



ผลของอุณหภูมิเท และความชันของรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และ
ความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อ
แบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น
THE EFFECTS OF POURING TEMPERATURE AND COOLING SLOPE
ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS PROPERTY OF A356
ALUMINUM ALLOYS BY COOLING PLATE TECHNIQUE

นายกมลฤทธิ สมพิมพ์ รหัส 51362244
นายวรุพงษ์ ผึ้งเย็น รหัส 51365160

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2554

| |
|-----------------------------|
| ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| วันที่รับ..... 10 ก.ค. 2555 |
| เลขทะเบียน..... 15๓4๕A๒๒ |
| เลขเรียกหนังสือ..... ๗5. |
| มหาวิทยาลัยนเรศวร ๓13๖พ |

2554



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลของอุณหภูมิและความชื้นของรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบ เทผ่านรางเทหล่อเย็น

ผู้ดำเนินโครงการ นายกมลฤทธิ สมพิมพ์ รหัส 51362244
นายวรุพงษ์ ผึ้งเย็น รหัส 51365160

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....ที่ปรึกษาร่วมโครงการ
(ดร. อัมพร เวียงมูล)

ศิริกานต์ ๕๑๕.....กรรมการ
(อาจารย์ธนิศานต์ ธงชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันรัมย์ฤทธิ)

.....กรรมการ
(ดร. ทศพล ตีร์จุริราภาพงค์)

.....กรรมการ
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

| | | | |
|----------------------|--|---------|---------------|
| ชื่อหัวข้อโครงการงาน | ผลของอุณหภูมิเท และความชันของรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น | | |
| ผู้ดำเนินโครงการงาน | นายกมลฤทธิ์ | สมพินพา | รหัส 51362244 |
| | นายวรพงษ์ | ผิงเย็น | รหัส 51365160 |
| ที่ปรึกษาโครงการงาน | อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ | | |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมวัสดุ | | |
| ภาควิชา | วิศวกรรมอุตสาหการ | | |
| ปีการศึกษา | 2554 | | |

บทคัดย่อ

โครงการงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของชิ้นงาน อะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส และการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง (Semi-Solid Casting) ด้วยวิธีเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) เมื่อรางเทหล่อเย็นมีความยาว 250 มิลลิเมตร โดยมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็นเป็น 660 และ 680 องศาเซลเซียส และ 50 และ 70 องศา ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรของทั้งสองอุณหภูมิ ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) ที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ โดยเมื่ออุณหภูมิเทลดลง จะทำให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมิขนาดเล็กลง ละเอียด ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ที่มีลักษณะเป็นแท่งแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แต่สำหรับโครงสร้างจุลภาค หลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งประกอบด้วย เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีรูปร่างกลม (Globular) โดยเมื่ออุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็นลดลง จะทำให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมิขนาดเล็กลง ละเอียด และมีรูปร่างกลม ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ ดร. อัมพร เวียงมูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ตลอดจนแนะนำวิธีการในการแก้ปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา จนสามารถทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย และ ดร. ทศพล ตรีรัฐจิราภาพงศ์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัฒนภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ รวมไปถึงการแนะนำใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นสถานที่ในการศึกษาหาความรู้ให้กับผู้ทำโครงการ จนงานลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาคารปฏิบัติการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นสถานที่ในการใช้เตาหลอมโลหะ กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และเครื่องมือต่างๆ ภายในอาคาร จนงานเสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องตัดชิ้นงาน และเครื่องขัดโลหะ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องค่าใช้จ่าย และกำลังใจ จนสามารถศึกษา ทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายกมลฤทธิ์ สมพิมพ์า

นายวรพงษ์ ผึ้งเย็น

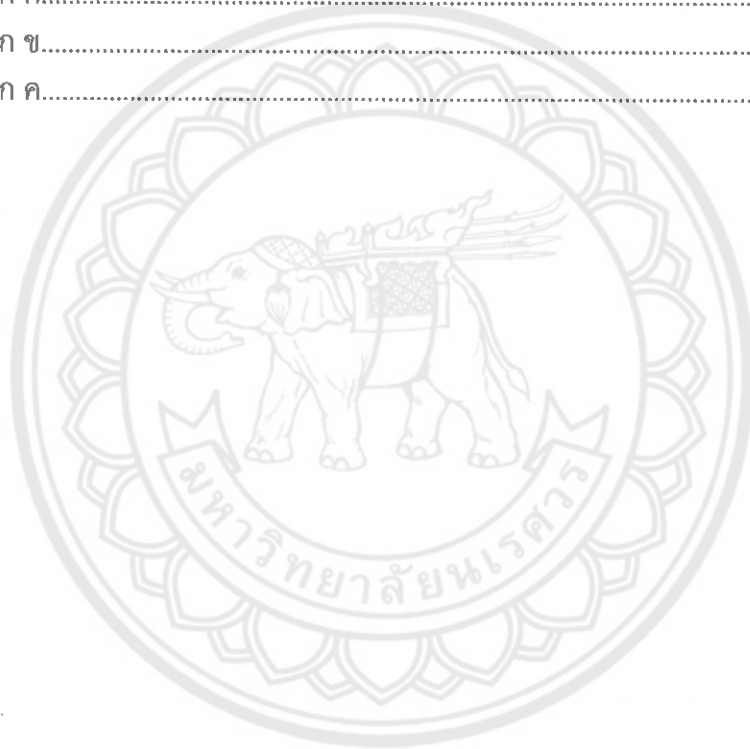
มีนาคม 2554

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| ใบรับรองปริญญาโท..... | ก |
| บทคัดย่อ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูป..... | ช |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... | 1 |
| 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)..... | 2 |
| 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)..... | 2 |
| 1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ..... | 2 |
| 1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ..... | 2 |
| 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ..... | 2 |
| 1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ..... | 3 |
| | |
| บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น..... | 4 |
| 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม..... | 4 |
| 2.2 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว..... | 7 |
| 2.3 กระบวนการหล่อโลหะ (Casting Process)..... | 12 |
| 2.4 การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processes)..... | 14 |
| 2.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ..... | 20 |
| 2.6 ปัจจัยรูปร่างจากการวัดขนาดเกรน..... | 23 |
| 2.7 การทดสอบความแข็ง..... | 23 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 25 |
| | |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 27 |
| 3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ..... | 27 |
| 3.2 วัสดุ และอุปกรณ์..... | 28 |
| 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... | 29 |
| | |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์..... | 34 |
| 4.1 รูปพรรณ..... | 34 |
| 4.2 โครงสร้างจุลภาค..... | 37 |
| 4.3 ความแข็ง..... | 46 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---------------------------------------|------|
| บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ..... | 50 |
| 5.1 บทสรุป..... | 50 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา..... | 50 |
| 5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข..... | 51 |
| | |
| เอกสารอ้างอิง..... | 52 |
| | |
| ภาคผนวก ก..... | 54 |
| ภาคผนวก ข..... | 61 |
| ภาคผนวก ค..... | 64 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ..... | 3 |
| 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356..... | 28 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน..... | 5 |
| 2.2 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก..... | 6 |
| 2.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก..... | 6 |
| 2.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก..... | 7 |
| 2.5 แผนภูมิสมมูลโลหะผสม..... | 8 |
| 2.6 ลักษณะการแข็งตัวของโลหะผสมทั่วไป..... | 8 |
| 2.7 แผนภูมิแสดงการเกิดผลึกของโลหะหลอมเหลว..... | 9 |
| 2.8 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวกลายเป็นของแข็ง..... | 10 |
| 2.9 การแตกหักของเดนไดรต์ เมื่อมีการไหลของโลหะหลอมเหลว..... | 11 |
| 2.10 ภาพจำลองการไหลที่เกิดจากความต่างของอุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของเดนไดรต์จาก ผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ..... | 12 |
| 2.11 แบบหล่อถาวรที่มีแบบปิด-เปิด อย่างง่าย..... | 13 |
| 2.12 แบบหล่อถาวรที่มีแบบเลื่อนปิด-เปิด บนฐานรอง..... | 13 |
| 2.13 การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร..... | 13 |
| 2.14 ช่วงอุณหภูมิของเฟสกึ่งแข็ง..... | 14 |
| 2.15 โครงสร้างจุลภาคของการขึ้นรูปกึ่งแข็ง..... | 15 |
| 2.16 ลักษณะการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง..... | 15 |
| 2.17 โครงสร้างที่มีรูปร่างกลม ของการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง..... | 16 |
| 2.18 การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 18 |
| 2.19 ช่วงอุณหภูมิกึ่งแข็งที่ใช้ในการเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 18 |
| 2.20 การฟอร์มตัวของโลหะหลอมเหลวเมื่อเทผ่านรางเทหล่อเย็นหล่อเย็น..... | 19 |
| 2.21 ลักษณะแนวทางการขัดขึ้นตรวจสอบสลักเป็นตาราง..... | 21 |
| 2.22 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง..... | 22 |
| 2.23 ลักษณะภาพที่ได้จากการส่องของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง..... | 22 |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... | 27 |
| 3.2 แม่พิมพ์ถาวร..... | 29 |
| 3.3 ลักษณะรางเทหล่อเย็น..... | 30 |
| 3.4 ลักษณะการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร..... | 30 |
| 3.5 ลักษณะการหล่อแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 31 |
| 3.6 บริเวณที่ใช้ในการทดสอบ..... | 31 |
| 3.7 ตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค..... | 32 |
| 3.8 จุดที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง..... | 33 |
| 4.1 รูปพรุนของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อ - เย็น..... | 34 |
| 4.2 รูปพรุนของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรที่อุณหภูมิแตกต่างกัน..... | 35 |
| 4.3 รูปพรุนของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 36 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.4 รูปทรงของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 37 |
| 4.5 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่าน- รางเทหล่อเย็น..... | 38 |
| 4.6 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และ การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 39 |
| 4.7 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และ การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 39 |
| 4.8 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร..... | 40 |
| 4.9 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส..... | 41 |
| 4.10 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส..... | 41 |
| 4.11 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 42 |
| 4.12 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อ- เย็นที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส.... | 43 |
| 4.13 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านราง- เทหล่อเย็นที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิ 660 และ 680 องศา- เซลเซียส..... | 43 |
| 4.14 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... | 44 |
| 4.15 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อ- เย็น ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา..... | 45 |
| 4.16 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านราง- เทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา..... | 45 |
| 4.17 ความแข็งของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเท- หล่อเย็น..... | 46 |
| 4.18 ความแข็งของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซล- เซียส..... | 47 |
| 4.19 ความแข็งของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส..... | 47 |
| 4.20 ความแข็งของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา..... | 48 |
| 4.21 ความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณขอบ และกลางชิ้นงาน..... | 49 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการงาน

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความสำคัญมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทางด้านอุตสาหกรรมทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล เป็นต้น เนื่องจากอะลูมิเนียมมีสมบัติทางกลที่โดดเด่น คือ น้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก ด้านทานการกัดกร่อนได้ดี นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ จึงส่งผลให้ประหยัดต้นทุนทางด้านการผลิต ด้วยสมบัติที่โดดเด่นเหล่านี้ผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้อะลูมิเนียมมาเป็นวัสดุหลักในการผลิตมากกว่าโลหะชนิดอื่นๆ (ชวลิต, 2542)

อะลูมิเนียมที่นิยมนำมาใช้ในงานหล่อนั้น ยังพบปัญหามากมายในแง่ของคุณภาพของงานหล่อ ด้านสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยสมบัติทางกลนั้น มีความเกี่ยวข้องกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เนื่องจากงานหล่ออะลูมิเนียมส่วนใหญ่โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) ส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานต่ำ จึงมีการพัฒนางานหล่อโลหะ ด้วยวิธีการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing) วิธีนี้จะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีรูปร่างกลม (Globular) จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น (ผศ. นุชธนา, 2545) โดยการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำเกรนให้ละเอียดโดยการเติมสารเคมี (Chemical Grain Refining) การกวนโดยใช้แรงทางกล (Mechanical Stirring) การกวนโดยใช้แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Stirring) การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ข้อดี และข้อเสียที่แตกต่างกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) เปรียบเทียบกับการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยวิธีการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) โดยทั้ง 2 วิธี จะศึกษาที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส และสำหรับการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น แต่ละอุณหภูมิ จะศึกษาความชันของรางเทหล่อเย็นที่ 50 และ 70 องศา จากการศึกษาโครงการงานวิจัยนี้จะก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก โดยสามารถนำไปใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

1.2.1 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

1.2.2 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิ และความชันของรางเทต่างกัน

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

1.3.2 โครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิเท และความชันของรางแตกต่างกัน

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

1.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

1.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิเท และความชันของรางแตกต่างกัน

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 วิธีการหล่อที่ใช้ในการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

1.5.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสม เกรด A356

1.5.3 วัสดุที่นำมาทำเป็นรางเทหล่อเย็น คือ ทองแดง โดยรางเทหล่อเย็นจะมีความยาว 250 มิลลิเมตร ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา

1.5.4 ใช้แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) ทำจากเหล็กกล้า โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน 25.4 มิลลิเมตร และมีความยาวของชิ้นงาน 150 มิลลิเมตร

1.5.5 อุณหภูมิเท (Pouring Temperature : T_p) โดยจะเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

1.5.6 ศึกษาารุพุนด้วยกล้องถ่ายรูป

1.5.7 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

1.5.8 ศึกษาพื้นที่ (Area) และปัจจัยรูปร่าง (Shape factor) ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al)

1.5.9 ศึกษาความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell : HB)

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

1.6.1 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.2 ห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

1 กรกฎาคม 2554 – 28 กุมภาพันธ์ 2555

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

สำหรับหลักการ และทฤษฎีเบื้องต้นนี้ เป็นการกล่าวถึงหลักการทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง หรือที่ใช้ในงานวิจัย ในเรื่องของความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว การหล่อโลหะ การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมนุฏีที่มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นธาตุที่พบมากชนิดหนึ่งของโลก ส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปออกไซด์ (มันส์, 2541) ในปี ค.ศ. 1808 อะลูมิเนียมได้เริ่มเป็นที่รู้จัก แต่ยังคงถือว่าไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก และยังคงถือว่าเป็นโลหะใหม่เมื่อเทียบกับทองแดง ตะกั่ว และดีบุก แต่ทว่าตลอดเวลาที่ผ่านมา การวิจัยพัฒนาของอะลูมิเนียมกลับมีอย่างรวดเร็ว และต่อเนื่อง จึงทำให้ปัจจุบันการใช้งานอะลูมิเนียม เป็นที่แพร่หลายมากกว่า ทองแดง ตะกั่ว และดีบุกรวมกัน

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันอย่างมากมาย ด้วยสมบัติที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (Low Melting Point) มีความสามารถในการไหลที่ดี (High Castability) ความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย น้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น มีความแข็งแรง ทนต่อการเกิดสนิม ทนต่อการผุกร่อน และยังมีราคาที่ไม่สูงมาก

2.1.1 อะลูมิเนียมสำหรับงานหล่อ

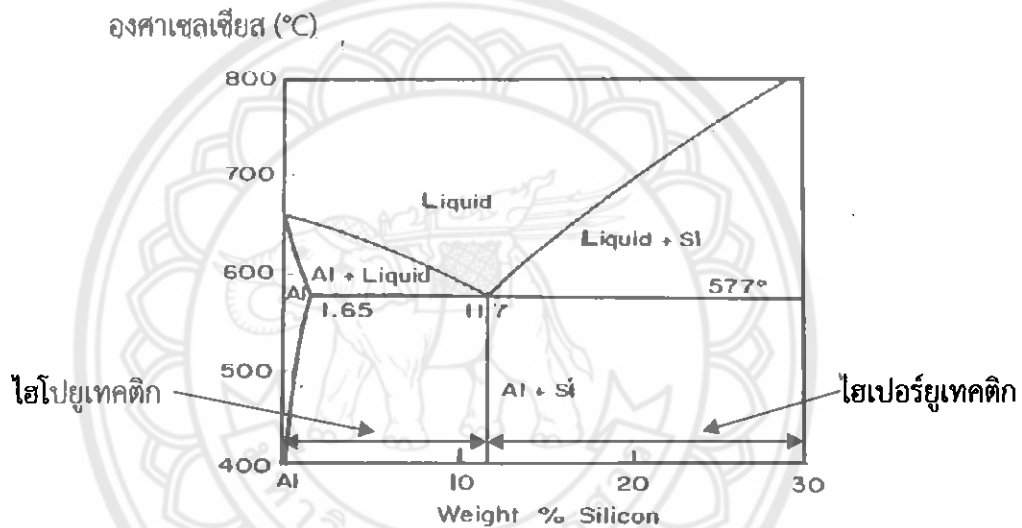
โลหะอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานหล่อ ได้พัฒนามาจากระบบยูเทคติก ที่มีธาตุ 2 ธาตุอยู่ในระบบ เช่น อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Al-Si), อะลูมิเนียม-ทองแดง (Al-Cu) และอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม (Al-Mg) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม โลหะที่ใช้งานส่วนใหญ่มักจะพัฒนามาจากระบบอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยการเติมธาตุแมกนีเซียม (Mg) และ/หรือทองแดง (Cu) ลงไป ทำให้โลหะผสมเหล่านี้สามารถชุบแข็งได้ โดยการตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Precipitation Hardening Heat Treatment) การเพิ่มธาตุผสมบางอย่าง เช่น นิกเกิล (Ni), โครเมียม (Cr) และ แมงกานีส (Mn) เป็นต้น ยังช่วยทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยกลไกการเพิ่มความแข็งแรง ด้วยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution Hardening) และช่วยปรับปรุงความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ด้วย แต่โดยส่วนมากแล้ว ธาตุที่จะนำมาผสมในอะลูมิเนียมที่จะนำมาใช้ในงานหล่อ คือ ซิลิคอน เพราะซิลิคอนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล และต้านทานการแตกร้าวของงานหล่อได้ดี

2.1.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

การหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิคอน ในปัจจุบันได้มีบทบาทสำคัญมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และเครื่องจักรกลต่างๆ เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดี โดยอะลูมิเนียมผสมมีส่วนประกอบหลัก คือ ซิลิคอน แต่สำหรับการรวมตัวระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนสามารถรวมตัว

กันได้ในขอบเขตที่จำกัดเท่านั้น เนื่องจากลักษณะหลายประการของอะลูมิเนียมกับซิลิคอนที่ต่างกัน เช่น โครงสร้างผลึก และจุดหลอมเหลว โดยซิลิคอนจะละลายให้สารละลายของแข็งอะลูมิเนียมได้ สูงสุดเพียงร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส (Steube ,1992)

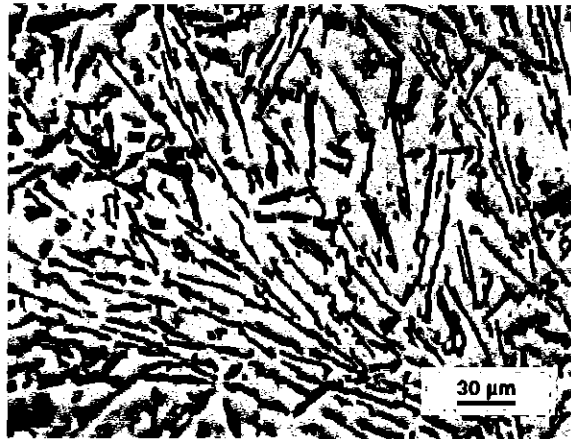
จากการนำซิลิคอนผสมลงไปในอะลูมิเนียม จะพบว่า ที่ส่วนผสมของซิลิคอนร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมผสมจะมีจุดหลอมเหลวต่ำสุดที่จุด ปฏิกริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) และเรียกจุดนี้ว่า อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก (Aluminium-Silicon Eutectic) แต่หากมีปริมาณซิลิคอนผสมอยู่น้อยกว่า 11.7 โดยน้ำหนัก จะเรียก ช่วงนี้ว่า อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก (Aluminium-Silicon Hypoeutectic) และถ้ามีปริมาณ ซิลิคอนผสมอยู่มากกว่า 11.7 โดยน้ำหนัก จะเรียกช่วงนี้ว่า อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก (Aluminium-Silicon Hypereutectic) โดยแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน
ที่มา : Davis (1993)

2.1.2.1 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทคติก

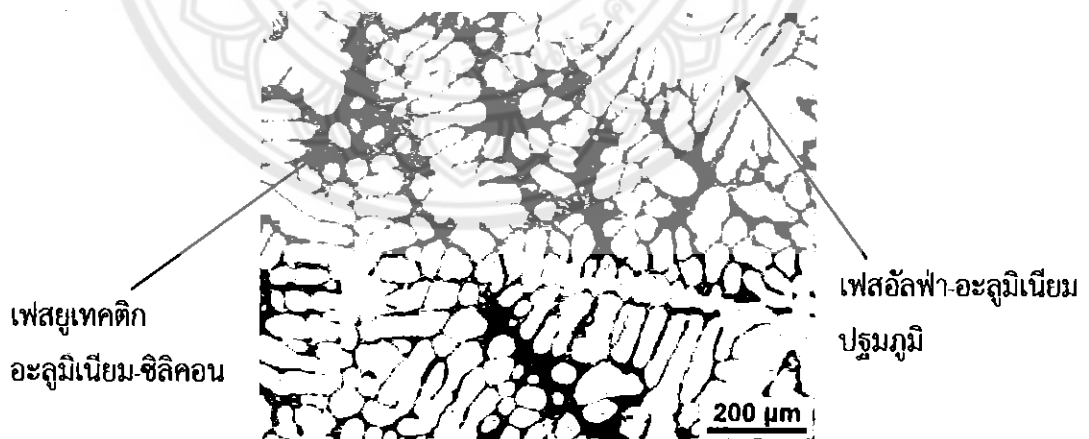
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีองค์ประกอบแบบยูเทคติก มี ส่วนผสมของซิลิคอนร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงจากการตกตะกอนได้ จึง ต้องมีการเติมโลหะเจืออื่นๆ ลงไป โดยการเติมธาตุแมกนีเซียม หรือทองแดง เพื่อที่จะสามารถผ่าน กรรมวิธีทางความร้อนได้ และทนต่อการกัดกร่อน โดยโลหะผสมชนิดนี้ จะมีลักษณะของยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Aluminium-Silicon) ที่ค่อนข้างหยาบ แสดงดังรูปที่ 2.2 แต่ยังสามารถปรับให้ละเอียดได้ โดยการเติมธาตุโซเดียม หรือสตรอนเซียมในโลหะหลอมเหลวเพียงร้อยละ 0.01-0.015 โดยน้ำหนัก จะมีผลให้จุดยูเทคติกเลื่อนจากร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก ไปเป็นซิลิคอน ร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิลิคอนปฐมภูมิ และทำให้ซิลิคอนละเอียดขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน
ที่มา : Jinguo Qiao (2005)

2.1.2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีองค์ประกอบแบบไฮโปยูเทคติก ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิคอนต่ำกว่าร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และมีโครงสร้างของยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้ มีช่วงการแข็งตัวกว้าง โดยมากแล้ว โลหะผสมไฮโปยูเทคติก จะไม่นิยมใช้แค่ 2 ธาตุเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากความแข็งแรงยังต่ำอยู่ จึงนำ ทองแดง หรือแมกนีเซียมผสมรวมเข้าไปด้วย เพื่อให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการทำให้ตกตะกอนได้



