tensile stress in  $365.84 \text{ N/mm}^2$  and the highest strength in 220 (HB) is Gray Cast Iron that is composed of (C) 2.84%, (Si) 1.46%, (P) 0.02%, and the Iron, the lowest strength in 121. (HB), is Gray Cast Iron that is composed of (C) 3.47%, (Si) 3.79%, (P) 0.024% Therefore, it can be concluded that the Characteristic of the graphite with small, short and constantly spreading crystal will be the strongest one. on the contrary, that with big, long, inconstantly spreading one will be least strong.



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณอาจารย์กัณฑ์วิรัชญ์ พลูปราชนัญ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบโครงการวิศวกรรมฉบับนี้ให้สมบูรณ์ขึ้น คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ คุณสุนทร รุณณรงค์, คุณจิรัชมิตร ชินวงศ์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ สถานที่ คำแนะนำและเพื่อทำโครงการฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ อาจารย์บรรจบ อรชร ที่ช่วยเหลือเพื่อเครื่องทดสอบ ตลอดจนเจ้าหน้าที่และเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดาและอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และอบรมสั่งสอน จนกระทั่งโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ  
10 กันยายน 2542



## สารบัญ

|                                                    | หน้า |
|----------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                                    | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                 | ง    |
| กิตติกรรมประกาศ                                    | จ    |
| สารบัญ                                             | ฉ    |
| สารบัญตาราง                                        | ช    |
| สารบัญรูป                                          | ฌ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ                         | ฎ    |
| บทที่                                              |      |
| 1. บทนำ                                            | 1    |
| ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา                    | 1    |
| วัตถุประสงค์โครงการ                                | 2    |
| ขอบเขตของโครงการ                                   | 2    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                          | 2    |
| 2. ทฤษฎี                                           | 3    |
| สมบัติทั่วไปของเหล็กหล่อสีเทา                      | 3    |
| แผนภาพสมดุลย์เหล็กคาร์ไบด์                         | 4    |
| การจำแนกชนิดของเหล็กตามแผนภูมิสมดุลย์เหล็กคาร์ไบด์ | 6    |
| ปฏิกิริยาในแผนภูมิสมดุลของเหล็กคาร์ไบด์            | 7    |
| หลักการแข็งตัว                                     | 7    |
| เวลาของการแข็งตัว                                  | 11   |
| โครงสร้างจากการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อ               | 11   |
| อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อ                        | 13   |
| โครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทา                         | 14   |
| ส่วนผสมของเหล็กหล่อ                                | 16   |
| บทบาทของธาตุผสมในเหล็กสีเทา                        | 17   |
| อิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กหล่อ                       | 18   |
| การทดสอบวัสดุ                                      | 19   |
| 3. การออกแบบและการคำนวณ                            | 27   |
| การออกแบบแบบหล่อ                                   | 27   |
| การสร้างแบบหล่อ                                    | 27   |



## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 3. การออกแบบและการคำนวณ (ต่อ)                                         |    |
| คำนวณเวลาเป็นตัวในแบบหล่อ                                             | 27 |
| คำนวณปริมาณส่วนผสมในการหล่อเหล็กหล่อสี่เทาเริ่มต้น                    | 28 |
| คำนวณน้ำหนักของธาตุซิลิกอนที่ใช้ในการเติมเพื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสม | 31 |
| ตัวอย่างคำนวณค่า Carbon Equivalent (C.E.)                             | 33 |
| ตัวอย่างคำนวณปริมาณโครงสร้าง                                          | 33 |
| 4. ผลการทดลอง                                                         | 34 |
| อุปกรณ์การทดลอง                                                       | 34 |
| ขั้นตอนดำเนินการหล่อขึ้นทดสอบ                                         | 34 |
| การเก็บข้อมูลจากการทดลอง                                              | 35 |
| ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง                                               | 36 |
| 5. สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ                                           | 54 |
| สรุปผลการทดลอง                                                        | 54 |
| ข้อเสนอแนะ                                                            | 55 |
| บรรณานุกรม                                                            | 56 |
| ภาคผนวก ก. ตารางสำหรับการคำนวณ                                        | 57 |
| ภาคผนวก ข. ตารางความแข็งบริเนล                                        | 60 |
| ภาคผนวก ค. รูปแสดงอุปกรณ์การทดลองและการทดลอง                          | 64 |
| ภาคผนวก ง. แบบขึ้นทดสอบ                                               | 66 |
| ประวัติผู้จัดทำโครงงานวิศวกรรมศาสตร์                                  | 74 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                    | หน้า |
|-------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 แสดงตัวเลือกขนาดหัวกด และแรงกดบริเนล                    | 25   |
| 4.1 แสดงค่าอัตราส่วนผสมเริ่มต้นของการหล่อขึ้นทดสอบ          | 37   |
| 4.2 แสดงส่วนประกอบของธาตุในการหล่อขึ้นงานครั้งที่ 1         | 38   |
| 4.3 แสดงส่วนประกอบของธาตุในการหล่อขึ้นงานครั้งที่ 2         | 39   |
| 4.4 แสดงผลการทดสอบส่วนผสม, สมบัติเชิงกลของการหล่อครั้งที่ 1 | 46   |
| 4.5 แสดงผลการทดสอบส่วนผสม, สมบัติเชิงกลของการหล่อครั้งที่ 2 | 47   |

### ตารางภาคผนวกที่

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. แสดงอัตราส่วนของธาตุต่างๆ ตามมาตรฐานญี่ปุ่น                                  | 58 |
| 2. แสดงค่าคงที่ของแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับสมบัติและอุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะที่ 1400°C | 58 |
| 3. แสดงค่าโมดูลัสของลักษณะต่างๆ                                                 | 59 |
| 4. แสดงค่าความแข็งบริเนลที่ขนาดความโตหัวกด 10 mm.                               | 61 |



## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                                                                                                                   | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 แสดงแผนภูมิสมมูลเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์                                                                                                                                                | 5    |
| 2.2 แสดงรูปแสดงพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากของเหลวเป็นของแข็ง                                                                                                          | 8    |
| 2.3 แสดงพลังงานรวมที่ปล่อยออกมาของของแข็ง-ของเหลวในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง ขนาดของของแข็งที่เริ่มก่อตัวถ้ารัศมีวิกฤตและเป็นนิวเคลียสถ้ารัศมีมีวิกฤต                                      | 9    |
| 2.4 แสดงอุณหภูมิเมื่อของเหลวอยู่ในช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว การโป่งออกของของแข็ง-ของเหลวที่ผิวจะไม่มี การเติบโต การคืบหน้าไปของผิวในแนวรอบเกิดจากความร้อนแฝงจำเพาะที่เคลื่อนไปตามผิวของแข็ง | 10   |
| 2.5 แสดงพัฒนาการของโครงสร้างมหภาค ในการแข็งตัวระหว่างที่มีการหล่อ                                                                                                                        | 12   |
| 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size of Casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand Mold)                                              | 13   |
| 2.7 แสดงชนิดของแกรไฟต์                                                                                                                                                                   | 15   |
| 2.8 แสดงการทดสอบแรงดึง                                                                                                                                                                   | 21   |
| 2.9 แสดงแผนภาพความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้า                                                                                                                                            | 22   |
| 2.10 แสดงการหาค่าความเค้นพิสูจน์                                                                                                                                                         | 23   |
| 2.11 แสดงลักษณะห้วกดแบบบริเนลและรอยกด                                                                                                                                                    | 25   |
| 4.1 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 1                                                                                                                            | 40   |
| 4.2 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 2                                                                                                                            | 40   |
| 4.3 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 3                                                                                                                            | 41   |
| 4.4 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 4                                                                                                                            | 41   |
| 4.5 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 5                                                                                                                            | 42   |
| 4.6 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 6                                                                                                                            | 42   |
| 4.7 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 1                                                                                                                            | 43   |
| 4.8 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 2                                                                                                                            | 43   |
| 4.9 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 3                                                                                                                            | 44   |
| 4.10 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 4                                                                                                                           | 44   |
| 4.11 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 5                                                                                                                           | 45   |
| 4.12 แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 6                                                                                                                           | 45   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                     | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า C.E. และความเค้นแรงดึง<br>ในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1    | 48   |
| 4.14 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า C.E. และความแข็ง<br>ในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1          | 49   |
| 4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ค่าความเค้นแรงดึงและความแข็ง<br>ในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1 | 50   |
| 4.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า C.E. และความเค้นแรงดึง<br>ในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 2    | 51   |
| 4.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า C.E. และความแข็ง<br>ในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 2          | 52   |
| 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่าง ค่าความเค้นแรงดึงและความแข็ง<br>ในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1 | 53   |
| <br><b>รูปภาคผนวก</b>                                                                      |      |
| 1. แสดงแบบหล่อทราย                                                                         | 64   |
| 2. แสดงแบบหล่อทรายเมื่อประกบแล้ว                                                           | 64   |
| 3. แสดงแบบหล่อทรายพร้อมเทหล่อ                                                              | 65   |
| 4. แสดงการเทน้ำโลหะออกจากเตา                                                               | 65   |
| 5. แสดงการเทน้ำโลหะลงแบบหล่อทราย                                                           | 66   |
| 6. แสดงชิ้นงานเหล็กหล่อสีเทา                                                               | 66   |



## คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

| สัญลักษณ์                      | ความหมาย                                                      |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Al                             | อลูมิเนียม                                                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | อลูมินา                                                       |
| C                              | คาร์บอน                                                       |
| Co                             | โคบอลต์                                                       |
| Cr                             | โครเมียม                                                      |
| Mo                             | โมลิบดีนัม                                                    |
| Mn                             | แมงกานีส                                                      |
| Mns                            | แมงกานีสซัลไฟด์                                               |
| Ni                             | นิกเกิล                                                       |
| Si                             | ซิลิกอน                                                       |
| SiO <sub>2</sub>               | ซิลิกอนไดออกไซด์                                              |
| Ti                             | ไทเทเนียม                                                     |
| V                              | วานาเดียม                                                     |
| W                              | ทังสเตน                                                       |
| C.E.                           | Carbon Equivalent                                             |
| FCC.                           | Face Centered Tetraginal Cubic                                |
| FeS                            | ซัลไฟด์                                                       |
| Fe <sub>3</sub> C              | ซีเมนไต์                                                      |
| M <sub>s</sub>                 | เส้นอุณหภูมิเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงออสเทนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ |
| M <sub>f</sub>                 | เส้นอุณหภูมิสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงออสเทนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์  |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กหล่อ เป็นเหล็กที่ถูกนำมาใช้งานด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเหล็กหล่อสามารถแบ่งประเภทออกไปได้อีก 4 ประเภท คือ เหล็กหล่อสีขาว, เหล็กหล่อสีเทา, เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม และเหล็กหล่ออบเหนียวโดยเฉพาะเหล็กหล่อสีเทา เป็นเหล็กที่มีราคาถูก น้ำหนักจะมีความเหลวสูง สามารถไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ดี จึงสามารถหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ค่อนข้างง่าย ทางด้านสมบัติทางกล เหล็กหล่อสีเทาจะมีความแข็งแรงสูง (HB 67 – 450 ตามการวัดแบบบริเนล) แต่จะมีความต้านทานแรงดึง (Tensile Force) ต่ำ จากสมบัติดังกล่าว ทำให้เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กที่มีการผลิต และใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในประเทศไทยของเรา เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเสื้อสูบ, ลูกสูบรถยนต์, อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน, แท่นรองเครื่องจักร เป็นต้น

องค์ประกอบของเหล็กหล่อสีเทานั้นประกอบไปด้วยธาตุ คาร์บอน (C) ระหว่าง 2.5 ถึง 4% (โดยน้ำหนัก), ซิลิกอน (Si), แมงกานีส (Mg), กำมะถัน (S) และอื่นๆ แต่ธาตุที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทานั้นคือ ธาตุซิลิกอน (Si) ดังนั้นในส่วนขั้นตอน ของการผลิตเหล็กหล่อชนิดนี้จึงต้องมีการควบคุมปริมาณธาตุซิลิกอน (Si) เป็นพิเศษ เพราะขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์ (Graphite) ที่เกิดขึ้น ภายในเนื้อเหล็กหล่อสีเทานี้มีผลกระทบต่อสมบัติทางด้านความแข็งแรงเป็นอย่างมาก ในส่วนของมาตรฐานการผลิตเหล็กชนิดนี้ (ตามมาตรฐานญี่ปุ่น JIS) ได้แบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 เกรด คือ FC15, FC 20, FC 25, FC 30 และ FC 35 ซึ่งแต่ละเกรดก็จะมีส่วนประกอบของธาตุที่แตกต่างกันออกไป และสมบัติทางด้านความแข็งแรงก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย ดังนั้นการศึกษาเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทาจึงเป็นสิ่งสมควร ให้มีความสำคัญอย่างมากเพื่อที่จะนำไปใช้ พัฒนาการผลิตและประยุกต์ใช้ประโยชน์เหล็กหล่อสีเทาต่อไปในอนาคต



### วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยา และสมบัติทางกลอันเกิดจากขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทา
2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทานั้น เนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของธาตุประกอบ

### ขอบเขตของโครงการ

1. ทำการหล่อโลหะให้เป็นเหล็กหล่อสีเทา โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของธาตุประกอบ ซิลิคอน (Si) ในแต่ละชิ้นงาน
2. นำเหล็กแต่ละชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างภายในของเนื้อเหล็ก จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางกล โดยการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) และทดสอบแรงดึง (Tensile Test)
3. นำรูปลักษณะโครงสร้างของเนื้อเหล็ก, ผลการทดสอบความแข็ง, ผลการทดสอบแรงดึง ของเหล็กแต่ละชิ้นมาสรุปเปรียบเทียบ

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทา ทำให้เราทราบถึง

1. ลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาของเหล็กหล่อสีเทา
2. ขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อสีเทาที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางกล
3. การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของธาตุประกอบซิลิคอน (Si) ในน้ำเหล็กนั้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่างของแกรไฟต์

จากประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับดังกล่าว สามารถนำไปพัฒนาสมบัติต่าง ๆ ของเหล็กหล่อสีเทา เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป



## บทที่2

### ทฤษฎี

#### สมบัติทั่วไปเหล็กหล่อสีเทา (Gray Cast Iron)

เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม และโครงสร้างใกล้เคียงเหล็กดิบ (Pig Iron) ที่ถลุงจากเตาสัง (Blast Furnace) ในบางโอกาสอาจจะผลิตเหล็กหล่อสีเทาจากเหล็กดิบได้โดยตรง โดยปราศจากการปรับปรุงส่วนผสมใดๆ หรือไม่ก็อาจนำเหล็กดิบมาหลอมใหม่ในเตาพ่นลม (Cupola) หรือเตาไฟฟ้า แล้วปรับปรุงส่วนผสมบ้างเล็กน้อย เพื่อให้เหล็กมีคุณภาพดีขึ้น และทำให้เหล็กหล่อสีเทามีราคาถูกเมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ ส่วนการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมแล้วจะนิยมผลิตด้วยเตาคิวโบล่า (Cupola) นอกจากนี้เหล็กหล่อสีเทามีสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพต่างๆที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประการ ดังนี้

1. มีความแข็งแรงไม่สูงสามารถกลึงไส ตบแต่งให้ได้ขนาดตามต้องการได้ง่าย
2. มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ และมีความสามารถในการไหล (Fluidity) ดี สามารถหล่อหลอมให้ได้รูปร่างซับซ้อนได้ง่าย
3. มีอัตราการขยายตัวน้อย สามารถใช้ทำส่วนประกอบของเครื่องจักรที่ต้องการรูปร่าง และขนาดที่แน่นอน
4. มีความต้านทานต่อแรงอัด และรับแรงสั่น (Damping Capacity) ได้ดี ใช้ทำแท่นรองรับอุปกรณ์เครื่องมือกลต่างๆได้ดี
5. สามารถที่จะปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงดึงได้มากขึ้น ขึ้นอยู่กับการปรับปรุงส่วนผสม และการอบชุบ ทำให้ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

ที่เรียกชื่อว่าเหล็กหล่อสีเทาก็เพราะเหล็กหล่อชนิดนี้ เมื่อตีหักดูเนื้อเหล็กตรงรอยหักจะมีลักษณะเป็นสีเทาซึ่งต่างกับเหล็กหล่อสีขาว ในความเป็นจริงเหล็กหล่อสีเทาก็เป็นเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับเหล็กหล่อสีขาว ผิดตรงที่เหล็กหล่อสีเทาในขณะเปลี่ยนสภาวะจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะเป็นระบบสแตเบิล (Stable) กล่าวคือปริมาณคาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์ แยกตัวออกมารวมเป็นแผ่น (Flakes) ซึ่งเรียกว่าแกรไฟต์ และกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเหล็ก ทำให้มองดูรอยหักเป็นสีเทาหากทำการศึกษาแผนภาพสมดุลเหล็กคาร์ไบด์ จะพบว่าเป็นระบบสแตเบิล ซึ่งอยู่ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนจุดต่างๆบนแผนภาพจะแตกต่างจากระบบสแตเบิลบ้าง แต่การศึกษาจริงๆ นั้น



จะไม่อาจศึกษาได้โดยตรงจากแผนภาพ เนื่องจากในทางปฏิบัติการเย็นตัวของเหล็กหล่อที่จะให้เป็นตามแผนภาพเป็นไปได้ยาก เพราะเหล็กจะต้องเย็นตัวช้ามาก ถึงแม้ว่าเหล็กจะถูกปล่อยให้เย็นตัวในแบบทราย อัตราการเย็นตัวก็ยังช้ากว่าอัตราการเย็นตัวในสภาวะสมดุล (Equilibrium Cooling Rate) และอีกประการหนึ่งในเหล็กหล่อสีเทามีธาตุอื่น ๆ นอกเหนือจากคาร์บอนผสมอยู่ซึ่งมีสมบัติของเหล็กหล่ออยู่มาก การศึกษาสมบัติของเหล็กหล่อจึงต้องกระทำในลักษณะที่เน้นหนักไปทางด้านปฏิบัติมากกว่าทางด้านทฤษฎี

### แผนภูมิสมดุลงเหล็กคาร์ไบต์ (Iron-Iron Carbide Diagram)

ในการทำกรรมวิธีทางความร้อนนั้น เราจำเป็นต้องศึกษาแผนภูมิสมดุลงเหล็กกับเหล็กคาร์ไบต์ โดยจะต้องศึกษาโครงสร้างจุลภาคต่าง ๆ ที่มีอยู่ในแผนภูมิสมดุลง ซึ่งโครงสร้างต่าง ๆ นั้น มีรายละเอียดดังนี้

1. เหล็กเดลตา (Delta Iron) จากรูปที่ 2.1 พบโครงสร้างของเหล็กเดลตา (δ) เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 1400 – 1539 องศาเซลเซียส เหล็กเดลตาดังกล่าวนี้จะอยู่ในพื้นที่สามเหลี่ยม 3 รูป ซึ่งอยู่ด้านบนซ้ายมือของแผนภูมิสมดุลง โดยจะมีปริมาณคาร์บอนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.50 โดยจะอยู่รวมกับเหล็กหลอมเหลว ส่วนเหล็กเดลตาที่มีคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.18 นั้น จะอยู่รวมกับโครงสร้างออสเทนไนต์ และสุดท้ายเป็นเหล็กเดลตาที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.10 ในพื้นที่นี้จะมีเหล็กเดลตาอยู่เพียงโครงสร้างเดียวเท่านั้น

เหล็กเดลตานั้นจะมีระบบผลึกเป็นแบบ BCC และมีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก นอกจากนั้นเมื่อปล่อยให้อุณหภูมิต่ำลง เหล็กเดลตาที่มีระบบผลึกแบบ BCC นั้น ก็จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC

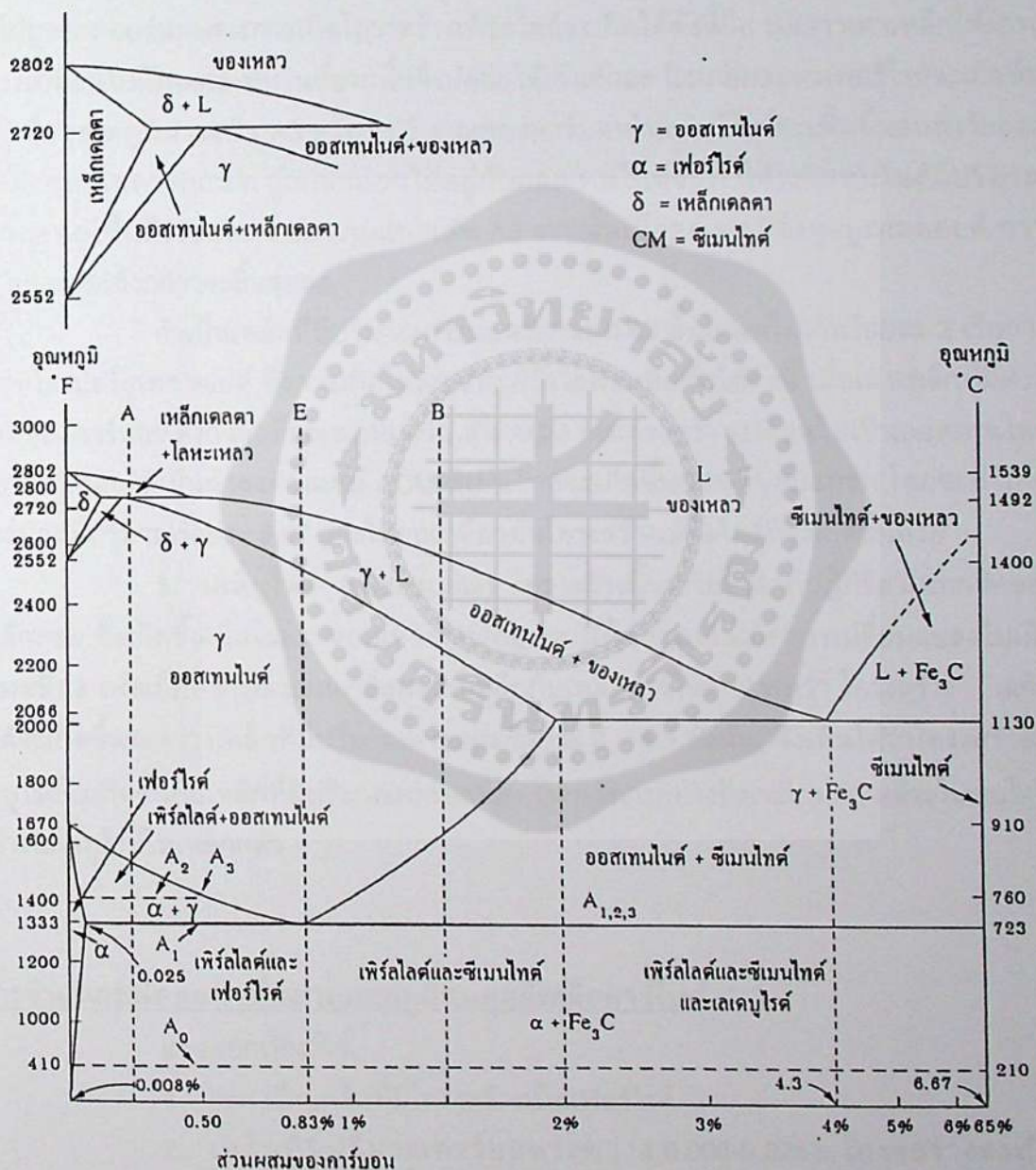
2. ออสเทนไนต์ (Austenite) หรือเหล็กแกมมา (γ) โครงสร้างนี้เกิดขึ้นจากการละลายของคาร์บอนในเหล็กแกมมา โดยที่ปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มสูงสุดประมาณร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิ 1130 องศาเซลเซียส ออสเทนไนต์นั้นโดยทั่วไปจะไม่พบว่าเกิดที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าเป็นเหล็กเครื่องมือ (Tool Steel) จะพบออสเทนไนต์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องเสมอ

3. เฟอไรต์ (Ferrite) หรือเหล็กแอลฟา (α) โครงสร้างเฟอไรต์นี้จะมีระบบผลึกเป็นแบบ BCC โครงสร้างนี้จะประกอบด้วยเหล็กที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ คือจะมีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.025 ดังนั้น โครงสร้างนี้จึงไม่แข็ง แต่จะอ่อน และตีขึ้นรูปได้โดยง่าย แต่ถ้ามีโลหะผสมชนิดอื่น ๆ ผสมอยู่ เช่น โครเมียม และวาเนเดียม เป็นต้น โลหะผสมดังกล่าวจะสามารถละลายเข้าไปในเฟอไรต์ได้ ฉะนั้นในการพิจารณาโครงสร้างของเฟอไรต์ของเหล็กชนิดนี้ จะพบว่า มีโครเมียม และวาเนเดียมรวมอยู่ด้วย

