



การศึกษาอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดน้ำโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วย  
แรงดันสูง ที่มีผลต่อข้อบกพร่องเชิงปริมาตรโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของ  
อะลูมิเนียมผสม เอ 332 ในชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์

A STUDY OF POURING TEMPERATURE AND INJECTION VELOCITY  
IN HIGH PRESSURE DIE CASTING PROCESS ON VOLUME DEFECTS  
BY FINITE ELEMENT METHOD OF A332 ALUMINIUM ALLOYS  
IN MOTORCYCLE PISTON

นายนพพล บุคคะวัน รหัส 52363301  
นายอนุกุล ยางสันเทียะ รหัส 52363349  
นายวุดริชัย ขมเล็ก รหัส 52363486

|                              |
|------------------------------|
| ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์    |
| - 1 ต.ค. 2556                |
| วันที่รับ...../...../.....   |
| เลขทะเบียน..... 16922678     |
| เลขเรียกหนังสือ..... มง      |
| มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ๑๗๖ ๙ |

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ปีการศึกษา 2555



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษาอุณหภูมิและความเร็วฉีดน้ำโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วย  
แรงดันสูง ที่มีผลต่อข้อบกพร่องเชิงปริมาตรโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ  
อะลูมิเนียมผสม เอ 332 ในชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์


ผู้ดำเนินโครงการ นายนพพล บุคคะวัน รหัส 52363301  
นายอนุกุล ยางสันเทียะ รหัส 52363349  
นายวุฒธิชัย ขมเล็ก รหัส 52363486


ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์  
ที่ปรึกษาร่วมโครงการ อาจารย์วรวิทย์ จิรรัฐติเจริญ

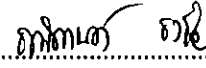
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ  
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ


ปีการศึกษา 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

  
.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ทศพล ตริ์จิริราภาพงศ์)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)

|                         |   |              |               |
|-------------------------|---|--------------|---------------|
| ชื่อหัวข้อโครงการงาน    | การศึกษาอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดน้ำโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ที่มีผลต่อข้อบกพร่องเชิงปริมาตรโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของอะลูมิเนียมผสม เอ 332 ในชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ |              |               |
| ผู้ดำเนินโครงการงาน     | นายนพพล   | บุศกะวัน     | รหัส 52363301 |
|                         | นายอนุกุล   | ยางสันเทียะ  | รหัส 52363349 |
|                         | นายวุฒิชัย  | ชมเล็ก       | รหัส 52363486 |
| ที่ปรึกษาโครงการงาน     | อาจารย์กฤษณา  | พูลสวัสดิ์   |               |
| ที่ปรึกษาร่วมโครงการงาน | อาจารย์วรวิทย์  | จิรัฐติเจริญ |               |
| สาขาวิชา                | วิศวกรรมวัสดุ   |              |               |
| ภาควิชา                 | วิศวกรรมอุตสาหการ   |              |               |
| ปีการศึกษา              | 2555  |              |               |

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดรูพรุนและการหดตัว ในชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ที่ทำจากอะลูมิเนียมผสม เอ 332 ในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูงโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิเทที่ 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส และความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที พบว่า ปัจจัยด้านอุณหภูมิเทและความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะที่กล่าวมาข้างต้น ไม่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มชิ้นงาน และระยะเวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ โดย ณ ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเทสูงขึ้นจะใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวสูงชันด้วย สำหรับชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเท 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส น้ำโลหะจะใช้ระยะเวลาในการเติมเต็มชิ้นงานน้อยลง เมื่อความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะสูงขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงขอแสดงความขอบพระคุณบุคคลผู้มีพระคุณ โดยเฉพาะ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำทั้งทางด้านภาคทฤษฎี ภาคปฏิบัติ รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนดูแลติดตามโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์ อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ และ อาจารย์ธนิกันต์ ธงชัย ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างวิชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ประสิทธิ์ประสานวิชาความรู้ และอบรมสั่งสอนให้ผู้จัดทำโครงการเป็นคนดีของสังคม

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยสนับสนุนค่าใช้จ่ายและให้กำลังใจตลอดมา จนสามารถทำโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความรัก คำปรึกษา และความช่วยเหลือขณะที่ศึกษาและทำโครงการเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การดูแลตลอดการทำโครงการจนสำเร็จการศึกษา หากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ ขอมอบความดีให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายนพพล บุคคะวัน

นายนุกูล ยางสันเทียะ

นายวุฒิชัย ชมเล็ก

มีนาคม 2556

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| ใบรับรองปริญญาโท.....                                       | ก    |
| บทคัดย่อ.....   | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ค    |
| สารบัญ.....   | ง    |
| สารบัญตาราง.....  | ฉ    |
| สารบัญรูป.....  | ช    |
| <br>  |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 หลักการและเหตุผล.....                                   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....                             | 2    |
| 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output) .....                         | 2    |
| 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....                      | 2    |
| 1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....                           | 2    |
| 1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....                          | 2    |
| 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ .....                        | 3    |
| 1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....                      | 3    |
| <br>  |      |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....                       | 4    |
| 2.1 ลูกสูบลูกจักรยานยนต์ .....                              | 4    |
| 2.2 การหล่อโลหะ.....  | 5    |
| 2.3 ข้อบกพร่องและปัจจัยที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อ ..... | 8    |
| 2.4 อะลูมิเนียมผสม .....                                    | 19   |
| 2.5 แม่พิมพ์ .....  | 22   |
| 2.6 ไฟไนต์เอเลเมนต์ .....                                   | 24   |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                              | 29   |
| <br>  |      |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ .....                          | 31   |
| 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินโครงการ .....                | 32   |
| 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....                          | 32   |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....                              | 34   |
| 4.1 การสร้างชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ 3 มิติ.....                   | 34   |
| 4.2 การออกแบบระบบทางรีดน้ำโลหะและการวางตำแหน่งชิ้นงานในแม่พิมพ์..... | 35   |
| 4.3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....                              | 41   |
| <br>   |      |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....  | 54   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....  | 54   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 54   |
| 5.3 ปัญหาที่พบในการทดลอง.....  | 54   |
| <br>   |      |
| เอกสารอ้างอิง.....   | 56   |
| ภาคผนวก ก.....   | 58   |
| ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....   | 61   |

## สารบัญญัตราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ.....  | 3    |
| 2.1 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม.....  | 19   |
| 2.2 มาตรฐานอะลูมิเนียม - ซิลิคอนที่นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมงานหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนักโดยประมาณ)..... | 21   |
| 2.3 องค์ประกอบทางเคมีและมาตรฐานแม่พิมพ์ เอสเคดี 61.....  | 22   |
| 2.4 สมบัติทั่วไปของแม่พิมพ์ถาวร เอสเคดี 61.....  | 23   |
| 3.1 องค์ประกอบทางเคมีอะลูมิเนียมผสม เอ 332 (ร้อยละโดยน้ำหนักโดยประมาณ).....                            | 31   |



## สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ลูกสูบลูกจักรยานยนต์ลักษณะต่างๆ.....                                 | 4    |
| 2.2 กระบวนการหล่อแบบอย่างร้อน.....                                       | 7    |
| 2.3 กระบวนการหล่อแบบอย่างเย็น.....                                       | 8    |
| 2.4 ลักษณะชิ้นงานไม่เต็มโพรงแม่แบบ.....                                  | 9    |
| 2.5 ลักษณะชิ้นงานเกิดร่องน้ำโลหะ.....                                    | 9    |
| 2.6 ลักษณะชิ้นงานไม่เต็มโพรงแม่แบบ.....                                  | 10   |
| 2.7 ลักษณะชิ้นงานเกิดร่องน้ำโลหะ.....                                    | 10   |
| 2.8 ลักษณะชิ้นงานเกิดโพรงแก๊ส.....                                       | 11   |
| 2.9 ลักษณะชิ้นงานเกิดรูเข็ม.....   | 11   |
| 2.10 ลักษณะชิ้นงานเกิดรูพรุน.....  | 12   |
| 2.11 ลักษณะชิ้นงานเกิดการหดตัวภายใน.....                                 | 12   |
| 2.12 ลักษณะชิ้นงานเกิดรอยแตกรอยร้าว.....                                 | 13   |
| 2.13 ส่วนต่างๆ ของระบบทางวิ่งน้ำโลหะในแม่พิมพ์.....                      | 14   |
| 2.14 ลักษณะรูเทที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดความยาว.....                | 14   |
| 2.15 ลักษณะของรูเข้าน้ำโลหะแบบใบพัด.....                                 | 16   |
| 2.16 ลักษณะของรูเข้าน้ำโลหะแทนเจนเซียล.....                              | 17   |
| 2.17 ลักษณะของรูเข้าน้ำโลหะแบบวงแหวน.....                                | 17   |
| 2.18 ลักษณะหน้าตัดของรูเข้าน้ำโลหะ.....                                  | 18   |
| 2.19 ลักษณะรูล้นของชิ้นงานในกระบวนการหล่อฉีดแรงดันสูง.....               | 18   |
| 2.20 โปรแกรมโซลิดเวิร์คช่วยในการจำลองชิ้นงาน 3 มิติ.....                 | 27   |
| 2.21 โปรแกรมโปรคาสแสดงอุณหภูมิและการเย็นตัวบนชิ้นงาน.....                | 28   |
| 2.22 แถบสีสำหรับการตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อ..... | 29   |
| 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....                                   | 31   |
| 4.1 การวัดขนาดส่วนต่างๆของลูกสูบลูกจักรยานยนต์.....                      | 34   |
| 4.2 การระบุขนาดส่วนต่างๆของลูกสูบลูกจักรยานยนต์.....                     | 34   |
| 4.3 ลักษณะชิ้นงานลูกสูบลูกจักรยานยนต์ในรูปแบบ 3 มิติ.....                | 35   |
| 4.4 ลักษณะแม่พิมพ์ของเครื่องหล่อฉีดแรงดันสูง.....                        | 35   |
| 4.5 ลักษณะรูเทน้ำโลหะในแม่พิมพ์ (ชิ้น A).....                            | 36   |
| 4.6 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งน้ำโลหะแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....        | 37   |



## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 4.7    | ลักษณะพื้นที่หน้าตัดของรูเข้าน้ำโลหะ..... 38  |
| 4.8    | ลักษณะพื้นที่หน้าตัด และระยะด้านต่างๆ ของรูเข้าน้ำโลหะ..... 39  |
| 4.9    | ระบบทางวิ่งน้ำโลหะของชิ้นงานในแม่พิมพ์ ในลักษณะ 3 มิติ..... 39  |
| 4.10   | การวางตำแหน่งของชิ้นงานในแม่พิมพ์..... 40   |
| 4.11   | ทางวิ่งน้ำโลหะในแม่พิมพ์..... 40  |
| 4.12   | ลักษณะชิ้นงานจากการจำลองการหล่อที่มีอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่แตกต่างกัน ที่ความเร็ว<br>ฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที..... 41                    |
| 4.13   | แถบสีแสดงอุณหภูมิน้ำโลหะจากการจำลองการหล่อด้วยอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส<br>ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที..... 42              |
| 4.14   | ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงานกับอุณหภูมิเทน้ำโลหะ<br>ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที..... 43        |
| 4.15   | แถบสีสำหรับการตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อ..... 43  |
| 4.16   | การตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะ<br>ต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที..... 44        |
| 4.17   | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขณะน้ำโลหะเติมเต็มชิ้นงานกับอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่<br>แตกต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที..... 45 |
| 4.18   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเป็นของแข็งของอะลูมิเนียม เอ 332<br>กับอุณหภูมิน้ำโลหะ..... 45  |
| 4.19   | ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานกับอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ที่ความ<br>เร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที..... 46               |
| 4.20   | ลักษณะชิ้นงานจากการจำลองการหล่อที่มีอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่แตกต่างกัน ที่ความ<br>เร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที..... 47                      |
| 4.21   | ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงานกับอุณหภูมิเทน้ำโลหะ<br>ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที..... 47          |
| 4.22   | ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขณะน้ำโลหะเติมเต็มชิ้นงานกับอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่<br>แตกต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที..... 48   |
| 4.23   | การตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะ<br>ต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที..... 48          |
| 4.24   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเป็นของแข็งของอะลูมิเนียม เอ 332<br>กับอุณหภูมิน้ำโลหะ..... 49  |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานกับอุณหภูมิเหน้าโลหะ ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที.....          | 50   |
| 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส.....       | 51   |
| 4.27 ลักษณะชิ้นงานจากการจำลองการหล่อที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิเหน้าโลหะ 660 องศาเซลเซียส.....           | 51   |
| 4.28 การตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะต่างกัน ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส..... | 52   |
| 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส.....   | 52   |
| 4.30 ลักษณะชิ้นงานจากการจำลองการหล่อที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิเหน้าโลหะ 780 องศาเซลเซียส.....           | 53   |
| 4.31 การตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะต่างกัน ที่อุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส..... | 53   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันอุตสาหกรรมหล่อโลหะมีการขยายตัวสูงขึ้น และกำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีส่วนสนับสนุน และนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านอื่นๆ หลายด้าน อาทิ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักร อุตสาหกรรมด้านโครงสร้างต่างๆ ทั้งนี้ เพราะงานหล่อโลหะมีความสามารถในการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน ผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก อีกทั้งยังมีกระบวนการผลิตที่หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตาม งานหล่อโลหะยังมีข้อเสียหรือข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานหลายประการ อาทิ การเกิดรูพรุน การเกิดรูเข็ม เกิดการหดตัวของชิ้นงานมากเกินไป ฯลฯ ปัญหาเหล่านี้เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อุตสาหกรรมหล่อโลหะไม่สามารถพัฒนาได้ถึงขีดสุด ซึ่งในปัจจุบันพบว่ามีสถานประกอบการหลายแห่ง ได้มีการนำเทคโนโลยีเข้ามามีส่วนช่วยในการพัฒนาอุตสาหกรรมหล่อโลหะเพิ่มสูงขึ้น เพื่อลดปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับลูกค้าไปพร้อมๆ กัน

การใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ถือเป็นการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัย เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ โดยเฉพาะกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงและมีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อเสียในด้านต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงมีสถานประกอบการหลายแห่งกำลังให้ความสนใจ และนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับงานหล่อโลหะเพิ่มมากขึ้น จุดเด่นที่น่าสนใจของการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ คือ สถานประกอบการสามารถรับรู้ถึงข้อบกพร่องของชิ้นงานก่อนทำการหล่อชิ้นงานจริง โดยแบบจำลองดังกล่าวจะทำหน้าที่จำลองลักษณะการหล่อชิ้นงานในแม่พิมพ์ที่ผู้ใช้งานกำหนดซึ่งข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองนี้ จะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับให้ผู้ใช้งานนำไปวิเคราะห์เพื่อแก้ไขปัญหาก็อาจจะเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี ซึ่งการใช้วิธีนี้จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการหล่อชิ้นงานลดลง และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังกล่าวยังสามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ อาทิ อุณหภูมิที่ใช้ในการเทน้ำโลหะ ความเร็วฉีดที่ใช้ในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ส่วนผสมของน้ำโลหะ ชนิดของแม่พิมพ์ และระบบทางวุ้นน้ำโลหะ ได้อย่างสะดวกรวดเร็ว นับเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้งานหล่อโลหะมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น สร้างความเชื่อมั่นให้กับงานด้านงานหล่อได้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมหล่อโลหะให้มีความก้าวหน้าอีกด้วย

งานปริญญานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาเพื่อวิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่องเชิงปริมาตร ที่อาจจะเกิดขึ้นในขณะหล่อโลหะอะลูมิเนียมผสม เอ 332 ในชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ ซึ่งมีปัจจัยหลักที่จะศึกษา ได้แก่ ปัจจัยด้านอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดน้ำโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูงของอะลูมิเนียมผสม เอ 332 โดยการทำแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทของอะลูมิเนียมผสม เอ 332 ในชิ้นงานลูกสูบ จักรยานยนต์ที่มีผลต่อข้อบกพร่องเชิงปริมาตร

1.2.2 เพื่อศึกษาการปรับเปลี่ยนความเร็วฉีดน้ำโลหะ ในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ของอะลูมิเนียมผสม เอ 332 ในชิ้นงานลูกสูบจักรยานยนต์ที่มีผลต่อข้อบกพร่องเชิงปริมาตร

## 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

ได้ทราบตำแหน่งที่เกิดข้อบกพร่องเชิงปริมาตรในขณะกระบวนการหล่อ ที่เกิดจากอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดน้ำโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง

## 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดน้ำโลหะ ในกระบวนการหล่อฉีด ด้วยแรงดันสูง มีผลต่อข้อบกพร่องเชิงปริมาตร

## 1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 โปรแกรมที่ใช้จำลองกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง คือ โปรแกรมโปรคาส (Procast)

1.5.2 โปรแกรมที่ช่วยในการสร้างแม่แบบลูกสูบรถจักรยานยนต์ 3 มิติ คือ โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solid Work)

1.5.3 ใช้กระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง (High Pressure Die Casting) โดยออกแบบแม่พิมพ์ถาวรที่ทำจากเหล็กกล้า เอสเคดี 61 (SKD 61)

1.5.4 โพรงแม่แบบ (Mold Cavity) ที่ใช้ในการทดสอบ คือ แม่แบบลูกสูบ (Piston) ของรถจักรยานยนต์ที่ทำจากอะลูมิเนียมผสม เอ 332

1.5.5 ศึกษาข้อบกพร่องเชิงปริมาตร ได้แก่ รูพรุน (Blow holes) และการหดตัวภายนอก (Shrinkage Defect)

1.5.6 อุณหภูมิเทที่มีค่าแตกต่างกัน 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส

1.5.7 การฉีดน้ำโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ใช้ความเร็วฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที และ 1 เมตรต่อวินาที

## 1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



## บทที่ 2

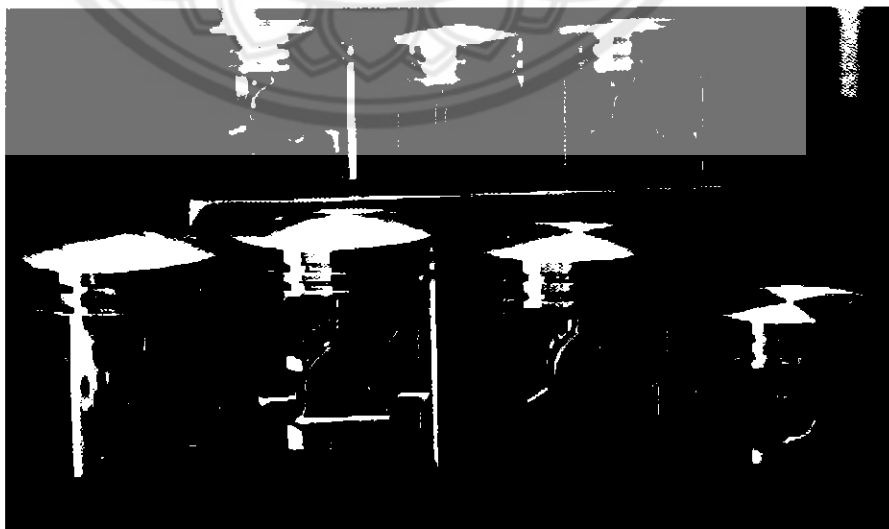
### หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้กล่าวถึงการศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิและความเร็วฉีดน้ำโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง เพื่อวิเคราะห์การเกิดข้อบกพร่องเชิงปริมาตรที่อาจเกิดขึ้นในขณะหล่อโลหะ เป็นการศึกษาที่ต้องอาศัยข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการงาน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้ถูกรวบรวมไว้ ดังนี้

