



การศึกษาอัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีผลต่อ

โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็ง

EFFECT OF ALUMINUM-COPPER ALLOYS COMPOSITION  
ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS PROPERTY

นายอภินันท์

ชัยทรัพย์มงคล รหัส 48365392

นายเฉลิมพล

พังแสงสุ รหัส 49360334

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์  
วันที่รับ..... 24 มิ.ย. 2554  
เลขทะเบียน..... 15515403  
เลขเรียกหนังสือ..... ม/ส.  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ 2554 17

2553

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

ปีการศึกษา 2552



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ      การศึกษาอัตราส่วนผสมของ อะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีผลต่อโครงสร้างทาง  
จุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็ง

ผู้ดำเนินโครงการ      นายอภิรักษ์ ชัยทรัพย์มงคล      รหัส 48365392  
                                 นายเฉลิมพล พังแสงสุ      รหัส 49360334

ที่ปรึกษาโครงการ      อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์

สาขาวิชา      วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา      วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา      2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ชูลีพรย์ ป่าไร่)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ธนิศานต์ ธงชัย)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ศิริภาณุจน์ ชันสัมฤทธิ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

|                   |                                                                                                  |               |               |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| ชื่อหัวข้อโครงการ | การศึกษาอัตราส่วนผสมของ อะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็ง |               |               |
| ผู้ดำเนินโครงการ  | นายอภิรักษ์                                                                                      | ชัยทรัพย์มงคล | รหัส 48365392 |
|                   | นายเฉลิมพล                                                                                       | พั่งแสงสุ     | รหัส 49360334 |
| ที่ปรึกษาโครงการ  | อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์                                                                          |               |               |
| สาขาวิชา          | วิศวกรรมวัสดุ                                                                                    |               |               |
| ภาควิชา           | วิศวกรรมอุตสาหการ                                                                                |               |               |
| ปีการศึกษา        | 2552                                                                                             |               |               |

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็ง เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ได้หลังจากการหล่อโลหะผสมสองชนิดแล้วในอัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ทองแดงที่ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยนำหนักของทองแดง และทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค พบโครงสร้างเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม ( $\alpha$ -Al) เป็นเฟสพื้น หรือเฟสปฐมภูมิ และมีเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ ( $\theta$ -CuAl<sub>2</sub>) อยู่บริเวณขอบเกรนของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือเป็นกลุ่มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณทองแดง สอดคล้องกับค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเพราะเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ มีสมบัติด้านความแข็ง การทดสอบความแข็งพบว่าส่วนกึ่งกลางชิ้นงานทดสอบจะมีค่าความแข็งน้อยกว่าบริเวณขอบชิ้นงานทดสอบ และระยะระหว่างกลางจากค่าเฉลี่ยความแข็งของแต่ละส่วนผสมสอดคล้องกับค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น เพราะเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ที่เพิ่มขึ้น แต่ในผลการทดลองนั้นมีค่าบางค่าที่แสดงผลออกมาแปรปรวนจากกลุ่มผลทดสอบนั้น ด้วยเหตุผลจากความบกพร่องของชิ้นงาน เช่น รูพรุน หรือโพรงอากาศ ในกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเกิดจากการเหน้าโลหะหลอมเหลวมีการกักอากาศไว้ภายใน ไม่สามารถเคลื่อนออกมาได้ทันระหว่างการแข็งตัวในกระบวนการเหน้าโลหะ

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำวิธี แก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงงานมาโดยตลอด และขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ อาจารย์ชูลิพย์ ป่าไร่ อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย อาจารย์มานะ วีรวิกรม ที่สละเวลาเพื่อการสอบปริญญานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้ทำโครงงาน จนงานลุล่วงไปด้วยดี

นอกจากนี้ ยังต้องขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่เทคนิคคณะวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยเหลือด้านวัสดุอุปกรณ์ ในการดำเนินโครงงานเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ นางศีนาฏ ชัยทรัพย์มงคล ผู้เป็นมารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ และให้การดูแลสนับสนุนในทุกด้านจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงงานใคร่ขอขอบพระคุณ คุณมนต์ชัย คุณเพ็ญทิพย์ ที่ได้ให้การดูแล และให้การส่งเสริมในด้านการศึกษาด้วยดีเสมอมา ตลอดจนการดำเนินโครงงานจนสำเร็จการศึกษา

ผู้ดำเนินโครงงาน

อภินันท์ ชัยทรัพย์มงคล

เฉลิมพล พังแสงสุ

เมษายน 2554

## สารบัญ

|                                                           | หน้า |
|-----------------------------------------------------------|------|
| ใบรับรองปริญญาบัตร.....                                   | ก    |
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                      | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                      | ค    |
| สารบัญ.....                                               | ง    |
| สารบัญตาราง.....                                          | จ    |
| สารบัญรูป.....                                            | ฉ    |
| <br>                                                      |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                         | 1    |
| 1.1 หลักการ และเหตุผล.....                                | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....                           | 1    |
| 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....                        | 1    |
| 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....                    | 1    |
| 1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย.....                        | 2    |
| 1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย.....                       | 2    |
| 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย.....                      | 2    |
| 1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ (Gantt Chart).....         | 3    |
| <br>                                                      |      |
| บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....                    | 4    |
| 2.1 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous Metals and Alloys)..... | 4    |
| 2.2 โลหะอะลูมิเนียม (Aluminum).....                       | 5    |
| 2.3 โลหะทองแดง (Copper).....                              | 6    |
| 2.4 สมบัติของการผสม.....                                  | 7    |
| 2.5 การหล่อ.....                                          | 10   |
| 2.6 การออกแบบโมล (Mold Design).....                       | 12   |
| 2.7 การแข็งตัวของโลหะ .....                               | 14   |
| 2.8 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing).....              | 23   |
| 2.9 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค .....                    | 25   |
| 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                           | 27   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                                                                                                | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ.....                                                                                                              | 28   |
| 3.1 ศึกษาข้อมูล.....                                                                                                                           | 29   |
| 3.2 วิธีออกแบบ และการทำแม่พิมพ์.....                                                                                                           | 29   |
| 3.3 การเปลี่ยนปัจจัยในการทดลอง.....                                                                                                            | 29   |
| 3.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....                                                                                                          | 30   |
| 3.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test).....                                                                                                      | 32   |
| 3.6 วิเคราะห์ข้อมูล.....                                                                                                                       | 32   |
| 3.7 สรุปผล และจัดทำรูปเล่ม.....                                                                                                                | 32   |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิเคราะห์.....                                                                                                           | 33   |
| 4.1 ผลการศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูล.....                                                                                                        | 33   |
| 4.2 การออกแบบแม่พิมพ์ จัดทำเครื่องกวนน้ำโลหะ และแม่พิมพ์.....                                                                                  | 34   |
| 4.3 ทำการทดลองผสมโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง.....                                                                                                   | 35   |
| 4.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค.....                                                                                                          | 37   |
| 4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และ<br>โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ร้อยละ 2, 4 , 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักทองแดง..... | 38   |
| 4.6 ผลการทดสอบสมบัติด้านความแข็ง.....                                                                                                          | 41   |
| บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....                                                                                                              | 43   |
| 5.1 บทสรุป.....                                                                                                                                | 43   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....                                                                                                                | 43   |
| 5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา.....                                                                                                       | 44   |
| เอกสารอ้างอิง.....                                                                                                                             | 45   |
| ภาคผนวก ก.....                                                                                                                                 | 46   |
| ภาคผนวก ข.....                                                                                                                                 | 53   |
| ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....                                                                                                                   | 55   |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                                                           | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และดำเนินงาน.....                                                                                                                     | 3    |
| 2.1 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นงานที่ตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก.....                                                                                            | 26   |
| 3.1 ชิ้นงานในการศึกษาอัตราส่วนผสมของ อะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็ง.....                                                 | 30   |
| 4.1 ผลการคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิไนต์ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง..... | 41   |
| ก.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.....                                                                           | 47   |
| ก.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของทองแดง.....                                                                   | 48   |
| ก.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของทองแดง.....                                                                   | 49   |
| ก.4 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของทองแดง.....                                                                   | 50   |
| ก.5 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของทองแดง.....                                                                   | 51   |
| ก.6 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง.....                                                                  | 52   |

## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                  | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.1 แผนภูมิสมดุล อะลูมิเนียม-ทองแดง.....                                | 9    |
| 2.2 Bottom Gate.....                                                    | 13   |
| 2.3 Side Gate.....                                                      | 13   |
| 2.4 ลักษณะการเกิดผลึกของงานหล่อ.....                                    | 15   |
| 2.5 ลักษณะการแยกตัวของสารมลทินอยู่ตามขอบเกรนและกึ่งกลางของแท่งโลหะ..... | 15   |
| 2.6 รูปตัดการเกิดผลึกในลักษณะต่างๆ ของโลหะหล่อ.....                     | 16   |
| 2.7 ลักษณะการเกิดโพรงอากาศอันเนื่องมาจากการหดตัวของน้ำโลหะ.....         | 17   |
| 2.8 กลไกการเกิดเดนไดรต์.....                                            | 19   |
| 2.9 อุณหภูมิน้ำโลหะในโพรงแบบหล่อ.....                                   | 20   |
| 2.10 ภาวะ Undercooling ที่เกิดมากที่สุด.....                            | 22   |
| 2.11 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรีอคเวลล์.....                              | 24   |
| 2.12 ลักษณะแนวทางการขัดผิวของชิ้นงานที่ทดสอบสลับเป็นตาราง.....          | 26   |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....                                       | 28   |
| 3.2 ชิ้นงานที่จะได้จากการหล่อตามมาตรฐาน ASTM B 108.....                 | 29   |
| 3.3 ชิ้นงานที่นำชิ้นงานมาตัด โดยเลือก 3 ส่วน.....                       | 30   |
| 3.4 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....                               | 31   |
| 3.5 ตำแหน่งการทดสอบความแข็ง.....                                        | 32   |
| 4.1 การออกแบบขนาดแม่พิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM B 108.....                  | 33   |
| 4.2 แบบพิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM B 108.....                               | 34   |
| 4.3 เครื่องกวนน้ำโลหะ.....                                              | 34   |
| 4.4 แผนภูมิสมดุล อะลูมิเนียม-ทองแดง.....                                | 35   |
| 4.5 เทน้ำโลหะอะลูมิเนียมทองแดงลงแม่พิมพ์.....                           | 36   |
| 4.6 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อ.....                                  | 36   |
| 4.7 ชิ้นงานที่ตัด เพื่อทดสอบ.....                                       | 37   |
| 4.8 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....                               | 37   |
| 4.9 โครงสร้างอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.....                                  | 38   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า                                                                           |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 4.10   | โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของทองแดง.....38 |
| 4.11   | โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง.....39                             |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการ และเหตุผล

ปัจจุบันนี้ได้มีโลหะหลายชนิดที่นำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ซึ่งอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ โลหะที่พบมากในชีวิตประจำวันได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม เงิน ทองแดง และอื่นๆ อีกมากมาย และมีการนำโลหะเหล่านี้มาผสมเข้าด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียมผสมทองแดงซึ่งอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีความเบา และเหนียว และจุดเด่นทางด้านการทนต่อการเป็นสนิม แต่ยังคงความสามารถทางความแข็งแรง จึงทำให้ต้องมีการผสมทองแดง เพื่อเพิ่มสมบัติทางความแข็งแรงของอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะได้หลายชนิด เช่น ทองแดง แมกนีเซียม ซิลิคอน ในที่นี้นักศึกษาสนใจในการผสมกันระหว่าง อะลูมิเนียม กับทองแดง โดยคาดว่าสมบัติทางกลจะสูงขึ้น และสามารถนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้อีกด้วย เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางต่อไป

ในการเพิ่มสมบัติของอะลูมิเนียม โดยผสมทองแดงจะใช้วิธีการหล่อ เพื่อให้เนื้อของสารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้ได้สมบัติถึงโครงสร้างทางจุลภาค และเป็นวิธีการที่สามารถทำได้สะดวก และรวดเร็ว

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ได้หลังจากการหล่อโลหะผสมสองชนิดแล้วในอัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ทองแดงที่แตกต่างกัน

#### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป โดยการหล่อโลหะที่มีอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

#### 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค และค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมของโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีอัตราส่วนผสมร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักทองแดง

## 1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 วัสดุในการดำเนินงาน คือ อะลูมิเนียม และทองแดง

1.5.2 แม่พิมพ์ถาวรชนิดเหล็ก (Permanent Mold) ขนาดตามมาตรฐาน ASTM B 108

1.5.3 อุณหภูมิหลอมโลหะที่ 1100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ 710 องศาเซลเซียส

1.5.4 อัตราส่วนผสมของโลหะ อะลูมิเนียม-ทองแดง ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักทองแดง

1.5.5 ศึกษา และตรวจสอบขนาดโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

1.5.6 ศึกษาการวัดค่าความแข็ง โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งรีอคเวลล์

## 1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

อาคารปฏิบัติการทางวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

## 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

กรกฎาคม พ.ศ. 2552 - เมษายน พ.ศ. 2554





## บทที่ 2

### หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในปัจจุบันมีความต้องผลิตภัณฑ์ในด้านการอำนวยความสะดวกต่างๆ เพิ่มขึ้นจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในจำนวนนั้นโลหะ และอุตสาหกรรมโลหะก็มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสนองต่อความต้องการต่างๆ ในรูปผลิตภัณฑ์ที่ใช้โลหะ และโลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง จึงทำให้มีความสนใจในการศึกษา และพัฒนา เพื่อให้ได้โลหะผสมอะลูมิเนียมที่มีประสิทธิภาพเหมาะแก่การใช้งานต่างๆ โดยเรียนรู้ และพัฒนาจากทฤษฎีของโลหะอะลูมิเนียม และโลหะนอกกลุ่มเหล็กอีกชนิดที่ใช้ในผสม คือทองแดง เพื่อพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาค โดยนำหลักทฤษฎีการหล่อโลหะมาอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้น

#### 2.1 โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Nonferrous Metals and Alloys)

โลหะนอกกลุ่มเหล็ก หมายถึงโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ เช่นทองแดง อะลูมิเนียม สังกะสี ดีบุก และอื่นๆ ในงานวิศวกรรม และอุตสาหกรรมจะใช้โลหะนอกกลุ่มเหล็กทั้งหมดในปริมาณที่ต่ำกว่าเหล็ก ปริมาณที่ผลิตทั้งปีจะอยู่ในเกณฑ์ประมาณหนึ่งในสิบห้าส่วนของเหล็กหล่อ และเหล็กกล้าทั้งนี้ไม่รวมโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่จัดอยู่ในประเภทโลหะมีค่าสูง (Precious Metal) เช่น ทองคำ และทองคำขาว โลหะนอกกลุ่มเหล็กที่ใช้ในงานวิศวกรรมส่วนใหญ่จะใช้ทดแทนเหล็กในกรณีที่โลหะนอกกลุ่มเหล็กมีความเหนือกว่าในด้านสมบัติใช้งานทั้งนี้เพราะเพราะโลหะนอกกลุ่มเหล็กมีราคาสูงกว่าเหล็กลักษณะที่เหนือกว่าเหล็กจะพิจารณาหลายๆ ประเด็นที่สำคัญ คือ (มนัส, 2543)

2.1.1 ง่ายต่อการผลิตขึ้นส่วนโลหะ หมายถึงการหล่อ (Casting) การขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการรีด การตีขึ้นรูป การเชื่อม และการตกแต่งด้วยการตัด กลึงเจาะ จะเห็นได้ว่าโลหะนอกกลุ่มเหล็กส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวต่ำมีสมบัติการไหลภายในแบบหล่อสูง (High Fluidity) สามารถที่จะหล่อได้ทั้งแบบทราย และแบบโลหะในลักษณะการฉีดเข้าแบบหล่อ (Die Casting) จากสมบัติอ่อนตัวสูงของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Malleable และ Ductile) สามารถขึ้นรูปได้ทั้งร้อน และเย็น และใช้กรรมวิธีขึ้นรูปได้ลักษณะอย่างกว้างขวาง

2.1.2 สมบัติต้านทานการกัดกร่อนโลหะนอกกลุ่มเหล็กหลายประเภทมีสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กทั้งในบรรยากาศทั่วไปที่มีความชื้น และในสภาวะที่เป็นกรด หรือด่าง

2.1.3 สภาพที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า และความร้อนโลหะนอกกลุ่มเหล็กจะมีทั้งที่เป็นตัวนำที่ดี และไม่ได้อยู่ในกลุ่ม ดังเช่นทองแดงจัดเป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีทำสายไฟฟ้า แต่โลหะนิกเกิลผสมจัดเป็นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดีใช้ทำขดลวดต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistor)

2.1.4 น้ำหนัก หรือความถ่วงจำเพาะโลหะนอกกลุ่มเหล็กหลายประเภทที่มีน้ำหนักเบาว่าเหล็กมาก เช่น อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ไทเทเนียม ความได้เปรียบในด้านน้ำหนักจะเป็นประเด็นหนึ่งที่พิจารณา เพื่อนำเอาโลหะเหล่านี้มาพัฒนาใช้ในกรณีที่ต้องการชิ้นส่วนโลหะที่มีน้ำหนักเบา

2.1.5 ความสวยงามของสีส้น เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะนำเอาโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่ใหสี และความมันเงาของผิวมาใช้งานในด้านการตกแต่ง และงานสถาปัตยกรรม

โลหะนอกกลุ่มเหล็กถูกจัดประเภทไว้หลายชนิดขึ้นอยู่กับน้ำหนัก ความคงทนต่อการกัดกร่อน อุณหภูมิหลอมเหลว ปริมาณแหล่งแร่ และสมบัติการแผ่รังสี

## 2.2 โลหะอะลูมิเนียม (Aluminum)

อะลูมิเนียมจัดเป็นธาตุที่พบมากชนิดหนึ่งบนผิวโลกประมาณร้อยละ 8 จะพบกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ซึ่งจะปะปนอยู่กับออกไซด์ของซิลิคอน ( $SiO_2$ ) และเหล็กแร่อะลูมิเนียมที่สามารถนำมาถลุง เพื่อผลิตโลหะอะลูมิเนียมจะเป็นแร่ที่มีปริมาณซิลิคอนออกไซด์ต่ำ ได้แก่ แร่บอกไซต์ (Bauxite) ตามชื่อของบริเวณที่พบครั้งแรกในประเทศฝรั่งเศส นอกจากนี้ยังมีแร่เคโอลินไนต์ (Kaolinite) และที่มีปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ต่ำที่ยังพอนำมาผลิตโลหะอะลูมิเนียมในเชิงพาณิชย์ได้ เช่น Nepheline และ Alunite ซึ่งแร่ทั้งสองนอกจากมีซิลิคอนออกไซด์แล้วยังมีธาตุโพแทสเซียม และโซเดียมปนอยู่อีกปัจจุบันแหล่งแร่บอกไซต์มีปริมาณลดลงแร่ที่มีปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ต่ำกว่าบอกไซต์จะถูกนำมาผสม เพื่อผลิตโลหะอะลูมิเนียมมากยิ่งขึ้น ประเทศที่พบแหล่งแร่อะลูมิเนียมที่สำคัญได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกา อิตาลี และฝรั่งเศส สำหรับประเทศไทยไม่ปรากฏพบแร่บอกไซต์แต่ในประเทศใกล้เคียง เช่น มาเลเซีย และเวียดนามปรากฏพบแร่บอกไซต์จากเอกสารทรัพยากรธรณีที่พิมพ์ออกเผยแพร่ได้กล่าวเป็นเชิงวิจารณ์ว่าประเทศไทยอาจจะมีแหล่งแร่บอกไซต์ เพราะสภาพธรณีวิทยา และสภาพภูมิอากาศเขตร้อน เหมาะแก่การกำเนิดของแร่บอกไซต์ (มนัส, 2543)

### โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมจัดเป็น โลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการเป็นสนิมมีความแข็งแรงในเกณฑ์ปานกลาง แต่มีความเหนียวสูงสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางแทนเหล็ก และทองแดงได้ในหลายๆ ด้านของงานวิศวกรรม และอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมมีสมบัติทางด้านหล่อหลอมที่ดี โดยมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำ สามารถรวมตัวกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะผสมได้ง่ายมีความสามารถในการไหลอยู่ในเกณฑ์สูงสามารถหล่อหลอมได้ง่าย ข้อเสียของอะลูมิเนียมยังคงมีอยู่เหมือนกัน โดยขอบเขตการยืดหยุ่น (Elastic Limit) ต่ำ ทำให้การใช้งานถูกจำกัดขอบเขตไปมาก (มนัส, 2543)

### สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

|                                          |                                                |
|------------------------------------------|------------------------------------------------|
| - น้ำหนักอะตอม                           | 26.97 amu                                      |
| - โครงสร้างของผลึก (Face Centered Cubic) | FCC                                            |
| - ความหนาแน่น (20° C)                    | 2.70 g/cm <sup>3</sup>                         |
| - อุณหภูมิหลอมเหลว                       | 658°C                                          |
| - จุดเดือดกลายเป็นไอ (Boiling Point)     | 1800°C                                         |
| - ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย             | 93 cal/g                                       |
| - สัมประสิทธิ์การขยายตัว (20° C)         | $23.8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| - ความต้านทานจำเพาะ (20° C)              | 2.699 microhm.cm                               |

### สมบัติทางกลของอะลูมิเนียม

|                                                 |                         |
|-------------------------------------------------|-------------------------|
| - ความแข็งแรง (Tensile Strength)                | 8-10 kg/mm <sup>2</sup> |
| - พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)             | 3 kg/mm <sup>2</sup>    |
| - อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)           | 40-50%                  |
| - ความแข็ง (Hardness)                           | 16-20 HB                |
| - โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) | 1109420 psi             |

## 2.3 โลหะทองแดง (Copper)

ทองแดงเป็นธาตุที่พบปริมาณน้อยบนผิวโลก แต่เป็นธาตุหนึ่งที่ปรากฏพบในสภาพบริสุทธิ์ โดยธรรมชาติ เรียกว่า พบในสภาพโลหะ (Metallic State) หรือในสภาพ Native Copper ซึ่งปรากฏพบกระจัดกระจายตามแหล่งต่างๆ

แร่ทองแดงที่ปรากฏพบมีมากมายหลายชนิดมีทั้งที่อยู่ในฟอร์มของซิลไฟด์ ออกไซด์ คาร์บอเนต ซัลเฟต ซิลิเกต และที่อยู่ในลักษณะผสมกัน และยังปนอยู่กับแร่อื่นๆ เช่น แร่ निकเกิล เงิน พลวง และบิสมีท์ ปริมาณของทองแดงในแร่จะอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10 แร่ทองแดงที่จัดว่ามีความสำคัญในเชิงอุตสาหกรรมผลิตโลหะทองแดง ส่วนมากจะเป็นแร่ประเภทซิลไฟด์ซึ่งมีอยู่สองชนิดที่สำคัญคือ แร่ทองแดง คาลโคไซด์ เป็นแร่มีสีเทา-ดำ มีความถ่วงจำเพาะ 5.5-5.8 มีปริมาณทองแดงร้อยละ 79.9 อีกชนิดหนึ่ง คือ แร่คาลโคไพไรต์ เป็นแร่มีสีเหลือง ความถ่วงจำเพาะประมาณ 4 มีปริมาณทองแดงประมาณร้อยละ 35

นอกจากนี้ยังมีแร่ทองแดงออกไซด์ (Cu<sub>2</sub>O) มีทองแดงปริมาณสูงกว่าแร่ที่กล่าวมาแล้วร้อยละ (88.8) เป็นแร่มีสีแดงปริมาณที่พบมีน้อย แร่ทองแดงอีกชนิดหนึ่งที่มีสีเขียวสามารถเจียรไนทำเป็นเครื่องประดับเป็นแร่ทองแดงคาร์โบเนตเรียก Malachite (CuCO<sub>3</sub>.Cu(OH)<sub>2</sub>) มีปริมาณทองแดงร้อยละ 58

### สมบัติทางฟิสิกส์ของทองแดง

|                                          |                                                 |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| - น้ำหนักอะตอม (Atomic Weight)           | 63.57 amu                                       |
| - โครงสร้างของผลึก (Face Centered Cubic) | FCC                                             |
| - ความหนาแน่น (20° C)                    | 8.94 g/cm <sup>3</sup>                          |
| - อุณหภูมิหลอมเหลว                       | 1083° C                                         |
| - จุดเดือดกลายเป็นไอ (Boiling point)     | 2595° C                                         |
| - ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย             | 0.092 cal/g                                     |
| - สัมประสิทธิ์การขยายตัว                 | $16.47 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| - ความต้านทานจำเพาะ (30° C)              | 1.682 microhm.cm                                |

### สมบัติทางกล

|                                                 |                       |
|-------------------------------------------------|-----------------------|
| - ความแข็งแรง (Tensile Strength)                | 17 kg/mm <sup>2</sup> |
| - พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)             | 10 kg/mm <sup>2</sup> |
| - อัตราการยืดตัว (Percent Elongation)           | 35-50 %               |
| - ความแข็ง (Hardness)                           | 35-50 HB              |
| - โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) | 1706800 psi           |

## 2.4 สมบัติของการผสม

เมื่อโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมกันนั้น ย่อมที่จะทำให้สมบัติของโลหะผสมเหล่านั้นมีความแตกต่างไปจากโลหะเดิมที่อยู่ในสภาพบริสุทธิ์ สมบัติที่แตกต่างกันนั้นมีรายละเอียดดังนี้ (ชวลิต, 2553)

ถ้าโลหะ 2 ชนิดผสมกันในสภาวะของแข็งอย่างมีขีดจำกัดนั้น หมายถึงโลหะทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบซึ่งไม่ละลายซึ่งกันและกัน ดังนั้นสมบัติของการผสมจะเป็นไปในลักษณะผสมผสานระหว่างสมบัติโลหะบริสุทธิ์ทั้งสอง เช่น สมบัติในด้านความแข็ง ตัวนำไฟฟ้า และสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

- ถ้าการผสมนั้นเป็นชนิด สารละลายของแข็งความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นกว่าโลหะบริสุทธิ์แต่กลับทำให้การเป็นตัวนำไฟฟ้าลดลง

- ถ้าการผสมนั้นเป็นชนิด Intermetallic Compound ก็ไม่สามารถทำนายสมบัติใดๆ ได้เลย

### 2.4.1 โลหะผสม (Alloys Metals)

โลหะที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรมนั้น จำเป็นต้องมีสมบัติที่เหมาะสมกับงานในแต่ละด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติทางกล คือต้องมีความสามารถที่จะรับแรงต่างๆ ได้ แต่โดยปกติโลหะบริสุทธิ์ส่วนมากจะอ่อน และรับแรงต่างๆ ได้ไม่มาก เมื่อจะนำไปใช้งานก็ไม่เหมาะสม ฉะนั้นจำเป็นต้องเพิ่ม

ความแข็งแรงให้กับโลหะเหล่านั้น โดยผสมธาตุต่างๆ ลงไป แล้วเรียกโลหะใหม่นี้ว่า “โลหะผสม” (ชวลิต, 2553)

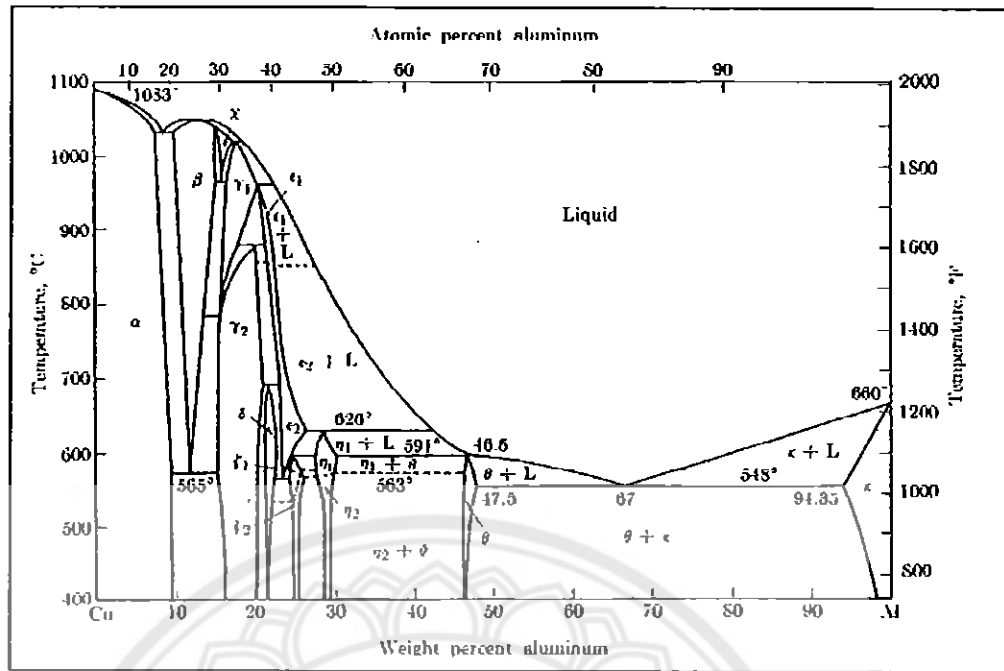
#### 2.4.2 โลหะอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมสามารถผสมกับโลหะได้หลายชนิด เช่น ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี ซิลิคอน และแมงกานีส โลหะที่ผสมกับอะลูมิเนียมเหล่านี้จะช่วยทำให้อะลูมิเนียมมีสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลงไปตามที่เรากำลังต้องการ เช่น อะลูมิเนียมผสมเกรด 4032 ประกอบด้วยทองแดงร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก แมกนีเซียมร้อยละ 1.1 ซิลิคอน 12.2 และนิกเกิลร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำอะลูมิเนียมชนิดนี้ไปผ่านกรรมวิธีทางร้อนจะให้ความแข็งแรงประมาณ 120 HB และความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ  $9,100 \text{ kg/cm}^2$  จะเห็นได้ว่าเมื่อผสมโลหะชนิดอื่นลงไปในอะลูมิเนียมจะทำให้อะลูมิเนียมผสมนั้นมีสมบัติทางกลสูงขึ้นมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เองจึงทำให้อะลูมิเนียมผสมถูกนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นอะลูมิเนียมผสมยังสามารถนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งจะส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมมีสมบัติทางกลดีขึ้นอีก (ชวลิต, 2553)

อนึ่ง เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมมากยิ่งขึ้นจึงได้นำรายละเอียดของอะลูมิเนียมผสมกับธาตุอื่นๆ มาเสนอต่อต่อไปนี้ ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียมผสมทองแดง ขอให้พิจารณารูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิสมดุล อะลูมิเนียม-ทองแดง จากรูปจะเห็นได้ว่าทองแดงสามารถละลายในอะลูมิเนียมได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 5.65 ที่อุณหภูมิยูเทกติกประมาณ 550 องศาเซลเซียส (1,018 องศาฟาเรนไฮต์) และการละลายของทองแดงจะลดปริมาณเหลือร้อยละ 0.25 เมื่อถึงอุณหภูมิห้อง จากแผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียมกับทองแดง ให้พิจารณาที่อัตราส่วนผสมของทองแดงร้อยละ 33 ถึงร้อยละ 52.5 ตำแหน่งเหนืออุณหภูมิยูเทกติกเล็กน้อยจะพบเฟสซีตา-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ ( $\theta\text{-CuAl}_2$ ) และเฟสของเหลว (L) จากจุดดังกล่าวถ้าปล่อยให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจะเกิดเฟสซีตาเฟสเดียว ซึ่งทำให้อะลูมิเนียมนี้มีความแข็งแรงสูง

#### 2.4.3 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงมีผลให้สามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม และมีผลให้สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไปทองแดง เมื่อละลายในอะลูมิเนียมจะให้อารละลายของแข็ง เฟส K โดยมีปริมาณทองแดงละลายได้สูงสุดร้อยละ 5.65 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 548 องศาเซลเซียส จะเหลือเพียงประมาณร้อยละ 0.5 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่มีปริมาณทองแดงร้อยละ 54 หรือร้อยละ 46 ของอะลูมิเนียมจะปรากฏอะลูมิเนียมรวมตัวกับทองแดงให้อารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ซึ่งจะมีสูตร  $\text{CuAl}_2$  หรือเรียกว่าเฟส (Brittle) ทองแดงยังสามารถรวมกับอะลูมิเนียมเป็นสารประกอบ  $\text{CuAl}_2$  โดยมีทองแดงร้อยละ 70 ดังปรากฏในแผนภูมิสมดุล อะลูมิเนียม-ทองแดง (แผนภูมิสมดุลที่แสดงจะเป็นทองแดง-อะลูมิเนียม ร้อยละของทองแดงในอะลูมิเนียมจะต้องไปหักออกจาก 100) (มนัส, 2543)



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียม-ทองแดง

ที่มา : Metals Hand Book (1948)

จากแผนภูมิสมดุลจะปรากฏจุดยูเทกติกที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส ส่วนผสมร้อยละ 33 ทองแดงปฏิกิริยายูเทกติกจะเป็นดังนี้ คือ โลหะหลอมเหลวอะลูมิเนียมทองแดงที่ร้อยละ 33 ทองแดงเมื่อเย็นตัวลงมาถึงอุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส จะแตกตัวให้เฟส K (ร้อยละ 5.65 ทองแดง) กับเฟส θ หรือ  $\text{CuAl}_2$  (ร้อยละ 52.75 ทองแดง)



โครงสร้างของยูเทกติกจะประกอบด้วยแถบบางๆ ระหว่างเฟส K และ θ สลับกัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์สูง แต่ความเหนียวน้อย (Brittle) ลักษณะคล้ายเพิลไลต์ (Pearlite) ในเหล็กคาร์บอน

โครงสร้างไฮโปยูเทกติก ในที่นี้จะแยกเป็นสองลักษณะ คือ ไฮโปยูเทกติกที่เกินร้อยละ 5 ทองแดง และที่ต่ำกว่าร้อยละ 5 ทองแดง

โครงสร้างไฮโปยูเทกติก ในที่ส่วนผสมเกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนักทองแดง ในสภาพการเย็นตัวที่เป็นอัตราการเย็นตัวสมดุล โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K เป็นโครงสร้างพื้นฐาน โดยมีลักษณะโครงสร้างยูเทกติก ( $K + \theta$ ) กระจุกกระจายอยู่ตามบริเวณขอบเกรน (Grain Boundary) ซึ่งมีผลทำให้ความเหนียวลดลง

สำหรับโครงสร้างไฮโปยูเทกติก ที่ส่วนผสมน้อยกว่าร้อยละ 5 ลักษณะโครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K เป็นโครงสร้างพื้นฐาน อาจะปรากฏการตกผลึกของเฟส θ อยู่บ้างตามบริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นผลมาจากการแยกตัวของอะตอมทองแดงมาจับตัวเป็น θ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 548 องศาเซลเซียส ลักษณะที่สำคัญของเฟส K กับเฟส θ มีผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะผสมอะลูมิเนียม

ทองแดงเป็นอย่างมากตามที่ทราบเฟส K เป็นเฟสที่มีความเหนียวสูง โดยที่เฟส 0 มีความแข็งแรงสูงแต่เปราะ ในกรณีเช่นนี้ถ้าเฟส 0 แม้จะมีอยู่เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าอยู่ในสภาพที่ต่อเนื่อง จะมีผลให้โลหะผสมขาดสมบัติความเหนียว ถ้าจะเปรียบก็จะเหมือนเอาเม็ดทรายผสมในซีเมนต์ ถ้าทราบใดที่ซีเมนต์ยังสามารถหุ้มเม็ดทรายได้หมดก็ยังคงรักษาความเป็นซีเมนต์ไว้ได้ แต่ถ้าซีเมนต์ไม่สามารถหุ้มเม็ดทรายอยู่ได้ก็จะขาดความเหนียวอย่างเห็นได้ชัด

ในกรณีที่โลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง มีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 เข้าใกล้ร้อยละ 33 เข้าไปเท่าไร โครงสร้างของโลหะผสมก็จะมีเฟส 0 เกิดขึ้นในปริมาณสูง ยิ่งถ้าเป็นโลหะผสมประเภทไฮเปอร์ยูเทกติก (มากกว่าร้อยละ 33 ทองแดง) ด้วยแล้วจะมีเฟส 0 เกิดขึ้นในปริมาณมากกว่าเฟส K โลหะผสมจะมีความเหนียว และความแข็งแรงน้อยมาก จนไม่มีคุณสมบัติประโยชน์ในการใช้งานด้านวิศวกรรม เมื่อพูดถึงลักษณะโครงสร้างไฮโปยูเทกติกที่ปรากฏเฟส 0 อยู่ในสภาพต่อเนื่องตามบริเวณของเกรน ซึ่งเป็นโครงสร้างของโลหะผสมที่ผ่านงานหล่อด้วยแบบทราย (Sand Casting) สามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยความเหนียวให้ดีขึ้นได้ด้วยการอบชุบความร้อน โดยการนำไปเอาที่อุณหภูมิ 544 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทิ้งไว้ประมาณ 48 ชั่วโมง ให้เฟส 0 สลายตัว คั้นอะตอมของทองแดงให้กลับไปเป็นสารละลายของแข็ง K หรือไม่ก็อาจจะปรับตัวให้เป็นเม็ดกลมกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปขาดความต่อเนื่อง จากนั้นนำไปทำให้เย็นโดยรวดเร็ว โดยการชุบน้ำไม่เปิดโอกาสให้เกิดเฟส 0 ได้ทัน จะได้เฟส K เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่หุ้มเฟส 0 ไว้ได้เป็นส่วนใหญ่ โลหะผสมที่ผ่านการอบชุบความร้อนดังกล่าวนี้จะมีทั้งความแข็งแรง และความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ดี

หมายเหตุ

- ไฮโปยูเทกติก หมายถึง โลหะผสมที่มีธาตุต่ำกว่าส่วนผสมที่จุดยูเทกติก
- ไฮเปอร์ยูเทกติก หมายถึง โลหะผสมที่มีปริมาณธาตุผสมสูงกว่าส่วนผสมที่จุดยูเทกติก

## 2.5 การหล่อ

การหล่อเป็นวิธีการเทโลหะเหลวลงในช่องว่างของแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ เมื่อแข็งตัวแล้วโลหะจะมีรูปร่างตามแบบแต่อาจเกิดการหดตัวบ้าง วิธีการหล่อมักใช้เมื่อ

- ผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่ หรือใช้วิธีการขึ้นรูปอื่นได้ยาก
- โลหะที่จะขึ้นรูปมีความเหนียวน้อยเกินไปที่จะขึ้นรูปด้วยการขึ้นรูปด้วยการขึ้นร้อน หรือเย็น
- เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปวิธีอื่นแล้วพบว่าวิธีการหล่อเป็นวิธีที่ค่าใช้จ่ายต่ำสุดขั้นตอนสุดท้าย

ในการทำโลหะบริสุทธิ์ก็อาจเกี่ยวข้องกับการหล่อ เทคนิคการหล่อก็มีหลายวิธี คือการหล่อด้วยแบบหล่อทราย หล่อด้วยแบบหล่อถาวร การหล่อใช้ความดันสูง การหล่อแบบอินเวสเมนต์ และการหล่อแบบต่อเนื่อง ต่อจากนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการหล่อ โดยใช้แบบถาวร (มณัส, 2543)

### 2.5.1 การหล่อด้วยแบบหล่อโลหะ (Permanent Mold)

การหล่อแบบเหน้าโลหะ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity Pouring) โลหะที่ใช้เป็นแบบหล่อ ส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กหล่อ ซึ่งมีทั้งเหล็กสีเทา และเหล็กหล่อเหนียว (Ductile หรือ Spheroidal Graphite Cast Iron) ซึ่งเป็นเหล็กที่มีสมบัติทางด้านทานการแตกร้าวซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Thermal Shock) บางกรณีอาจใช้เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสม หรือโลหะผสมทองแดงขึ้นอยู่ขึ้นกับสมบัติพิเศษที่ต้องการ ดังเช่นการซ่อมแซมหล่อด้วยการเชื่อมได้ จะใช้เหล็กกล้า เพื่อยืดอายุของแบบหล่อ จะใช้โลหะผสมทองแดงในกรณีต้องการความเป็นตัวนำความร้อนที่ดี เพื่อการเย็นตัวในอัตราสูงของงานหล่อ จะใช้โลหะผสมทองแดงในกรณีต้องการความเป็นตัวนำความร้อนที่ดี เพื่อการเย็นตัวในอัตราสูงของงานหล่อ นอกจากโลหะดังกล่าวแล้วบางกรณีอาจใช้แกรไฟต์ หรือคาร์บอนทำแบบหล่อ เพื่อความสะดวกในการตบแต่ง (มนัส, 2543)

