

# อิทธิพลของธาตุผสมและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของเหล็กหล่อกึ่งแข็ง

นุชธนา พูลทอง<sup>1</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

## บทคัดย่อ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง (semi-solid metal processing) เป็นเทคโนโลยีการผลิตใหม่ที่ใช้ในการผลิตวัสดุที่มีสมบัติพิเศษ ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถพัฒนาเหล็กหล่อให้มีคุณภาพสูงขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาทที่หล่อด้วยกระบวนการปกติเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อที่ผ่านการกวนในสถานะที่เป็นโลหะกึ่งแข็ง ผลการทดลองพบว่าเหล็กหล่อเทาทที่หล่อด้วยกระบวนการปกติที่มีการเติมธาตุผสมมีความแข็ง (hardness) และความแข็งแรง (tensile strength) สูงกว่าเหล็กหล่อเทาทที่หล่อด้วยกระบวนการปกติและไม่เติมธาตุผสม อย่างไรก็ตามเมื่อนำเหล็กหล่อเทาทที่ไม่เติมธาตุผสมผ่านการกวนในสถานะที่เป็นโลหะกึ่งแข็งพบว่าได้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กหล่อเทาทที่หล่อด้วยกระบวนการปกติที่มีการเติมธาตุผสมทุกส่วนผสม เนื่องจากโครงสร้างในลักษณะก่อนกลมที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านการกวนในสถานะที่เป็นโลหะกึ่งแข็ง ธาตุผสมที่เติมมีผลน้อยมากต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อที่ผ่านการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง แต่จะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่มีผลสูงที่สุดต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อที่ผ่านการกวนในสถานะที่เป็นโลหะกึ่งแข็งคืออัตราการเย็นตัว

คำสำคัญ : กระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง / เหล็กหล่อเทาท / แรงเหวี่ยง

<sup>1</sup> อาจารย์ประจำ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ

# **Influence of Chemical Composition and Cooling Rate on Structure and Mechanical Properties of Semi-solid Cast Iron**

**Nuchthana Poolthong<sup>1</sup>**

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

---

## **Abstract**

Semi-solid metal processing of alloys is one of the key technologies for producing advance materials. High quality cast iron is being developed by semi-solid processing. To identify effects of alloying elements, a series of experiments were carried out to compare microstructure and mechanical properties of semi-solid processing cast iron and conventional gray cast iron. It was shown that increasing alloying elements of the conventional gray cast iron gave higher hardness and tensile strength. However, the tensile strength of the unalloyed semi-solid cast iron was higher than that of the conventional gray cast iron, for every composition, as a result of the globular structure produced by semi-solid processing. Alloying elements had little effect on the tensile strength of semi-solid cast iron, but the elongation was markedly affected. The tensile strength of semi-solid cast iron, however, was much dependent on the cooling rate.

**Keywords :** Semi-solid Metal Processing / Gray Iron / Centrifugal Force

---

<sup>1</sup> Lecturer, Materials Technology Program, School of Energy and Materials.

## 1. บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง (semi-solid metal processes) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสถานะกึ่งแข็ง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างใกล้เคียงกับแบบที่ต้องการ โลหะกึ่งแข็งนี้มีพฤติกรรมการไหลตัว (fluidity behavior) ที่ดี เนื่องจากมีการควบคุมให้โครงสร้างส่วนที่แข็งตัวมีลักษณะค่อนข้างกลม (globular) ไม่เป็นเดนไดรต์ (non-dendrite structure) ซึ่งทำให้โลหะกึ่งแข็งมีพฤติกรรมการไหลตัวคล้ายของเหลวเมื่ออัดโลหะกึ่งแข็งเข้าแม่พิมพ์ ในลักษณะเช่นเดียวกับการหล่อแบบฉีด ชิ้นงานที่ได้มีผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ดี มีคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบเดนไดรต์ เนื่องจากสามารถลดปริมาณการหดตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแบบเดนไดรต์ [1][2]

การผลิตชิ้นส่วนโดยวิธีการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งสามารถแก้ปัญหาหลายประการที่พบในกรรมวิธีการหล่อปกติ ตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปโลหะที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของแข็งต่อของเหลวเป็น 60/40 ทำให้อุณหภูมิและพลังงานในการขึ้นรูปต่ำกว่าการหลอม เพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ลดการเกิดรูพรุนและโพรงอากาศของชิ้นงาน สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการทุบขึ้นรูปหรือการกลึงใส่ตัดแต่ง (machine) จากงาน wrought products เนื่องจากมีขั้นตอนในการทำงานที่น้อยกว่า สามารถนำไปทำการปรับปรุงด้วยความร้อน (heat treatment) ทำให้คุณภาพดีเทียบเท่ากับการหล่อแบบแบบฉีด (high pressure die casting) แต่มีอัตราการผลิตสูงกว่า และได้รูปร่างของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับแบบที่ต้องการ ทำให้ขั้นตอนในการตัดแต่งชิ้นงานซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายลดลง [2]

กระบวนการผลิตที่ใช้ในการควบคุมการแข็งตัวของโลหะเพื่อให้ได้โครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์นั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่นการทำเกรนโลหะเอียดโดยเติมสารเคมี (chemical grain refining) การกวนโดยใช้แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic stirring) การกวนโดยใช้แรงทางกล (mechanical stirring) เป็นต้น [3] ซึ่งในแต่ละวิธีมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการควบคุมการแข็งตัวของโลหะเพื่อให้ได้โครงสร้างที่ไม่เป็นเดนไดรต์โดยใช้แรงทางกล (mechanical stirring)

ในปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือกลุ่มของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น อลูมิเนียม และแมกนีเซียม ซึ่งพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องจนได้โลหะผสมอลูมิเนียม แมกนีเซียมที่มีความแข็งแรงสูงแต่น้ำหนักเบา อันเป็นผลมาจากแรงผลักดันของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา เพื่อให้การใช้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูงสุด [4] สำหรับการปรับกระบวนการผลิตมาเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงเช่นโลหะกลุ่มเหล็ก โลหะผสมโคบอล และโลหะผสมไทเทเนียม ยังคงมีข้อจำกัดอยู่มาก แต่คาดว่าด้วยกระบวนการผลิตนี้ จะสามารถผลิตโลหะที่มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นได้ จากงานวิจัยของ Qiu และคณะ [5] ได้ศึกษาถึงการกวนเหล็กหล่อเทาโดยใช้แรงทางกล ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการเย็นตัว (cooling rate) ที่เหมาะสม และสถานะที่มีแรงเฉือนสูง (high shear condition) ออสเทนไนต์ (primary austenite) ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นทรงกลม (spheroidal) และมีขนาดเล็ก Nomura และคณะ [6] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวในแบบหล่อ (mould filling characteristic) ของเหล็กหล่อเทา