อนึ่ง เหล็กเดลตาที่ได้กล่าวแล้วนั้นก็คือ เฟอไรต์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเป็นเฟอไรต์ที่ไม่เสถียร ถือเป็นเฟอไรต์ที่สามารถแตกตัวให้โครงสร้างอื่น ๆ เมื่ออุณหภูมิลด



ด้านล่าง ซีเมนต์ไต์ (Cementite) หรือเหล็กคาร์ไบด์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) เป็นโครงสร้างที่แข็ง และเปราะ โครงสร้างซีเมนต์ไต์นี้ไม่ปรากฏเป็นโครงสร้างเดี่ยว แต่จะแทรกตัวอยู่กับโครงสร้างอื่นๆ เช่น ซีเมนต์ไต์กับเฟอร์ไรต์ ซีเมนต์ไต์กับเพิร์ลไลต์ และซีเมนต์ไต์กับเลเดบไรต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิสมดุลเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ (Iron-Iron Carbide Diagram)



4. เพิร์ลไลต์ (Pearlite) โครงสร้างเพิร์ลไลต์นี้มีความหมายว่าไข่มุก ทั้งนี้ก็เพราะว่าเพิร์ลไลต์เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง จะพบว่าโครงสร้างเป็นผิวมันคล้ายผิวของไข่มุก สำหรับโครงสร้างเพิร์ลไลต์นี้เกิดจากปฏิกิริยาอุทกตอยด์ที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 723 องศาเซลเซียส และมีส่วนผสมของคาร์บอนร้อยละ 0.83 โครงสร้างเพิร์ลไลต์นี้เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์กับซีเมนไทต์

ในบางกรณีเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 0.83 ซึ่งเรียกว่า เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ลักษณะการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์จะเกิดได้ดังนี้คือ เมื่อเราเผาเหล็กให้โครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวลง นิวเคลียสของเฟอร์ไรต์จะเกิดขึ้นและเมื่ออุณหภูมิผ่านเส้น A3 ลงมา ปริมาณของคาร์บอนในเฟอร์ไรต์จะเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 0.025 จากนั้นคาร์บอนจะถูกผลักออกไปอยู่กับออสเทนไนต์จนทำให้ออสเทนไนต์มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นถึงร้อยละ 0.83 ตามแนวเส้น A3 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิถึงจุดยูเทคตอยด์ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะสิ้นสุดลง

ถ้าเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.83 ขึ้นไปแต่ไม่เกินร้อยละ 2 เรียกว่าเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ซึ่งการเกิดโครงสร้างเพิร์ลไลต์จะเกิดขึ้นได้ดังนี้ เมื่อเผาเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนดังกล่าวที่อุณหภูมิเหนือเส้น ACM จนโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงผ่านเส้น ACM ซีเมนไทต์จะเกิดขึ้นก่อนที่จะขอบแกรน โดยจะปรับให้คาร์บอนมีปริมาณร้อยละ 6.67 และในขณะเดียวกันโครงสร้างเพิร์ลไลต์ก็จะเกิดขึ้นด้วย

5. เลเดบูไรต์ (Ledeburite) โครงสร้างนี้จะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอุทกตอยด์ของเหล็กหล่อ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อโลหะหลอมเหลวถูกลดอุณหภูมิให้ต่ำลงจนเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นของแข็ง 2 เฟสเมื่อพิจารณาแผนภูมิสมดุลเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ จะพบว่า โครงสร้าง เลเดบูไรต์จะเกิดขึ้นระหว่างเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 2 - 4.3 ดังนั้น จึงเห็นได้ว่าโครงสร้างเลเดบูไรต์จะเกิดขึ้นกับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กหล่อ แต่จะไม่พบโครงสร้างเลเดบูไรต์ในเหล็กกล้า

#### การจำแนกชนิดของเหล็กตามแผนภูมิสมดุลเหล็กคาร์ไบด์

แบ่งออกเป็นดังนี้

1. Iron เป็นเหล็กที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์
2. เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.008-0.025% โครงสร้างจะเป็นเฟอร์ไรต์ + ซีเมนไทต์
3. เหล็กกล้า Hypo-Eutectoid โครงสร้างจะเป็นเฟอร์ไรต์ + เพิร์ลไลต์
4. เหล็กกล้า Eutectoid โครงสร้างจะเป็นเพิร์ลไลต์ (เพิร์ลไลต์ + ซีเมนไทต์)
5. เหล็กหล่อ Hypo-Eutectoid โครงสร้างจะเป็นเพิร์ลไลต์ + เหล็กเลเดบูไรต์

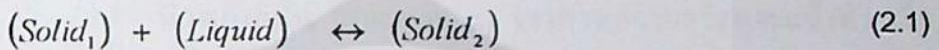


(ชนิดเปลี่ยนรูป)

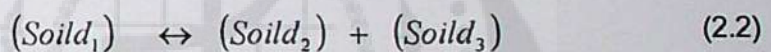
6. เหล็กหล่อยูเทคติก โครงสร้างจะเป็นเดลิบูไรต์ (ออสเทนไนต์ + ซีเมนไทต์)
7. เหล็กหล่อ Hypo-Eutectoid โครงสร้างสุดท้ายจะประกอบไปด้วยเดลิบูไรต์ + ไพรมารีซีเมนไทต์

### ปฏิกิริยาในแผนภูมิสมดุลงเหล็กคาร์ไบด์

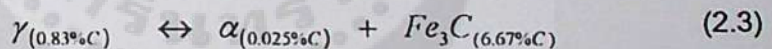
1. ปฏิกิริยาเพอริเทคติก (Peritectic Reacyion) เกิดที่ Delta Iron 0.18%C และของเหลว (Liquid) เท่ากับ 0.50%C ที่อุณหภูมิประมาณ 1500 °C ดังสมการ



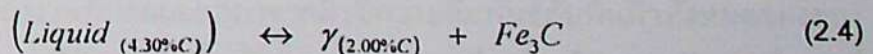
2. ปฏิกิริยายูเทคทอย (Eutectoid Reacyion) เกิดที่ Steeis 0.83%C จะเป็นปฏิกิริยาหมุนกลับของความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็งและของเหลว



ในแผนภูมิสมดุลงของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น คือ ออสเทนไนต์เท่ากับ 0.83%C เฟอไรต์เท่ากับ 0.025%C และซีเมนไทต์เท่ากับ 6.67%C ที่อุณหภูมิ 723 °C



3. ปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reacyion) เกิดที่ Cast Iron 4.30%C จะเป็นปฏิกิริยาหมุนกลับในแผนภูมิสมดุลงของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะได้ ออสเทนไนต์เท่ากับ 2.00%C ของเหลวเท่ากับ 4.30%C และซีเมนไทต์ ( $Fe_3C$ ) เท่ากับ 6.67%C ที่อุณหภูมิ 1130 °C ดังสมการ



### หลักการแข็งตัว (Principles of Solidification)

ในบรรดาโลหะและโลหะผสมมักมีสมบัติที่คล้ายกับ สารกึ่งตัวนำ วัสดุประกอบ (Composites) เซรามิกซ์ (Ceramics) และโพลิเมอร์ (Polymers) จะเริ่มจากการเป็นของเหลว เมื่อของเหลวที่มีความหนาแน่น เกิดการเย็นตัวภายในอุณหภูมิที่ของเหลวเริ่มแข็งตัวแล้ว

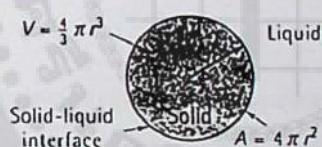


วัสดุนั้นจะอยู่ในสภาวะที่เป็นของแข็ง โดยต้องผ่านกระบวนการทางกล หรือกระทำทางความร้อน (Heat Treatment) แม้ว่าช่วงเวลาการแข็งตัวของผลิตภัณฑ์เป็นผลมาจากสมบัติทางกล และมีผลกระทบกับชนิดของกระบวนการผลิตต่างๆ โดยปกติจะเกี่ยวข้องกับขนาดของเกรน และรูปแบบการเรียงตัวของอะตอมซึ่งจะถูกควบคุมโดยการแข็งตัวของวัสดุนั้นมากกว่า

### 1. การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์

ช่วงเวลาการแข็งตัว การเรียงตัวของอะตอมจะเปลี่ยนไปในทางที่ดีที่สุด คือ จากพันธะสั้น ๆ ไปเป็นพันธะที่ยาวขึ้น หรือเป็นโครงสร้างแบบผลึก การแข็งตัวมี 2 ขั้นตอน คือ นิวคลีเอชัน (Nucleation) และการเติบโต (Growth) นิวคลีเอชันเกิดขึ้นเมื่อมีของแข็งชิ้นเล็กๆ เกิดขึ้นในของเหลว การเติบโตของของแข็งเกิดขึ้นเมื่อ อะตอมจากของเหลวมีการเปลี่ยนเป็นของแข็งจนกระทั่งไม่มีของเหลวเหลืออยู่

1.1 นิวคลีเอชัน (Nucleation) เราคาดหวังว่าวัสดุจะแข็งตัว เมื่อของเหลวเย็นตัวภายใต้อุณหภูมิที่ของเหลวเริ่มแข็งตัว (หรือการละลาย) เพราะว่าพลังงานที่ใช้ในการรวมตัวของโครงร่างผลึกของของแข็ง มีน้อยกว่าของของเหลว พลังงานที่แตกต่างกันระหว่างของเหลว และของแข็ง คือ ปริมาตรพลังงานที่ปล่อยออกมาเป็นพลังงานอิสระ (Free Energy)  $\Delta G$  เมื่อของแข็งเพิ่มขนาดมากขึ้น



**รูปที่ 2.2** แสดงพื้นที่ผิวที่เพิ่มเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากของเหลวเป็นของแข็ง

เมื่อมีการเรียงตัวเป็นแบบของของแข็ง แล้วอย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นระหว่างของแข็งในของเหลวที่มีปริมาตรมากกว่า (ดังรูปที่ 2.2) พลังงานผิวอิสระ (Surface Free Energy)  $\sigma$  คือพลังงานที่ปล่อยออกมาจากผิวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวทั้งหมดของของแข็งขนาดใหญ่ โดยพลังงานที่ผิวจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานรวมที่เปลี่ยนไป  $\Delta G$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือ

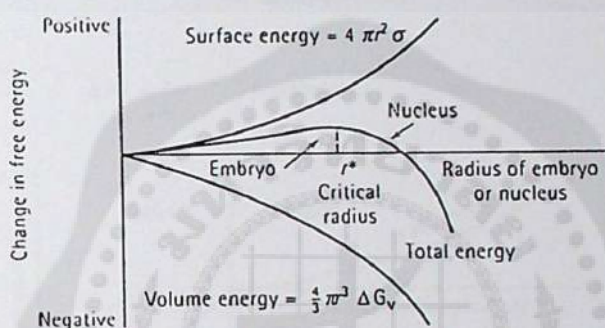
$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + \pi r^2 \sigma \quad (2.5)$$

ซึ่ง  $(4/3)\pi r^3$  คือ ปริมาตรของทรงกลมที่กำลังก่อตัว ที่รัศมีเท่ากับ  $r$ ,  $(4/3)\pi r^2$



คือ พื้นที่ผิวของทรงกลมที่กำลังก่อตัว,  $\sigma$  คือ พลังงานที่ปล่อยออกมาที่พื้นผิวทรงกลม และ  $\Delta G_v$  คือ ปริมาตรพลังงานที่ปล่อยออกมาค่าที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปในทางตรงกันข้าม

เมื่อของแข็งมีขนาดเล็กมาก ๆ (มีรัศมีน้อยกว่ารัศมีวิกฤต  $r^*$  ในรูปที่ 2.3) จากนั้นจะมีการเพิ่มขนาดขึ้นของเฟสของแข็งสาเหตุจากปริมาณพลังงานที่ปล่อยออกมาจะเพิ่มขึ้นขนาดของของแข็งจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากนั้นพลังงานที่ปล่อยออกมาจะลดลงดังนั้น โลหะที่มีส่วนประกอบหลักเป็นของแข็งเล็กนี้ เรียกว่า เอ็มบริโอ (Embryo) เพราะว่า ของเหลวอยู่ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดแข็งตัวของของเหลว Undercooling  $\Delta T$  คือ อุณหภูมิซึ่งวัสดุแข็งตัวลงต่ำกว่า อุณหภูมิสมดุลของจุดเย็นตัวก่อนเกิดนิวเคลียส (Nucleation)



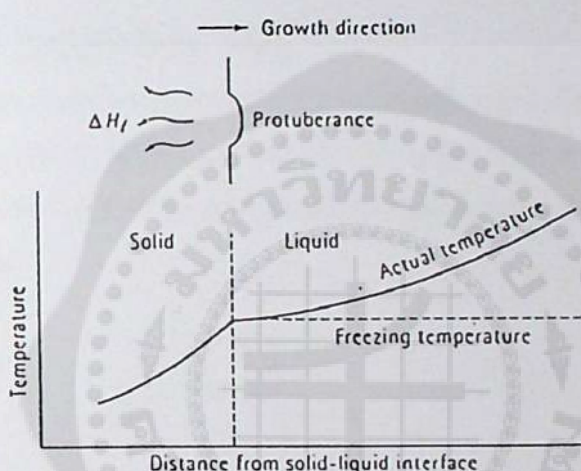
**รูปที่ 2.3** แสดงพลังงานที่ปล่อยออกมาของของแข็ง-เหลวในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของของแข็งที่เริ่มก่อตัวที่รัศมีวิกฤต และเป็นนิวเคลียสที่มีรัศมีวิกฤต

แต่เมื่อของแข็งมีขนาดใหญ่กว่า  $r^*$  การเพิ่มขนาดจะดำเนินต่อไป เพราะว่าพลังงานรวมลดลง ของแข็งในช่วงนี้จะอยู่ในสภาวะเสถียร นิวเคลียสจะเกิดขึ้น และจากนั้นของแข็งขนาดเล็กจะเพิ่มขนาดขึ้นถึงช่วงนี้เรียกว่าช่วง นิวเคลียสเริ่มจาก

**1.2 การเติบโต (Growth)** ของแข็งมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เกิดขึ้นโดยอะตอมที่ติดกับผิวของของแข็งโดยธรรมชาติของการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของโลหะขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ของความร้อนจากระบบ โดยการเคลื่อนที่ของความร้อนจะมี 2 ชนิด ความร้อนจำเพาะของของเหลว และความร้อนแฝงของการละลาย ความร้อนจำเพาะ คือ ความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิของหน่วยน้ำหนักของวัสดุ โดย 1 องศา ความร้อนจำเพาะจะต้องมีการเคลื่อนที่ก่อนโดยเคลื่อนที่ไปสู่บรรยากาศโดยรอบ หรือเข้าไปในบรรยากาศรอบ ๆ จนกระทั่งของเหลวแข็งตัวที่อุณหภูมิจุดแข็งตัว ความร้อนแฝงจำเพาะของการละลายจะต้องเคลื่อนที่จากของแข็ง-ของเหลวที่ผิวหน้า ก่อนอื่นการแข็งตัวของของเหลวที่สมบูรณ์เราใช้ความร้อนแฝงของการละลาย อธิบายการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของของแข็งในทางกล และโครงสร้างสุด



ท้ายในการโก่งตัวของผิวที่เป็นของแข็ง-ของเหลวในระหว่างการแข็งตัว (Planer Growth) เมื่อของเหลวมีการแข็งตัวได้ดีภายใต้สภาวะที่ประกอบด้วย อุณหภูมิของของเหลวที่เพิ่มขึ้นมากกว่าจุดแข็งตัว และอุณหภูมิของของแข็งที่ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดแข็งตัวในระหว่างการแข็งตัว ค่าความร้อนแฝงของการละลายจะเคลื่อนที่ โดยเคลื่อนไปตามผิวของของแข็ง-ของเหลวไปยังสิ่งแวดล้อม จากขนาดเล็กจะโป่งออกเป็นอุณหภูมิจุดแข็งตัว (รูปที่ 2.4) การเย็นตัวอย่างรวดเร็วที่โป่งออก และจากนั้นจะหยุดจนกว่าพื้นผิวหลักจะหมดไป เป็นการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทางกลเราได้ทราบแล้วว่า (Planer Growth) เกิดขึ้น โดยมีการเคลื่อนที่ของของแข็งของเหลวเข้าในของเหลวอย่างราบรื่นที่ผิว



**รูปที่ 2.4** แสดงอุณหภูมิเมื่อของเหลวอยู่ในช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว การโป่งพองออกของของเหลวที่ผิวจะไม่มีการเติบโต การคืบหน้าไปแนวรอบเกิดจากความร้อนแฝงเคลื่อนไปตามผิวของแข็ง

## 2. การแข็งตัวของโลหะผสม

การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์ที่กล่าวมาแล้วนั้น จะเห็นว่าสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย แต่สำหรับโลหะผสมนั้นจะมีการแข็งตัวที่ซับซ้อน และแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ก็เพราะว่ามีการรวมตัวกันของโลหะ 2 ชนิด ซึ่งการรวมตัวกันนี้จะทำให้เกิดผลึกต่าง ๆ มากมาย โดยมีรายละเอียดดังนี้

หลังจากที่โลหะผสมที่เกิดจากการรวมกันของธาตุมากกว่า 1 ชนิดถูกเทลงสู่แบบหล่อโลหะ ผลึกของโลหะผสมที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากผลึกของโลหะบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่นโลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุ A และธาตุ B เกิดการแข็งตัว ผลึกที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นผลึกของธาตุ A และธาตุ B แยกกันอยู่ แต่จะเป็นผลึกที่ประกอบไปด้วยธาตุ A และธาตุ B รวมกันอยู่ในลักษณะที่ธาตุ A ถูกละลายเข้าไปในธาตุ B หรือธาตุ B ถูกละลายในธาตุ A และการรวมกันทั้ง



สองลักษณะนั้นเรียกว่า สารละลายของแข็ง (Solid Solution) แต่ในบางครั้งอาจเกิดการรวมกันของธาตุ A และธาตุ B ซึ่งธาตุทั้งสองมีปริมาณใกล้เคียงกัน การรวมกันในลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า สารประกอบของโลหะ (Intermetallic Compound) นอกจากสารละลายของแข็ง และ สารประกอบโลหะทั้ง 2 แล้ว ยังมีบางกรณีที่เราจะพบได้ไม่บ่อยนัก คือ กรณีที่ธาตุ A และธาตุ B หรือทั้ง A และ B จะปรากฏในสภาพผลึกบริสุทธิ์โดยไม่รวมตัวกัน

ดังนั้น จึงอาจจะสรุปได้ว่า โครงสร้างของโลหะผสมนั้นเกิดจากปฏิกิริยา 3 ลักษณะดังนี้คือ สารละลายของแข็ง สารประกอบโลหะ และโลหะบริสุทธิ์

### เวลาของการแข็งตัว (Solidification Time)

อัตราการแข็งตัวของของแข็งเกิดขึ้นได้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว หรืออัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน ความเร็วของการแข็งตัวของผลิตภัณฑ์ หรือช่วงเวลาสั้น ๆ ในการแข็งตัว เวลา  $t_s$  หมายถึง เวลาสำหรับเหล็กหล่อที่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์ คำนวณได้จากการใช้กฎของ Chvorinov's Rule

$$t_s = K \left( \frac{V}{A} \right)^2 \quad (2.6)$$

V คือ ปริมาตรของเหล็กหล่อที่มีความร้อนเคลื่อนที่ก่อนเกิดการแข็งตัวขึ้น

A คือ พื้นที่ผิวของเหล็กหล่อที่เชื่อมต่อกับผิวของส่วนที่ยื่นมาจากผิว ซึ่งความร้อนสามารถเคลื่อนตัวออกจากเหล็กหล่อได้นั่นเอง

K คือ ค่าคงที่ของแม่พิมพ์ขึ้นกับสมบัติ และอุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งโลหะ และแม่พิมพ์

### โครงสร้างจากการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ (Structure For Casting)

น้ำโลหะจากเตาหลอมเมื่อถูกเทลงสู่แบบหล่อ การแข็งตัวของน้ำโลหะก็จะเริ่มขึ้น โดยชิ้นงานหล่อนั้นจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งถ่ายไปยังแบบหล่อน้ำโลหะที่ส่วนนั้นจะเย็นตัวลงจนถึงจุดแข็งตัว และเกิดผลึก (Chill Crystals) หรือที่เรียกโดยทั่วไปว่าเกรน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

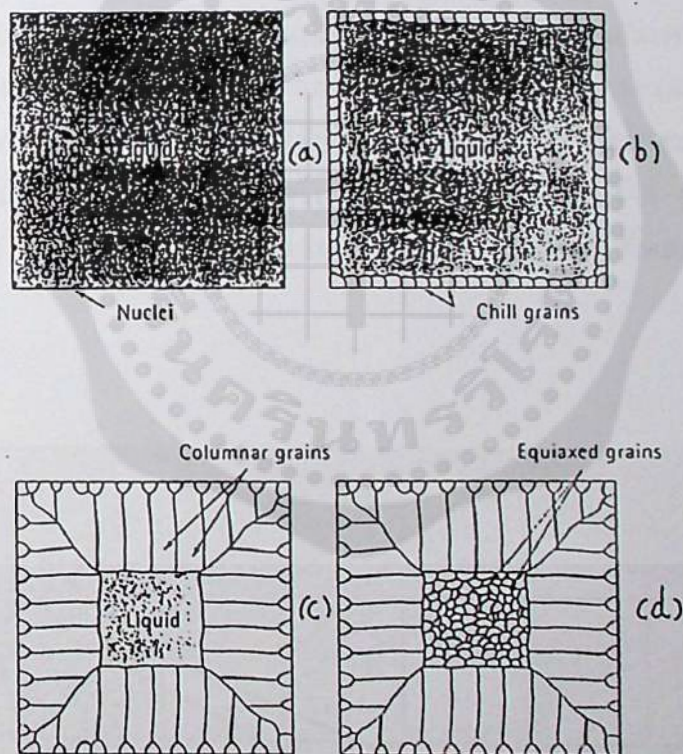
1. เกรนละเอียด (Fine Grain Or Chill Zone) เป็นเกรนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวนอกของแบบหล่อซึ่งเย็นตัวอย่างเร็ว ได้เกรนขนาดเล็ก บริเวณนี้มีความแข็งสูงกว่าบริเวณข้างใน



2. เกรนยาว (Columnar Grain) เป็นบริเวณถัดจากริมผนังเข้ามาเล็กน้อย อุณหภูมิบริเวณนี้สูงกว่าขอบ การถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เกรนเติบโตในลักษณะเป็นแนวยาวเข้าหาจุดศูนย์กลางของแบบหล่อขอบเกรนด้านข้างชนกันจึงเติบโตออกไปในทิศเดียว

3. Equi – Axed Grain เป็นบริเวณกลางๆของแบบหล่อซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายที่น้ำโลหะจะแข็งตัว โลหะมีอุณหภูมิสูง การถ่ายเทความร้อนทำได้ช้า เม็ดเกรนที่ได้หยาบ เกรนเติบโตได้ทุกทิศทาง

นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำโลหะที่นำเทลงในแบบหล่อ ยังมีผลต่อเม็ดเกรนด้วย ถ้าอุณหภูมิเทถูกต้อง เนื้อของโลหะจะเกิดเกรนทั้ง 3 ลักษณะขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป ก็จะทำให้เกิดเฉพาะเกรนละเอียดและเกรนแบบยาวเท่านั้น



รูปที่ 2.5 แสดงพัฒนาการของโครงสร้างมหภาค ในการแข็งตัวระหว่างที่มีการหล่อ

(a) เริ่มมีการแข็งตัวเกิดขึ้น (Nucleation) (b) มีการเกิด Chill Zone

(c) เติบโตเป็น Columnar Zone

(d) ใจกลางเกิดเป็น Equiaxed Zone



### อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อ (Cooling rate)

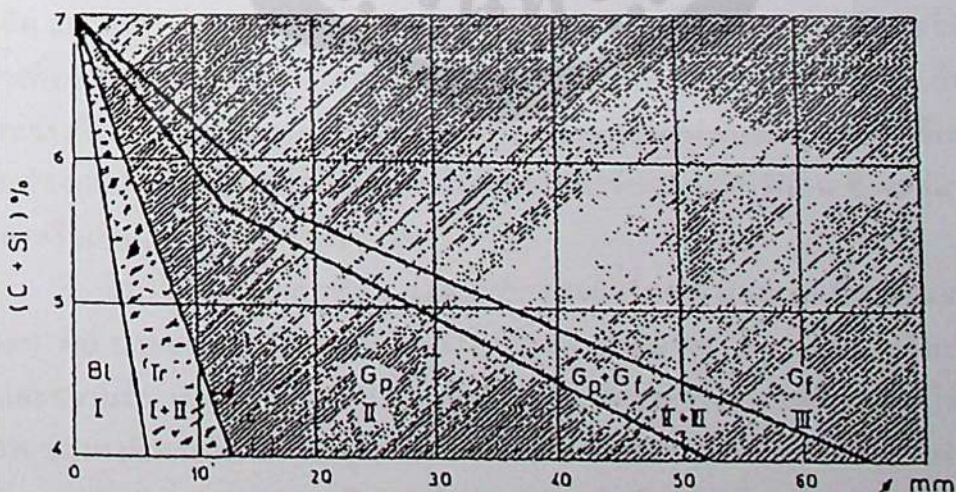
จาก Equilibrium Diagram ของเหล็กกับคาร์บอน การเย็นตัวของเหล็กหล่อจะให้การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิยูเทคติก เป็นออสเทนไนท์กับแกรไฟต์ ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดได้จะต้องใช้เวลานานมาก เพื่อให้อะตอมของคาร์บอนมีเวลาพอที่จะรวมกลุ่มกัน และมีการขยายตัวโดยอิสระ สำหรับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมแน่นอนชนิดหนึ่งนั้นในขณะที่เย็นตัวและให้กำเนิดแกรไฟต์ ยูเทคติกได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ หรือพูดง่าย ๆ อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อในระบบเหล็ก-คาร์บอน ไม่ใช่เหล็ก-ซีเมนต์ไทด์ นั้นขึ้นอยู่กับ