ในการออกแบบระบบของแบบหล่อ คงมีลักษณะเหมือนกับแบบหล่อทั่วไป คือตัวแบบหล่อจะต้องมีสองส่วน โดยทำให้เกิดช่องว่างที่เป็นระบบรูเท (Sprue) ทางวิ่ง (Gates และ Runner) รูลัน (Riser) รูระบายแก๊ส (Vent) และช่องว่างที่เป็นตัวแบบ (Mould Cavity) นำแบบหล่อทั้งสองส่วนมาประกบกันยึดติดด้วยอุปกรณ์ช่วยยึดให้แน่น อาจจะต้องติดตั้งที่ตั่งให้แน่นนอนมีอุปกรณ์ช่วยยึดแบบให้แน่น และมีระบบแยกส่วนของแบบหล่อ ภายหลังการเทโลหะหลอมเหลวลงแบบหล่อแล้ว เพื่อความสะดวกในการทำงานให้เกิดความรวดเร็ว และแน่นอนมีประสิทธิภาพ ลักษณะของแบบหล่อพร้อมอุปกรณ์ติดตั้งบนแท่นพร้อมที่จะเทโลหะหลอมเหลว

### 2.5.2 งานหล่อโลหะอะลูมิเนียม (Aluminum Casting Technology)

โลหะผสมอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะผสมที่มีสมบัติทางด้านหล่อหลอมดีชนิดหนึ่ง เพราะมีจุดหลอมเหลวต่ำ และมีความสามารถในการไหลเข้าแบบหล่อดีทำให้สามารถหล่อเป็นรูปร่างได้สะดวกแม้จะมีรูปร่างซับซ้อน ชิ้นงานหล่อมีความหนาไม่มากก็ตามการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียมจึงสามารถใช้เทคนิคการหล่อหลอมได้หลายวิธี ดังเช่นการใช้วิธีหล่อด้วยแบบทราย (Sand Mold) หล่อด้วยแบบหล่อที่เป็นโลหะใช้แรงอัดฉีดโลหะเข้าแบบหล่อ (Pressure Die Casting) หล่อด้วยแบบหล่อที่เป็นพลาสติก (Plaster mold) หรือหล่อแบบอินเวสต์เมนต์ (Investment Casting) และวิธีอื่นๆ (มนัส, 2543)

### 2.5.3 เทคนิคการหลอมโลหะอะลูมิเนียม

สมบัติของโลหะที่เหมาะสมสำหรับการหล่อหลอม (Casting Metal) ควรจะมีสมบัติที่สำคัญหลายประการ ดังนี้ คือ

- ควรจะมีสมบัติไหลง่าย (Good Fluidity) สามารถไหลผ่านทางช่องแคบๆ หรือไหลไปตามช่องทางของแบบที่สลับซับซ้อนได้ง่าย
- มีจุดหลอมตัวต่ำสะดวกในการหล่อหลอม (Low Melting Point)

- ไม่ยอมให้แก๊สใดๆ ละลายได้ง่ายในขณะหลอมเหลว (Low Gas Solubility)
- ไม่แตกเปราะง่ายในขณะแข็งตัว (Not Hot Shortness)
- สามารถผสมธาตุต่างๆ เข้าได้ง่าย และกระจายตัวสม่ำเสมอ (Good Chemical Reproducibility)
- ให้ผิวงานหล่อที่เรียบไม่ติดทรายแบบ หรือสเกล (Good cast Surface Finish)

เราจะไม่พบโลหะชนิดใดที่จะให้สมบัติทางด้านหล่อหลอมครบถ้วนตามที่กล่าวมานี้เลย ยกเว้นโลหะอะลูมิเนียมที่ให้สมบัติที่เข้าใกล้มากที่สุด จะเห็นได้ว่าโลหะอะลูมิเนียมมีจุดหลอมตัวต่ำประมาณ 690 องศาเซลเซียส ถึง 730 องศาเซลเซียส มีช่องการแข็งตัวยาว และไหลได้ง่ายทำให้ปัญหาทางด้านวัสดุทำแบบหล่อ (Molding Material) หดไปปัญหาที่สำคัญ และจัดเป็นเรื่องที่ต้องระมัดระวังในการหล่อหลอมอะลูมิเนียมก็คือสมบัติเปราะแตกง่ายในช่วงการเกิดการแข็งตัว และอีกประการหนึ่ง คืออะลูมิเนียมยอมให้แก๊สโดยเฉพาะไฮโดรเจนละลายได้ดีมากในสภาพหลอมเหลว และปริมาณของแก๊สจะลดลงเมื่ออะลูมิเนียมแข็งตัว นอกจากนี้อะลูมิเนียมรวมตัวกับออกซิเจนและกลายเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ได้ง่าย และมีความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับโลหะอะลูมิเนียมทำให้การแยกตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นไปได้อย่างอันจะมีผลทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์สามารถไหลปะปนกับโลหะอะลูมิเนียมเข้าแบบหล่อทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่มีคุณภาพต่ำ ประการสุดท้ายที่จัดว่าสำคัญไม่น้อยก็ คือ เรื่องการหดตัวในสภาวะของแข็งค่อนข้างสูง (ร้อยละ 3.5-8.5) ทำให้ควบคุมขนาดการหล่อได้ยาก ทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นสิ่งที่ต้องแก้ไขขณะทำการหล่อหลอม เพื่อให้ได้งานหล่อที่มีคุณภาพดีตามมาตรฐาน (มนัส, 2543)

## 2.6 การออกแบบโมลด์ (Mold Design)

เนื่องจากการเย็นตัวของโลหะภายในแบบอยู่ในเกณฑ์สูง การออกแบบจำเป็นจะต้องวางระบบทางวิ่งของโลหะให้มีการไหลวน (Turbulence) น้อยที่สุด เพื่อป้องกันการดูดอากาศของโลหะในขณะไหลเข้าสู่แบบหล่อ การควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Gradient) ของโลหะภายหลังเมื่อไหลเข้าไปเต็มแบบหล่อแล้วมีความสำคัญเช่นกัน ทั้งนี้ เพื่อให้การแข็งตัวของโลหะจะเริ่มจากส่วนที่บางที่สุดไปยังส่วนที่หนา และต่อไปยังตำแหน่งของไรเซอร์ เป็นไปในลักษณะมีทิศทาง (Directional Solidification) โดยหลักทางด้านปฏิบัติแล้วส่วนที่หนา หรือส่วนที่มีปริมาณมากที่สุดจะต้องอยู่ติดกับไรเซอร์ เพื่อให้โลหะในไรเซอร์สามารถไหลไปชดเชยส่วนที่มีการหดมากที่สุดของงานหล่อ เพื่อให้ได้ชิ้นงานหล่อมีเนื้อแน่น (Sound Casting) ปราศจากรู หรือโพรงหดตัว (Shrinkage Cavity) ทั้งรูเท, ทางวิ่ง, และไรเซอร์จะต้องออกแบบให้อยู่ในแนวเดียวกันบนรอยแยก (Parting Surface) ของแบบหล่อ เพื่อให้สามารถแกะออกจากแบบได้พร้อมกันกับชิ้นงานหล่อ เนื่องจากลักษณะของแบบหล่อที่เป็นโลหะมีลักษณะเฉพาะตัว (Rigid) การหดตัวของโลหะภายในแบบหล่อถ้ามีส่วนของแบบหล่อไปขวางการหดตัวจะทำให้โลหะขณะหดตัวเกิดความเครียด (Stress) ขึ้นตามบริเวณต่างๆ อันจะทำให้เกิดการแตกร้าว จึงต้องระมัดระวังในการออกแบบ สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ เรื่องของการระบาย

ไอออกจากแบบหล่อต้องวางระบบให้อากาศมีทางหนีออกได้สะดวก เพราะถ้าอากาศออกไม่ได้จะเกิด ความดันขึ้น และด้านการไหลเข้าแบบหล่อของโลหะ หรืออาจจะรวมตัวกับโลหะขณะยังหลอมเหลว ทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่มีฟองอากาศ (มนัส, 2543)

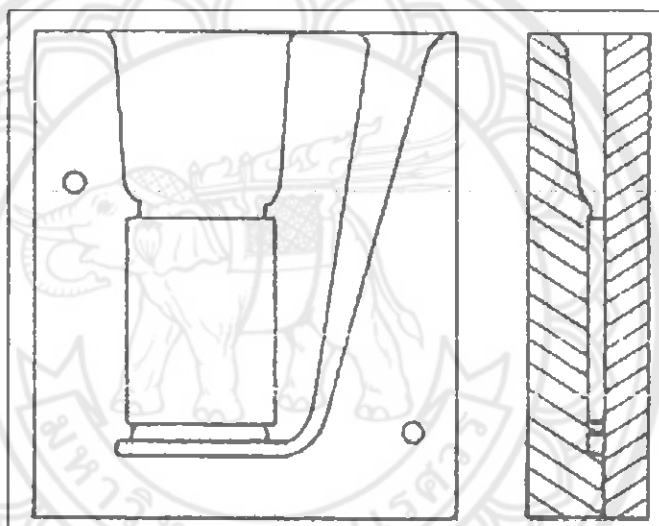
จากภาพที่แสดงต่อไปนี้ จะเป็นลักษณะของการออกแบบงานหล่อที่ใช้แบบหล่อเป็นโลหะซึ่งมี ระบบทางวิ่ง (Gates System) อยู่สามลักษณะ คือ

2.6.1 ระบบ Bottom Gate ทางเข้าโพรงแบบจะอยู่ข้างล่าง

2.6.2 ระบบ Side Gates ทางเข้าโพรงแบบอยู่ด้านข้าง

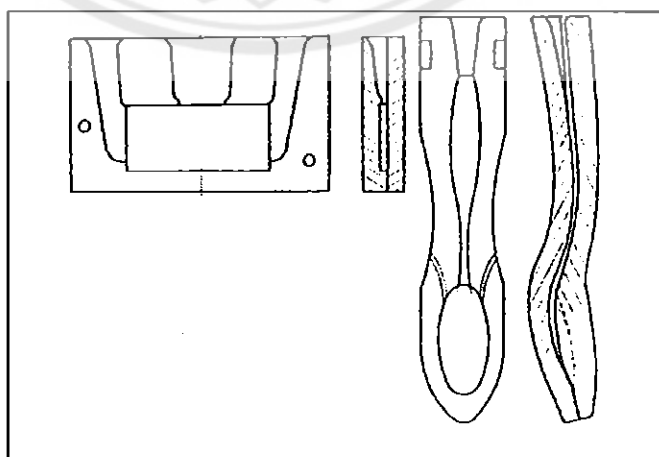
2.6.3 ระบบ Top Gate ทางเข้าโพรงแบบอยู่ด้านบน

แต่ละระบบที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่จะเหมาะสมกับลักษณะของงานหล่อแต่ละแบบ และ ลักษณะสมบัติของโลหะที่จะหล่อแต่ละชนิด



รูปที่ 2.2 Bottom Gate

ที่มา : มนัส (2543)



รูปที่ 2.3 Side Gate

ที่มา : มนัส (2543)

## 2.7 การแข็งตัวของโลหะ

การแข็งตัว (Solidification) ของโลหะ หรือการแข็งตัวของโลหะผสมมี 2 ขั้นตอน คือนิวคลีเอชัน (Nucleation) เป็นขั้นตอนการเกิด นิวคลีไอ (Nuclei) ที่อยู่ในมวลโลหะที่หลอมเหลว

การเติบโตของนิวคลีไอ โดย นิวคลีไอในโลหะเหลวจะโตขึ้นจนเป็นผลึก และผลึกเหล่านี้จะต่อกันเป็นโครงสร้างของเกรน (Grains) เรียกบริเวณที่เกรนสัมผัสกันว่าขอบเกรน (Grain Boundaries) นิวคลีเอชันในโลหะที่หลอมเหลว (ขวลิต, 2542)

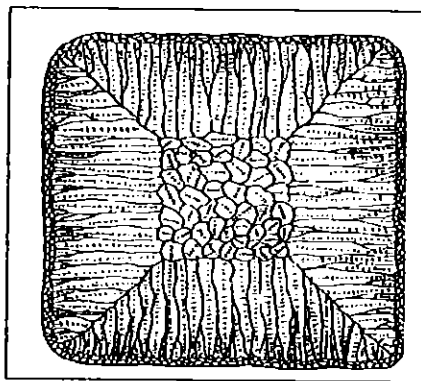
การเกิดนิวคลีไอในโลหะเหลว มี 2 ลักษณะดังนี้

โฮโมจีเนียส นิวคลีเอชัน (Homogeneous Nucleation) อะตอมโลหะที่หลอมเหลวจะเกาะกันเป็นอนุภาคเล็กๆ ที่เรียกว่า นิวคลีไอ และโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคมีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤติ (Critical Size) และกลายเป็นนิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งจะเสถียร และเป็นผลึกต่อไปอย่างไรก็ตาม หากอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤตินั้นเล็กลง เรียกว่า เอ็มบริโอ (Embryo) อาจหลอมลงไปกลายเป็นโลหะเหลวใหม่ได้ นิวคลีไอ ก็อาจหลอมกลับไปเป็นของเหลวใหม่ได้ เช่นเดียวกัน โฮโมจีเนียส นิวคลีเอชัน จะเกิดขึ้นในการแข็งตัวของโลหะเดี่ยวบริสุทธิ์ ไม่มีสิ่งเจือปน

เฮเทอโรจีเนียส นิวคลีเอชัน (Heterogeneous Nucleation) จะเกิดขึ้นในกระบวนการหล่อโลหะในอุตสาหกรรม ซึ่งมีการผสมสารที่ทำให้เกรนละเอียด (Grain Refiner) ตามที่ต้องการ หรือมีสิ่งเจือปนอื่นๆ หรือการเกิดนิวคลีไอ บริเวณผิวของแบบหล่อซึ่งเย็นเร็วกว่าบริเวณอื่นเป็นต้น

### 2.7.1 โครงสร้างจากการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ

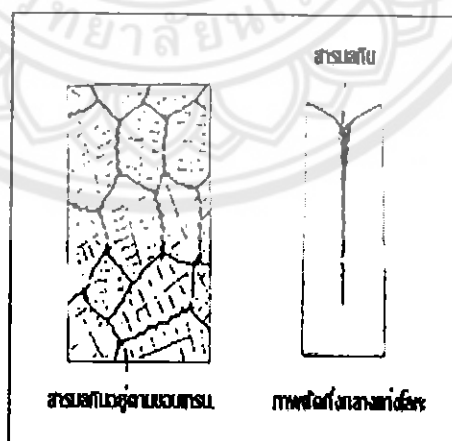
น้ำโลหะจากเตาหลอมเมื่อถูกเทลงสู่แบบหล่อ การแข็งตัวของน้ำโลหะก็จะเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานหล่อนั้นจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแบบหล่อ และเมื่อความร้อนจากน้ำโลหะถูกส่งถ่ายไปยังแบบหล่อน้ำโลหะที่ส่วนนั้นจะเย็นตัวลงจนถึงจุดแข็งตัว และเกิดผลึก (Chill Crystal) ซึ่งผลึกเหล่านั้นจะมีจำนวนมาก และในขณะเดียวกันบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วยแต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าภายนอก ดังนั้น ผลึกจะขยายตัวจากจุดเริ่มต้นการเย็นตัวบริเวณภายนอกเข้าสู่ภายในของแบบหล่อ จึงทำให้ผลึกมีลักษณะเรียวยาว (Columnar) เมื่อพิจารณารูปที่ 2.4 จะเห็นโครงสร้างเรียวยาวนี้อย่างชัดเจนทั้งนี้เพราะว่ามีความแตกต่างกันมากระหว่างอุณหภูมิภายในกับภายนอกชิ้นงานหล่อ (ขวลิต, 2542)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิดผลึกของงานหล่อ

ที่มา : วิหาร (2548)

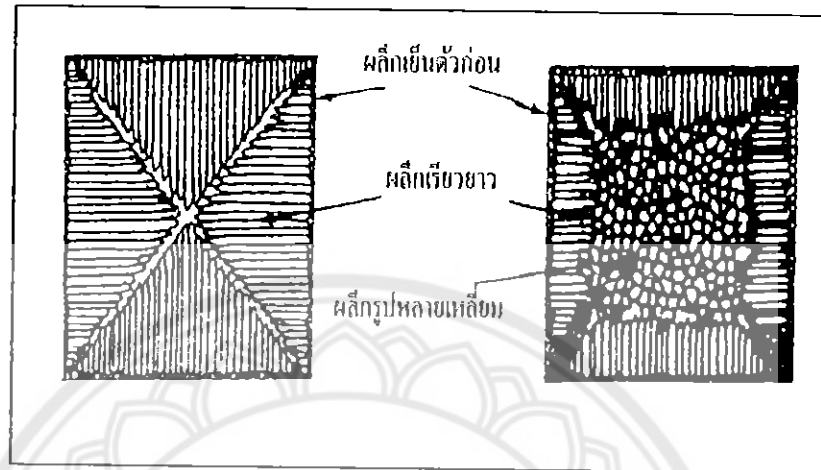
อีกประการหนึ่งก็คือ ในขณะหลอมละลายโลหะในเตาหล่อนั้นย่อมมีสารมลทินเกิดขึ้น และสารมลทินเหล่านั้นจะรวมอยู่กับน้ำโลหะในขณะที่เทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อ และเมื่อน้ำโลหะเกิดการเย็นตัวสารมลทินก็จะแยกตัวออกมา โดยสารมลทินเหล่านั้นอาจจะรวมตัวกัน โดยสารมลทินเหล่านั้นอาจจะรวมกันอยู่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานหล่อ (Major Segregation) แต่ถ้าสารมลทินบางส่วนถูกผลักดันโดยเกรนที่กำลังเติบโตให้ออกไปอยู่บริเวณขอบเกรนทั้งนี้ก็เพราะว่าเกรนทุกเกรนต่างก็เติบโต และผลักดันสารมลทินออกไปสู่ขอบเกรนทั้งสิ้นเราเรียกการรวมตัวของสารมลทินที่บริเวณนี้ว่า Minor Segregation แต่ยังมีมลทินบางชนิดสามารถแทรกตัวกระจายอยู่ภายในเกรนของโลหะ โดยจะอยู่ในรูปของสารประกอบของแมงกานีสซัลไฟด์ ( $MnS$ ) ซิลิกา ( $SiO_2$ ) และอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ซึ่งสารประกอบทั้งสามชนิดนี้จะพบในโครงสร้างของเหล็กกล้า



รูปที่ 2.5 ลักษณะการแยกตัวของสารมลทินอยู่ตามขอบเกรนและกึ่งกลางของแท่งโลหะ

ที่มา : ขวลิขิต (2542)

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า การแข็งตัวของชิ้นงานหล่อจะเริ่มตันที่ผิวนอกไปจนถึงกึ่งกลางของชิ้นงานเวลาทั้งหมดในระหว่างการแข็งตัวจากผิวนอกถึงกึ่งกลางนั้น จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับปริมาตรของน้ำโลหะกับพื้นที่ผิวสัมผัสของน้ำโลหะ



รูปที่ 2.6 รูปตัดการเกิดผลึกในลักษณะต่างๆ ของโลหะหล่อ

ที่มา : ขวลิขิต (2542)

จากสิ่งที่ได้กล่าวมาแล้ว อาจสรุปลักษณะสำคัญบางอย่างในการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อดังต่อไปนี้

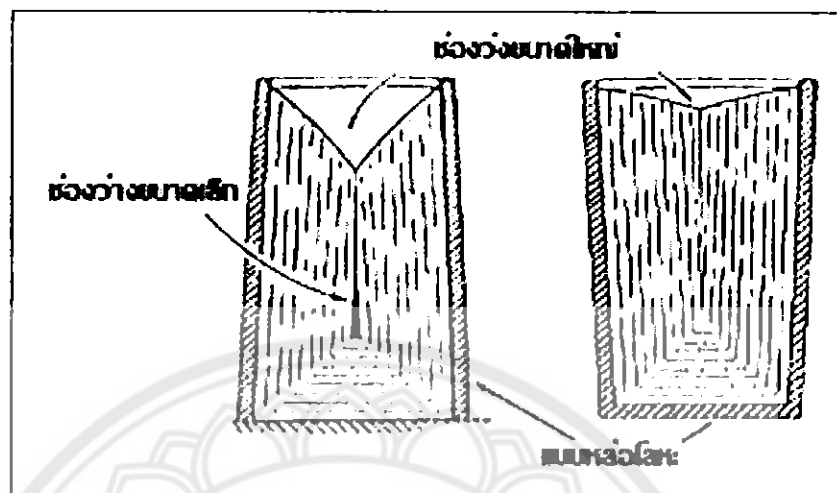
2.7.1.1 ผลึกลักษณะเรียวยาว จะปรากฏอย่างชัดเจนในชิ้นงานหล่อก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิภายนอก และภายในชิ้นงานหล่อลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นกับงานหล่อที่ผ่านการหล่อโดยใช้แบบหล่อทำจากโลหะ หรืองานหล่อที่หลอมละลายโลหะที่อุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิเทมากเกินไป ดังรูปที่ 2.6