กึ่งแข็งพบว่าค่ากำลังบิด (torque) ของเหล็กหล่อเทาที่แข็งที่เหมาะสมในการเทลงแบบหล่ออยู่ในช่วง  $2^4 \times 10^{-2}$  Nm ซึ่งจะมี apparent viscosity ไม่เกิน 10 Pas และมีปริมาตรของเหลวไม่เกินร้อยละ 35 Nomura และ Muubo [7] ได้ทำการทดลองเทเหล็กหล่อเทาที่แข็งลงในแบบหล่อทรายผลการทดลองพบว่าสามารถเป็นชิ้นงานขนาดเล็กที่มีสมบัติทางกลดีเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อเทาที่หล่อจากกรรมวิธีปกติ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเอากระบวนการหล่อที่แข็งมาใช้ในผลิตเหล็กหล่อเทาที่มีคุณภาพสูง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังคงไม่มีการศึกษาถึงธาตุผสมที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาที่แข็ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเหล็กหล่อเทาที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่แข็ง โดยควบคุมการแข็งตัวของโลหะโดยใช้แรงทางกล มีขอบเขตของงานวิจัยคือศึกษาถึงอิทธิพลของธาตุผสมและอัตราการเย็นตัวที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อที่แข็งเปรียบเทียบกับเหล็กหล่อเทาที่หล่อด้วยวิธีปกติ

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. หล่อเหล็กหล่อเทา 10 ส่วนผสม ในตารางที่ 1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทดสอบสมบัติทางกล
2. นำเหล็กหล่อเทาแต่ละส่วนผสมจำนวนส่วนผสมละ 500 กรัม หลอมในเตาหลอมตั้งในรูปที่ 1 การหล่อหลอมทำในเบ้าแมกนีเซีย (magnesia crucible) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. ควบคุมบรรยากาศโดยใช้แก๊สอาร์กอน ทำการหลอมที่อุณหภูมิ 1450 °ซ
3. ใช้แท่งอลูมินาเป็นตัวกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 มม. ดังในรูปที่ 2 อัตราการกวน (rotation speed) คือ 300 รอบต่อนาที หรือ 5 รอบต่อวินาที เริ่มกวนที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิการแข็งตัวและหยุดกวนน้ำโลหะเมื่ออุณหภูมิลดลงมาอยู่ในช่วงที่แข็ง อัตราการลดลงของอุณหภูมิหน้าโลหะ (cooling rate) คือ 0.034 องศาต่อวินาที โดยคำนวณสัดส่วนของของแข็งและของเหลวที่ต้องการจาก Scheil's equation [8] หยุดกวนน้ำโลหะเมื่อมีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 20-40
4. สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จะนำเบ้าหลอมออกจากเตาไปชุบน้ำ ทูบเบ้าหลอมและตัวกวนออกจากโลหะ ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่เป็นโลหะที่แข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์ และทดสอบความแข็ง และตรวจสอบปริมาณคาร์บอนด้วยเครื่อง Electron Probe Microanalysis (EPMA)

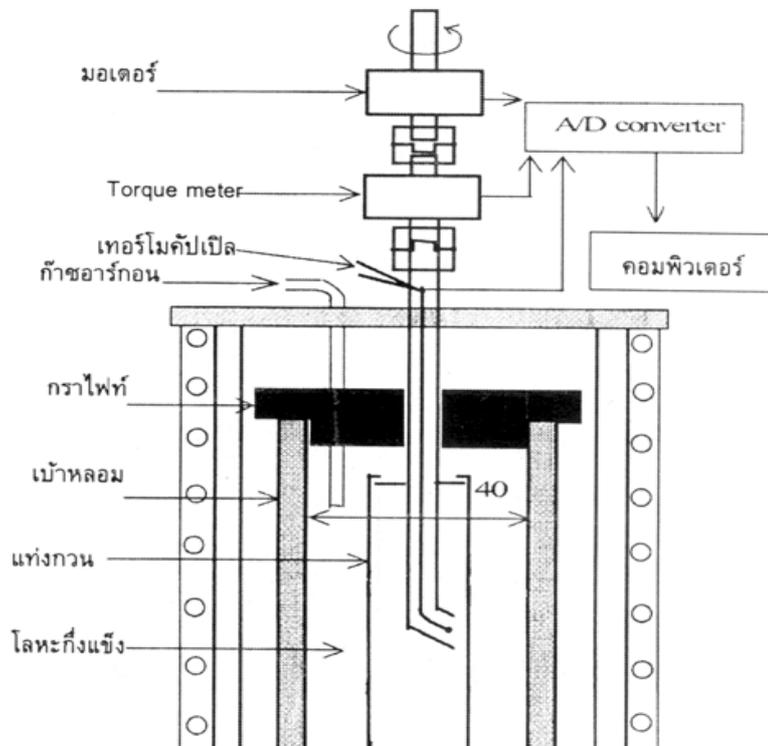
5. สำหรับการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึงจะทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วในเบ้าหลอม โดยวิธี chill-cooling ด้วยเหล็กกล้าเกรด SKD 61 ดังในรูปที่ 3 จากนั้นตัดชิ้นงานจากบริเวณ 3 มม. และ 12 มม. จากด้านบนของชิ้นงานมาทดสอบความแข็งและเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง ดังในรูปที่ 4

6. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

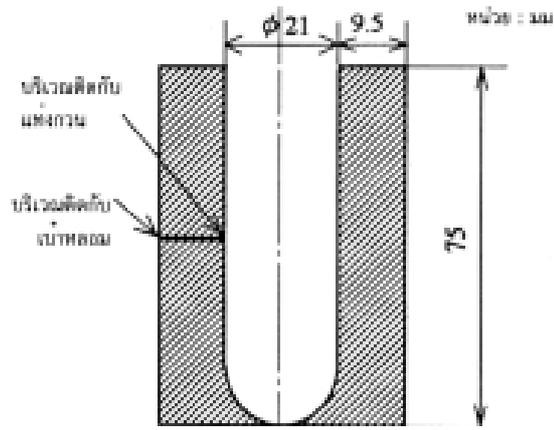
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ (mass%)

| ชิ้นงาน | C    | Si   | Mn    | P     | S     | CE   | ธาตุผสม  |
|---------|------|------|-------|-------|-------|------|----------|
| FC-1    | 2.69 | 2.34 | 0.165 | 0.029 | 0.006 | 3.48 | -        |
| FC-2    | 2.67 | 2.39 | 0.172 | 0.038 | 0.010 | 3.50 | 0.266 Cu |
| FC-3    | 2.60 | 2.48 | 0.180 | 0.039 | 0.011 | 3.44 | 0.701 Cu |
| FC-4    | 2.62 | 2.60 | 0.193 | 0.041 | 0.012 | 3.50 | 0.574 Cr |
| FC-5    | 2.56 | 2.43 | 0.191 | 0.040 | 0.012 | 3.44 | 0.917 Cr |
| FC-6    | 2.49 | 2.15 | 0.206 | 0.038 | 0.011 | 3.22 | 0.198 Mo |
| FC-7    | 2.48 | 2.16 | 0.207 | 0.040 | 0.013 | 3.21 | 0.466 Mo |
| FC-8    | 2.43 | 2.22 | 0.211 | 0.042 | 0.013 | 3.18 | 0.810 Mo |
| FC-9    | 2.69 | 2.47 | 0.140 | 0.042 | 0.013 | 3.53 | 0.801 Ni |
| FC-10   | 2.70 | 2.45 | 0.141 | 0.043 | 0.011 | 3.53 | 1.791 Ni |