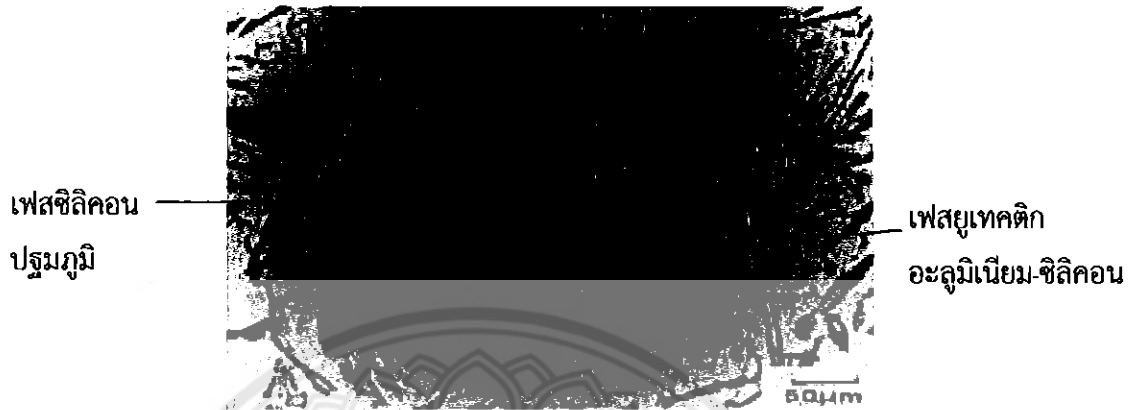
รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทคติก

ที่มา : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838809012468>

2.1.2.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีองค์ประกอบแบบไฮเปอร์ยูเทคติก ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก จะมีสมบัติทนต่อการเสียดสีได้ดี และมีค่าการขยายตัวที่ดี ดังนั้นจึงมักนำไปใช้งานประเภทลูกสูบที่มีการสั่นดาปภายใน และเสื้อสูบ

เครื่องย่นดัด ที่ผลิตด้วยการหล่อในแม่พิมพ์ถาวร ซึ่งใช้ได้โดยไม่ต้องมีปลอกสูบเหล็ก โดยโลหะผสมประเภทนี้จะให้โครงสร้างจุลภาคในลักษณะของซิลิคอนปฐมภูมิที่หายาก แสดงดังรูปที่ 2.4 ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเปราะ แตกหักได้ง่าย



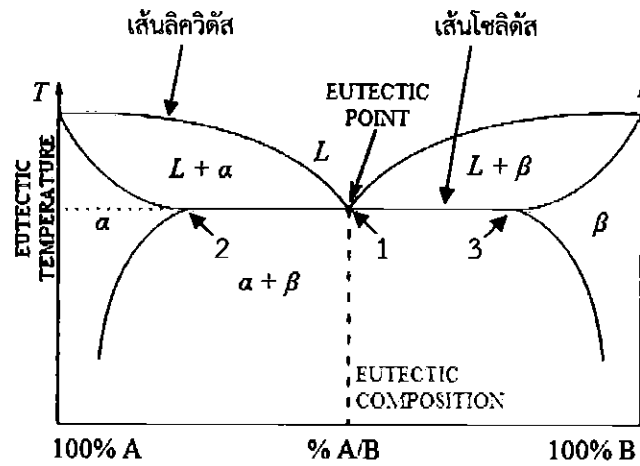
รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทคติก
ที่มา : <http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/2/phase-diagram/al-sihai.htm#page4>

2.1.3 อะลูมิเนียมผสม เกรด A356

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด A356 เป็นอะลูมิเนียมผสมประเภทไฮโปยูเทคติก ประกอบด้วย ซิลิคอนร้อยละ 6.5-7.5 ทองแดงร้อยละ 0.02 แมกนีเซียมร้อยละ 0.30-0.45 เหล็กร้อยละ 0.15 สังกะสีร้อยละ 0.07 และแมงกานีสร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนัก ซึ่งอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 นี้เป็นที่รู้จัก และใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย เช่น ชิ้นส่วนประกอบยานพาหนะ เนื่องจากมีความเหนียว และความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก (สุทธาวัลย์, 2550) โดยอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 มีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ นั่นคือ มีความสามารถในการหล่อที่ดี มีอัตราการหดตัวต่ำ (Low Shrinkage) มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน สามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยกรรมวิธีความร้อนแบบการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening หรือ Age Hardening) และมีโอกาสเกิดการแตกร้าวในขณะร้อนหลังจากการหล่อต่ำ

2.2 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว

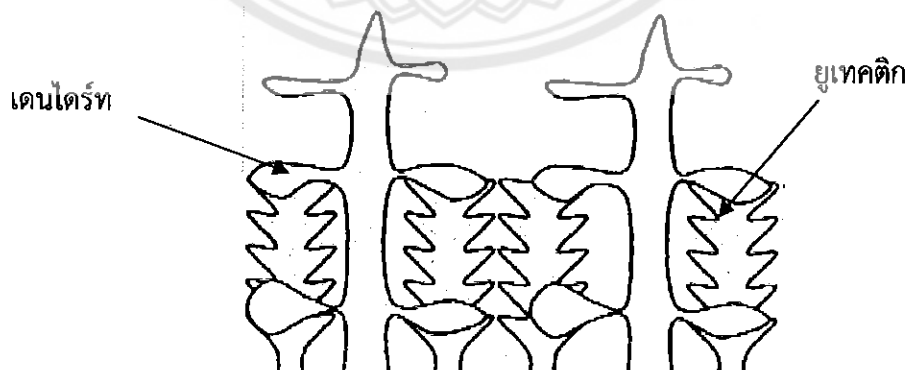
การแข็งตัวของโลหะ หรือโลหะผสมในการหล่อโลหะนั้น นับว่ามีความสำคัญมากต่อการผลิตในอุตสาหกรรม สำหรับกรณีที่มีการแข็งตัวเป็นไปตามภาวะสมดุล โลหะผสมจะมีพฤติกรรมการแข็งตัวเป็นไปตามแผนภูมิสมดุล แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภูมิสมดุลโลหะผสม

ที่มา : http://en.wikipedia.org/wiki/Eutectic_system

โลหะผสม ณ จุดที่ 1 เรียกว่าโลหะผสมยูเทคติก ซึ่งที่ตำแหน่งนี้อุณหภูมิลิควิดัส (Liquidus Temperature) กับอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus Temperature) จะเท่ากัน เรียกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) โดยการแข็งตัวที่จุดนี้ จะเกิดการแข็งตัวที่เป็นของแข็งสองชนิดที่มีความต่างขององค์ประกอบทางเคมี และระบบผลึก ส่งผลให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปด้วย ถ้าองค์ประกอบทางเคมีของโลหะหลอมเหลวน้อยกว่าจุดที่ 1 แต่มากกว่าองค์ประกอบทางเคมี ณ จุดที่ 2 จะเรียกโลหะที่จุดนี้ว่า โลหะผสมไฮโปยูเทคติก จะเริ่มเกิดการแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าเส้นลิควิดัสเพียงเล็กน้อย ของแข็งที่เกิดขึ้นมาก่อนจะเป็นเฟสอัลฟาของธาตุ A ที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ ซึ่งจะโตตามระยะเวลาการเย็นตัว จากนั้นเฟสยูเทคติก จะเกิดขึ้นตามมาในบริเวณระหว่างแขนของเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 2.6 แต่ถ้าส่วนผสมทางเคมีของโลหะหลอมเหลวมากกว่าจุดที่ 1 แต่น้อยกว่าส่วนผสมจุดที่ 3 จะเรียกโลหะที่จุดนี้ว่า โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก โดยการแข็งตัวจะเหมือนกับไฮโปยูเทคติก เพียงแต่การเกิดเฟสเริ่มต้น จะปรากฏเฟสของธาตุ B มาก่อน จากนั้นจึงเกิดเฟสยูเทคติกของ A และ B ตามมา (Lashkari, 2008)



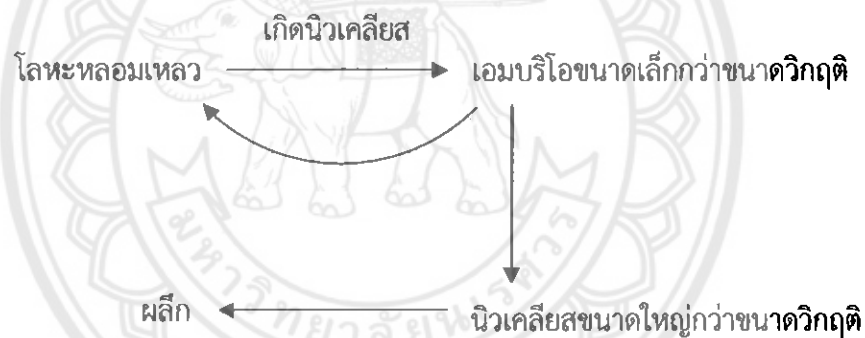
รูปที่ 2.6 ลักษณะการแข็งตัวของโลหะผสมทั่วไป

ที่มา : สมบัติ (2548)

โดยการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวแบ่งออกเป็น 3 กลไกด้วยกัน คือ กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation) กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation) กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบสภาวะพลศาสตร์ (Dynamic Nucleation) โดยมีรายละเอียดดังนี้

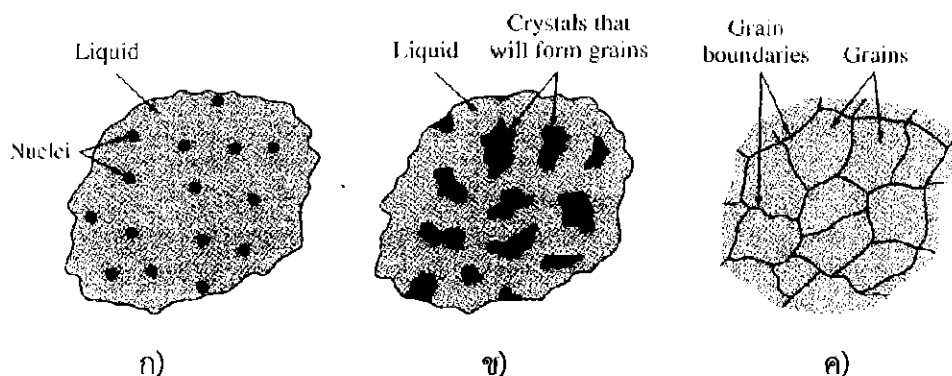
2.2.1 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์

เป็นกลไกที่ง่ายที่สุดมักจะถูกนำมาพิจารณาก่อนเสมอ กล่าวคือ กลไกนี้เกิดขึ้นในการแข็งตัวของโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของจุดเยือกแข็งสมดุล (Equilibrium Freezing Temperature) ของโลหะนั้นมากๆ นิวเคลียสที่เกิดขึ้นโดยกลไกนี้ จะเกิดการเคลื่อนตัวของอะตอมโลหะอย่างช้าๆ และเกิดพันธะระหว่างกัน เรียกการเกิดนั้นว่า เอมบริโอ (Embryo) และถ้าเกิดพันธะระหว่างกัน จนกระทั่งมีขนาดที่มีความเสถียร เรียกว่า ขนาดวิกฤต (Critical Size : r^*) โดยถ้าขนาดของเอมบริโอมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤต จะถูกละลายกลับเป็นโลหะหลอมเหลว แต่ถ้าเอมบริโอมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤต เรียกว่า นิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งจะอยู่ และเติบโตเป็นผลึกต่อไป แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภูมิแสดงการเกิดผลึกของโลหะหลอมเหลว

โดยเริ่มแรกโลหะจะอยู่ในสภาพที่เป็นของแข็ง ยึดกันด้วยพันธะโลหะ (Metallic Bond) ซึ่งมีระดับพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibb's Free Energy) ต่ำ เมื่อได้รับความร้อน พลังงานอิสระของกิบส์จะมากขึ้น อะตอมมีการสั่นที่มากขึ้น ทำให้โลหะหลอมเหลวในสภาพของแข็งหลอมเหลวกลายเป็นโลหะหลอมเหลว และเมื่ออุณหภูมิโลหะหลอมเหลวลดต่ำลง พลังงานอิสระของกิบส์ ก็ต่ำลงด้วย การสั่นของอะตอมก็น้อยลง และอะตอมเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้น ตามอุณหภูมิที่ลดลง จนเกิดการรวมตัวกัน กลายเป็นนิวเคลียส (Nucleus) ขนาดเล็ก นั่นคือ จุดเริ่มต้นของการแข็งตัว จากนั้นนิวเคลียสจะมีการขยายตัวใหญ่ขึ้น รวมตัวกันกลายเป็นผลึก (Crystal) และผลึกก็ขยายตัวจนชนกัน ที่เรียกว่า เกรน (Grain) ซึ่งอยู่ในสภาพของแข็ง แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวกลายเป็นของแข็ง

ก) การเกิดนิวเคลียส

ข) การเติบโตของนิวเคลียสเป็นผลึก

ค) การเชื่อมต่อกันของผลึกกลายเป็นเกรน

ที่มา : www.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/2/material/IE2302_CH4.pdf

ปริมาณนิวเคลียสจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว ถ้าหากโลหะหลอมเหลวมีอัตราการเย็นตัวที่เร็ว จะทำให้เกิดนิวเคลียสเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวช้า จะเกิดนิวเคลียสน้อย ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่

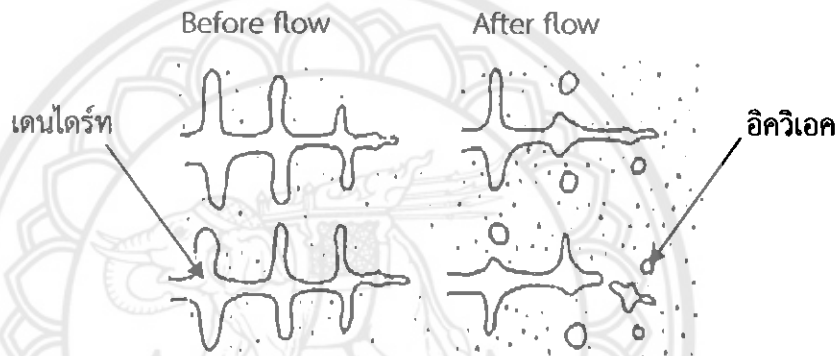
2.2.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์

กลไกการเกิดนิวเคลียสในลักษณะนี้ จะเกิดขึ้นได้โดยอาศัยสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่ในโลหะหลอมเหลวเป็นนิวเคลียส ซึ่งกลไกการเกิดในลักษณะนี้มักจะเกิดกับโลหะเป็นส่วนใหญ่ (ผศ. ณรงค์ศักดิ์, 2553) เพราะในการหลอมโลหะย่อมมีสิ่งเจือปนอยู่ในโลหะเสมอ ทั้งในรูปของสารมลทิน (Impurities) ที่มาจากวัตถุดิบ มาจากผนังของแบบหล่อ มาจากวัสดุทนไฟที่ใช้ภายในเตา และมาจากเข็ารองรับโลหะหลอมเหลวที่กระแทกหลุ่ตรงในระหว่างการหล่อ โดยอนุภาคพวกนี้มักอยู่ในรูปของสารแขวนลอย ที่มีอนุภาคเล็กๆ ลอยอยู่ในโลหะหลอมเหลว และทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมให้กับโลหะหลอมเหลว ซึ่งจะเรียกนิวเคลียสเทียมนี้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Catalysts) ด้วยการที่มีนิวเคลียสเทียมมาเกี่ยวข้อง จึงทำให้กลไกการเกิดนิวเคลียสโดยวิธีนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์

2.2.3 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบสภาวะพลศาสตร์

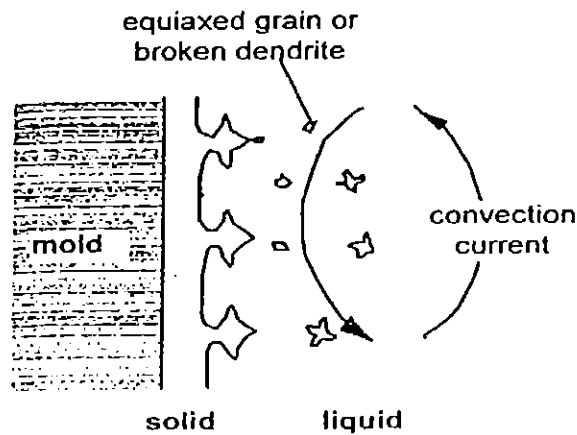
นอกจากกลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ และวิวิธพันธ์แล้ว ยังพบว่าในสภาวะพลศาสตร์ หรือสภาวะที่เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวในระหว่างการแข็งตัว ก็สามารถเกิดนิวเคลียสได้เช่นกัน โดยในระหว่างการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวโครงสร้างเดนไดรท์จะเกิดการแตกหัก (Crystal Fragmentation) และได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอควิแอกซ์ (Equiaxed) ซึ่งเมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงแบบหล่อ จะเกิดการไหลวน เนื่องจากการเท ร่วมกับการไหลที่เกิดจากความต่างของอุณหภูมิ (Thermal Solutal Convection) ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของโลหะหลอมเหลวบริเวณต่างๆ กล่าวคือ โลหะหลอมเหลวในบริเวณที่ติดอยู่กับผนังแบบหล่อเป็นส่วนที่เย็น

จะมีความหนาแน่นมากกว่าโลหะหลอมเหลวที่อยู่ตรงกลางของแบบหล่อ ทำให้เกิดการไหลในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วง ในขณะที่เดียวกันบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลว จะเกิดการไหลบริเวณผิวสัมผัส เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกัน ซึ่งเกิดความแตกต่างของปริมาณตัวถูกละลาย (Solute) โดยทิศทางการไหลจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย (Solvent) เมื่อนำเอาผลมารวมกันจะเกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวบนผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวเฉพาะจุดอีกครั้ง (Local Remelting) ของเดนไดรต์แบบแท่ง (Columnar Dendritic) และเกิดการแตกหักของเดนไดรต์ (Dendrite Fragmentation) กลายเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นอิกวิเอค แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การแตกหักของเดนไดรต์ เมื่อมีการไหลของโลหะหลอมเหลว
ที่มา : Steube (1992)

โดยการเกิดในลักษณะนี้ จะเกิดมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงของการไหลเวียนโลหะหลอมเหลว (Convection) เช่น การทำให้สั้นสะเทือนด้วยคลื่นอัลตราโซนิค หรือการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก เป็นต้น ซึ่งกลไกการเกิดนิวเคลียสเมื่ออยู่ในสภาวะพลศาสตร์นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อนิวเคลียสของเดนไดรต์ขนาดเล็ก (Pre-Dendritic Nuclei) และเกิดขึ้นขณะเทโลหะหลอมเหลว โดยเดนไดรต์ขนาดเล็กดังกล่าว เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วบริเวณผนังแบบหล่อ และถูกพัดเข้าสู่โลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแบบหล่อ จากการไหลที่รุนแรงในช่วงแรกของการเทโลหะหลอมเหลว เมื่อถูกพาเข้าสู่โลหะหลอมเหลว เดนไดรต์ขนาดเล็กบางส่วนจะถูกละลายกลับไปเป็นโลหะหลอมเหลว และเมื่อโลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแบบหล่ออยู่ในสภาวะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว เดนไดรต์ขนาดเล็กที่ยังเหลือ จะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียส และเติบโตเป็นอิกวิเอค สามารถอยู่ได้โดยไม่ถูกละลายกลับ (Remelt) แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ภาพจำลองการไหลที่เกิดจากความต่างของอุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของเดนไดรท์จากผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ
ที่มา : Stefanescu (2002)

2.3 กระบวนการหล่อโลหะ (Casting Process)

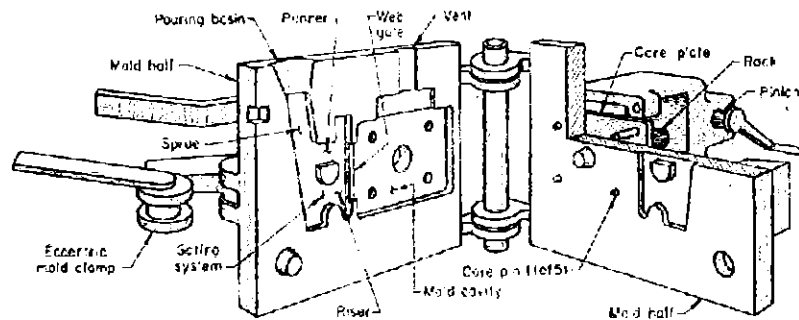
กระบวนการหล่อโลหะ หมายถึง การเทโลหะหลอมเหลวเข้าไปในโพรงแบบหล่อแล้วปล่อยให้แข็งตัว มีรูปร่างตามที่ต้องการ หรือหากจะให้ความหมายที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น จะหมายถึง เริ่มต้นจากการให้ความร้อนเพื่อหลอมโลหะให้มีสภาพเป็นของเหลว (Melting) จากนั้นทำการปรับปรุงโลหะหลอมเหลวให้มีส่วนผสมทางเคมีตามต้องการ แล้วทำการเทโลหะหลอมเหลวลงในโพรงแบบหล่อ (Mold Cavity) ที่มีรูปร่างตามชิ้นงานที่เราต้องการ จากนั้นปล่อยให้โลหะหลอมเหลวเย็นตัวลง และเกิดการแข็งตัว (Solidify) จะได้ชิ้นงานตามต้องการ ซึ่งการหล่อโลหะนี้ มีหลายวิธี เช่น การหล่อโลหะแบบหล่อทราย (Sand Casting) การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting) เป็นต้น

2.3.1 การหล่อโลหะแบบหล่อทราย

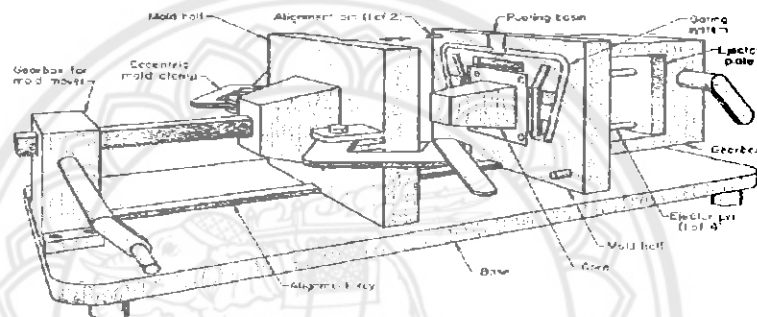
การหล่อโลหะแบบหล่อทราย เป็นการหล่อที่มีมานาน ซึ่งวิธีนี้จะใช้กันอย่างแพร่หลายประมาณร้อยละ 90 ของงานหล่อทั้งหมด โดยการหล่อวิธีนี้ เมื่อหล่อจนได้ชิ้นงานแล้ว ต้องทำลายแม่พิมพ์ทิ้ง เพื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แต่ทรายสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ซึ่งการหล่อในวิธีนี้จะมีรอบการผลิตต่ำ สะดวกต่อการออกแบบการผลิต ต้นทุนด้านเครื่องมือ และด้านการผลิตต่ำ แต่ยังมีข้อเสีย คือ คุณภาพ และลักษณะของผิวชิ้นงานสุดท้ายไม่เรียบ

2.3.2 การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร

แบบหล่อถาวร (Permanent Mold) เป็นแม่พิมพ์ที่ใช้งานแล้ว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยส่วนมากจะทำมาจากเหล็กหล่อสีเทา เหล็กกล้า บรอนซ์ และแกรไฟต์ ซึ่งลักษณะของแบบหล่อถาวรอาจมีลักษณะต่างๆ ที่มีระบบการทำงานด้วยมือ โดยสามารถปิด-เปิดแบบได้ แสดงดังรูปที่ 2.11 และบนฐานรองที่ออกแบบกลไกให้เลื่อนเข้า-ออกได้สะดวก แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แบบหล่อถาวรที่มีแบบปิด-เปิด อย่างง่าย
ที่มา : ผศ. ณรงค์ศักดิ์ (2554)