2.7.1.2 ผลึกลักษณะเรียวยาว จะปรากฏไม่ชัดเจน คือเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากมีความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิภายนอก และภายในชิ้นงานไม่มากนักลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นกับงานหล่อที่ผ่านการหล่อโดยใช้แบบหล่อทำจากทราย

อนึ่ง บริเวณของตรงกลางชิ้นงานหล่อจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่มาก และจะเกิดเป็นผลึกเล็กๆ รูปหลายเหลี่ยม (Fine-Axed Grains) ที่เติบโตได้หลายทิศทางจนทำให้ผลึกลักษณะเรียวยาวที่เกิดขึ้นภายนอกไม่สามารถขยายตัวต่อไปได้ ดังรูปที่ 2.6

นอกจากลักษณะโครงสร้างของผลึกที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีโครงสร้างของผลึกในลักษณะอื่นๆ อีก เช่น โครงสร้างของผลึกที่มีฟองอากาศเกิดจากการเปลี่ยนสถานะน้ำโลหะ ทั้งนี้ก็เพราะว่าขณะที่น้ำโลหะที่มีความร้อนสูงสัมผัสกับแบบหล่อจะมีแก๊สเกิดขึ้น และแก๊สเหล่านั้น ส่วนแก๊สที่เหลืออยู่จะแทรกตัวอยู่กับโครงสร้างของผลึก ตัวอย่างเช่น เหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ เมื่อมีแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นแก๊สนี้อาจจะรวมตัวกันกับเหล็กได้เหล็กออกไซด์ และถ้ารวมกันกับคาร์บอนก็จะได้

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีสถานะเป็นแก๊สที่ตกค้างอยู่ในน้ำโลหะจนทำให้เกิดเป็นโพรง (Blow-Holes) ในโครงสร้างของผลึก



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดโพรงอากาศอันเนื่องมาจากการหดตัวของน้ำโลหะ  
ที่มา : ขวลิขิต (2542)

อนึ่ง โพรงอากาศนอกจากจะเกิดจากการแทรกตัวของแก๊สในน้ำโลหะแล้ว ยังอาจเกิดโพรงอากาศได้จากการหดตัวของน้ำโลหะอีกด้วยทั้งนี้ก็เพราะว่าการหดตัว (Shrinkage) ของน้ำ โลหะ ในขณะที่น้ำโลหะเริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะทำให้เกิดช่องว่างซึ่งมีทั้งขนาดใหญ่คล้ายท่อ (Pipe) หรือมีขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า Secondary Pipe

## 2.7.2 การแข็งตัวของโลหะผสม (Solidification of Alloy)

โลหะผสมหมายถึง ขณะที่ทำการหลอมโลหะชนิดหนึ่งแล้วมีการผสมเติมธาตุซึ่งอาจจะเป็นโลหะลงในน้ำโลหะที่กำลังหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะนั้นการเติมสารผสมเติมธาตุหรือโลหะจะนิยมกำหนดสัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก เพื่อให้โลหะผสมที่ได้มีอัตราส่วนผสมเป็นร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก เช่น ทองเหลืองร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก Zn ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก Cu จะหมายถึงเมื่อเทียบให้น้ำหนักทองเหลืองทั้งหมดเป็นร้อยละ 100 ในเนื้อโลหะผสมดังกล่าวจะมีน้ำหนักของทองแดงร้อยละ 60 และน้ำหนักสังกะสีร้อยละ 40 การผสมเติมในระหว่างที่โลหะชนิดหนึ่งกำลังหลอมละลายธาตุ หรือโลหะที่ถูกผสมเติมลงไปจะเรียกว่า ธาตุผสมเติม (Alloying Elements) (วิหาร, 2548)

โลหะผสมดังกล่าวอาจจะเป็นโลหะผสมสองธาตุ หรือมากกว่านั้นก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่ข้อกำหนดมาตรฐานโลหะที่ทำการตกลงให้เป็นไปตามมาตรฐานที่ต้องการจะใช้งานโลหะผสมนั้นๆ ธาตุที่ถูกผสมเติมลงไปอาจจะหลอมละลาย หรือละลายทั้งนี้แล้วแต่พฤติกรรมธรรมชาติของแต่ละธาตุ

2.7.2.1 การแข็งตัวของน้ำโลหะผสมจะเกิดขึ้น โดยมีช่วงห่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัวระยะหนึ่ง เรียกอุณหภูมิเริ่มต้นแข็งตัวว่า Liquidus และอุณหภูมิสิ้นสุดการแข็งตัวว่า Solidus แต่โลหะบริสุทธิ์จะแข็งตัวที่อุณหภูมิคงที่อุณหภูมิเดียว

2.7.2.2 ในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะผสมจะเกิดความต่างส่วนผสมทางเคมี (Composition Gradient) ของมวลโลหะที่แข็งตัวแยกออกจากน้ำโลหะก่อน และหลังในช่วงระยะเวลา ต่างกันนอกจากมวลโลหะแข็งจะมีความต่างส่วนผสมทางเคมีแล้ว น้ำโลหะในส่วนที่สัมผัสกับมวลโลหะแข็ง และน้ำโลหะส่วนที่อยู่ห่างไกลจะมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันด้วย

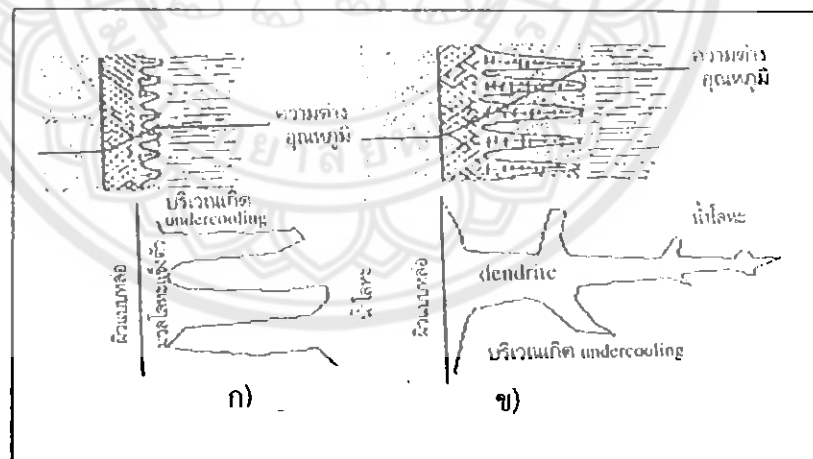
2.7.2.3 โลหะที่เกิดจากการแข็งตัวของน้ำโลหะอาจจะมี องค์ประกอบของเนื้อโลหะ (Phases) เพียงชนิดเดียว หรือหลายชนิดที่แตกต่างกันได้หลายองค์ประกอบเนื้อโลหะจะมีผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับพฤติกรรมธรรมชาติของโลหะกับธาตุต่างๆ ที่ผสมเติมลงในน้ำโลหะนั้น

2.7.2.4 การแข็งตัวของโลหะผสมชนิดสารละลายของแข็ง (Solid Solution Alloys) โลหะผสมชนิดสารละลายของแข็ง หมายถึง โลหะผสมชนิดที่โลหะต่างชนิดเมื่อนำมาหลอมผสมรวมกันจะสามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งสภาวะที่เป็นของเหลว และของแข็ง เช่น โลหะผสมทองแดง-นิกเกิล

2.7.2.5 การที่โลหะสองชนิดจะละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะของแข็งได้นั้น ขนาดรัศมีอะตอมของโลหะ และธาตุที่ผสมเติมจะต้องมีขนาดรัศมีอะตอมที่ใกล้เคียงกันเช่น เมื่อผสมเติมโลหะ (ธาตุ) B ลงในน้ำโลหะ A ที่กำลังหลอมละลายโลหะ (ธาตุ) B อาจจะหลอมละลาย หรือละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำโลหะ A ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับระดับอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะ B เช่น ทองแดง และสังกะสี มีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 1085 องศาเซลเซียส และ 419.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับถ้าสมมติให้โลหะ B มีระดับอุณหภูมิหลอมละลายสูงกว่าโลหะ A เมื่อใส่โลหะ B ลงไปในน้ำโลหะ A ที่กำลังหลอมละลายอยู่ในขณะนั้น โลหะ B จะไม่เกิดการหลอมละลายแต่ความร้อนจากน้ำโลหะจะทำให้ระดับอุณหภูมิของ แท่งโลหะ B สูงขึ้นเรื่อยๆ ถ้าปริมาณการผสมโลหะ B มีปริมาณเพียงเล็กน้อย ปริมาณความร้อน จากน้ำโลหะ A อาจจะมากพอที่ทำให้ก้อนโลหะ B ร้อนมากจนมีระดับอุณหภูมิใกล้หลอมละลาย ความร้อนที่สะสมที่ผิวหน้าของแท่งโลหะ B จะทำให้อะตอมของโลหะ B แยกตัวไปละลายปะปนในน้ำโลหะ A ที่ละน้อยๆ จนแท่งโลหะ B ลดขนาดเล็กลง และละลายหมดไปในที่สุด แต่จะต้องใช้ระยะเวลายาวนานค่อนข้างมาก

2.7.2.6 ในความเป็นจริงสิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นในธรรมชาติของการแข็งตัวของน้ำโลหะที่เป็นโลหะผสม คือ ก่อนที่โลหะแข็งจะแยกออกจากน้ำโลหะ และแขวนลอยปะปนกับน้ำโลหะนั้น จะมีอัตราส่วนผสมทาง เคมีที่แตกต่างกันเป็นชั้นหุ้มพอกกันตามลำดับการแข็งตัว จะพบว่าขณะที่โลหะทั้งสองชนิดหลอมละลายน้ำโลหะผสม ที่ได้จะมีสภาวะเป็นสารละลายของเหลว โดยทุกส่วนของปริมาตรน้ำโลหะจะมีสัดส่วน ปริมาณ ของอะตอมโลหะ B กระจายอย่างสม่ำเสมอในปริมาณเฉลี่ยร้อยละ  $C_0$  ถ้าอัตราการลดอุณหภูมิของน้ำโลหะจากระดับที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายลงผ่านอุณหภูมิแข็งตัวของโลหะในอัตราการลดอุณหภูมิสมดุลธรรมชาติแล้ว (ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิเข้าใกล้ 0

องศาเซลเซียสต่อวินาที) ก้อนโลหะที่แข็งตัวแยกออกจากน้ำโลหะจะมีปริมาณของอะตอมโลหะ B แทรกในระบบผลึกของอะตอมโลหะ A ในสภาวะที่เป็นสารละลายของแข็งด้วยปริมาณร้อยละ  $C_0$  B พฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ เมื่ออุณหภูมิค่อยๆ ลดลงน้ำโลหะจะเกิดภาวะ Under Cooling ที่จุด a บนเส้น Liquidus อะตอมโลหะ A จะแยกโลหะ A จะแยกตัวออกจากน้ำโลหะ และจับตัวเป็นผลึก หลายๆ ผลึกจับตัวเป็นนิวเคลียสเริ่มต้นการแข็งตัว อะตอมโลหะ A จะแยกตัวออกมาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิที่ลดลงถ้าอัตราการลดอุณหภูมิมีอัตราการแพร่ที่ช้ามากๆ แล้ว อะตอมของโลหะ B จะสามารถแพร่เข้าสู่ระบบผลึกของโลหะ A ในมวลโลหะที่แข็งตัวแยกออกจากน้ำโลหะได้ กระบวนการนี้จะดำเนินเรื่อยไปจนระดับอุณหภูมิลดลงถึงจุด b บนเส้น Solidus ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของการแข็งตัวของน้ำโลหะ ผสมชนิดส่วนผสมนี้โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์จะมีลักษณะที่เดียวกัน โดยเนื้อโลหะทุกๆ เกรนจะมีความสม่ำเสมอของอัตราส่วนผสมระหว่างโลหะ A และ B แต่ในสภาพความเป็นจริงอัตราการแข็งตัว และอัตราการลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในโพรงแบบหล่อจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก โดยอัตราการลดอุณหภูมิจะมีโอกาสเข้าใกล้ 0 องศาเซลเซียสต่อวินาที ได้น้อยมากการลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้การแพร่ของอะตอมโลหะ B เข้าสู่ระบบผลึกของอะตอมโลหะ A ถูกหน่วง หรือช้าลง หรือไม่เกิดการแพร่เลยก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่อัตราการลดอุณหภูมิว่าลดลงแบบรวดเร็ว หรือแบบเฉียบพลันจากสภาวะหลอมละลายผ่านอุณหภูมิ Solidus การหน่วง หรือการหยุดแพร่ของอะตอมของโลหะ B จากน้ำโลหะเข้าสู่ระบบผลึกของมวลโลหะแข็งจะมีผลทำให้ปริมาณความเข้มข้นของอะตอมโลหะ B ในแต่ละตำแหน่งไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดเดนไดรต์

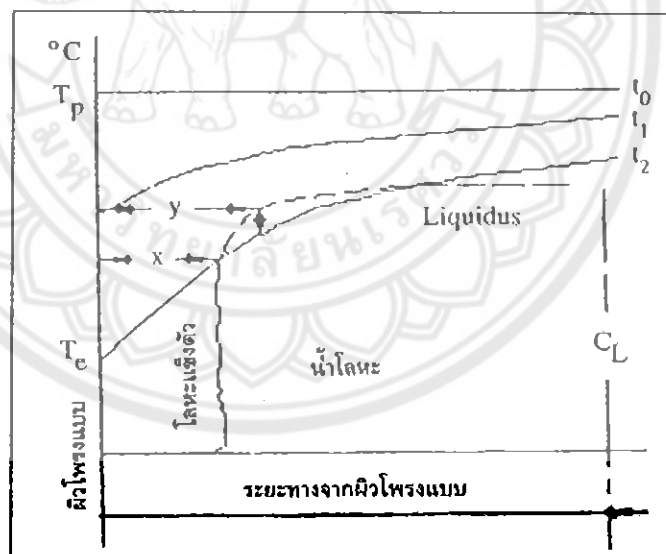
ก) Degree of Undercooling ต่ำ

ข) Degree of Undercooling มาก

ที่มา : เจนณรงค์ (2547)

2.7.2.7 สมมุติว่าทำการหลอมโลหะผสมโดยโลหะผสมชนิดนี้มีอุณหภูมิแข็งตัวที่  $T_e$  ถ้าการเทน้ำโลหะสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วมากจนน้ำโลหะเต็มแบบหล่อด้วยเวลา  $t_0 = 0$  วินาที เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในการพิจารณาโลหะบริสุทธิ์ผิวโพรงแบบหล่อจะยังคงภาวะที่มีอุณหภูมิห้อง และน้ำโลหะยังคงภาวะที่มีอุณหภูมิเทที่ระดับอุณหภูมิจะสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายมากเมื่อพิจารณาพฤติกรรมการณ์แข็งตัวของโลหะผสมดังกล่าวไปพร้อมๆ กับการเกิด Undercooling ในน้ำโลหะ และการเกิดความแตกต่างอุณหภูมิในวัสดุแบบหล่อ ที่เวลา  $t_0$  จะเป็นเวลาก่อนที่จะเกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะ เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนแปลงเป็น  $t_1$  จะเกิดความแตกต่างอุณหภูมิขึ้นในวัสดุ

2.7.2.8 แบบหล่อที่เกิดความร้อนจากการรับความร้อนจากน้ำโลหะ ในน้ำโลหะจะเกิดภาวะ Undercooling และเริ่มมีก้อนโลหะแข็งแยกตัวออกจากน้ำโลหะในขณะเดียวกันจะเกิดความต่างอุณหภูมิในน้ำโลหะ โดยที่อุณหภูมิน้ำโลหะที่ผิวสัมผัสโพรงแบบจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำโลหะที่อยู่ส่วนที่ถัดลึกเข้าสู่ใจกลางของมวลน้ำโลหะผสมจะแตกต่างไปจากที่เกิดขึ้นในโลหะบริสุทธิ์แต่การแข็งตัวของโลหะผสมจะแตกต่างไปจากที่เกิดขึ้นในโลหะบริสุทธิ์โดยอุณหภูมิ Liquidus ที่เป็นอุณหภูมิเริ่มตัวการแข็งตัวของน้ำโลหะส่วนที่เหลือจะเปลี่ยนตามระยะทางที่ถัดลึกจากผิวโพรงแบบหลอมมากขึ้นดัง เส้นประใน รูปที่ 2.9 ในบริเวณผิวสัมผัสมวลโลหะแข็งน้ำโลหะซึ่งจะเรียกว่า Solidification Front



รูปที่ 2.9 อุณหภูมิน้ำโลหะในโพรงแบบหล่อ  
ที่มา : วิหาร (2548)

จะมีปริมาณอะตอมของโลหะ B มากที่สุดเสมอในขณะที่การแข็งตัวของน้ำโลหะรุกคืบเข้าสู่ส่วนกลางของมวลน้ำโลหะ B มากที่สุดเสมอในขณะที่การแข็งตัวของน้ำโลหะรุกคืบเข้าสู่ส่วนกลางมวลน้ำโลหะ จะเป็นผลทำให้น้ำโลหะในบริเวณนี้มีระดับอุณหภูมิในการแข็งตัวต่ำกว่าอุณหภูมิ  $T_e$  มากขึ้นตามปริมาณอะตอม B ที่เพิ่มมากขึ้นช่วงระยะเวลาดังกล่าวน้ำโลหะที่ห่างไกลจาก

Solidification Front มากๆยังคงมีระดับอุณหภูมิในการแข็งตัวที่  $T_e$  เช่นเดิม ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่มีการแพร่ของอะตอมของโลหะ B ออกจากบริเวณดังกล่าวเลย

2.7.2.9 เมื่อพิจารณาโลหะผสมที่จุด X ในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าน้ำโลหะที่จุด X จะมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปตามเส้นประอุณหภูมิตามเส้นประนี้จะสูงกว่าโลหะที่ผิวสัมผัสโพรงแบบหล่อ น้ำโลหะ นอกจากนี้อุณหภูมิจริงน้ำโลหะที่จุด X ยังสูงกว่าอุณหภูมิมวลโลหะแข็งที่ผิวสัมผัสโพรงแบบหล่อ อย่างไรก็ตามสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิจริงของน้ำโลหะที่จุด X และอุณหภูมิ Liquidus จะแตกต่างกันกับอุณหภูมิมวลโลหะแข็งที่ผิวสัมผัสโพรงแบบหล่อน้ำโลหะผสมที่จุด X นี้ชัดเจน ดังนั้นจึงกล่าวได้น้ำโลหะที่จุด X กำลังเกิดภาวะ Undercooling และพร้อมที่จะเกิดการแข็งตัวเกาะพอกมวลโลหะแข็งส่วนที่เป็น Solidification Front พฤติกรรมดังกล่าวจะต่อเนื่องเรื่อยไปจนถึงบริเวณใจกลางมวลของน้ำโลหะ เพื่อให้เกิดความชัดเจนมากยิ่งขึ้น เมื่อพิจารณาน้ำโลหะสองชนิดที่ต่างส่วนผสมเคมี โดยพิจารณาในบริเวณผิวสัมผัสมวลโลหะแข็ง-น้ำโลหะในบริเวณจุด X ถ้าชนิดแรกจะมีส่วนผสมทางเคมีที่จุด X เป็นร้อยละ 10 ของ B และชนิดที่สองมีส่วนผสมทางเคมีเป็นร้อยละ 5 ของ B โดยโลหะผสมทั้งสองชนิดอุณหภูมิ Liquidus เป็น 538 องศาเซลเซียส และ 568 องศาเซลเซียส ตามลำดับแล้ว และสมมุติว่าที่ผิวสัมผัสมวลโลหะแข็ง

- น้ำโลหะ มีอุณหภูมิเป็น 532 องศาเซลเซียสจะเห็นได้ว่าเกิดความต่างอุณหภูมิจริงในน้ำโลหะ เมื่อ อุณหภูมิจริงของโลหะผสมชนิด B ร้อยละ 10 อุณหภูมิเป็น 538 องศาเซลเซียส จะเป็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสมวลโลหะแข็ง