1. อุณหภูมิของเหล็กหล่อตอนเทลงแบบหล่อ (Pouring Temperature)
2. ความร้อนแฝงของเหล็กหล่อ (Latent Heat Of Solidification)
3. สภาพการนำหรือพาความร้อนของตัวแบบหล่อ (Heat Conductivity Of

Mold)

4. ขนาดหรือปริมาณของน้ำเหล็กหล่อที่เทลงแบบ (Size of Casting)

ปัจจัยทั้งสี่ประการดังกล่าวมาแล้วนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเหล็กหล่อ กับความร้อนแฝงของเหล็กหล่อ ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเหล็กหล่อโดยตรง แต่ตัวนำความร้อนของแบบหล่อ และขนาดของเหล็กหล่อเป็นปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงได้กว้างขวางมาก ในการศึกษาเรื่องนี้ได้มีการสร้างแผนภาพกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size Of Casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand Mold) ไว้คือ



**รูปที่ 2.6** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง (Structure) ส่วนผสม (Composition) และขนาดของเหล็กหล่อ (Size Of Casting) ที่หล่อด้วยแบบทราย (Sand Mold)



โดยในแกนตั้ง แทนส่วนผสมโดยบอกเป็นผลรวมระหว่างเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนกับซิลิกอน (C + Si) % แกนนอน แทนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นมิลลิเมตร (mm.) แผนภาพจะแสดงลักษณะของโครงสร้างโดยแบ่งเป็นโซนต่าง ๆ เช่น

โซน I แสดงถึงโครงสร้าง เป็นเหล็กหล่อขาว (Ledeburite + Pearlite)

โซน I + II แสดงถึงโครงสร้าง เป็นเหล็กหล่อ Mottled (Ledeburite + Pearlite + Graphite)

โซน II แสดงถึงโครงสร้าง เป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภท Pearlitic Cast iron

โซน II + III แสดงถึงโครงสร้าง เป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภท Ferritic Pearlitic

โซน III แสดงถึงโครงสร้าง เป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภท Ferritic

จากแผนภาพจะได้ว่า ถ้าเหล็กหล่อมีคาร์บอน 3% และซิลิกอน 2% ซึ่งปกติเหล็กหล่อประเภทนี้จะเป็นเหล็กหล่อสีเทาประเภทเพอร์ลิติก แต่ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กหล่อเล็กกว่า 10 mm. โครงสร้างอาจจะเป็นมอดเติล หรือเหล็กหล่อขาวก็ได้

### โครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทา

เพื่อให้เหล็กหล่อสีเทาที่ผลิตมีคุณภาพสูง จำเป็นจะต้องควบคุมส่วนผสมของเหล็กซึ่งจะเกี่ยวข้องไปถึงโครงสร้างพื้นฐาน และลักษณะของแกรไฟต์ที่เกิด เพื่อความเข้าใจจะขอลำดับถึงลักษณะของโครงสร้างพื้นฐาน และลักษณะของแกรไฟต์ดังนี้

โครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ของเหล็กหล่อสีเทามีสามประเภทคือ เฟอไรติก, เพอร์ลิติก และเฟอไรโตเพอร์ลิติก โดยหลักทางโลหะวิทยาจะถือว่าโครงสร้างเพอร์ลิติกเป็นโครงสร้างที่ให้คุณสมบัติทนแรงดึงได้สูงที่สุด ส่วนเฟอไรโตเพอร์ลิติก และเฟอไรติก ก็จะทำให้คุณสมบัติทนแรงดึงลดหลั่นลงไปตามปริมาณของเพอร์ไลต์เพราะฉะนั้นถ้าจะให้เหล็กหล่อคุณภาพดีจะต้องควบคุมส่วนผสมโดยเฉพาะปริมาณของคาร์บอนและซิลิกอน ซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนาหรือเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน

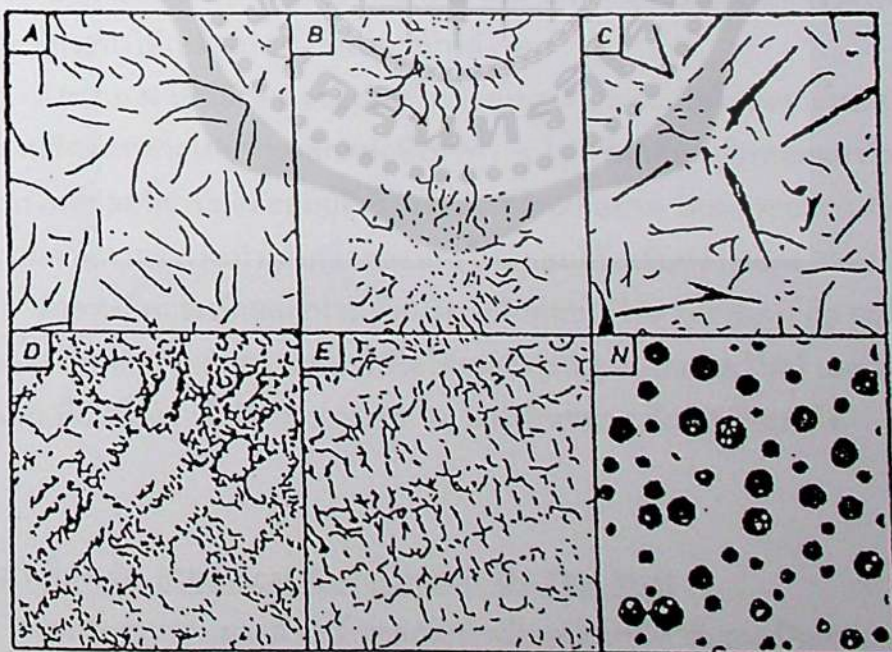
แกรไฟต์เป็นผลึกที่นุ่ม และเปราะของคาร์บอน มีความแข็งบริเนล (Brinell Hardness) HB ประมาณ 1 มีความแข็งแรงในทางดึงประมาณ  $2 \text{ kg/mm}^2$  หรือประมาณ 20 Pa และความหนาแน่นประมาณ  $2.2 \text{ kg/cm}^3$  สำหรับโครงสร้างของเหล็กหล่อที่ใช้กันส่วนมาก 85% ของคาร์บอนทั้งหมดจะอยู่ในสภาพแกรไฟต์ โครงสร้างละเอียดของแกรไฟต์ยังแยกออกได้ตามรูปร่าง และขนาด เช่น เล็กหรือใหญ่ เกล็ดหรือมีแฉกอยู่โดยรอบ (Asteroidal) เป็นก้อน ๆ หรือกลม (Spheroidal) สภาพของชิ้นแกรไฟต์มีผลเป็นอย่างมากต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ ตัวอย่างเช่นเหล็กหล่อเทาซึ่งมีคาร์บอนอยู่ 3.6% และมีซิลิกอนอยู่ 2.1% มีแกรไฟต์ในรูปเกล็ดมีความแข็งแรงทางดึง  $18 \text{ kg/mm}^2$  หรือประมาณ 180 Pa เทียบกับเหล็กหล่อ



แกรไฟต์กลมที่มีปริมาณคาร์บอนและซิลิกอนเท่ากัน แต่มีแกรไฟต์เป็นรูปกลม ปรากฏว่าเหล็กหล่อชนิดหลังนี้มีความแข็งแรงทางดึงถึง  $55 - 70 \text{ kg/mm}^2$  หรือประมาณ  $550 - 700 \text{ Pa}$  ความแตกต่างนี้เนื่องมาจากรูปร่างของชั้นแกรไฟต์ต่างกัน แกรไฟต์ในรูปเกล็ดทำให้เกิดการเพิ่มความเค้น (Stress Concentration) ที่ตรงปลายแหลมของเกล็ดถ้ามีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของเกล็ด สำหรับแกรไฟต์รูปกลมนั้นจะมีการเพิ่มความเค้นน้อยกว่ามาก

ลักษณะของแกรไฟต์ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 6 ชนิด ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.7

ประเภท A เป็นลักษณะของแกรไฟต์เฟลกขนาดเล็ก และกระจายอย่างสม่ำเสมอ มีลักษณะเป็นยูเทคติกแกรไฟต์ จากภาพจะเห็นแกรไฟต์เป็นเส้น แต่ความจริงแล้วจะเป็นแผ่นมีลักษณะโค้งไปมา ทั้งนี้เป็นเพราะในขณะที่เกิดเมื่อเริ่มครั้งแรกเป็นนิวเคลียสจะลอยอยู่ในเหล็กหลอมเหลว การขยายตัวในตอนแรกจะอิสระ และจะมีทิศทางไปตามแกน C ตามระบบผลึก Hexagonal ซึ่งเป็นทิศทางที่เหมาะสมในการขยายตัว (Preferential Direction) พอขยายตัวได้ระยะหนึ่งจะเข้าไปใกล้ผลึกของแกรไฟต์อันอื่น ๆ ที่เกิดพร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดการแย่งอะตอมของคาร์บอนซึ่งกันและกัน เมื่อเป็นเช่นนี้แกรไฟต์แต่ละตัวจะพยายามเปลี่ยนทิศทางไปยังบริเวณที่ยังมีอะตอมคาร์บอนมากกว่า เพื่อการขยายตัวทำให้แผ่นของแกรไฟต์เกิดลักษณะโค้ง โอกาสที่แกรไฟต์จะชนกันดูจะยาก



รูปที่ 2.7 แสดงชนิดของแกรไฟต์



ประเภท B เป็นลักษณะของแกรไฟต์เฟลคขนาดเล็กเช่นเดียวกับประเภท A แต่การเกิดจะอยู่เป็นกลุ่ม ๆ โดยเฟลคแกรไฟต์แต่ละตัวจะพุ่งไปรวมกันตรงกลาง คล้ายกลีบดอกไม้ (Rosette) จัดเป็นยูเทคติกแกรไฟต์เช่นเดียวกัน แต่การกระจายไม่สม่ำเสมอมักจะพบแกรไฟต์ประเภทนี้ตรงบริเวณใจกลางของชิ้นงานหล่อที่บาง หรือเหล็กหล่อที่ทำให้ผิวเย็นเร็ว (Chilled Cast Iron) ซึ่งเป็นลักษณะของเหล็กที่เรียกว่า มอดเติลคือมีทั้งโครงสร้างที่เป็นเหล็กหล่อสีเทา และเหล็กหล่อสีขาว

ประเภท C เป็นลักษณะของแกรไฟต์ที่มีทั้งขนาดใหญ่ (Primary Or Kish Graphite) และขนาดเล็ก (Eutectic) เกิดสลับกันเป็นลักษณะของแกรไฟต์ที่เกิดในเหล็กหล่อที่มีคาร์บอน และซิลิกอนสูง คือค่า Carbon Equivalent เกินกว่า 4.3% คือเป็นเหล็กส่วนผสมไฮเปอร์ยูเทคติก อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่ออยู่ในเกณฑ์ช้าลักษณะเช่นนี้จะทำให้เหล็กมีความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่เหล็กจะอ่อนนุ่ม กลึงไสได้ง่าย

ประเภท D และ ประเภท E พบลักษณะของแกรไฟต์ลักษณะนี้ในเหล็กที่มีอัตราการเย็นตัวสูง และเกิดกับเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมเป็นไฮโปยูเทคติก คือ มีค่า C.E ต่ำ ลักษณะของแกรไฟต์จะเป็นเกล็ดเล็ก ๆ แบบเดียวกับแกรไฟต์ยูเทคติก แต่การเกิดจะอยู่ตามขอบเกรน ลักษณะที่ต่างกันของแกรไฟต์ประเภท D และ E ก็คือ ถ้าเป็นประเภท D จะเกิดในลักษณะที่ไม่มีทิศทาง (Random) แต่ประเภท E จะเกิดลักษณะมีทิศทาง (Orientation) แต่ทั้งสองประเภทจะเกิดตามขอบของเกรน (Inrerdendritic) ถ้าปล่อยให้เหล็กเย็นช้าลงจะไม่เกิดแกรไฟต์ลักษณะนี้ ลักษณะของแกรไฟต์ประเภท D และ E เป็นลักษณะที่ไม่ควรจะให้เกิดในเหล็กหล่อเพราะมักจะทำให้เหล็กเปราะ และแตกหักได้ง่าย

ประเภท N เป็นลักษณะของแกรไฟต์อยู่ในรูปกลม จะเกิดได้เฉพาะในเหล็กหล่อที่มีกรรมวิธีการผลิตแตกต่างไปจากเหล็กหล่อสีเทาทั่ว ๆ ไป ซึ่งก็คือเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ลักษณะของแกรไฟต์กลมนี้จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อบ้าง โดยเฉพาะทางด้านความเหนียว และความต้านทานแรงดึงทำให้เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมมีชื่อเรียกว่า Semi Steel

ข้อสรุปที่พอจะเป็นแนวทางเพื่อผลิตเหล็กหล่อให้ได้คุณภาพสูงก็คือ จะต้องควบคุมส่วนผสมของเหล็กหล่อร่วมกับความหนาให้ได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นเพอร์ไลต์ และจะต้องทำการอินนอคคูลเลทเพื่อให้ได้แกรไฟต์เป็นประเภท A และเป็นขนาดเล็กเท่าที่จะทำได้

### ส่วนผสมของเหล็กหล่อ (Chemical Composition Of The Iron)

จากที่เราทราบมาแล้วเหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมทั่ว ๆ ไป จะมีคาร์บอนระหว่าง 2.5 ถึง 4% ซึ่งคาร์บอนนี้จะตกผลึกเกิดเป็นแกรไฟต์แทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก ขณะที่เหล็กหล่อเย็นตัวลงจากสภาพหลอมเหลวจนแข็งตัว นอกจากธาตุคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่น ๆ เช่น ซิลิกอน, ฟอสฟอรัส และอื่น ๆ ซึ่งธาตุต่าง ๆ นี้มีบทบาทสำคัญมากเกี่ยวกับ



สมบัติของเหล็กหล่อเราแบ่งธาตุต่าง ๆ นอกเหนือไปจากการบ่อนออกเป็น 2 ชนิด คือ

**ประเภทช่วยให้เกิดแกรไฟต์ (Graphite-Forming Elements)** ได้แก่ ซิลิกอน, ฟอสฟอรัส, อลูมิเนียม, นิเกิล, ทองแดง และอื่น ๆ ธาตุที่มีอิทธิพลในการช่วยให้เกิดแกรไฟต์มากที่สุดก็คือ ซิลิกอนถัดไปก็เป็นฟอสฟอรัส และอลูมิเนียมตามลำดับ เหตุผลที่จะพอสรุปถึงอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ได้มีดังนี้ ปกติธาตุคาร์บอนกับเหล็กสามารถรวมกันให้ซีเมนไทต์ได้ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) แต่ถ้ามีซิลิกอนอยู่ด้วยแล้ว จะปรากฏว่าธาตุซิลิกอนมีความดึงดูด (Affinity) ระหว่างเหล็กสูงกว่าคาร์บอน ดังนั้นซิลิกอนจะรวมกับเหล็กก่อน และให้สารประกอบในขณะที่เหล็กยังอยู่ที่อุณหภูมิสูง หรืออยู่ในสภาพหลอมเหลว ดังนั้นธาตุคาร์บอนจึงหมดโอกาสที่จะรวมกับเหล็กเกิด ซีเมนไทต์ เมื่อเป็นเช่นนี้จะยอมของธาตุคาร์บอนจึงจับรวมกันเข้าเป็นกลุ่มเป็นก้อนรวมกันเป็นแกรไฟต์ ซึ่งรูปแบบของแกรไฟต์ปกติจะเกิดเป็นแผ่นบาง ๆ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปบ้างขึ้นอยู่กับปัจจัยในการหล่อ

**ประเภทรวมตัวกับคาร์บอน (Carbide-Forming Elements)** ได้แก่ ธาตุแมงกานีส, โครเมียม, ทังสเตน, วาเนเดียม, โมลิบดีนัม และอื่น ๆ ธาตุเหล่านี้จะไม่รวมกับเหล็กเพื่อให้คาร์บอนแยกตัวไปรวมกันเกิดแกรไฟต์ แต่ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ และเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพเมื่อเป็นเช่นนี้ ถ้าในเหล็กหล่อมีธาตุเหล่านี้อยู่ เหล็กหล่อจะมีโอกาสเป็นเหล็กหล่อสีเทาได้ยาก โดยทั่วไปในเหล็กหล่อสีเทามักจะผสมแมงกานีสลงไประหว่าง 0.5% ถึง 0.8% ด้วยเหตุผลที่จะให้แมงกานีสไปดึงเอากำมะถันออกจากเหล็ก เพราะในเหล็กหล่อถ้ามีกำมะถันมาก กำมะถันจะไปรวมกับเหล็กกลายเป็นเหล็กซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) ซึ่งจะทำให้เหล็กเสียสมบัติที่ดีไป กล่าวคือกำมะถันทำให้เหล็กเปราะที่อุณหภูมิสูง แมงกานีสนอกจากช่วยดึงกำมะถันแล้วแมงกานีสยังช่วยให้เกิดเฟอร์ไรต์ที่ละเอียด

### บทบาทของธาตุผสมในเหล็กหล่อสีเทา

1. **แมงกานีส (Manganese)** จัดเป็นธาตุที่มีบทบาททางด้านเพิ่มเสถียรภาพให้กับออสเทนไนท์ และเป็นธาตุรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ แมงกานีสเป็นธาตุที่ใช้สำหรับลดกำมะถันในเหล็กหล่อ โดยจะใช้ประมาณ 1.7 เท่าของกำมะถัน และบวกอีก 0.3% ซึ่งเมื่อรวมกับกำมะถันแล้ว จะได้แมงกานีสซัลไฟด์ และจะลอยขึ้นสู่ผิวรวมตัวกับแอสลัก เพราะแมงกานีสซัลไฟด์ มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเหล็กหลอมเหลวในกรณีผสมแมงกานีสมากเกินปริมาณที่จะไปดึงกำมะถัน แมงกานีสมีบทบาทช่วยให้เกิดเฟอร์ไรต์และเพิ่มความแข็ง เพราะแมงกานีสมีแนวโน้มทำให้เกิดคาร์ไบด์ (Free Carbide) ทำให้เหล็กเปราะแตกง่าย

2. **ฟอสฟอรัส (Phosphorus)** จัดเป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กหล่อทั่ว ๆ ไป ธาตุหนึ่ง (Common Element) ซึ่งไม่จัดเป็นธาตุผสม ความจริงฟอสฟอรัสเป็นธาตุอยู่ในกลุ่มช่วยให้เกิดแกรไฟต์แล้วจะทำให้เกิด Ternary Eutectic ระหว่างออสเทนไนท์  $\text{Fe}_3\text{C}$  และ  $\text{Fe}_3\text{P}$



ซึ่งจะเกิดอยู่ตามขอบแกรน เมื่อเหล็กเย็นตัวทำให้เหล็กมีความแข็งและเปราะ มีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำ จะใช้ประโยชน์ได้ในขอบเขตจำกัด เช่น ใช้ทำเบรค (Brake shoes) ของรถไฟ

ฟอสฟอรัส เป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล (Fluidity) ให้กับเหล็กหล่อมาก ดังเช่นในเหล็ก ส่วนผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (Hyper Eutectic) ถ้าเพิ่มฟอสฟอรัสประมาณ 0.2% จะทำให้เหล็กหล่อหลอมเหลวมีความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น เท่ากับเหล็กหล่อที่หลอมละลายที่อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ  $15^{\circ}\text{C}$  หรือเท่ากับเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้น 0.1% คุณสมบัติที่ ฟอสฟอรัส มีส่วนเพิ่มอีกประการหนึ่งก็คือ เพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และตัวนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) เมื่อผสมร่วมกับ ซิลิกอน

3. ซิลิกอน (Silicon) เป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กหล่อสีเทาทั่วๆ ไป อีกธาตุหนึ่ง (Common Element) ซึ่งไม่จัดเป็นธาตุผสม ถ้ามีอยู่ในเหล็กไม่เกิน 3% และจะผสมซิลิกอนเกิน 3% เฉพาะในกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษ โดยเฉพาะใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซิลิกอนเป็นธาตุที่จัดอยู่ในกลุ่มช่วยให้เกิดแกรไฟต์ อันดับแรก ในเหล็กหล่อสีเทาจะต้องมีซิลิกอน การศึกษาสมบัติของเหล็กหล่อสีเทา จะพิจารณาร่วมกับคาร์บอน ซึ่งจะเปลี่ยนโครงสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณของ Si กับ C และอัตราการเย็นตัวในแบบหล่อ (ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุทำแบบหล่อขนาดความหนาของงานหล่อ) ถ้าผสม ซิลิกอนในเหล็กสูงกว่า 3% ในกรณีที่ต้องการสมบัติทนความร้อนของเหล็กหล่อ เช่นผสมซิลิกอน 5 ถึง 7% (Matrix เป็น Ferritic) จะทนความร้อนได้สูงถึง  $750^{\circ}\text{C}$  ในกรณีแกรไฟต์มีลักษณะเป็นเกล็ด (Flake) และจะทนได้สูงถึง  $850^{\circ}\text{C}$  เมื่อแกรไฟต์เป็นรูปกลม (Nodule) ซึ่งเรารู้จักเหล็กหล่อชนิดนี้ในนามของซิลาล (Sial) และถ้าผสมนิเกิล ประมาณ 18% โครเมียมประมาณ 2 – 5% ซึ่งจะได้โครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเตนไนท์ จะทนความร้อนได้สูงถึง  $1000^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเรารู้จักเหล็กหล่อชนิดนี้ในนามนิโคร-ซิลาล (Nicro-Sial)

4. ซัลเฟอร์ ซัลเฟอร์ลดการละลายของคาร์บอนในน้ำเหล็ก ดังนั้นก็น่าจะถือได้ว่าซัลเฟอร์ช่วยให้เกิดแกรไฟต์ แต่ตามความเป็นจริงเมื่อเพิ่มฟอสฟอรัสแกรไฟต์จะลด และมักจะทำให้เหล็กหล่อเป็นเหล็กหล่อขาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีแมงกานีสอยู่บ้าง ซัลเฟอร์จะรวมกับเหล็กเกิดเป็นไอเอ็นซัลไฟด์ และช่วยให้เกิดเหล็กหล่อขาว ในกรณีเช่นนี้จะเกิดมีจุดแข็งเป็นพิเศษ (Hard Spots)

5. สารอื่นๆ นอกเหนือจากสารที่กล่าวมาแล้ว สารที่ช่วยให้เกิดแกรไฟต์ คือ ทองแดง นิเกิล และอลูมินัม และสารที่กันไม่เกิดแกรไฟต์ คือ โครเมียม โมลิบดีนัม ฯลฯ

### อิทธิพลของธาตุผสมในเหล็กหล่อ (Effects Of Alloy Addition In Cast Iron)

การผสมธาตุต่างๆ ลงไปในเหล็กหล่อส่วนใหญ่เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มสมบัติทางด้านความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานการกัดกร่อน และความต้านทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงให้กับเหล็กหล่อสำหรับสมบัติทางด้านความแข็งแรงดิ่งนั้น เหล็กหล่อสีเทา



สามารถเพิ่มได้จนถึงประมาณ  $304 \text{ N/mm}^2$  โดยเหล็กยังมีสมบัติทางด้านความสามารถในการกลึง-ไสดี สามารถกระทำได้โดยการ Inoculated ด้วยเฟอร์โรซิลิกอน หรือแคลเซียมซิลิไฟด์กับเหล็กที่มีค่า Carbon Equivalent (C.E.) ค่าการทำอินนอคูเลชั่นจะสามารถให้ค่าความแข็งแรงที่สูง โดยไม่ต้องอาศัยธาตุผสม (Alloy Elements) เพราะการใช้ธาตุผสมจะทำให้เหล็กมีราคาแพง และธาตุผสมบางธาตุ โดยเฉพาะนิเกิล และโมลิบดีนัม มีราคาแพง