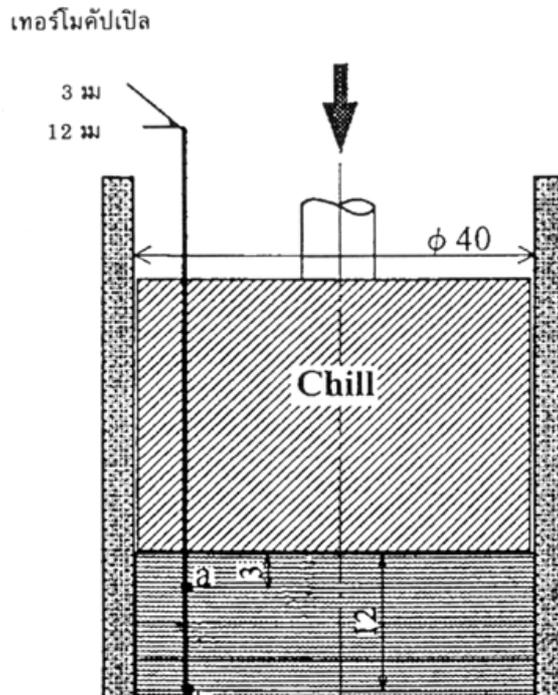
$CE = C + 1/3 (Si + P)$



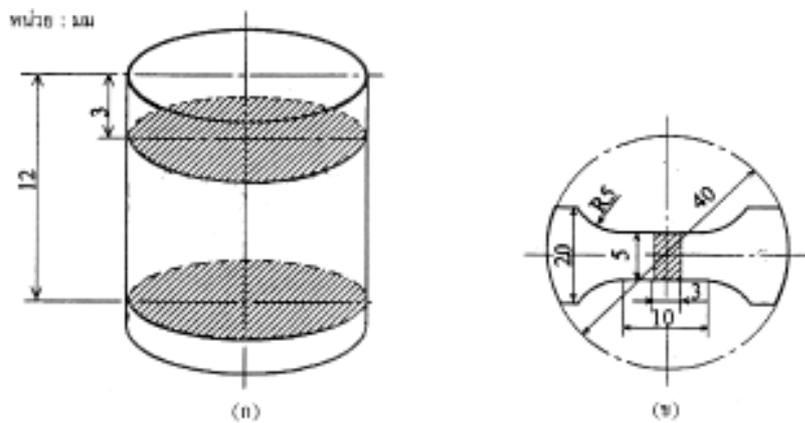
รูปที่ 1 เตาหลอมโลหะกึ่งแข็ง



รูปที่ 2 แท่งกวนน้ำโลหะทำจากอลูมินา



รูปที่ 3 การทำให้โลหะแข็งเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยวิธี chill-cooling ด้วยเหล็กกล้า SKD61



รูปที่ 4 (ก) ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและทดสอบความแข็งแรง (ข) ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรง

### 3. ผลการดำเนินการวิจัย

#### 1. โครงสร้างจุลภาค

##### 1.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาที่ผ่านการหล่อหลอมด้วยวิธีการปกติ

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมธาตุผสมคือทองแดง (FC-2 และ FC-3) หรือนิกเกิล (FC-9 และ FC-10) ลงในเหล็กหล่อเทาให้ผลให้กราฟไฟท์มีความละเอียด มีขนาดเล็กกลง และมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากนิกเกิลและทองแดงเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดกราฟไฟท์ (graphitiser) นอกจากนี้ธาตุทั้งสองยังเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดเฟิร์ลไลท์ [9] ดังจะเห็นได้จากเมื่อเติมธาตุแต่ละชนิดในปริมาณมากขึ้นทำให้โครงสร้างพื้นเปลี่ยนเป็นเฟิร์ลไลท์ทั้งหมด

โมลิบดีนัมและโครเมียมเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดคาร์ไบด์ (carbide stabilizer) [9] ดังนั้นเมื่อเติมธาตุเหล่านี้เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกราฟไฟท์ลดลงและมีปริมาณคาร์ไบด์เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5

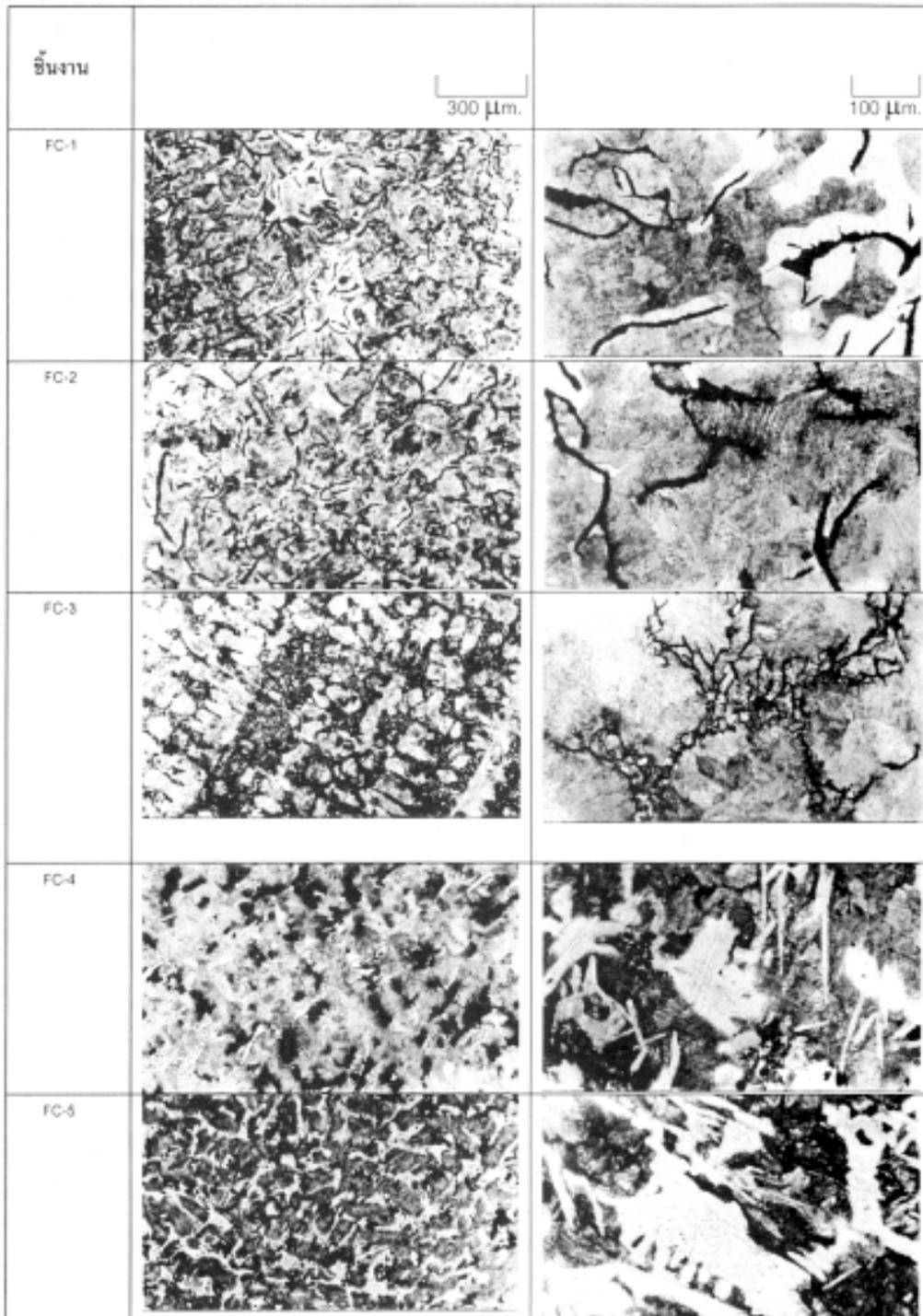
ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อเทาที่หล่อด้วยกรรมวิธีปกติ