#### 2.1 ลูกสูบรถจักรยานยนต์ (Piston)

ลูกสูบ (Piston) เป็นชิ้นส่วนภายในรถจักรยานยนต์ที่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงภายในกระบอกสูบอยู่ตลอดเวลาที่เครื่องยนต์ทำงาน หน้าที่ที่สำคัญที่สุดของลูกสูบคือ รับแรงกดดันจากการเผาไหม้และส่งกำลังไปสู่เพลาคือเหวี่ยงโดยผ่านก้านสูบ ลูกสูบจึงได้รับความร้อนกระทำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น ลูกสูบจะต้องสามารถทนต่อการทำงานที่รอบสูงเป็นเวลานานๆ ได้ โดยวัสดุที่นิยมใช้ในการผลิต ได้แก่ เหล็กหล่อ (Cast Iron) และเหล็กกล้าผสม (Steel Alloys) แต่ที่นิยมมากที่สุด คือ อะลูมิเนียมผสม เนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่าเหล็กหล่อและเหล็กผสม 2 ถึง 3 เท่า อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น

กระบวนการผลิตลูกสูบรถจักรยานยนต์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ กระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตลูกสูบได้ในอัตราที่สูง อีกทั้งยังได้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบและมีความเที่ยงตรงในด้านขนาด แต่มีข้อจำกัดในเรื่องต้นทุนการผลิต และปัญหาการเกิดข้อบกพร่องระหว่างกระบวนการ ทำให้การผลิตไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร



รูปที่ 2.1 ลูกสูบรถจักรยานยนต์ลักษณะต่างๆ

ที่มา: <http://www.pistonpiston.com/engines-pistons.html>

## 2.2 การหล่อโลหะ (Casting)

กรรมวิธีการหล่อ (Casting Process) หมายถึงการเทน้ำโลหะเข้าไปในโพรงแม่แบบ (Mold Cavity) แล้วปล่อยให้แข็งตัวมีรูปร่างตามที่ต้องการ หรือหากจะให้ความหมายที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น จะหมายถึง การเริ่มต้นให้ความร้อนเพื่อหลอมโลหะให้มีสภาพเป็นของเหลว (Melting) จากนั้นทำการปรับปรุงน้ำโลหะให้มีส่วนผสมทางเคมีที่ต้องการ และทำการเทน้ำโลหะ (Pouring) ลงในโพรงแม่แบบ จากนั้นปล่อยให้โลหะเย็นตัวลงจนเกิดการแข็งตัว (Solidification) จะได้รูปร่างชิ้นงานตามที่ต้องการ (ณรงค์ศักดิ์, 2553) ซึ่งการหล่อสามารถแบ่งได้หลายแบบดังนี้

### 2.2.1 การหล่อด้วยแบบหล่อทราย (Sand Casting)

การหล่อด้วยแบบทราย เป็นกระบวนการที่ใช้กันมานานอย่างแพร่หลาย สามารถผลิตชิ้นงานหล่อตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ต้นทุนในการผลิตต่ำ ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ ผิวของชิ้นงานไม่เรียบ มีความแม่นยำต่ำ อัตราการผลิตต่ำ และต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิต ชิ้นงานหล่อที่ผลิตโดยแบบหล่อทราย เช่น เครื่องยนต์ ใบพัดเทอร์ไบด์ ตลอดจนอุปกรณ์ทางการแพทย์ อื่นๆ อีกหลายชนิด แบบหล่อทรายสามารถใช้หล่อโลหะได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นเหล็กหล่อ เหล็กกล้า อะลูมิเนียมผสม ทองแดงผสม ตลอดจนนิกเกิล หรือไทเทเนียม เป็นต้น

### 2.2.2 การหล่อด้วยแบบหล่อเปลือกบาง (Shell Mold)

การหล่อด้วยแบบหล่อเปลือกบาง เป็นวิธีทำแบบที่ได้รับความนิยม ทั้งนี้เพราะชิ้นงานที่หล่อด้วยวิธีนี้ จะมีผิวเรียบ ขนาดชิ้นงานสุดท้ายใกล้เคียงกับชิ้นงานจริง และราคาประหยัด ชิ้นงานหล่อที่ผลิตจากกรรมวิธีนี้ ได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขนาดเล็กที่ต้องการความเที่ยงตรงของขนาดสูง เช่น ฝาครอบชุดเฟืองเกียร์ ข้อต่อชิ้นส่วนต่างๆ และยังมีนิยมใช้ทำใส่แบบอีกด้วย

### 2.2.3 การหล่ออินเวสเมนต์ (Investment Casting)

การหล่ออินเวสเมนต์ หรือเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการหล่อขี้ผึ้งหาย (Lost - Wax Process) เป็นกระบวนการที่ใช้หล่อชิ้นงานที่มีขนาดเล็กตั้งแต่ 1 กรัมไปจนถึง 5 กิโลกรัม ขนาดชิ้นงานมีความเที่ยงตรงสูง และผิวของชิ้นงานหลังการหล่อเสร็จมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียของกระบวนการ คือ ราคาของกระบวนการผลิตสูง และมีอัตราการผลิตต่ำ ชิ้นงานหล่อที่ผลิตโดยการหล่ออินเวสเมนต์ เช่น เครื่องประดับ เฟือง วาล์ว ใบพัดเทอร์ไบด์ของเครื่องยนต์เจต ลูกเบี้ยว เป็นต้น

### 2.2.4 การหล่อแม่พิมพ์ถาวร (Permanent Mold)

การหล่อขึ้นรูปแม่พิมพ์ถาวร เป็นกระบวนการที่มีการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ ดังนั้นการหล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวรจึงเหมาะกับการผลิตชิ้นงานหล่อที่มีปริมาณการผลิตสูง ชิ้นงานมีความแม่นยำสูง และมีความแข็งแรงสูง

#### 2.2.4.1 การหล่อแบบลงแม่พิมพ์ถาวร (Gravity Die Casting)

การหล่อแบบหน้าโลหะลงแม่พิมพ์ถาวร เป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีอัตราการผลิตสูง ผลิตชิ้นงานปริมาณมาก ผิวของชิ้นงานมีความแม่นยำสูง แต่จะมีข้อจำกัดด้านขนาด รูปร่าง และข้อจำกัดทางวัสดุ ซึ่งการหล่อแบบหน้าโลหะลงแม่พิมพ์ถาวรจะเหมาะกับโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เนื่องจากน้ำโลหะมีการไหลตัวที่ดี โดยส่วนมากแม่พิมพ์ทำจากเหล็กหล่อเทา เหล็กกล้าบรอนซ์ แกรไฟต์ หรือวัสดุชนิดอื่น ชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากแม่พิมพ์ถาวร เช่น หัวกระบอกสูบ และชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น

#### 2.2.4.2 การหล่อฉีดด้วยแรงดันต่ำ (Low Pressure Die Casting)

กระบวนการฉีดด้วยแรงดันต่ำ เป็นวิธีที่น้ำโลหะถูกอัดเข้าสู่แม่พิมพ์โดยใช้แรงดันต่ำ แรงดันที่ใช้ปกติประมาณ 34.5–103.5 กิโลปาสคาล การฉีดด้วยแรงดันต่ำ โดยมากใช้แม่พิมพ์เหล็กสำหรับอะลูมิเนียม และแม่พิมพ์แกรไฟต์สำหรับเหล็ก การหล่อด้วยวิธีนี้ใช้กับชิ้นงานที่มีความบาง รูปร่างซับซ้อน ขนาดชิ้นงานมีความแม่นยำ และต้องการผิวสำเร็จชิ้นงานที่เรียบ

#### 2.2.4.3 การหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง (High Pressure Die Casting)

กระบวนการฉีดด้วยแรงดันสูง เป็นวิธีที่น้ำโลหะถูกอัดเข้าสู่แม่พิมพ์โดยใช้แรงดันและอุณหภูมิสูง การหล่อด้วยวิธีนี้ใช้กับชิ้นงานที่มีความบาง รูปร่างซับซ้อน ขนาดชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง และต้องการผิวสำเร็จของชิ้นงานที่เรียบ สามารถผลิตได้ปริมาณมากในเวลาสั้นๆ การฉีดด้วยแรงดันสูงโดยส่วนมากนำมาใช้กับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น อะลูมิเนียมผสมสังกะสีผสม เป็นต้น แรงดันที่ใช้ปกติประมาณ 34.45 เมกะปาสคาลหรือมากกว่า อัตราการผลิตขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน ลักษณะของการออกแบบที่มีความซับซ้อน ความหนาและสมบัติของโลหะหล่อ เป็นต้น

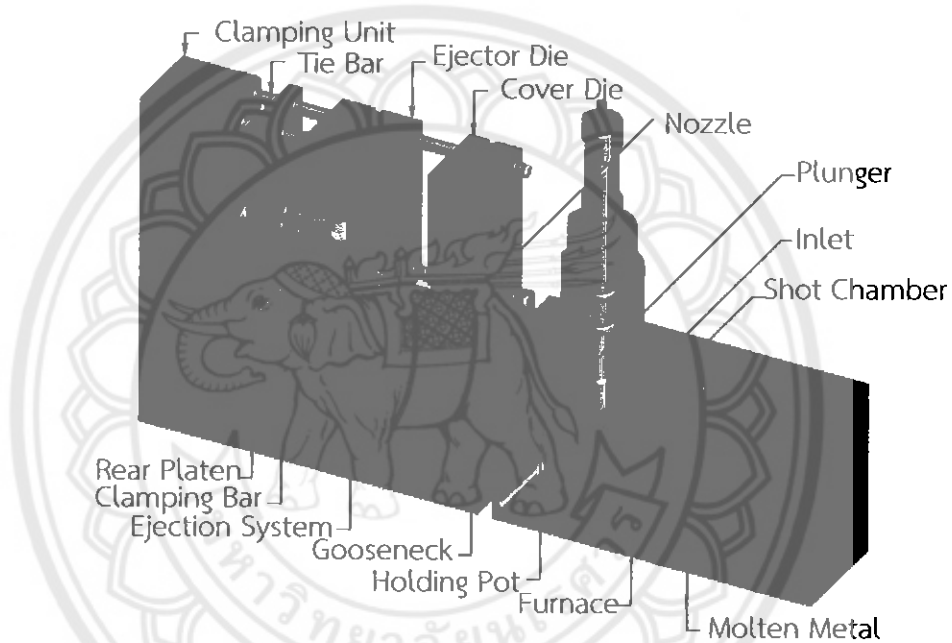
ข้อจำกัดของกระบวนการนี้ คือ ต้นทุนในการผลิตสูง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทำแม่พิมพ์สูง แต่ถ้าผลิตในจำนวนมากๆ ต้นทุนในการผลิตจะต่ำ อีกทั้งระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการนี้ยาวนาน เนื่องจากเสียเวลาในการทำแม่พิมพ์ แต่ถ้าแม่พิมพ์สำเร็จแล้ว เวลาที่ใช้ในการผลิตจะสั้นมาก อัตราการผลิตจึงสูง ส่วนมากนิยมใช้ขึ้นรูปโลหะนอกกลุ่มเหล็ก หรือโลหะที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ชิ้นงานที่ได้มีความหนาไม่มาก และมักพบโพรงอากาศภายในชิ้นงาน เนื่องจากกระบวนการนี้ มีการใช้ความดัน และความเร็วในการผลิต ส่งผลให้น้ำโลหะไหลเข้าแม่พิมพ์แบบปั่นป่วน น้ำโลหะจึงดักจับกับอากาศในแม่พิมพ์ได้มากขึ้นงานที่ได้จึงมีโพรงอากาศ ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานไม่ดีนัก และไม่สามารถเพิ่มสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ เนื่องจากมีอากาศภายในชิ้นงาน ถ้าให้ความร้อน อากาศที่อยู่ภายในจะดันให้ชิ้นงานบวมหรือแตกหักได้ (กนก-กาญจน์, 2553)

โดยทั่วไปกระบวนการหล่อฉีดแรงดันสูง แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การหล่อแบบอ่างร้อน (Hot Chamber Die Casting) และการหล่อแบบอ่างเย็น (Cold Chamber Die Casting)



### ก. การหล่อแบบอ่างร้อน

วิธีการนี้จะมีอ่างหลอมโลหะที่ติดอยู่กับตัวเครื่องจักร และมีลูกสูบ (Plunger) เป็นตัวดันน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยเมื่อแม่พิมพ์ปิดสนิทลูกสูบจะถูกดึงขึ้นเพื่อปล่อยให้ น้ำโลหะไหลเข้าสู่ช่อง จากนั้นลูกสูบเคลื่อนที่ลงเพื่อดันน้ำโลหะเข้าแม่พิมพ์เมื่อน้ำโลหะแข็งตัว ลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นแม่พิมพ์จะถูกเปิดออก และจะดันชิ้นงานออกมา แสดงดังรูปที่ 2.2 วิธีการนี้เหมาะสมสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำประเภท สังกะสี ดีบุก ตะกั่ว เป็นต้น เนื่องจากอ่างหลอมโลหะอยู่ติดกับเครื่องจักร ส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำโลหะสูญเสีย น้อย นอกจากนี้โลหะที่ใช้การขึ้นรูปต้องไม่ทำปฏิกิริยากับลูกสูบ หรืออุปกรณ์ที่ทำการฉีด (วิหาร, 2548)

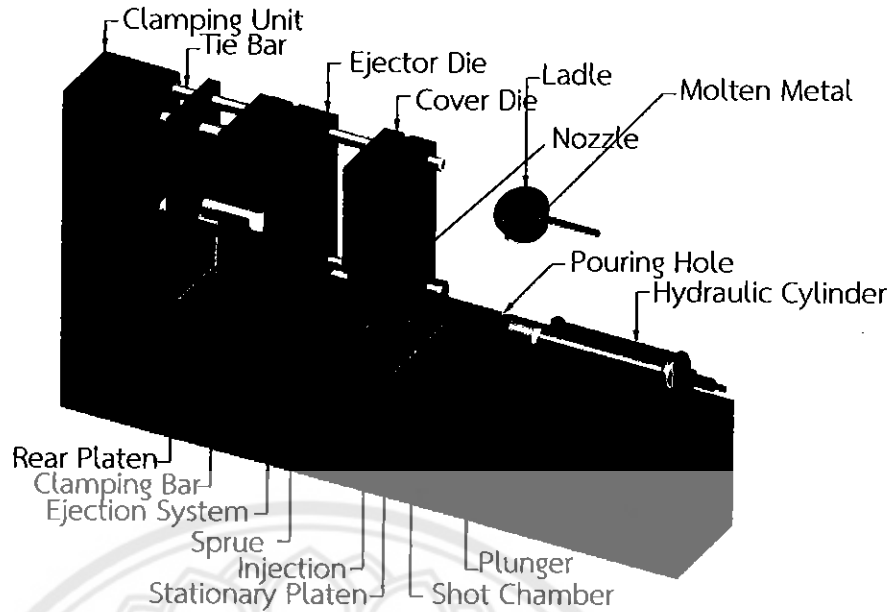


รูปที่ 2.2 กระบวนการหล่อแบบอ่างร้อน (Hot Chamber Equipment Scheme)

ที่มา: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting>

### ข. การหล่อแบบอ่างเย็น

วิธีการนี้จะมีอ่างหลอมโลหะแยกออกจากตัวเครื่องจักร โดยน้ำโลหะถูกเทลงสู่ช่องเท (Pouring Hole) จากนั้นลูกสูบจะเคลื่อนที่เข้าเพื่อดันน้ำโลหะเข้าแม่พิมพ์ แล้วอัดด้วยแรงดันระหว่าง 20 - 70 เมกะปาสคาล บางครั้งอาจสูงถึง 150 เมกะปาสคาล ลักษณะการทำงานของเครื่องอัดอาจมีแบบที่ทำการอัดในแนวนอนและแนวตั้ง เมื่อน้ำโลหะแข็งตัวแล้วลูกสูบจะถอยกลับมายังตำแหน่งเดิม แม่พิมพ์จะเปิดออก จากนั้นจะดันชิ้นงานออกมา แสดงดังรูปที่ 2.3 วิธีการนี้เหมาะสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงประเภท อะลูมิเนียม แมกนีเซียม ทองเหลือง และทองแดงผสม เนื่องจากต้องเสียเวลาดักน้ำโลหะมาเทลงช่องเท ส่งผลให้สูญเสียอุณหภูมิของน้ำโลหะมาก วิธีการนี้จึงทำงานช้ากว่าการหล่อแบบอ่างร้อน (วิหาร, 2548)



รูปที่ 2.3 กระบวนการหล่อแบบอ่างเย็น (Cold Chamber Equipment Scheme)

ที่มา: <http://www.custompartnet.com/wu/die-casting>

## 2.3 ข้อบกพร่องและปัจจัยที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องในงานหล่อ

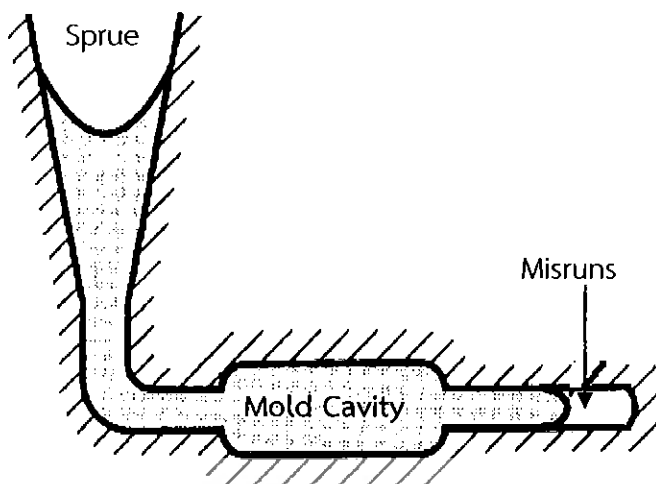
ในการผลิตชิ้นงานขึ้นรูปต่างๆ ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อโลหะถือเป็นชิ้นงานที่เกิดข้อบกพร่องมากที่สุด เนื่องจากการขึ้นรูปที่จำเป็นต้องอาศัยปัจจัยหลายด้านเป็นองค์ประกอบ เช่น อุณหภูมิ เหน้าโลหะ แรงดัน ฯลฯ ซึ่งการควบคุมปัจจัยต่างๆ ดังกล่าวเป็นไปได้ยาก ซึ่งกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง เป็นอีกกรรมวิธีหนึ่งที่พบการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานเป็นจำนวนมาก