ค่า Carbon Equivalent หรือ C.E. เป็นการหาปริมาณคาร์บอน โดยบวกเพิ่มอิทธิพลของธาตุอื่น ๆ เข้าไปด้วย โดยค่าที่ได้จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่จะมีอยู่จริง ในทางทฤษฎีการคำนวณค่า C.E. จะมีสมการการคำนวณ ดังนี้

$$\text{C.E.} = \text{C} + 0.31 \text{ Si}\% + 0.27\% \text{ P} + 0.078 (1.85 - \text{Mn}\%) + 0.156 \text{ Al} + 0.156 \text{ Al} \quad (2.7)$$

$$0.125 \text{ Ti} + 0.109 \text{ Ni} + 0.0935 \text{ Cu} - 0.935 \text{ Mo} - 0.312 \text{ Cr} - 0.624 \text{ V}$$

ส่วนในทางปฏิบัตินั้น จะถือว่ามีเพียงซิลิกอน และฟอสฟอรัสเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อปริมาณของคาร์บอน โดยเฉพาะในเหล็กหล่อสีเทา จึงใช้สมการการคำนวณดังนี้

$$\text{C.E.} = \text{C} + \frac{(\text{Si} + \text{P})}{3} \quad (2.8)$$

การผสมธาตุต่าง ๆ ถ้าต้องการผสมเพียงจำนวนเล็กน้อยจะผสมในเบ้าหลอม (Ladle) และธาตุผสมส่วนมาจะอยู่ในรูปของ เฟอร์โร-อัลลอยด์ ถ้าต้องการผสมปริมาณสูงจะต้องใส่ในเตาหลอม ซึ่งจะมีการสูญเสียจำนวนมาก ดังนั้นการหลอมเหล็กหล่อที่ต้องการผสมธาตุบางตัว ปริมาณสูงจะกระทำโดยเตาหลอมไฟฟ้า (Induction) ในบางกรณีอาจต้องทำการหลอมเฟอร์โร-อัลลอยด์ แล้วนำมาผสมกับเหล็กหลอมเหลวเพื่อลดการสูญเสีย หรือบางครั้งอาจต้องใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณของธาตุที่ต้องการอยู่ในเกณฑ์สูงมาทำการหลอมแล้วจึงเติมธาตุผสมลงไปอีกเล็กน้อยในภายหลัง

### การทดสอบวัสดุ (Mechanical Testing)

เป็นการทดสอบเพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องจักรปรับปรุงเทคนิคการผลิตต่าง ๆ ตลอดจนควบคุมขบวนการผลผลิต เพื่อให้ผลผลิตคุณภาพ ตามลักษณะที่ระบุไว้ เหตุนี้เองการที่จะตกลงซื้อผลิตภัณฑ์ที่ระบุลักษณะเฉพาะได้นั้นก็ต้องมีการสุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์มาทำการทดสอบก่อนด้วยเหมือนกัน สำหรับวิศวกรทุกสาขาที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร และวัสดุต่าง ๆ การพิจารณาตัดสินใจเลือกใช้วัสดุ ก็ต้องมีการทดสอบเช่นเดียวกัน ซึ่งสรุปได้ว่าการทดสอบจึงมีความสำคัญมากสำหรับในงานด้านวิศวกรรม



ในการเลือกวัสดุเราควรเลือกใช้ โดยเปรียบเทียบสมบัติทางกล ต่อเงื่อนไขการนำไปใช้งาน ขั้นตอนแรกในการเลือกจะต้องวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ เพื่อหาลักษณะเฉพาะที่สำคัญที่สุดที่วัสดุจะต้องมี โดยวัสดุนั้นควรจะแข็งแรงรับน้ำหนักได้มาก มีความเหนียวประกอบด้วยวัสดุนั้น

### 1. การทดสอบวิเคราะห์ปริมาณธาตุในโลหะ (Spectrometer)

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในโลหะด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์มีชื่อเรียกเต็มเป็นภาษาอังกฤษว่า "Optical Emission Spectrometer" มีชื่อเรียกตามภาษาการค้าว่า คิว-แวก (Q-Vac)

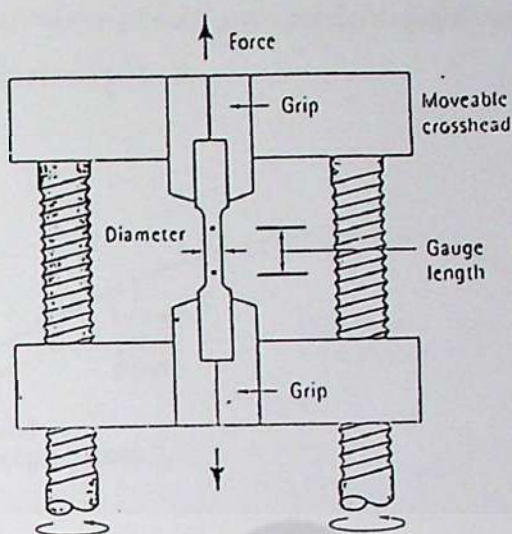
หลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ ธาตุแต่ละธาตุจะให้ความยาวคลื่นแสง (Wave Length) ไม่เท่ากัน เมื่อมีการทำให้ธาตุเปล่งแสงออกมาด้วยการกระตุ้นด้วยแรงเคลื่อนระหว่าง 800 V ถึง 1000 V ธาตุจะเปล่งแสงออกมาเพราะในการทดสอบนี้จะใช้ อิเล็กโตรดอาร์กบนชิ้นทดสอบ ทำให้เกิดความยาวคลื่นไม่เท่ากัน เช่น ชิ้นทดสอบเหล็กจะมีธาตุหลายชนิดเจืออยู่ ลำแสงที่เปล่งออกมานี้จะผ่านเลนส์กรอง (Condensing Lens) จะเป็นเลนส์นูนและปริซึมสามเหลี่ยมลำแสงจะเกิดการหักเหเป็นสเปกตรัม (Spectrum) ที่ต่าง ๆ กัน ความเข้มของลำแสง (Light Intensity) ที่เกิดขึ้นจะถูกแปรสภาพมาเป็นความเข้มกระแสไฟฟ้า ในขณะอาร์กชิ้นทดสอบนั้น ก็จะมีการอาร์กแท่งเปรียบเทียบ (เป็นเหล็กบริสุทธิ์ Fe) ขึ้นพร้อมกันในเวลาเดียวกัน และก็ถูกแปรสภาพมาเป็นความเข้มกระแสไฟฟ้าเช่นกันด้วยอุปกรณ์โฟโตมิเตอร์ผ่านเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์หาค่าเปอร์เซ็นต์ของแต่ละธาตุที่เจืออยู่ในเหล็กได้

### 2. การทดสอบโดยการดึง (Tensile Test)

การทดสอบโดยการดึง เป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายที่สุดในทุกวิธีการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ และนิยมทดสอบกันมาก เพราะสามารถที่จะให้ผลที่เป็นสมบัติทางกลพื้นฐานพอสมควร เช่น ให้ผลเกี่ยวกับ ความต้านทานแรงดึง ความยืดตัว ความเหนียว ความเปราะ และลักษณะการแตกหักของวัสดุ ซึ่งนับว่าจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบ และเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป โดยทั่วไปการทดสอบก็ต้องใช้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นนิยมทดสอบกับวัสดุที่มีสมบัติเหนียวมากกว่า

**2.1 แผนภาพความเค้น-ความเครียด (The Stress-Strain Diagram)** การทดสอบแรงดึงเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุต่อแรงกระทำแบบ-สถิตย์ หรือแรงกระทำต่อวัสดุอย่างช้า ๆ การทดสอบได้แสดงดังรูปที่ 2.9 ในการทดสอบนั้นจะทำให้เกิดความเค้น และความเครียดในชิ้นทดสอบ แล้วนำค่าทั้งสองนี้มาเขียนแผนภาพ โดยให้ค่าทางแกนนอนแทนความเครียด แกนตั้งแทนความเค้น แผนภาพนี้จึงเป็นแผนภาพความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Diagram) จะมีส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญแสดงถึงสมบัติทางกลของวัสดุเป็นช่วง ๆ ดังรูปที่ 2.8





**รูปที่ 2.8** แสดงการทดสอบแรงดึง

ความเค้น และความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain) คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเพียงครั้งเดียว แล้วนำมาใช้กับทุกขนาด และรูปร่างของชิ้นทดสอบ สำหรับวัสดุที่เรากำหนดให้ ถ้าเราแปลงค่าของแรงเป็นความเค้น และระยะห่างระหว่าง Gauge Mark เป็นความเครียด ความเค้น และความเครียดทางวิศวกรรมถูกนิยาม โดยสมการต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

ความเครียดทางวิศวกรรม

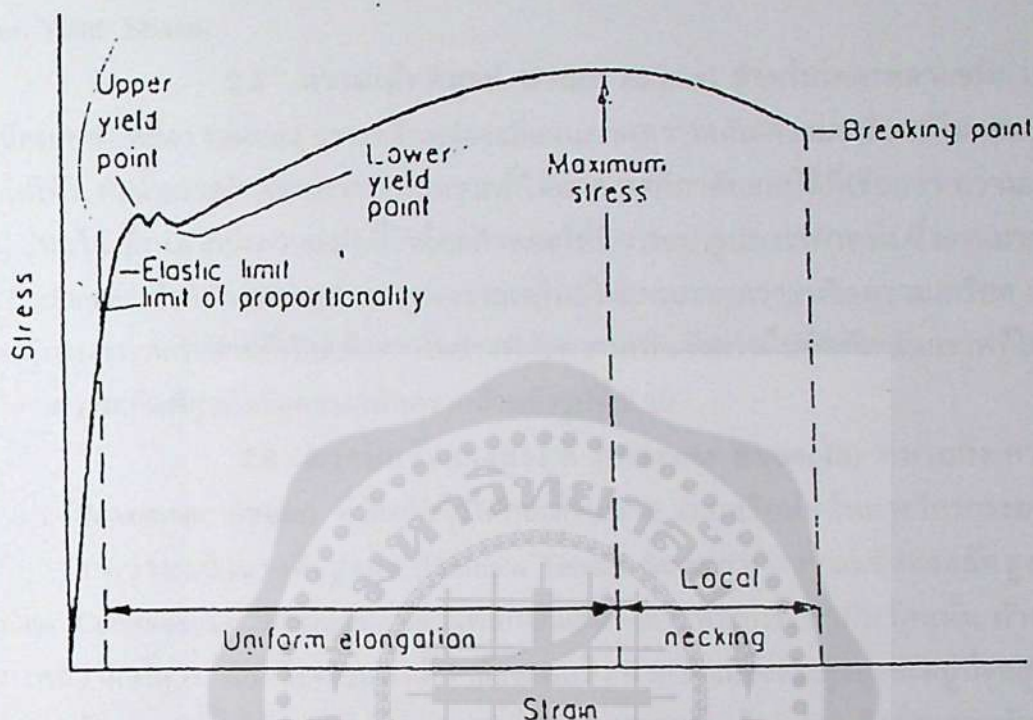
$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $A_0$  คือ พื้นที่ภาคตัด เมื่อเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ  $L_0$  คือ ระยะห่างจากจุดเริ่มต้นระหว่าง Gauge Mark และ  $L$  คือ ระยะห่างระหว่าง Gauge Mark ภายหลังจากที่แรง  $F$  กระทำ

ในการทดสอบโดยการดึงนั้น จะทำให้เกิดความเค้น และความเครียดในชิ้นทดสอบแล้วก็นำค่าทั้งสองนี้มาเขียนแผนภาพ โดยให้ค่าทางแกนนอนแทนความเครียดแกนตั้งแทนความเค้น แผนภาพนี้จึงเป็นแผนภาพความเค้น-ความเครียด (Stress Strain Diagram) แต่ในการทดสอบจริงนั้น แผนภาพที่เขียนจากเครื่องทดสอบจะเป็นแผนภาพของแรงกับการยืด



ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแผนภาพความเค้นกับความเครียด จะมีส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญแสดงถึงสมบัติทางกลของวัสดุเป็นช่วงๆ ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพความเค้น-ความเครียดของเหล็กกล้า

**2.2 พิกัดความเป็นสัดส่วน (Proportional Limit)** หมายถึง พฤติกรรมของวัสดุที่ได้รับความเค้น ซึ่งอยู่ภายในช่วงของการคืนรูปไม่เกิดการแปรรูปอย่างถาวร คือ เมื่อปล่อยแรงดึง วัสดุก็จะหดกลับสู่สภาพเดิม ในการทดสอบบางครั้งการที่จะกำหนดพิกัดความยืดหยุ่นในกราฟทำได้ยาก เพราะโลหะหรือวัสดุบางชนิดจะมีพิกัดความยืดหยุ่นเกือบจะเป็นตำแหน่งเดียวกันในกราฟ แต่โดยส่วนมากแล้ว พิกัดความยืดหยุ่นจะอยู่เหนือพิกัดความเป็นสัดส่วนเล็กน้อย

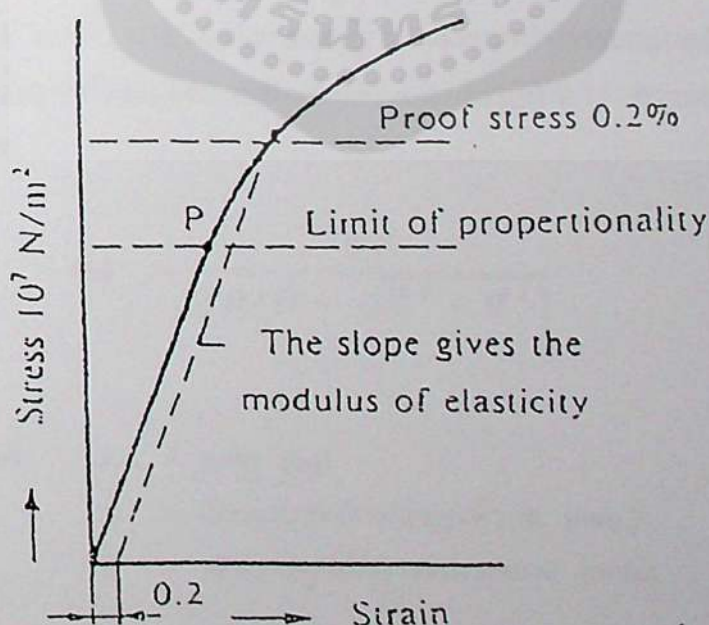
**2.3 จุดคราก (Yield Point)** เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำเกินพิกัดความยืดหยุ่น ก็จะมีการแปรรูปอย่างถาวรจนถึงจุดหนึ่งทำให้วัสดุแปรรูปง่าย คือ อัตราการยืดตัวจะสูงกว่าตอนแรก เมื่อเป็นเช่นนี้วัสดุจะแปรรูปทั้ง ๆ ที่ความเค้นคงที่จึงเรียกจุดนี้ว่า จุดครากบน (Upper Yield Point) สำหรับเหล็กกล้าแล้วในช่วงนี้จะมีอัตราการยืดตัวสูงมากเร็วกว่าแรงดึงขณะทดสอบจะเพิ่มขึ้นได้ทันจึงเหมือนว่าการดึงในช่วงนี้ใช้แรงดึงน้อยกว่าเดิม จึงมีจุดครากล่าง (Lower Yield Point) ในแผนภาพดังรูป ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความเหนียวมาก เช่น เหล็กกล้า หรืออลูมิเนียม เท่านั้น



**2.4 ความเค้นคราก (Yield Stress)** หมายถึง ความเค้นที่จุดคราก และความเค้นนี้จะทำให้วัสดุแปรรูปอย่างถาวรและดำเนินต่อไปด้วยความเค้นซึ่งเกือบคงที่สำหรับเหล็กกล้าจะมีทั้งความเค้นครากบน (Upper Yield Stress) และความเค้นครากล่าง (Lower Yield Stress)

**2.5 ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress)** สำหรับโลหะหลายชนิด เช่น อลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง และเหล็กหล่อจะมีแผนภาพความเค้น-ความเครียดที่ไม่แสดงจุดครากให้เห็น ดังนั้นการกำหนดความเค้นครากที่ได้ยาก แต่ก็อาศัยสมบัติที่เรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ แทนได้ ซึ่งหมายถึงความเค้นที่วัดโดยกำหนดให้มีการแปรรูปถาวรค่าหนึ่ง ซึ่งส่วนมากจะใช้ 0.2% Strain แล้วก็กำหนดค่านี้บนแกนความเครียดในแผนภาพความเค้น-ความเครียด แล้วก็ลากเส้นตรงขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงพิกัดความเป็นสัดส่วนไปตัดกับเส้นกราฟที่ได้ ก็จะเป็นค่าความเค้นพิสูจน์หรือความเค้นครากด้วยดังรูปที่ 2.10

**2.6 ความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Strength)** หมายถึง ความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) ที่วัสดุรับไว้ได้ก่อนที่จะขาด แตกหรือหัก ในทางวิศวกรรมบางทีก็เรียกว่า ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ความแข็งแรงอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) แล้วแต่ลักษณะของแรงที่มากระทำกับวัสดุนั้น ถ้าดูในแผนภาพความเค้น-ความเครียด ของเหล็กกล้าจะพบว่า ค่าความแข็งแรงสูงสุดจะอยู่ที่จุดสูงสุดของกราฟ ถัดจากจุดนี้ไปค่าความเค้นจะลดลงเรื่อย ๆ และจะเริ่มสังเกตว่าเกิดการคอดตัวของพื้นที่หน้าตัด จนในที่สุดวัสดุจะขาดหรือแตกหักที่จุดแตกหัก (Breaking Point) แล้วเรียกความแข็งแรงที่จุดวัสดุแตกหักว่า Breaking Strength



รูปที่ 2.10 แสดงการหาค่าความเค้นพิสูจน์



**2.7 เปอร์เซ็นต์ความยืด (Percent Elongation)** หมายถึง ความยืดถาวรของความยาวพิกัดหลังจากขึ้นทดสอบ คิดเป็นร้อยละของความยาวพิกัดเดิม ดังนั้น

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความยืด} = \frac{L_u - L_o}{L_o} \times 100 \quad (2.11)$$

ในเมื่อ  $L_o$  = ความยาวพิกัดเดิม

$L_u$  = ความยาวพิกัดสุดท้าย

**2.8 การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Reduction In Area)** หมายถึง การที่พื้นที่ภาคตัดขวางของขึ้นทดสอบลดลงมากที่สุดหลังจากขึ้นทดสอบขาด โดยการตั้งคิดเป็นร้อยละของพื้นที่ภาคตัดขวางเดิม ดังนั้น

$$\text{การลดลงของพื้นที่หน้าตัด} = \frac{S_o - S_u}{S_o} \times 100 \quad (2.12)$$

ในเมื่อ  $S_o$  = พื้นที่ภาคตัดขวางเดิมภายในความยาวพิกัด

$S_u$  = พื้นที่ภาคตัดขวางน้อยที่สุดหลังจากขาด

### 3. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tests)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนล จะทำการกดด้วยหัวกดที่ทำจากเหล็กกล้าหรือทังสเตนคาร์ไบด์ที่แข็ง โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมกดลงไปบนผิวงาน ช่วงระยะเวลามาตรฐาน (10 – 15 วินาที) ภายใต้ภาระมาตรฐาน หลังจากนำภาระออกแล้วรอยเว้ารูปวงกลมจะถูกวัดในแนวตั้งฉากทั้งสองทิศทางเพื่ออ่านค่าเฉลี่ย ดังรูปที่ 2.11 ความแข็งบริเนล (HB) คำนวณได้จากสมการ

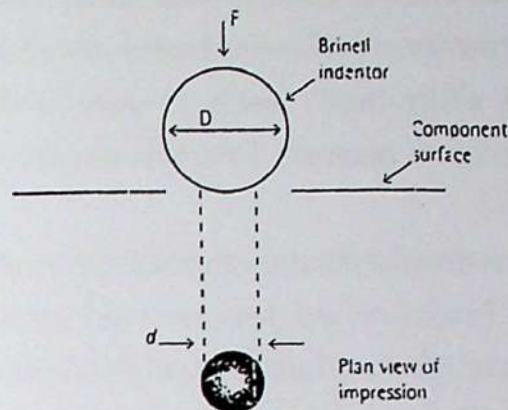
$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.13)$$

โดยที่  $F$  = ภาระ (kg)

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm.)

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (mm.)





รูปที่ 2.11 แสดงหัวกดบริเนลและรอยกด

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวเลือกขนาดหัวกด และแรงกดบริเนล

| Degree Of<br>Loading<br>$D^2$ | Indenting Boll Diameter D |          |            |          |          | Hardness<br>Rang<br>HB | Material<br>Suitability  |
|-------------------------------|---------------------------|----------|------------|----------|----------|------------------------|--------------------------|
|                               | 10<br>kPa                 | 5<br>kPa | 2.5<br>kPa | 2<br>kPa | 1<br>kPa |                        |                          |
| 30                            | 300                       | 750      | 187.5      | 120      | 30       | 95-653                 | Steel, Grey<br>Cast Iron |
| 15                            | 150                       | -        | -          | -        | -        | 48-327                 | Grey Cast Iron           |
| 10                            | 1000                      | 250      | 62.5       | 40       | 10       | 32-218                 | Grey Cast Iron           |
| 5                             | 500                       | 125      | 31.25      | 20       | 5        | 16-109                 | Aluminium                |
| 2.5                           | 250                       | 62.5     | 15.62      | 10       | 2.5      | 7.9-54.4               | Bearing Metals           |
| 1.25                          | 125                       | 31.25    | 7.81       | 5        | 1.25     | 39-27.2                | Lead                     |

#### 4. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope)

ชิ้นทดสอบจะถูกเตรียมด้วยการตัดด้วยแผ่นตัด โดยห้ามมิให้เกิดความร้อนระหว่างการตัดมากเกินไปหรือใช้แรงกดตัดมากเกินไปเพราะจะทำให้โครงสร้างเสียรูป เพื่อสะดวกให้การจับชิ้นทดสอบมาทำการขัดให้ผิวเรียบ จะมีการหล่อด้วยพลาสติกให้หุ้มชิ้นทดสอบ แล้วจึงนำไปขัดกระดาษทราย และขัดละเอียดจนให้เกิดผิวเป็นมัน จากนั้นจะมีการกัดด้วยสารเคมีทำให้เกิดเป็นรอยโครงสร้างที่ขอบเม็ดเกรนขึ้น หรือกัดให้ผิวของแต่ละผลึกให้สามารถมองเห็น



เห็นได้ด้วยการส่องแสงไฟฟ้าไปกระทบผิวชิ้นทดสอบ และสะท้อนออกมาแตกต่างกัน การมองตรวจสอบวิธีนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ โครงสร้างของเม็ดเกรนจากขนาดรูปร่างของเม็ดเกรน เช่น เกรนหยาบหรือละเอียด การเกิดระนาบคู่ (Twin Plane) รูปเข็ม รูปทรงกลม การแผ่กระจาย และการเรียงตัวของเม็ดเกรน เช่น เดกซ์เจอร์ (Texture) จากการรีด การแยกตัวที่ขอบเม็ดเกรน

การหาประเภทของเม็ดเกรน : โครงสร้างเม็ดเกรนจากการหล่อ จากการอบอ่อน จากการชุบแข็ง จากการอบชุบ โซนการเพิ่มคาร์บอน โซนไนไตรด์ โซนความลึกของความแข็ง การเปลี่ยนรูป และการก่อตัวใหม่ที่เม็ดเกรน เช่น ในขณะนี้รูปขณะเย็น และการตกผลึกใหม่ ประเภทการแยกตัวและรูปร่างการแยกตัวของโครงสร้างที่เป็น อโลหะ : ผลึกมัธยิม (Intermediate Crystal) ในเหล็กหล่อเทา การแทรกตัวของซัลไฟด์ในเหล็กกล้าดัดง่าย การแยกตัวของเกล็ดแกรไฟต์ หรือแกรไฟต์รูปกลมในเหล็กหล่อตามมาตรฐานสมาคมทดสอบวัสดุช่างอเมริกัน (ASTM) ที่ได้จัดแบ่งมาตรฐานกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ไว้ดังนี้

กำลังขยาย 50 : 1 (50 เท่าลงมา) สำหรับโครงสร้างมหภาค

กำลังขยาย 100 : 1 ใช้วิเคราะห์หาการฝังในของอโลหะ (เช่น การกระจาย การแยกตัวของแกรไฟต์ในเหล็กเทา ริวรอยซีตะกรัน (Slag Streak) ในเหล็กกล้า

กำลังขยาย 300 : 1 ใช้วิเคราะห์โครงสร้างทั่วไป

กำลังขยาย 500 : 1 ขึ้นไปจะใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเป็นพิเศษ



### บทที่ 3

#### การออกแบบและการคำนวณ

##### การออกแบบแบบหล่อ

ในการออกแบบแบบหล่อ เพื่อใช้ในการทดลองนี้ ได้ออกแบบตามความเหมาะสม โดยพิจารณาจากขนาดของ ชิ้นงานทดสอบสมบัติทางโครงสร้างและสมบัติเชิงกล รูปร่าง ประกอบภาคผนวก ง

เพื่อให้ได้ขนาดชิ้นงานหล่อ  $\varnothing 30$  mm. ความยาว 500 mm. จะได้ขนาดแบบหล่อดังนี้

ความกว้างแบบหล่อ 150 mm.