| ชิ้นงาน | ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค  |   |
|---------|--|---|
|         | ลักษณะกราฟไฟท์   | ลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน  |
| FC-1    | เป็นกราฟไฟท์ชนิด A   | เฟิร์ลไลท์-เฟอร์ไรท์  |
| FC-2    | เป็นกราฟไฟท์ชนิด A   | เฟิร์ลไลท์-เฟอร์ไรท์ โดยมีปริมาณเฟิร์ลไลท์น้อยกว่า FC-1               |
| FC-3    | เป็นกราฟไฟท์ละเอียดและมีขนาดเล็ก ในบางบริเวณเป็นลักษณะ undercooled | เฟิร์ลไลท์  |
| FC-4    | เป็นกราฟไฟท์ละเอียดและมีปริมาณน้อย                                 | เฟิร์ลไลท์ และคาร์ไบด์กระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงาน                       |
| FC-5    | ไม่พบกราฟไฟท์  | เฟิร์ลไลท์และคาร์ไบด์กระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงานและมีปริมาณมากกว่า FC-4 |
| FC-6    | เป็นกราฟไฟท์ละเอียดและมีขนาดเล็ก ในบางบริเวณเป็นลักษณะ undercooled | เฟิร์ลไลท์-เฟอร์ไรท์  |
| FC-7    | เป็นกราฟไฟท์ละเอียดและมีปริมาณน้อย                                 | เฟิร์ลไลท์ และคาร์ไบด์  |
| FC-8    | เป็นกราฟไฟท์ละเอียดและมีปริมาณน้อยมาก                              | เฟิร์ลไลท์ และคาร์ไบด์ ซึ่งมีปริมาณมากกว่า FC-7                       |
| FC-9    | เป็นกราฟไฟท์ชนิด B และ C   | เฟิร์ลไลท์-เฟอร์ไรท์  |
| FC-10   | เป็นกราฟไฟท์ชนิด B และ C   | เฟิร์ลไลท์  |

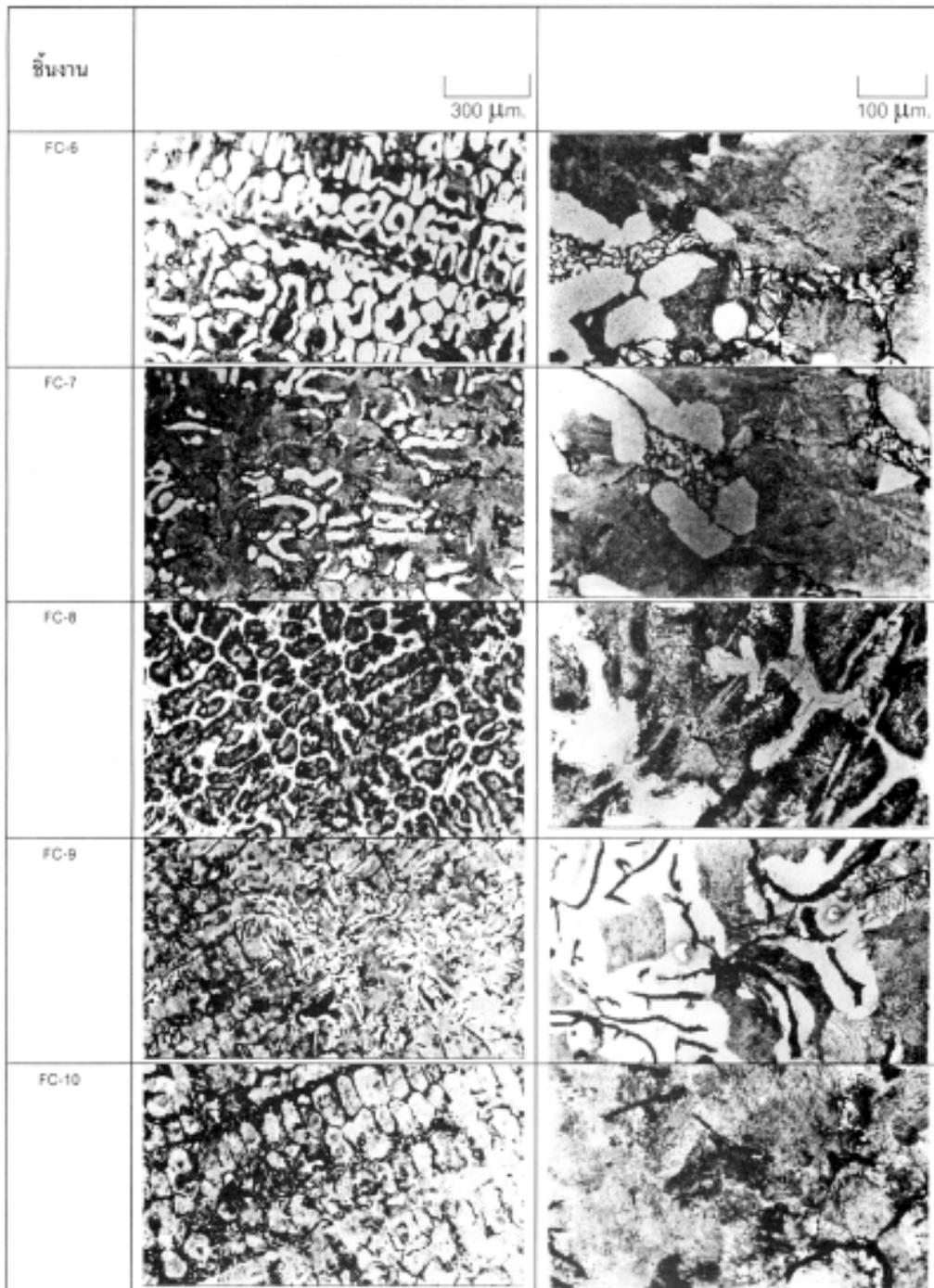
##### 1.2 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง

จากการศึกษาโครงสร้างเหล็กหล่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งทุกส่วนผสมพบว่าโครงสร้างที่ได้เป็นเกรนที่มีรูปร่างค่อนข้างกลมกระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงาน โดยเกรนบริเวณที่อยู่ติดกับเบ้าหลอมมีลักษณะกลมและเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเกรนบริเวณที่อยู่ติดกับแท่งกวน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นอิทธิพลจากแรงเหวี่ยง (centrifugal effect) ที่กระทำต่อโลหะกึ่งแข็งซึ่งมีความหนาแน่นในส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวแตกต่างกัน ดังนั้นส่วนที่เป็นของแข็งจะถูกผลักออกไปยังบริเวณติดกับเบ้าหลอม [10] ผลของแรงเฉือน (shearing force) ในสภาวะที่เป็นโลหะกึ่งแข็งทำให้โครงสร้างเดนไดรต์เกิดการแตกออก และ/หรือ เกิดการหลอมใหม่ที่บริเวณรากของเดนไดรต์ เนื่องจากการไหลอลวน (turbulent) ของของเหลวและความร้อน