### 2.3.1 ประเภทข้อบกพร่องในกระบวนการหล่อฉีดน้ำโลหะด้วยแรงดันสูง

#### 2.3.1.1 ความไม่สมบูรณ์ทางรูปร่าง (Imperfection of casting shape)

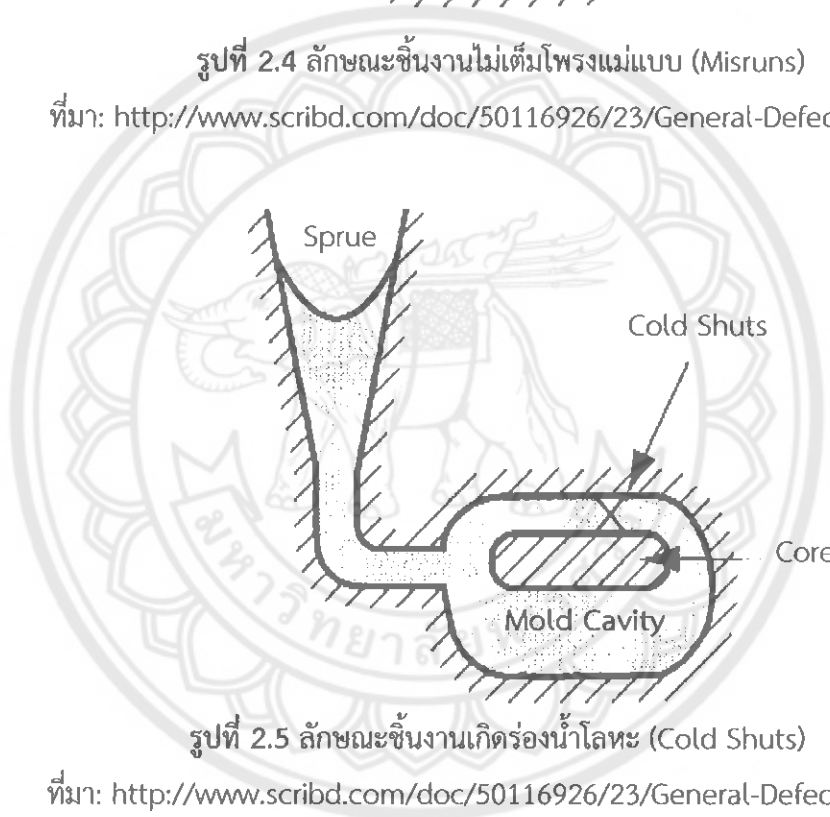
เป็นข้อบกพร่องที่มีสาเหตุหลักมาจากแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการหล่อฉีดขึ้นรูปด้วยแรงดันสูง ซึ่งมีลักษณะข้อบกพร่องต่างๆ ได้แก่ ชิ้นงานไม่เต็มโพรงแม่แบบ (Misruns) และชิ้นงานเกิดร่องน้ำโลหะ (Cold Shuts) แสดงดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งข้อบกพร่องทั้งสองนี้มีสาเหตุที่เกิดจากการไหลที่ไม่สมบูรณ์ หรือเกิดจากพื้นที่ในการไหลของน้ำโลหะไม่เพียงพอ

ความหนืดของน้ำโลหะเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องดังกล่าว ดังนั้น การหลอมน้ำโลหะก่อนทำการฉีดแม่พิมพ์อะลูมิเนียม จำเป็นจะต้องให้น้ำโลหะมีอุณหภูมิพอเหมาะที่จะทำการฉีด ไม่ว่าจะเป็นการฉีดในตอนแรก หรือการฉีดเติมเข้าไปเพื่อให้ น้ำโลหะไหลให้เต็มแม่พิมพ์ก็ตาม



รูปที่ 2.4 ลักษณะชิ้นงานไม่เต็มโพรงแม่แบบ (Misruns)

ที่มา: <http://www.scribd.com/doc/50116926/23/General-Defects-Misrun>

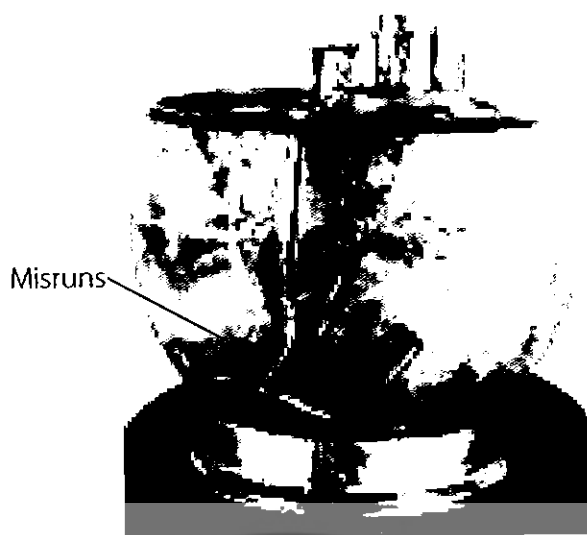


รูปที่ 2.5 ลักษณะชิ้นงานเกิดร่องน้ำโลหะ (Cold Shuts)

ที่มา: <http://www.scribd.com/doc/50116926/23/General-Defects-Misrun>

#### ก. ชิ้นงานไม่เต็มโพรงแม่แบบ (Misruns)

สามารถพบได้ง่ายเนื่องจากการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอ และการไหลที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำโลหะ น้ำโลหะบางส่วนแข็งตัวขัดขวางการไหลก่อนที่จะถึงทุกส่วนของชิ้นงานจะถูกฉีดให้เต็ม ตัวแปรที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องดังกล่าว ได้แก่ ความหนืดของน้ำโลหะ กำลังของเครื่องฉีดไม่เพียงพอ และเกิดการอุดตันของโลหะจากรอบการฉีดก่อนหน้านี้



รูปที่ 2.6 ลักษณะชิ้นงานไม่เต็มโพรงแม่แบบ (Misruns)

ที่มา: <http://www.themetalcasting.com/gating-design-mold-filling.html>

#### ข. ชิ้นงานเกิดร่องน้ำโลหะ (Cold Shuts)

เป็นข้อบกพร่องที่เกิดจากการไหลมาชนกันของน้ำโลหะในสองทิศทางหรือมากกว่า จากนั้นเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ชิ้นงานบริเวณนั้นเกิดเป็นร่องขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากการที่น้ำโลหะแข็งตัวเร็วเกินไป เนื่องจากการออกแบบทางวิ่งไม่ดี แรงดันจากการหล่อฉีดไม่เพียงพอ หรืออุณหภูมิเตาเกินไป



รูปที่ 2.7 ชิ้นงานเกิดร่องน้ำโลหะ (Cold Shuts)

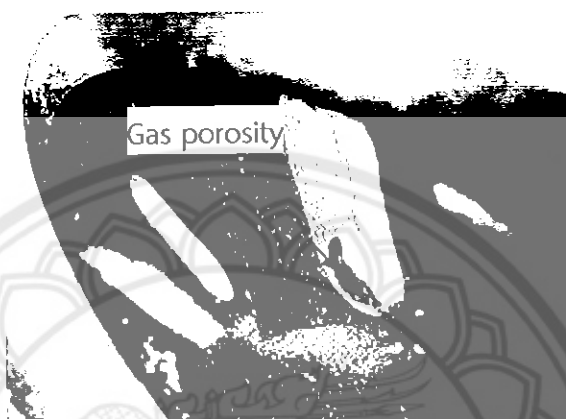
ที่มา: <http://www.themetalcasting.com/gating-design-mold-filling.html>

#### 2.3.1.2 ข้อบกพร่องของโครงสร้าง (Defect of structural)

เป็นข้อบกพร่องที่มีสาเหตุหลักมาจากโครงสร้างของชิ้นงานหลังการหล่อ เช่น เกรนภายในชิ้นงานหล่อมีความแข็งแรงสูง สมบัติทางเคมีไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การเกิดการรวมกันระหว่างออกซิเจนกับธาตุอื่นภายในชิ้นงานหล่อ เป็นต้น

### 2.3.1.3 ข้อบกพร่องจากแก๊ส (Gas Defect)

ก. การเกิดโพรงแก๊ส (Gas Porosity) เป็นการเกิดแก๊สในบางจุดของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.8 โพรงแก๊สที่เกิดขึ้นหลังการฉีดยึดบนผิวชิ้นงานนั้นสามารถพบได้บ่อยครั้ง ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการเย็นตัวไม่สมบูรณ์ หรือน้ำโลหะที่ไหลเข้าไปมีฟองอากาศติดไปด้วย เนื่องจากการหลอมเหลวน้ำโลหะที่อุณหภูมิสูงเกินไป ทำให้เกิดฟองอากาศที่ผิวหน้าของน้ำโลหะเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องดังกล่าวขึ้นได้

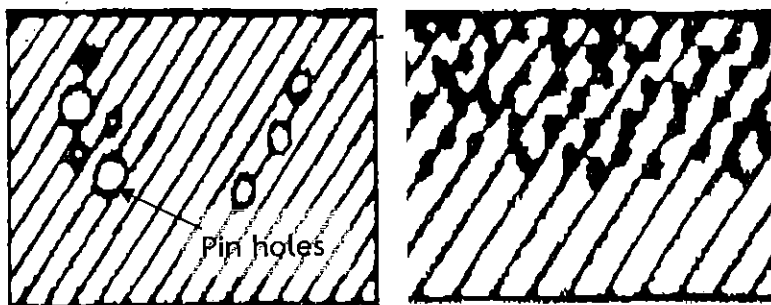


รูปที่ 2.8 ลักษณะชิ้นงานเกิดโพรงแก๊ส (Gas Porosity)

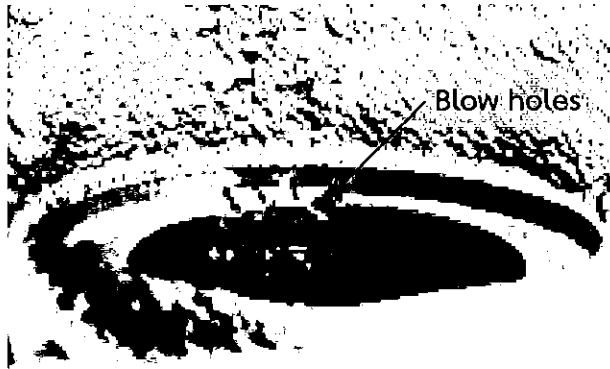
ที่มา: [http://en.wikipedia.org/wiki/Casting\\_defect](http://en.wikipedia.org/wiki/Casting_defect)

ข. รูเข็ม (Pin holes) มีลักษณะเป็นรูกลมขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร เป็นรูที่มีผิวด้านในเรียบ มักจะเกิดทั่วๆ ไปบนผิวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.9 มีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ต่ำเกินไป เกิดแก๊สระหว่างกระบวนการหล่อ ความดันของน้ำโลหะน้อยเกินไป

ค. รูพรุน (Blow holes) เป็นข้อบกพร่องที่พบบ่อยในงานหล่อโลหะ รูพรุนมักมีรูปร่างต่างๆ กัน อาจเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน เป็นโพรงภายใน หรือเป็นโพรงกลมอยู่ใต้ผิวชิ้นงานเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุของการเกิดรูพรุน ได้แก่ อุณหภูมิที่ต่ำเกินไป เกิดแก๊สระหว่างกระบวนการหล่อ และความเร็วฉีดน้ำโลหะที่สูงเกินไป ลักษณะของรูพรุนแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ลักษณะชิ้นงานเกิดรูเข็ม (Pin holes)



รูปที่ 2.10 ลักษณะชิ้นงานเกิดรูพรุน (Blow holes)

ที่มา: <http://www.impco-inc.com/sealants>

#### 2.3.1.4 ข้อบกพร่องภายนอก (External Defect)

ข้อบกพร่องลักษณะนี้เป็นข้อบกพร่องที่สามารถมองเห็นได้โดยง่าย เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในกระบวนการหล่อโลหะ ซึ่งสามารถแบ่งได้ ดังนี้

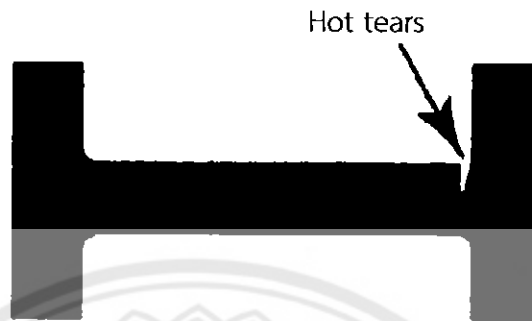
ก. การหดตัวของโลหะ (Shrinkage Defect) ความบกพร่องนี้เกิดจากการที่แรงดันของน้ำโลหะที่จะไหลไปทั่วแม่พิมพ์ไม่เพียงพอ เมื่อน้ำโลหะเย็นตัวลงก็จะทำให้ชิ้นส่วนไม่เต็มแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.11 จึงเกิดการหดตัวที่ไม่สมบูรณ์หลังการฉีดน้ำโลหะ สาเหตุอีกประการหนึ่งเกิดจากการที่มีสิ่งสกปรกปะปนในน้ำโลหะมากเกินไป ทำให้ส่วนที่ควรจะหดตัวได้อย่างสมบูรณ์เกิดความบกพร่องขึ้น หรืออาจเกิดจากการที่มีอากาศเข้าไปมากกว่าน้ำโลหะ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้การหดตัวไม่สมบูรณ์ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.11 ลักษณะชิ้นงานเกิดการหดตัวภายใน (Shrinkage Defect)

ข. รอยแตกรอยร้าว (Hot tears) ข้อบกพร่องชนิดนี้มักเกิดจากการแตกตัวของโลหะในอุณหภูมิต่ำ อาจเนื่องมาจากการหล่อเย็นที่ไม่สมบูรณ์ภายในแม่พิมพ์ การป้องกันปัญหานี้ อยู่ที่ลักษณะของการหล่อเย็นภายในแม่พิมพ์ หากการเย็นตัวของชิ้นงานไม่สมบูรณ์จะทำให้ชิ้นงานเกิด รอยแตกรอยร้าวได้โดยง่าย แสดงดังรูปที่ 2.12 จึงจำเป็นต้องระวังการเกิดการเย็นตัวอย่าง

รวดเร็วเกินไปในบางส่วนของน้ำโลหะ ส่วนใหญ่ปัญหานี้มักเกิดที่ผิวของชิ้นงาน เนื่องจากผลของการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอของน้ำโลหะ การป้องกันการเย็นตัวที่ไม่สม่ำเสมอนั้นจำเป็นจะต้องทำการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำโลหะก่อนการฉีดชิ้นงานทุกครั้ง เพราะหากน้ำโลหะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้เกิดปัญหาเหล่านี้ตามมา (สารัตน์, 2550)



รูปที่ 2.12 ลักษณะชิ้นงานเกิดรอยแตกรอยร้าว (Hot tears)

ที่มา: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/tag/aluminum-casting-defects/>

### 2.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อที่ผ่านกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง

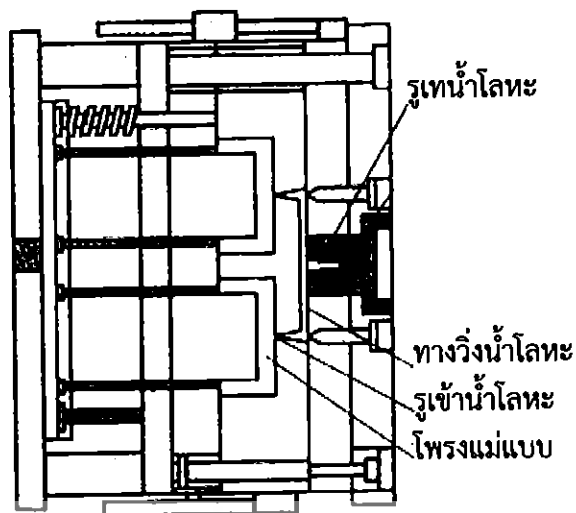
#### 2.3.2.1 อุณหภูมิเท (Pouring temperature)

อุณหภูมิเทเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาภายในชิ้นงานอยู่เสมอ การเกิดข้อบกพร่องสามารถแยกออกได้หลายชนิดดังที่กล่าวมา ซึ่งอุณหภูมิเทจะมีผลต่อความหนืดของน้ำโลหะ ดังนั้นการหลอมน้ำโลหะก่อนทำการฉีดเข้าแม่พิมพ์ จึงจำเป็นจะต้องให้น้ำโลหะมีอุณหภูมิพอเหมาะที่จะทำการฉีด ไม่ว่าจะเป็นการฉีดในตอนแรกหรือการฉีดเติมเข้าไปเพื่อให้น้ำโลหะไหลให้เต็มแบบหล่อก็ตาม

การที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะสูงเกินไป จะส่งผลต่ออัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่ช้าลงทำให้ได้ชิ้นงานที่เกิดการหดตัวในอัตราที่สูงขึ้น แต่หากอุณหภูมิเทน้ำโลหะต่ำเกินไป จะส่งผลให้สมบัติการไหล (Fluidity) ต่ำลงน้ำโลหะเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะไหลเต็มแบบหล่อ ทำให้เกิดข้อบกพร่องด้านชิ้นงานไม่เต็มแบบหล่อขึ้น ด้วยเหตุนี้ การเลือกอุณหภูมิเทจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการหล่อโลหะ เพราะหากมีอุณหภูมิเทที่ไม่เหมาะสม จะส่งผลต่อการไหลของน้ำโลหะและการเกิดปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ในชิ้นงานได้ (สุทธิพงษ์, 2549)

#### 2.3.2.2 ระบบทางวิ่งน้ำโลหะ (Gating system)

การกำหนดและออกแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อ ดังนั้น การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง จึงควรศึกษาข้อมูลด้านระบบทางวิ่งน้ำโลหะในแต่ละส่วนอย่างละเอียด ก่อนที่จะทำการออกแบบและนำไปประยุกต์ใช้งานซึ่งส่วนประกอบต่างๆ ของระบบทางวิ่งน้ำโลหะในแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.13

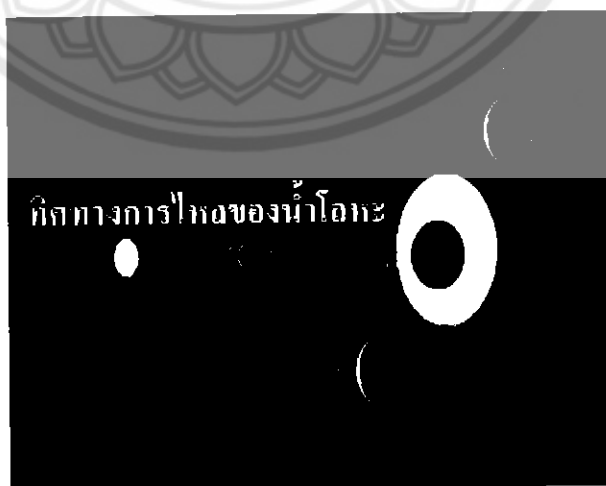


รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบทางวิ่งน้ำโลหะในแม่พิมพ์

ที่มา: <http://www.vulcanmold.com/article/Basic+Terminology.html>

#### ก. รูเท (Sprue)

รูเท ถือเป็นส่วนแรกของระบบทางวิ่งน้ำโลหะภายในแม่พิมพ์ ที่ใช้กระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ทำหน้าที่ส่งผ่านน้ำโลหะจากปลายกระบอกลีด (Nozzle) ไปยังทางวิ่ง (Runner) จึงอาจกล่าวได้ว่า รูเทเป็นส่วนที่กำหนดทิศทางการไหลของน้ำโลหะส่วนสำคัญส่วนแรก การออกแบบรูเทจึงจำเป็นต้องออกแบบให้เหมาะสมกับชิ้นงาน เช่น หากพื้นที่หน้าตัดรูเทไม่เท่ากันตลอดทั้งความยาว หรือเกิดการหักมุมของทางวิ่งรูเท จะส่งผลให้น้ำโลหะเกิดการไหลแบบไม่ราบเรียบและน้ำโลหะจะเกิดการเย็นตัวได้ยาก ฉะนั้น การออกแบบรูเทจึงควรมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดทั้งความยาว แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะรูเทที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากันตลอดความยาว

ที่มา: <http://mould-technology.blogspot.com/2008/07/sprue-bush-cooling-design>



หากปลายกระบอกฉีดมีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตันขึ้นได้ดังนั้น การออกแบบรูเทให้มีความเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งหลักการออกแบบรูเทสำหรับ กระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง มีดังนี้

ก.1 ควรออกแบบให้พื้นที่หน้าตัดรูเทมากกว่าพื้นที่หน้าตัดทางวิ่ง ร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 19 และรูเทควรมีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าหรือเท่ากับพื้นที่หน้าตัดปลายกระบอกฉีด (Nozzle)

ก.2 ตลอดความยาวของรูเทไม่ควรหักมุมเป็นมุมฉาก เนื่องจากจะทำให้ทิศทางการไหลของน้ำโลหะเกิดการไหลที่ไม่ราบเรียบขึ้น จะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องต่างๆในชิ้นงานตามไปด้วย

#### ข. ทางวิ่งน้ำโลหะ (Runner)

เป็นส่วนที่ทำให้น้ำโลหะสามารถเคลื่อนที่ภายในแม่พิมพ์ได้ โดยทำหน้าที่ส่งผ่านน้ำโลหะจากรูเทไปยังรูเข้าน้ำโลหะ (Gate) ทางวิ่งน้ำโลหะเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะ กล่าวคือ ทางวิ่งที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้น้ำโลหะเกิดการเย็นตัวได้ช้ากว่าทางวิ่งที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้าทางวิ่งมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองมากเช่นกัน ซึ่งการออกแบบต้องคำนึงถึงความเร็วในการวิ่งของน้ำโลหะ เพื่อที่จะสามารถไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ได้ หากทางวิ่งมีขนาดใหญ่หรือเล็กเกินไปก็จะเกิดปัญหาในการฉีดได้ โดยมีหลักในการออกแบบทางวิ่ง ดังนี้

ข.1 ควรออกแบบให้ทางวิ่งมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าพื้นที่หน้าตัดรูเข้าน้ำโลหะร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 19 และมีพื้นที่หน้าตัดร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 19 ของพื้นที่หน้าตัดรูเทสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

$$A_{\text{Runner}} = P_{\text{Spure}} \times A_{\text{Spure}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $A_{\text{Runner}}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งน้ำโลหะ

$A_{\text{Spure}}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรูเท

$P_{\text{Spure}}$  คือ ร้อยละของพื้นที่หน้าตัดรูเท

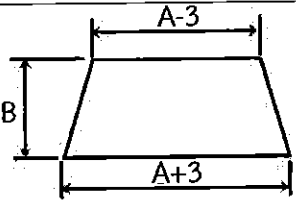
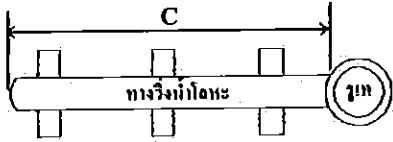
ข.2 ไม่ควรออกแบบทางวิ่งให้มีการหักมุมเป็นมุมฉาก เพราะจะทำให้ น้ำโลหะเกิดการไหลที่ไม่ราบเรียบ

ข.3 ควรออกแบบทางวิ่งให้มีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากสี่เหลี่ยมสามารถออกแบบแม่พิมพ์ได้ง่าย ส่วนสี่เหลี่ยมคางหมูสามารถตัดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายกว่าสี่เหลี่ยม แต่การออกแบบแม่พิมพ์ก็จะต้องมีความยุ่งยากมากขึ้น

ข.4 ควรออกแบบให้ระยะทางที่น้ำโลหะวิ่งเข้าแบบหล่อสั้นที่สุด โดยเฉพาะชิ้นงานที่บาง เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงเร็วจนเกินไปสามารถพิจารณา

ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะหน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะกับความยาวของทางวิ่งน้ำโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะหน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะกับความยาวของทางวิ่งน้ำโลหะ

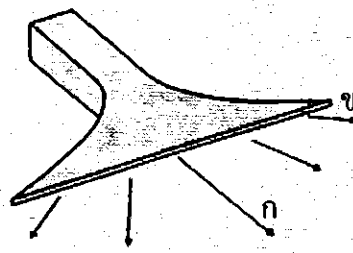
| หน้าตัดของรูวิ่ง (A x A) มิลลิเมตร  | ความยาวของรูวิ่ง (C) มิลลิเมตร   |
|---|--|
|  |  |
| 20x20   | <600   |
| 30x30   | <1000  |
| 40x40   | <2000  |

ที่มา: หริส (2543)

### ค. รูเข้าน้ำโลหะ (Gate)

เป็นส่วนที่ต่อมาจากทางวิ่งส่งผ่านไปยังแบบหล่อ มีหน้าที่นำพาน้ำโลหะเข้าสู่แบบหล่อภายในแม่พิมพ์ การเลือกชนิดรูเข้าน้ำโลหะจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของแบบหล่อ รูเข้าน้ำโลหะแต่ละชนิดจะมีลักษณะแตกต่างกัน ได้แก่

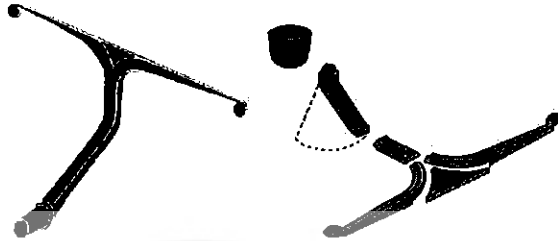
ค.1 รูเข้าน้ำโลหะแบบพัด (Fan gate) เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก ลักษณะของรูเข้าน้ำโลหะแบบนี้จะทำให้เกิดการไหลในสองทิศทาง คือ ไหลตั้งฉากกับรูเข้าน้ำโลหะและไหลเฉียงแสดงดังเส้น ก และ ข ในรูปที่ 2.15 ตามลำดับ โดยน้ำโลหะตรงกลางรูเข้าน้ำโลหะจะไหลตั้งฉากกับรูเข้าน้ำด้วยความเร็วสูง และการไหลจะเฉียงพร้อมทั้งความเร็วจะลดลงเรื่อยๆ ที่ด้านข้างของพัด ทำให้การเติมเต็มน้ำโลหะเข้าช่องว่างแม่พิมพ์เต็มไม่พร้อมกัน โดยน้ำโลหะด้านข้างจะไหลช้ากว่าซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการไหลแบบหมุนวนได้ และส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องที่ชิ้นงานได้ ลักษณะของรูเข้าน้ำโลหะแบบใบพัด แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะของรูเข้าน้ำโลหะแบบใบพัด (Fan gate)

ที่มา: <http://www.hotflo.com/dccalc/runners1.html>

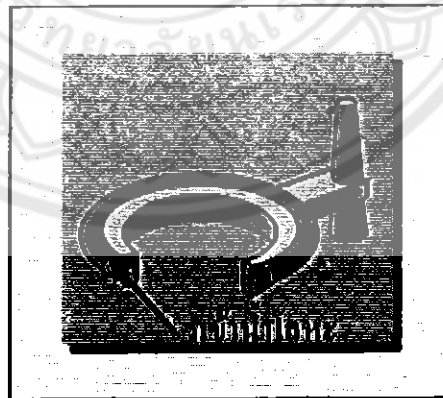
ค.2 รูเข้าน้ำโลหะแบบแทนเจนเชียล (Tangential gate) เป็นรูเข้าน้ำที่ถูกวางไปตามความยาวด้านข้างของชิ้นงานทางวิ่งของแทนเจนเชียลต้องมีพื้นที่หน้าตัดลดลงอย่างสม่ำเสมอจากต้นทางถึงปลายทาง แสดงดังรูปที่ 2.16 เพื่อให้แรงดันในทางวิ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำโลหะมีอัตราการไหลอย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวรูเข้าน้ำโลหะ



รูปที่ 2.16 ลักษณะของรูเข้าน้ำโลหะแบบแทนเจนเชียล (Tangential gate)

ที่มา: <http://www.coezinc.com/index.php?lay=show&ac=article&id=539321622&Ntype=4>

ค.3 รูเข้าน้ำโลหะแบบวงแหวน (Ring gate) เป็นรูเข้าน้ำที่มีลักษณะเป็นวงแหวนครอบคลุมโดยรอบของชิ้นงาน เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก รูเข้าน้ำแบบวงแหวนจะมีลักษณะการทำงานเหมือนรูเข้าน้ำแบบแทนเจนเชียลมันวนเข้าหากันเป็นวงแหวน และในกรณีที่ชิ้นงานทรงกระบอกยาวมาก อาจต้องมีเกทแบบแทนเจนเชียลเข้ามาเสริมเพิ่มเติมด้านข้างลักษณะรูเข้าน้ำโลหะแบบวงแหวน แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะของรูเข้าน้ำโลหะแบบวงแหวน (Ring gate)

ที่มา: [http://www.dsm.com/en\\_US/html/dep/gatetype.htm](http://www.dsm.com/en_US/html/dep/gatetype.htm)

การออกแบบรูเข้าน้ำโลหะจะต้องคำนึงถึงขนาดของทางวิ่งน้ำโลหะ โดยรูเข้าน้ำโลหะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ กล่าวคือ พื้นที่หน้าตัดรูเข้าน้ำโลหะจะมีขนาด ร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 19 ของพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 ซึ่ง

ควรเลือกใช้ความหนาของรูเข้าน้ำโลหะให้อยู่ในช่วง 0.25 – 0.75 มิลลิเมตร หากความหนาของรูเข้าน้ำโลหะ น้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตร จะทำให้น้ำโลหะแข็งตัวที่รูเข้าน้ำโลหะ และหากความหนาของรูเข้าน้ำโลหะ มากกว่า 0.75 มิลลิเมตร จะทำให้เกิดรูพรุนบริเวณรูเข้าน้ำโลหะ โดยมีมุมระหว่างด้านความกว้างกับด้านความหนาของหน้าตัด ประมาณ 80 องศา แสดงดังรูปที่ 2.18

$$A_{Gate} = P_{Runner} \times A_{Runner} \tag{2.2}$$

เมื่อ  $A_{Gate}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรูเข้าน้ำโลหะ  
 $A_{Runner}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรูเท  
 $P_{Runner}$  คือ ร้อยละของพื้นที่หน้าตัดรูเท



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะหน้าตัดของรูเข้าน้ำโลหะ

ที่มา: <http://www.coezinc.com/index.php?lay=show&ac=article&id=539321622>

ง. รูสัน (Riser)

เป็นส่วนเกินของน้ำโลหะที่สามารถไหลเข้าไปในแบบหล่อ เมื่อแบบหล่อเริ่มแข็งตัวแล้วอาจเกิดการหดตัวขึ้น เป็นการแก้ปัญหาการฉีดงานไม่เต็มแบบหล่อได้ อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหาการเกิดโพรงภายในชิ้นงาน แต่หากออกแบบรูสันให้มีจำนวนมากเกินความจำเป็น ก็จะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายของวัสดุ ในการออกแบบรูสันต้องคำนึงถึงขอบของชิ้นงานเป็นหลัก หากชิ้นงานมีความแข็งแรงของขอบต่ำแต่รูสันใหญ่เกินไป เมื่อทำการเคาะรูสันออกจากชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานแตกหักหรือบิ่นไปได้ โดยลักษณะรูสันของชิ้นงานในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ลักษณะรูสันของชิ้นงานในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง

ที่มา: <http://www.engineeringcomputation.com/CAST-DESIGNER/>

### 2.3.2.3 ความเร็วการฉีดน้ำโลหะ

ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะมีผลอย่างยิ่งในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ใช้ในการกำหนดอัตราการไหลของน้ำโลหะ ซึ่งหากมีการใช้ความเร็วที่ไม่เหมาะสมในกระบวนการฉีดน้ำโลหะจะทำให้ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานขึ้นได้

ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะที่มากเกินไป จะทำให้อัตราการไหลในแต่ละส่วนของแม่พิมพ์สูงขึ้นด้วย ทำให้เกิดการไหลแบบไม่ราบเรียบ ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่องเกี่ยวกับแก๊สเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าปกติอีกด้วย แต่ในทางตรงข้าม หากความเร็วในการฉีดน้ำโลหะน้อยเกินไป อาจทำให้น้ำโลหะไหลไม่เต็มโพรงแม่แบบและเกิดข้อบกพร่องที่มีลักษณะโลหะไม่เต็มชิ้นงานขึ้น

อย่างไรก็ตามหากมีการปรับเปลี่ยนความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ ควรต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยด้านอุณหภูมิเท และการออกแบบระบบทางวิ่งของน้ำโลหะด้วย เพราะปัจจัยทั้งสามด้านถือเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (ปรารภ, 2552)

## 2.4 อะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys)

อะลูมิเนียมผสมมีสมบัติเด่นหลายประการ อาทิ ความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวสูง สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ทำให้ง่ายต่อการหล่อขึ้นรูป มีสมบัติการนำความร้อนสูง และไม่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์ จึงนิยมนำมาใช้ในชีวิตประจำวันอย่างกว้างขวาง

### 2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมผสมถือเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็ก ซึ่งโลหะนอกกลุ่มเหล็กนี้จะไม่มีการเป็นองค์ประกอบหลัก อาทิ อะลูมิเนียม ทองแดง สังกะสี ดีบุก แมกนีเซียม เป็นต้น ปริมาณการใช้งานของโลหะกลุ่มนี้ในทางวิศวกรรม และอุตสาหกรรมมักจะน้อยกว่าโลหะในกลุ่มเหล็ก ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ทดแทนเหล็กในกรณีที่ต้องการสมบัติการใช้งานที่สูงกว่า เพราะส่วนใหญ่แล้วโลหะกลุ่มนี้จะมีราคาที่สูงกว่ากลุ่มเหล็ก ซึ่งเกณฑ์การพิจารณาที่บ่งบอกว่าโลหะกลุ่มนี้ มีสมบัติดีกว่าโลหะกลุ่มเหล็กสามารถพิจารณาได้ ดังนี้

2.4.1.1 สมบัติที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ความอ่อนตัวสูงและความสามารถในการไหลในโพรงแม่แบบสูง จึงง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ เหมาะแก่การนำไปผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของอุตสาหกรรมโลหะ อาทิเช่น การรีด การตีขึ้นรูป การเชื่อม การตัด การหล่อหลอม กลึง และเจาะ เป็นต้น

2.4.1.2 สมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อน สามารถต้านทานและทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าโลหะกลุ่มเหล็ก ทั้งในสภาวะที่มีความชื้นสูงและสภาวะที่ประกอบไปด้วยกรดและเบส

2.4.1.3 สภาพการนำไฟฟ้าและความร้อน ในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยสภาพการนำหลากหลายชนิด ทั้งมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าหรือความร้อนที่ดีและไม่ดี

2.4.1.4 ความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากโลหะในกลุ่มนี้มีน้ำหนักที่เบากว่าเหล็ก จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนของโลหะ ในชิ้นงานที่ต้องการน้ำหนักเบา อาทิเช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมการบิน เป็นต้น

2.4.1.5 การมีสีสนสวยงามและผิวที่มันเงา เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญของโลหะกลุ่มนี้ จึงเหมาะแก่การนำไปตกแต่งชิ้นงานสถาปัตยกรรม

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้นำโลหะนอกกลุ่มเหล็กมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากต้องการสมบัติเด่นต่างๆ ที่มีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความหลากหลายมากขึ้น โดยสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมผสม

| สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมผสม |  |
|-------------------------------|--|
| ความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง    | 2.70 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร            |
| ความหนาแน่นที่จุดหลอมเหลว     | 2.375 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร           |
| ค่าความจุความร้อนจำเพาะ       | 24.2 J/mol·K                             |
| จุดหลอมเหลว                   | 660.6 องศาเซลเซียส                       |
| การนำความร้อน                 | 237 W/m·K                                |
| การขยายตัวจากความร้อน         | 23.1 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ |

ที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/อะลูมิเนียมผสม>

#### 2.4.2 ชนิดของอะลูมิเนียมผสม

##### 2.4.2.1 อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Aluminium-Copper Alloys)

สำหรับอะลูมิเนียมผสมทองแดง ที่มีปริมาณทองแดงผสมตั้งแต่ ร้อยละ 2.5 ถึงร้อยละ 5.5 และมีธาตุอื่นได้แก่ แมกนีเซียม แมงกานีส โครเมียม สังกะสี และนิกเกิล เป็นต้นผสมเข้าไปอีกบ้างเพื่อเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้สูงขึ้น ซึ่งอะลูมิเนียมผสมทองแดงนิยมนำไปใช้งานในเกี่ยวกับ การผลิตลูกสูบเครื่องยนต์ดีเซล ฝาสูบเครื่องยนต์ ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศของเครื่องบิน เป็นต้น

##### 2.4.2.2 อะลูมิเนียมผสมซิลิคอน (Aluminium-Silicon Alloys)

การซิลิคอนที่ผสมในอะลูมิเนียมจะช่วยให้อะลูมิเนียมผสมมีน้ำหนักเบาขึ้น การหดตัวของโลหะภายหลังการแข็งตัวเกิดขึ้นน้อย และเพิ่มสมบัติในด้านการไหลของน้ำโลหะในกระบวนการหล่อจึงนิยมนำใช้ในการหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี เช่น ลูกสูบ ห้องเครื่อง ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น

### 2.4.2.3 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (Aluminium–Magnesium Alloys)

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมนี้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงปานกลาง และทนต่อการกัดกร่อนภายใต้บรรยากาศทั่วไปได้ดีมาก สำหรับโลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมในงานหล่อ โลหะนิยมใช้ทำอุปกรณ์ขนส่งอาหาร ข้อต่อที่ใช้สำหรับสารเคมี ระบบน้ำทิ้ง และก้านเบรคสำหรับเครื่องบิน เป็นต้น

### 2.4.2.4 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิคอน (Aluminium – Magnesium-Silicon Alloys)

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิคอนมีความแข็งแรงสูง สามารถอบชุบหรือผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้ นอกจากนี้ยังมีความต้านทานกัดกร่อนดี นิยมนำไปใช้ในงานสถาปัตยกรรมทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและชิ้นส่วนเครื่องบิน เป็นต้น