- น้ำโลหะ จะต่ำกว่าอุณหภูมิแข็งตัวถึง 6 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันในขณะ ที่อุณหภูมิ ที่จุด X ของโลหะผสมชนิด B ร้อยละ 5 อุณหภูมิ B เป็น 566 องศาเซลเซียส จะได้ว่ามีความต่างอุณหภูมิกับโลหะผสมร้อยละ 10 ของ B มากถึง 28 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าพลังงานทั้งหมดในน้ำโลหะชนิด B ร้อยละ 5 อุณหภูมิ B บริเวณ Solidification Front ที่จุด X นี้จะมีค่ามากกว่าพลังงานทั้งหมดในน้ำโลหะชนิดร้อยละ 10 ของ B และทำให้เกิดแรงขับที่จะผลักดันให้เกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะผลกระทบที่เกิดจากภาวะ Undercooling ที่เกิดขึ้นจริงต่อการเริ่มการแข็งตัว น้ำโลหะ สามารถแยกออกได้สามประการ โดยผลกระทบดังกล่าวจะขึ้นกับ Degree of Undercooling ดังนี้ เมื่อเกิดมีภาวะ Undercooling ด้วยระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ Liquidus เพียงเล็กน้อย ผิวสัมผัสมวลโลหะแข็งน้ำโลหะ หรือ Solidification Front บางส่วนที่พุ่งยาวขึ้นสู่บริเวณที่เกิด Undercooling และจะโต (Growth) มากกว่าที่จะขยายยาวในระนาบด้านข้าง ทั้งนี้เนื่องจากภาวะ Undercooling ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแรงขับผลักดันอะตอมของโลหะหลักแยกตัวออกมาเกาะทับซ้อนกัน และแข็งพร้อมกับผลักดันอะตอมของธาตุผสมเดิมให้หลบไปอยู่ด้านข้างที่มีระดับอุณหภูมิสูงกว่า ทำให้บริเวณดังกล่าวมีปริมาณอะตอมของธาตุผสมเดิมมากกว่าปริมาณเฉลี่ยของน้ำโลหะ เป็นผลทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิ Solidus ลดต่ำลงมาจาก เดิมอีก ดังรูปที่ 2.8 ก) ทำให้เกรนที่จะเกิดขึ้นในบริเวณนี้มีลักษณะคล้ายหวีเมื่อเริ่มต้นกระบวนการแข็งตัวของน้ำโลหะ

- เมื่อเกิดมีภาวะ Undercooling ด้วยระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ Liquidus มากขึ้นภาวะดังกล่าวจะทำให้น้ำโลหะในบริเวณที่เกิดมีภาวะ Undercooling มีการถ่ายเทความร้อนออกจากโลหะเร็วขึ้น ซึ่งการคายความร้อนในทิศทางขนานกับโพรงแบบหล่อจะมีอัตราเพิ่มขึ้น ทำให้นอกจากการพอกโตขึ้นของมวลโลหะแข็งจะมีทิศทางพุ่งยาวขึ้นสูงบริเวณเกิด Undercooling แล้วจะมีการพอกขึ้นในทิศทางด้านข้างได้ด้วยในบริเวณ ทำให้น้ำโลหะแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวมีลักษณะคล้ายกิ่งไม้ที่แตกแขนงออกจากกิ่งหลัก หรือกิ่งสน เรียกว่า Dendritic Structure ดังรูปที่ 2.8 ข)

- เมื่อเกิดภาวะ Undercooling ด้วยระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ Liquidus มากๆ ภาวะที่เกิดขึ้นในกรณีจะมีผลทำให้เกิดความต่างอุณหภูมิที่มีโอกาสจะทำให้  $T_{liquidus} = T_{actual}$  มาก โดยความต่างอุณหภูมิดังกล่าวจะมีค่าสูงที่สุด  $y$  ในรูปที่ 2.9 ภาวะ Undercooling ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะทำให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้นแยกหลุดออกจากกันอย่างอิสระ และกระจายกระจายอย่างไม่มีระเบียบไปทั่วทั้งบริเวณที่เกิด Undercooling การพอกโตขึ้นของนิวเคลียสเหล่านี้จะเกิดขึ้นอย่างอิสระทุกมิติ หรือทุกทิศทาง ดังนั้นหลังการแข็งตัวของน้ำโลหะที่เกิดภาวะมี Degree of Undercooling สูงมากขึ้น มวลของโลหะจะมีเกรนเล็กละเอียดขนาดเท่าๆ กัน (Fined Equiaxed Grains) ซึ่งเกรนลักษณะดังกล่าวมักจะพบในบริเวณใจกลางแท่งโลหะที่เป็นโลหะผสม ภาวะที่จะทำให้เกิดเกรนในลักษณะดังกล่าวได้ง่ายที่สุดจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 อย่างไรก็ตาม



รูปที่ 2.10 ภาวะ Undercooling ที่เกิดมากที่สุด  
ที่มา : วิหาร (2548)

ทั้งนี้เพราะภาวะ Undercooling ที่มีค่ามากแนวโน้มที่น้ำโลหะจะแข็งตัวในแบบที่เป็น Dendrite Structure มากขึ้น นอกจากนี้ยังจะทำให้มีนิวเคลียสเริ่มต้นการแข็งตัวของน้ำโลหะแยกตัวออกจากน้ำโลหะก่อนหน้าที่ Solidification Fronts จะพุ่งยาวเข้าไปถึงโดยนิวเคลียสเหล่านี้จะไม่สามารถเกาะพอก Solidification Fronts ได้ทันแต่นิวเคลียสเหล่านี้จะถูกอะตอมที่แยกจากน้ำโลหะเกาะพอกให้โตขึ้นแทน เป็นผลทำให้น้ำโลหะจากส่วนอื่นๆ สามารถไหลป้อนเข้าสู่ช่องว่างที่หดตัวลงได้ง่ายขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าการทำให้น้ำโลหะเกิดมีภาวะความต่างอุณหภูมิในน้ำโลหะได้มาก

ขึ้นเท่าไรจะทำให้เราสามารถแก้ปัญหาเองการไหลย้อนเต็มของน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบหล่อได้ง่ายมากขึ้นเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การใช้ Chiller หรือวัสดุถ่ายเทความร้อนฝังในทรายหล่อจะช่วยทำให้การแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดได้เร็วขึ้นเช่น การใช้แบบโลหะเป็นแบบหล่อถาวรในงานหล่อ

## 2.8 การทดสอบความแข็ง (Hardness Testing)

หลักการเกี่ยวกับการทดสอบความแข็งจะเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานต่อการเกิดรอยกด ซึ่งใช้เป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแบบต่างๆ หัวกดมีทั้งที่เป็นแบบหัวบอล หรือแบบกรวยปลายมน หรือปิรามิด ซึ่งปกติทำจากเหล็กกล้าแข็ง หรือเพชร และใช้ทดสอบภายใต้สภาวะน้ำหนักกดที่โดยการวัดน้ำหนักที่จะทำให้เกิดรอย กดตามที่กำหนด หรือวัดรอยกดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำนั้น โดยเราสามารถเลือกใช้การทดสอบตามมาตรฐานสากล ตัวอย่างเช่น ตามมาตรฐานของ American Society Testing and Materials (ASTM) E10-7a (Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials) สำหรับการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ หรือ ASTM E18-08 (Standard Test Method for Rockwell Hardness of Metallic Materials) สำหรับการทดสอบแบบร็อคเวลล์ หรือ ASTM E92-41 (Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials) สำหรับการทดสอบแบบวิกเกอร์ส โดยเลือกใช้ตามความเหมาะสมของลักษณะชิ้นงานและวัสดุที่นำมาทดสอบ และลักษณะข้อมูลของค่าความแข็งที่ต้องการทราบ เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้การทดสอบแบบร็อคเวลล์

### การทดสอบแบบร็อคเวลล์

การทดสอบแบบร็อคเวลล์ จะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่ออกแบบมาเป็นพิเศษโดยการใส่น้ำหนักที่กระทำผ่านระบบดัมน้ำหนักกับคาน หัวกดอาจเป็นลูกบอลเหล็กกล้าแข็ง 1/16 นิ้ว 1/8 นิ้ว หรือหัวกดเพชรรูปกรวยมุม 120 องศา เรียกว่า Brale ค่าความแข็งที่แสดงบนหน้าปัดเครื่องเป็นส่วนกลับของค่าความลึกรอยกด ส่วนการแสดงผลหน่วยค่าความแข็งจะขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนัก ชนิดและขนาดของหัวกดที่ใช้ในการทดสอบยกตัวอย่างเช่นถ้าเลือกใช้น้ำหนักกด 100 กิโลกรัม และใช้หัวกดบอลเหล็กกล้าแข็งขนาด 1/16 นิ้ว ต้องอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดเครื่องในสเกล B และถ้าใช้หัวกดเพชรกับน้ำหนักกด 150 กิโลกรัม ต้องอ่านค่าความแข็งในสเกล C เป็นต้น

ในการทดสอบเริ่มแรกจะใช้น้ำหนักกดเบื้องต้น 10 กิโลกรัม ค้างไว้ซึ่งจะทำให้เกิดรอยกดเบื้องต้นบนชิ้นทดสอบ โดยสังเกตเข็มบนหน้าปัดเครื่องที่แสดงน้ำหนักกดเบื้องต้นจะเข้าสู่บริเวณที่กำหนด จากนั้นให้ใส่น้ำหนักกดที่แท้จริง โดยปกติถ้าใช้หัวกดบอลน้ำหนักกดแท้จริงจะอยู่ในช่วงประมาณ 60 ถึง 100 กิโลกรัม และถ้าใช้หัวกดเพชรจะใช้น้ำหนักกดแท้จริงได้ถึง 150 กิโลกรัม ส่วนหัวกดบอลจะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่า หลังจากใส่น้ำหนักกดแท้จริงและน้ำหนักกดออก ให้อ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดเครื่องโดยที่น้ำหนักกดเบื้องต้นยังค้างอยู่

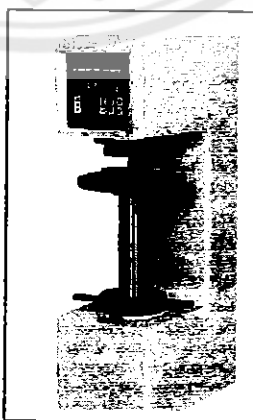
ในการทดสอบความแข็งร็อคเวลล์ ค่าความแข็งที่ได้สามารถมีได้หลายค่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดหัวกด และน้ำหนักกดที่ใช้ นอกจากนี้หน้าปัดเครื่องยังมีสองชุดคือสีแดงกับสีดำ ซึ่งรวมกันแล้วทำให้การ

ทดสอบแบบร็อคเวลล์ มีหน่วยต่างกันประมาณ 30 หน่วย บนหน้าปัดจะออกแบบเป็นสเกล B และ C โดยสองสเกลนี้เป็นสเกลชุดแรกที่ผ่านมารับรองมาตรฐานและนิยมใช้มากที่สุด ส่วนหน้าปัดสีแดงใช้อ่านค่าความแข็งสำหรับสเกลที่ใช้หัวกดเป็นหัวบอล และหน้าปัดสีดำใช้อ่านค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบด้วยหัวกดเพชร

สเกลร็อคเวลล์ อยู่ในรูปของเศษส่วน 100 และแต่ละส่วน หรือแต่ละค่าความแข็งมีค่าความลึกรอยกดเท่ากับ 0.002 มิลลิเมตร ถ้าอ่านค่าความแข็งจะได้เป็น ตัวอย่างเช่น 53 HRB กับ 56 HRB หมายถึงทั้งสองมีรอยกดต่างกันเท่ากับ  $3 \times 0.002$  มิลลิเมตร นั่นคือ 0.006 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากสเกลเป็นแบบกลับส่วนดังนั้นวัสดุที่อ่านค่าความแข็งได้สูงกว่าจึงเป็นวัสดุที่แข็งกว่า

สเกล B ใช้ในการทดสอบวัสดุความแข็งปานกลางในช่วง 0 – 100 HRB ถ้าใช้หัวกดบอลวัดค่าความแข็งของวัสดุเกิน 100 HRB อาจทำให้หัวบอลยุบตัวทำให้ได้ค่าความแข็งที่คลาดเคลื่อนได้ ส่วนสเกล C มักใช้ทดสอบกับวัสดุที่มีความแข็งมากกว่า 100 HRB ซึ่งปกติแล้วเหล็กกล้าจะมีค่าความแข็งสูงสุดประมาณ 70 HRC และการวัดค่าความแข็งด้วยสเกล C จะอยู่ที่ประมาณ 20 HRC ขึ้นไป เนื่องจากการทดสอบความแข็งต่ำกว่า 20 HRC ได้รอยกดที่เล็กมากทำให้ค่าความแข็งที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ ในการทดสอบความแข็งต่ำกว่า 20 HRC ได้รอยกดที่เล็กมากทำให้ค่าความแข็งที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ ในการทดสอบให้เลือกใช้สเกลที่ใช้หัวกดบอลที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้เพราะความว่องไวในการตรวจวัดจะลดลงตามขนาดรอยกดที่เพิ่มขึ้น

ชิ้นงานทดสอบควรมีลักษณะแบนเรียบและปราศจากสนิม ออกไซด์ รู และควรเป็นวัสดุที่ไม่ผ่านการขึ้นรูปทั้งด้านบนและล่าง ส่วนความหนาของชิ้นทดสอบควรจะหนาพอที่จะไม่เกิดการบิดหรือเกิดการเสียรูปของแท่นรองชิ้นทดสอบภายใต้การทดสอบ เนื่องจากการเสียรูปดังกล่าวอาจทำให้การวัดค่าความแข็งคลาดเคลื่อนได้ ในการทดสอบควรวัดกับวัสดุความหนาเดียวเสมอ และเพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากสิ่งเจือปน รูอากาศเล็กๆ และความบกพร่องที่ผิวอื่นๆ ควรทำการทดสอบอย่างน้อยสามจุดแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 2.11 เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์

ที่มา : ขวลิขิต (2542)

การทดสอบความแข็งแรงวิธีนี้มีหลักการทดสอบที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้ (ขวลิต, 2542)

- ควรตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องด้วยแท่งทดสอบ (Test Block) ทุกครั้งก่อนการทำงาน
- ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบควรทำความสะอาด และขนานกันทั้งสองด้าน
- รอยกดบนผิวทดสอบควรห่างกันอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร
- ควรวัดค่าความแข็งอย่างน้อย 3 จุด แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย จะได้เป็นค่าความแข็งที่ถูกต้อง
- ค่าความแข็งที่อ่านได้บนสเกลเป็นค่าที่นำไปใช้ได้เลยจึงมีความรวดเร็วในการทดสอบ
- ชิ้นงานที่จะทำการทดสอบควรมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 เท่าของรอยกดบนผิวทดสอบ

## 2.9 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) คือโครงสร้างของโลหะที่กำลังขยาย 200 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะเป็นการศึกษาถึง รูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรน ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะนั้น เพื่อนำไปใช้ในการเลือกวัสดุมาใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการเพราะวัสดุแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน (ขวลิต, 2553)

การที่จะทำให้วัสดุต่างๆ สามารถนำกลับมาใช้งานได้ตรงตามความต้องการได้นั้นเราต้องมาดูที่กระบวนการผลิตวัสดุนั้น และทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ เนื่องจากโครงสร้างที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ คือโครงสร้างจุลภาคเท่านั้น เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่บิ การศึกษารูปร่าง ขนาด การจัดเรียงตัวของผลึก และลักษณะเกรนนั่นจึงต้องตัดชิ้นงานตามแนวที่การ แล้วนำไปขัด กัดกรด โดยกรดจะกัดตามขอบเกรนรุนแรงกว่าส่วนอื่นของผลึก เพราะขอบเกรนมีเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่องมากที่สุด หลังจากการกัดกรดแล้วขอบเกรนจะถูกกัดเป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์ การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรน และขอบเกรนหันเหอกนอกทิศทางเดิม

### 2.9.1 การขัดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบ

ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 220 320 400 และขัดจนถึงเบอร์ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนพื้นหนาเรียบแล้วขัดผิวของชิ้นงานที่ตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะที่ขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ น้ำชำระสิ่งสกปรกออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดผิวของชิ้นงานที่ ตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย

15515403

4/5.

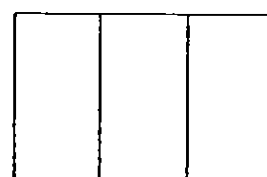
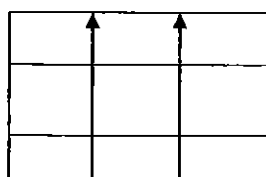
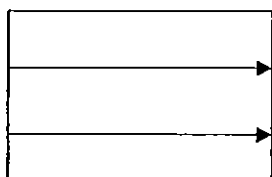
Q 257 D

2553

ทิศทางการขัดครั้งที่ 1

ทิศทางการขัดครั้งที่ 2

เมื่อขัดเสร็จรอยขัดครั้งที่ 1 จะหายไป



รูปที่ 2.12 ลักษณะแนวทางการขัดผิวของชิ้นงานที่ทดสอบสลับเป็นตาราง

ที่มา : ขวลิขิต (2542)

### 2.9.2 การขัดผิวของชิ้นงานด้วยผงขัด

การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นงานที่ตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina) และแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide) โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 1 และ 0.3 ไมครอน การขัดผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงผ้าสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

### 2.9.3 กัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลาย

ชิ้นงานที่ตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นถูกนำไปกัดด้วยสารละลาย ซึ่งการใช้สารละลายนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ สารละลายเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะชนิดต่างๆ ซึ่งแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ สารละลายที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างของเหล็ก และสารละลายที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็กซึ่งในการทดลองนี้เราใช้อะลูมิเนียมผสมในการตรวจสอบ สารละลายที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นงานที่ตรวจสอบที่เป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก

| น้ำยากัดผิวตรวจสอบ                      | ส่วนผสม                                                          | โลหะที่ตรวจสอบ     | การใช้งาน                          |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| กรดไฮโดรฟลูออริก<br>(Hydrofluoric Acid) | กรดไฮโดรฟลูออริก ½ - 2<br>มิลลิลิตร ผสม น้ำ 100<br>มิลลิลิตร     | อะลูมิเนียม<br>ผสม | จุ่ม หรือ เช็ดนาน<br>15 -45 วินาที |
| โซเดียมไฮดรอกไซด์<br>(Sodium Hydroxide) | โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)<br>1 มิลลิลิตร ผสม น้ำ 100<br>มิลลิลิตร | อะลูมิเนียม<br>ผสม | เช็ดด้วยสำลีนาน<br>10 - 15 วินาที  |

ที่มา : ขวลิขิต (2542)