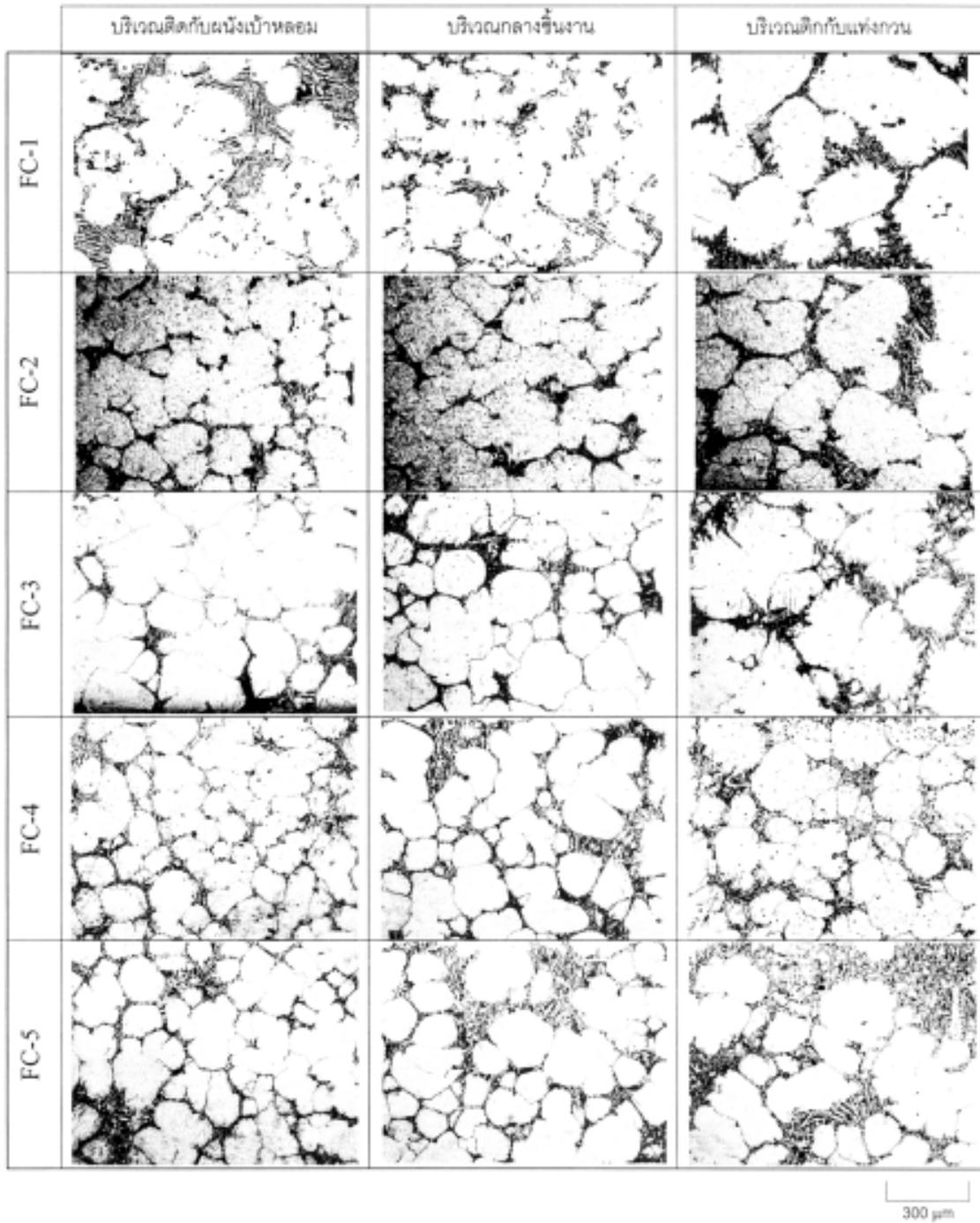
ที่ไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณของโลหะกึ่งแข็ง [11] โครงสร้างจุลภาคที่ได้ประกอบด้วยเกรนของ ออสเทนไนท์ที่เกิดขึ้นก่อนการชุบน้ำ (water quenching) ซึ่งภายหลังจากชุบน้ำโครงสร้างออสเทนไนท์ ที่เกิดภายในเกรนค่อนข้างกลมเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ (martensite) ในส่วนของน้ำโลหะที่ล้อมรอบ เกรนออสเทนไนท์เปลี่ยนไปเป็นเลเดบูไรท์ (ledeburite) และไม่พบกราฟไฟท์ในชิ้นงานทุกส่วนผสม



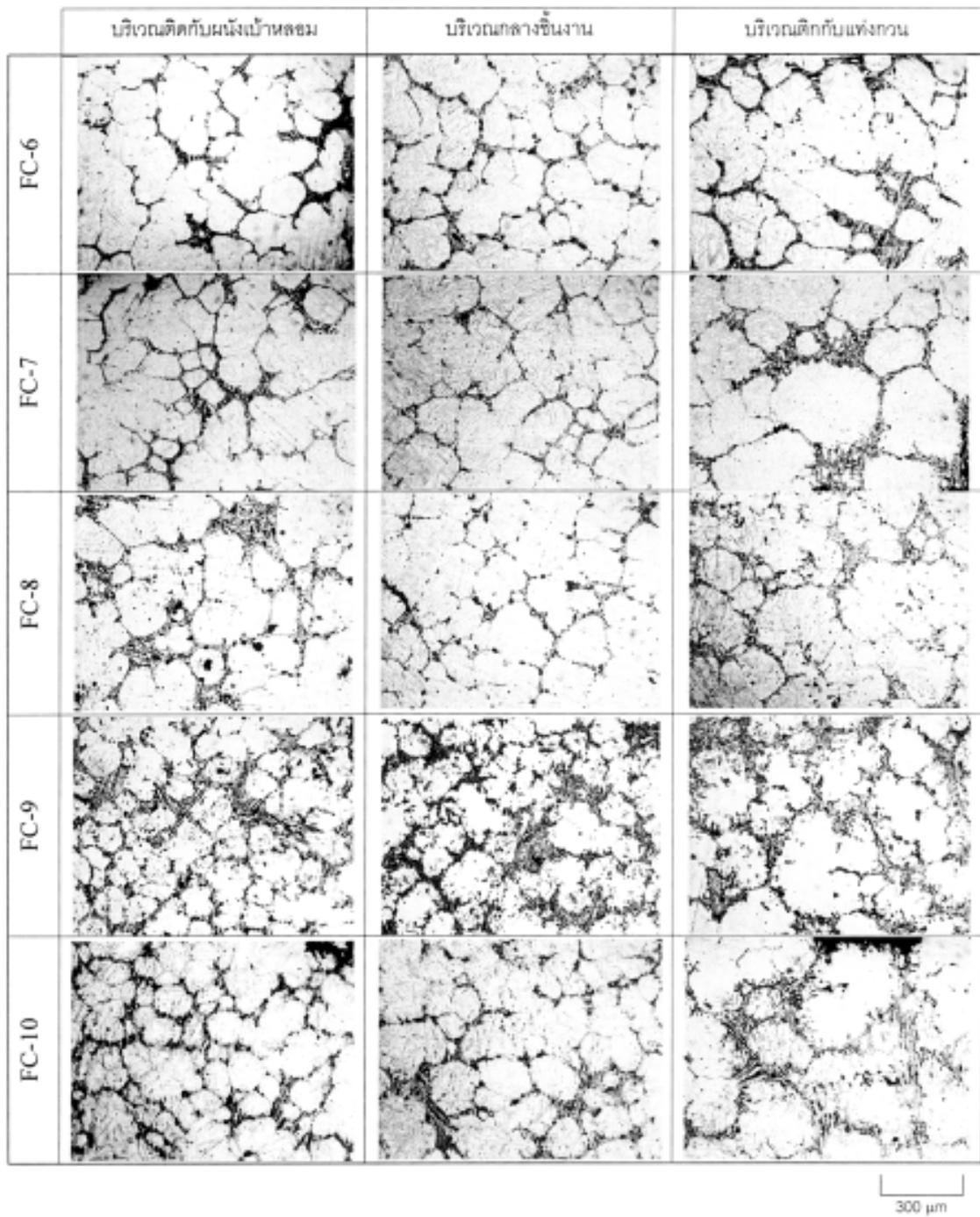
รูปที่ 5 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาที่หล่อด้วยกรรมวิธีปกติ