### 2.4.3 อะลูมิเนียมผสมซิลิคอน เอ 332

มาตรฐานที่นิยมใช้สำหรับการแบ่งชนิดอะลูมิเนียม สำหรับอุตสาหกรรมงานหล่อโลหะในประเทศไทย คือ มาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (AA) ได้สรุปเกรดอะลูมิเนียมผสมที่นิยมใช้งาน พร้อมทั้งส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานอะลูมิเนียมผสมซิลิคอนที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนักโดยประมาณ)

| มาตรฐาน (AA) | ซิลิคอน (Si) | เหล็ก (Fe) | ทองแดง (Cu) | แมงกานีส (Mn) | แมกนีเซียม (Mg) | นิกเกิล (Ni) | สังกะสี (Zn) | ไทเทเนียม (Ti) |
|--------------|--------------|------------|-------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|----------------|
| A319.0       | 5.5-6.5      | 1.0        | 3.0-4.0     | 0.5           | 0.1             | -            | 3.0          | 0.25           |
| A319.1       | 5.5-6.5      | 0.8        | 3.0-4.0     | 0.5           | 0.1             | -            | 3.0          | 0.25           |
| A332.0       | 11.0-13.0    | 1.2        | 2.0-4.0     | 0.35          | 0.7-1.3         | 2.0-3.0      | 0.35         | 0.25           |
| A332.2       | 10.5-13.5    | 0.6        | 0.8-1.5     | 0.35          | 0.9-1.5         | -            | 0.35         | -              |
| A356.0       | 6.5-7.5      | 0.2        | 0.2         | 0.1           | 0.25-0.45       | -            | 0.1          | 0.2            |
| A360.2       | 9.0-11.0     | 0.2        | 0.03        | 0.45          | 0.25-0.45       | -            | 0.1          | -              |
| A390.0       | 16.0-18.0    | 0.5        | 4.0-5.0     | 0.1           | 0.45-0.65       | -            | 0.1          | 0.2            |

ที่มา: เซาวลิต (2551)

อะลูมิเนียมผสมซิลิคอนได้รับความนิยมมากในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีสมบัติที่ดีใน ด้านงานหล่อ มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำจุดหลอมเหลวต่ำ ความอ่อนตัวสูง และมีความสามารถในการไหลที่ดี ซึ่งการเติมธาตุซิลิคอนเข้าไปในอะลูมิเนียมส่งผลทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น และการเติมธาตุแมกนีเซียม หรือทองแดง จะส่งผลทำให้โลหะผสมเหล่านี้สามารถชุบแข็ง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียมผสมได้ ส่วนการเพิ่มธาตุผสมบางอย่าง เช่น นิกเกิล และแมงกานีสยังช่วยทำให้อะลูมิเนียมผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยกลไกการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง และยังช่วยปรับปรุงความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ด้วยซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการความแข็งแรงในอุณหภูมิสูง งานที่ต้องใช้สมบัติด้านสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิต่ำ และงานที่ทนต่อความต้านทานการเสียดสีและการกัดกร่อนได้ดี เช่น รอก เสื้อสูบ และลูกสูบ เป็นต้น

## 2.5 แม่พิมพ์ (Mold)

แม่พิมพ์เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญมากในงานหล่อโลหะ เพราะเป็นส่วนที่กำหนดรูปร่างและขนาดชิ้นงานที่เราต้องการ อย่างไรก็ตาม แม่พิมพ์ยังเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานด้วยเช่นกัน สาเหตุอาจเนื่องจากการออกแบบแม่พิมพ์ไม่ดี หรือมาจากการเลือกใช้วัสดุไม่เหมาะสมในการทำแม่พิมพ์ ดังนั้น การออกแบบและเลือกวัสดุในการทำแม่พิมพ์ให้เหมาะสม จึงเป็นการช่วยลดปัญหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานได้

### 2.5.1 ข้อมูลพื้นฐานของแม่พิมพ์ถาวร

แม่พิมพ์ถาวรนับว่าเป็นส่วนที่สำคัญในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง การพิจารณา ด้านความคงทนและราคาของแม่พิมพ์ เป็นอีกหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ ซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านี้ย่อมขึ้นอยู่กับวัสดุและกระบวนการที่ใช้ทำแม่พิมพ์นั้นๆ ซึ่งราคาของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับจำนวนการผลิต หรือจำนวนครั้งของกระบวนการหล่อฉีดชิ้นงาน

โดยปกติแม่พิมพ์ถาวرنั้นทำจากเหล็กเหนียวแบบพิเศษผสมพวกโครเมียม-โมลิบดีนัม-วาเนียมเตียม ซึ่งจะถูกทำให้แข็งโดยการอบแล้วทำให้เย็นในอากาศ ความแข็งที่ใช้อยู่ประมาณ 45 รอคเวลล์สเกลซี (HRC) ซึ่งการอบชุบจะทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ถาวรยาวนานมากยิ่งขึ้น

แม่พิมพ์ถาวรสำหรับงานหล่ออะลูมิเนียมผสมสามารถทนการอัดได้ 60,000 ถึง 130,000 ครั้ง ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อด้วยแม่พิมพ์ถาวรนี้ อาจไม่มีความจำเป็นในการตกแต่งอีกเลย เนื่องจากชิ้นงานที่ได้ จะมีรูปร่างหน้าตาเหมือนชิ้นงานที่ต้องการโดยแม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง จำเป็นต้องทำให้หลายชิ้นเพื่อป้องกันข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิต ดังนั้นต้องให้แน่ใจว่าปริมาณการผลิตคุ้มกับการลงทุน การหล่อด้วยวิธีแม่พิมพ์ถาวรจึงควรออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมที่สุด ประกอบกับการพัฒนาเทคนิคในด้านต่างๆ เพื่อหลีกเลี่ยงจุดเสียหรือข้อบกพร่องที่จะเกิดกับชิ้นงาน (เรื่องศักดิ์, 2551)



## 2.5.2 แม่พิมพ์ถาวร เอสเคดี 61 หรือ เอช 13 ในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง

### 2.5.2.1 สมบัติทั่วไปของแม่พิมพ์ถาวร เอสเคดี 61

แม่พิมพ์ถาวร เอสเคดี 61 จัดเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มงานร้อน ที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากการมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสม ซึ่งการผสมคาร์บอน ร้อยละ 0.4 จะช่วยให้เหล็กมีความเหนียวสูง ขณะที่ยังสามารถชุบแข็งให้มีค่าความแข็งสูงได้ด้วยเช่นกัน การผสมโครเมียม ร้อยละ 5.3 จะช่วยให้เหล็กสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี และสามารถชุบแข็งด้วยการอบปกติ (Normalizing) ได้โดยมีการเปลี่ยนแปลงทางขนาดน้อยมาก การผสมซิลิกอนร้อยละ 1.0 จะช่วยให้เหล็กต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงได้ดี การผสมโมลิบดีนัมและวาเนเดียม จะช่วยคงความแข็งแรงไว้ที่อุณหภูมิสูงได้ดี โดยเฉพาะวาเนเดียมจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเสียดสีและความต้านทานการสึกหรอให้สูงมากขึ้นโดยแม่พิมพ์ถาวร เอสเคดี 61 มีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีและมาตรฐานของแม่พิมพ์ เอสเคดี 61

| องค์ประกอบทางเคมี | คาร์บอน (C) | ซิลิกอน (Si) | โครเมียม (Cr) | โมลิบดีนัม (Mo) | วาเนเดียม (V) |
|-------------------|-------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|
| ร้อยละโดยน้ำหนัก  | 0.4         | 1.0          | 5.3           | 1.4             | 1.0           |

ที่มา: [www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf](http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf)

จากองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.4 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีดังกล่าว ส่งผลให้แม่พิมพ์ถาวร เอสเคดี 61 มีคุณลักษณะเด่น ดังต่อไปนี้

- ก. ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันดีมาก
  - ข. คงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก
  - ค. ต้านทานต่อการล้าเนื่องจากความร้อนได้ดี
  - ง. มีความเหนียวแกร่งสูงมาก
  - จ. มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง
  - ฉ. ชุบแข็งง่าย มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดน้อยมาก
  - ช. มีค่าการนำความร้อนดีมาก
  - ซ. สามารถระบายความร้อนด้วยน้ำได้โดยตรง
  - ฌ. สามารถทำไนไตรดิง (Nitriding) เพื่อเพิ่มความแข็งผิวได้
- อีกทั้งองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลให้แม่พิมพ์ถาวร เอสเคดี 61 มีสมบัติเด่น

ในอีกหลายด้าน อาทิ ความจุความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น ฯลฯ ซึ่งเป็นสมบัติโดยทั่วไปของแม่พิมพ์ถาวรแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของแม่พิมพ์ถาวร เอสเคดี 61

| สมบัติ   | อุณหภูมิทดสอบ (องศาเซลเซียส) |            |            |      |      |                        |      |
|--|------------------------------|------------|------------|------|------|------------------------|------|
|  | 20                           | 350        | 700        |      |      |                        |      |
| การนำความร้อนในสภาพอบอุ่น  | 27.2 W/m·K                   | 30.5 W/m·K | 33.4 W/m·K |      |      |                        |      |
| การนำความร้อนในสภาพชุบแข็งและอบคืนตัว  | 25.5 W/m·K                   | 27.6 W/m·K | 30.3 W/m·K |      |      |                        |      |
| สมบัติ   | อุณหภูมิทดสอบ (องศาเซลเซียส) |            |            |      |      |                        |      |
|  | 100                          | 200        | 300        | 400  | 500  | 600                    | 700  |
| สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนระหว่าง 20°C ถึง อุณหภูมิทดสอบ (10 <sup>-6</sup> m/m·K) | 10.9                         | 11.9       | 12.3       | 12.7 | 13.0 | 13.3                   | 13.5 |
| สมบัติ   |                              |            |            |      |      | ค่าเฉพาะ               |      |
| ความจุความร้อนจำเพาะที่ 100 °C (Specific heat at 100 °C)                                 |                              |            |            |      |      | 0.44 J/g·C             |      |
| ความหนาแน่น (Density)  |                              |            |            |      |      | 7.85 g/cm <sup>3</sup> |      |

ที่มา: [www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf](http://www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/2344.pdf)

### 2.5.2.2 การใช้งานแม่พิมพ์ถาวรเอสเคดี 61

สามารถนำไปใช้งานที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงเหมาะกับแม่พิมพ์งานร้อนทุกชนิด เช่น งานแม่พิมพ์ฉีดโลหะ งานแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปโลหะ แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูป แม่พิมพ์แก้ว แม่พิมพ์พลาสติก กระบอกสำหรับงานฉีดโลหะหรือพลาสติก ตัวปลดขึ้นงาน และใบตัดเหล็กร้อน เป็นต้น

## 2.6 ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element)

เป็นการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่มาช่วยในงานหล่อโลหะ เพื่อเพิ่มคุณภาพในชิ้นงานหล่อโลหะ ซึ่งไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถบอกถึงตำแหน่งในการเกิดข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดภายในชิ้นงาน ขณะกระบวนการหล่อโลหะตั้งแต่เริ่มจนจบกระบวนการ

### 2.6.1 ความเป็นมาของไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อ 60 ปีก่อน ทางกลุ่มนักวิชาการของสมาคมหล่อโลหะของอเมริกา ได้เขียนเอกสารระบุถึงความต้องการที่จะนำคอมพิวเตอร์มาช่วยแก้ปัญหาในงานหล่อโลหะ มุ่งเน้นการออกแบบชิ้นงานหล่อ โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับเรื่องการคายความร้อน (Heat transfer) มาประยุกต์ใช้ ดังนั้น ทางสมาคมได้ว่าจ้างให้มหาวิทยาลัยโคลัมเบีย (Columbia University) ทำการพัฒนาโปรแกรมทาง

คอมพิวเตอร์ขึ้นมา โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาออกมาสมัยนั้น สามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบเท ขนาดของช่องเท และขนาดของรูสันได้จริงในงานหล่อโลหะ และช่วยทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

ประมาณปี 2500 ได้เริ่มมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานหล่ออย่างจริงจัง โดยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ โดยนำเทคนิคการประมาณค่าแบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference approximation) เข้ามาใช้ และในปี 2503 ได้พัฒนาเปลี่ยนมาเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method: FEM) ทำให้การคำนวณเป็นระบบระเบียบมากขึ้น รวดเร็วยิ่งขึ้นและใช้กันอย่างแพร่หลายมาจนถึงปัจจุบัน โดยในปี 2506 ทางสมาคมหล่อโลหะของสหรัฐอเมริกา ได้จัดการประชุมวิชาการเกี่ยวกับการออกแบบงานหล่อโดยใช้คอมพิวเตอร์ขึ้น ส่งผลให้มีการพัฒนาและนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ไปใช้ในงานอุตสาหกรรมมากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกๆ ไม่สามารถที่จะนำไปใช้ออกแบบรูปร่างชิ้นงานหล่อ 3 มิติได้ ดังนั้น สมาคมหล่อโลหะของอเมริกาจึงได้ว่าจ้างมหาวิทยาลัยมิชิแกน (University of Michigan) สำหรับพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับงานออกแบบ 3 มิติ เน้นการใช้งานจริงในงานหล่อที่มีลักษณะของชิ้นงานซับซ้อนมากขึ้น โดยเน้นวัสดุโลหะ 3 ชนิด คือ เหล็กหล่อ อะลูมิเนียมผสม และทองแดงผสม

ในปัจจุบันการพัฒนาระบบการผลิต ทางด้านอุตสาหกรรมงานหล่อมีความก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น และการแข่งขันกันในระดับโลกก็มีมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยจะเน้นด้านคุณภาพของชิ้นงานหล่อและค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าเป็นหลัก ซึ่งการจำลองการหล่อก็เป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งสำหรับงานหล่อโลหะ ที่จะช่วยให้ประสบความสำเร็จได้ สำหรับการจำลองชิ้นงานหล่อสามารถตอบสนองความต้องการของหลายๆ ด้านในงานหล่อได้ หลายครั้งที่งานหล่อจำเป็นต้องออกแบบระบบหล่อ ทั้งในส่วนของการวิ่งของน้ำโลหะและตัวป้อนน้ำโลหะ โดยผู้ใช้สามารถออกแบบและจำลองการทำงาน โดยไม่ต้องนำไปทดลองหล่องานจริง จะสามารถช่วยลดต้นทุนได้รวมไปถึงสามารถเริ่มต้นจากการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นลักษณะ 3 มิติ ซึ่งโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน อาทิเช่น CastCAE พัฒนาโดยบริษัท CT-CASTech ในประเทศฟินแลนด์ Magmasoft พัฒนาขึ้นโดย Magma Foundry Technologies และ Procast พัฒนาขึ้นโดย UES Software, Inc. Dayton เป็นต้น

## 2.6.2 ประโยชน์ของไฟไนต์เอลิเมนต์

สามารถออกแบบตรวจสอบขนาดของรูเท ช่องไหลของน้ำโลหะ และรูสันตามชนิดของน้ำโลหะที่ทำการหล่อ รูปร่างของชิ้นงานหล่อ ชนิดของแม่พิมพ์ที่ใช้ และกรรมวิธีที่ทำการหล่อซึ่งเน้นในเรื่องต่างๆ ดังนี้

2.6.2.1 การแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification)

2.6.2.2 การไหลของน้ำโลหะ (Flow of melt)

2.6.2.3 ความเค้นตกค้างในชิ้นงานหล่อ (Residual stress)

2.6.2.4 ทำนายตำแหน่งของโพรง และ ข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อ

### 2.6.2.5 การหดตัวของน้ำโลหะ และอื่นๆ

และยังมีฐานข้อมูลของวัสดุโลหะหล่อ เป็นสิ่งสำคัญสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานหล่อโลหะ ซึ่งจะเป็นค่าสมบัติทางความร้อนและทางกล (การนำความร้อน, ความหนาแน่น, ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ฯลฯ) โดยข้อมูลเหล่านี้จะได้มาจากห้องทดลองทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีความแม่นยำ ถูกต้อง และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ทำให้ปัจจุบันอุตสาหกรรมงานหล่อโลหะนิยมนำโปรแกรมพวกไฟไนต์เอลิเมนต์ มาจำลองการหล่อโลหะก่อนเริ่มกระบวนการผลิตชิ้นงานจริง (วรวิทย์, 2551)

### 2.6.3 ปัญหาในการออกแบบไฟไนต์เอลิเมนต์

ประสิทธิภาพและความเร็วของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ยังเป็นปัญหาหลักสำหรับการพัฒนาการออกแบบโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ชิ้นงานหล่อมีความซับซ้อนมากๆ อาจต้องใช้คอมพิวเตอร์รุ่นใหม่ๆ ที่มีสมรรถนะสูง สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว บางครั้งระยะเวลาประมวลผลอาจใช้เวลาหลายวัน หรือไม่สามารถประมวลผลได้เลย และปัญหาการเรียนรู้ตัวโปรแกรมด้วยตนเองถือเป็นปัญหาอีกประการหนึ่งที่สำคัญ โปรแกรมบางตัวค่อนข้างยากที่จะนำมาใช้งาน เช่น ANSYS, ABAQUS, MARC และ MITAS-II เป็นต้น โดยผู้ใช้งานที่จะต้องเข้าใจคำสั่งของโปรแกรม ก่อนจะทำการออกแบบและวิเคราะห์ชิ้นงานหล่อโดยใช้โปรแกรมเหล่านี้ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น โปรแกรมเหล่านี้มักนิยมใช้ในมหาวิทยาลัย มากกว่าจะนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป

### 2.6.4 โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solid Work)

ปัจจุบันมีโปรแกรมด้านเขียนแบบมากมายหลายโปรแกรมให้เลือกใช้งาน แต่เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ โปรแกรมออโตแคด (AutoCAD) เพราะว่าเป็นโปรแกรมเขียนแบบ โปรแกรมแรกที่ถูกนำเข้ามาใช้ในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย และอยู่ในวงการเขียนแบบมายาวนาน ซึ่งเป็นอันดับหนึ่งในการเขียนแบบ 2 มิติอยู่ แต่ถ้ากล่าวถึงการเขียนแบบ 3 มิติ โปรแกรมออโตแคด (AutoCAD) ใช้งานค่อนข้างยากเนื่องจากต้องจดจำคำสั่งและขั้นตอนจำนวนมาก ดังนั้น จึงมีการพัฒนาโปรแกรมด้านการเขียนแบบ สำหรับงาน 3 มิติขึ้น เพื่อให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น ซึ่งโปรแกรมหกกล่าวคือโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (จตุรงค์, 2551)

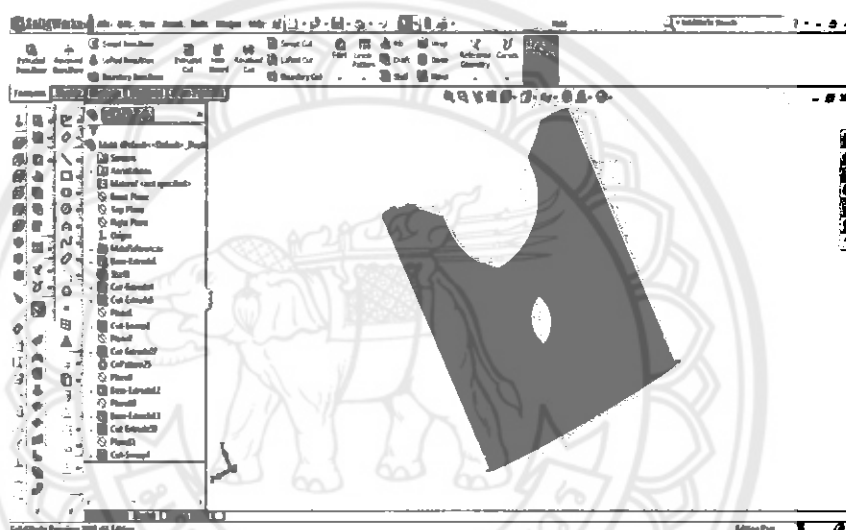
โซลิดเวิร์คเป็นโปรแกรมที่ใช้ในเขียนแบบชิ้นงานขึ้นมา โดยชิ้นงานที่เขียนแบบจะมีลักษณะเป็นรูปร่างชิ้นงาน 3 มิติ และมียังรูปร่างชิ้นงานที่คล้ายแบบจริงที่ต้องการผลิต แสดงดังรูปที่ 2.20 ซึ่งจะนำชิ้นงานที่ได้จากการจำลองชิ้นงานสามมิตินี้ไปใช้ในการทดสอบในโปรแกรมอื่นๆ ต่อไป อาทิเช่น โปรแกรม Procast, CastCAE และ Magma เป็นต้นโดยโปรแกรมโซลิดเวิร์คที่มีประโยชน์และข้อดีในด้านต่างๆ ดังนี้