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

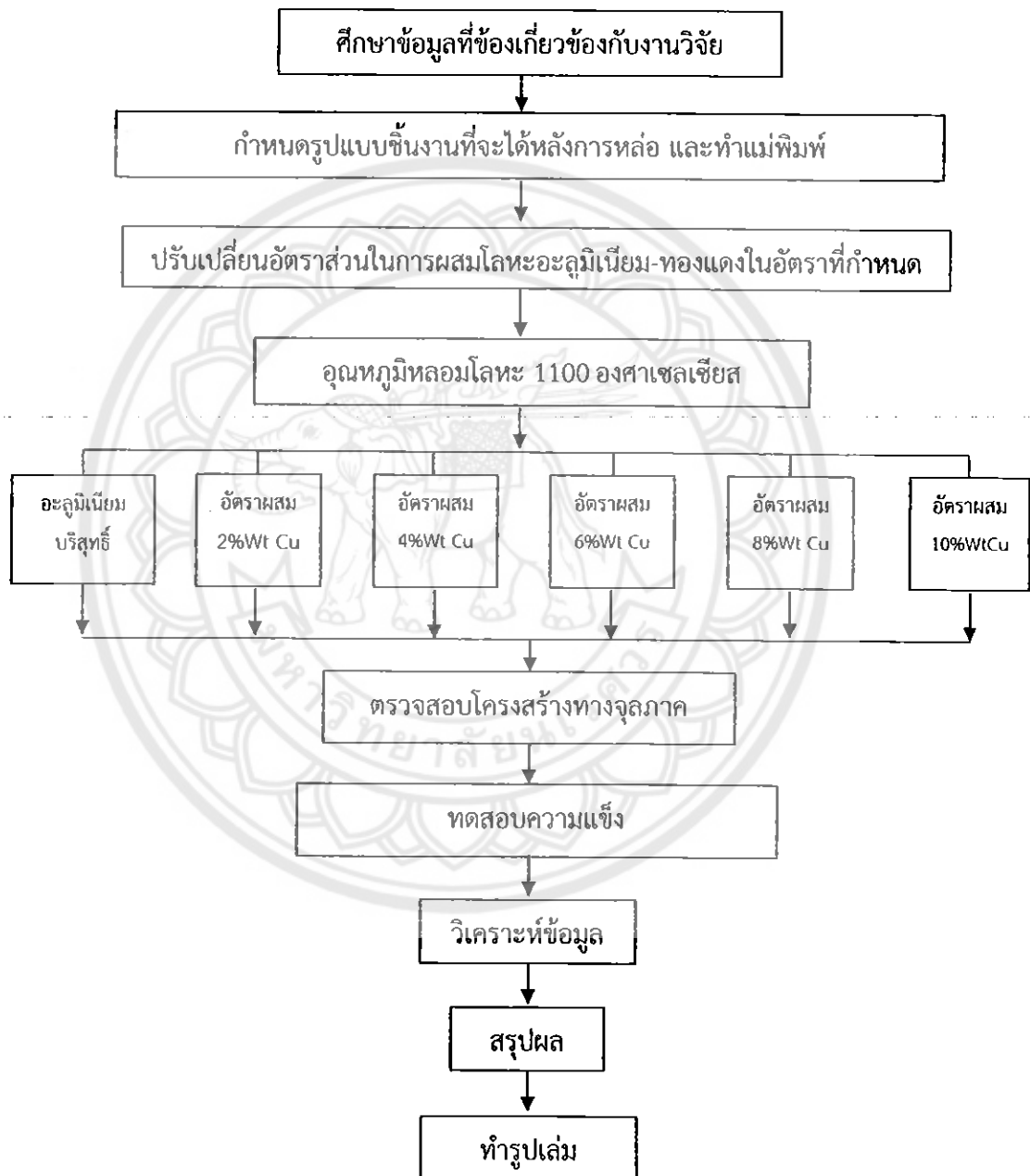
นายเจนณรงค์ จันทสร และนาย สุรพล ปัญญาแก้ว (2544) ทำการศึกษาการแตกร้าวในขณะร้อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง โดยใช้โลหะทองแดงผสมร้อยละ 1-7 (ร้อยละ 1-7 โดยน้ำหนักทองแดง) เติมผสมในอะลูมิเนียมที่ทำการหลอมด้วยเตาอินดักชั่น ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Emission Spectrometer นำอินก๊อตที่ได้ไปหล่อ เพื่อทดสอบสมบัติด้านการต้านทานการแตกร้าวในขณะร้อน โดยใช้แบบหล่อทราย CO<sub>2</sub> ในการทดลองใช้อุณหภูมิเทโลหะเหลว 720 องศาเซลเซียส ปกคลุมผิวหน้าโลหะเหลวด้วยฟลักชนิด Coveral-11 โครงสร้างมหภาคที่ได้จากการนำชิ้นงานทดสอบไปกัดด้วยสารละลาย Tucker's ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่ทำการเทหล่อนั้นจะมีการแตกร้าวที่บริเวณที่แข็งตัวสุดท้าย และเป็นที่สะสมของความเค้น และความเครียด ซึ่งเกิดจากการหดตัวของโลหะผสม โดยพบว่าความยาวของการแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของทองแดงที่ผสม กล่าวคือถ้าส่วนผสมของทองแดงมากขึ้นก็จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวมากขึ้น และเป็นการแตกร้าวที่ขอบเกรน



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินโครงการ

โดยบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินโครงการ เรื่องการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสม อะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็ง



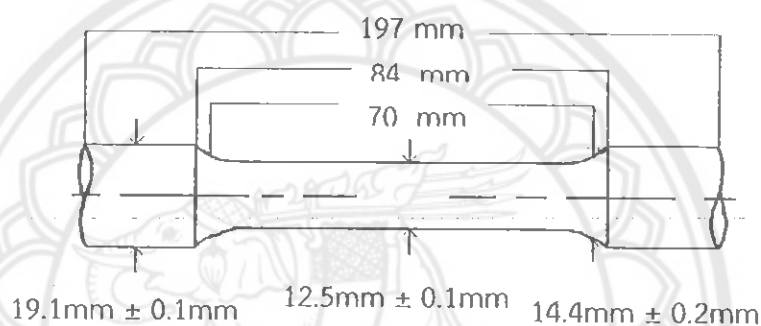
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 ศึกษาข้อมูล

ศึกษาข้อมูลของโลหะอะลูมิเนียม และข้อมูลของโลหะทองแดง ข้อมูลอะลูมิเนียมผสมทองแดง กรรมวิธีการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง การสร้างแบบหล่อ เลือกทดสอบความแข็งที่เหมาะสมกับการทดลอง และออกแบบการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ให้เหมาะสมกับการทดลอง

### 3.2 วิธีการออกแบบ และการทำแม่พิมพ์

ขั้นตอนในการออกแบบเป็นการศึกษาจากข้อมูลโดยอ้างอิงจาก ASTM B 108 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ใช้ในการทำการทดลอง ในการศึกษาจาก ASTM B 108 จึงเลือกใช้โลหะในการทำแม่พิมพ์ซึ่งเหมาะสมกับการทดลองนี้



รูปที่ 3.2 รูปชิ้นงานที่จะได้จากการหล่อตามมาตรฐาน ASTM B 108

### 3.3 การเปลี่ยนปัจจัยในการทดลอง

ในการทดลองนี้ผู้ทำการทดลองสนใจทางด้านสมบัติทางความแข็งที่ได้จากการผสมโลหะสองชนิด คือ อะลูมิเนียม และทองแดง ซึ่งจะมีอะลูมิเนียมเป็นโลหะหลักจากการศึกษาสมบัติของอะลูมิเนียมนั้นจะเพิ่มค่าความแข็งได้โดยการเติมธาตุอื่น ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ทองแดงเป็นธาตุรองในการเพิ่มความแข็งของอะลูมิเนียมผู้ทดลองจึงออกแบบการทดลองโดยการเพิ่มอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชิ้นงานในการศึกษาอัตราส่วนผสมของ อะลูมิเนียม-ทองแดง ที่มีผลต่อ  
โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางด้านความแข็ง

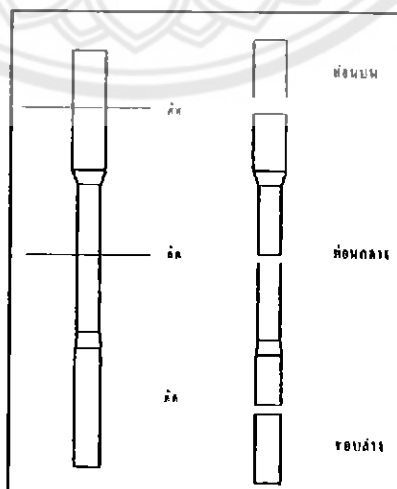
| ชิ้นงาน | อัตราส่วนผสม         | โครงสร้างทาง<br>จุลภาค | ค่าความแข็ง<br>(HRB) |
|---------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 1       | อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ |                        |                      |
| 2       | อัตราผสม 2%Wt Cu     |                        |                      |
| 3       | อัตราผสม 4%Wt Cu     |                        |                      |
| 4       | อัตราผสม 6%Wt Cu     |                        |                      |
| 5       | อัตราผสม 8%Wt Cu     |                        |                      |
| 6       | อัตราผสม 10%WtCu     |                        |                      |

### 3.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

เป็นการศึกษาโครงสร้างของโลหะ โดยส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

#### 3.4.1 ตัดชิ้นงาน

โดยการนำชิ้นงานมาตัด โดยเลือก 3 ส่วนของชิ้นงาน ตัด 3 ตำแหน่งของแต่ละอัตราส่วนผสม โดยตัดห่างจากด้านบน 2.5 เซนติเมตร ห่างจากด้านล่าง 2.5 เซนติเมตร และตัดที่จุดกึ่งกลาง



รูปที่ 3.3 รูปชิ้นงานที่นำชิ้นงานมาตัด โดยเลือก 3 ส่วน

### 3.4.2 ขัดหยาบ

เริ่มต้นจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 360, 500, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ

### 3.4.3 ขัดละเอียด

จากนั้นขัดละเอียดบนจานหมุนหุ้มด้วยกำมะหยี่ 2 ครั้ง จนผิวทดสอบไม่มีรอยขีด ครั้งที่ 1 ใช้ผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน ครั้งที่ 2 ใช้ผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน

### 3.4.4 ตรวจสอบผิวขัด

หลังจากขัดละเอียดแล้ว นำชิ้นงานไปล้างด้วยน้ำ เป่าให้แห้ง ตรวจสอบผิวงานด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 200 เท่า ถ้ายังเห็นรอยขีดอยู่ให้นำไปขัดละเอียดอีกครั้ง ล้างผิวชิ้นงาน และเป่าให้แห้งแล้วตรวจสอบผิวงานด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 200 เท่า จนกระทั่งไม่พบรอยขีด จึงนำไปกัดด้วยสารละลายต่อไป



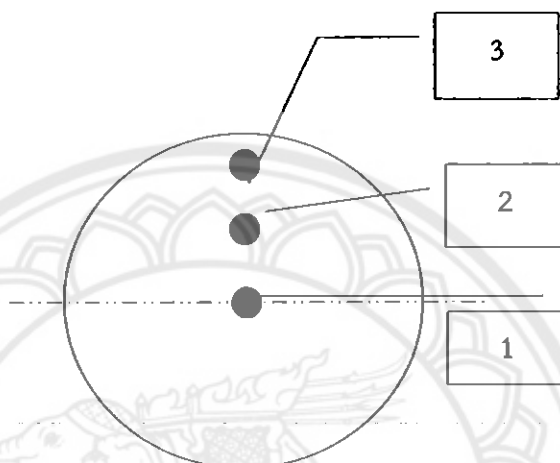
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

### 3.4.5 กัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก

จึงทำการกัดด้วยกรด โดยจุ่มผิวงานในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรนาน 6 วินาที แล้วจึงตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ และถ่ายภาพโครงสร้างทางจุลภาค

### 3.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

เป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่อยู่กับบริเวณผิวชิ้นงาน โดยใช้การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลล์ ซึ่งสามารถอ่านค่าความแข็งได้ทันทีจากหน้าปัดการทดสอบทำได้ โดยตัดชิ้นงานที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปนำมาวัดความแข็ง โดยใช้สเกล HRB ชนิดหัวกดลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว น้ำหนักทดสอบ 187.5 kgF ระยะเวลาในการกด 30 วินาที น้ำหนัก และหัวกดนี้สัมพันธ์กับชนิดของวัสดุทดสอบ



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

### 3.6 วิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสม อะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง นำชิ้นงานที่ได้มาวัดค่าความแข็ง และตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

### 3.7 สรุปผล และจัดทำรูปเล่ม

ทำการสรุปผลจากค่าความแข็งที่ได้จากการผสมอัตราส่วนผสม อะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง และรายงานโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จากชิ้นงานทดลอง โดยแสดงในการจัดทำรูปเล่ม เพื่อรายงานผลการทดลอง และสิ่งที่ได้จากการทดลอง

## บทที่ 4

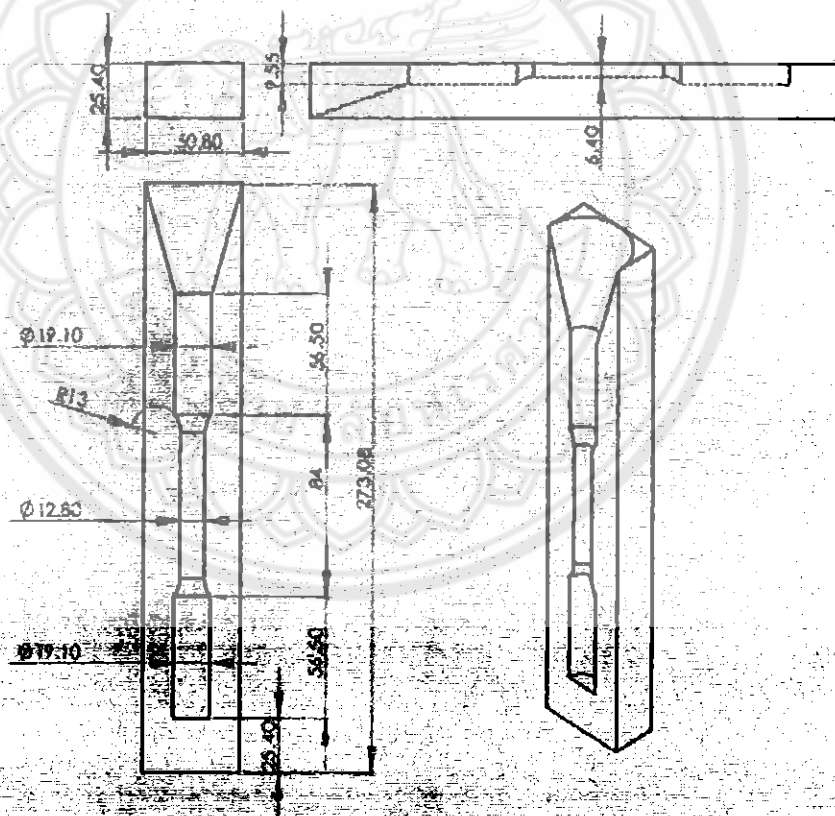
### ผลการทดลอง และวิเคราะห์

#### 4.1 ผลการศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูล

หลังจากศึกษาสมบัติของอะลูมิเนียม และทองแดง โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เทคนิคการหล่อด้วยแบบหล่อโลหะหลังจากศึกษา และรวบรวมข้อมูลจึงได้ทำการหล่อโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ในอัตราส่วนทองแดงร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนัก

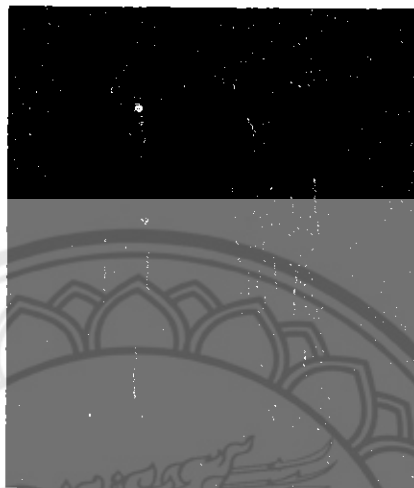
#### 4.2 การออกแบบแม่พิมพ์ จัดทำเครื่องกวนน้ำโลหะ และแม่พิมพ์

การออกแบบแม่พิมพ์นั้นได้ใช้แบบแม่พิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM B 108 ซึ่งมีขนาดความยาว 273 มิลลิเมตร มีขนาดความกว้าง 50.80 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การออกแบบขนาดแม่พิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM B 108

หลังจากที่ได้ออกแบบเครื่องกวนน้ำโลหะ และแม่พิมพ์เสร็จแล้วทำการสร้างตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยขึ้นแรกนำเหล็กมาตัดให้ได้ตามขนาดที่ออกแบบไว้แล้ว ทำการเชื่อมฐานแกนเสายึด และแขนเข้าด้วยกันจากนั้นทำแกนยึดมอเตอร์ และใบกวนน้ำโลหะจากเหล็กเส้นแบบแบน ซึ่งทนความร้อนสูงจาก อะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ประกอบมอเตอร์ และส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน



รูปที่ 4.2 แบบพิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM B 108



รูปที่ 4.3 เครื่องกวนน้ำโลหะ

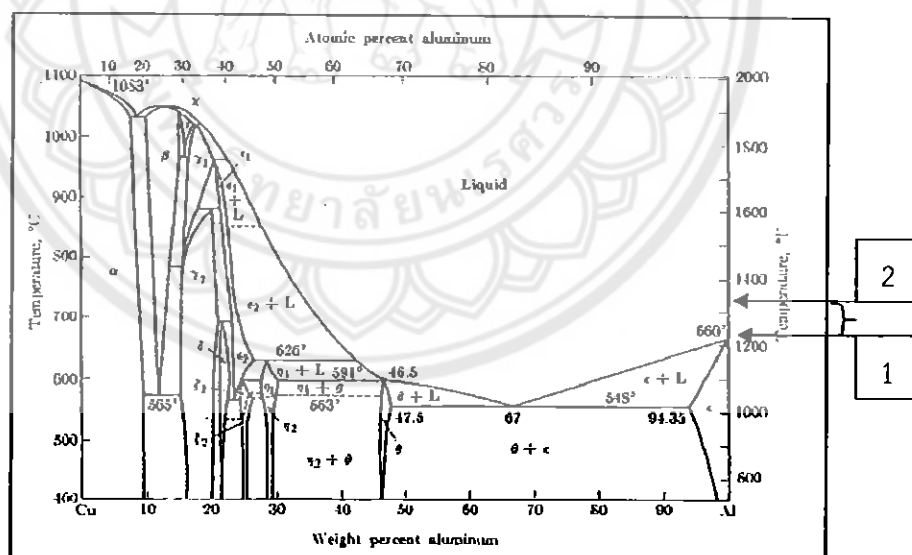
### 4.3 ทำการทดลองผสมโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง

#### 4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

ในการจัดเตรียมการผสมโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง ทำโดยชั่งหาปริมาณน้ำหนักของโลหะทั้งสอง โดยคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละส่วนผสมที่ได้กำหนดไว้ในการจัดเตรียมการทดลอง จะต้องคำนึงถึงระยะทางความห่างระหว่างแม่พิมพ์กับเข้าหลอมโลหะ ควรวางในตำแหน่งที่ใกล้กันให้มากที่สุด เพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียความร้อนในระหว่างการเคลื่อนย้ายเข้าหลอม เพื่อเทน้ำโลหะ และวางตำแหน่งแม่พิมพ์ให้มีความมั่นคง เมื่อเทน้ำโลหะแล้วจะไม่เอนเอียงหรือล้ม เพื่อความปลอดภัย และผลการทดลองที่ไม่คลาดเคลื่อน

4.3.1.1 เตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ในการทำหลอม และการขึ้นรูปโดยทำความสะอาดผิวแม่พิมพ์ และใบกวนน้ำโลหะแล้วทาสีเคลือบคาร์บอนผสมน้ำ เพื่อช่วยลดการติดกันของโลหะที่แข็งตัวแล้วกับแม่พิมพ์ และใบกวนในส่วนเข้าหลอมทำความสะอาดโดยเท หรือปิดเศษผงหรือเศษโลหะที่มีในเข้าก่อนการในส่วนผสมใหม่ทุกครั้ง

4.3.1.2 ทำการหลอมส่วนผสมโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง เข้าด้วยกันจนโลหะทั้งสองชนิดหลอมเหลวแล้วนำออกจากเข้าหลอมทำการกวนน้ำโลหะจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดจากกราฟของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง โดยกำหนดจากจุดหลอมเหลวของร้อยละโดยน้ำหนักของส่วนผสมโลหะทั้งสองชนิด และเพิ่มอีก 50 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นอุณหภูมิเท

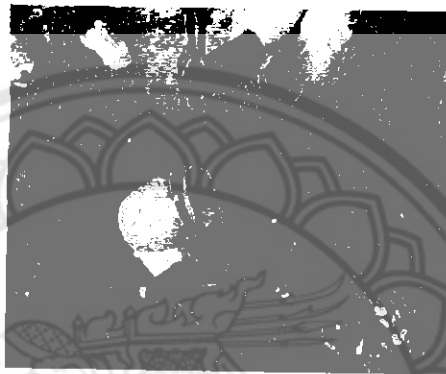


รูปที่ 4.4 แผนภูมิสมดุล อะลูมิเนียม-ทองแดง

ที่มา : มนัส (2543)

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าที่เส้นหมายเลข 1 นั้นแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของ อะลูมิเนียม บริสุทธิ์ คือ 660 องศาเซลเซียส และเส้นหมายเลข 2 แสดงถึงการบวกเพิ่มอีก 50 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นอุณหภูมิเทของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และทำเช่นนี้ต่อไปโดยดูร้อยละของการผสม โลหะทั้งสองชนิด และอ่านค่าพร้อมทั้งบวกอุณหภูมิ เพื่อกำหนดอุณหภูมิเทของแต่ละส่วนผสม

4.3.1.3 การวัดอุณหภูมิ ทำโดยวัดเมื่อน้ำโลหะทั้งสองชนิดละลายเป็นน้ำโลหะ หลอมเหลว และวัดในขณะที่ทำการกวนน้ำโลหะ และวัดก่อนทำการยกออกจากเตาหลอม เพื่อที่จะทำการเทน้ำโลหะที่มีอุณหภูมิตามที่กำหนดไว้



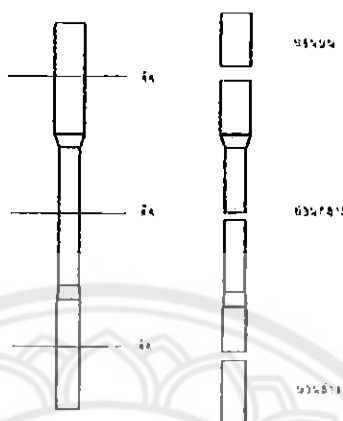
รูปที่ 4.5 เทน้ำโลหะอะลูมิเนียมทองแดงลงแม่พิมพ์