รูปที่ 5 (ต่อ) อิทธิพลของขนาดผสมที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาที่หล่อด้วยกรรมวิธีปกติ



รูปที่ 6 อิทธิพลของแรงทางกลต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกึ่งแข็ง



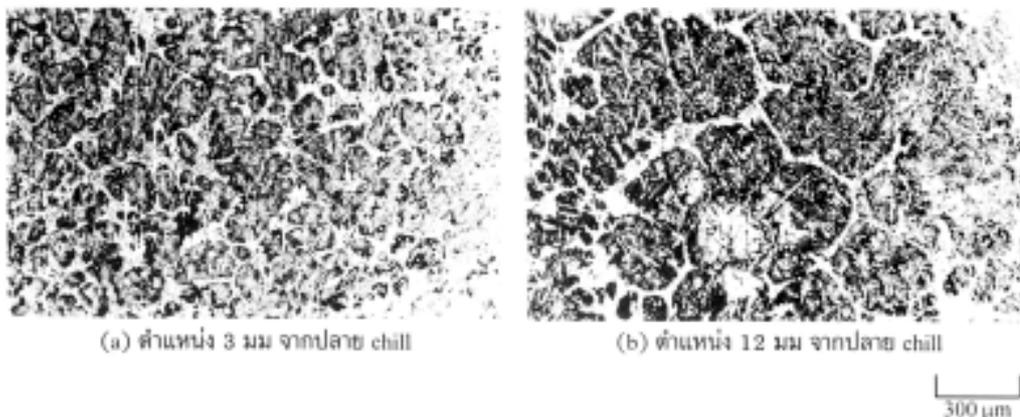
รูปที่ 6 (ต่อ) อิทธิพลของแรงทางกลต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแข็ง

1.3 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัว (cooling rate) ต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง

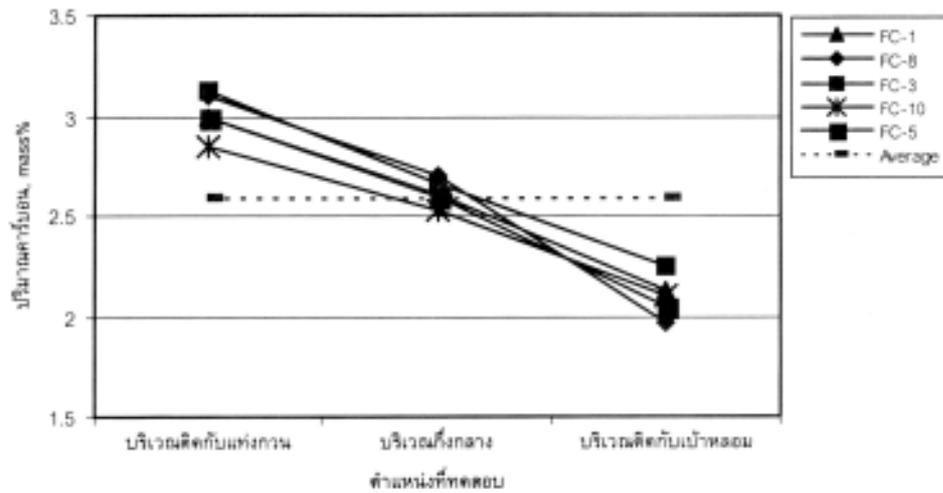
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กหล่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งและเย็นตัวแบบ chill-cooling พบว่าเกรนที่ได้มีลักษณะค่อนข้างกลมโดยลักษณะของเกรน ณ ตำแหน่ง 3 มม. จากปลาย chill มีขนาดเล็ก และมีโครงสร้างพื้นที่ละเอียดกว่าโครงสร้าง ณ ตำแหน่ง 12 มม. จากปลาย chill ดังแสดงในรูปที่ 7 เนื่องจากชิ้นทดสอบที่ตัด ณ ตำแหน่ง 3 มม. จากปลาย chill มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าชิ้นทดสอบที่ตัด ณ ตำแหน่ง 12 มม. จากปลาย chill ซึ่งอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าทำให้โลหะเกิดโครงสร้างที่ละเอียดกว่า [12] โครงสร้างจุลภาคที่ได้ประกอบด้วยเกรนของออสเทนไนท์ที่เกิดขึ้นก่อนทำให้เกิดการเย็นตัว ซึ่งภายหลังการเย็นตัวโครงสร้างออสเทนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ ในส่วนของน้ำโลหะที่ล้อมรอบเกรนออสเทนไนท์เปลี่ยนไปเป็นเลเดบไทร์ หลังทำให้เกิดการเย็นตัวโดยกรรมวิธี chill-cooling