ความยาวแบบหล่อ 600 mm.

ความหนาแบบหล่อ 60 mm.

แบบเป็นชนิดประกบสองฝา

##### การสร้างแบบหล่อ

1. สร้างแบบไม้ขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของชิ้น
2. เตรียมทรายทำแบบหล่อ โดยใช้ทรายหล่อเซอร์คอน
3. อัดทรายหล่อลงในแบบไม้ ทั้งให้แน่นตัว 15 นาที
4. แกะแบบหล่อทรายออกจากแบบ

##### คำนวณเวลาเย็นตัวในแบบหล่อ

หาเวลาการเย็นตัวหรือเวลาการเปลี่ยนสถานะ จากของเหลวเป็นของแข็ง สมบูรณ์โดยอุณหภูมิเทหล่อ  $1400^{\circ}\text{C}$  ค่าคงที่แบบหล่อ  $0.75\text{ mm.}^{-2}$  (จากภาคผนวก ก)

จากกฎของ Chvorinov 's Rule (สมการที่ 2.6)

$$t_s = K \left( \frac{V}{A} \right)^2$$



$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\pi d^2 l}{4} \\
 &= \frac{\pi \times 30^2 \times 500}{4} \\
 &= 35.34 \times 10^4 \quad \text{mm}^3 \\
 A &= 2 \times \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) + \pi d l \\
 &= 2 \times \left( \frac{\pi \times 30^2}{4} \right) + (\pi \times 30 \times 500) \\
 &= 48.53 \times 10^3 \quad \text{mm}^2 \\
 t_s &= 0.75 \text{ mm}^{-2} \times \left( \frac{35.34 \times 10^4 \text{ mm}^3}{48.53 \times 10^3 \text{ mm}^2} \right) \\
 &= 53.028 \quad \text{s.} \\
 &= 0.883 \quad \text{min.}
 \end{aligned}$$

เหล็กจะเย็นตัวในแบบหล่อ (เป็นสถานะของแข็งโดยสมบูรณ์) ใช้เวลา 53.028 วินาที หรือ 0.883 นาที

### คำนวณปริมาณส่วนผสมในการหล่อเหล็กหล่อสีเทาเริ่มต้น

ตารางที่ 3.1 แสดงเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนของธาตุในเหล็กที่ใช้ในการหล่อเริ่มต้น

| ชนิดเหล็ก      | อัตราส่วนที่ใช้ (%) | ปริมาณธาตุประกอบในเหล็ก 100 kg |        |        |       |       |
|----------------|---------------------|--------------------------------|--------|--------|-------|-------|
|                |                     | C (%)                          | Si (%) | Mn (%) | P (%) | S (%) |
| เหล็กพิก       | 20                  | 4.30                           | 2.26   | 0.05   | 0.04  | 0.03  |
| เศษเหล็กหล่อ   | 40                  | 3.20                           | 1.70   | 0.60   | 0.05  | 0.02  |
| เศษเหล็กเหนียว | 40                  | 0.20                           | 0.20   | 0.40   | 0.02  | 0.01  |

ที่เหล็กพิก อัตราส่วนที่ใช้ 10 kg

ปริมาณ 100 kg มี C อยู่ 4.30 kg

ปริมาณ 10 kg มี C อยู่  $(4.30 / 100) \times 10 = 0.430 \text{ kg}$

ปริมาณ 100 kg มี Si อยู่ 2.26 kg



ปริมาณ 10 kg มี Si อยู่  $(2.26 / 100) \times 10 = 0.226$  kg

ปริมาณ 100 kg มี Mn อยู่ 0.05 kg

ปริมาณ 10 kg มี Mn อยู่  $(0.05 / 100) \times 10 = 0.005$  kg

ปริมาณ 100 kg มี P อยู่ 0.05 kg

ปริมาณ 10 kg มี P อยู่  $(0.05 / 100) \times 10 = 0.005$  kg

ปริมาณ 100 kg มี S อยู่ 0.03 kg

ปริมาณ 10 kg มี S อยู่  $(0.03 / 100) \times 10 = 0.003$  kg

**ที่เศษเหล็กหล่อ อัตราส่วนที่ใช้ 20 kg**

ปริมาณ 100 kg มี C อยู่ 3.20 kg

ปริมาณ 20 kg มี C อยู่  $(3.20 / 100) \times 20 = 0.640$  kg

ปริมาณ 100 kg มี Si อยู่ 1.70 kg

ปริมาณ 20 kg มี Si อยู่  $(1.70 / 100) \times 20 = 0.340$  kg

ปริมาณ 100 kg มี Mn อยู่ 0.60 kg

ปริมาณ 20 kg มี Mn อยู่  $(0.60 / 100) \times 20 = 0.120$  kg

ปริมาณ 100 kg มี P อยู่ 0.05 kg

ปริมาณ 20 kg มี P อยู่  $(0.05 / 100) \times 20 = 0.010$  kg

ปริมาณ 100 kg มี S อยู่ 0.02 kg

ปริมาณ 10 kg มี S อยู่  $(0.02 / 100) \times 20 = 0.004$  kg

**ที่เศษเหล็กเหนียว อัตราส่วนที่ใช้ 20 kg**

ปริมาณ 100 kg มี C อยู่ 0.20 kg

ปริมาณ 20 kg มี C อยู่  $(0.20 / 100) \times 20 = 0.040$  kg

ปริมาณ 100 kg มี Si อยู่ 0.20 kg



ปริมาณ 20 kg มี Si อยู่  $(0.20 / 100) \times 20 = 0.040$  kg

ปริมาณ 100 kg มี Mn อยู่ 0.40 kg

ปริมาณ 20 kg มี Mn อยู่  $(0.40 / 100) \times 20 = 0.08$  kg

ปริมาณ 100 kg มี P อยู่ 0.02 kg

ปริมาณ 20 kg มี P อยู่  $(0.02 / 100) \times 20 = 0.004$  kg

ปริมาณ 100 kg มี S อยู่ 0.01 kg

ปริมาณ 10 kg มี S อยู่  $(0.01 / 100) \times 20 = 0.002$  kg

เนื่องจากเหล็กทั้งหมด = 50 kg

รวม C =  $0.430 + 0.640 + 0.040 = 1.110$  kg

เป้าหมาย C 3.10% =  $(3.10 / 100) \times 50 = 1.550$  kg

ส่วนขาดของ C =  $1.550 - 1.110 = 0.440$  kg

รวม Si =  $0.226 + 0.340 + 0.040 = 1.110$  kg

เป้าหมาย Si 1.30% =  $(1.30 / 100) \times 50 = 0.650$  kg

ส่วนขาดของ Si =  $0.650 - 0.606 = 0.044$  kg

รวม Mn =  $0.005 + 0.120 + 0.080 = 0.205$  kg

เป้าหมาย Mn 0.70% =  $(0.70 / 100) \times 50 = 0.350$  kg

ส่วนขาดของ Mn =  $0.350 - 0.205 = 0.145$  kg

รวม P =  $0.004 + 0.010 + 0.004 = 0.018$  kg

เป้าหมาย P 0.12% =  $(0.12 / 100) \times 50 = 0.060$  kg

ส่วนขาดของ P =  $0.060 - 0.018 = 0.042$  kg

รวม Mn =  $0.005 + 0.120 + 0.080 = 0.205$  kg

เป้าหมาย Mn 0.70% =  $(0.70 / 100) \times 50 = 0.350$  kg



$$\text{ส่วนขาดของ Mn} = 0.350 - 0.205 = 0.145 \text{ kg}$$

คำนวณน้ำหนักของธาตุซิลิกอนที่ใช้ในการเติมเพื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสม

หล่อชิ้นงานครั้งที่ 1

1. น้ำหนักเหล็กเริ่มต้น 50 kg
2. เทหล่อครั้งละ 2 ชิ้นงาน น้ำหนักชิ้นละ 3 kg (น้ำหนักรวม 6 kg)
3. เปลี่ยนแปลงปริมาณซิลิกอน (Si) ครั้งละ 1.5 %

ชิ้นที่ 1 ไม่มีการเติม

ชิ้นที่ 2 น้ำหนักคงเหลือ = 44 kg  
 100% = 44 kg  
 $0.15\% = (44 / 100) \times 0.15$   
 ปริมาณซิลิกอนที่เติม = 0.066 kg

ชิ้นที่ 3 น้ำหนักคงเหลือ = 38 kg  
 100% = 38 kg  
 $0.15\% = (38 / 100) \times 0.15$   
 ปริมาณซิลิกอนที่เติม = 0.057 kg

ชิ้นที่ 4 น้ำหนักคงเหลือ = 32 kg  
 100% = 32 kg  
 $0.15\% = (32 / 100) \times 0.15$   
 ปริมาณซิลิกอนที่เติม = 0.048 kg

ชิ้นที่ 5 น้ำหนักคงเหลือ = 26 kg  
 100% = 26 kg  
 $0.15\% = (26 / 100) \times 0.15$   
 ปริมาณซิลิกอนที่เติม = 0.039 kg



$$\begin{aligned}
 \text{ชั้นที่ 6} \quad \text{น้ำหนักคงเหลือ} &= 20 \quad \text{kg} \\
 100\% &= 20 \quad \text{kg} \\
 0.15\% &= (20 / 100) \times 0.15 \\
 \text{ปริมาณซิลิกอนที่เติม} &= 0.030 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

### หล่อชิ้นงานครั้งที่ 2

1. น้ำหนักเหล็กเริ่มต้น 50 kg
4. เทหล่อครั้งละ 2 ชิ้นงาน น้ำหนักชิ้นละ 3 kg (น้ำหนักรวม 6 kg)
5. เปลี่ยนแปลงปริมาณซิลิกอน (Si) ครั้งละ 0.5 %

### ชั้นที่ 1 ไม่มีการเติม

$$\begin{aligned}
 \text{ชั้นที่ 2} \quad \text{น้ำหนักคงเหลือ} &= 44 \quad \text{kg} \\
 100\% &= 44 \quad \text{kg} \\
 0.5\% &= (44 / 100) \times 0.5 \\
 \text{ปริมาณซิลิกอนที่เติม} &= 0.22 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ชั้นที่ 3} \quad \text{น้ำหนักคงเหลือ} &= 38 \quad \text{kg} \\
 100\% &= 38 \quad \text{kg} \\
 0.5\% &= (38 / 100) \times 0.5 \\
 \text{ปริมาณซิลิกอนที่เติม} &= 0.19 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ชั้นที่ 4} \quad \text{น้ำหนักคงเหลือ} &= 32 \quad \text{kg} \\
 100\% &= 32 \quad \text{kg} \\
 0.5\% &= (32 / 100) \times 0.5 \\
 \text{ปริมาณซิลิกอนที่เติม} &= 0.16 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ชั้นที่ 5} \quad \text{น้ำหนักคงเหลือ} &= 26 \quad \text{kg} \\
 100\% &= 26 \quad \text{kg} \\
 0.5\% &= (26 / 100) \times 0.5 \\
 \text{ปริมาณซิลิกอนที่เติม} &= 0.5 \quad \text{kg}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{ชั้นที่ 6 น้ำหนักคงเหลือ} &= 20 \text{ kg} \\
 100\% &= 20 \text{ kg} \\
 0.5\% &= (20 / 100) \times 0.5 \\
 \text{ปริมาณซิลิกอนที่เติม} &= 0.10 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

#### ตัวอย่างคำนวณค่า Carbon Equivalent (C.E.)

คำนวณ การหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1 ที่อัตราส่วนผสมธาตุคาร์บอน (C) 2.84 %  
 ธาตุซิลิกอน (Si) 1.46% ฟอสฟอรัส (P) 0.025%  
 จาก สมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned}
 C.E. &= C + \left( \frac{Si + P}{3} \right) \\
 &= 2.84 + \left( \frac{1.46 + 0.025}{3} \right) \\
 &= 3.33
 \end{aligned}$$

ชิ้นงานมีค่า Carbon Equivalent (C.E.) 3.33

#### ตัวอย่างคำนวณปริมาณโครงสร้าง

คำนวณ การหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1 ที่อัตราส่วนผสมธาตุคาร์บอน (C) 2.84 %  
 โดยปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) ที่อุณหภูมิห้อง (25°C)  
 โดย

ซีเมนไทต์ เท่ากับ 6.67%C

ปริมาณคาร์บอนเมื่อเหล็กมีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ทั้งหมด เท่ากับ 0.008%

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณสภาพของเฟอร์ไรต์} &= \frac{6.67 - 2.84}{6.67 - 0.008} \times 100 \\
 &= 57.49 \% \\
 \text{ปริมาณแกรไฟต์} &= 100 - 57.49 \\
 &= 42.51 \%
 \end{aligned}$$

โครงสร้างของเหล็กหล่อสีเทาที่มี ปริมาณคาร์บอน (C) 2.84 % จะประกอบไปด้วย เฟอร์ไรต์ 57.49% + แกรไฟต์ 42.509%



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการหล่อโลหะให้เป็นเหล็กหล่อสีเทา โดยแต่ละชิ้นจะมีอัตราส่วนผสมของธาตุประกอบ ซิลิกอน (Si) ที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นจะทำการทดสอบสมบัติทางกลของเหล็กหล่อสีเทาที่ได้ โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ธาตุประกอบ
2. ทดสอบความต้านทานแรงดึง
3. ทดสอบความแข็ง
4. ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

### อุปกรณ์การทดลอง

1. เตาไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำความถี่
2. เครื่องผสมทรายหล่อ
3. เทอร์โมคัปเปิล
4. Optical Emission Spectrometer
5. Tensile Testing
6. Brinell Harness Testing

### ขั้นตอนดำเนินการหล่อขึ้นทดสอบ

1. คำนวณส่วนผสมที่ต้องใช้หล่อขึ้นทดสอบ ดังตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2
2. เตรียมวัสดุ ซึ่งประกอบไปด้วย เหล็กพิก (Pig Iron) เศษเหล็กหล่อ (Return Scrap) เศษเหล็กเหนียว (Steel Scrap) และธาตุประกอบต่าง ๆ ที่ขาด ปริมาณตาม ตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2
3. เเผาแบบหล่อเพื่อให้ร้อน ณ อุณหภูมิ ประมาณ  $150^{\circ}\text{C}$  เพื่อป้องกันไม่ให้แบบหลอมมีความชื้น



#### 4. ดำเนินการหล่อชิ้นงาน

4.1 กำหนดอุณหภูมิหล่อที่ 1400 °C

4.2 เริ่มต้นในการหล่อชิ้นงาน โดยมีอัตราส่วนผสมของธาตุซิลิกอน (Si) เริ่มต้นที่ 1.3% ในการหล่อทั้งสองครั้ง

4.3 จากนั้นเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของธาตุซิลิกอน (Si) โดยเพิ่มครั้งละ 0.15% ในการหล่อครั้งแรก และเพิ่มครั้งละ 0.5% ในการหล่อครั้งที่สอง

5. เทน้ำโลหะลงแบบหล่อที่ทุกอัตราส่วนผสมซิลิกอน (Si) ครั้งละ 2 ชิ้นงาน ทิ้งให้เย็นตัว 24 ชั่วโมง

#### การเก็บข้อมูลจากการทดลอง

1. การตรวจสอบอัตราส่วนผสม (Spectrometer) เมื่อเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อแล้ว นำโลหะที่เหลือในแต่ละครั้ง ทำการเทลงในแบบสำหรับหาอัตราส่วนผสม เมื่อเย็นตัวแล้วจึงทำการแกะแบบ จากนั้นทำการตรวจสอบอัตราส่วนผสมด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ขนาดขึ้นทดสอบ  $\varnothing 35$  mm.หนา 5 mm.

2. การวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tests) นำชิ้นงานที่เย็นตัวลงแล้ว ไปทำการตัดเป็นขึ้นทดสอบ ขนาดหนา 20 mm.  $\varnothing 25$  mm. ทำการวัดความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tests) โดยมีวิธีดังนี้

2.1 วางชิ้นงานลงบนแท่น

2.2 เลือกใช้ขนาดภาระ (Load test) 3,000 kg ขนาดหัวกด 10 mm.

2.3 กดน้ำหนักลง 8 วินาที

2.4 วัดเส้นผ่าศูนย์กลาง นำไปเทียบดูค่าความแข็งบริเนล จากตารางภาคผนวก ข

#### 3. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope)

3.1 นำชิ้นงานที่เย็นตัวลงแล้ว ไปทำการตัดเป็นขึ้นทดสอบ ขนาดหนา 20 mm.  $\varnothing 25$  mm.

3.2 นำขึ้นทดสอบไปขัดด้วยเครื่องขัดโดยใช้กระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 180, 400, 600 และ 1200 จนขึ้นเงา

3.3 นำขึ้นทดสอบไปขัดต่อด้วยผ้าสักหลาด โดยมีน้ำยาอะลูมินาเป็นสารหล่อ ลื่น

3.4 นำขึ้นทดสอบไปกัดด้วยกรดไนตริกจากนั้นนำไปล้างด้วยแอลกอฮอล์



3.5 เป่าชิ้นทดสอบให้แห้งสนิท

3.6 นำชิ้นทดสอบไปถ่ายภาพโครงสร้าง กำลังขยาย 300 เท่า

4. การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) นำชิ้นงานที่เย็นตัวลงแล้ว ไปทำการกลึงเป็นชิ้นทดสอบให้ได้ขนาดดังรูปภาคผนวก ง จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยมีวิธีการดังนี้

4.1 ติดตั้งชิ้นทดสอบกับหัวจับ ณ เครื่องทดสอบ ชันยึดให้แน่น

4.2 เปิดเครื่องทดสอบ เพิ่มแรงดึงให้แก่ชิ้นทดสอบเรื่อยๆ จนชิ้นงาน

ขาด

4.3 อ่านค่าจากเครื่องทดสอบ บันทึกผลการทดลอง

#### ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

จากทฤษฎี เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของธาตุซิลิกอน (Si) แกรไฟต์ภายในโครงสร้างจะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย และจะส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลของเหล็กหล่อเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.3 จะแสดง อัตราส่วนผสมธาตุประกอบ, ค่า Carbon Equivalent (C.E.) และความแตกต่างของสมบัติเชิงกลของการหล่อครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.4 จะแสดง อัตราส่วนผสมธาตุประกอบ, ค่า Carbon Equivalent (C.E.) และความแตกต่างของสมบัติเชิงกลของการหล่อครั้งที่ 2



ตารางที่ 4.1 แสดงค่าอัตราส่วนผสมเริ่มต้นของการหล่อขึ้นทดสอบ

| วัสดุหลอม                       |     |    | ส่วนประกอบของธาตุ |      |      |       |      |       |      |       |      |       |
|---------------------------------|-----|----|-------------------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
|                                 |     |    | C                 |      | Si   |       | Mn   |       | P    |       | S    |       |
| วัสดุ                           | %   | kg | %                 | kg   | %    | kg    | %    | kg    | %    | kg    | %    | kg    |
| เหล็กพิก<br>(Pig Iron)          | 20  | 10 | 4.3               | 0.43 | 2.26 | 0.226 | 0.05 | 0.005 | 0.04 | 0.004 | 0.03 | 0.003 |
| เศษเหล็กหล่อ<br>(Return Scrap)  | 40  | 20 | 3.2               | 0.64 | 1.7  | 0.340 | 0.6  | 0.120 | 0.05 | 0.005 | 0.02 | 0.002 |
| เศษเหล็กเหนียว<br>(Steel Scrap) | 40  | 20 | 0.2               | 0.04 | 0.2  | 0.040 | 0.4  | 0.080 | 0.02 | 0.002 | 0.01 | 0.001 |
| รวม                             | 100 | 50 |                   | 1.11 |      | 0.606 |      | 0.205 |      | 0.011 |      | 0.006 |
| เป้าหมาย                        |     |    | 3.1               | 1.55 | 1.3  | 0.650 | 0.7  | 0.350 | 0.12 | 0.060 | 0.10 | 0.050 |
| ส่วนขาด                         |     |    |                   | 0.44 |      | 0.044 |      | 0.145 |      | 0.049 |      | 0.044 |

(เปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบของธาตุ มาจาก % ต่อ 100 Kg)



ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของธาตุในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1

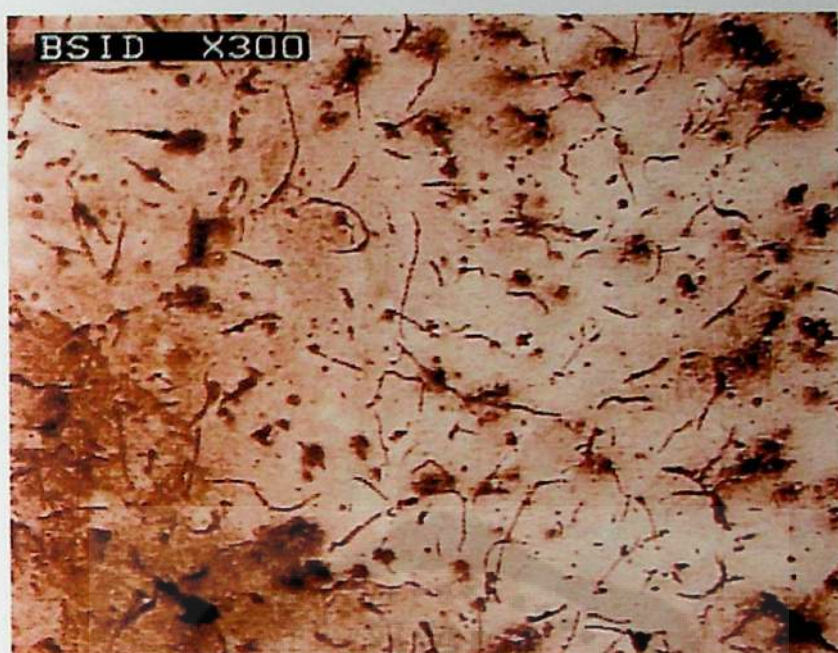
| ชิ้นงาน | เปอร์เซ็นต์ส่วนผสม ( % ) |                 |                 |                  |                |
|---------|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|
|         | คาร์บอน<br>(C)           | ซิลิกอน<br>(Si) | ฟอสฟอรัส<br>(P) | แมงกานีส<br>(Mn) | กำมะถัน<br>(S) |
| 1       | 2.84                     | 1.46            | 0.025           | 0.44             | 0.027          |
| 2       | 2.80                     | 1.61            | 0.024           | 0.44             | 0.036          |
| 3       | 2.80                     | 1.80            | 0.025           | 0.44             | 0.025          |
| 4       | 2.72                     | 1.95            | 0.025           | 0.45             | 0.025          |
| 5       | 2.72                     | 2.11            | 0.025           | 0.45             | 0.025          |
| 6       | 2.61                     | 2.17            | 0.025           | 0.44             | 0.026          |



ตารางที่ 4.3 แสดงส่วนประกอบของธาตุในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 2

| ชิ้นงาน | เปอร์เซ็นต์ส่วนผสม ( % ) |                 |                 |                  |                |
|---------|--------------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|
|         | คาร์บอน<br>(C)           | ซิลิกอน<br>(Si) | ฟอสฟอรัส<br>(P) | แมงกานีส<br>(Mn) | กำมะถัน<br>(S) |
| 1       | 3.32                     | 1.08            | 0.022           | 0.53             | 0.030          |
| 2       | 3.38                     | 1.61            | 0.023           | 0.54             | 0.031          |
| 3       | 3.47                     | 2.16            | 0.023           | 0.54             | 0.031          |
| 4       | 3.49                     | 2.68            | 0.023           | 0.54             | 0.033          |
| 5       | 3.46                     | 3.24            | 0.024           | 0.54             | 0.034          |
| 6       | 3.47                     | 3.79            | 0.024           | 0.54             | 0.033          |





**รูปที่ 4.1** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 1

ส่วนผสม C 2.84 % Si 1.46 % P 0.025 % (C.E. 3.33)

โครงสร้าง เฟอไรต์ 57.49 % + แกรไฟต์ 42.51 % (Type A)

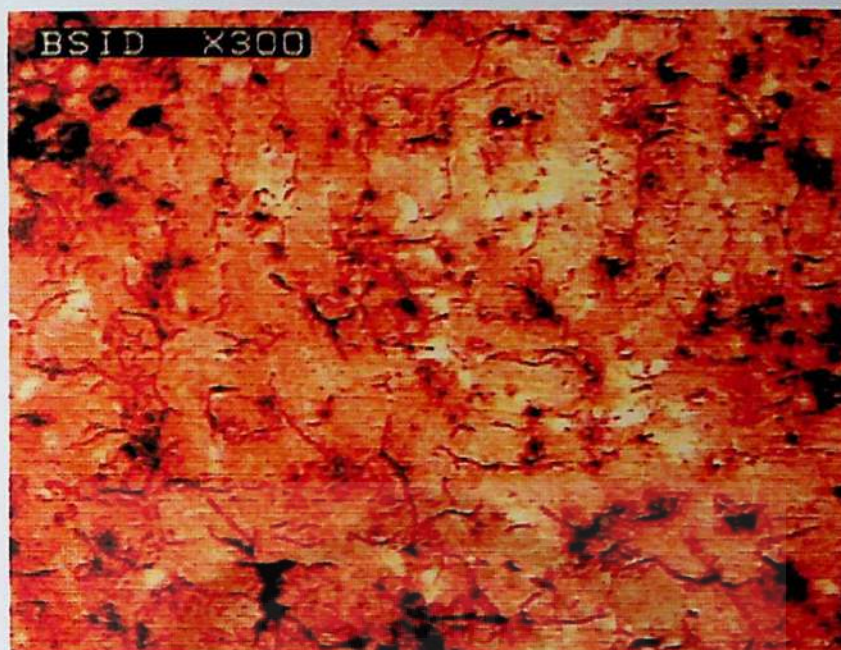


**รูปที่ 4.2** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 2

ส่วนผสม C 2.80 % Si 1.61 % P 0.024 % (C.E. 3.34)