4.3.1.4 เมื่อเทน้ำโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดง ตามอัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ 2,4,6,8 และ10 โดยน้ำหนัก แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอุณหภูมิห้องนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์จะได้ ชิ้นงานออกมา และทำจนครบตามที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 4.6 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อ

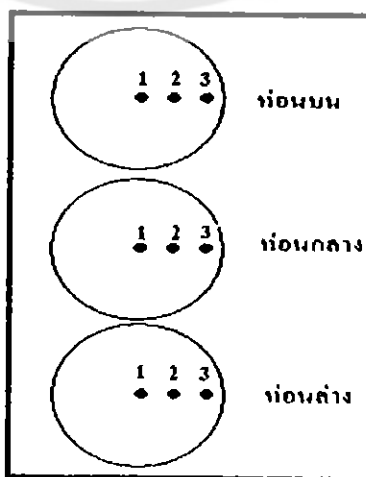
4.3.1.5 เมื่อได้ชิ้นงานที่เย็นตัวแล้วจากนั้นทำการตัดส่วนเกินออก และทำการตัดแบ่งชิ้นงานเป็น 3 ส่วน เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค และทดสอบความแข็งของชิ้นงานในแต่ละส่วนผสม ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ชิ้นงานที่ตัด เพื่อทดสอบ

#### 4.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

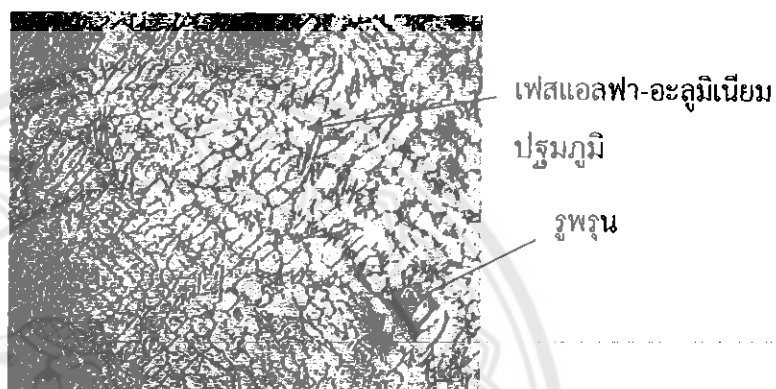
หลังจากที่ได้นำชิ้นงานไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร แล้วนำไปส่องกล้องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 200 เท่า ได้ส่องทั้งหมด 3 จุดต่อหนึ่งชิ้นทดสอบ สาเหตุที่ส่อง 3 จุดต่อชิ้นทดสอบเพราะต้องการดูโครงสร้างของชิ้นงานให้ทั่วถึงทั้งหมด ถ้าทำการส่องเพียงจุดเดียวแล้วนำมาเป็นตัวแทนของพื้นที่ทั้งหมด อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากถ้าหากส่องเจอโครงสร้างเพียงโครงสร้างเดียวไม่อาจสรุปได้ เพราะการแข็งตัวของโลหะจะประกอบด้วยโครงสร้างหลายแบบตามการเย็นตัวด้วยเหตุนี้ จึงต้องตรวจสอบตำแหน่งที่ต่างกัน 3 ตำแหน่งใน 1 ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

#### 4.5 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค

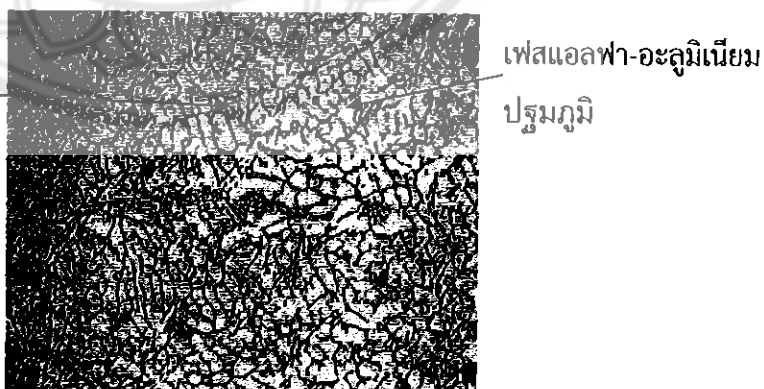
ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วย เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ( $\alpha$ -Al) เป็นสีขาวซึ่งเป็นเฟสอะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูป 4.9 ลักษณะเกรนแบบเดนไดรต์โตสมำเสมอ และพบจุดบกพร่องในชิ้นงานชนิดรูปน



รูปที่ 4.9 โครงสร้างอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Aluminium)

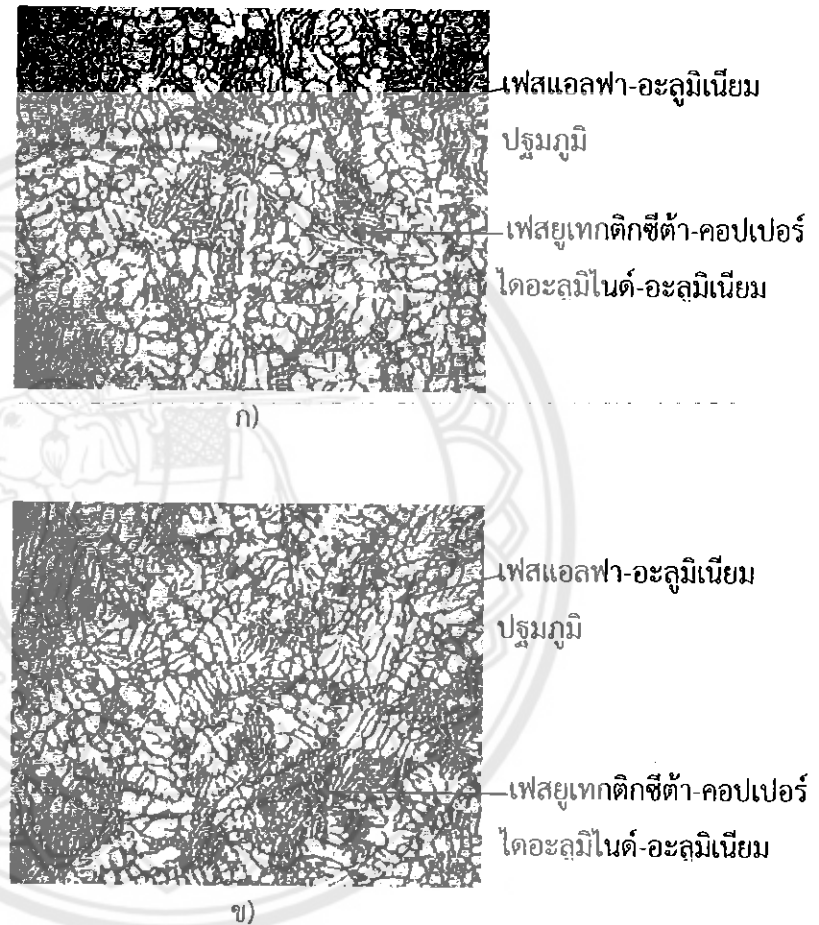
ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2 จะพบเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ( $\alpha$ -Al) เป็นสีขาว และเฟสแอลฟา ที่มีทองแดงละลายได้อย่างสมบูรณ์ อยู่ระหว่างขอบเกรนของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 4.10

เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม-  
อะลูมิเนียมที่มีทองแดง  
ทองแดงละลายอย่างสมบูรณ์



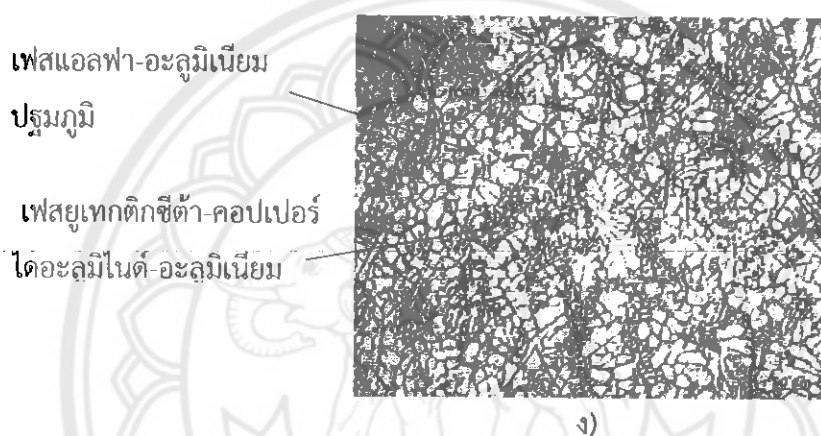
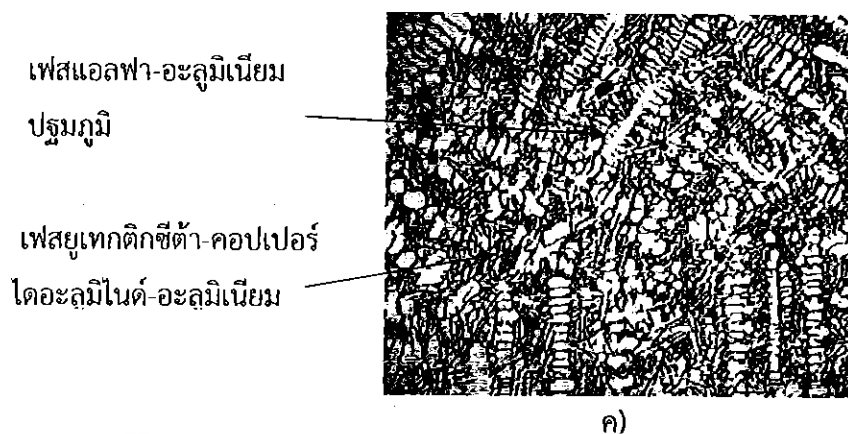
รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของทองแดง

ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง จะพบเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ( $\alpha$ -Al) เป็นสีขาว และเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์-อะลูมิเนียม จับตัวอยู่ระหว่างของเกรนเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ผลมาจากการแยกตัวของอะตอมทองแดงมาจับตัวกันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 548 องศาเซลเซียส และจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นมากปริมาณการผสมทองแดงที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะเกรนแบบเดนไดรต์ขนาดใหญ่ และจะมีขนาดเล็กลงตามการผสมทองแดงที่เพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

- ก) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของทองแดงที่พบเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์-อะลูมิเนียม
- ข) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของทองแดงที่พบเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทกติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์-อะลูมิเนียม



รูปที่ 4.11 (ต่อ) โครงสร้างทางจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

- ค) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของทองแดงที่พบเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม
- ง) โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของทองแดงที่พบเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม

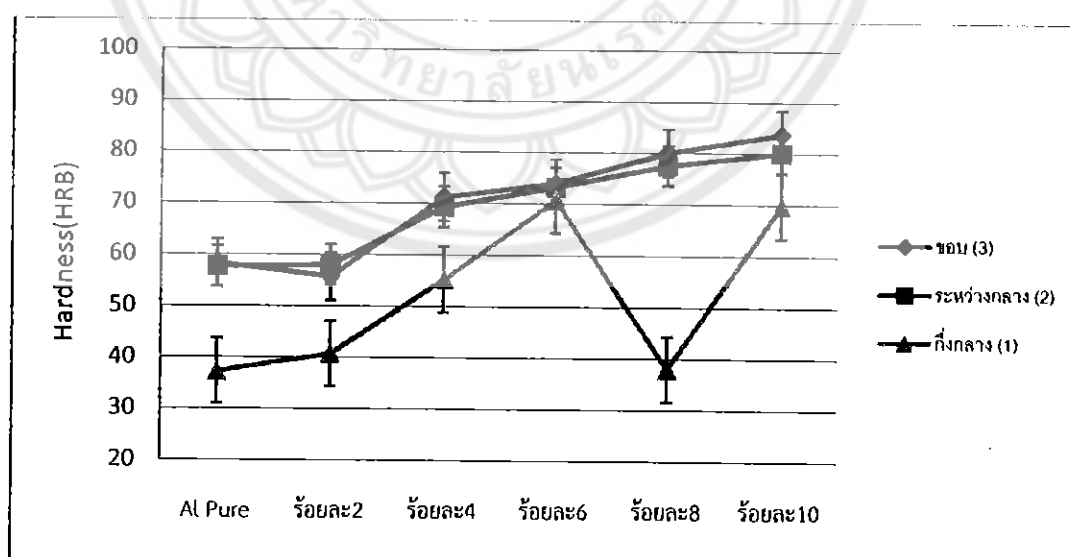
เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วย กฎ Lever rule เพื่อหาร้อยละโดยน้ำหนักของโครงสร้าง เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และเฟสซีต้า-อะลูมิเนียมทองแดง เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับค่าความแข็ง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณหาร้อยละโดยน้ำหนักของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมินด์ ของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง

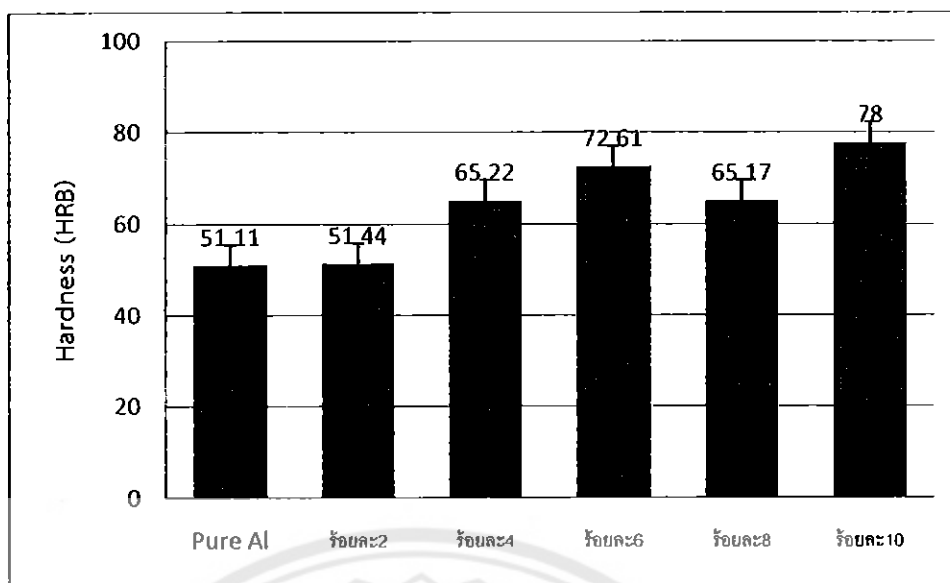
| โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง | เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม | ซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมินด์ |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|
| ร้อยละ 2                  | ร้อยละ 100           | ร้อยละ 0                  |
| ร้อยละ 4                  | ร้อยละ 99.28         | ร้อยละ 0.72               |
| ร้อยละ 6                  | ร้อยละ 99.25         | ร้อยละ 0.75               |
| ร้อยละ 8                  | ร้อยละ 95.00         | ร้อยละ 5.00               |
| ร้อยละ 10                 | ร้อยละ 90.70         | ร้อยละ 9.30               |

จากข้อมูลดังตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าร้อยละการเกิดเฟสซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมินด์ จะเพิ่มขึ้น ร้อยละ 4 และสูงสุดที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักทองแดง การเกิดเฟสซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมินด์เพิ่มขึ้นตามการผสมทองแดง เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็น FCC เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงมีผลให้สามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม และมีผลให้สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป

#### 4.6 ผลการทดสอบสมบัติด้านความแข็ง



รูปที่ 4.12 สมบัติทางด้านความแข็งเฉลี่ยที่ตำแหน่งทดสอบเดียวกันในอัตราส่วนผสมที่ต่างกันของอะลูมิเนียม-ทองแดง ตามอัตราส่วนทองแดงร้อยละ (อะลูมิเนียมบริสุทธิ์), 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.12 สมบัติทางด้านความแข็งเฉลี่ยในอัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ทองแดง ตามอัตราส่วนผสมทองแดงร้อยละ (อะลูมิเนียมบริสุทธิ์), 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนัก

#### ผลการวิเคราะห์สมบัติด้านความแข็ง

จากการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง สามารถดูได้จากตารางที่ ข.1

จากรูป 4.11 จะสังเกตได้ว่าส่วนกึ่งกลางชิ้นทดสอบจะมีค่าความแข็งน้อยกว่าบริเวณขอบชิ้นงานทดสอบ และระยะระหว่างกลาง เป็นผลจากการเย็นตัวของน้ำโลหะที่สัมผัสผิวแม่พิมพ์ในขณะที่บริเวณกึ่งกลางน้ำโลหะเย็นตัวอย่างช้าๆ ขนาดของเกรนที่ติดกับผิวแม่พิมพ์ นั้นจะมีขนาดเล็กและละเอียดทำให้มีความแข็งสูง ในการเพิ่มส่วนผสมของทองแดงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เพิ่มจากการเกิดเฟสซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ ที่เพิ่มขึ้นตามขอบเกรนของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม ถึงแม้ว่าจะมีบางส่วนผสมที่มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดความบกพร่องในชิ้นงานแต่สามารถที่จะสรุปได้ว่าชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามการผสมทองแดง จากรูปที่ 4.12 สมบัติทางด้านความแข็งเฉลี่ยในอัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ทองแดง ตามอัตราส่วนผสมทองแดง ร้อยละ 0 (อะลูมิเนียมบริสุทธิ์), 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนัก

## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

5.1.1 จากหล่อโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ และโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2,4,6,8 และ10 โดยน้ำหนักของทองแดง และทำการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าโครงสร้างของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แตกต่างจากโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงร้อยละ 2 ซึ่งมีโครงสร้างเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเฟสแอลฟา ที่มีทองแดงละลายได้อย่างสมบูรณ์ อยู่ระหว่างขอบเกรนของเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม และที่การผสมของร้อยละ 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง จะพบโครงสร้าง เฟสแอลฟา-อะลูมิเนียม เป็นเฟสพื้นหรือเฟสปฐมภูมิ และเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมินด์-อะลูมิเนียม จับตัวอยู่ระหว่างของเกรนเฟสแอลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ผลมาจากการแยกตัวของอะตอมทองแดงมาจับตัวกันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 548 องศาเซลเซียส และจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นมากปริมาณการผสมทองแดงที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะเกรนแบบเดนไดรท์ขนาดใหญ่ และจะมีขนาดเล็กลงตามการผสมทองแดงที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 จากการทดสอบความแข็งแรงพบว่าส่วนกึ่งกลางชิ้นทดสอบจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณระหว่างกลาง และบริเวณขอบชิ้นทดสอบ จากค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของแต่ละส่วนผสมสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นตามการผสมทองแดงที่เพิ่มขึ้น และปริมาณเฟสยูเทคติกซีต้า-คอปเปอร์ไดอะลูมินด์ ส่งผลต่อสมบัติความแข็งแรง แต่ในผลการทดลองนั้นมีค่าบางค่าที่แสดงผลออกมาแปรปรวนจากกลุ่มผลทดสอบนั้น ด้วยเหตุผลจากความบกพร่องของชิ้นงาน ชนิด รูพรุน หรือโพรงอากาศในกระบวนการหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ซึ่งเกิดจากการมีปริมาณก๊าซในน้ำโลหะหลอมเหลวมากเกินไป ในขั้นตอนเทน้ำโลหะสู่พิมพ์ไม่สามารถเคลื่อนตัวออกได้ทันระหว่างการแข็งตัว

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 การเพิ่มความแข็งแรงให้อะลูมิเนียม นั้นสามารถใส่ธาตุอื่นผสมเพื่อให้ได้สมบัติความแข็งแรงหรือใส่ธาตุผสมมากกว่า 1 ชนิดได้ขึ้นกับผู้พัฒนาสนใจหรือตามจุดประสงค์ในความต้องการใช้งาน

5.2.2 ในการหล่อโลหะผสมโดยแม่พิมพ์ถาวร ควรคำนึงถึงอากาศภายในน้ำโลหะในระหว่างการเท ควรออกแบบแม่พิมพ์ หรือการเทน้ำโลหะที่ลดการแปรปรวนในน้ำโลหะ หรือใช้ความดันช่วยส่งน้ำโลหะเข้าสู่แบบ เพื่อไม่ให้น้ำโลหะกักอากาศไว้ภายใน เพื่อการบกพร่องของชิ้นงาน

### 5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 ไม่สามารถใช้วัสดุ หรืออุปกรณ์ได้ตลอดเวลาเพราะข้อจำกัดของการเปิด และปิดอาคาร ปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหกรรม จึงควรต้องวางแผนการดำเนินงานอย่างรอบคอบ และตรงเวลา