## 2. อิทธิพลของแรงเหวี่ยงต่อปริมาณคาร์บอนในเหล็กหล่อที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็ง

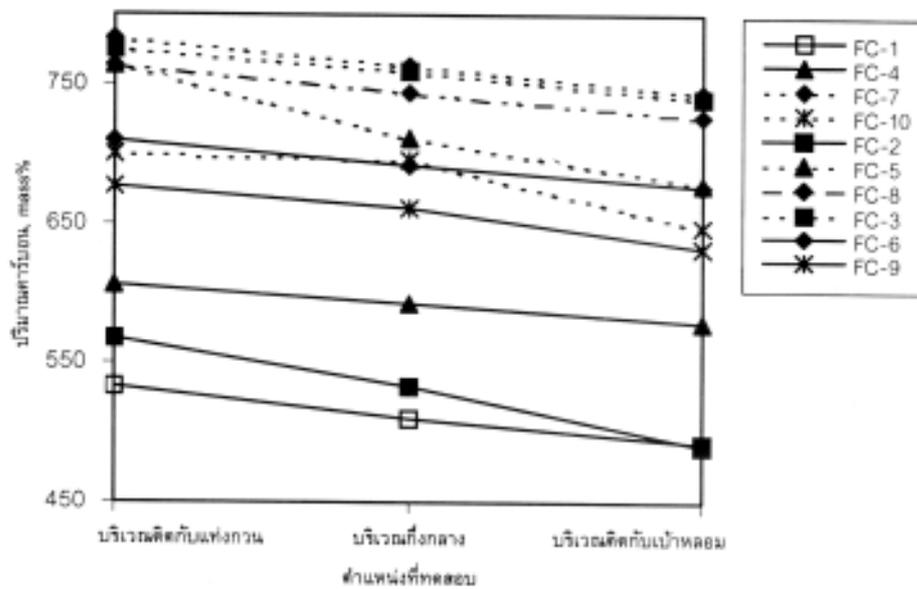
ผลจากการตรวจสอบปริมาณคาร์บอนด้วยเครื่อง Electron Probe Microanalysis (EPMA) พบว่าปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงจากบริเวณแท่งกวนน้ำโลหะไปยังบริเวณเบ้าหลอม แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งเป็นผลจากการที่ธาตุผสมต่างๆ รวมทั้งคาร์บอนสามารถละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นของเหลวมากกว่าในสภาวะที่เป็นของแข็ง ดังนั้นเมื่อเกิดการแข็งตัวขึ้นอะตอมคาร์บอนจึงถูกผลักจากของแข็งออกมาในของเหลว ทำให้บริเวณที่เป็นของเหลวมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า [13] สำหรับของแข็งที่เกิดขึ้นก่อนเมื่อได้รับอิทธิพลจากแรงเหวี่ยงจะเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณติดกับเบ้าหลอม ขณะที่ของแข็งที่เกิดขึ้นภายหลังจะอยู่ถัดมาจากบริเวณเบ้าหลอม และของแข็งที่แข็งตัวที่สุดจะอยู่บริเวณที่ติดกับแท่งกวน ซึ่งเป็นผลให้ค่าคาร์บอนในแต่ละบริเวณแตกต่างกัน



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 0.8%Ni ที่ผ่านการเย็นตัวโดยวิธี chill-cooling ที่ตำแหน่งต่างกัน



รูปที่ 8 ปริมาณคาร์บอน (mass%) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงาน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและตำแหน่งของชิ้นงาน

### 3. สมบัติทางกล

3.1 สมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กหล่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว

ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อกึ่งแข็ง 10 ส่วนผสม แสดงในรูปที่ 9 ผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานสูงสุดในบริเวณใกล้แท่งกวนและลดลงไปจนต่ำสุดที่บริเวณใกล้แท่งกวนในบริเวณใกล้เบ้าหลอม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการตรวจสอบปริมาณคาร์บอนด้วยเครื่อง EPMA

การที่อะตอมคาร์บอนเข้าไปแทรกตัวในโครงสร้างผลึกของเหล็กและทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการบิดเบี้ยวไปเป็นผลให้ความแข็งและความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น [13] ดังนั้นในบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนแทรกตัวอยู่มากกว่าจึงมีความแข็งมากกว่าบริเวณที่มีคาร์บอนแทรกตัวอยู่น้อย

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นงานแต่ละส่วนผสมพบว่าชิ้นงานที่มีธาตุผสมเพิ่มขึ้นจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเกือบทุกส่วนผสม โดยชิ้นงานที่มีความแข็งสูงคือ FC-7 และ FC-3

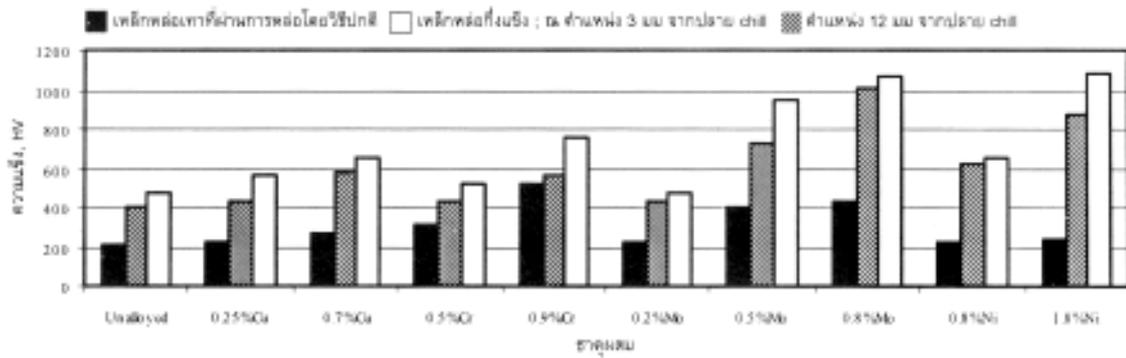
3.2 สมบัติทางกลของชิ้นงานเหล็กหล่อที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งและทำให้เย็นตัวโดยวิธี chilled cooling

ผลจากการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่แข็งตัวโดยวิธี chilled cooling เปรียบเทียบกับชิ้นงานในสภาพหล่อแสดงในรูปที่ 10 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานโลหะกึ่งแข็งมีความแข็งสูงกว่าชิ้นงานในสภาพหล่อและชิ้นงาน ณ บริเวณ 3 มม. จากปลาย chill มีความแข็งกว่าชิ้นงาน ณ บริเวณ 12 มม. จากปลาย chill ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานที่อยู่ใกล้ chill มีการเย็นตัวที่เร็วกว่าทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้ละเอียดกว่าและมีโครงสร้างที่แตกต่างกันจึงมีความแข็งแรงมากกว่าบริเวณที่อยู่ต่ำลงไป

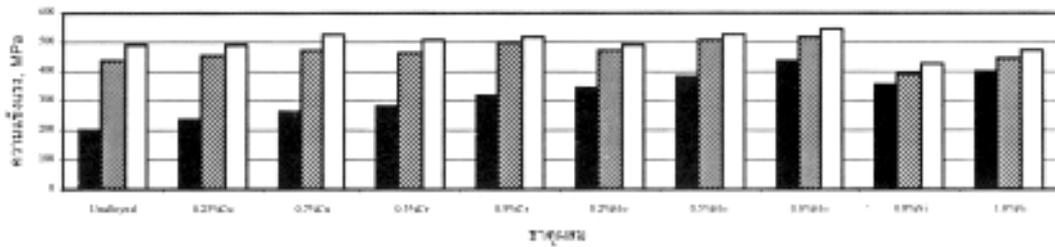
ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานเหล็กหล่อเทาในสภาพหล่อพบว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณธาตุผสมเพิ่มขึ้น เมื่อนำชิ้นงานไปเตรียมเป็นโลหะกึ่งแข็งและนำมาทดสอบแรงดึงเปรียบเทียบกันพบว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นกว่าชิ้นงานในสภาพหล่อทุกส่วนผสม แต่เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงในแต่ละส่วนผสมพบว่ามีความแข็งแรงแตกต่างกันน้อยมาก โดยชิ้นงานเหล็กหล่อเทา 0.8%Mo มีค่าความแข็งแรงสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 11