โครงสร้าง เฟอไรต์ 58.09 % + แกรไฟต์ 41.91 % (Type A)

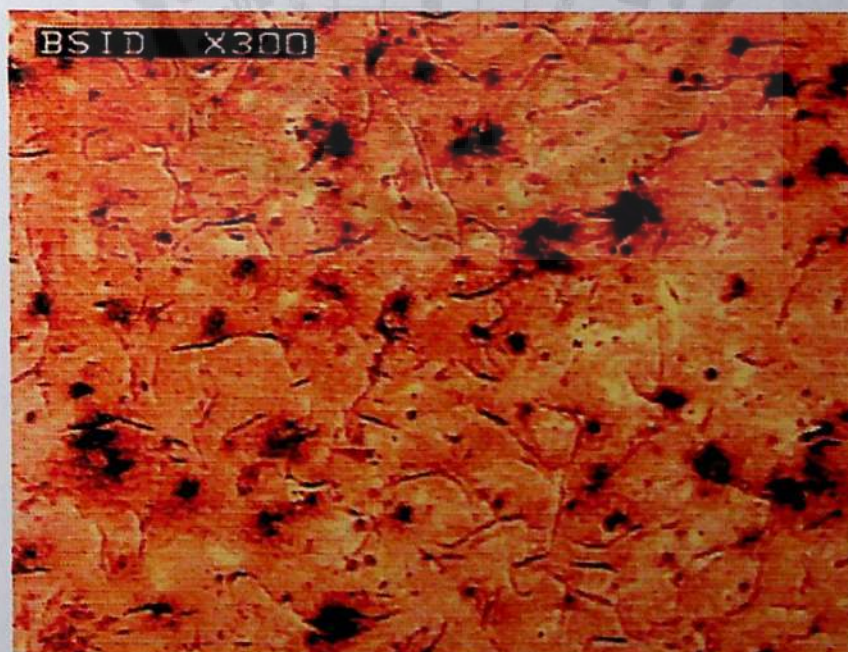




**รูปที่ 4.3** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 3

ส่วนผสม C 2.80 % Si 1.80 % P 0.025 % (C.E. 3.40)

โครงสร้าง เฟิร์ลไลต์ 58.09 % + แกรไฟต์ 41.91 % (Type A)



**รูปที่ 4.4** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 4

ส่วนผสม C 2.72 % Si 1.95 % P 0.025 % (C.E. 3.37)

โครงสร้าง เฟิร์ลไลต์ 59.29 % + แกรไฟต์ 40.71 % (Type A)

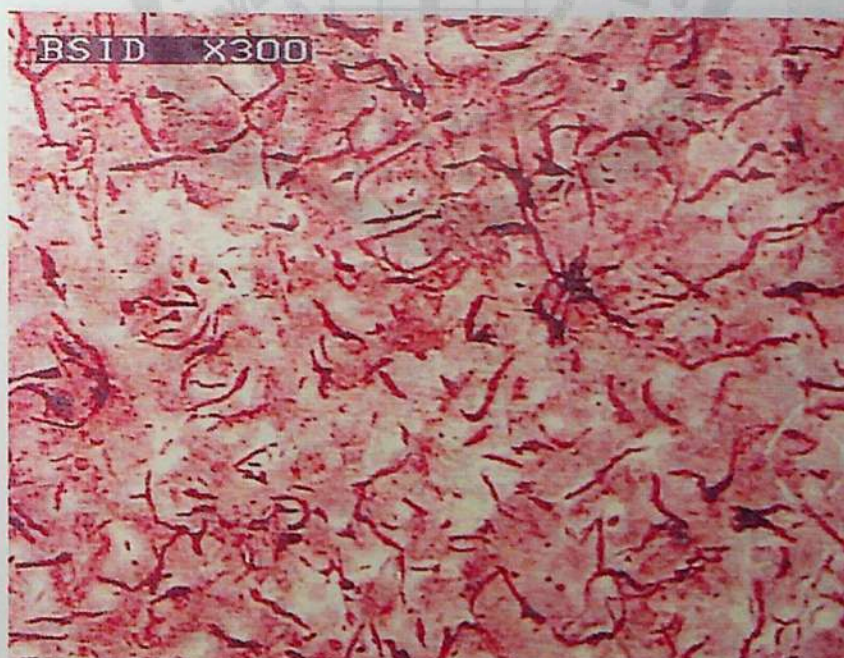




**รูปที่ 4.5** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 5

ส่วนผสม C 2.72 % Si 2.11 % P 0.025 % (C.E. 3.43)

โครงสร้าง เฟอไรต์ 59.29 % + แกรไฟต์ 40.71 % (Type A)



**รูปที่ 4.6** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 1 ของการหล่อชิ้นงานที่ 6

ส่วนผสม C 2.61 % Si 2.17 % P 0.025 % (C.E. 3.34)

โครงสร้าง เฟอไรต์ 60.94 % + แกรไฟต์ 39.06 % (Type A)





**รูปที่ 4.7** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 1

ส่วนผสม C 3.32 % Si 1.80 % P 0.022 % (C.E. 3.68)

โครงสร้าง เฟอไรต์ 50.28 % + แกรไฟต์ 40.72 % (Type A)

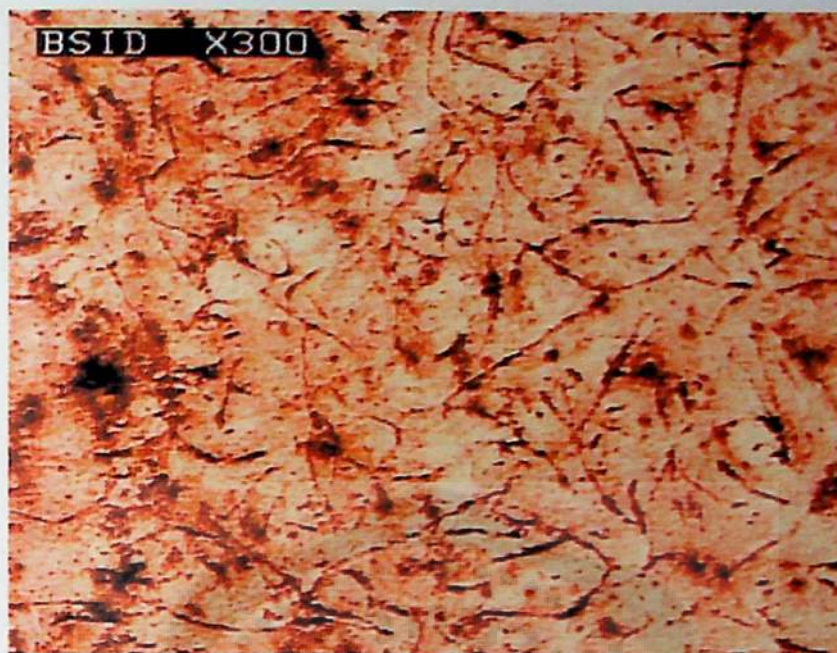


**รูปที่ 4.8** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 2

ส่วนผสม C 3.38 % Si 1.61 % P 0.023 % (C.E. 3.92)

โครงสร้าง เฟอไรต์ 40.38 % + แกรไฟต์ 50.62 % (Type A)





**รูปที่ 4.9** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 3

ส่วนผสม C 3.47 % Si 2.16 % P 0.023 % (C.E. 4.19)

โครงสร้าง เฟิร์ลไลต์ 50.28 % + แกรไฟต์ 40.72 % (Type A)

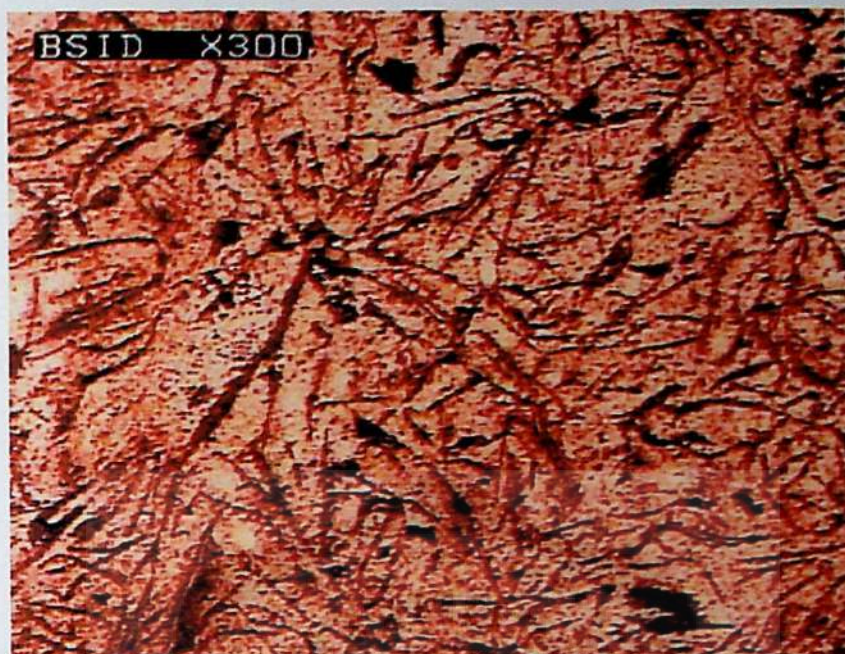


**รูปที่ 4.10** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 4

ส่วนผสม C 3.49 % Si 2.68 % P 0.033 % (C.E. 4.39)

โครงสร้าง เฟิร์ลไลต์ 47.73 % + แกรไฟต์ 52.27 % (Type C)





**รูปที่ 4.11** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 5

ส่วนผสม C 3.46 % Si 3.24 % P 0.024 % (C.E. 4.54)

โครงสร้าง เฟอไรต์ 48.18 % + แกรไฟต์ 51.82 % (Type C)



**รูปที่ 4.12** แสดงโครงสร้างชิ้นงานหล่อครั้งที่ 2 ของการหล่อชิ้นงานที่ 6

ส่วนผสม C 3.47 % Si 3.79 % P 0.033 % (C.E. 4.74)

โครงสร้าง เฟอไรต์ 40.03 % + แกรไฟต์ 51.97 % (Type C)



**ตารางที่ 4.4** แสดงผลการทดสอบส่วนผสมและสมบัติเชิงกลของการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1

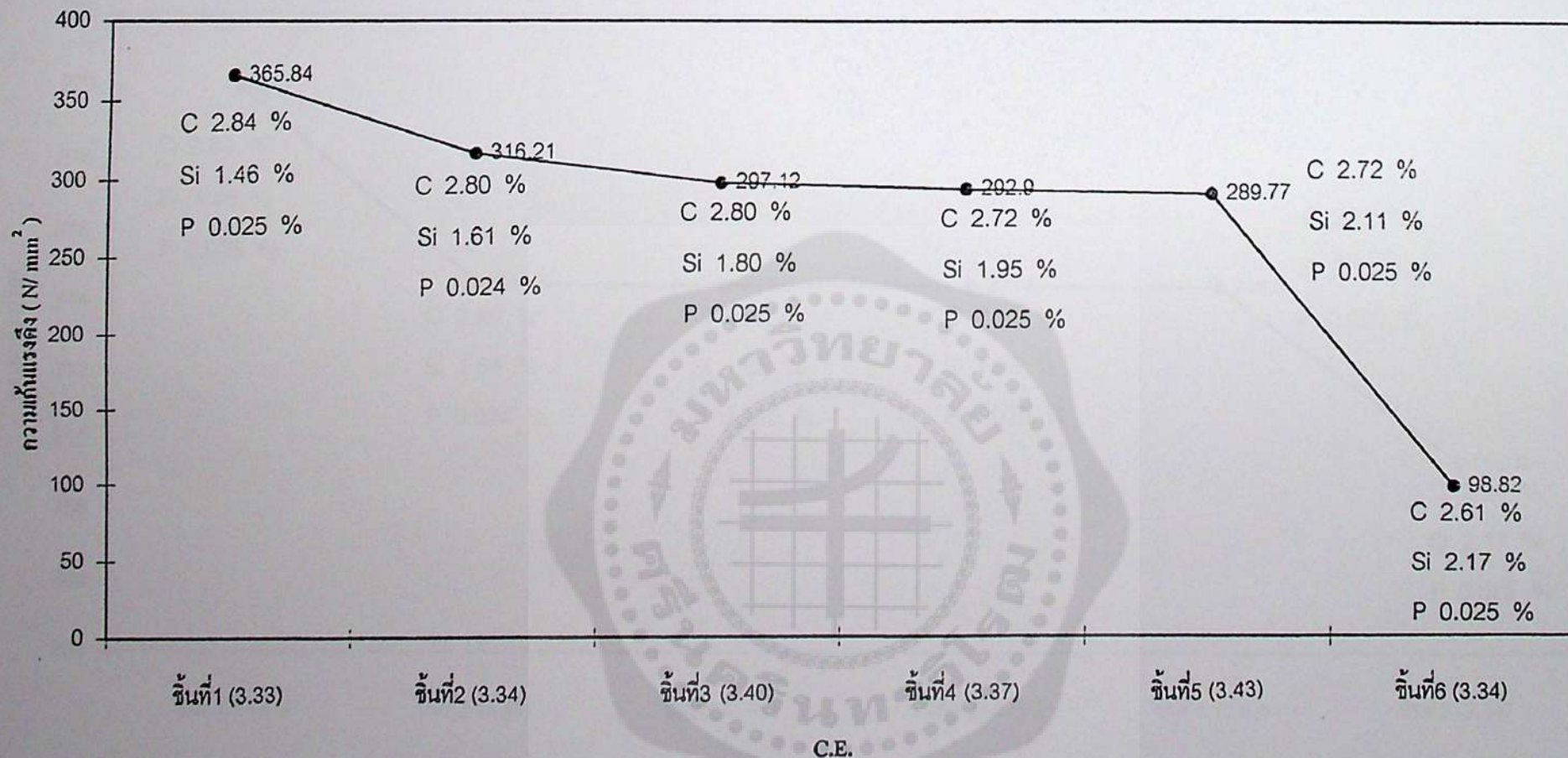
| ชิ้นงาน | เปอร์เซ็นต์ส่วนผสม (%) |                 |                 |      | การทดสอบ                               |                  |
|---------|------------------------|-----------------|-----------------|------|----------------------------------------|------------------|
|         | คาร์บอน<br>(C)         | ซิลิกอน<br>(Si) | ฟอสฟอรัส<br>(P) | C.E. | ความเค้นแรงดึง<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ความแข็ง<br>(HB) |
| 1.      | 2.84                   | 1.46            | 0.025           | 3.33 | 365.84                                 | 220.0            |
| 2.      | 2.80                   | 1.61            | 0.024           | 3.34 | 316.21                                 | 214.50           |
| 3.      | 2.80                   | 1.80            | 0.025           | 3.40 | 297.12                                 | 214.50           |
| 4.      | 2.72                   | 1.95            | 0.025           | 3.37 | 292.90                                 | 214.50           |
| 5.      | 2.72                   | 2.11            | 0.025           | 3.43 | 289.77                                 | 214.50           |
| 6.      | 2.61                   | 2.17            | 0.025           | 3.34 | 98.82                                  | 209.50           |



ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบส่วนผสมและสมบัติเชิงกลของการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 2

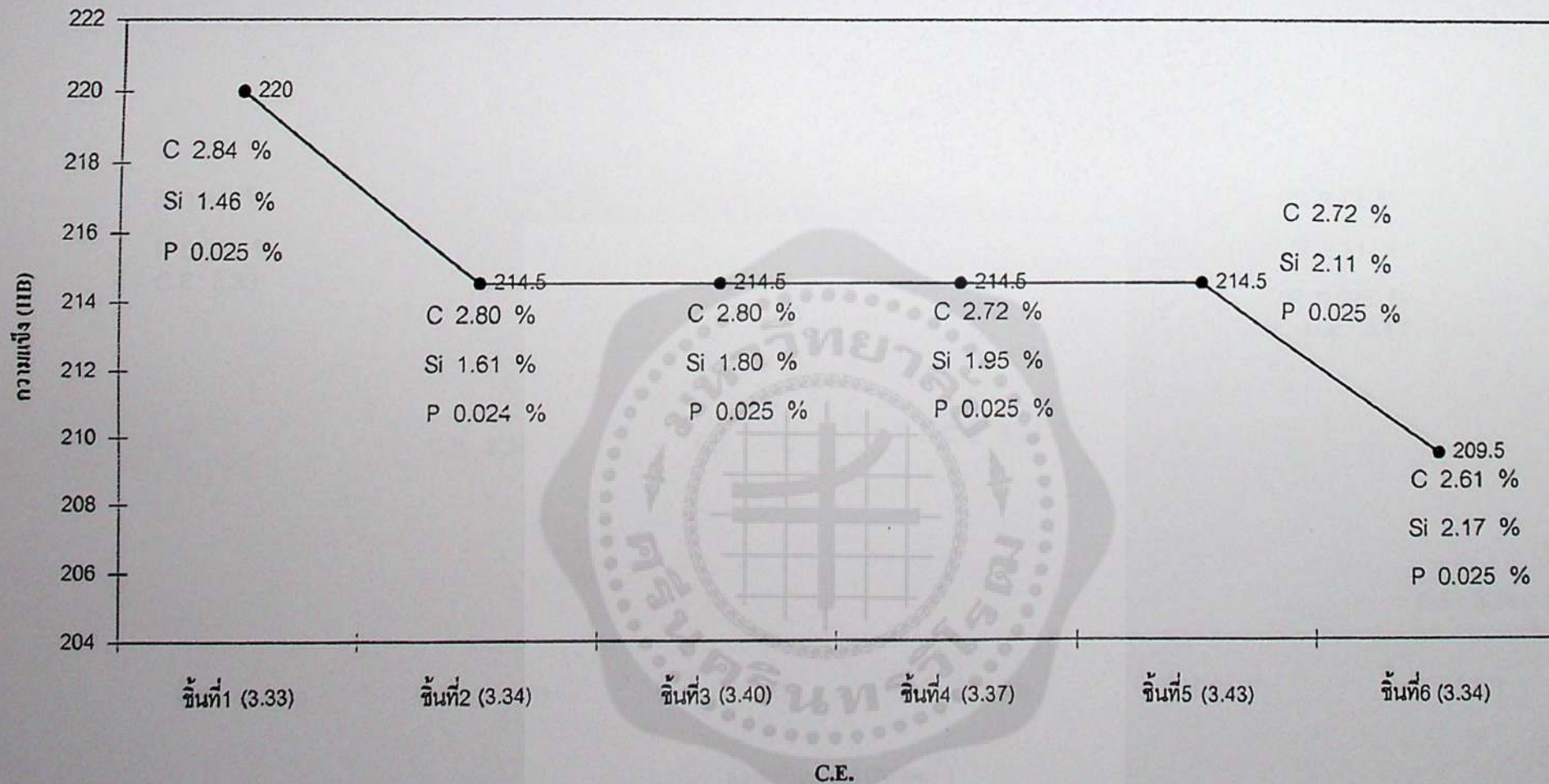
| ชิ้นงาน | เปอร์เซ็นต์ส่วนผสม (%) |                 |                 |      | การทดสอบ                               |                  |
|---------|------------------------|-----------------|-----------------|------|----------------------------------------|------------------|
|         | คาร์บอน<br>(C)         | ซิลิกอน<br>(Si) | ฟอสฟอรัส<br>(P) | C.E. | ความเค้นแรงดึง<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ความแข็ง<br>(HB) |
| 1.      | 3.32                   | 1.08            | 0.022           | 3.68 | 236.43                                 | 192.00           |
| 2.      | 3.38                   | 1.61            | 0.023           | 3.92 | 217.18                                 | 179.00           |
| 3.      | 3.47                   | 2.16            | 0.023           | 4.19 | 159.05                                 | 168.50           |
| 4.      | 3.49                   | 2.68            | 0.023           | 4.39 | 121.26                                 | 154.00           |
| 5.      | 3.46                   | 3.24            | 0.024           | 4.54 | 113.20                                 | 149.50           |
| 6.      | 3.47                   | 3.79            | 0.024           | 4.74 | 107.90                                 | 121.00           |





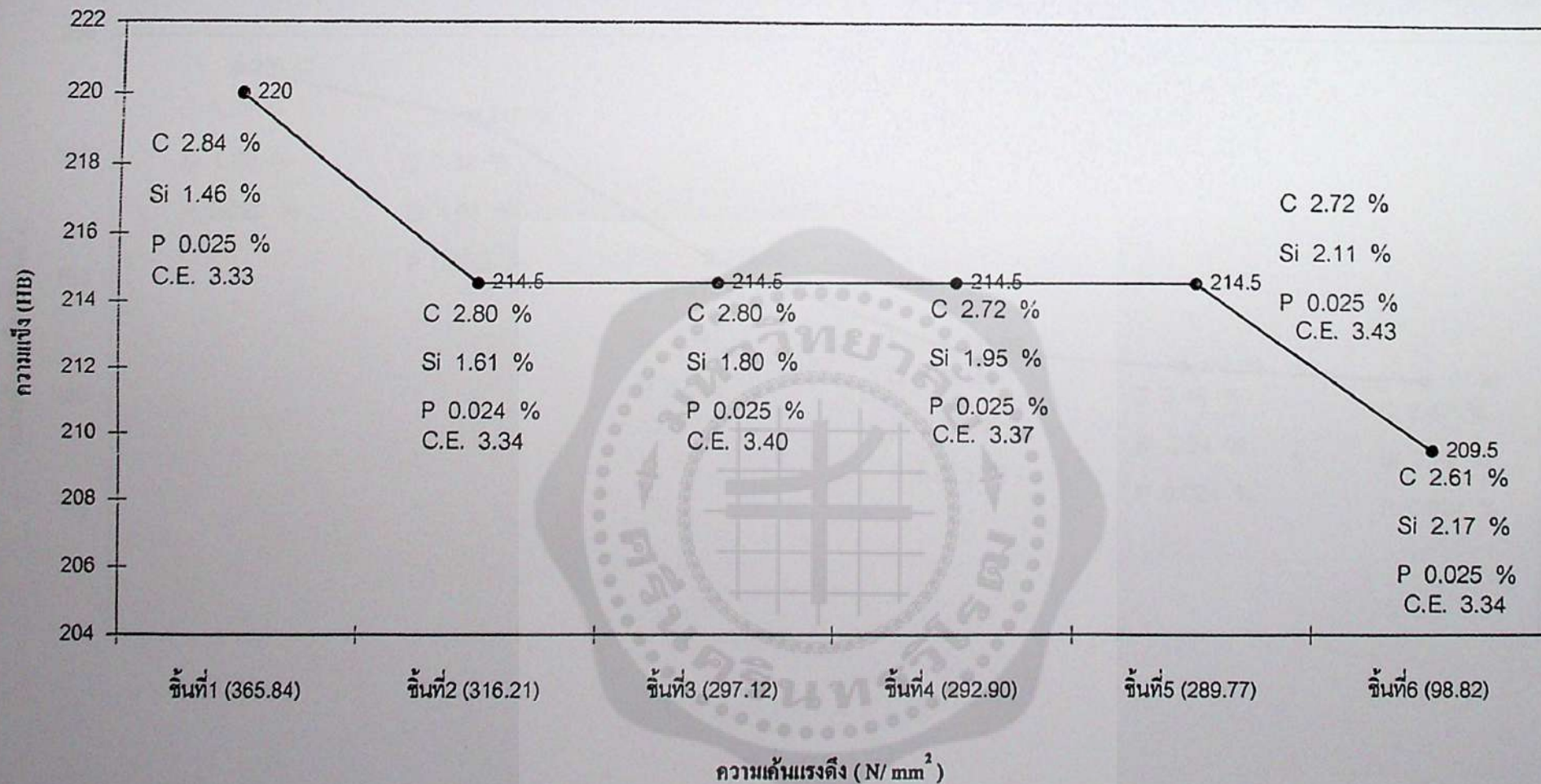
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า C.E. และความเค้นแรงดึง ในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1