รูปที่ 2.12 แบบหล่อถาวรที่มีแบบเลื่อนปิด-เปิด บนฐานรอง
ที่มา : ผศ. ณรงค์ศักดิ์ (2554)

ดังนั้นการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร เป็นการนำโลหะหลอมเหลวเทลงสู่แม่พิมพ์ถาวร แสดงดังรูปที่ 2.13 แล้วรอให้ชิ้นงานแข็ง และเย็นตัว จึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์ที่ใช้ไปนั้นสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่อีกได้ โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะของผิวชิ้นงานที่เรียบ การตกแต่งผิวก็น้อย ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพสูง ส่งผลให้สมบัติทางกลสูงตามไปด้วย แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายสูง และมีข้อจำกัดด้านขนาดของชิ้นงาน ชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากแบบหล่อถาวร เช่น ลูกสูบเครื่องยนต์ หัวกระบอกสูบ ตลอดจนชิ้นส่วนของเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น

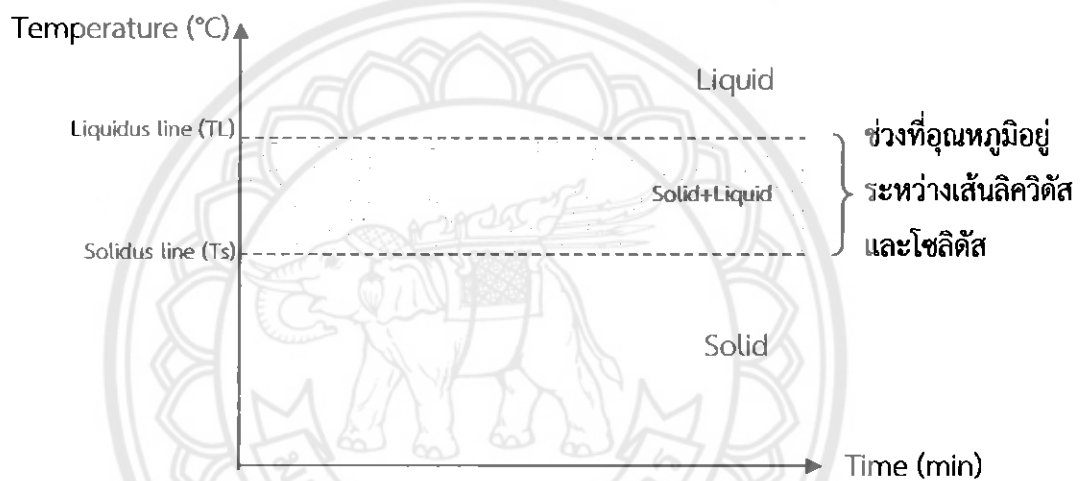


รูปที่ 2.13 การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร
ที่มา : Haga, T. (2002)

2.4 การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processes)

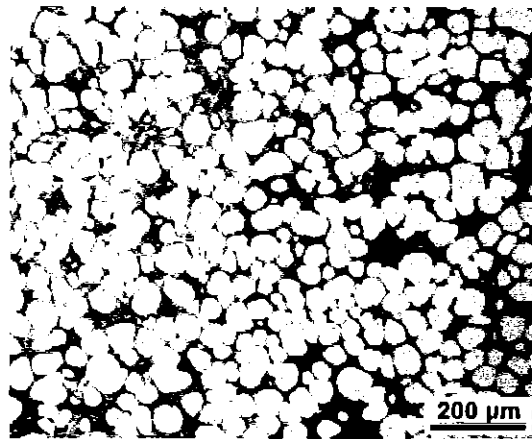
การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งนี้ ได้ถูกคิดค้นโดยสถาบันเทคโนโลยี แมซซาชูเซต (MIT) ในปี ค.ศ. 1970 โดยศึกษาค้นคว้าวิจัยจากกรรมวิธีดิกโซแคสติง (Thixocasting) และรีโอแคสติง (Rheocasting) โดยรีโอแคสติงที่ค้นพบ คือการหล่อโดยใช้ลักษณะการกวน (Stir Casting) ซึ่งเป็น การหล่อโลหะ โดยให้โลหะหลอมเหลวมีการเคลื่อนไหวเข้าสู่แม่พิมพ์

การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดใกล้เคียงกับโครงร่างสุดท้าย (Near Net Shape) โดยในการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งนี้ จะผลิตในขณะที่ โลหะหลอมเหลวอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง นั่นคือจะเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อในช่วงที่อุณหภูมิอยู่ ระหว่างเส้นลิกวิดัส และโซลิดัส แสดงดังรูปที่ 2.14



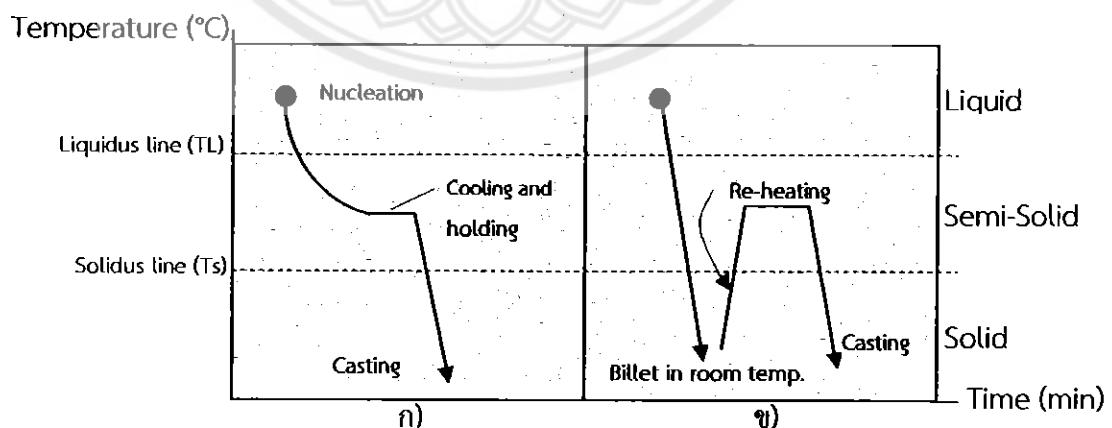
รูปที่ 2.14 ช่วงอุณหภูมิของเฟสกึ่งแข็ง
ที่มา : Figueredo (2001)

จากการวิจัยของสถาบัน MIT ทำให้เกิดการนำแนวคิดของการตัดเฉือนของของแข็งที่อยู่ในโลหะหลอมเหลว เนื่องจากการเคลื่อนไหวของโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ ในขณะที่โลหะหลอมเหลวเริ่มแข็งตัว หรือเริ่มเกิดผลึก โดยจะเกิดโครงสร้างที่เป็นกลุ่มของเดนไดรต์ขนาดเล็ก และมีลักษณะกลมแยกตัวออกมา ซึ่งโครงสร้างจะแตกต่างไปจากโครงสร้างที่ไม่มีการให้แรงเฉือนกับโลหะหลอมเหลว ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำแนวคิดของการตัดเฉือนของของแข็งในโลหะหลอมเหลวนี้ พัฒนามาเป็นกรรมวิธีการหล่อโลหะแบบดิกโซแคสติง และถูกพัฒนาต่อมาเป็นการหล่อโลหะแบบรีโอแคสติง โดยทั้ง 2 วิธีนี้ จะให้โครงสร้างที่มีรูปร่างกลม ไม่เป็นเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง
ที่มา : Hong-Min Gua (2009)

การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งด้วยวิธีการหล่อแบบติกโซแคสติง เป็นการหล่อที่ถูกคิดค้นขึ้นมาก่อนการหล่อแบบรีโอแคสติง โดยการนำเอาวัตถุดิบ หรือแท่งโลหะ (Ingot) ที่ได้จากการหล่อแบบรีโอแคสติง มาให้ความร้อนอีกครั้ง (Reheating) เพื่อทำการอัดขึ้นรูป (Forging) ตามแบบที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 2.16 ข) ซึ่งการหล่อด้วยวิธีนี้มีข้อเสีย คือกระบวนการมีความซับซ้อน วัตถุดิบแพง เสียค่าใช้จ่ายสูง ส่วนการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งด้วยวิธีการหล่อแบบรีโอแคสติง เป็นการปรับปรุงวิธีการหล่อแบบติกโซแคสติง ให้มีขั้นตอนการหล่อที่น้อยลง โดยวิธีนี้จะปรับปรุงโครงสร้างให้มีรูปร่างกลม ในช่วงสภาวะกึ่งแข็ง ซึ่งเริ่มจากวัตถุดิบที่มีสถานะเป็นของแข็ง นำไปหลอมจนมีสถานะเป็นของเหลว แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนโลหะหลอมเหลวอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง แล้วทำการปรับปรุงโครงสร้างในช่วงนี้ ให้ได้โครงสร้างตามต้องการ แล้วจึงเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ โดยการหล่อวิธีนี้มีข้อดี คือ ไม่ต้องนำไปให้ความร้อนรอบสอง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการหล่อแบบติกโซแคสติง แสดงดังรูปที่ 2.16 ก)



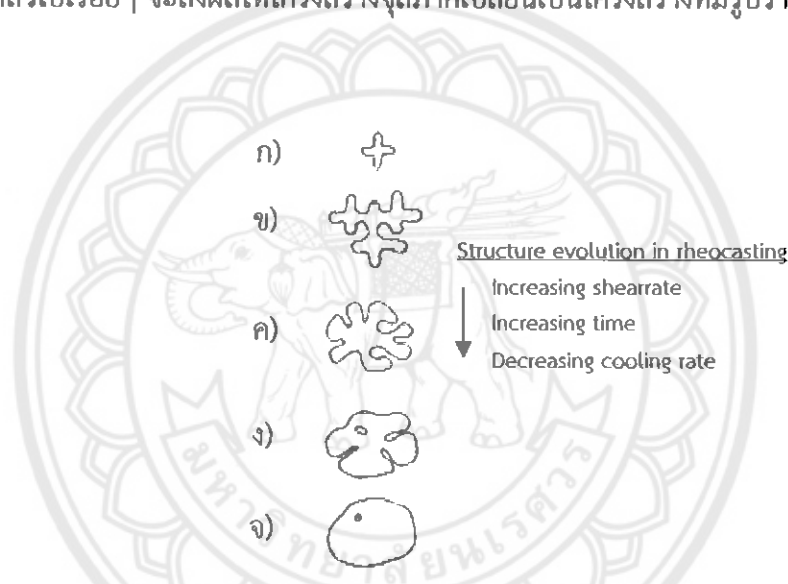
รูปที่ 2.16 ลักษณะการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง

ก) การหล่อแบบรีโอแคสติง

ข) การหล่อแบบติกโซแคสติง

ที่มา : Figueredo (2001)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นเดนไดรต์ ให้กลายเป็นโครงสร้างที่มีรูปร่างกลม ของการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง เมื่อได้รับแรงกระทำภายใต้การเคลื่อนที่ของของเหลว จะเริ่มจากการเกิดนิวเคลียสขนาดเล็กจำนวนมาก แสดงดังรูปที่ 2.17 ก) จากนั้นนิวเคลียสมีการโตเพิ่มขึ้น กลายเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 2.17 ข) จากนั้นเดนไดรต์จะเปลี่ยนแปลงไป โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette like structure) เนื่องจากมีการปรับปรุงโครงสร้างในขณะที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง โดยการเพิ่มแรงเฉือนให้กับโลหะหลอมเหลว เพิ่มระยะเวลาในการโตของนิวเคลียส และลดอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ แสดงดังรูปที่ 2.17 ค) จากนั้นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบขยายตัวใหญ่ขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.17 ง) เมื่อเพิ่มแรงเฉือนให้กับโลหะหลอมเหลว เพิ่มระยะเวลาในการโตของนิวเคลียส และลดอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวไปเรื่อยๆ จะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่มีรูปร่างกลม แสดงดังรูปที่ 2.17 จ)



รูปที่ 2.17 โครงสร้างที่มีรูปร่างกลม ของการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง

- ก) จุดเริ่มต้นของเดนไดรต์
- ข) เดนไดรต์ขยายตัว
- ค) โครงสร้างที่รูปร่างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ
- ง) โครงสร้างที่รูปร่างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบขยายตัว
- จ) โครงสร้างที่มีรูปร่างกลม

ที่มา : Fleming (2002)

สำหรับการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง จะทำให้ชิ้นงานมีขนาดใกล้เคียงกับโครงร่างสุดท้าย เนื่องจากมีการควบคุมอัตราส่วนของแข็ง และของเหลวขณะหล่อโลหะ โครงสร้างจุลภาคมีความกลม และละเอียด เนื่องจากมีการปรับปรุงโครงสร้างขณะที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง มีผลให้สมบัติทางกลดีขึ้น เพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ เนื่องจากความร้อนของโลหะหลอมเหลวลดลง ลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับโลหะหลอมเหลว ในขั้นตอนการเทโลหะหลอมเหลวลงในแม่พิมพ์ แต่อย่างไรก็ตามการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง ยังพบข้อเสียด้านความหนืดของโลหะ-

หลอมเหลวสูง ทำให้เกิดรูพรุนมากกว่า เมื่อเทียบกับการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และโครงสร้างจะไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneity) ทั่วทั้งชิ้นงาน

ในปัจจุบันการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ กลุ่มของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น กลุ่มของอะลูมิเนียมผสม เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่สูง เมื่อเทียบกับน้ำหนักที่เบา อันเป็นผลมาจากแรงผลักดันของโรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีน้ำหนักเบาขึ้นเอง และในการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง สามารถหล่อได้หลายวิธี เช่น การทำเกรนให้ละเอียดโดยการเติมสารเคมี (Chemical Grain Refining) การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งโดยการพ่นฟองแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid Process) การกวนโดยใช้แรงทางกล (Mechanical Stirring) การกวนโดยใช้แรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Stirring) การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope Technique) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน

2.4.1 การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งโดยการพ่นฟองแก๊ส

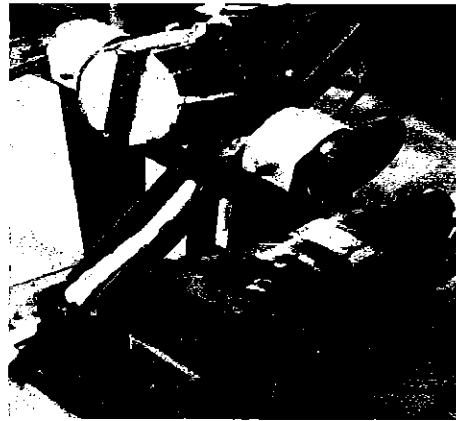
การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งโดยการพ่นฟองแก๊ส เป็นวิธีใหม่ในการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งแบบรีโอแคสติงวิธีหนึ่ง โดยกลไกของการหล่อวิธีนี้ได้ใช้หลักการที่ว่า หากโลหะหลอมเหลวถูกพ่นฟองแก๊สเข้าไป แก๊สจะทำให้โลหะหลอมเหลวเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และแรงดันจากการพ่นฟองแก๊ส จะทำให้เดนไดรต์เกิดการแตกหัก ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่มีรูปร่างกลมอย่างสม่ำเสมอขึ้นมาแทน

2.4.2 การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งด้วยเทคนิคการกวนด้วยแรงทางกล

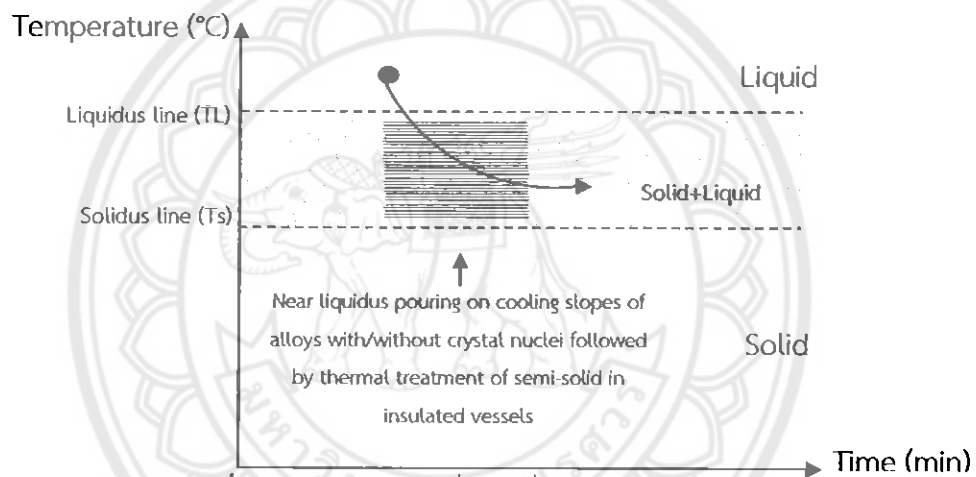
เป็นการกวนด้วยแรงทางกลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับเหล็ก และโลหะนอกกลุ่มเหล็ก โดยการให้แรงเฉือนกับโลหะหลอมเหลว นั้น จะทำในขณะที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง เพื่อเป็นการลดขนาดเกรน และจำกัดการโตของเดนไดรต์ โดยการเกิดนิวเคลียสภายใต้การกวนด้วยแรงทางกล จะเกิดนิวเคลียสขึ้นที่บริเวณผนังของเบ้าหลอม และบริเวณใบกวน โดยโลหะกึ่งแข็งที่ผ่านการกวนนั้น จะมีโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette Structure) ขนาดเล็กมากกว่าการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ซึ่งจะมีความเร็วในการกวน (Stirring Rate) และระยะเวลาในการกวนโลหะหลอมเหลว (Stirring Time) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของอนุภาค

2.4.3 การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น

การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็งด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น เป็นการหล่อวิธีหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มของ New Rheocasting Process ซึ่งได้รับการพัฒนาจากโรงงาน UBE ในประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ในการผลิตโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม ซึ่งเทคนิคนี้ จะเป็นการนำอะลูมิเนียมผสมมาหลอม จนเป็นโลหะหลอมเหลว จากนั้นจึงเทลงสู่แม่พิมพ์โดยผ่านรางเทหล่อเย็น แสดงดังรูปที่ 2.18 ช่วงอุณหภูมิของการเทผ่านรางเทหล่อเย็น จะอยู่ระหว่างเส้นลิวิตัส กับเส้นโซลิดัส และเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็นที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น
ที่มา : Birol Y. (2007)



รูปที่ 2.19 ช่วงอุณหภูมิที่แข็งที่ใช้ในการเทผ่านรางเทหล่อเย็น
ที่มา : Figueredo (2001)

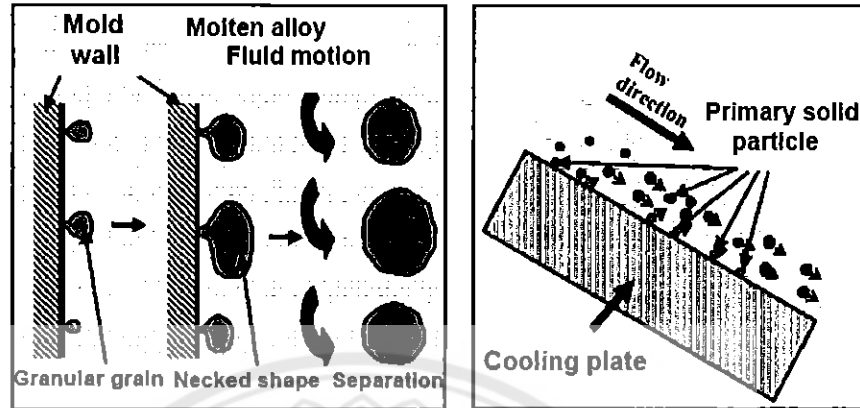
2.4.3.1 การฟอร์มตัวของโลหะหลอมเหลวที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

ก. นำโลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย เทลงสู่แม่พิมพ์ โดยผ่านรางเทหล่อเย็น

ข. เมื่อโลหะหลอมเหลวเทลงบนรางเทหล่อเย็น ระหว่างผิวสัมผัสของรางเทหล่อเย็น กับโลหะหลอมเหลว ความร้อนจะถูกดึงให้กับผนังของรางเทหล่อเย็น ทำให้เกิดนิวเคลียสขนาดเล็กในโลหะหลอมเหลวจำนวนมาก ทำให้เดนไดรต์ทิศทางการโตพุ่งสวนทางกับทิศทางการเย็นตัว แสดงดังรูปที่ 2.20 ก)

ค. เนื่องจากการไหลของโลหะหลอมเหลวเหลว ทำให้เกิดความเค้นไปกระทำกับเดนไดรต์ ทำให้เดนไดรต์เกิดการแตกหัก และการไหลของโลหะหลอมเหลวยังทำให้เกิดการหลอมใหม่อีกครั้ง และเกิดนิวเคลียสใหม่ควบคู่กันไป ซึ่งการเกิดในลักษณะนี้ซ้ำไปซ้ำมา จึงทำให้มีการกระจายตัวของความร้อน และการกระจายตัวของนิวเคลียส ส่งผลให้โครงสร้างที่ได้มีการ

กระจายตัวที่ดี และมีการเกิดเดนไดรต์น้อยลง จากนั้นโลหะหลอมเหลวจึงไหลลงสู่แม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.20 ข)



ก)

ข)

รูปที่ 2.20 การฟอร์มตัวของโลหะหลอมเหลวเมื่อเทผ่านรางเทหล่อเย็น
ที่มา : Motegi (2004)

2.4.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

ก. ความชันของรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope)

ความชันของรางเทหล่อเย็น มีผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ซึ่งลักษณะโครงสร้างนั้น ขึ้นอยู่กับอัตราการตัดเฉือนระหว่างโลหะหลอมเหลวกับรางเทหล่อเย็น

ก.1 ถ้าความชันของรางเทหล่อเย็นมาก ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็นก็จะมาก ทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นก็จะมากตามไปด้วย ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดเล็ก และละเอียด

ก.2 ถ้าความชันของรางเทหล่อเย็นน้อย ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็นก็จะน้อย ทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นก็จะน้อยตามไปด้วย ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดใหญ่ และหยาบ

ข. อุณหภูมิเท (Pouring Temperature) หรืออัตราส่วนของแข็ง (Solid Fraction)

อุณหภูมิเท หรืออัตราส่วนของแข็ง คือปริมาณของของแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างที่โลหะนั้นยังอยู่ในสภาพหลอมเหลว มีความสำคัญ ดังนี้

ข.1 ปริมาณของอัตราส่วนของแข็งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในขณะที่มีการเทโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็น ถ้ามีอุณหภูมิสูงก็จะมีอัตราส่วนของโลหะหลอมเหลวสูง

ข.2 การเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ในอัตราส่วนของแข็งที่ต่ำ จะได้โครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดใหญ่ และหยาบ แต่ความสามารถการเติมเต็มแม่พิมพ์ (Mold Filling) สูง ในทางตรงกันข้าม ถ้าเทโลหะหลอมเหลวที่สัดส่วนของแข็งสูง จะได้โครงสร้างจุลภาคขนาดเล็ก และละเอียด แต่ความสามารถในการเติมเต็มแม่พิมพ์ต่ำลง

ข.3 การเพิ่มของอัตราส่วนของแข็งของโลหะหลอมเหลวก่อนการเท จะส่งผลให้ปริมาณรูพรุนสูงขึ้น