5.3.2 การใช้เตาหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำชิ้นงานออกจากเตา อาจทำให้ผู้ปฏิบัติงาน เกิดอันตรายได้ ฉะนั้นเราจึงควรใส่อุปกรณ์ที่ป้องกันความร้อนทุกครั้ง

5.3.3 การเตรียมชิ้นงานโดยใช้เครื่องตัด ทำให้ชิ้นงานไม่ได้ระนาบ จึงยากต่อการขัด จึงควรนำ ชิ้นงานไปปรับระนาบ ก่อนนำไปขัดทุกครั้ง

5.3.4 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการหล่อขึ้นรูปมีจุดบกพร่อง ชนิดรูพรุน มีโพรงอากาศอยู่ในชิ้นงาน บางชิ้นงาน ในการแก้ปัญหาควรศึกษาออกแบบแม่พิมพ์โดยคำนึงถึงปัญหานี้ และสร้างแม่พิมพ์ขึ้น ใหม่เพื่อไม่ให้เกิดปัญหานี้โดยทำตามทฤษฎีการออกแบบแม่พิมพ์



## เอกสารอ้างอิง

เจนณรงค์ จันทสร, สุรพล ปัญญาแก้ว. (2547). การศึกษาการแตกร้าวในขณะร้อนของโลหะผสมอลูมิเนียม-ทองแดง. โครงการงานนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

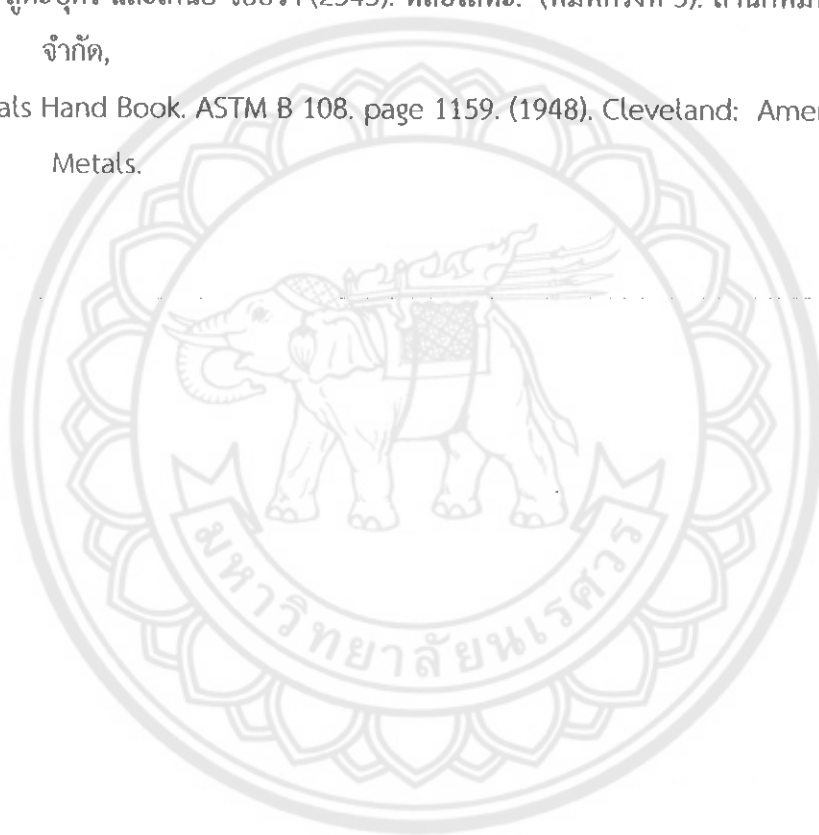
ชาลิต เชียงกุล. (2542). โลหะวิทยา (พิมพ์ครั้งที่2). บริษัท ส.เอเชียเพรส จำกัด.

มนัส สติรจินดา. (2543). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (พิมพ์ครั้งที่4). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิหาร ตีปัญญา. (2548). วิศวกรรมโลหการ (พิมพ์ครั้งที่1). สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

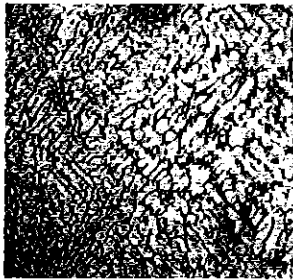
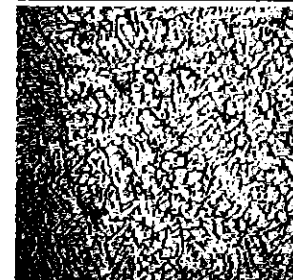
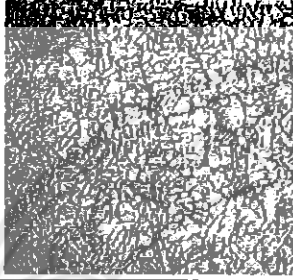
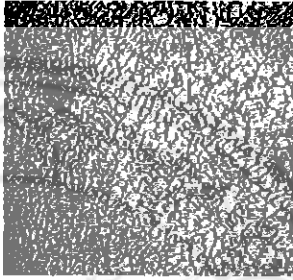
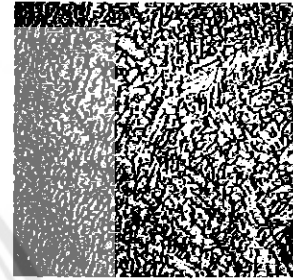
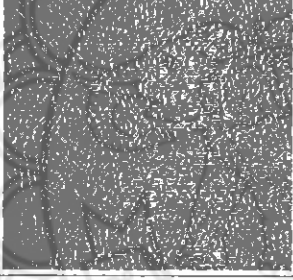
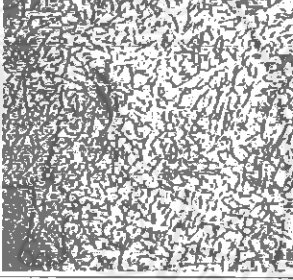
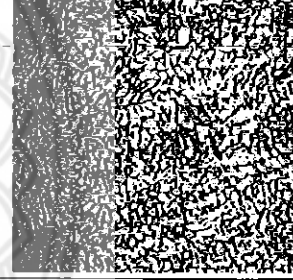
หริส สุตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา (2543). หล่อโลหะ. (พิมพ์ครั้งที่ 5). สำนักพิมพ์ดวงกมล จำกัด,

Metals Hand Book. ASTM B 108. page 1159. (1948). Cleveland: American Society for Metals.

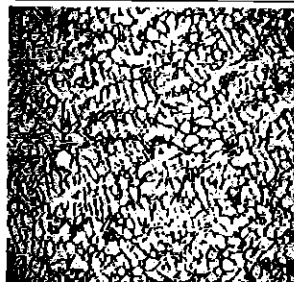
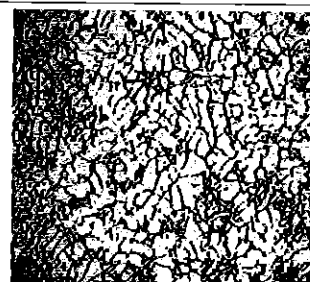
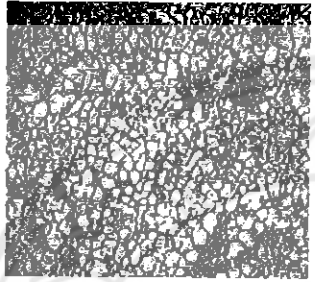
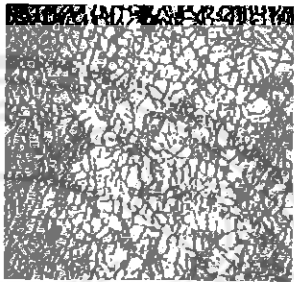
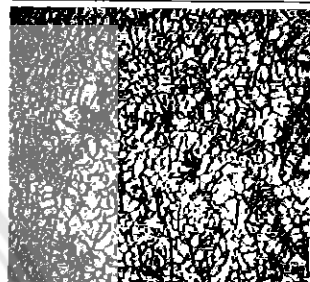
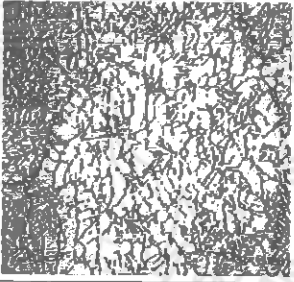
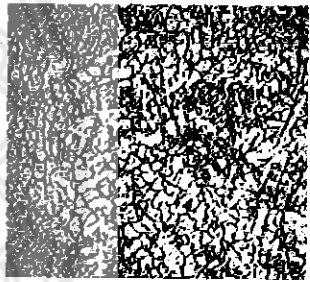




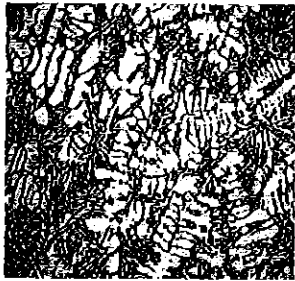
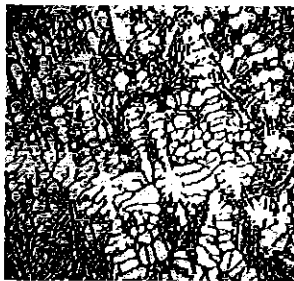
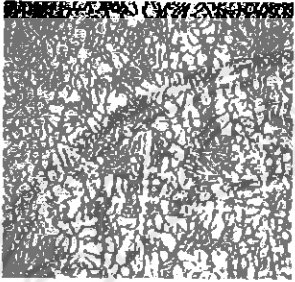
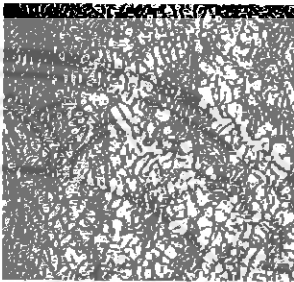
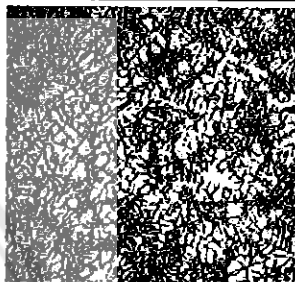
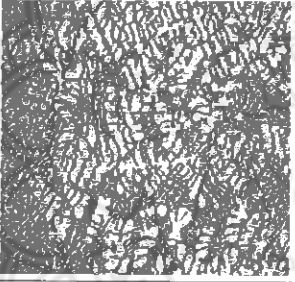
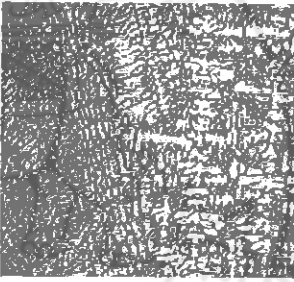
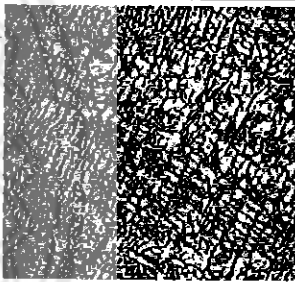
ตารางที่ ก.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมอะลูมิเนียม  
บริสุทธิ์

|                               | จุดที่ 1                                                                           | จุดที่ 2                                                                            | จุดที่ 3                                                                             |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนบน   |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนกลาง |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนล่าง |  |  |  |

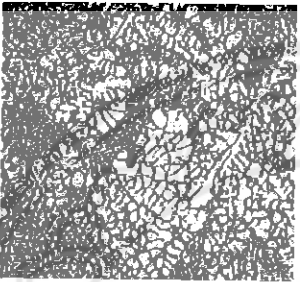
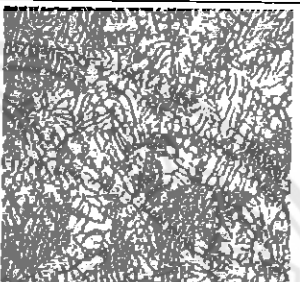
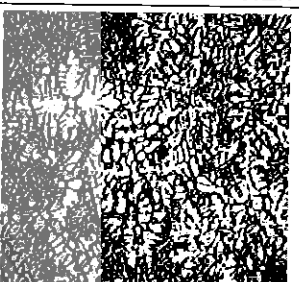
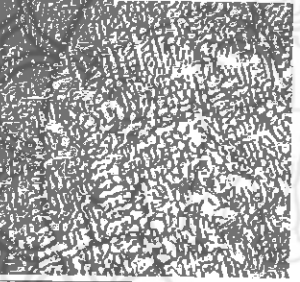
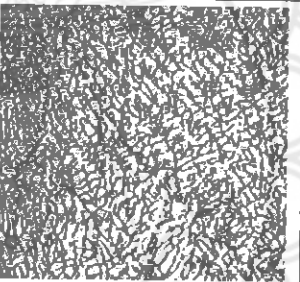
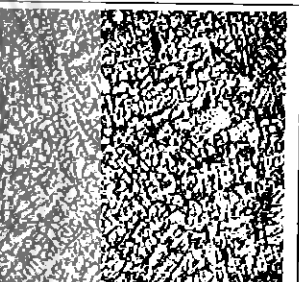
ตารางที่ ก.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของทองแดง

|                               | จุดที่ 1                                                                           | จุดที่ 2                                                                            | จุดที่ 3                                                                             |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนบน   |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนกลาง |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนล่าง |  |  |  |

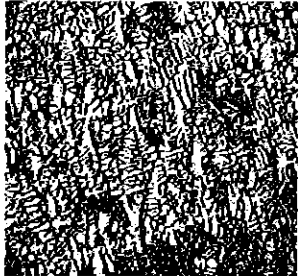
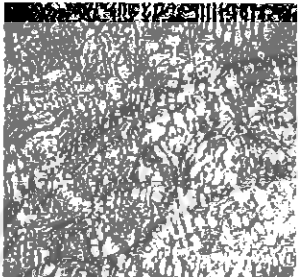
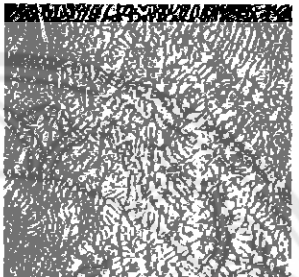
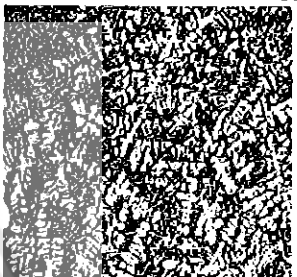
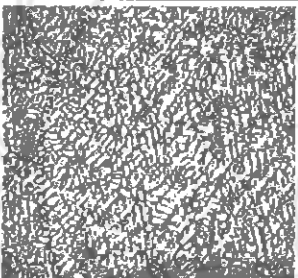
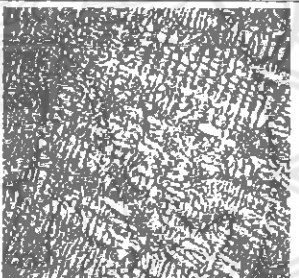
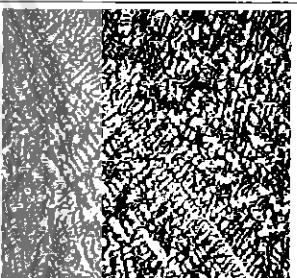
ตารางที่ ก.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของทองแดง

|                               | จุดที่ 1                                                                           | จุดที่ 2                                                                            | จุดที่ 3                                                                             |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนบน   |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนกลาง |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนล่าง |  |  |  |

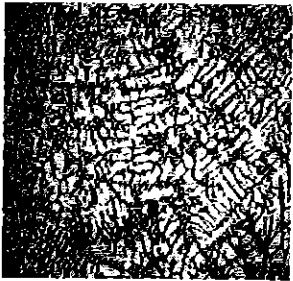
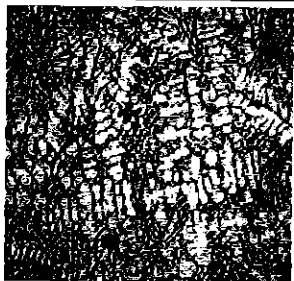
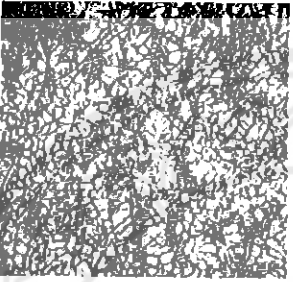
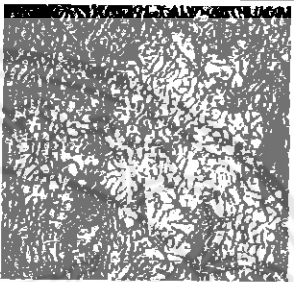
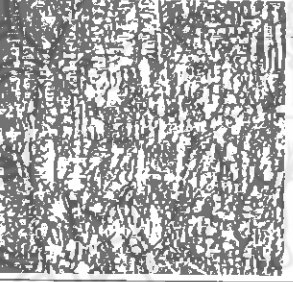
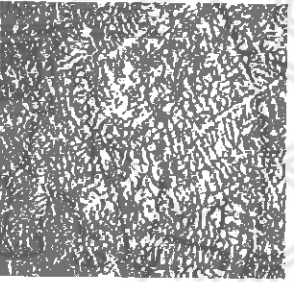
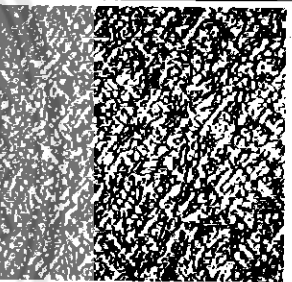
ตารางที่ ก.4 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 6 โดย  
น้ำหนักของทองแดง

|                               | จุดที่ 1                                                                           | จุดที่ 2                                                                            | จุดที่ 3                                                                             |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนบน   |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนกลาง |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนล่าง |  |  |  |

ตารางที่ ก.5 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 8 โดยน้ำหนักของทองแดง

|                               | จุดที่ 1                                                                           | จุดที่ 2                                                                            | จุดที่ 3                                                                             |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนบน   |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนกลาง |   |   |   |
| ชิ้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนล่าง |  |  |  |

ตารางที่ ก.6 ผลการศึกษาโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่อัตราผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง

|                               | จุดที่ 1                                                                           | จุดที่ 2                                                                            | จุดที่ 3                                                                             |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ชั้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนบน   |   |   |   |
| ชั้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนกลาง |   |   |   |
| ชั้นส่วน<br>ทดสอบ<br>ส่วนล่าง |  |  |  |



ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงบันทึกค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียม-ทองแดงที่อัตรา  
ส่วนผสมร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักของทองแดง

|             | Pure<br>Aluminium<br>HRB |      |      | 2% wt Cu<br>HRB |      |      | 4% wt Cu<br>HRB |      |      | 6% wt Cu<br>HRB |      |      | 8% wt Cu<br>HRB |      |      | 10% wt Cu<br>HRB |      |      |
|-------------|--------------------------|------|------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|------------------|------|------|
| ตำแหน่ง     | 1                        | 2    | 3    | 1               | 2    | 3    | 1               | 2    | 3    | 1               | 2    | 3    | 1               | 2    | 3    | 1                | 2    | 3    |
| บน          | 32                       | 53   | 61   | 35              | 51   | 53   | 70.5            | 70   | 72   | 67.5            | 71.5 | 76   | 69              | 80.5 | 75.5 | 81.3             | 75   | 81   |
| กลาง        | 43                       | 58   | 54   | 61              | 63   | 49   | 32              | 66   | 69   | 66.5            | 73.5 | 69   | 34.5            | 72   | 82   | 70               | 80   | 88   |
| ล่าง        | 37                       | 62   | 60   | 26              | 60   | 65   | 63              | 72   | 72.5 | 78              | 74.5 | 77   | 10.5            | 80   | 82.5 | 58               | 85   | 82   |
| ผลเฉลี่ยจุด | 37.3                     | 57.7 | 58.3 | 40.7            | 58.0 | 55.7 | 55.2            | 69.3 | 71.2 | 70.7            | 73.2 | 74.0 | 38.0            | 77.5 | 80.0 | 69.8             | 80.0 | 83.7 |
| ผลเฉลี่ยรวม | 51.11                    |      |      | 51.44           |      |      | 65.22           |      |      | 72.61           |      |      | 65.17           |      |      | 78               |      |      |

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายอนันต์ ชัยทรัพย์มงคล  
ภูมิลำเนา 11 หมู่ 15 ต. บางหญ้าแพรก อ. พระประแดง  
จ. สมุทรปราการ

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดทรงธรรม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 6  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: watsadusad@hotmail.com



ชื่อ นายเฉลิมพล พังแสงสุ  
ภูมิลำเนา 365/9 หมู่ 4 ต.ธานี อ. เมือง  
จ. สุโขทัย

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุโขทัย  
วิทยาคม จ.สุโขทัย
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 5  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: ty\_fruity@hotmail.com