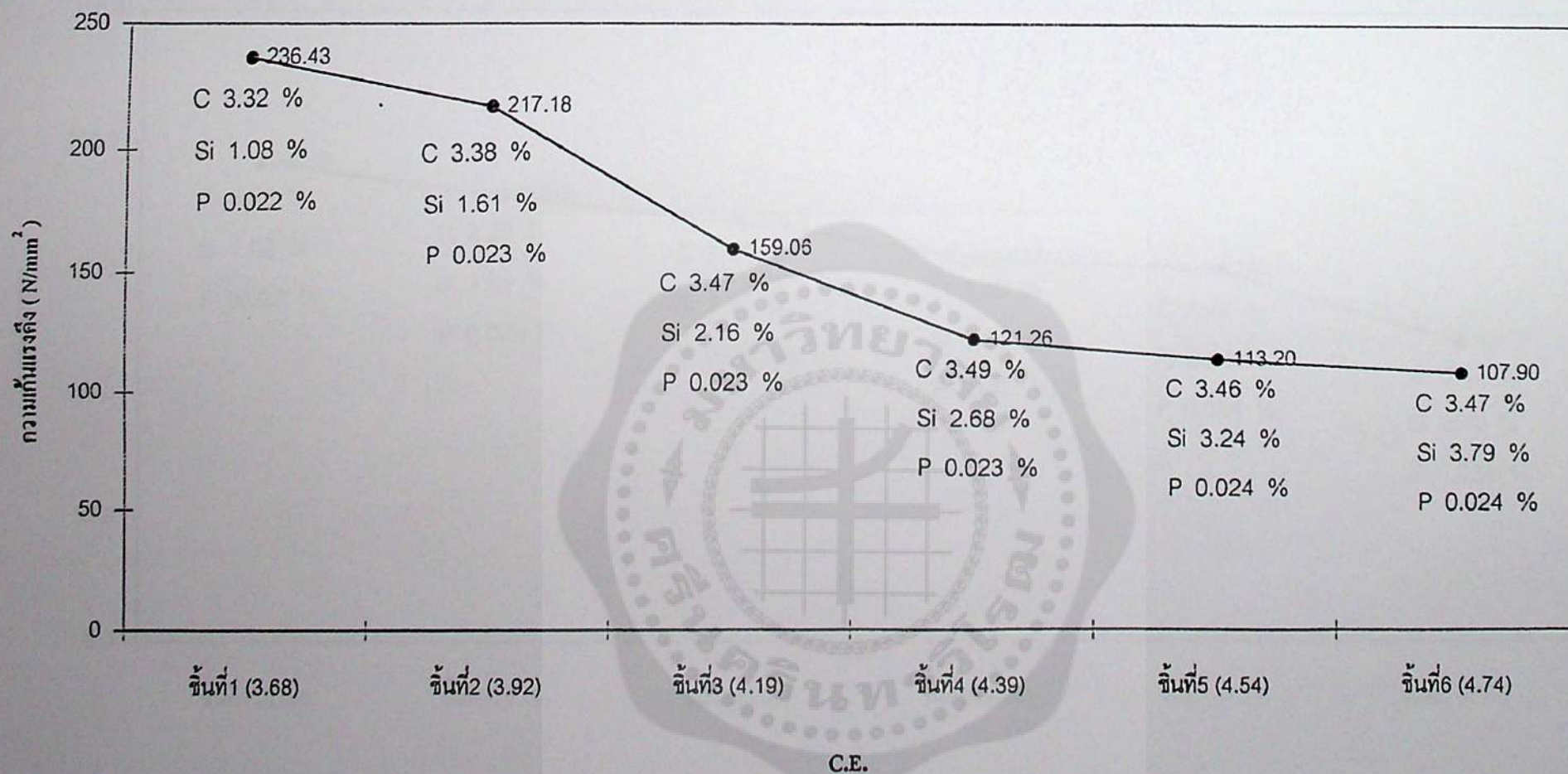
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า C.E. และความแข็งในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1





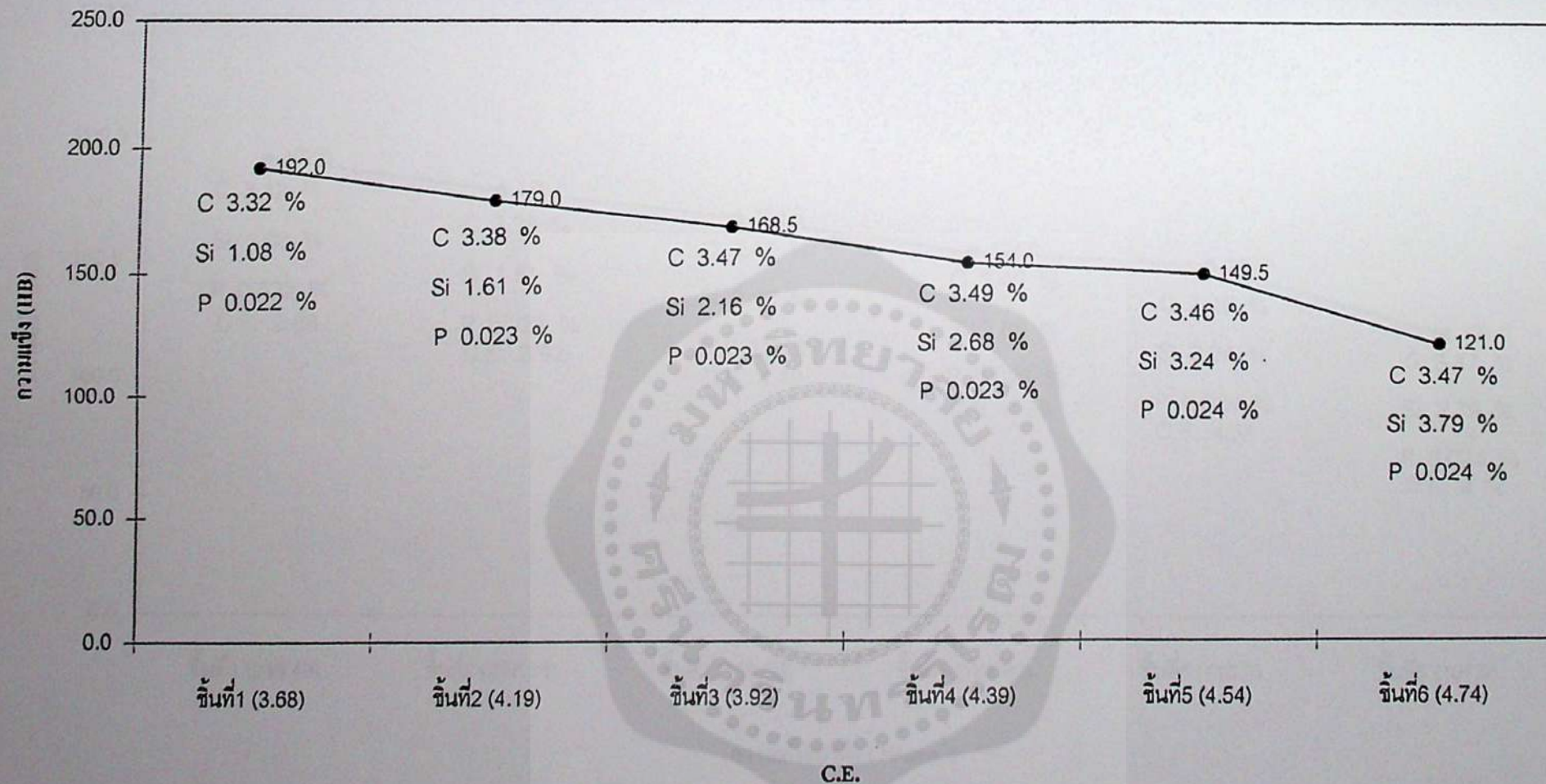
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ความเค้นแรงดึง และความแข็งในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 1





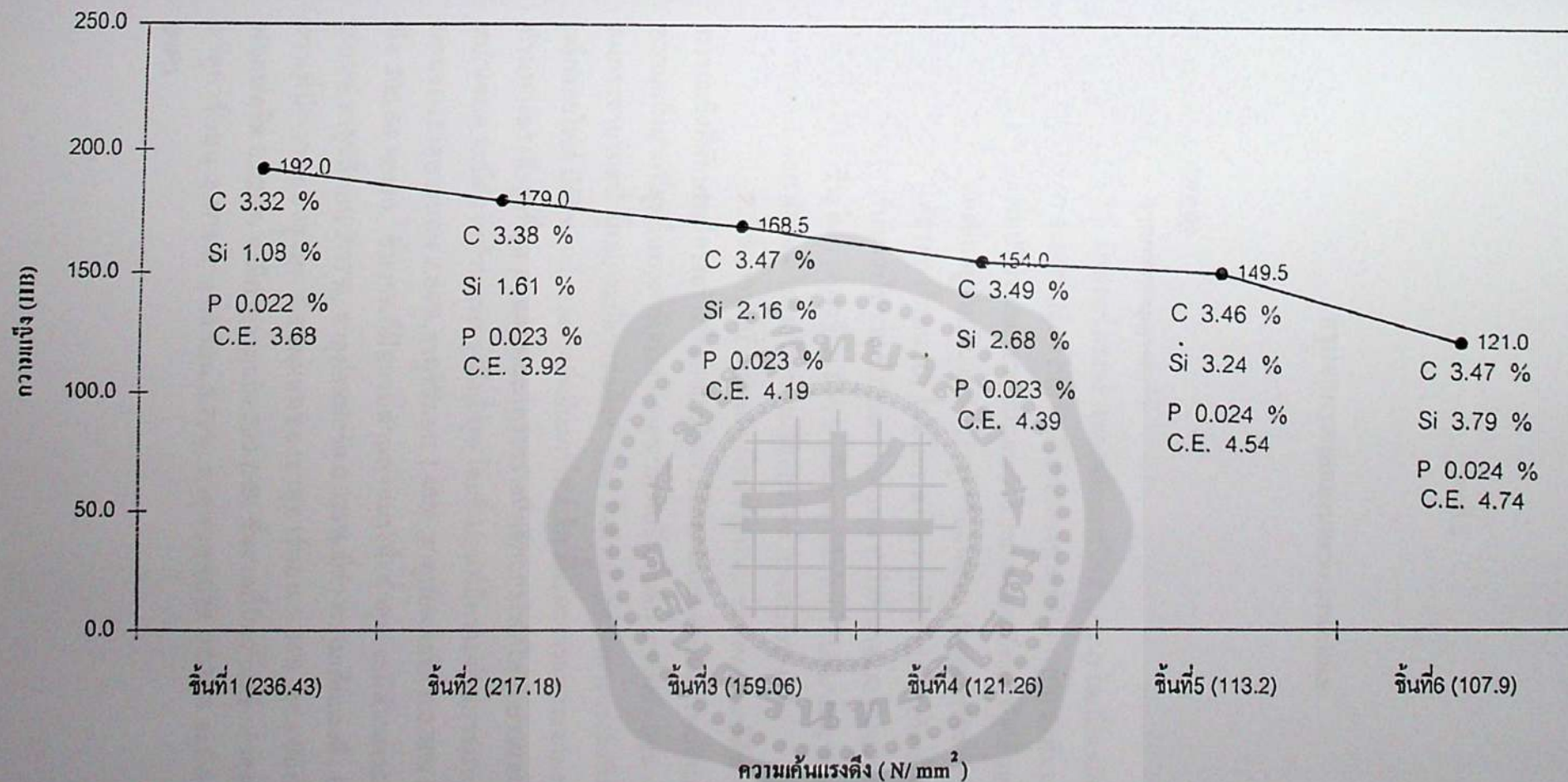
รูปที่ 4.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า C.E. และความเค้นแรงดึงในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 2





รูปที่ 4.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า C.E. และความแข็งแรงในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 2





รูปที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า ความเค้นแรงดึง และความแข็งแรงในการหล่อชิ้นงานครั้งที่ 2



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า

1. ลักษณะโครงสร้างของผลึกแกรไฟต์ (เกรน) ในเนื้อเหล็กหล่อสีเทาดังรูปที่ 4.5 ถึง รูปที่ 4.16 จะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณของธาตุซิลิกอน (Si) ที่เติมลงในขบวนการหล่อ โดยมีผลให้เมื่อเพิ่มปริมาณของธาตุซิลิกอน (Si) ขนาดของผลึกแกรไฟต์ (เกรน) ใหญ่ขึ้น หรือ ยาวขึ้นแต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุคาร์บอนด้วย เนื่องจากว่าธาตุซิลิกอน (Si) จะรวมตัวกับเหล็ก ทำให้ธาตุคาร์บอน (C) ไม่มีโอกาสที่จะรวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นซีเมนไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ได้ ดังนั้นธาตุคาร์บอนจะไปรวมตัวกับแกรไฟต์แทน ทำให้ขนาดและความยาวของผลึกแกรไฟต์ ใหญ่หรือยาวขึ้น ในทางตรงข้าม ถ้าหากเติมธาตุซิลิกอน ในปริมาณมาก แต่ปริมาณของธาตุคาร์บอน มีน้อย ลักษณะโครงสร้างของผลึกแกรไฟต์ อาจจะเล็กลงได้

2. ชิ้นงานที่เย็นตัวแล้วเมื่อนำไปทำการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า ในด้านความแข็งที่ลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์ มีลักษณะเล็ก สั้นและการแผ่กระจายสม่ำเสมอจะมีความแข็งมากที่สุดในทางกลับกันที่ลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์ มีขนาดใหญ่ ยาวและการแผ่กระจายไม่สม่ำเสมอ จะมีความแข็งต่ำที่สุด ในด้านการต้านทานแรงดึงที่ลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์ มีลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์เล็ก สั้นและการแผ่กระจายสม่ำเสมอ จะมีความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ส่วนลักษณะโครงสร้างที่ผลึกแกรไฟต์ใหญ่ ยาวและการแผ่กระจายไม่สม่ำเสมอ จะมีความต้านทานแรงดึงต่ำสุด โดยชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด จะมีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน 2.84%, ธาตุซิลิกอน 1.46%, ธาตุฟอสฟอรัส 0.025% มีค่า ความเค้นแรงดึง  $365.84 \text{ N/mm}^2$  ชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำสุด จะมีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน 2.61%, ธาตุซิลิกอน 2.17%, ธาตุฟอสฟอรัส 0.025% มีค่า ความเค้นแรงดึง  $98.82 \text{ N/mm}^2$  ชิ้นงานที่มีความแข็งสูงสุด มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน 2.84%, ธาตุซิลิกอน 1.46%, ธาตุฟอสฟอรัส 0.025% จะมีค่าความแข็ง 220 (HB) ชิ้นงานที่มีความแข็งต่ำสุด จะมีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน 3.47%, ธาตุซิลิกอน 3.79%, ธาตุฟอสฟอรัส 0.024% จะมีค่าความแข็ง 121 (HR)



### ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองครั้งต่อไปควรมีการเปลี่ยนชนิดของวัสดุแบบหล่อ ชนิดและอุณหภูมิในการหล่อ เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบลักษณะของโครงสร้างและสมบัติทางกล
2. ในการทดลองครั้งต่อไป ควรมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของธาตุประกอบอื่นๆ เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางกล





## บรรณานุกรม

กิตติพัฒน์ ปณิษฐาภรณ์, การทดสอบความแข็ง, กรุงเทพมหานคร : สถาบันพัฒนา อุตสาหกรรม  
เครื่องจักรกล และโลหะ.

กิตติพัฒน์ ปณิษฐาภรณ์ และระพี เชื้อประทุม, การทดสอบด้วยแรงดึง, กรุงเทพมหานคร :  
สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล และโลหะ.

กัณฑ์วิชณ์ พลุปราชญ์, วัสดุวิศวกรรม, นครนายก : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ,  
2540.

ชวลิต เขียงกุล, โลหะวิทยา, กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2542.

บัญญัติ ใจชื่น , การออกแบบงานหล่อ , กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย –  
ญี่ปุ่น), 2526

ประเสริฐ ก้วยสมบูรณ์, วัสดุช่าง 1, กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ  
นครเหนือ.

มานพ ดันตะระบัณฑิตย์, งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริม  
เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2531.

ศิริชัย โพธิ์ตาปะนะ และชาญเดช พิสิษฐ์ไพบูลย์, ทรายทำแบบหล่อโลหะ, กรุงเทพมหานคร :  
สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล และโลหะ.

สุรสิทธิ์ แก้วพระอินทร์, โลหะวิทยา, กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2541.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กหล่อสีเทา มอก. 536-2537, กรุงเทพมหานคร, 2527.

หิรัส สุตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา, หล่อโลหะ, พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพมหานคร : ควงกมล,  
2527.

Donald R. Askeland, The Science And Engineering of Materials, USA : Mc Graw Hill,  
1989.

William F. Smith, Principles of Materials Science And Engineering, USA : Mc Graw Hill,  
1990.



ภาคผนวก ก

ตารางสำหรับการคำนวณ



### ตารางที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงอัตราส่วนของธาตุต่างๆ ตามมาตรฐานญี่ปุ่น

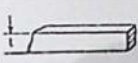
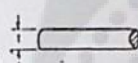
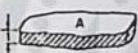
| Material Type | Composition |           |           |        |       |
|---------------|-------------|-----------|-----------|--------|-------|
|               | C           | Si        | Mn        | P      | S     |
| FC15          | 3.5 – 3.8   | 2.8 – 2.3 | 0.5 – 0.8 | < 0.25 | < 0.1 |
| FC20          | 3.3 – 3.6   | 2.3 – 1.8 | 0.6 – 0.9 | < 0.20 | < 0.1 |
| FC25          | 3.2 – 3.5   | 2.2 – 1.7 | 0.6 – 0.9 | < 0.15 | < 0.1 |
| FC30          | 3.1 – 3.3   | 2.1 – 1.6 | 0.6 – 0.9 | < 0.12 | < 0.1 |
| FC35          | 3.9 – 3.2   | 2.0 – 1.5 | 0.7 – 0.1 | < 0.10 | < 0.1 |

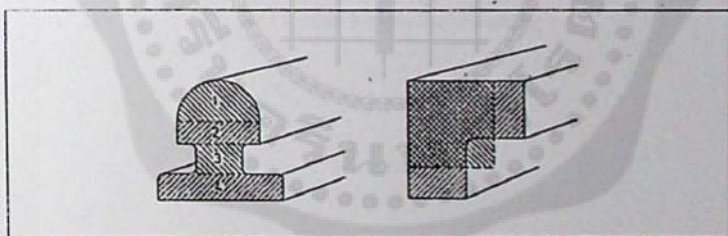
ตารางภาคผนวกที่ 2 แสดงค่าคงที่ของแม่พิมพ์ขึ้นกับสมบัติและอุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะ  
ที่ 1400 °C

| วัสดุทำแบบ      | ค่า K (mm <sup>-2</sup> ) |
|-----------------|---------------------------|
| ทองแดง          | 2.48                      |
| เหล็กกล้า       | 2.42                      |
| แกรไฟต์         | 2.04                      |
| ซิลิกอนคาร์ไบด์ | 1.00                      |
| ทรายเซอร์คอน    | 0.75                      |
| ทรายแก้ว        | 0.61                      |



ตารางภาคผนวกที่ 3 แสดงค่าโมดูลัสของลักษณะต่างๆ

| Shape                                                                                                                      | Volume<br>$V$         | Area<br>$A$           | Modulus<br>$V/A$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| Sphere<br>                                | $\frac{\pi t^3}{6}$   | $\pi t^2$             | $\frac{t}{6}$    |
| Cylinder<br>$h = t$<br>                   | $\frac{\pi t^3}{4}$   | $\frac{3 \pi t^2}{6}$ | $\frac{t}{6}$    |
| Cube<br>                                  | $t^3$                 | $6t^2$                | $\frac{t}{6}$    |
| Bar<br>(square<br>semi infinite)<br>      | $t^2 l$               | $4tl$                 | $\frac{t}{4}$    |
| Bar<br>(cylindrical<br>semi infinite)<br> | $\frac{\pi t^2 l}{4}$ | $\pi tl$              | $\frac{t}{4}$    |
| Plate<br>(semi infinite)<br>              | $At$                  | $2A$                  | $\frac{t}{2}$    |





| ตัวชี้วัด | หน่วยวัด     | ปีงบประมาณ 2563 | ปีงบประมาณ 2564 | ปีงบประมาณ 2565 |
|-----------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1.1.1     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.2     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.3     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.4     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.5     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.6     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.7     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.8     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.9     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.1.10    | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |

| ตัวชี้วัด | หน่วยวัด     | ปีงบประมาณ 2563 | ปีงบประมาณ 2564 | ปีงบประมาณ 2565 |
|-----------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1.2.1     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.2     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.3     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.4     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.5     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.6     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.7     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.8     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.9     | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |
| 1.2.10    | จำนวนบุคลากร | 1,200           | 1,200           | 1,200           |





ตารางภาคผนวกที่ 4 แสดงค่าความแข็งบริเนลที่ขนาดความโตหัวกด 10 mm.

| ความโต<br>รอยบุ๋ม<br>(mm) | น้ำหนักที่ใช้กด (kg) |      |      |      |
|---------------------------|----------------------|------|------|------|
|                           | 3000                 | 1000 | 500  | 2000 |
| 4.00                      | 229                  | 76.3 | 38.1 | 153  |
| 4.01                      | 228                  | 75.9 | 37.9 | 152  |
| 4.02                      | 226                  | 75.5 | 37.7 | 151  |
| 4.03                      | 225                  | 75.1 | 37.5 | 150  |
| 4.04                      | 224                  | 74.7 | 37.3 | 149  |
| 4.05                      | 223                  | 74.3 | 37.1 | 149  |
| 4.06                      | 222                  | 73.9 | 37.0 | 148  |
| 4.07                      | 221                  | 73.5 | 36.8 | 147  |
| 4.08                      | 219                  | 73.2 | 36.6 | 146  |
| 4.09                      | 218                  | 72.8 | 36.4 | 146  |
| 4.10                      | 217                  | 72.4 | 36.2 | 145  |
| 4.11                      | 216                  | 72.0 | 36.0 | 144  |
| 4.12                      | 215                  | 71.7 | 35.8 | 143  |
| 4.13                      | 214                  | 71.3 | 35.6 | 143  |
| 4.14                      | 213                  | 71.0 | 35.5 | 142  |
| 4.15                      | 212                  | 70.6 | 35.3 | 141  |
| 4.16                      | 211                  | 70.2 | 35.1 | 140  |
| 4.17                      | 210                  | 69.9 | 34.9 | 140  |
| 4.18                      | 209                  | 69.5 | 34.8 | 139  |
| 4.19                      | 208                  | 69.2 | 34.6 | 138  |
| 4.20                      | 207                  | 68.8 | 34.4 | 138  |
| 4.21                      | 205                  | 68.5 | 34.2 | 137  |
| 4.22                      | 204                  | 68.2 | 34.1 | 136  |
| 4.23                      | 203                  | 67.8 | 33.9 | 136  |
| 4.24                      | 202                  | 67.5 | 33.7 | 135  |

| ความโต<br>รอยบุ๋ม<br>(mm) | น้ำหนักที่ใช้กด (kg) |      |      |      |
|---------------------------|----------------------|------|------|------|
|                           | 3000                 | 1000 | 500  | 2000 |
| 4.25                      | 201                  | 67.1 | 33.6 | 134  |
| 4.26                      | 200                  | 66.8 | 33.4 | 134  |
| 4.27                      | 199                  | 66.5 | 33.2 | 133  |
| 4.28                      | 198                  | 66.2 | 33.1 | 132  |
| 4.29                      | 198                  | 65.8 | 32.9 | 132  |
| 4.30                      | 197                  | 65.5 | 32.8 | 131  |
| 4.31                      | 196                  | 65.2 | 32.6 | 130  |
| 4.32                      | 195                  | 64.9 | 32.4 | 130  |
| 4.33                      | 194                  | 64.5 | 32.3 | 129  |
| 4.34                      | 193                  | 64.2 | 32.1 | 128  |
| 4.35                      | 192                  | 63.9 | 32.0 | 128  |
| 4.36                      | 191                  | 63.6 | 31.8 | 127  |
| 4.37                      | 190                  | 63.3 | 31.7 | 126  |
| 4.38                      | 189                  | 63.0 | 31.5 | 126  |
| 4.39                      | 188                  | 62.7 | 31.4 | 125  |
| 4.40                      | 187                  | 62.4 | 31.2 | 125  |
| 4.41                      | 186                  | 62.1 | 31.1 | 124  |
| 4.42                      | 185                  | 61.8 | 30.9 | 124  |
| 4.43                      | 185                  | 61.5 | 30.8 | 123  |
| 4.44                      | 184                  | 61.2 | 30.6 | 122  |
| 4.45                      | 183                  | 60.9 | 30.5 | 122  |
| 4.46                      | 182                  | 60.6 | 30.3 | 121  |
| 4.47                      | 181                  | 60.4 | 30.2 | 121  |
| 4.48                      | 180                  | 60.1 | 30.0 | 120  |
| 4.49                      | 179                  | 59.8 | 29.9 | 120  |