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ

การตรวจสอบโครงสร้างของโลหะ ก็เพื่อต้องการรู้ถึงโครงสร้างที่มีอยู่ในโลหะผสมนั้นๆ หรือรู้ถึงตำหนิที่มีอยู่ในโลหะผสมนั้นๆ โดยโครงสร้างจุลภาค และรูพรุน จะเกี่ยวเนื่องถึงสมบัติทางกลของวัสดุด้วย นั่นคือ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างสามารถนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม การตรวจสอบโครงสร้างนั้นสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ซึ่งการตรวจสอบแต่ละลักษณะจะมีวิธีการ และจุดประสงค์แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนี้ เป็นการตรวจสอบโครงสร้างด้วยการมองด้วยตาเปล่า หรือถ้าใช้กล้องขยายก็มีกำลังการขยายไม่เกิน 50 เท่า การเตรียมชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคนั้นไม่ยุ่งยาก เพราะว่าเป็นการตรวจสอบรูพรุนภายในของโลหะ การแยกชิ้นของผลึก รอยร้าว รอยแตก และหน้าตัดที่ถูกดึงจนขาด เป็นต้น

2.5.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค กระทำได้โดยการใช้อุปกรณ์จุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้อำนาจขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะสามารถให้อำนาจขยายสูงถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่า

2.5.2.1 การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

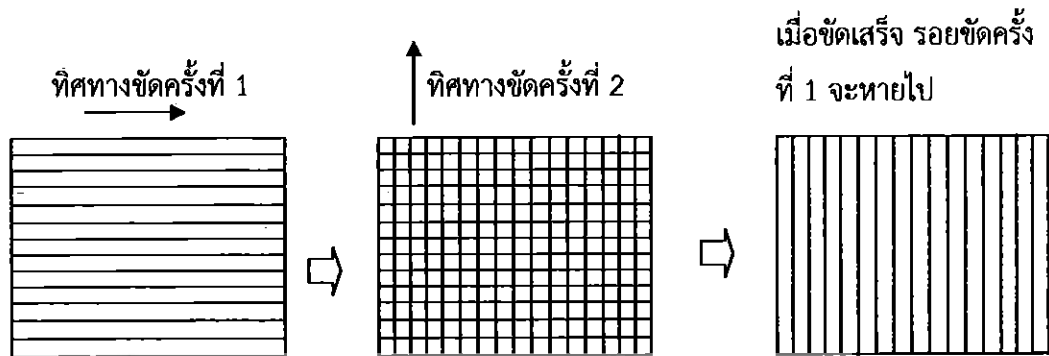
ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคนั้น ควรตัดให้มีพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อน ให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่าความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดข้อผิดพลาด

สำหรับขนาดของชิ้นตรวจสอบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้ว และมีความสูงไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมควรมีขนาด 25 x 25 x 20 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้อย่างง่าย

หลังจากได้ชิ้นตรวจสอบที่มีขนาดตามความต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้ เพื่อให้สามารถนำชิ้นงานตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ โดยขั้นตอนที่กล่าวถึงนั้น มีรายละเอียดดังนี้

ก. การขัดผิวชิ้นงานตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำมาจากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เบอร์ 180, 320, 600 และ 1000 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบ แล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะที่ขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรก ซึ่งได้แก่ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อ

ต้องการเปลี่ยนกระดาศทรายเบอร์ต่อไป ควรขัดชิ้นงานตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาศทรายเบอร์สุดท้าย แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ลักษณะแนวทางการขัดชิ้นงานตรวจสอบสลับเป็นตาราง

อนึ่ง การขัดผิวชิ้นงานตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเกิดข้อผิดพลาด

ข. การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นงานตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide) โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาด 0.3 และ 1 ไมครอน การขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำ เกลงบนสักหลาด แล้วขัดผิวจนเป็นมัน

ค. การกัดด้วยกรด (Etching) ชิ้นงานตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ซึ่งกรดไฮโดรฟลูออริกจะมีขนาดความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร หลังจากนั้นจึงนำอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการกัดกรดแล้ว ไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

2.5.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ จะมีลักษณะของกล้อง แสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่งสามารถที่จะช่วยให้มนุษย์มองเห็นรายละเอียดได้สูงสุดในระดับของช่วงแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ คือ 400-700 นาโนเมตรเพียงเท่านั้น (หรือที่ดีที่สุดก็อยู่ในช่วงระดับความละเอียด 200-400 นาโนเมตร) (วิรุฑ, 2553) โดยผู้ที่ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจ และเกิดทักษะเสียก่อน จึงค่อยเริ่มลงมือทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

ก. วางชิ้นงานตรวจสอบลงบนที่วางของกล้องจุลทรรศน์ ที่วางชิ้นงานตรวจสอบนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และเคลื่อนที่ไปทางซ้าย-ขวาได้ ทั้งนี้เพื่อการปรับชิ้นงานตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์วัตถุ และยังเป็นการปรับระยะชัดของภาพอีกด้วย

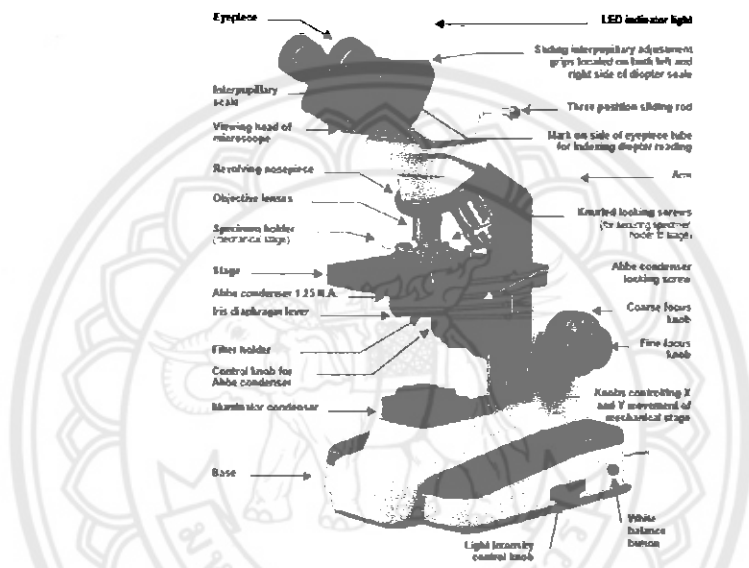
ข. เปิดสวิตช์ และปรับความเข้มของแสงตามต้องการ

ค. ปรับระยะชัดของภาพ (Focus) ซึ่งสามารถปรับได้ 2 ระบบคือ การปรับหยาบ (Coarse Focus Control) จะสามารถปรับระยะชัดของภาพได้รวดเร็ว แต่จะมี

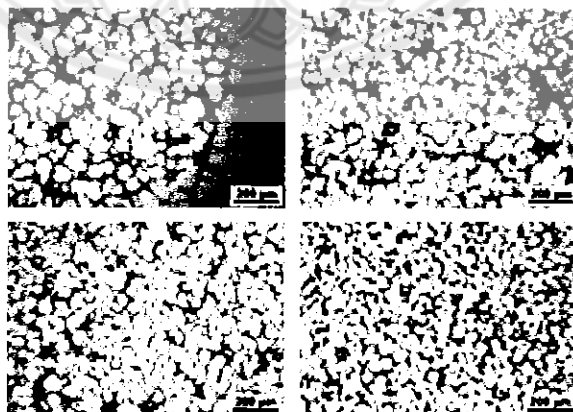
ความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ แต่สำหรับการปรับละเอียด (Fine Focus Control) นั้น จะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบ และจะไม่มี ความผิดพลาดเกิดขึ้นเลย

ง. เมื่อได้ภาพที่ชัดเจนแล้ว จึงถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคนั้นไว้ เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป โดยลักษณะของภาพที่ได้ จะเห็นในลักษณะของภาพ 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 2.23

จ. เมื่อต้องการหยุดการทำงาน ให้ปิดสวิตช์และนำชิ้นงานตรวจสอบออกจากที่วาง ควรระวังไม่ให้ชิ้นงานตรวจสอบกระทบกับเลนส์วัตถุ เพราะอาจทำให้เลนส์นั้นมีรอยเกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การมองภาพไม่ชัดเจน



รูปที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
ที่มา : มานพ (2535)



รูปที่ 2.23 ลักษณะภาพที่ได้จากการส่องของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง
ที่มา : Hong-Min Gua (2009)

2.6 ปัจจัยรูปร่างจากการวัดขนาดเกรน

ปัจจัยรูปร่างเป็นจำนวนมิติที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างจากกล้องจุลทรรศน์ที่อธิบายรูปร่างของอนุภาคที่ไม่สมมาตร ปัจจัยรูปร่างจะคำนวณจากการวัดขนาดเกรน ได้แก่ การวัดอนุภาคแบบ 2 มิติ ที่มาจากรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งปัจจัยรูปร่าง ปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ถ้าเท่ากับหนึ่งมักจะเป็นรูปร่างที่มีความสมมาตร เช่น วงกลม ทรงกลม สี่เหลี่ยม หรือก้อน

ปัจจัยรูปร่างส่วนใหญ่เป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก แสดงดังสมการที่ 2.1

$$A_r = \frac{d_{min}}{d_{max}} \quad (2.1)$$

เมื่อ d_{min} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุด

d_{max} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สุด

การทำปัจจัยรูปร่าง จะเป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันเส้นรอบรูป P และพื้นที่ A_r แสดงดังสมการที่ 2.2

$$F_{circ} = \frac{4\pi A_r}{P^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ F_{circ} = ปัจจัยรูปร่าง

P = เส้นรอบรูป

2.7 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง คือ สมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทาน หรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติทำให้เกิดรอยจากการกด ดังนั้นการทดสอบความแข็ง คือ การทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปโดยถาวร เมื่อถูกแรงกดกระทำลงบนชิ้นงาน ซึ่งการทดสอบความแข็งในลักษณะนี้ จะมีข้อจำกัดในการใช้งาน และไม่สามารถให้ข้อมูลที่แม่นยำ หรือกำหนดสเกลเฉพาะสำหรับวัสดุ และโลหะสมัยใหม่ได้ ซึ่งวิธีโดยปกติเพื่อหาค่าความแข็งคือ การวัดความแข็งของชิ้นงานจากความลึก หรือพื้นที่ของรอยกด โดยจะมีวิธีมาตรฐานหลัก 3 มาตรฐาน สำหรับการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง กับขนาดของรอยกด คือ การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness Test) การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Tests) และการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์

วิธีการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม และมุม 136 องศา ระหว่างผิวหน้าตรงข้าม ภายใต้ภาระ 1-100 กิโลกรัมแรง เป็นระยะเวลา 10-15 วินาที เส้นทแยงที่หลงเหลือบนผิวหน้าของวัสดุภายหลังจากการนำ

ภาระออก จะถูกวัดโดยกล้องจุลทรรศน์ และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเส้นทแยง ค่าความแข็งคำนวณจากผลหารของภาระที่ใช้ ต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของรอยกด

2.7.2 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบบรอกเวล

เป็นวิธีทดสอบความแข็งของโลหะที่นิยมใช้มากที่สุด โดยจะวัดความแข็งจากระยะกดที่ถูกห้กด กดด้วยแรงคงที่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบบริเนล และวิกเกอร์ ที่วัดจากแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีการวัดด้วยกันหลายสเกล เพื่อให้สามารถเลือกใช้วัดความแข็งได้เหมาะสมที่สุด ตามชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ โดยแรงที่ใช้ในการกดมี 2 แรง คือ แรงกดนำ (Minor Load) หมายถึง แรงที่ใช้กดให้หัวกดสัมผัสผิวทดสอบ แรงกดนำนี้จะมีขนาดไม่มากนัก โดยจะมีขนาดเพียง 10 กิโลกรัมแรงเท่านั้น และแรงกดตาม (Major Load) หมายถึง แรงที่ใช้ในการกดหัวกดเพื่อให้เกิดรอยกดบนผิวทดสอบ โดยขนาดของแรงกดนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่จะทำการทดสอบ เช่น อะลูมิเนียมผสมจะใช้การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบบรอกเวล สเกล B ที่ใช้หัวกดลูกบอลขนาด 1/16 นิ้ว และน้ำหนักกด 100 กิโลกรัมแรง เป็นต้น

2.7.3 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบบริเนล

การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบบริเนล ประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง หรือลูกบอลคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ภายใต้ภาระ 3000 กิโลกรัมแรง สำหรับวัสดุที่อ่อนสามารถลดภาระที่ 1500 หรือ 500 กิโลกรัมแรง เพื่อหลีกเลี่ยงรอยกดที่มากเกินไป ปกติจะคงภาระไว้ 10-15 วินาที ในกรณีเหล็กหล่อ และเหล็กกล้า และอย่างน้อย 30 วินาที สำหรับโลหะอื่นๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่เหลืออยู่บนวัสดุทดสอบจะถูกวัดโดยกล้องขยายกำลังต่ำ ค่าความแข็งคำนวณจากภาระที่ใช้ ต่อพื้นที่ผิวของรอยกด จะใช้สูตรคำนวณ ดังสมการที่ 2.1

$$HB = \frac{F}{\frac{3.1416 \times D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.3)$$

เมื่อ HB = ค่าความแข็งแบบบริเนล

P = ภาระ หน่วย กิโลกรัมแรง

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวกด หน่วย มิลลิเมตร

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยกด หน่วย มิลลิเมตร

การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบบริเนล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดที่ใช้คำนวณ เป็นค่าเฉลี่ยจากการอ่านค่าสองครั้งตั้งฉากกัน การแสดงค่าความแข็งแบบบริเนลสามารถแสดงให้เห็นสถานะของการทดสอบ เช่น 75 HB/10/500/30 หมายความว่า ค่าความแข็ง 75 ใช้ลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ภาระ 500 กิโลกรัมแรง เป็นระยะเวลา 30 วินาที สำหรับโลหะที่มีความแข็งมาก อาจใช้ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์แทนลูกเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบแบบบริเนล กับวิธีทดสอบความแข็งแบบอื่นๆ ลูกบอลเหล็กของบริเนล สามารถสร้างรอยกดที่ลึก และกว้าง ดังนั้นการทดสอบความแข็งด้วยวิธีนี้ จะหาค่าความ-

แข็งเฉลี่ยของวัสดุได้ดีกว่า ซึ่งจะให้ความถูกต้องกับโครงสร้างเกรนที่ซับซ้อน และไม่สม่ำเสมอในความ เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพชรลัดดา (2010) ได้ทำการศึกษาพื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ปฐมภูมิ ณ ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 640 และ 660 องศาเซลเซียส โดยใช้อะลูมิเนียมผสมเกรด AA7075 จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิจะมีขนาดเล็ก และมีรูปร่างกลมมากกว่าการ หล่อด้วยอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สมบัติทางกลสูงกว่าตามไปด้วย และที่ตำแหน่งบน กลาง และล่าง ของชิ้นงาน พบว่าตำแหน่งล่าง โลหะหลอมเหลวสัมผัสกับแม่พิมพ์ก่อน จึงมีอัตราการ เย็นตัวเร็วกว่า ส่งผลให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดเล็ก และละเอียด มากกว่าตำแหน่ง กลาง และบน จึงทำให้ตำแหน่งล่างมีความแข็งสูงกว่าตำแหน่งกลาง และบน ตามลำดับ

Kund, N.K. และ Dutta, P. (2010) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการหล่อ โลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง โดยใช้วิธีหล่อแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 โดย ขณะที่โลหะหลอมเหลวไหลผ่านรางเทหล่อเย็น โลหะหลอมเหลวจะถูกระบายความร้อนจากรางเท หล่อเย็น การระบายความร้อนนี้จะช่วยให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัว และทำให้เกิดแรงเค้น ซึ่ง มีความจำเป็นต่อการหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง และจากการศึกษาผลกระทบจากมุมของรางเทหล่อ เย็นนั้น จะเห็นว่า เมื่อความชันของรางเทหล่อเย็นมากขึ้น จะทำให้ความเร็วในการไหลของโลหะ หลอมเหลวมากขึ้น ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย จึง สรุปได้ว่า ความชันของรางเทหล่อเย็นมีความจำเป็นมาก ต่อการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค

Haga, T และ Nakamura, R. (2010) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการหล่อ โลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง ด้วยวิธีการหล่อแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น จากการทดลองพบว่า ความ ยาวของรางเทหล่อเย็น มีผลกระทบต่ออัตราการระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลว โดยการระบาย ความร้อนจะมากตามความยาวของรางเทหล่อเย็น และความชันของรางเทหล่อเย็นมีผลกระทบต่อ การไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็น โดยเมื่อความชันของรางเทหล่อเย็นเพิ่มขึ้น การไหล ของโลหะหลอมเหลวก็จะเร็วขึ้น ทำให้ช่วงเวลาที่โลหะหลอมเหลวไหลบนรางเทหล่อเย็นจึงน้อย การ ระบายความร้อนจึงน้อยตามไปด้วย

Biol, Y. (2007) ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิเท และความยาวของรางเทหล่อเย็น ที่มี ผลกระทบต่อสมบัติทางกลของโลหะผสม ที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ของ อะลูมิเนียมผสม เกรด A357 โดยจะเทที่อุณหภูมิ 620 ถึง 640 องศาเซลเซียส ความยาวของรางเท หล่อเย็น 200 ถึง 400 มิลลิเมตร และรางเทหล่อเย็นมีความชัน 60 องศา จากการทดลองพบว่า การ เทโลหะหลอมเหลวในช่วงของอุณหภูมิตั้งแต่ 620 ถึง 640 องศาเซลเซียส และความยาวของราง เทหล่อเย็นระหว่าง 200 ถึง 400 มิลลิเมตร จะทำให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานมีรูปร่างกลม (Globular) ส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานสูงขึ้นตามไปด้วย

Haga, T และ Kapranos, P. (2002) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของการหล่อโลหะ แบบรีโอแคสติง (Rheocasting) ที่ผ่านการหล่อด้วยอุณหภูมิต่ำ (Low Superheat Casting) และ การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) ของอะลูมิเนียมผสม-

19๓4 5422

มร.

ก136๗
2654

เกรด A356 โดยใช้อุณหภูมิเท 620, 650 องศาเซลเซียส และใช้ความชันของรางเทหล่อเย็น 60 องศา กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ 350, 450, 500 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ผลการทดลองพบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น จะมีขนาดเล็ก และมีรูปร่างกลมกว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโดยใช้อุณหภูมิต่ำ จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ดีกว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโดยใช้อุณหภูมิต่ำ

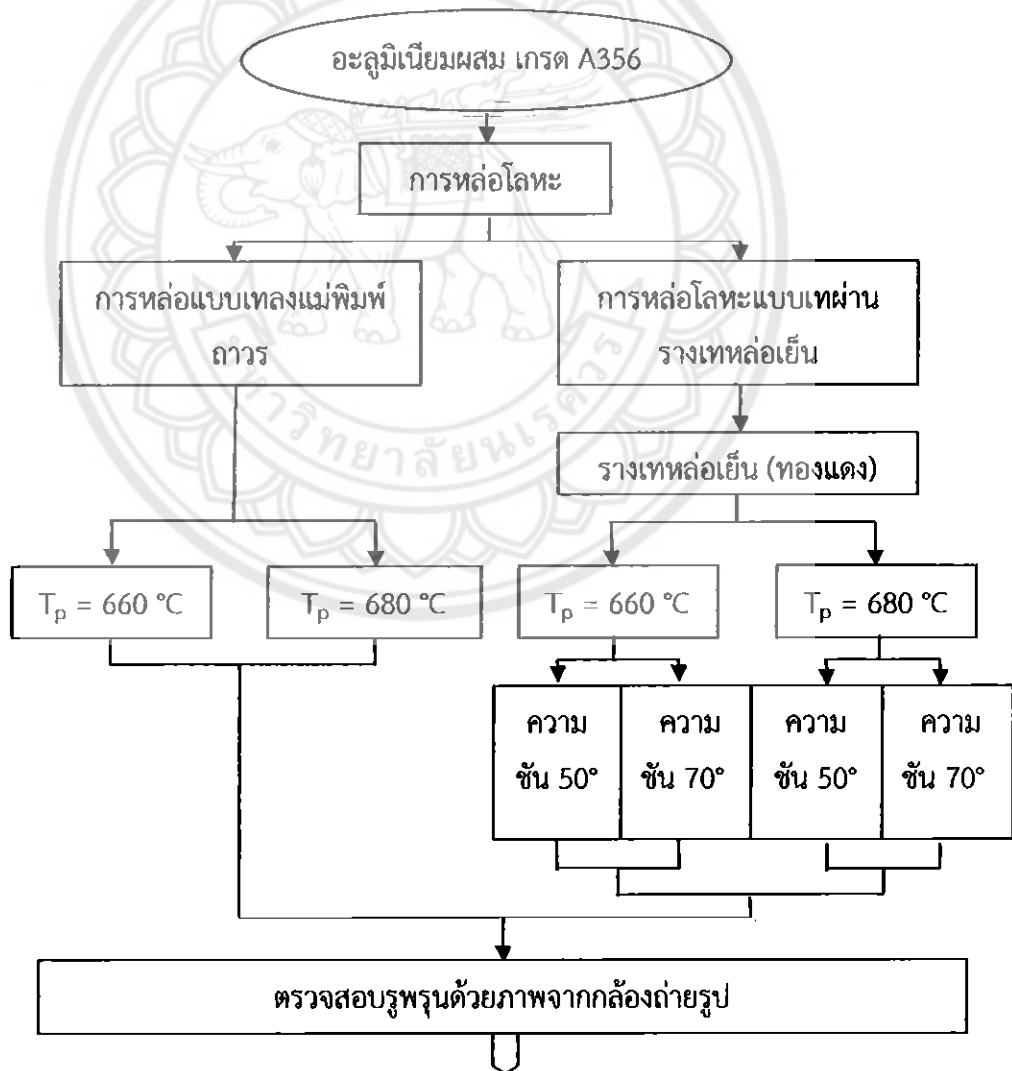


บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

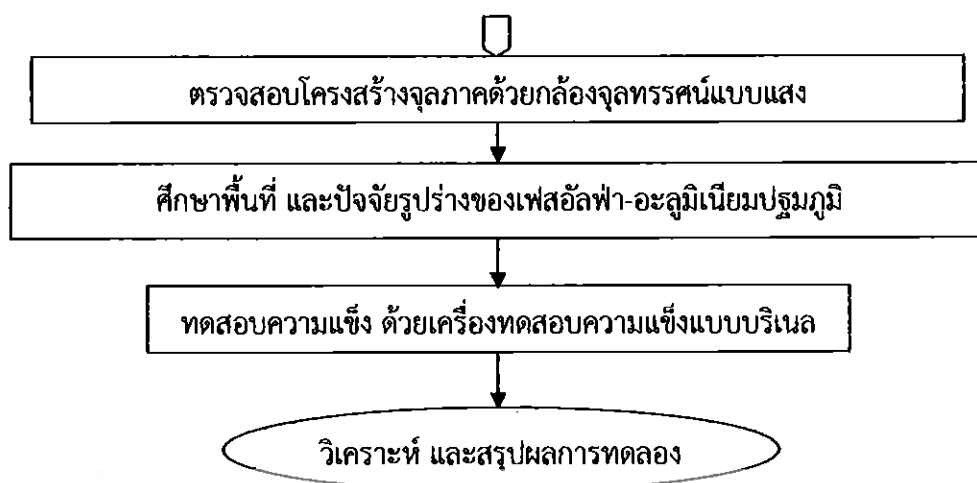
สำหรับวิธีการดำเนินงานวิจัยนี้ จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ วัสดุ อุปกรณ์ และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ

ในการศึกษาอุณหภูมิและความชันของรางเทหล่อเย็น ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เทียบกับการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 วัสดุ และอุปกรณ์

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

อะลูมิเนียมผสม เกรด A356 จะอยู่ในกลุ่มโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ประเภทไฮโปยูเทคติก ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด A356

| องค์ประกอบทางเคมี | ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt) |
|-------------------|------------------------|
| ซิลิคอน | 6.5-7.5 |
| แมกนีเซียม | 0.30-0.45 |
| เหล็ก | 0.15 |
| แมงกานีส | 0.10 |
| สังกะสี | 0.07 |
| ทองแดง | 0.02 |
| อะลูมิเนียม | Balance |

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.2.1 อุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เตาทอมโลหะ
- ข. รางเทหล่อเย็น
- ค. แม่พิมพ์ถาวร
- ง. เครื่องตัดชิ้นงาน
- จ. เครื่องขัดชิ้นงาน
- ฉ. กระดาษทราย เบอร์ 180, 320, 600 และ 1000
- ช. ผงขัดอะลูมินา ความละเอียด 1 และ 0.3 ไมครอน

3.2.2.2 สารเคมี

- ก. กรดไฮโดรฟลูออริก ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร
- ข. น้ำกลั่น

3.2.2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
- ข. กล้องถ่ายรูป
- ค. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 และศึกษาการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ และอุปกรณ์

3.3.2.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

นำอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่เตรียมไว้ ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งยาว โดยมีน้ำหนัก 5 กิโลกรัม มาแบ่งเป็น 6 ส่วนเท่าๆ กัน ของน้ำหนักทั้งหมด เพื่อนำไปหล่อชิ้นงาน

3.3.2.2 การเตรียมแม่พิมพ์ (Mold)

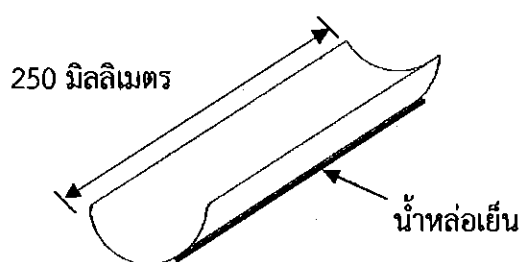
แม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง คือ แม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold) ซึ่งทำมาจากเหล็กกล้า ซึ่งจะเป็นแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 ชิ้น มาประกบเข้าด้วยกัน โดยกำหนดให้ขนาดของชิ้นงาน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์ถาวร

3.3.2.3 การเตรียมรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope)

รางเทอะลูมิเนียมหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลอง เป็นรางเทที่ทำมาจากทองแดง เนื่องจากทองแดง มีการถ่ายเทความร้อนได้สูง โดยกำหนดให้รางเทมีความยาว 250 มิลลิเมตร และส่วนด้านล่างของรางเทจะมีระบบน้ำหล่อเย็น ไหลเวียนอยู่ตลอดเวลา เพื่อช่วยในการระบายความร้อนของรางเท แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะรางเทหล่อเย็น

3.3.3 ขั้นตอนการหล่ออะลูมิเนียมผสม เกรด A356

3.3.3.1 การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร

ก. นำแท่งอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่เตรียมไว้ มาหลอมจนอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว

ข. เทอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยจะเทที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส ลงสู่แม่พิมพ์ ตามลำดับ

ค. รอให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวแข็งตัว และเย็นตัวในแม่พิมพ์

ง. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 3.4 ลักษณะการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร

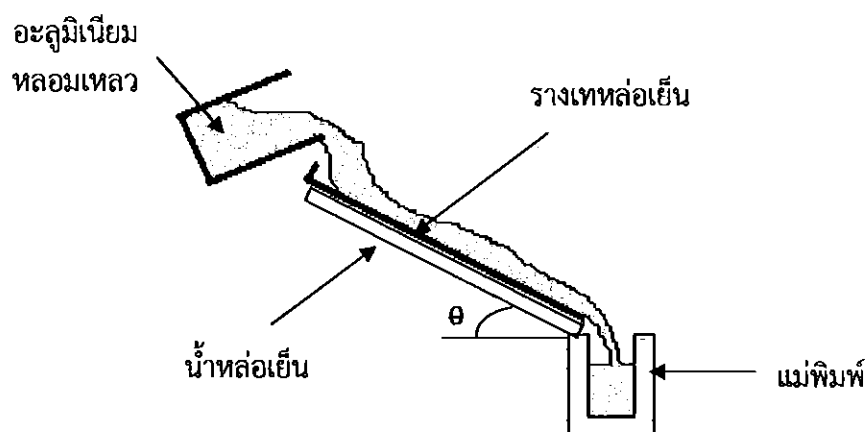
3.3.3.2 การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

ก. นำแท่งอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่เตรียมไว้ มาหลอมจนอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว

ข. เทอะลูมิเนียมหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ โดยการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ซึ่งจะเทที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส และแต่ละอุณหภูมิจะเทที่ความชันของรางเทหล่อเย็น เท่ากับ 50 และ 70 องศา แสดงดังรูปที่ 3.5

ค. รอให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวแข็งตัว และเย็นตัวในแม่พิมพ์

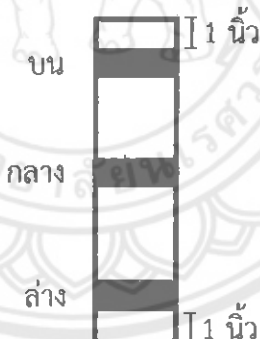
ง. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 3.5 ลักษณะการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

3.3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบ

เป็นการนำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 2 วิธี มาตัดเอาส่วนบน กลาง และล่าง โดยชิ้นบน และชิ้นล่างห่างจากพื้นที่ผิวหน้าบน และล่าง 1 นิ้ว ชิ้นกลางนับจากกึ่งกลางระหว่างชิ้นงานทั้งสอง แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยนำชิ้นงานดังกล่าวมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ตรวจสอบพื้นที่ และปัจจัยด้านรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ด้วยโปรแกรม Sigma Scan Pro. 5 และนำไปทดสอบความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล



รูปที่ 3.6 บริเวณที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.4.1 การตรวจสอบรูพรุนในชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 6 เงื่อนไข มาตรวจสอบรูพรุนด้วยตาเปล่า โดยมีวิธีการตรวจสอบ คือ นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อทั้ง 6 เงื่อนไข ไปขัดด้วยกระดาษทราย ตั้งแต่เบอร์ 180, 320, 600 และ 1000 ตามลำดับ จากนั้นจึงนำไปถ่ายรูปด้วยกล้องถ่ายรูป แล้วนำรูปถ่ายดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์รูพรุน

3.3.4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

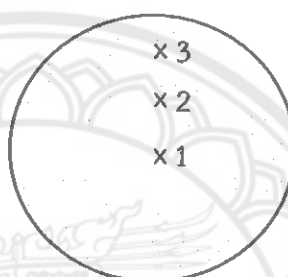
โดยการนำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 6 เงื่อนไข มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยมีขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังนี้

ก. นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 6 เงื่อนไข มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 600 และ 1000 ตามลำดับ

ข. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายครบทุกเบอร์แล้ว มาขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ขนาด 1 และ 0.3 ไมครอน ตามลำดับ

ค. จากนั้นนำชิ้นงานมากัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ขนาดความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ไปจุ่มลงในกรด ล้างด้วยน้ำสะอาด เช็ด และเป่าให้แห้ง

ง. นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดกรดเรียบร้อยแล้ว มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยชิ้นงาน 1 ชิ้น จะตรวจสอบโครงสร้างด้วยกัน 3 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

3.3.4.3 การตรวจสอบพื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม-ปฐมภูมิ

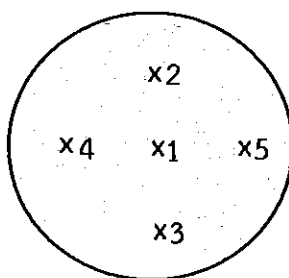
ก. นำรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่มีกำลังขยาย 200 เท่า มาปรับสีเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอนให้เป็นสีดำ และเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ให้เป็นสีขาว

ข. หลังจากนั้นนำรูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ปรับสีเรียบร้อยแล้ว มาตรวจสอบ และวิเคราะห์พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ

3.3.4.4 การทดสอบความแข็ง

ก. นำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทั้ง 6 เงื่อนไข มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 600 และ 1000 ตามลำดับ

ข. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายมาแล้ว ไปทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนล โดยใช้หัวลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ใช้น้ำหนักกด 187.5 กิโลกรัมแรง และเวลากด 10-15 วินาที โดยชิ้นงาน 1 ชิ้น จะทดสอบความแข็ง 5 จุด แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 จุดที่ใช้ในการทดสอบความแข็ง

3.3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคพื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และความแข็งของชิ้นงานในแต่ละเงื่อนไข คือเปรียบเทียบระหว่างการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร กับการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น สำหรับการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร เปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เปรียบเทียบที่ความชันของรางเท และอุณหภูมิเทที่ต่างกัน จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มาสรุปผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และจัดทำรูปเล่มรายงาน

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

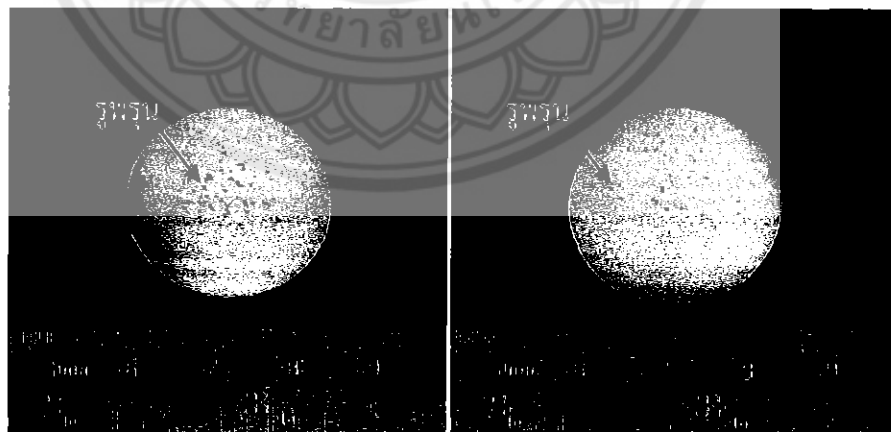
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ในเรื่องรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน โครงสร้างจุลภาค ศึกษาพื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และความแข็ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 รูพรุน

รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเป็นอย่างมาก ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงวิเคราะห์รูพรุน เมื่อกระบวนการหล่อ อุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เปลี่ยนแปลงไป

4.1.1 รูพรุนที่เกิดขึ้นในการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

จากการศึกษารูพรุนในชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น โดยใช้รูปถ่ายจากกล้องถ่ายภาพ แสดงดังรูปที่ 4.1 มาเปรียบเทียบกับตัวอย่างเปล่า พบว่าการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรจะมีรูพรุนเกิดขึ้น มากกว่าการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เนื่องจากการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น จะมีรางเทหล่อเย็นช่วยให้โลหะหลอมเหลว มีลักษณะการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์แบบราบเรียบกว่าการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร จึงส่งผลให้รูพรุนเกิดขึ้นในชิ้นงานน้อยกว่า



ก)

ข)

รูปที่ 4.1 รูพรุนของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

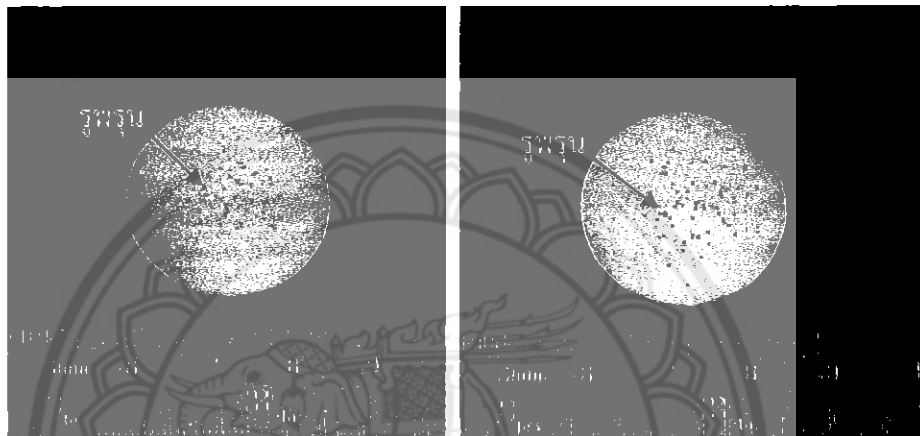
ก) การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ข) การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา

4.1.2 รูพรุนของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน

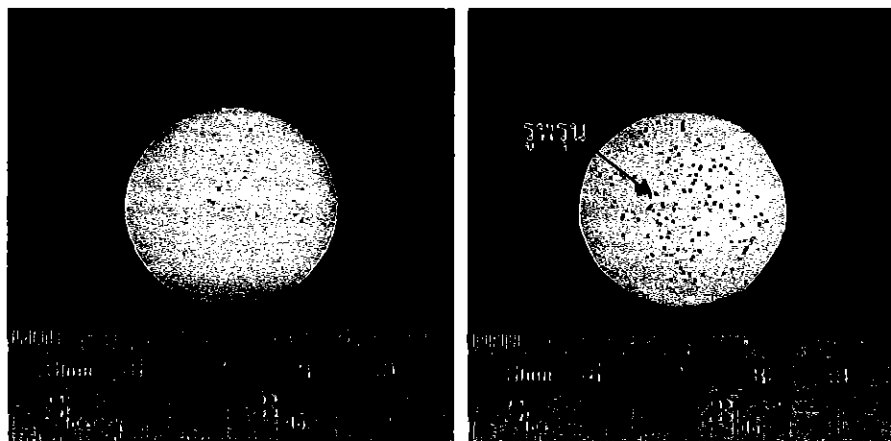
จากการศึกษารูพรุนในชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส เมื่อนำรูปจากกล้องถ่ายรูป มาเปรียบเทียบกับตาเปล่า พบว่า รูพรุนที่เกิดในชิ้นงานจะไม่ต่างกันมาก โดยที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จะมีรูพรุนมากกว่า อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง โลหะหลอมเหลว เกิดปฏิกิริยากับอากาศได้มากกว่าอุณหภูมิต่ำ จึงทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานมากกว่า นั่นคืออากาศสามารถละลายเข้าไปในโลหะหลอมเหลว แล้วอากาศไม่สามารถรวมตัว หรือนี้ออกจากโลหะหลอมเหลวได้ทัน จึงส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน



รูปที่ 4.2 รูพรุนของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
 ก) การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส
 ข) การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส

4.1.3 รูพรุนของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน

จากการศึกษารูพรุนในชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส เมื่อนำรูปจากกล้องถ่ายรูป มาวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส รูพรุนเกิดขึ้นน้อย แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 680 องศาเซลเซียส รูพรุนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.3 เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง อากาศสามารถละลายเข้าไปอยู่ในโลหะหลอมเหลวได้มากกว่าอุณหภูมิต่ำ โดยอากาศที่ละลายเข้าไปไม่สามารถรวมตัว และหนีออกจากโลหะหลอมเหลวได้ทัน จึงทำให้รูพรุนในชิ้นงานมีมากกว่าตามไปด้วย



ก)

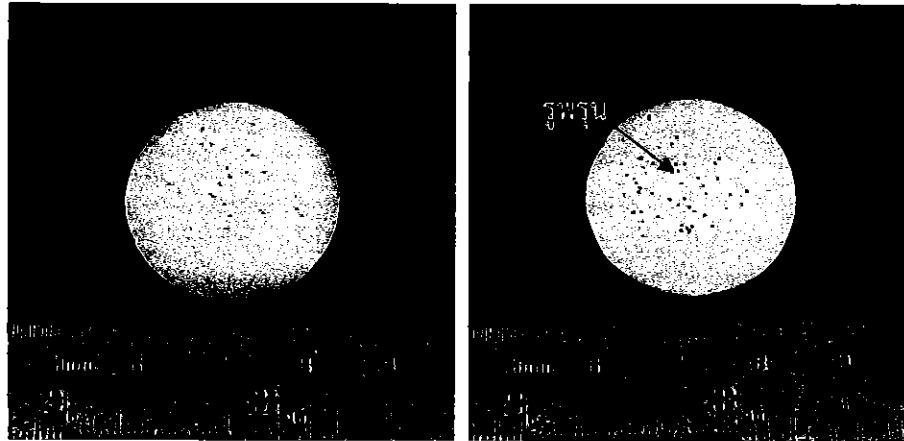
ข)

รูปที่ 4.3 รูพรุนของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

- ก) อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา
 ข) อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา

4.1.4 รูพรุนของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเทเท่ากัน แต่ความชันของรางเทหล่อเย็นต่างกัน

จากการศึกษารูพรุนในชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา เมื่อนำรูปจากกล้องถ่ายภาพ มาวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยความชันของรางเท 50 องศา รูพรุนจะไม่ค่อยมีในชิ้นงาน แต่เมื่อเพิ่มความชันของรางเทหล่อเย็นเป็น 70 องศา เป็นผลให้รูพรุนในชิ้นงานนั้นเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.4 เนื่องจากที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา รางเทจะมีความชันน้อยกว่า 70 องศา จึงทำให้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็นต่ำกว่าโลหะหลอมเหลวมีเวลาอยู่บนรางเหนาน ทำให้มีการระบายความร้อนดีกว่า ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวที่ไหลลงสู่แม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า เป็นผลให้โลหะหลอมเหลวมีความหนืดมากกว่า เป็นผลให้มีลักษณะการไหลที่ราบเรียบกว่า เมื่อเทียบกับความชัน 70 องศา ทั้งนี้จึงส่งผลให้รูพรุนที่เกิดในชิ้นงานที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา น้อยกว่า 70 องศา



ก)

ข)

รูปที่ 4.4 รูพรุนของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

ก) ความชื้นของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ข) ความชื้นของรางเทหล่อเย็น 70 องศา อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

4.2 โครงสร้างจุลภาค

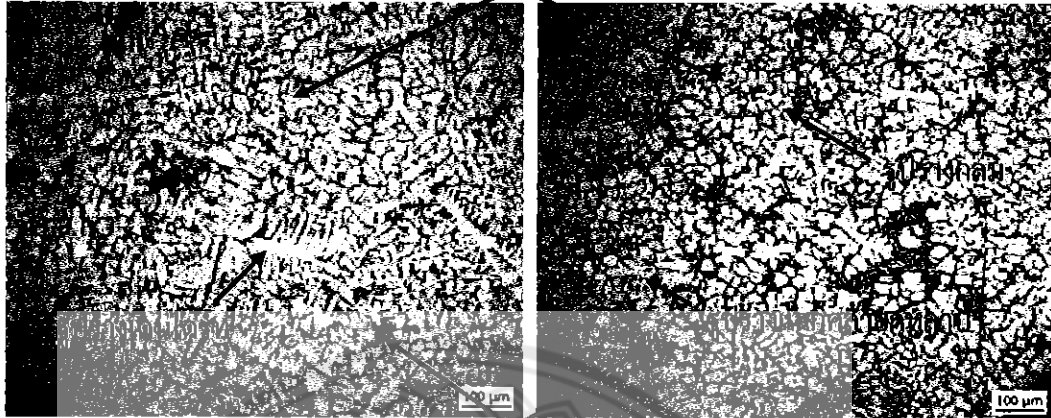
โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ มีผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานเป็นอย่างมาก ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เมื่อกระบวนการหล่อ อุณหภูมิเท และความชื้นของรางเทหล่อเย็นของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เปลี่ยนแปลงไป

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมผสมแบบไฮโปยูเทคติก ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น พบว่าโครงสร้างจุลภาคของการหล่อทั้งสองวิธี ประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) โดยการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร จะพบโครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ และพบโครงสร้างของเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาว เกิดขึ้นแทรกอยู่ระหว่างแขนของเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 4.5 ก) ส่วนการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น พบว่าโครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิส่วนใหญ่ จะมีรูปร่างกลม (Globular) และบางส่วนก็มีลักษณะที่เป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette Like Structure) และเกิดเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีรูปร่างเป็นแท่งยาวจำนวนมากแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.5 ข) เนื่องจากการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น มีการปรับปรุงโครงสร้างของชิ้นงาน ด้วยวิธีการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็น แสดงดังรูปที่ 2.20 ทำให้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์เกิดการแตกหัก กลายเป็นนิวเคลียสจำนวนมาก ทำให้มีพื้นที่ในการโตของนิวเคลียสน้อย รวมไปถึงนิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีระยะเวลาในการโตเป็นเดนไดรต์ได้น้อย จึงเป็นผลให้โครงสร้างมีรูปร่างกลม ขนาดเล็ก และละเอียด ในขณะที่การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร โลหะหลอมเหลวถูกเทลงสู่แม่พิมพ์โดยตรง ทำให้มีอุณหภูมิที่สูงลงสู่แม่พิมพ์ นิวเคลียสเกิดขึ้นน้อย ทำ

ให้มีพื้นที่ในการโตมาก มีระยะเวลาโตเป็นเดนไดรต์ได้มาก จึงทำให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ขนาดใหญ่

เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ปฐมภูมิ



ยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน

ก)

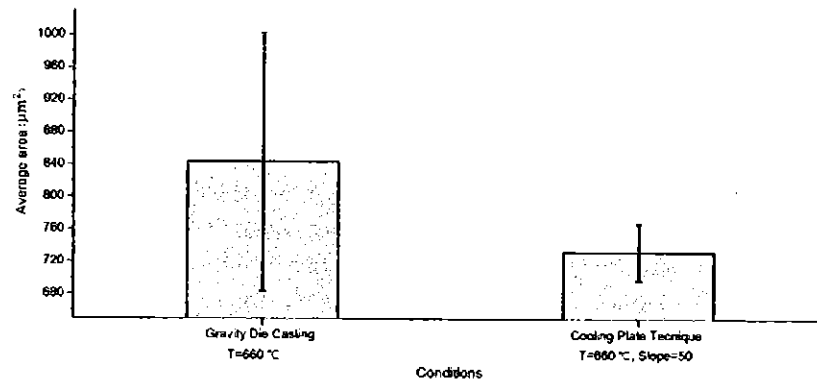
ข)

รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

ก) การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

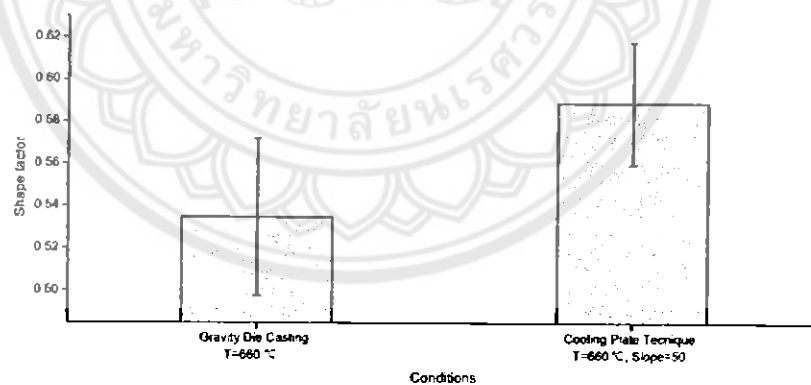
ข) การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา

จากการศึกษาพื้นที่ (Area) ของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ พบว่าเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรมีพื้นที่ 843.59 ตารางไมโครเมตร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น จะมีพื้นที่ 732.98 ตารางไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น จะมีพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่เล็ก และละเอียดกว่าการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร เนื่องจากการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น โครงสร้างส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก ซึ่งเกิดจากการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็น ที่ก่อให้เกิดการแตกหักของเดนไดรต์ กลายเป็นนิวเคลียสขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ทำให้โครงสร้างมีความละเอียด แต่ในขณะที่การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร โลหะหลอมเหลวไหลลงสู่แม่พิมพ์โดยตรง นิวเคลียสที่เกิดขึ้น สามารถโตได้ในทุกทิศทาง จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.6 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

จากการศึกษาปัจจัยรูปร่าง (Shape Factor) ของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ พบว่ารูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรจะมีปัจจัยรูปร่างเท่ากับ 0.535 เมื่อเทียบกับหนึ่ง และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็นจะมีปัจจัยรูปร่างเท่ากับ 0.589 เมื่อเทียบกับหนึ่ง จะเห็นว่าปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร จะมีค่าที่ต่ำกว่าการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น แสดงดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น โครงสร้างจะมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่ ที่เป็นผลจากการไหลตัวของโลหะหลอมเหลวบนรางเท ที่ทำให้เดนไดรท์เกิดการแตกหัก โครงสร้างจึงมีรูปร่างกลม

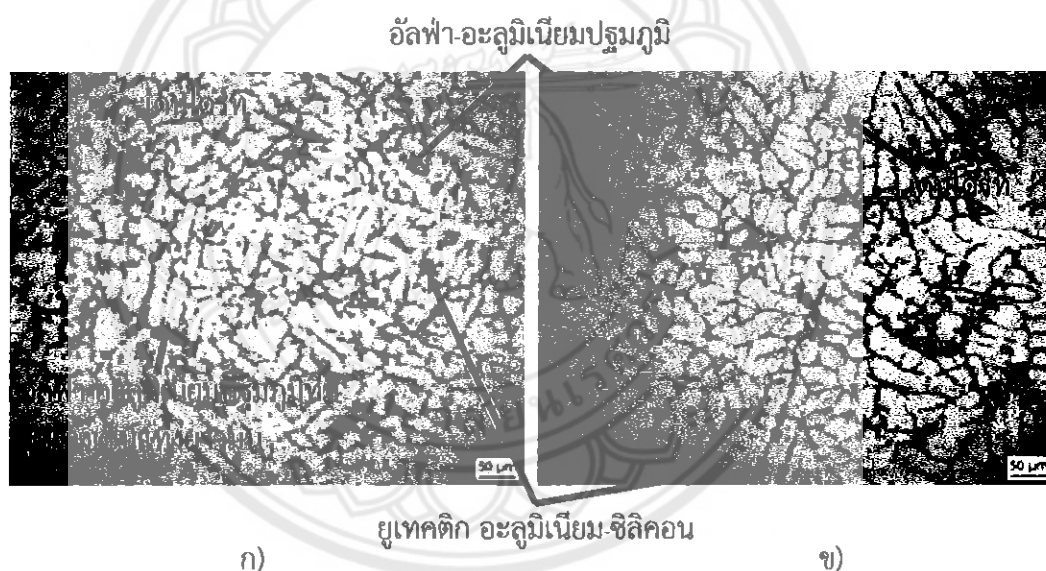


รูปที่ 4.7 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ส่วนใหญ่โครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีลักษณะเป็นเดนไดรท์ ที่มีขนาดใหญ่ และมีรูปร่างเป็นกิ่งก้านสาขา ส่วนการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็นนั้น โครงสร้างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก ละเอียด และมีรูปร่างกลม และโครงสร้างบางส่วนจะมีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน

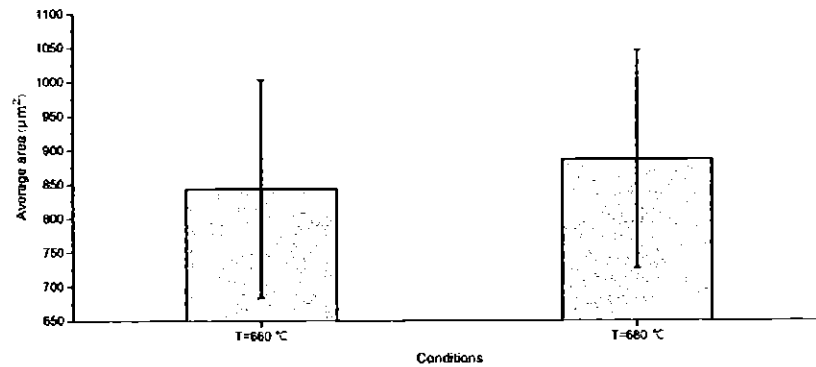
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมผสมแบบไฮโปยูเทคติก ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส พบว่า การหล่อโลหะทั้งสองวิธีโครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีลักษณะที่เป็นแท่งยาวมนเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนก็จะมีลักษณะที่เป็นเดนไดรต์ขนาดเล็ก และยังเกิดเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะเป็นแท่งอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.8 ก) ส่วนการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสนั้น เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ ซึ่งจะมีทั้งขนาดเล็ก และใหญ่ปะปนกันอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน และเกิดเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะเป็นแท่งๆ เช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.8 ข) เนื่องจากการหล่อที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส มีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่า 680 องศาเซลเซียส ทำให้นิวเคลียสของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และมีพื้นที่ในการโตของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิน้อยกว่า จึงเป็นผลให้โครงสร้างจุลภาค มีขนาดเล็ก และละเอียดกว่า



รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร

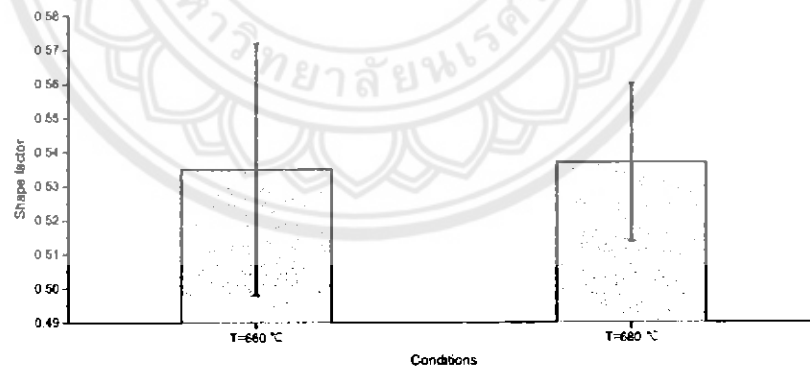
- ก) การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส
 ข) การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาพื้นที่ของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 พบว่าเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส จะมีพื้นที่ 843.59 ตารางไมโครเมตร ซึ่งโครงสร้างจะมีขนาดเล็ก และละเอียดกว่า เมื่อเทียบกับการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส โดยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของอุณหภูมินี้จะมีพื้นที่ 886.73 ตารางไมโครเมตร ซึ่งใหญ่กว่า แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาปัจจัยรูปร่างของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 พบว่าการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส จะมีรูปร่าง 0.535 และ 0.537 เมื่อเทียบกับหนึ่งตามลำดับ เห็นได้ว่าการหล่อทั้งสองอุณหภูมิ เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีรูปร่างที่คล้ายกันมาก แสดงดังรูปที่ 4.10 เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เทโลหะหลอมเหลวมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีรูปร่างเป็นเดนไดรต์ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการหล่อที่ไม่มีการปรับปรุงโครงสร้าง ซึ่งมีการเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์โดยตรง เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีการโตได้ทุกทิศทาง โครงสร้างจุลภาคจึงมีรูปร่างที่เป็นเดนไดรต์

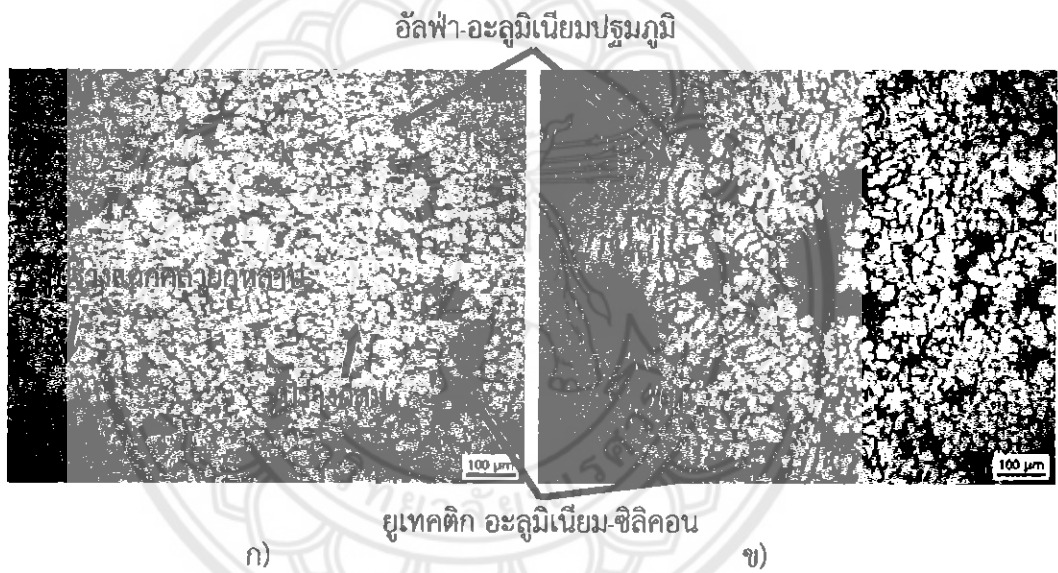


รูปที่ 4.10 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ส่วนใหญ่ จะมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีค่าสูง และปัจจัยรูปร่างมีค่าต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการหล่อที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคจะมีความละเอียดมากกว่าอุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของ รางเทหล่อเย็นเท่ากัน แต่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ซึ่งเป็น อะลูมิเนียมผสมแบบไฮโปยูเทคติก ที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของ รางเทหล่อเย็น 50 องศา แต่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส พบว่าการหล่อทั้งสองอุณหภูมิ ที่ความชันของรางเทหล่อเย็นเดียวกัน โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐม- ภูมิ ที่มีรูปร่างกลม และเป็นแอคคล้ายกุหลาบ และเกิดเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีลักษณะ เป็นแท่งยาวแทรกอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาค ทั้งสองอุณหภูมิเท จะมีรูปร่างกลม และมีขนาดคล้ายกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะมีรูพรุน เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากที่อุณหภูมิเทสูง ส่งผลต่อการจับตัวระหว่างโลหะหลอมเหลว กับ อากาศได้มาก จึงส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน

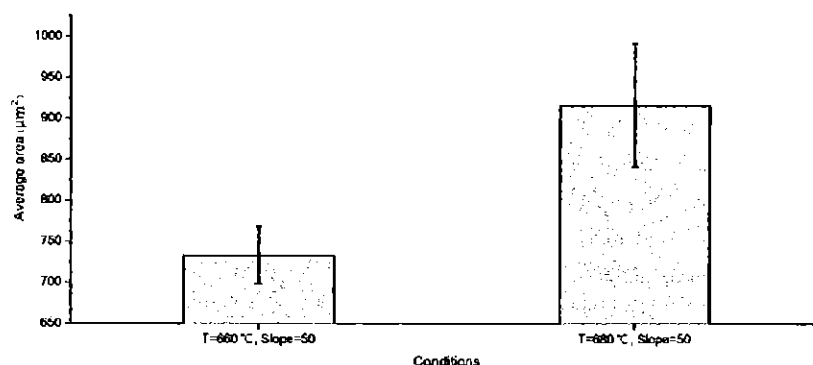


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

ก) อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา

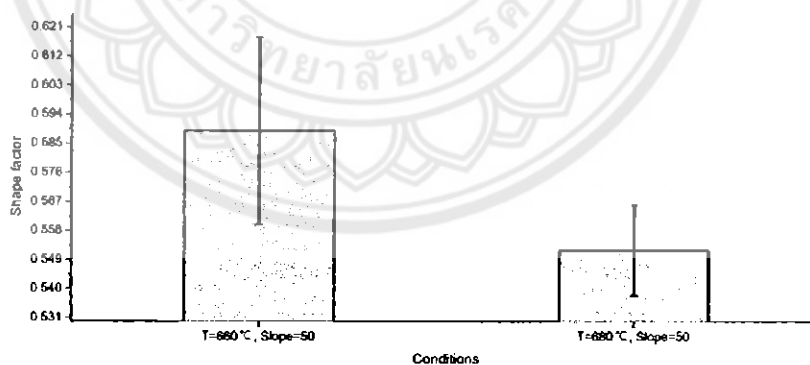
ข) อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา

จากการศึกษาพื้นที่ของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 พบว่าพื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ผ่านการ- หล่อโลหะด้วยอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส คือ 732.98 ตารางไมโครเมตร และการหล่อโลหะที่ อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส คือ 916.31 ตารางไมโครเมตร เห็นได้ว่าการหล่อโลหะที่อุณหภูมิต่ำ กว่า เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิจะมีขนาดเล็ก และละเอียดกว่าอุณหภูมิเทสูง แสดงดังรูปที่ 4.12 เนื่องจากการหล่อด้วยอุณหภูมิต่ำ มีอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าอุณหภูมิเทสูง ทำให้นิวเคลียสเกิดขึ้น เป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมามีขนาดของพื้นที่ที่เล็ก และละเอียด



รูปที่ 4.12 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็นที่ ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

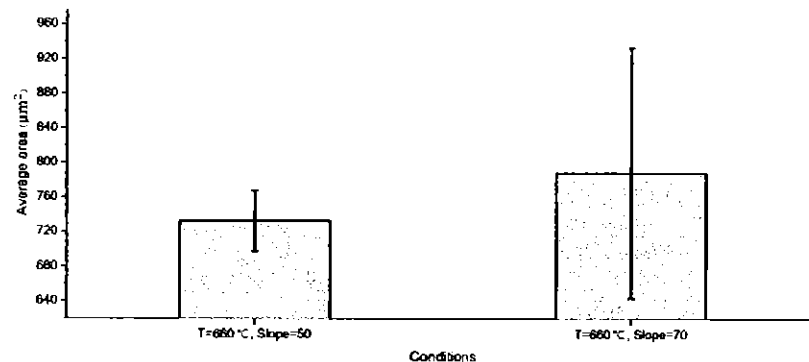
จากการศึกษาปัจจัยรูปร่างของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 พบว่าการหล่อที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส รูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีรูปร่างค่อนข้างกลม โดยมีรูปร่างเฉลี่ย 0.589 เมื่อเทียบกับหนึ่ง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 680 องศาเซลเซียส ความกลมของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะลดลง โดยมีรูปร่างเฉลี่ย 0.552 เมื่อเทียบกับหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากอุณหภูมิเทต่ำมี อัตราการเย็นตัวเร็วกว่าอุณหภูมิสูง ทำให้โลหะหลอมเหลวที่กำลังแข็งตัว เกิดนิวเคลียสเป็นจำนวนมาก มีพื้นที่ในการโตของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิน้อย จึงทำให้โครงสร้างมีรูปร่างกลม แต่เมื่ออุณหภูมิสูง นิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย ทำให้มีพื้นที่ในการโตของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมาก โตได้ในทุกทิศทาง จึงเป็นผลให้โครงสร้างมีรูปร่างกลมน้อยลง



รูปที่ 4.13 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็นที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

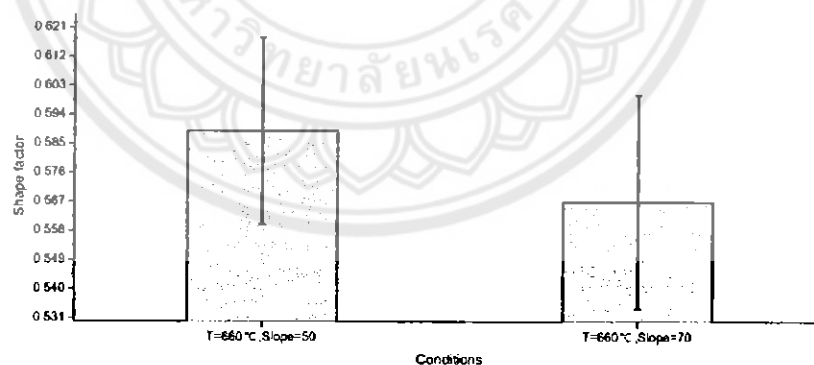
โครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่อความชันเท่ากัน ที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีพื้นที่เล็ก ละเอียด และมีรูปร่างกลม แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างจุลภาคจะมีพื้นที่ใหญ่ขึ้น หยาดขึ้น และรูปร่างจะมีความกลมลดลง

ความร้อนต่ำ (Haga, 2010) ดังนั้นจึงเป็นผลให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อย เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิจึงมีพื้นที่ใหญ่ และหยาบ



รูปที่ 4.15 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา

จากการศึกษาปัจจัยรูปร่างของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 พบว่าเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะด้วยความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา จะมีรูปร่างกลม แต่เมื่อความชันของ รางเทหล่อเย็น เพิ่มขึ้นเป็น 70 องศา ความกลมของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิจะลดลง แสดงดังรูปที่ 4.16 เนื่องจากโลหะหลอมเหลวที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 70 องศา มีอัตราการเย็นตัวต่ำ จึงเป็นผลให้เกิดนิวเคลียสน้อย มีระยะเวลา และพื้นที่ในการโตมาก ทำให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมีรูปร่างกลมลดลง



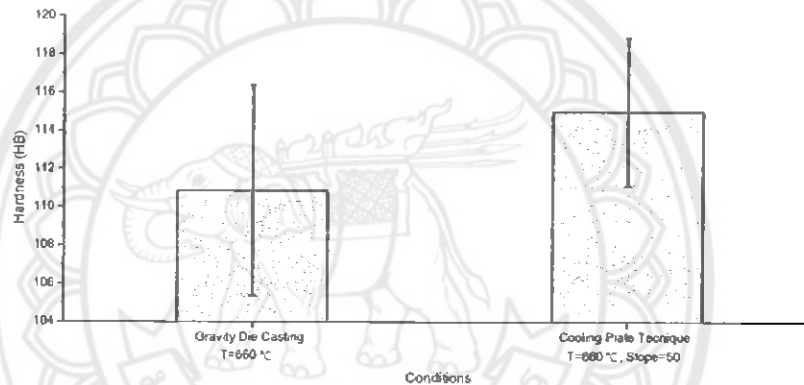
รูปที่ 4.16 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิเทเดียวกัน ที่ความชันของรางเทหล่อเย็นต่ำ เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีพื้นที่เล็ก ละเอียด และมีรูปร่างกลม แต่เมื่อเพิ่มความชันของรางเทหล่อเย็นสูงขึ้น เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีพื้นที่ใหญ่ หยาบ และมีรูปร่างกลมลดลง

4.3 ความแข็ง

4.3.1 ความแข็งของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

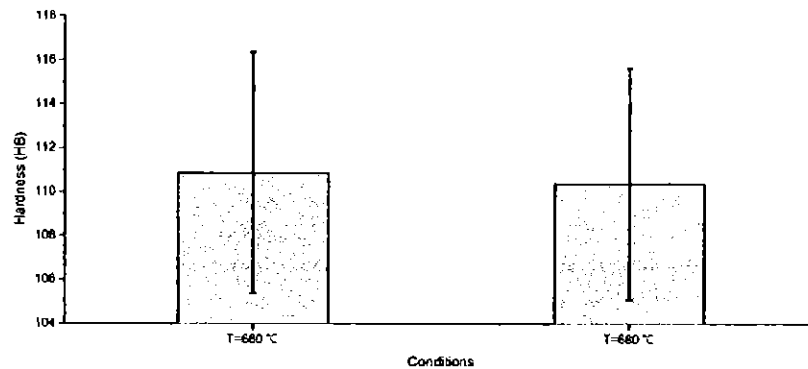
จากการศึกษาความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่อนำไปผ่านการทดสอบความแข็งแบบบริเนล พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวรจะมีความแข็งเฉลี่ย 110.87 HB ส่วนการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น จะมีความแข็งเฉลี่ย 114.98 HB ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแข็งของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร จะมีค่าต่ำกว่าการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น แสดงดังรูปที่ 4.17 เนื่องจากการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร โครงสร้างที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ส่วนใหญ่ จะมีรูปร่างเป็นเดนไดรท์ ที่มีพื้นที่ใหญ่ จึงส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานนั้นต่ำลง ในขณะที่การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็นนั้น เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ส่วนใหญ่ จะมีพื้นที่เล็ก ละเอียด และมีรูปร่างกลม จึงส่งผลให้ความแข็งนั้นสูงขึ้น



รูปที่ 4.17 ความแข็งของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น

4.3.2 ความแข็งของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร

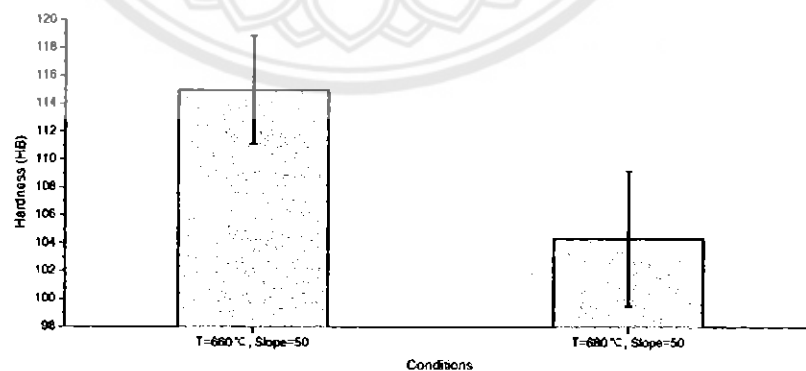
จากการศึกษาความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปผ่านการทดสอบความแข็งแบบบริเนล พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยอุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส คือ 110.87 และ 110.37 HB ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแข็งของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ทั้งสองอุณหภูมิ จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงดังรูปที่ 4.18 เนื่องจากอุณหภูมิเทใกล้เคียงกันมาก ส่งผลให้ได้โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะที่คล้ายกัน ความแข็งของชิ้นงานจึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.18 ความแข็งของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

4.3.3 ความแข็งของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเทหล่อเย็นเท่ากัน แต่อุณหภูมิแตกต่างกัน

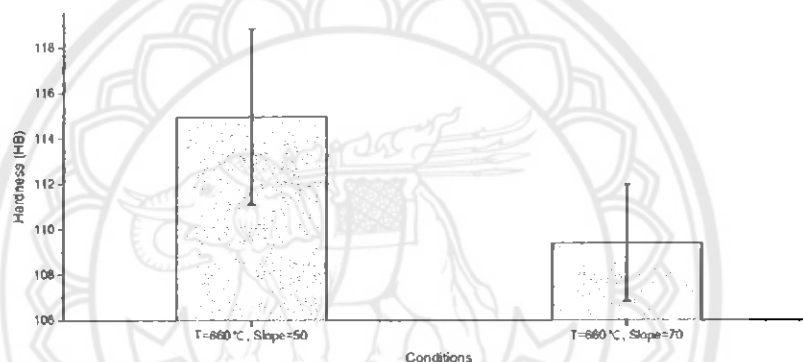
จากการศึกษาความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา เมื่ออุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปผ่านการทดสอบความแข็งแบบบริเนล พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส คือ 114.98 HB แต่พอเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทให้สูงขึ้นเป็น 680 องศาเซลเซียส ความแข็งของชิ้นงานจะลดลงเหลือ 104.34 HB แสดงดังรูปที่ 4.19 เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเร็ว ส่งผลให้โครงสร้างที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีรูปร่างกลม เล็ก และละเอียด จึงทำให้ความแข็งของชิ้นงานสูงขึ้น แต่ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยอุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่า ทำให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีพื้นที่ใหญ่ และมีรูปร่างกลมลดลง อีกทั้งภายในชิ้นงานยังมีรูพรุนด้วย จึงส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานต่ำลง