2.6.4.1 งานที่ออกแบบมาเข้าใจได้ง่ายเพราะแสดงภาพออกมาเป็นแบบ 3 มิติ ชื่นงานเหมือนจริง

2.6.4.2 งานที่ออกแบบมีความผิดพลาดน้อยลง เพราะเราสามารถเห็นภาพจริงก่อนผลิตจริง รวมไปถึงสามารถทดสอบการทำงานทางกายภาพได้จากโปรแกรม เนื่องจากโปรแกรมสามารถทราบน้ำหนัก ปริมาตร รวมถึงความเป็นไปได้ในเชิงวิศวกรรมได้ทันที

2.6.4.3 ทำการลอกแบบจาก 2 มิติไปเป็นแบบ 3 มิติได้ง่าย เนื่องจากโปรแกรมสามารถทำได้โดยอัตโนมัติ ลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์

2.6.4.4 นำชิ้นงานที่ออกแบบจากโปรแกรมโซลิดเวิร์คไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมทดสอบอื่นๆ เพื่อเป็นการต่อยอดทางวิชาการ



รูปที่ 2.20 โปรแกรมโซลิดเวิร์คช่วยในการสร้างชิ้นงาน 3 มิติ

#### 2.6.5 โปรแกรมโปรคาส (Procast)

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการหล่อโลหะขนาดใหญ่หรือขนาดเล็ก ได้มีการแข่งขันสูงในด้านการผลิตสินค้า เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า ดังนั้นบริษัทต่างๆ จึงหาวิธีการที่จะช่วยลดต้นทุนในการออกแบบ และพัฒนาสินค้าอย่างต่อเนื่องโดยนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยทางคอมพิวเตอร์ที่มีเทคนิคทางด้านวิศวกรรมเป็นพื้นฐาน อาทิเช่น คอมพิวเตอร์ช่วยเขียนแบบ รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงานทางวิศวกรรม มาช่วยในงานหล่อโลหะมากขึ้น ซึ่งช่วยลดเวลา และเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบ ทำให้คุณภาพสินค้ามีคุณภาพเป็นไปตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงานทางวิศวกรรมของอุตสาหกรรมหล่อโลหะ คือ โปรแกรมโปรคาส เป็นโปรแกรมที่มีพื้นฐานทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการจำลองการหล่อในคอมพิวเตอร์ สามารถกำหนดสถานะขอบเขตซึ่งง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์การหล่อและแก้ปัญหาต่างๆ ได้ (อาณัฐ, 2553)

ดังนั้นโปรแกรมโปรคาสสามารถที่ใช้ช่วยในการทำนายตำแหน่งการเกิดข้อบกพร่องของชิ้นงาน และยังแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนชิ้นงานต่างๆ รวมไปถึงบอกระยะเวลาในการใช้ใน

กระบวนการหล่อโลหะ โปรแกรมโปรคาสยังสามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ ในการทดสอบได้โดยง่าย เพื่อให้ได้วิธีการที่ดีที่สุดในการนำไปใช้กับกระบวนการผลิตจริง ซึ่งความสามารถเบื้องต้นของ โปรแกรมโปรคาส มีดังนี้

2.6.5.1 โปรแกรมมีการจัดเก็บข้อมูลพื้นฐานของวัสดุแต่ละชนิดไว้ในฐานข้อมูล ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกวัสดุที่ต้องการใช้ในการหล่อ หรือวัสดุที่ใช้ในการทำแม่พิมพ์จากฐานข้อมูลได้โดยตรง โดยวัสดุในฐานข้อมูลโปรแกรมจะแสดงสมบัติต่างๆ ของวัสดุให้ผู้ใช้งานได้รับทราบ เช่น องค์ประกอบทางเคมี ร้อยละการเป็นของแข็ง อุณหภูมิหลอมเหลว ฯลฯ หากวัสดุที่ผู้ใช้งานต้องการ ไม่ปรากฏในฐานข้อมูลของโปรแกรม ผู้ใช้งานสามารถเพิ่มข้อมูลวัสดุดังกล่าวลงในฐานข้อมูลของโปรแกรมได้ โดยข้อมูลของวัสดุที่มีความจำเป็นในการเพิ่มวัสดุลงฐานข้อมูล คือ องค์ประกอบทางเคมี ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งจะเป็นสิ่งที่กำหนดการแสดงข้อมูลขั้นพื้นฐานอื่นๆ ของวัสดุ

2.6.5.2 ผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยที่ใช้ในการหล่อโลหะได้ เช่น อุณหภูมิเทน้ำ โลหะ อุณหภูมิแม่พิมพ์วัสดุที่ใช้ในการหล่อ กรรมวิธีการหล่อ เป็นต้น การปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานก่อนการจำลองการหล่อ โดยผู้ใช้งานจะไม่สามารถปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆ ในระหว่างการจำลองการหล่อได้ ฉะนั้น ผู้ใช้งานควรตรวจสอบความถูกต้องของปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการกระบวนการหล่อ ก่อนที่จะทำการจำลองการหล่อ

2.6.5.3 ผู้ใช้งานสามารถสังเกตพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะขณะทำการจำลองการหล่อได้ โดยโปรแกรมจะแสดงการไหลและอุณหภูมิของน้ำโลหะ ณ เวลาต่างๆ ผู้ใช้งานสามารถรับรู้ อุณหภูมิของน้ำโลหะได้โดยการสังเกตที่แถบสีแสดงอุณหภูมิของน้ำโลหะ แสดงดังรูปที่ 2.21 โดยสีแดงจะแสดงอุณหภูมิสูงสุดของน้ำโลหะ ซึ่งอาจมีค่าที่สูงกว่าอุณหภูมิเทน้ำโลหะเล็กน้อยและสีม่วงเป็นการแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเกิดการแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว

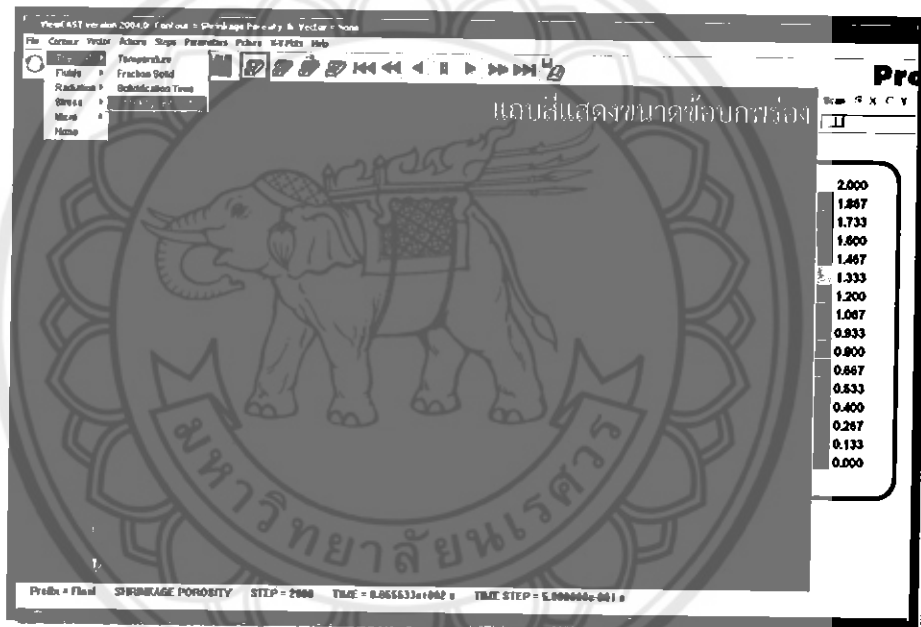


รูปที่ 2.21 โปรแกรมโปรคาสแสดงอุณหภูมิและการเย็นตัวของชิ้นงาน

ที่มา: [http://www.dpscontrol.sk/block\\_gallery.html](http://www.dpscontrol.sk/block_gallery.html)

2.6.5.4 ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยการสังเกตจากการจำลองการหล่อ ซึ่งโปรแกรมจะแสดงเวลาที่ใช้ในการหล่อให้ผู้ใช้งานสามารถสังเกตเห็นได้ หรือสามารถตรวจสอบได้จากข้อมูลการจำลองการหล่อ ที่บันทึกเวลาและอุณหภูมิทั้งหมดในการจำลองการหล่อไว้

2.6.5.5 ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหลังการจำลองการหล่อ โดยพิจารณาชิ้นงานเปรียบเทียบกับแถบสีแสดงข้อบกพร่องที่แสดงในโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 2.22 ซึ่งหากสีของชิ้นงาน ณ จุดใดจุดหนึ่งมีความแตกต่างกัน ให้สังเกตค่าบนแถบสีแสดงข้อบกพร่อง ซึ่งค่าที่อ่านได้จะเป็นการบ่งชี้ว่าข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเป็นข้อบกพร่องชนิดใด โดยข้อบกพร่องแบบรูพรุน (Blow hole) จะมีค่าบนแถบสีแสดงข้อบกพร่องน้อยกว่า 1 และหากค่าดังกล่าวมากกว่า 1 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า การหดตัวของชิ้นงาน (Shrinkage)



รูปที่ 2.22 แถบสีสำหรับการตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อ

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกชัย กิติแก้วทวีเสริฐ และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการออกแบบรูเข้าน้ำโลหะแบบใบพัด (Fan gate) ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ผลการทดลองที่ได้คือ เมื่อออกแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะให้รูเข้าน้ำโลหะแบบใบพัดมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง จะส่งผลทำให้อัตราการไหลมีความเร็วสูงบริเวณรูเข้าน้ำโลหะ จะเกิดการไหลแบบไม่ราบเรียบมากกว่าเดิม แต่เมื่อมีการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของรูเข้าน้ำโลหะ พบว่าการไหลของน้ำโลหะเป็นแบบราบเรียบมากยิ่งขึ้น การวิจัยดังกล่าวจึงเป็นการช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในชิ้นงานได้

ปรารภ กฤตบุญฤทธิ์ และพงษ์ศักดิ์ ดุลยประพันธ์ (2552) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระบบทางวิ่งน้ำโลหะ ต่อคุณภาพชิ้นงานในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง นอกจากกำหนดเส้นทางการ

ไหลที่เหมาะสมแล้ว ระบบทางวิ่งน้ำโลหะที่ดีจะต้องทำให้ความเร็วของน้ำโลหะ ขณะที่ไหลผ่านรูเข้าสู่โพรงแม่แบบมีความเร็วสูงพอเพื่อให้มีลักษณะการไหลเป็นแบบละออง ดังนั้นระบบทางวิ่งน้ำโลหะจะต้องมีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลงเป็นสัดส่วนเชิงเส้นจากทางวิ่งจนถึงรูเข้า เพื่อช่วยในการปรับเพิ่มความเร็วของน้ำโลหะให้สูงที่สุด และยังส่งผลให้การไหลของน้ำโลหะเป็นแบบราบเรียบ ทำให้ชิ้นงานที่ออกมามีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

พีรภักดิ์ วิริยะรัตนศักดิ์ (2552) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงเงื่อนไขการหล่อฉีดด้วยแรงดันในช่วงการฉีดในส่วนของการจ่ายน้ำโลหะ (Pre-Filling) ซึ่งความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ และอัตราการเติมเติมน้ำโลหะลงสู่กระบอกลูกสูบมีผลทำให้เกิดโพรงอากาศในชิ้นงานขึ้นได้ จากการทดสอบใช้ช่วงความเร็วการฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที ถึง 1 เมตรต่อวินาที และอัตราการเติมเติมน้ำโลหะลงสู่กระบอกลูกสูบร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 100 เมื่อนำความรู้ที่ได้มาวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า การกำหนดค่าความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบประมาณ 0.3 เมตรต่อวินาที ถึง 0.4 เมตรต่อวินาที โดยให้อัตราการเติมเติมน้ำโลหะลงสู่กระบอกลูกสูบที่ร้อยละ 60 ถึงร้อยละ 70 จะทำให้การไหลของน้ำโลหะส่วนของระบบจ่ายน้ำโลหะมีประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้ลดการเกิดโพรงอากาศในชิ้นงาน

สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์ และศศิธร พิทักษ์ธำพนพงษ์ (2549) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเทน้ำโลหะในกระบวนการหล่อโลหะอะลูมิเนียม โดยใช้โปรแกรม CastCAE ในการจำลองชิ้นงานชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งได้ทำการเลือกอุณหภูมิเทน้ำโลหะในช่วง 620 ถึง 740 องศาเซลเซียส และได้ใช้มุมเทน้ำโลหะที่ 45 องศา จากการจำลองงานหล่อดังกล่าว พบว่า การเทน้ำโลหะที่มีอุณหภูมิสูงจะเกิดการหดตัวภายนอกมากกว่าอุณหภูมิเทที่ต่ำกว่า และที่อุณหภูมิเทต่ำจะทำให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวก่อนเต็มโพรงแม่แบบ

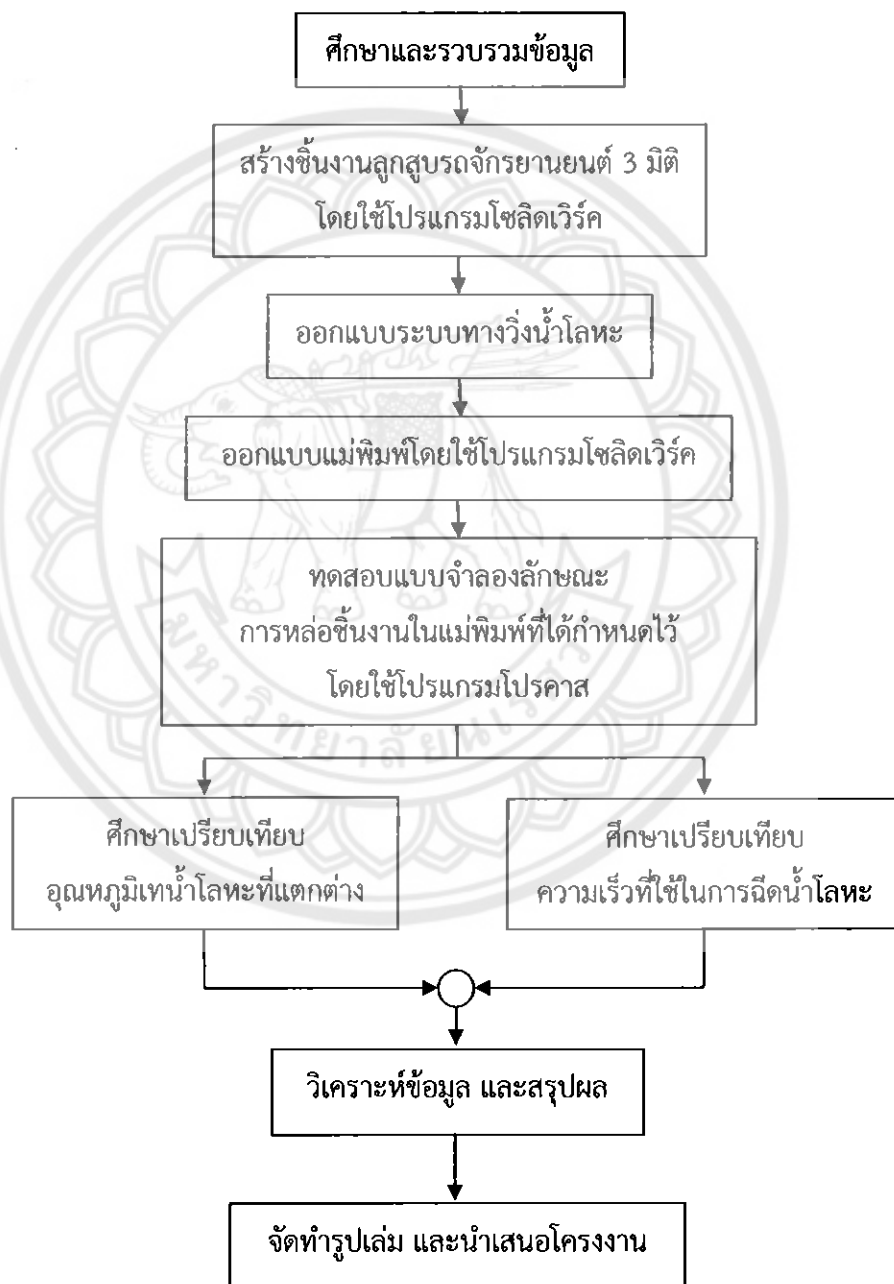
เชิดศักดิ์ อรัญมาลา และชาญยุทธ โกสิทธิ์วงษ์ (2547) ได้ศึกษาเกี่ยวกับหลักการออกแบบรูเข้าและทางวิ่งน้ำโลหะของชิ้นงานตัวอย่างที่มีรูพรุน โพรงอากาศชิ้นงานหดตัวและผิวของชิ้นงานไม่สวยงามโดยใช้เทคนิคการจำลองวิธีการหล่ออะลูมิเนียมช่วยในการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ซึ่งได้ทำการทฤษฎีเบื้องต้น รวมทั้งหลักการออกแบบรูเข้าและทางวิ่งน้ำโลหะ เพราะทั้งสองส่วนเป็นส่วนที่ควบคุมการไหลของน้ำอะลูมิเนียมก่อนเข้าสู่โพรงแม่แบบ โดยใช้โปรแกรมแมกมาซอฟท์ (MAGMASOFT) สำหรับใช้จำลองกรรมวิธีการหล่ออะลูมิเนียม ผลจากการใช้โปรแกรมดังกล่าวในการประกอบ การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาข้อบกพร่อง พบว่าสามารถลดข้อบกพร่องต่างๆบนชิ้นงานได้เป็นจำนวนมาก



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินโครงการ

สำหรับวิธีการดำเนินโครงการเป็นการกล่าวถึง ขั้นตอนการดำเนินโครงการ อุปกรณ์ และ เครื่องมือ ที่ใช้ในการทำโครงการ เพื่อเป็นแนวทางที่ใช้ในการวางแผน การกำหนดขอบเขตในการทำโครงการ ซึ่งได้แก่ ปัจจัยของอุณหภูมิและความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินโครงการ

### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินโครงการ

3.1.1 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Verniercalipper)

3.1.2 โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solid Work)

3.1.3 โปรแกรมโปรคาส (Procast)

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

เป็นการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่มีความจำเป็นในการดำเนินโครงการ เพื่อให้การดำเนินโครงการสามารถดำเนินการไปได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีการศึกษาและรวบรวมข้อมูล ดังนี้

3.2.1.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับลูกสูบรถจักรยานยนต์

3.2.1.2 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับงานหล่อ

3.2.1.3 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับข้อบกพร่อง และปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อโลหะ