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีอัตราการเย็นตัวแตกต่างกันโดยทดสอบชิ้นงานที่เตรียมจากบริเวณ 3 มม. จากปลาย chill และชิ้นงานที่เตรียมจากบริเวณ 12 มม. จากปลาย chill พบว่าชิ้นงานที่เตรียมจากบริเวณ 3 มม. จากปลาย chill ซึ่งมีอัตราการเย็นตัวสูงมีความแข็งแรงสูงกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากบริเวณ 12 มม. จากปลาย chill ดังแสดงในรูปที่ 11

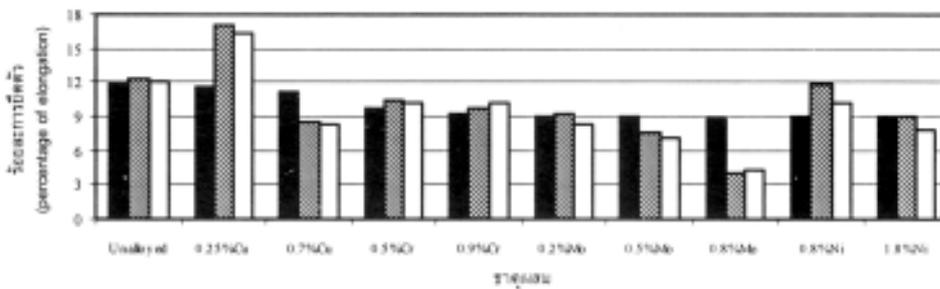
จากการทดสอบร้อยละการยืดตัว (percentage of elongation) เปรียบเทียบกันพบว่าชิ้นงานเหล็กหล่อเทาที่แข็ง 0.25%Cu มีร้อยละการยืดตัวมากที่สุด และชิ้นงานเหล็กหล่อเทาที่แข็ง 0.8%Mo มีร้อยละการยืดตัวต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 10 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อปกติ และชิ้นงานเหล็กหล่อที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยวิธี chill-cooling



รูปที่ 11 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อปกติ และชิ้นงานเหล็กหล่อที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยวิธี chill-cooling



รูปที่ 12 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% elongation) ของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อปกติ และชิ้นงานเหล็กหล่อที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยวิธี chill-cooling

#### 4. สรุปผลการวิจัย

1. นิกเกิลและทองแดงเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดเฟิร์ลไลต์ ในขณะที่โมลิบดีนัมและโครเมียมเป็นธาตุที่สนับสนุนให้เกิดคาร์ไบด์ในเหล็กหล่อเทา
2. อิทธิพลของแรงเค้นในสถานะที่เป็นโลหะที่แข็งเป็นตัวการที่ทำให้โครงสร้างแบบเดนไดรต์เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่มีเกรนในลักษณะค่อนข้างกลม

3. การเคลื่อนที่ของโลหะกึ่งแข็งภายใต้แรงเหวี่ยงจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่น (density) ของของแข็งและของเหลว ซึ่งจากการทดลองของแข็งซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวจะถูกผลักออกไปยังบริเวณที่ติดกับเบ้าหลอม ทำให้บริเวณติดกับเบ้าหลอมมีปริมาณของของแข็งมากกว่าบริเวณที่ติดกับแท่งกวน

4. ธาตุผสมที่เติมในเหล็กหล่อเทาได้แก่ นิกเกิล โครเมียม โมลิบดีนัม และทองแดง มีผลทำให้ความแข็งแรงของเหล็กหล่อเทาที่หล่อโดยกรรมวิธีปกติเพิ่มมากขึ้น แต่มีอิทธิพลน้อยมากกับเหล็กหล่อเทาที่แข็ง

5. เหล็กหล่อเทาที่ไม่มีธาตุผสมเมื่อเตรียมเป็นโลหะกึ่งแข็งพบว่ามีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กหล่อเทาที่หล่อโดยกรรมวิธีปกติที่เติมธาตุผสมทุกส่วนผสม เนื่องจากโครงสร้างที่มีลักษณะเกรนค่อนข้างกลมมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์และบริเวณล้อมรอบเกรนมีโครงสร้างเป็นเลเดบยูไรท์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ได้จากกวนด้วยแรงทางกลและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำ

6. เหล็กหล่อเทาที่แข็ง 0.25%Cu มีค่าร้อยละการยืดตัวสูงที่สุด และเหล็กหล่อเทาที่แข็ง 0.8%Mo มีค่าร้อยละการยืดตัวต่ำที่สุด

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์พยุร เกตุกราย อาจารย์เชาว์ เนียมสอน อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และคุณอมรศักดิ์ เร่งสมบูรณ์ ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่มีส่วนช่วยในการหล่อหลอมเหล็กหล่อเทา Prof.Dr.Hiroyuki Nomura ศาสตราจารย์ประจำภาควิชา Materials Processing Engineering มหาวิทยาลัยนาโกยา ประเทศญี่ปุ่น ผู้ให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการหล่อหลอมเหล็กหล่อที่แข็ง

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Minkoft, I., 1986, *Solidification and Cast Structure*, John Wiley & Sons, Great Britain, pp. 121 -124.
2. Kirkwood, D. H., 1994, "Semi-solid Metal Processing," *International Materials Reviews*, Vol. 39, No. 5, pp. 173-189.
3. Lowe, A., Ridgway, K., McCarthy, I., and Atkinson, H., 2000, "An Evaluation Model for Determining the Business Process Benefits of Thixoforming," *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 214 Part B, pp. 11-13.

4. Kirkwood, D. H., 1996, "Semi-solid Processing of High Melting Point Alloys," *The 4<sup>th</sup> International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, 19-21 June, England, pp. 320-325.
5. Qui, P., et al., 2000, "Mold Filling Ability and Solidification Structure of Semi-solid Gray Iron," *International Journal of Cast Metal Metal Research*, Vol. 13, pp. 93-98.
6. Nomura, H., et al., 2001, "Semi-solid Processing of Cast Iron," *Materials Transactions*, Vol. 42, No. 2, pp. 303-308.
7. Nomura, H. and Muumbo, A., 2001, "Casting of Semi-solid Iron," *Proceeding of the Science of Casting and Solidification*, Brasov, Transilvania Romania, pp. 188-193.
8. Scheil, E., 1942, *Z. Metallk*, Vol. 34, pp. 70-72.
9. Angus, H. T., 1976, *Cast Iron : Physical and Engineering Properties*, Butterworths, London, pp. 176-180.
10. Nomura, H., Qiu, P., Takita, M., and Poolthong, N., 2001, "Semi-solid Processing of Cast Iron," *Materials Transactions*, Vol. 42, No. 2, pp. 303-308.
11. Flemings, M. C., 1991, *Materials Science and Technology : A Comprehensive Treatment Processing of Metals and Alloys*, Weinheim VCH, Vol. 15, p. 44.
12. Burditt, M. F., 1993, *Ductile Iron Handbook*, American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Illinois, pp. 197-199.
13. Reed-Hill, R. E., 1992, *Physical Metallurgy Principles*, PWS-KENT Publishing Company, Boston, pp. 459-460.