รูปที่ 4.19 ความแข็งของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

4.3.4 ความแข็งแรงของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท่ากัน แต่ความชันของรางเทหล่อเย็นต่างกัน

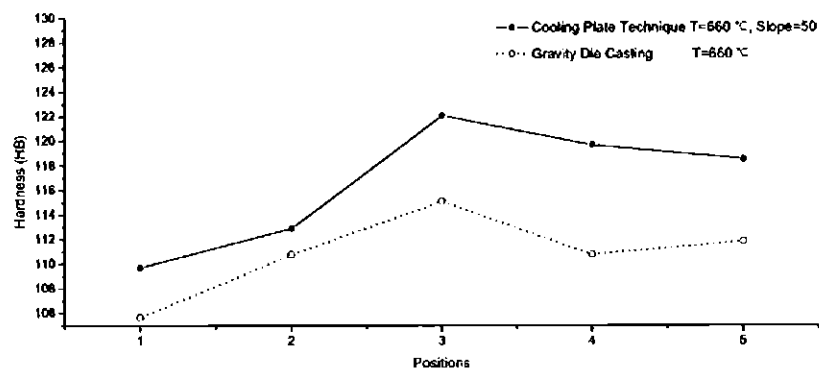
จากการศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส เมื่อความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา เมื่อนำไปผ่านการทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล พบว่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยความชัน 50 องศา คือ 114.98 HB แต่เมื่อเพิ่มความชันขึ้นเป็น 70 องศา ความแข็งแรงของชิ้นงานจะลดลงเหลือ 109.41 HB แสดงดังรูปที่ 4.20 เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยความชัน 50 องศา โครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีพื้นที่เล็ก และละเอียด เป็นผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานสูงขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยความชัน 70 องศา โครงสร้างจะมีพื้นที่ใหญ่ และชิ้นงานเกิดรูพรุน เนื่องจากโลหะหลอมเหลวมีการไหลแบบปั่นป่วน จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง



รูปที่ 4.20 ความแข็งแรงของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 และ 70 องศา

4.3.5 ความแข็งแรงของชิ้นงานที่บริเวณขอบ และกลางชิ้นงาน

จากการศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ณ บริเวณขอบและตรงกลางของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา โดยตำแหน่งที่ 1 คือบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน ส่วนตำแหน่งที่ 2, 3, 4 และ 5 คือบริเวณขอบของชิ้นงาน เมื่อนำไปผ่านการทดสอบความแข็งแรงแบบบริเนล พบว่าที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงาน จะมีค่าความแข็งแรงที่ต่ำกว่าบริเวณขอบของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.21 เนื่องจากอัตราการเย็นตัวในระหว่างกระบวนการหล่อ โดยขอบชิ้นงานจะสัมผัสกับแม่พิมพ์ ทำให้มีอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว เกิดโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก และละเอียด ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงกว่าบริเวณอื่น แต่ในขณะที่บริเวณตรงกลางชิ้นงานมีการเย็นตัวอย่างช้าๆ ทำโครงสร้างมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานต่ำ



รูปที่ 4.21 ความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณขอบ และกลางชิ้นงาน
 ตำแหน่งที่ 1 คือ ความแข็ง ณ ตรงกลางชิ้นงาน
 ตำแหน่งที่ 2,3,4,5 คือ ความแข็ง ณ ขอบของชิ้นงาน



บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข ปัญหา ของโครงการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านราง- เทหล่อเย็น โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีพื้นที่ใหญ่ หยาบ และมีรูปร่างที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ เป็นผลให้ความแข็งของชิ้นงานต่ำ แต่ การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีพื้นที่เล็ก ละเอียด และมี รูปร่างที่มีลักษณะกลม จึงส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานสูงขึ้น

5.1.2 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านราง- เทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส จะมีพื้นที่เล็ก และละเอียด จึงส่งผลให้ความแข็งสูง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทเป็น 680 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคจะมีพื้นที่ใหญ่ และหยาบขึ้น รวมถึงการเกิดรูพรุนในชิ้นงานนั้น มีปริมาณที่มากขึ้น เป็นผลให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง

5.1.3 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเทหล่อ- เย็นต่างกัน โดยชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา โครงสร้างจุลภาค ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีพื้นที่เล็ก ละเอียด และมีรูปร่างกลม ส่งผลให้ความแข็งของ ชิ้นงานสูง แต่เมื่อความชันของรางเทหล่อเย็นเพิ่มขึ้นเป็น 70 องศา เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะ มีพื้นที่ใหญ่ หยาบ และเกิดรูพรุนในชิ้นงานมากขึ้น จึงส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง

5.1.4 ความแข็งของชิ้นงานที่บริเวณขอบ และกลางชิ้นงาน พบว่าที่บริเวณขอบของ ชิ้นงาน โครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีพื้นที่เล็ก และละเอียด ส่งผลให้ ความแข็งของชิ้นงานสูง แต่ที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงาน โครงสร้างจุลภาคของเฟสอัลฟา- อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีพื้นที่ใหญ่ และหยาบขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 สำหรับการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และความแข็งของชิ้นงาน สามารถเลือก ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยวิธีอื่น มาศึกษา และเปรียบเทียบผลการทดลองได้

5.2.2 การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น สามารถนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการ- หล่อแบบอื่น เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลได้ เช่น การหล่อโลหะโดยใช้แรงดัน เป็นต้น

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 การหล่อโลหะที่ใช้ในงานวิจัย เป็นการหล่อที่มีลักษณะการเทโลหะหลอมเหลวด้วยมือ ซึ่งเป็นผลให้การเทโลหะหลอมเหลวไม่คงที่ โลหะหลอมเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์ไม่คงที่ เกิดความไม่สม่ำเสมอในชิ้นงาน จึงควรปรับลักษณะการเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ให้คงที่ โดยใช้มอเตอร์ช่วยในการเทโลหะหลอมเหลว

5.3.2 การใช้งานเตาหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูง ขณะนำชิ้นงานใส่ หรือออกจากเตา อาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ จึงควรใช้ที่คีบจับชิ้นงานออกจากเตาหลอม และใส่อุปกรณ์ป้องกันทุกครั้งขณะปฏิบัติงาน

5.3.3 ขณะนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ควรรอให้ชิ้นงานเย็นตัวก่อน มิฉะนั้นอาจเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้

5.3.4 ชิ้นงานจากการหล่อ จะมีลักษณะกลวงคล้ายท่อ เนื่องจากแม่พิมพ์ไม่มีรูระบายอากาศ จึงควรเจาะรูบริเวณด้านข้างของแม่พิมพ์ เพื่อเพิ่มรูระบายอากาศให้กับแม่พิมพ์

5.3.5 จากผลการทดลอง พบว่าโครงสร้างจุลภาคจะมีขนาด และรูปร่างที่คล้ายกัน จึงเป็นผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ จึงทำการวัดพื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่ส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงาน



เอกสารอ้างอิง

- ชาลิต เชียงกุล. (2542). โลหะวิทยา. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- บัญชา ธนบุญสมบัติ ,ศุภกาญจน์ คำมณี. (2544). จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งประตูลูกโลก ระดับจุลภาค. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ.
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. กรรมวิธีการผลิตโลหะ. มหาวิทยาลัยราชชมงคลอีสาน, นครราชสีมา. สืบค้นเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2554,
http://www.mme.rmuti.ac.th/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=3&id=2&Itemid=25
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นุชธนา พูลทอง. (2545). อิทธิพลของธาตุผสม และอัตราการเย็นตัวต่อ โครงสร้าง สมบัติทางกลของเหล็กหล่อกึ่งแข็ง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- เพชรลัดดา เรืองแก้ว. (2553). กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบรางเทหล่อเย็นแบบเอียงสำหรับ อะลูมิเนียมเกรด AA7075, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, อุบลราชธานี.
- มนัส สติรจินดา. (2541). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานพ ตันตระกูลบัณฑิตย์. (2535). งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- วิรุจน์ บัวงาม. เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope). มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี, อุบลราชธานี. สืบค้นเมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2554, <http://learners.in.th/blog/wirut/325228>
- สุทธาว์ลัย อิมอุไร, ธรณินทร์ ไชยเรืองศรี, ชัญชนา ธนชยานนท์, จุลเทพ ขจรไชยกุล. โครงสร้าง-จุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- สมบัติ ปาทาคำ. (2548). ผลของการเพิ่มของอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน ของแต่ละสัดส่วนของ ของแข็งต่อระยะช่วงห่างระหว่างแกนเดนไดรท์ขั้นทุติยภูมิของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด ASTM A356, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Birol, Y. (2007). A357 Thixoforming Feedstock Produced by Cooling Slope Casting. *Journal of Materials Processing Technology*, PP. 94-101.
- Davis, J.R., et al. (1993). *Aluminium and Aluminium Alloys*. ASM International, Materials Park Ohio, PP. 199-230.
- Figueredo, A.D. (2001). *Science and Technology of Semi-Solid Metal Processing*. Worcester Polytechnic Institute, United State.



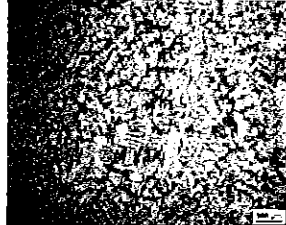
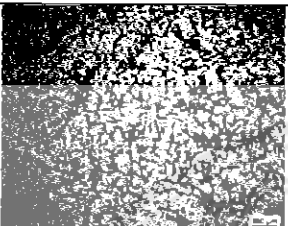
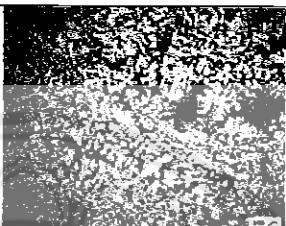

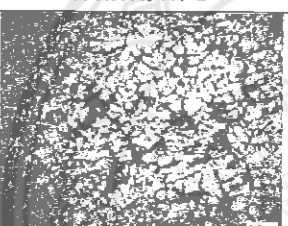
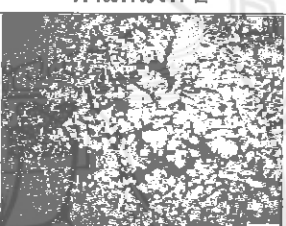
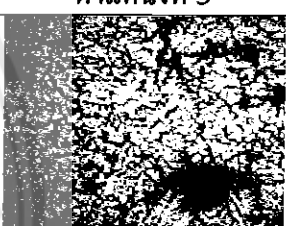




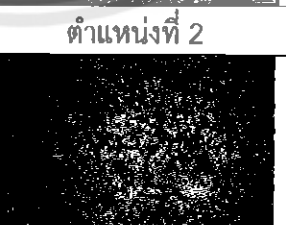
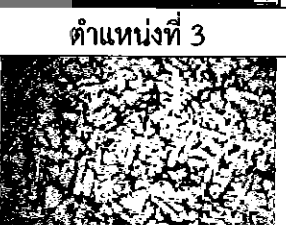
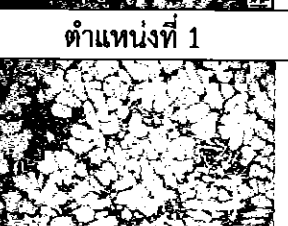
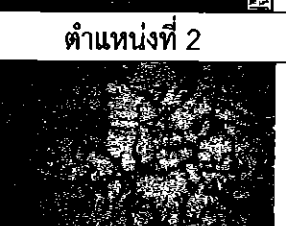
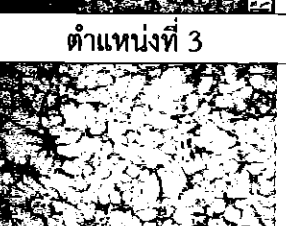

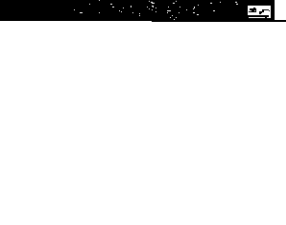

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Flemings M.C. (1991). Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State. **Metallurgical Transaction B**.
- Haga, T. and Kapronos, P. (2002). Simple rheocasting process. **Journal of Materials Processing Technology**, PP. 594-598.
- Haga, T. and Nakamura, R. (2010). Effects of casting factors of cooling slope on semi-solid condition. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, PP. s968-s972.
- Hong-Min Gua. (2009). Pressurized solidification of semi-solid aluminum die casting alloy A356. **Journal of Alloy and Compounds**, PP. 812-816.
- Jinguo Qiao. (2005). Relationship between microstructures and contents of Ca/P in near-eutectic Al-Si piston alloy, **Materials letters**, Shandong University, China.
- Lashkari, O. and Ghomashchi, R. (2008). The Implication of Rheological Principles for Characterization of Semi-Solid Al-Si Cast Billet. Available: http://amprinstitute.com/research_area/semi_solid.htm
- Motegi, T. and Tanabe, F. (2004). New Semi-Solid Casting of Copper Alloy Using an Inclined Chilling Plate, **Proceeding of the Eighth S2P International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composite**, Limassol, Cyprus.
- N.K. Kund, P.Dutta. (2010). Numerical simulation of solidification of liquid aluminium alloy flowing on cooling slope. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Bangalore.
- Stefanescu, D.M. (2002). **Science and Engineering of Casting Solidification**, University of Alabama, U.S.A.
- Steube, R.S. and Hellawell. (1992). **Micro/macro Scale Phenomena in Solidification**, Am. Soc. Mech, New York.

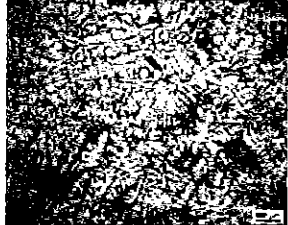
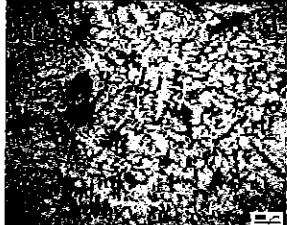
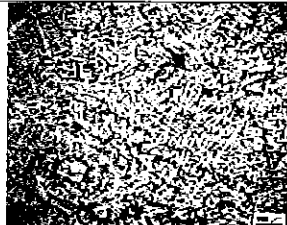
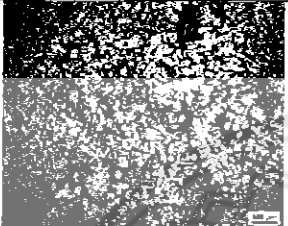
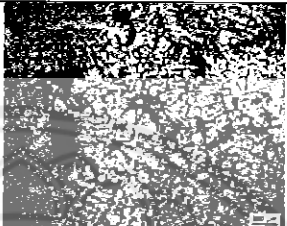
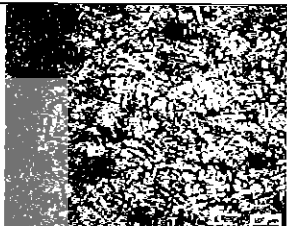
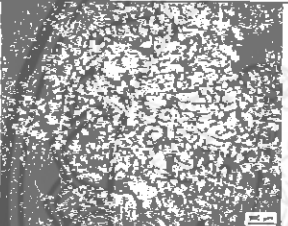
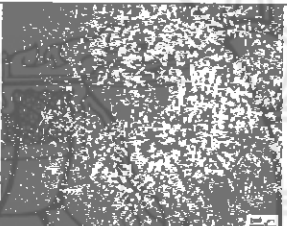
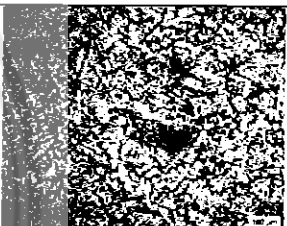


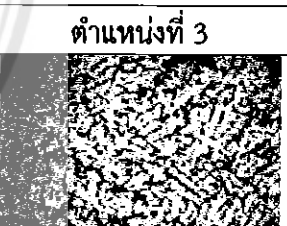
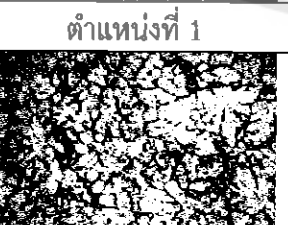
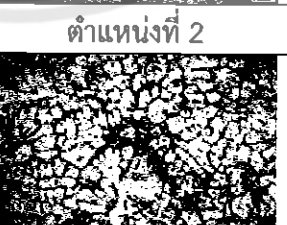
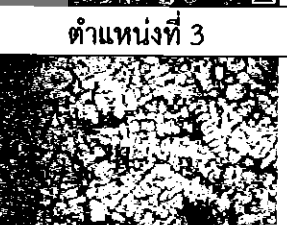

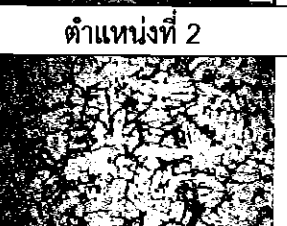
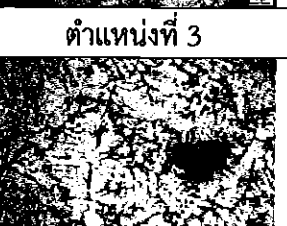
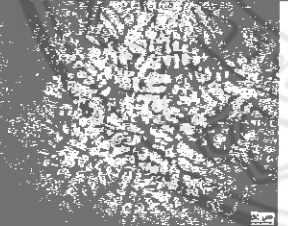
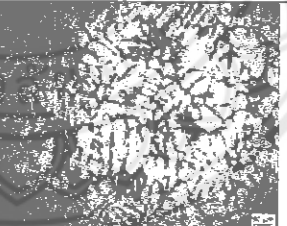
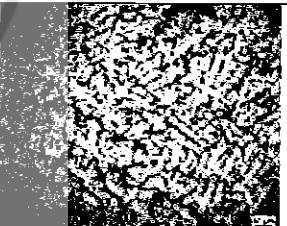
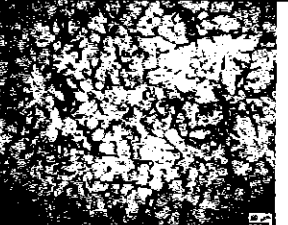
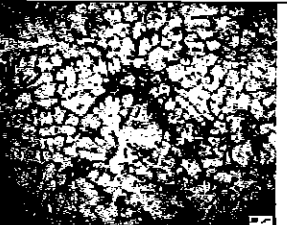
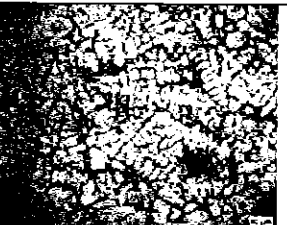
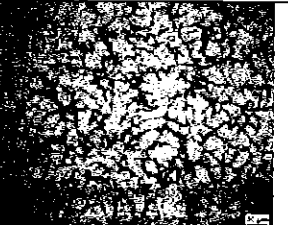
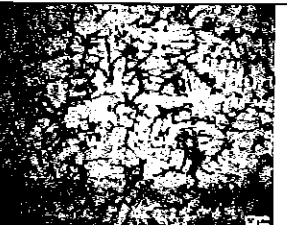
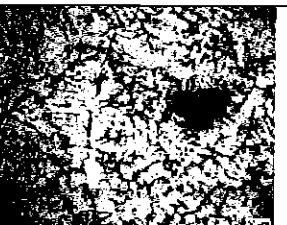
ภาคผนวก ก
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเท-
ลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น



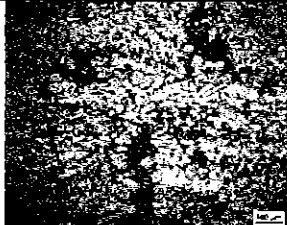
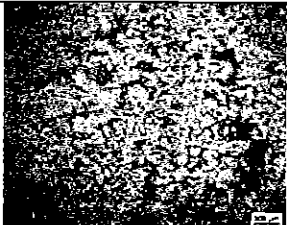
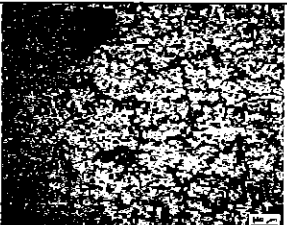
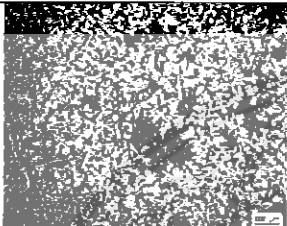
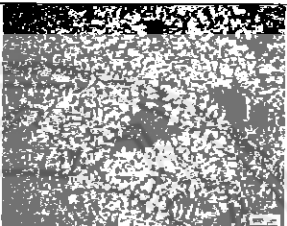
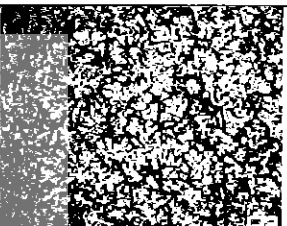
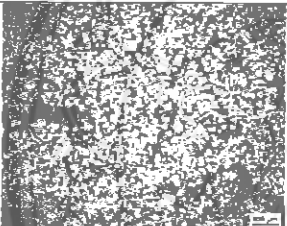
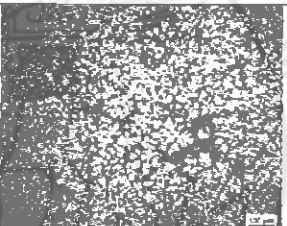
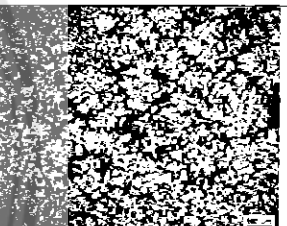
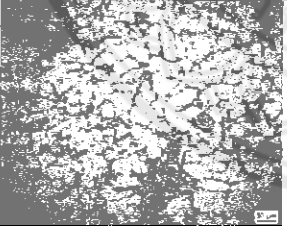
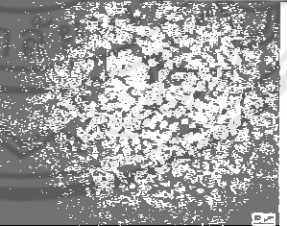
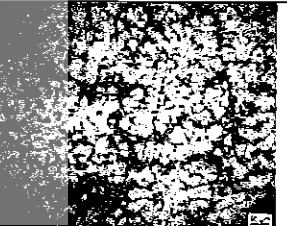