3.2.1.4 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบ และสมบัติของอะลูมิเนียมผสม เอ 332 ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เอ 332 (ร้อยละโดยน้ำหนักโดยประมาณ)

| อะลูมิเนียมผสม | ซิลิคอน (Si) | เหล็ก (Fe) | ทองแดง (Cu) | แมงกานีส (Mn) | แมกนีเซียม (Mg) | นิกเกิล (Ni) | สังกะสี (Zn) | ไทเทเนียม (Ti) |
|----------------|--------------|------------|-------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|----------------|
| เอ 332         | 11.0-13.0    | 1.2        | 2.0-4.0     | 0.35          | 0.7-1.3         | 2.0-3.0      | 0.35         | 0.25           |

3.2.1.5 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแม่พิมพ์ เอสเคดี 61 ที่ใช้ในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.4

3.2.1.6 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานหล่อโลหะ

3.2.2 สร้างชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ในรูปแบบ 3 มิติ และออกแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะ โดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค

เป็นการจำลองจากขนาดจริงของลูกสูบรถจักรยานยนต์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการดำเนินโครงการ ซึ่งมีขั้นตอนในการจำลองชิ้นงาน ดังนี้

3.2.2.1 วัดขนาดส่วนต่างๆ ของลูกสูบรถจักรยานยนต์โดยละเอียด แล้วบันทึกข้อมูลที่ได้ในรูปแบบ 2 มิติ

3.2.2.2 ใช้ข้อมูลที่ได้จากชิ้นงานในรูปแบบ 2 มิติ สร้างชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ในรูปแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค

3.2.2.3 ออกแบบทางวิ่งน้ำโลหะ โดยจำเป็นต้องมีความสอดคล้องกับชิ้นงาน ซึ่งมี ส่วนประกอบที่สำคัญต้องออกแบบ ได้แก่ รูเทที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ทางวิ่งน้ำ โลหะและรูเข้าน้ำโลหะ

### 3.2.3 ออกแบบแม่พิมพ์

3.2.3.1 ใช้แม่พิมพ์ เอสเคดี 61 ที่มีขนาดเท่ากับแม่พิมพ์ของเครื่องหล่อแบบฉีดด้วย แรงดันสูง ขนาด 100 ตัน ซึ่งแม่พิมพ์ 1 ชั้น มีขนาด กว้าง 360 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร และ หนา 270 มิลลิเมตร โดยใช้แม่พิมพ์จำนวน 2 ชั้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเทเท่ากับ 50 มิลลิเมตร

3.2.3.2 กำหนดการวางชิ้นงานลูกสูบลูกสูบล้อจักรยานยนต์ในแม่พิมพ์จำนวน 6 ชั้น สร้าง ชิ้นงานในรูปแบบ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค

### 3.2.4 การทดสอบ

เป็นการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการแสดงตำแหน่งการเกิด ข้อบกพร่องภายในชิ้นงาน และมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยการทดลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

3.2.4.1 ทดสอบอุณหภูมิเทที่ 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส

3.2.4.2 ทดสอบกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ที่ความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที และ 1 เมตรต่อวินาที

### 3.2.5 วิเคราะห์ และเปรียบเทียบการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดน้ำโลหะใน กระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ข้อบกพร่องเชิงปริมาณที่เกิดขึ้นกับ ชิ้นงาน ได้แก่ รูพรุน และการหดตัวภายนอก

### 3.2.7 สรุปผลการทดลอง และจัดทำรูปเล่มรายงาน

สรุปผลการทดลองจากการศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิเท และความเร็วฉีดน้ำโลหะใน กระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง และจัดทำรูปเล่มรายงาน

## บทที่ 4

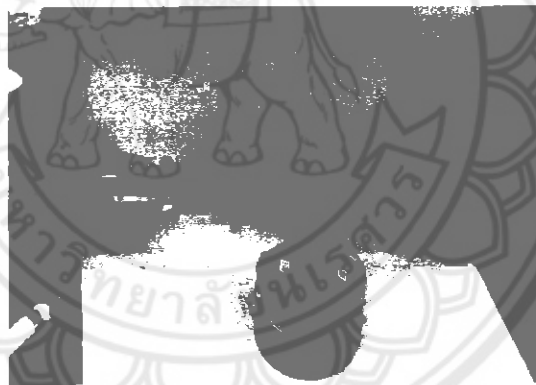
### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการสร้างชิ้นงาน 3 มิติโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ การวางตำแหน่งชิ้นงานในแม่พิมพ์ ผลการทดสอบการจำลองการหล่อโลหะ รวมถึงการนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์เปรียบเทียบปัจจัยด้านต่างๆ ได้แก่ ปัจจัยด้านความแตกต่างของอุณหภูมิและความแตกต่างของความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

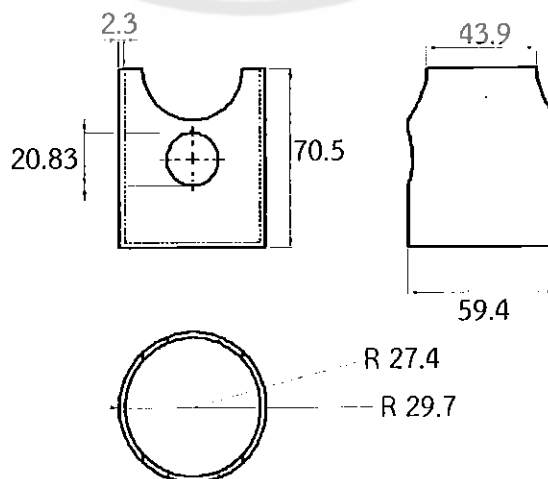
#### 4.1 การสร้างชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ 3 มิติ

เป็นการสร้างชิ้นงาน 3 มิติโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการจำลองการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ซึ่งชิ้นงานดังกล่าวมีขนาดเท่ากับขนาดจริงของลูกสูบรถจักรยานยนต์ที่ใช้งานทั่วไป มีขั้นตอนการสร้างชิ้นงาน ดังนี้

4.1.1 วัดขนาดส่วนต่างๆ ของลูกสูบรถจักรยานยนต์อย่างละเอียด แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยลูกสูบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 59.4 มิลลิเมตร สูง 70.5 มิลลิเมตร หน้า 2.3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การวัดขนาดส่วนต่างๆของลูกสูบรถจักรยานยนต์



รูปที่ 4.2 การระบุขนาดส่วนต่างๆของลูกสูบรถจักรยานยนต์ (หน่วย: มิลลิเมตร)

4.1.2 นำข้อมูลที่ได้จากการวัดขนาดชิ้นงานจริง สร้างชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ในรูปแบบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ในรูปแบบ 3 มิติ

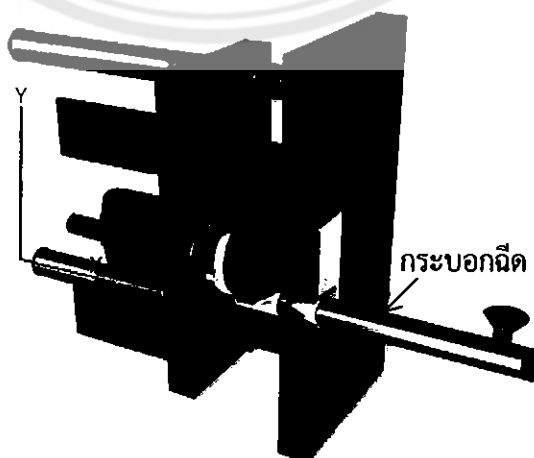
#### 4.2 การออกแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะและการวางตำแหน่งชิ้นงานในแม่พิมพ์

ขนาดรูเท (Sprue) ขนาดทางวิ่งน้ำโลหะ (Runner) และขนาดรูเข้าน้ำโลหะ (Gate) จะมีความสัมพันธ์กับการวางตำแหน่งชิ้นงานในแม่พิมพ์ ในส่วนนี้จะกล่าวถึง การออกแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะในแม่พิมพ์ และการวางตำแหน่งชิ้นงานในแม่พิมพ์ ดังนี้

##### 4.2.1 การออกแบบระบบทางวิ่งน้ำโลหะของชิ้นงาน

###### 4.2.1.1 รูเท (Sprue)

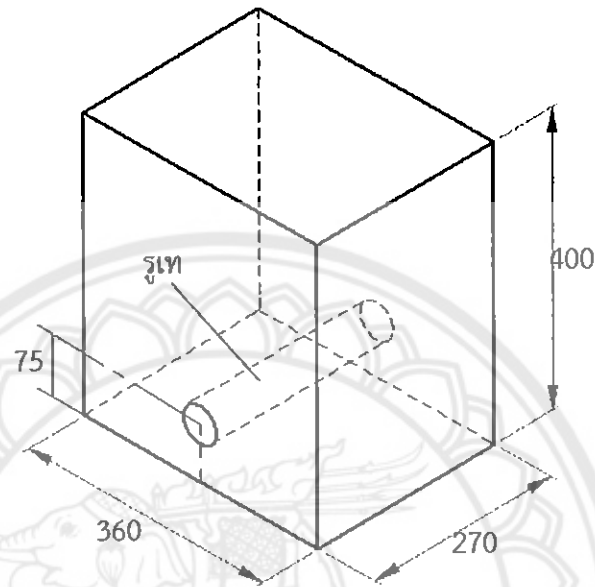
เป็นส่วนที่ส่งผ่านน้ำโลหะจากหัวฉีดเครื่องหล่อฉีดด้วยแรงดันสูงไปยังทางวิ่งน้ำโลหะ โดยการออกแบบรูเทจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งแม่พิมพ์ ที่ใช้งานในเครื่องหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ซึ่งจะมีแม่พิมพ์จำนวน 2 ชั้น แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยชั้น A จะเป็นชั้นที่ติดกับเครื่องหล่อฉีด ส่วนแม่พิมพ์ชั้น B จะเป็นชั้นที่สามารถเคลื่อนที่เข้าออกในแนวแกน X



รูปที่ 4.4 ลักษณะแม่พิมพ์ของเครื่องหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง

ที่มา: [http://www.alumasc-precision.co.uk/AVS\\_HighPressure.php](http://www.alumasc-precision.co.uk/AVS_HighPressure.php)

เนื่องจากเครื่องหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ขนาด 100 ตัน มีขนาดของแม่พิมพ์ หนา 270 มิลลิเมตร กว้าง 360 มิลลิเมตร และสูง 400 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเทเท่ากับ 50 มิลลิเมตร การออกแบบรูเทจึงเป็นไปตามขนาดที่ปฏิบัติงานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม โดยรูเทจะถูกออกแบบให้อยู่ในแม่พิมพ์ชั้น A เพื่อให้รูเทสามารถรับน้ำโลหะจากหัวฉีดได้โดยตรง ดังนั้นรูเทจะมีความยาว 270 มิลลิเมตร ตามความหนาของแม่พิมพ์ชั้น A แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ลักษณะรูเทน้ำโลหะในแม่พิมพ์ (ชั้น A)

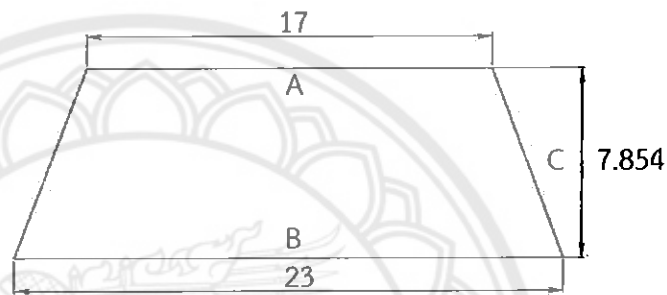
#### 4.2.1.2 ทางวิ่งน้ำโลหะ (Runner)

เป็นการออกแบบทางวิ่งหลักและทางวิ่งรองของน้ำโลหะ แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยทางวิ่งน้ำโลหะทั้งสองส่วนส่งผ่านน้ำโลหะจากรูเทไปยังรูเข้าน้ำโลหะ ซึ่งขนาดของทางวิ่งน้ำโลหะควรมีพื้นที่หน้าตัดร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 19 ของพื้นที่หน้าตัดรูเท โดยการทดลองนี้ กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะมีขนาดเท่ากับร้อยละ 8 ของพื้นที่หน้าตัดรูเท เนื่องจากผนังชิ้นงานมีความบาง และมีรูปร่างซับซ้อน ซึ่งการเลือกใช้พื้นที่หน้าตัดทางวิ่งที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้น้ำโลหะไหลเข้าสู่พื้นที่สุดท้ายของชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วกว่าการเลือกใช้ทางวิ่งน้ำโลหะที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ (ธนาธรรม, 2553) โดยพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ ( $A_{\text{Runner}}$ ) มีขนาดเท่ากับ 157.08 ตารางมิลลิเมตร สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ 2.1} \quad A_{\text{Runner}} &= P_{\text{Sprue}} \times A_{\text{Sprue}} \\
 \text{พื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ} &= 0.08 \times \text{พื้นที่หน้าตัดของรูเท} \quad (4.1) \\
 \text{หาขนาดพื้นที่หน้าตัดรูเท} \quad A_{\text{Sprue}} &= \pi r^2 \\
 &= \pi \times 25^2 \\
 &= 1963.5 \text{ ตารางมิลลิเมตร} \\
 \text{แทน } A_{\text{Sprue}} \text{ ใน (4.1) จะได้} \quad \text{พื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ} &\text{ เท่ากับ} \\
 \text{พื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ} &= 0.08 \times 1,963.5 \\
 &= 157.08 \text{ ตารางมิลลิเมตร}
 \end{aligned}$$

การออกแบบลักษณะพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะในการทดลองนี้ ออกแบบให้เป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากช่วยในการติดตั้งออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย และเป็นการออกแบบที่ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่งน้ำโลหะแบบสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยความยาวด้านคู่ขนานจะมีผลรวม 40 มิลลิเมตร ซึ่งด้าน A จะมีความยาว 17 มิลลิเมตร และด้าน B มีความยาว 23 มิลลิเมตร (หริส, 2543) แต่ความสูงของด้าน C จะเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งน้ำโลหะที่คำนวณได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก พื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ} &= (1/2) \times C \times (A+B) \\ \text{จะได้} &157.08 = 20 \times C \\ C &= 7.854 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$



รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งน้ำโลหะแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

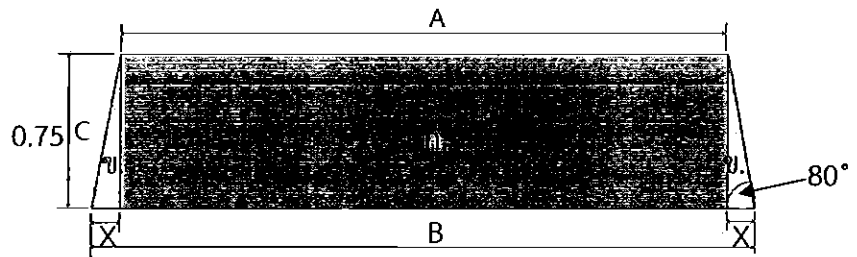
#### 4.2.1.3 รูเข้าน้ำโลหะ (Gate)

เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างทางวิ่งน้ำโลหะกับแบบหล่อชิ้นงาน ทำหน้าที่นำน้ำโลหะเข้าสู่แบบหล่อภายในแม่พิมพ์ และช่วยเพิ่มความเร็วในการไหลของน้ำโลหะ โดยรูเข้าน้ำโลหะต้องมีพื้นที่หน้าตัดขนาดร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 19 ของพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ ซึ่งการทดลองนี้กำหนดให้รูเข้าน้ำโลหะมีพื้นที่หน้าตัดขนาดร้อยละ 8 ของพื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ ทำให้รูเข้าน้ำโลหะมีพื้นที่หน้าตัด ( $A_{Gate}$ ) เท่ากับ 12.57 ตารางมิลลิเมตร คำนวณได้จากสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ 2.2} \quad A_{Gate} &= P_{Runner} \times A_{Runner} \\ \text{พื้นที่หน้าตัดรูเข้าน้ำโลหะ} &= 0.08 \times \text{พื้นที่หน้าตัดทางวิ่งน้ำโลหะ} \\ &= 0.08 \times 157.08 \\ &= 12.57 \text{ ตารางมิลลิเมตร} \end{aligned}$$

การออกแบบรูเข้าน้ำโลหะควรมีความหนา (ด้าน C) ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ถึง 0.75 มิลลิเมตร มุมระหว่าง C และ B ควรมีค่า ประมาณ 80 องศา โดยการทดลองนี้ใช้ความหนาของรูเข้าน้ำเท่ากับ 0.75 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการแข็งตัวของน้ำโลหะก่อนเต็มเต็มชิ้นงาน และมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดของรูเข้าน้ำโลหะ แสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งความยาวด้าน A และ B หาได้จากการคำนวณดังนี้

พิจารณา รูสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีพื้นที่หน้าตัด 12.57 ตารางมิลลิเมตร จะพบว่า เป็นการรวมกันของพื้นที่รูปสี่เหลี่ยม 1 รูป (พื้นที่ ก.) กับพื้นที่สามเหลี่ยม 2 รูป (พื้นที่ ข.)