ตารางภาคผนวกที่ 4 แสดงค่าความแข็งบริเนลที่ขนาดความโตหัวกด 10 mm.(ต่อ)

| ความโต<br>รอยบุ๋ม<br>(mm) | น้ำหนักที่ใช้กด (kg) |      |      |      |
|---------------------------|----------------------|------|------|------|
|                           | 3000                 | 1000 | 500  | 2000 |
| 4.50                      | 179                  | 59.5 | 29.8 | 119  |
| 4.51                      | 178                  | 59.2 | 29.6 | 118  |
| 4.52                      | 177                  | 59.0 | 29.5 | 118  |
| 4.53                      | 176                  | 58.7 | 29.3 | 117  |
| 4.54                      | 175                  | 58.4 | 29.2 | 116  |
| 4.55                      | 174                  | 58.1 | 29.1 | 116  |
| 4.56                      | 174                  | 57.9 | 28.9 | 116  |
| 4.57                      | 173                  | 57.6 | 28.8 | 115  |
| 4.58                      | 172                  | 57.3 | 28.7 | 115  |
| 4.59                      | 171                  | 57.1 | 28.5 | 114  |
| 4.60                      | 170                  | 56.8 | 28.4 | 114  |
| 4.61                      | 170                  | 56.5 | 28.3 | 113  |
| 4.62                      | 169                  | 56.3 | 28.1 | 113  |
| 4.63                      | 168                  | 56.0 | 28.0 | 112  |
| 4.64                      | 167                  | 55.8 | 27.9 | 112  |
| 4.65                      | 167                  | 55.5 | 27.8 | 111  |
| 4.66                      | 166                  | 55.2 | 27.6 | 110  |
| 4.67                      | 165                  | 55.0 | 27.5 | 110  |
| 4.68                      | 164                  | 54.8 | 27.4 | 110  |
| 4.69                      | 164                  | 54.5 | 27.3 | 109  |
| 4.70                      | 163                  | 54.3 | 27.1 | 109  |
| 4.71                      | 162                  | 54.0 | 27.0 | 108  |
| 4.72                      | 161                  | 53.8 | 26.9 | 108  |
| 4.73                      | 161                  | 53.5 | 26.8 | 107  |
| 4.74                      | 160                  | 53.3 | 26.6 | 107  |

| ความโต<br>รอยบุ๋ม<br>(mm) | น้ำหนักที่ใช้กด (kg) |      |      |      |
|---------------------------|----------------------|------|------|------|
|                           | 3000                 | 1000 | 500  | 2000 |
| 4.75                      | 159                  | 53.0 | 26.5 | 106  |
| 4.76                      | 158                  | 52.8 | 26.4 | 106  |
| 4.77                      | 158                  | 52.6 | 26.3 | 105  |
| 4.78                      | 157                  | 52.3 | 26.2 | 105  |
| 4.79                      | 156                  | 52.1 | 26.1 | 104  |
| 4.80                      | 156                  | 51.9 | 25.9 | 104  |
| 4.81                      | 155                  | 51.7 | 25.8 | 103  |
| 4.82                      | 154                  | 51.4 | 25.7 | 103  |
| 4.83                      | 154                  | 51.2 | 25.6 | 102  |
| 4.84                      | 153                  | 51.0 | 25.5 | 102  |
| 4.85                      | 152                  | 50.7 | 25.4 | 101  |
| 4.86                      | 152                  | 50.5 | 25.3 | 101  |
| 4.87                      | 151                  | 50.3 | 25.1 | 101  |
| 4.88                      | 150                  | 50.1 | 25.0 | 100  |
| 4.89                      | 150                  | 49.8 | 24.9 | 100  |
| 4.90                      | 149                  | 49.6 | 24.8 | 99.2 |
| 4.91                      | 148                  | 49.4 | 24.7 | 98.8 |
| 4.92                      | 148                  | 49.2 | 24.6 | 98.4 |
| 4.93                      | 147                  | 49.0 | 24.5 | 98.0 |
| 4.94                      | 146                  | 48.8 | 24.4 | 97.6 |
| 4.95                      | 146                  | 48.6 | 24.3 | 97.2 |
| 4.96                      | 145                  | 48.4 | 24.2 | 96.8 |
| 4.97                      | 144                  | 48.1 | 24.1 | 96.2 |
| 4.98                      | 144                  | 47.9 | 24.0 | 95.8 |
| 4.99                      | 143                  | 47.7 | 23.9 | 95.4 |



**ตารางภาคผนวกที่ 4** แสดงค่าความแข็งแรงบริเนลที่ขนาดความโตหัวกด 10 mm.(ต่อ)

| ความโต<br>รอยบุ๋ม<br>(mm) | น้ำหนักที่ใช้กด (kg) |      |      |      |
|---------------------------|----------------------|------|------|------|
|                           | 3000                 | 1000 | 500  | 2000 |
| 5.00                      | 143                  | 47.5 | 23.8 | 95.0 |
| 5.01                      | 142                  | 47.3 | 23.7 | 94.0 |
| 5.02                      | 141                  | 47.1 | 23.6 | 94.2 |
| 5.03                      | 141                  | 46.9 | 23.5 | 93.8 |
| 5.04                      | 140                  | 46.7 | 23.4 | 93.4 |
| 5.05                      | 140                  | 46.5 | 23.3 | 93.0 |
| 5.06                      | 139                  | 46.3 | 23.2 | 92.6 |
| 5.07                      | 138                  | 46.1 | 23.1 | 92.2 |
| 5.08                      | 138                  | 45.9 | 23.0 | 91.8 |
| 5.09                      | 137                  | 45.7 | 22.9 | 91.4 |
| 5.10                      | 137                  | 45.5 | 22.8 | 91.0 |
| 5.11                      | 136                  | 45.3 | 22.7 | 90.6 |
| 5.12                      | 135                  | 45.1 | 22.6 | 90.2 |
| 5.13                      | 135                  | 45.0 | 22.5 | 90.0 |
| 5.14                      | 134                  | 44.8 | 22.4 | 89.6 |
| 5.15                      | 134                  | 44.6 | 22.3 | 89.2 |
| 5.16                      | 133                  | 44.4 | 22.2 | 88.8 |
| 5.17                      | 133                  | 44.2 | 22.1 | 88.4 |
| 5.18                      | 132                  | 44.0 | 22.0 | 88.0 |
| 5.19                      | 132                  | 43.8 | 21.9 | 87.6 |
| 5.20                      | 131                  | 43.7 | 21.8 | 87.4 |
| 5.21                      | 130                  | 43.5 | 21.7 | 87.0 |
| 5.22                      | 130                  | 43.3 | 21.6 | 86.6 |
| 5.23                      | 129                  | 43.1 | 21.5 | 86.2 |
| 5.24                      | 129                  | 42.9 | 21.5 | 85.8 |

| ความโต<br>รอยบุ๋ม<br>(mm) | น้ำหนักที่ใช้กด (kg) |      |      |      |
|---------------------------|----------------------|------|------|------|
|                           | 3000                 | 1000 | 500  | 2000 |
| 5.25                      | 128                  | 42.8 | 21.4 | 85.6 |
| 5.26                      | 128                  | 42.6 | 21.3 | 85.2 |
| 5.27                      | 127                  | 42.4 | 21.2 | 84.8 |
| 5.28                      | 127                  | 42.2 | 21.1 | 84.4 |
| 5.29                      | 126                  | 42.1 | 21.0 | 84.2 |
| 5.30                      | 126                  | 41.9 | 20.9 | 83.8 |
| 5.31                      | 125                  | 41.7 | 20.9 | 83.4 |
| 5.32                      | 125                  | 41.5 | 20.8 | 83.0 |
| 5.33                      | 124                  | 41.4 | 20.7 | 82.8 |
| 5.34                      | 124                  | 41.2 | 20.6 | 82.4 |
| 5.35                      | 123                  | 41.0 | 20.5 | 82.0 |
| 5.36                      | 123                  | 40.9 | 20.4 | 81.8 |
| 5.37                      | 122                  | 40.7 | 20.3 | 81.4 |
| 5.38                      | 122                  | 40.5 | 20.3 | 81.0 |
| 5.39                      | 121                  | 40.4 | 20.2 | 80.8 |
| 5.40                      | 121                  | 40.2 | 20.1 | 80.4 |
| 5.41                      | 120                  | 40.0 | 20.0 | 80.0 |
| 5.42                      | 120                  | 39.9 | 19.9 | 79.8 |
| 5.43                      | 119                  | 39.7 | 19.9 | 79.4 |
| 5.44                      | 119                  | 39.6 | 19.8 | 79.2 |
| 5.45                      | 118                  | 39.4 | 19.7 | 78.8 |
| 5.46                      | 118                  | 39.2 | 19.6 | 78.4 |
| 5.47                      | 117                  | 39.1 | 19.5 | 78.2 |
| 5.48                      | 117                  | 38.9 | 19.5 | 77.8 |
| 5.49                      | 116                  | 38.8 | 19.4 | 77.6 |





ภาคผนวก ค  
รูปแสดงอุปกรณ์การทดลองและการทดลอง





รูปภาคผนวกที่ 1 แสดงแบบหล่อทราย



รูปภาคผนวกที่ 2 แสดงแบบหล่อทรายเมื่อประกอบแล้ว





รูปภาคผนวกที่ 3 แสดงเตาไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ

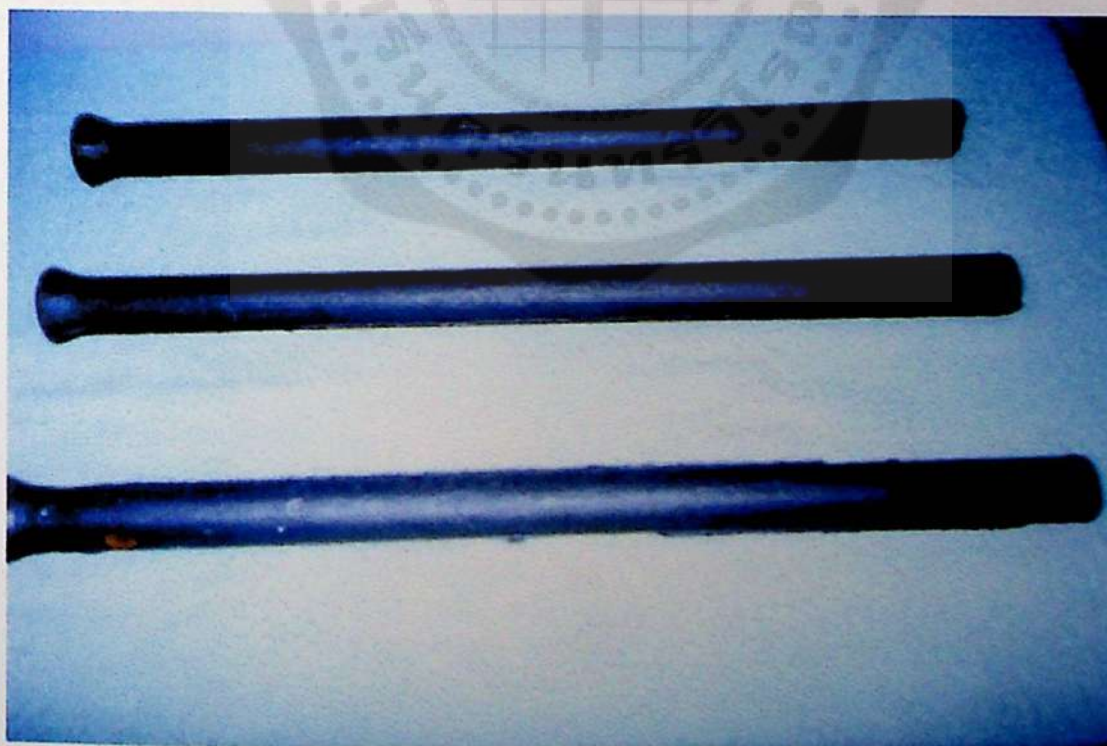


รูปภาคผนวกที่ 4 แสดงการเทน้ำเหล็กออกจากเตา





รูปภาคผนวกที่ 5 แสดงการเทน้ำเหล็กลงแบบหล่อ

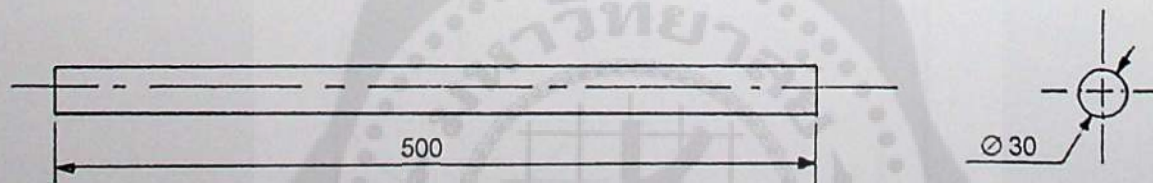


รูปภาคผนวกที่ 6 แสดงชิ้นงานเหล็กหล่อสีเทา



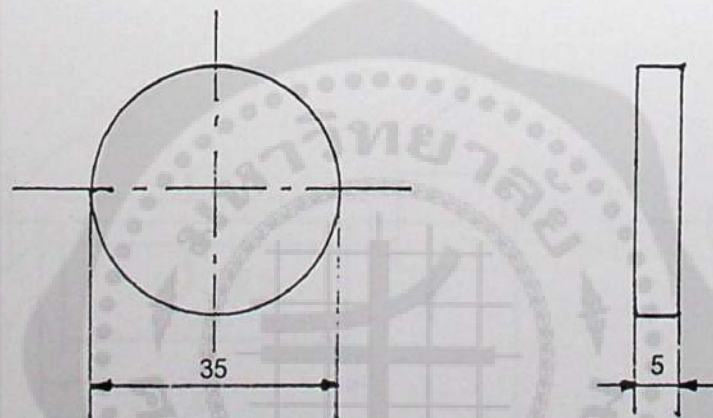






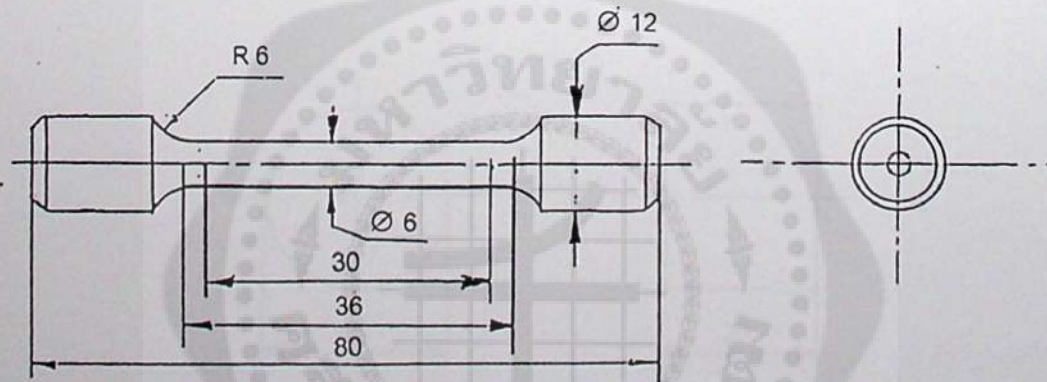
|                                     |                                |                                                                     |   |                  |                    |              |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---|------------------|--------------------|--------------|
| ลำดับที่ 1                          | จำนวน 1                        | ชื่อ ด้านหน้า,ด้านข้างและด้านบน,เหล็กหล่อสีเทา(JIS) ,ขนาด มิลลิเมตร |   |                  | -                  |              |
| ผู้เขียน<br>วิจิตร เศรษฐีรัฐกุล     | ผู้ตรวจ<br>อดิศักดิ์ ส่องสว่าง | ผู้อนุมัติ - วันที่<br>กัณฑ์วิช พลุประทุม - 17/9/42                 | - | วันที่<br>1/9/42 | มาตราส่วน<br>1:5   |              |
| มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ |                                | ชิ้นงานหล่อ                                                         |   |                  |                    |              |
|                                     |                                | 1                                                                   |   |                  | แก้ไขครั้งที่<br>- | แผ่นที่<br>- |





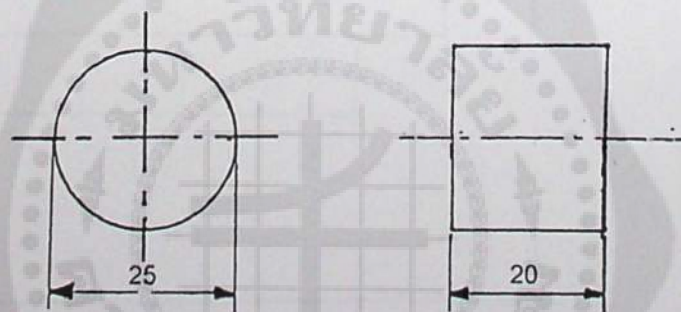
|                                     |                                |                                                              |                    |                  |                  |  |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------|------------------|------------------|--|
| ลำดับที่ 2                          | จำนวน 1                        | ชื่อ ด้านหน้าและด้านข้าง,เหล็กหล่อสีเทา(JIS) ,ขนาด มิลลิเมตร |                    |                  | -                |  |
| ผู้เขียน<br>ฐิติ นรเศรษฐ์รุกุล      | ผู้ตรวจ<br>อดิศักดิ์ ส่องสว่าง | ผู้อนุมัติ - วันที่<br>กนกทัตวิรัช พลุประทุม - 17/9/42       | -                  | วันที่<br>1/9/42 | มาตราส่วน<br>1:1 |  |
| มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ |                                | ชนิดทดสอบปริมาณธาตุประกอบ                                    |                    |                  |                  |  |
|                                     |                                | 2                                                            | แก้ไขครั้งที่<br>- | แผ่นที่<br>-     |                  |  |





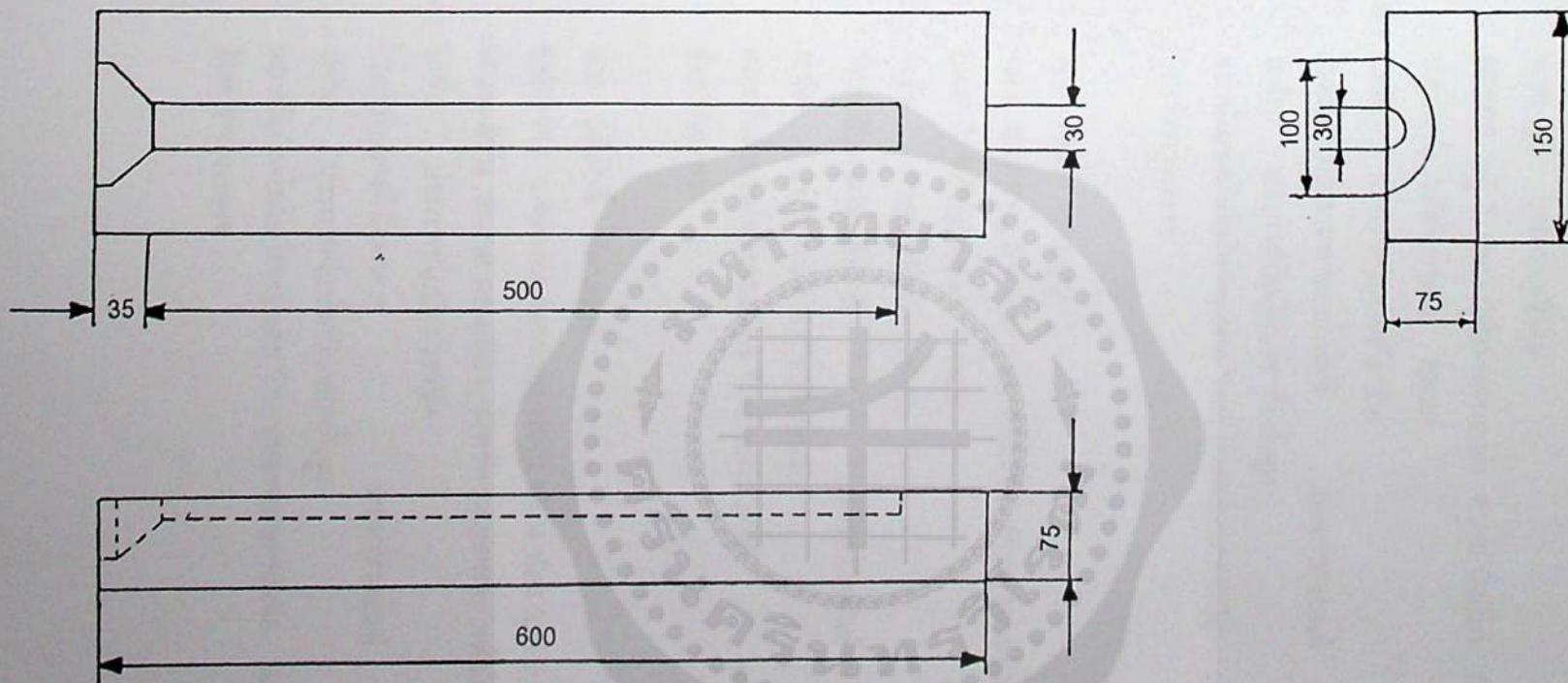
|                                     |                                |                                                                |  |                    |                  |                  |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|--|--------------------|------------------|------------------|
| ลำดับที่ 3                          | จำนวน 1                        | ชื่อ ด้านหน้าและด้านข้าง, เหล็กหล่อสีเทา (JIS), ขนาด มิลลิเมตร |  |                    | -                |                  |
| ผู้เขียน<br>ฐิติ นรเศรษฐ์กุล        | ผู้ตรวจ<br>อดิศักดิ์ ส่องสว่าง | ผู้อนุมัติ - วันที่<br>กัณฑ์วณิช พลุประเสริฐ - 17/9/42         |  | -                  | วันที่<br>1/9/42 | มาตราส่วน<br>1:1 |
| มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ |                                | ชนิดทดสอบความต้านทานแรงดึง                                     |  |                    |                  |                  |
|                                     |                                | 3                                                              |  | แก้ไขครั้งที่<br>- | แผ่นที่<br>-     |                  |





|                                     |         |                                                              |                                                      |   |                    |                  |
|-------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---|--------------------|------------------|
| ลำดับที่ 4                          | จำนวน 1 | ชื่อ ด้านหน้าและด้านข้าง,เหล็กหล่อสีเทา(JIS) ,ขนาด มิลลิเมตร |                                                      |   | -                  |                  |
| ผู้เขียน<br>จิตติ นรเศรษฐ์รกุล      |         | ผู้ตรวจ<br>อดิศักดิ์ ส่องสว่าง                               | ผู้อนุมัติ - วันที่<br>กัณฑ์วณิช พลุประทุม - 17/9/42 | - | วันที่<br>1/9/42   | มาตราส่วน<br>1:1 |
| มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ |         |                                                              | ขึ้นทดสอบความแข็ง                                    |   |                    |                  |
|                                     |         |                                                              | 4                                                    |   | แก้ไขครั้งที่<br>- | แผ่นที่<br>-     |





|                                     |                                |                                                          |             |                    |                  |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------|--------------------|------------------|
| ลำดับที่ 5                          | จำนวน 1                        | ชื่อ ด้านหน้า,ด้านข้างและด้านบน,ทรายหล่อ, ขนาด มิลลิเมตร |             |                    | -                |
| ผู้เขียน<br>วิจิตร เศรษฐกิจกุล      | ผู้ตรวจ<br>อดิศักดิ์ ส่องสว่าง | ผู้ออกแบบ - วันที่<br>กนกพรวิรัช พลุประเสริฐ - 17/9/42   | -           | วันที่<br>1/9/42   | มาตราส่วน<br>1:5 |
| มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ |                                |                                                          | แบบหล่อทราย |                    |                  |
|                                     |                                |                                                          | 5           | แก้ไขครั้งที่<br>- | แผ่นที่<br>-     |



### ประวัติผู้จัดทำโครงการวิศวกรรม

- ชื่อ** นาย จูติ นรเศรษฐีรกุล
- ที่อยู่** 69/802 หมู่ 3 ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล บึงยี่โก อำเภอ ธัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 10130
- การศึกษา** ระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพ  
โรงเรียนพระรามหกเทคโนโลยี แผนกช่างยนต์ จังหวัดกรุงเทพฯ  
ระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ แผนกช่างยนต์  
จังหวัดกรุงเทพฯ
- ชื่อ** นาย สมพร จวบบุญ
- ที่อยู่** 49/1 ซอย จรูญ 5 หมู่ 5 ถนน หนองจิก ตำบล รุสะมิแล อำเภอ เมือง จังหวัด ปัตตานี รหัสไปรษณีย์ 94100
- การศึกษา** ระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพ  
วิทยาลัยเทคนิคปัตตานี แผนกช่างยนต์ จังหวัดปัตตานี  
ระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ แผนกช่างยนต์  
จังหวัดสงขลา
- ชื่อ** นาย อติศักดิ์ ส่องสว่าง
- ที่อยู่** 553/1111 แพลดทหารอากาศทุ่งสีกัน ฟป.4 ห้อง 323 หมู่ 3 ถนน เดชะตุงคะ ตำบล สีกัน อำเภอ ดอนเมือง จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10210
- การศึกษา** ระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพ  
โรงเรียนช่างฝีมือทหาร แผนกช่างยนต์ จังหวัดกรุงเทพฯ  
ระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง  
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ แผนกช่างยนต์  
จังหวัดกรุงเทพฯ