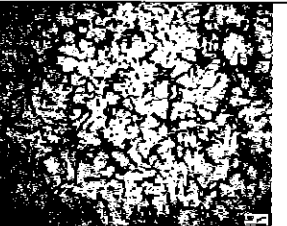
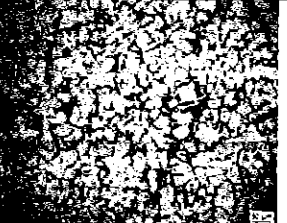
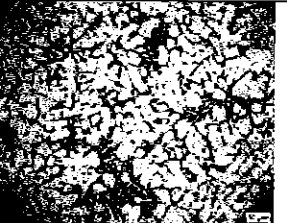
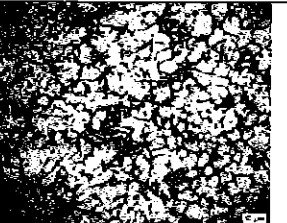
ตารางที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

| | | กำลังขยาย 50 เท่า | | |
|------|--|---|--|---|
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | |  |  |  |
| กลาง | |  |  |  |
| | |  |  |  |
| | | กำลังขยาย 100 เท่า | | |
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | |  |  |  |
| กลาง | |  |  |  |
| | | | | |
| ล่าง | | | | |
| | | | | |


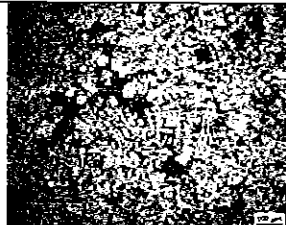
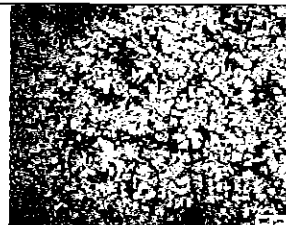
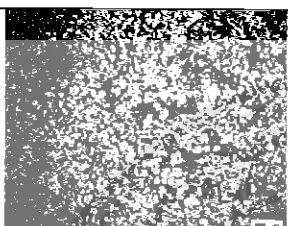
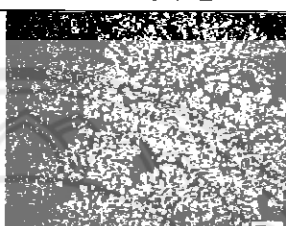
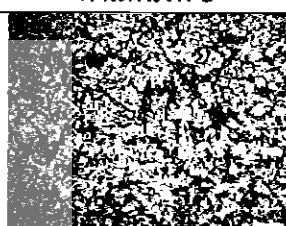
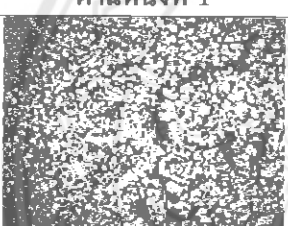
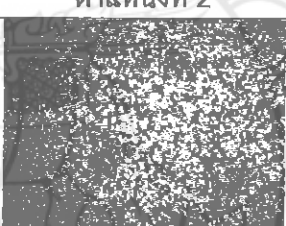
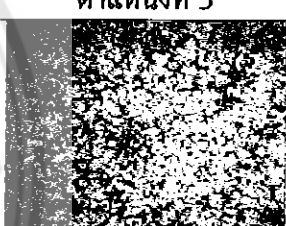
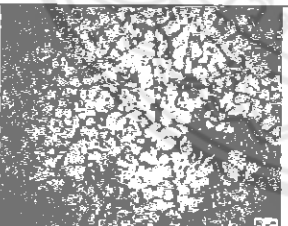
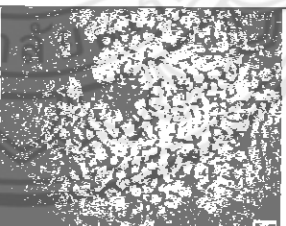
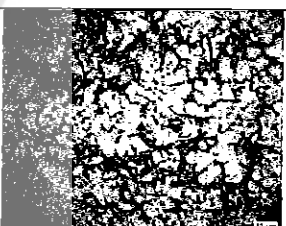
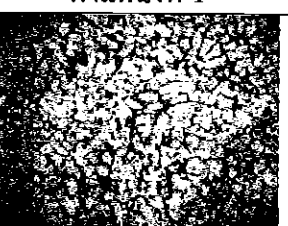
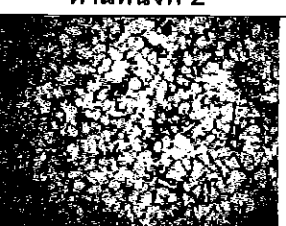

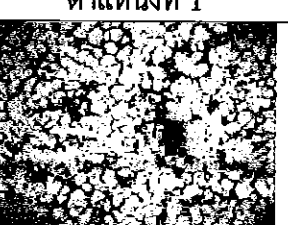

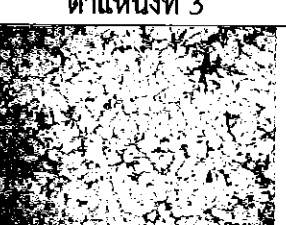
ตารางที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

| | | กำลังขยาย 50 เท่า | | |
|------|--|---|--|---|
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | |  |  |  |
| กลาง | |  |  |  |
| | |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | |  |  |  |
| | | กำลังขยาย 100 เท่า | | |
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | |  |  |  |
| กลาง | |  |  |  |
| | | | | |
| ล่าง | | | | |
| | | | | |

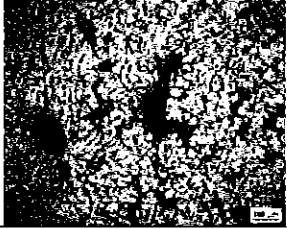
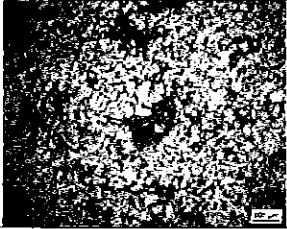
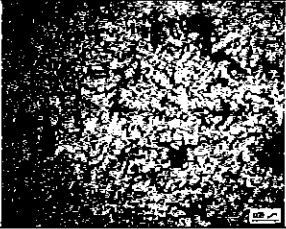
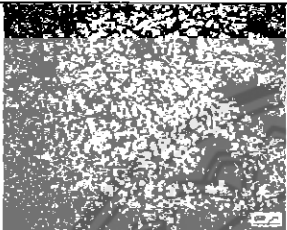
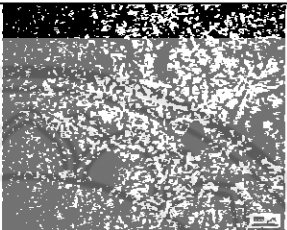
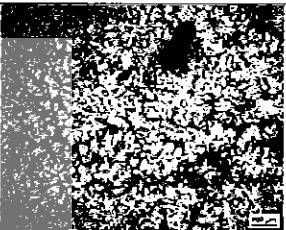
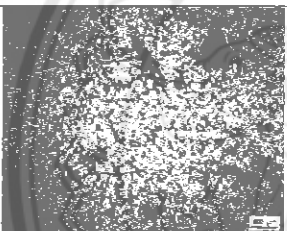
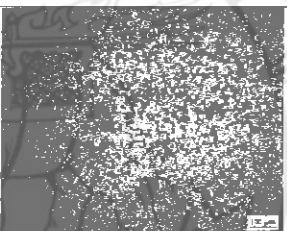
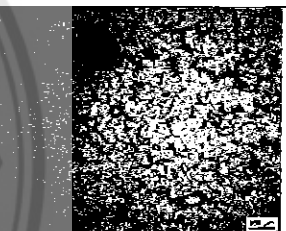
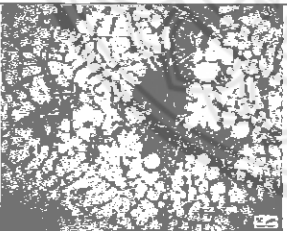
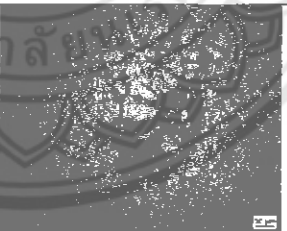
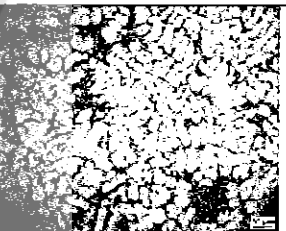
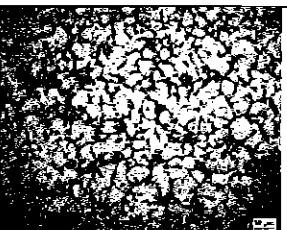
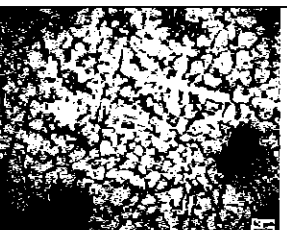
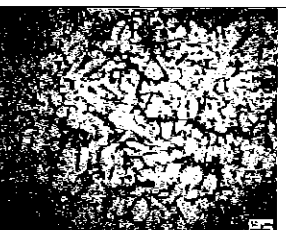
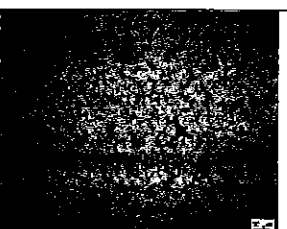
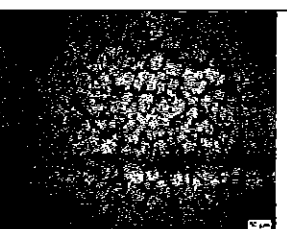
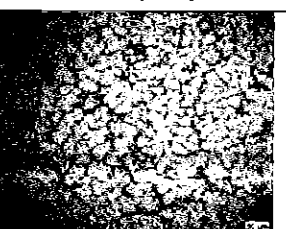
ตารางที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส และความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา

| | | กำลังขยาย 50 เท่า | | |
|------|------|---|--|---|
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | กลาง |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | | | | |
| | | กำลังขยาย 100 เท่า | | |
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | กลาง |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | | | | |


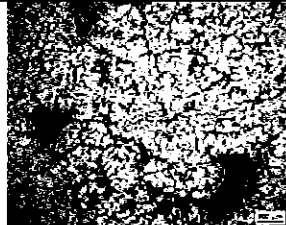
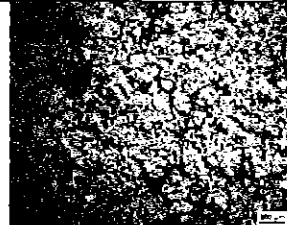
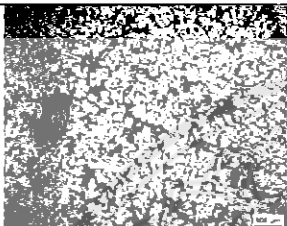
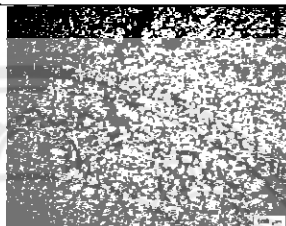
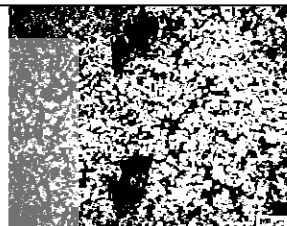
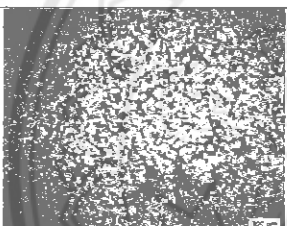
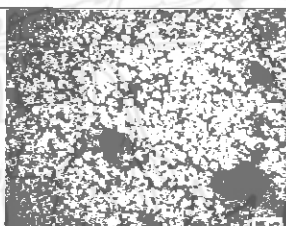
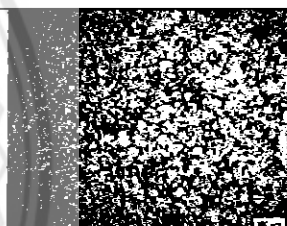
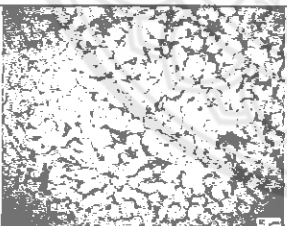
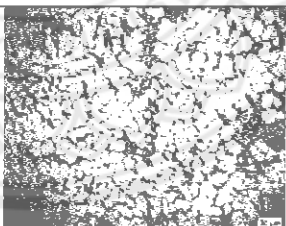
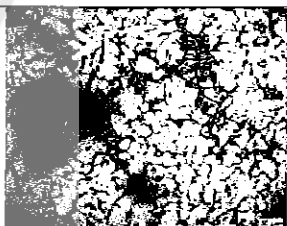
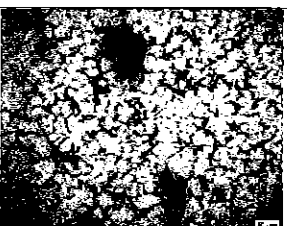
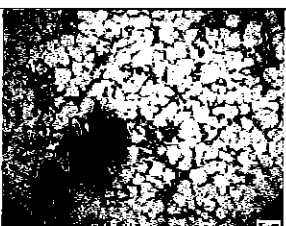
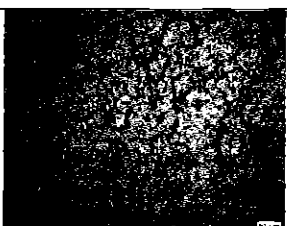
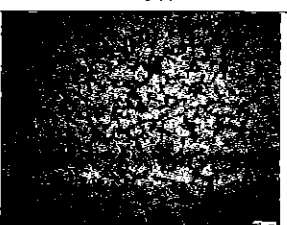
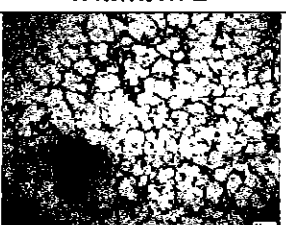
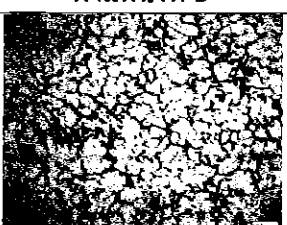
ตารางที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส และความชันของรางเทหล่อเย็น 70 องศา

| | | กำลังขยาย 50 เท่า | | |
|------|------|---|--|---|
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | กลาง |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | | | | |
| | | กำลังขยาย 100 เท่า | | |
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | กลาง |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | | | | |

ตารางที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส และความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา

| | | กำลังขยาย 50 เท่า | | |
|------|------|---|--|---|
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | กลาง |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | | | | |
| | | กำลังขยาย 100 เท่า | | |
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | กลาง |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | | | | |

ตารางที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส และความชันของรางเทหล่อเย็น 70 องศา

| | | กำลังขยาย 50 เท่า | | |
|------|------|---|--|---|
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | กลาง |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | | | | |
| | | กำลังขยาย 100 เท่า | | |
| | | ตำแหน่งที่ 1 | ตำแหน่งที่ 2 | ตำแหน่งที่ 3 |
| บน | |  |  |  |
| | กลาง |  |  |  |
| ล่าง | |  |  |  |
| | | | | |

ภาคผนวก ข
พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม
เกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบ
เทผ่านรางเทหล่อเย็น



ตารางที่ ข.1 พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์-ถาวรที่อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

| ตำแหน่ง | อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส | | อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส | |
|--------------------------|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------|
| | พื้นที่ (μm^2) | รูปร่าง | พื้นที่ (μm^2) | รูปร่าง |
| 1 | 1115.69 | 0.484 | 786.85 | 0.565 |
| 2 | 736.33 | 0.504 | 866.90 | 0.539 |
| 3 | 735.01 | 0.534 | 652.52 | 0.496 |
| 4 | 687.31 | 0.590 | 890.14 | 0.533 |
| 5 | 876.88 | 0.563 | 1074.47 | 0.544 |
| 6 | 910.64 | 0.538 | 1049.50 | 0.542 |
| ค่าเฉลี่ย | 843.59 | 0.535 | 886.73 | 0.537 |
| ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน | 159.59 | 0.037 | 159.36 | 0.023 |

ตารางที่ ข.2 พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

| ตำแหน่ง | อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส , ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา | | อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส , ความชันของรางเทหล่อเย็น 50 องศา | |
|--------------------------|---|---------|---|---------|
| | พื้นที่ (μm^2) | รูปร่าง | พื้นที่ (μm^2) | รูปร่าง |
| 1 | 723.48 | 0.600 | 987.09 | 0.542 |
| 2 | 767.74 | 0.555 | 781.72 | 0.571 |
| 3 | 717.39 | 0.560 | 888.04 | 0.535 |
| 4 | 683.58 | 0.613 | 922.81 | 0.548 |
| 5 | 777.95 | 0.582 | 941.53 | 0.548 |
| 6 | 727.72 | 0.626 | 976.70 | 0.565 |
| ค่าเฉลี่ย | 732.98 | 0.589 | 916.31 | 0.552 |
| ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน | 34.73 | 0.029 | 75.17 | 0.014 |

ตารางที่ ข.3 พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ ของการหล่อโลหะแบบเทผ่าน-
รางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 70 องศา อุณหภูมิเท 660 และ 680
องศาเซลเซียส

| ตำแหน่ง | อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส , ความชันของรางเทหล่อเย็น 70 องศา | | อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส , ความชันของรางเทหล่อเย็น 70 องศา | |
|--------------------------|---|---------|---|---------|
| | พื้นที่ (μm^2) | รูปร่าง | พื้นที่ (μm^2) | รูปร่าง |
| 1 | 629.11 | 0.559 | 883.96 | 0.609 |
| 2 | 955.88 | 0.608 | 945.00 | 0.613 |
| 3 | 850.65 | 0.544 | 1066.80 | 0.554 |
| 4 | 859.83 | 0.607 | 927.33 | 0.576 |
| 5 | 590.90 | 0.556 | 777.82 | 0.672 |
| 6 | 845.67 | 0.527 | 798.02 | 0.610 |
| ค่าเฉลี่ย | 788.68 | 0.567 | 899.82 | 0.606 |
| ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน | 144.70 | 0.033 | 106.00 | 0.040 |

ภาคผนวก ค
ความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด A356 ที่ผ่าน
การหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร และการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น
ที่ได้จากการทดสอบความแข็งแบบบริเนล



ตารางที่ ค.1 ความแข็งของชิ้นงาน ที่ผ่านการหล่อแบบเทลงแม่พิมพ์ถาวร ที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส

| อุณหภูมิ เท | ตำแหน่ง | จุด ที่ | ความแข็ง (HB) | ค่าเฉลี่ย ความแข็ง | ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน | ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของชิ้นงาน | ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของชิ้นงาน |
|----------------|---------|------------|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|--|
| 660 | บน | 1 | 115.12 | 112.60 | 8.32 | 110.87 | 5.48 |
| | | 2 | 103.68 | | | | |
| | | 3 | 116.24 | | | | |
| | | 4 | 123.30 | | | | |
| | | 5 | 104.66 | | | | |
| | กลาง | 1 | 111.84 | 109.18 | 4.12 | | |
| | | 2 | 106.65 | | | | |
| | | 3 | 105.64 | | | | |
| | | 4 | 106.65 | | | | |
| | | 5 | 115.12 | | | | |
| | ล่าง | 1 | 105.64 | 110.83 | 3.40 | | |
| | | 2 | 110.78 | | | | |
| | | 3 | 115.12 | | | | |
| | | 4 | 110.78 | | | | |
| | | 5 | 111.84 | | | | |
| 680 | บน | 1 | 123.30 | 110.40 | 7.53 | 110.37 | 5.26 |
| | | 2 | 103.68 | | | | |
| | | 3 | 109.72 | | | | |
| | | 4 | 107.66 | | | | |
| | | 5 | 107.66 | | | | |
| | กลาง | 1 | 101.77 | 109.21 | 4.75 | | |
| | | 2 | 107.66 | | | | |
| | | 3 | 111.84 | | | | |
| | | 4 | 114.02 | | | | |
| | | 5 | 110.78 | | | | |
| | ล่าง | 1 | 116.24 | 111.48 | 3.78 | | |
| | | 2 | 111.84 | | | | |
| | | 3 | 105.64 | | | | |
| | | 4 | 111.84 | | | | |
| | | 5 | 111.84 | | | | |

ตารางที่ ค.2 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ความชันของรางเท-
หล่อเย็น 50 องศา อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

| อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ รางเทหล่อ เย็น | ตำแหน่ง | จุด ที่ | ความแข็ง (HB) | ค่าเฉลี่ย ความแข็ง | ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน | ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของชิ้นงาน | ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของชิ้นงาน |
|--|---------|------------|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|--|
| 660/50 | บน | 1 | 112.92 | 113.82 | 2.39 | 114.98 | 3.87 |
| | | 2 | 114.02 | | | | |
| | | 3 | 117.38 | | | | |
| | | 4 | 114.02 | | | | |
| | | 5 | 110.78 | | | | |
| | กลาง | 1 | 109.72 | 116.59 | 5.11 | | |
| | | 2 | 112.92 | | | | |
| | | 3 | 122.09 | | | | |
| | | 4 | 119.70 | | | | |
| | | 5 | 118.54 | | | | |
| | ล่าง | 1 | 107.66 | 114.53 | 3.92 | | |
| | | 2 | 116.24 | | | | |
| | | 3 | 117.38 | | | | |
| | | 4 | 116.24 | | | | |
| | | 5 | 115.12 | | | | |
| 680/50 | บน | 1 | 100.83 | 101.34 | 5.13 | | |
| | | 2 | 95.42 | | | | |
| | | 3 | 98.07 | | | | |
| | | 4 | 108.68 | | | | |
| | | 5 | 103.68 | | | | |
| | กลาง | 1 | 97.18 | 104.80 | 5.2451 | | |
| | | 2 | 106.65 | | | | |
| | | 3 | 108.68 | | | | |
| | | 4 | 109.72 | | | | |
| | | 5 | 101.77 | | | | |
| | ล่าง | 1 | 103.68 | 106.89 | 2.81 | | |
| | | 2 | 107.66 | | | | |
| | | 3 | 107.66 | | | | |
| | | 4 | 104.66 | | | | |
| | | 5 | 110.78 | | | | |

ตารางที่ ค.3 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็นที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 70 องศา อุณหภูมิเท 660 และ 680 องศาเซลเซียส

| อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ รางเทหล่อ เย็น | ตำแหน่ง | จุด ที่ | ความแข็ง (HB) | ค่าเฉลี่ย ความแข็ง | ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน | ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของชิ้นงาน | ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของชิ้นงาน |
|--|---------|------------|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|--|
| 660/70 | บน | 1 | 107.66 | 108.92 | 2.25 | 109.41 | 2.56 |
| | | 2 | 106.65 | | | | |
| | | 3 | 110.78 | | | | |
| | | 4 | 107.66 | | | | |
| | | 5 | 111.84 | | | | |
| | กลาง | 1 | 112.92 | 110.80 | 1.99 | | |
| | | 2 | 108.68 | | | | |
| | | 3 | 109.72 | | | | |
| | | 4 | 109.72 | | | | |
| | | 5 | 112.92 | | | | |
| | ล่าง | 1 | 104.66 | 108.53 | 3.19 | | |
| | | 2 | 111.84 | | | | |
| | | 3 | 105.64 | | | | |
| | | 4 | 110.78 | | | | |
| | | 5 | 109.72 | | | | |
| 680/70 | บน | 1 | 107.66 | 108.92 | 2.25 | 108.50 | 5.10 |
| | | 2 | 106.65 | | | | |
| | | 3 | 110.78 | | | | |
| | | 4 | 107.66 | | | | |
| | | 5 | 111.84 | | | | |
| | กลาง | 1 | 96.29 | 108.58 | 7.75 | | |
| | | 2 | 114.01 | | | | |
| | | 3 | 107.66 | | | | |
| | | 4 | 108.68 | | | | |
| | | 5 | 116.24 | | | | |
| | ล่าง | 1 | 110.78 | 107.99 | 5.03 | | |
| | | 2 | 114.01 | | | | |
| | | 3 | 100.83 | | | | |
| | | 4 | 105.64 | | | | |
| | | 5 | 108.68 | | | | |