รูปที่ 4.7 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดของรูเข้าน้ำโลหะ

จาก พื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู

$$(A_{\text{Gate}}) = (1/2) \times (A+B) \times C$$

จะได้

$$(A+B) = 2 \times (A_{\text{GATE}}/C)$$

$$(A+B) = (2 \times 12.75)/0.75$$

$$B = 33.25 - A \quad (4.2)$$

หาความยาวด้าน A จากสูตรพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\text{พื้นที่ ก.} = A \times C$$

$$= 0.75 \times A$$

$$A = \text{พื้นที่ ก.} / 0.75 \quad (4.3)$$

หาพื้นที่ ก. จาก

$$\text{พื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู } (A_{\text{Gate}}) = \text{พื้นที่ ก.} + \text{พื้นที่ ข.} \times 2 \text{ รูป}$$

$$\text{พื้นที่ ก.} = 12.57 - \text{พื้นที่ ข.} \times 2 \text{ รูป} \quad (4.4)$$

หาพื้นที่ ข. จาก

$$\text{พื้นที่ ข.} = (1/2) \times C \times X$$

$$= (1/2) \times 0.75 \times X$$

$$= 0.375 \times X \quad (4.5)$$

หาความยาว X จาก  $\tan 80^\circ = C/X$

$$X = C/\tan 80^\circ$$

$$X = 0.75/\tan 80^\circ$$

$$= 0.132 \text{ มิลลิเมตร}$$

แทนค่า X ใน (4.5) จะได้ พื้นที่ ข. เท่ากับ

$$\text{พื้นที่ ข.} = 0.375 \times 0.132$$

$$= 0.0495 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

แทนค่า พื้นที่ ข. ใน (4.4) จะได้ พื้นที่ ก. เท่ากับ

$$\text{พื้นที่ ก.} = 12.57 - (2 \times 0.0495)$$

$$= 12.471 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$



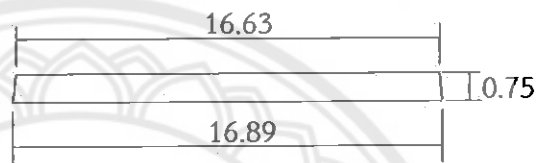
แทนค่า พื้นที่ ก. ใน (4.3) จะได้ ความยาว A เท่ากับ

$$\begin{aligned} A &= 12.475/0.75 \\ &= 16.63 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

แทนค่า ความยาว A ใน (4.2) จะได้ ความยาว B เท่ากับ

$$\begin{aligned} B &= 33.52 - 16.63 \\ &= 16.89 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นความยาวด้าน A และ B จะเท่ากับ 16.63 และ 16.89 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงระยะต่างๆ ของหน้าตัดรูเข้าน้ำโลหะ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นที่หน้าตัด และระยะด้านต่างๆ ของรูเข้าน้ำโลหะ

#### 4.2.2 การวางตำแหน่งชิ้นงานและระบบทางวิ่งน้ำโลหะในแม่พิมพ์

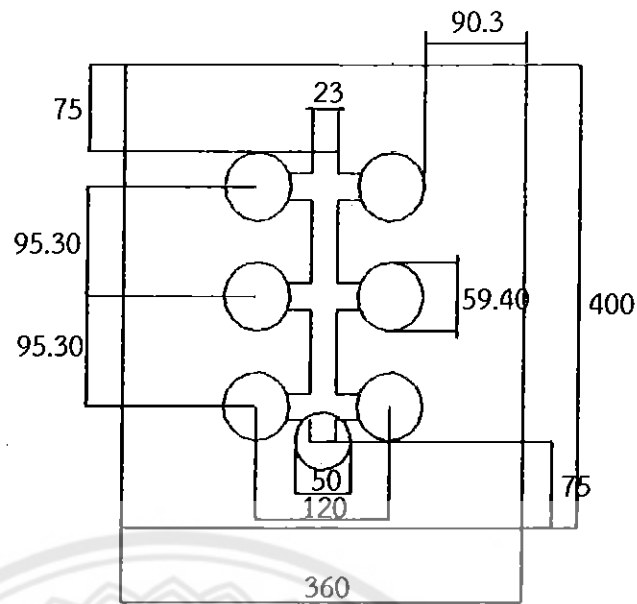
การวางตำแหน่งชิ้นงานและระบบทางวิ่งน้ำโลหะ ถือเป็นขั้นตอนการออกแบบที่มีความสำคัญในการหล่อโลหะ เนื่องจากระบบทางวิ่งน้ำโลหะจะส่งผลต่อการไหลและทิศทางการไหลของน้ำโลหะ ซึ่งการวางตำแหน่งต่างๆ ดังกล่าวที่เสร็จสิ้น แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ระบบทางวิ่งน้ำโลหะของชิ้นงานในแม่พิมพ์ ในลักษณะ 3 มิติ

##### 4.2.2.1 ตำแหน่งชิ้นงาน

การวางตำแหน่งชิ้นงานจะวางในแม่พิมพ์ชิ้นที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (ชิ้น B ในรูปที่ 4.4) เพื่อความสะดวกในการติดตั้งชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ โดยชิ้นงานควรถูกวางในตำแหน่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนในปริมาณที่เท่าๆ กันทุกทิศทาง แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งระยะห่างจากขอบด้านบนและด้านล่างของแม่พิมพ์ถึงขอบชิ้นงานด้านบนนั้นๆ จะเท่ากับ 75 มิลลิเมตร และระยะห่างจากขอบด้านซ้ายและด้านขวาของแม่พิมพ์ถึงขอบชิ้นงานด้านบนนั้นๆ เท่ากับ 90.3 มิลลิเมตร



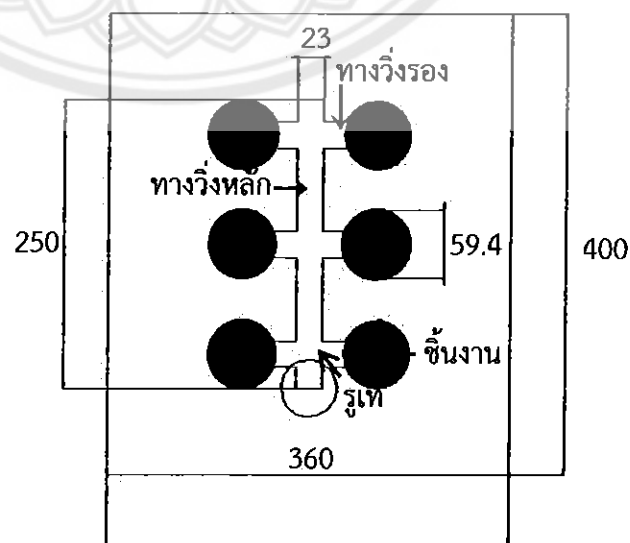
รูปที่ 4.10 การวางตำแหน่งของชิ้นงานในแม่พิมพ์ (หน่วย: มิลลิเมตร)

#### 4.2.2.2 ตำแหน่งรูเท

เนื่องจากแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองอ้างอิงจากแม่พิมพ์ที่ใช้งานของเครื่องหล่อฉีดแรงดันสูงขนาด 100 ตัน ซึ่งมีรูที่อยู่ในแม่พิมพ์ชั้นที่ติดกับเครื่องหล่อฉีด มีระยะห่างจากขอบด้านล่างของแม่พิมพ์ถึงจุดศูนย์กลางรูเทเท่ากับ 75 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.5

#### 4.2.2.3 ตำแหน่งทางวิ่งน้ำโลหะ

ทางวิ่งหลักจะเริ่มจากจุดกึ่งกลางของหน้าตัดรูเท ซึ่งมีระยะห่างจากขอบแม่พิมพ์ด้านล่าง 75 มิลลิเมตร และระยะห่างจากขอบแม่พิมพ์ด้านบนถึงจุดสิ้นสุดทางวิ่งหลัก เท่ากับ 75 มิลลิเมตร ทำให้ทางวิ่งหลักมีความยาว 250 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.11 ส่วนทางวิ่งรองจะแยกจากทางวิ่งหลัก เพื่อส่งต่อน้ำโลหะจากทางวิ่งหลักไปยังรูเข้าน้ำโลหะ โดยมีความยาว เท่ากับ 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.11 ทางวิ่งน้ำโลหะในแม่พิมพ์ (หน่วย: มิลลิเมตร)

### 4.3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

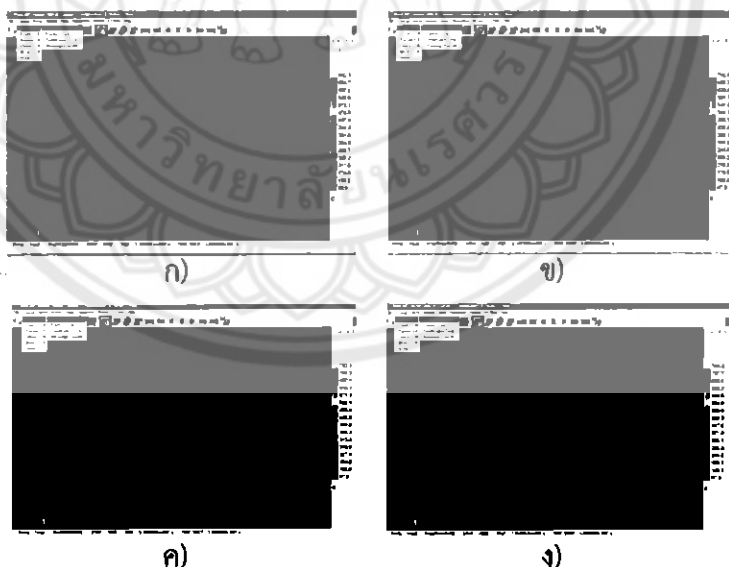
ผลการทดลองเป็นผลมาจากการจำลองการหล่อโดยใช้อะลูมิเนียม เอ 332 ในชิ้นงานลูกสูบลูกจักรยานยนต์ โดยมีปัจจัยในการทดลองที่แตกต่างกัน คือ ปัจจัยด้านอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ได้แก่ 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส และปัจจัยด้านความเร็วฉีดน้ำโลหะที่ใช้ในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูง ได้แก่ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งการทดลองการจำลองการหล่อดังกล่าวมีผลการทดลอง ดังนี้

#### 4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่มีผลต่อการเติมเต็มน้ำโลหะ และการเกิดข้อบกพร่องเชิงปริมาตรในชิ้นงานหล่อ

ในการทดลองครั้งนี้ ใช้อุณหภูมิเทน้ำโลหะที่แตกต่างกัน 4 อุณหภูมิ ได้แก่ 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการทดลองพบว่า อิทธิพลของอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ส่งผลต่อชิ้นงานหล่อ สามารถวิเคราะห์ได้จากความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที โดยสามารถพิจารณาผลการทดลองได้ ดังนี้

##### 4.3.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที

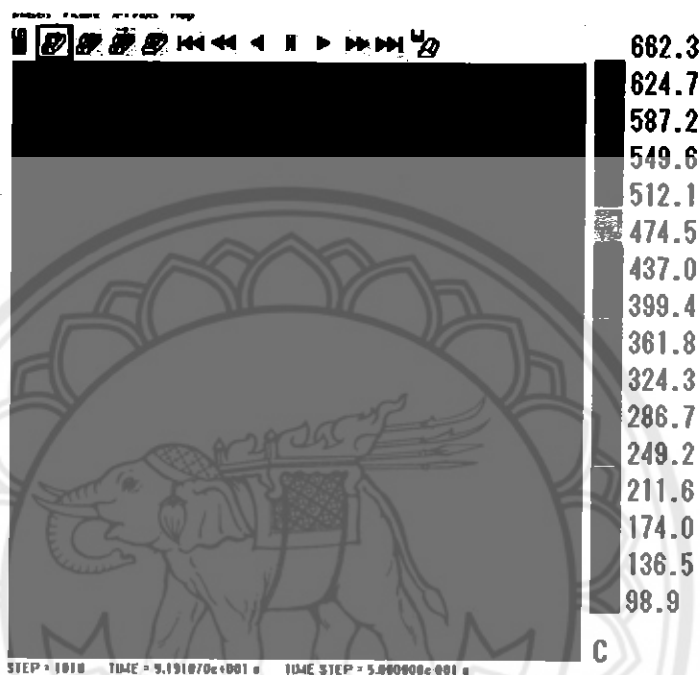
การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที พบว่า ณ อุณหภูมิเทต่างๆ น้ำโลหะสามารถเติมเต็มส่วนที่เป็นชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจาก ความสามารถในการไหลที่ดีของน้ำโลหะ โดยสามารถไหลเข้าไปในส่วนของชิ้นงานที่มีความบางและความซับซ้อนได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะชิ้นงานจากการจำลองการหล่อที่มีอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่แตกต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที

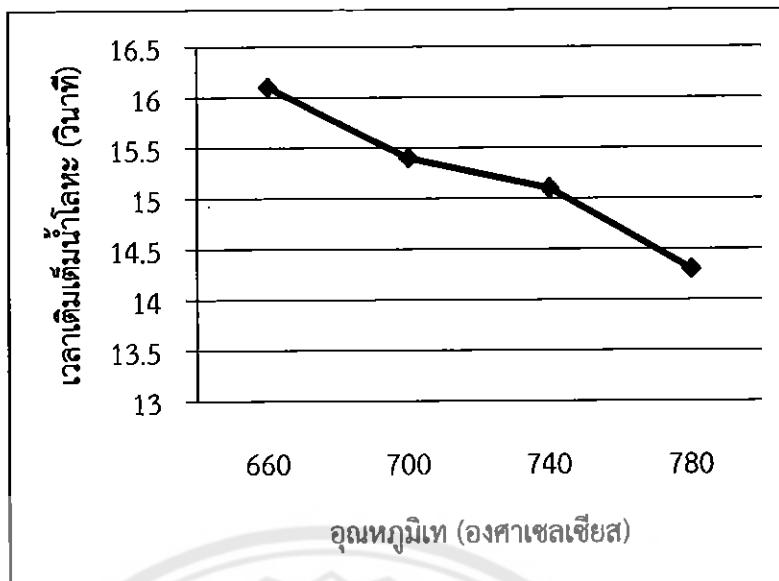
- ก) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส
- ข) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส
- ค) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 740 องศาเซลเซียส
- ง) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส

โดยระหว่างการจำลองการหล่อ ชิ้นงานจะแสดงสีที่ต่างกันตามอุณหภูมิของน้ำ โลหะในขณะนั้น เช่น ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส จะแสดงโทนสีแดงเมื่อน้ำโลหะมี อุณหภูมิอยู่ในช่วง 662.3 ถึง 587.2 องศาเซลเซียส, โทนสีเหลืองเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 549.6 ถึง 474.5 องศาเซลเซียส, โทนสีเขียวเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 437.0 ถึง 361.8 องศาเซลเซียส, โทนสีน้ำเงินเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 324.3 ถึง 211.6 องศาเซลเซียส และโทนสี ม่วงเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 174.0 ถึง 98.9 องศาเซลเซียส เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 4.13



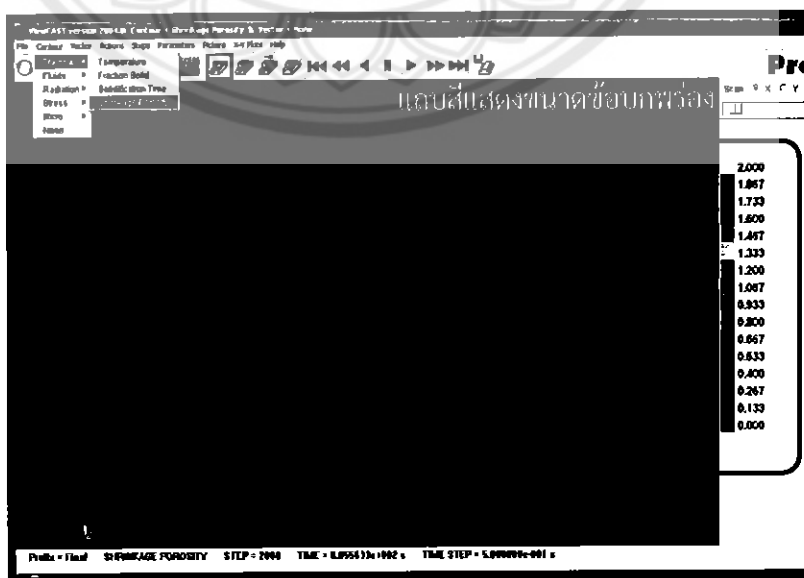
รูปที่ 4.13 แถบสีแสดงอุณหภูมิน้ำโลหะจากการจำลองการหล่อด้วยอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที

การที่น้ำโลหะสามารถเติมเต็มชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์นั้น เนื่องจาก น้ำโลหะใช้ ระยะเวลาในการไหลเข้าเติมเต็มชิ้นงานอยู่ในช่วง 14 ถึง 16 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยที่อุณหภูมิ เทน้ำโลหะ 660, 700, 740, และ 780 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงาน 16.1, 15.4, 15.1 และ 14.3 วินาที ตามลำดับ ระยะเวลาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการใช้ความเร็วใน การฉีดน้ำโลหะที่เท่ากัน ณ อุณหภูมิเทที่แตกต่างกัน จะทำให้น้ำโลหะไหลเข้าเติมเต็มชิ้นงานใน ระยะเวลาที่ใกล้เคียงกันมาก โดยชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเติมเต็มน้ำ โลหะสู่ชิ้นงานนานที่สุด เนื่องจาก น้ำโลหะ ณ อุณหภูมิเทดังกล่าวมีความหนืดสูงกว่าอุณหภูมิเทอื่นๆ จึงส่งผลให้ความสามารถในการไหลของน้ำโลหะลดลง ตรงข้ามกับชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 780 องศา เซลเซียส น้ำโลหะมีความหนืดต่ำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเทอื่นๆ ส่งผลให้การเติมเต็มน้ำโลหะเข้าสู่ ชิ้นงานใช้เวลาสั้นที่สุด ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิเทที่สูงขึ้นส่งผลให้ ความสามารถในการไหลของน้ำโลหะดีขึ้นด้วย

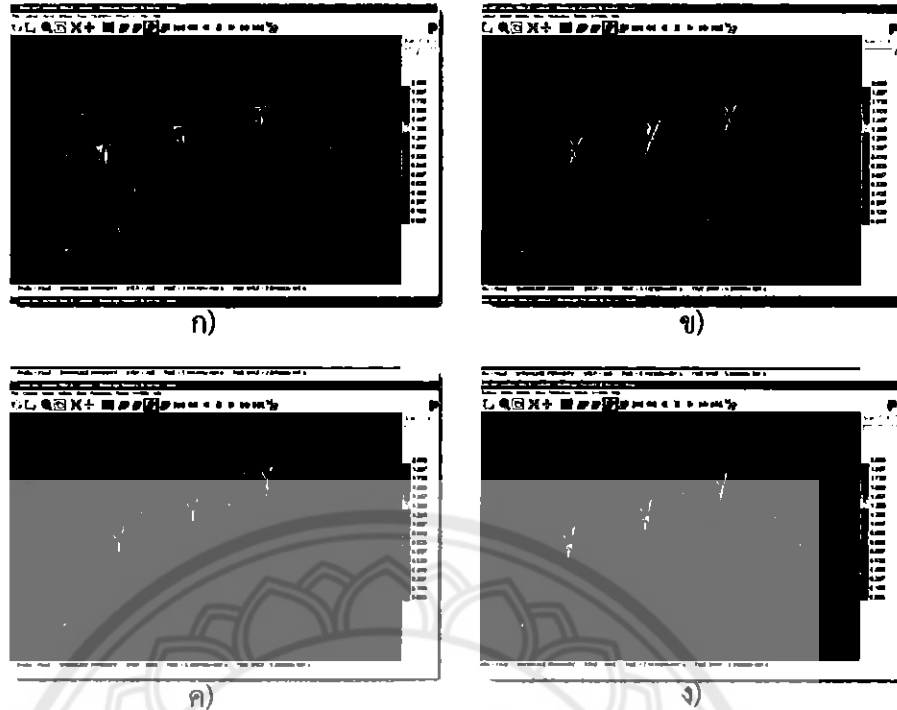


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงานกับอุณหภูมิเทน้ำโลหะที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที

วิธีที่ใช้ในการตรวจสอบข้อบกพร่องเชิงปริมาตร ได้แก่ รูพรุน (Blow hole) และการหดตัว (Shrinkage) ในชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการหล่อ สามารถตรวจสอบได้โดยใช้การตัดผ่านชิ้นงานแต่ละส่วน (Cross Section) จากนั้นพิจารณาความแตกต่างของสีที่ปรากฏบนชิ้นงาน โดยสีแต่ละสีจะแสดงขนาดของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.15 หากภายในชิ้นงานมีการแสดง โทนสีเขียวถึงสีแดง ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจะเป็นการหดตัวของชิ้นงาน (แถบสีแสดงขนาดข้อบกพร่อง จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1) แต่หากภายในชิ้นงานแสดงโทนสีน้ำเงิน จะเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุน (แถบสีแสดงขนาดข้อบกพร่องจะมีค่าน้อยกว่า 1) และหากไม่เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน ชิ้นงานจะแสดงค่าเป็นสีม่วง (แถบสีแสดงขนาดข้อบกพร่องจะมีค่าเท่ากับศูนย์) ซึ่งการตรวจสอบข้อบกพร่องเชิงปริมาตรในชิ้นงาน แสดงดังรูป 4.16



รูปที่ 4.15 แถบสีสำหรับการตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อ

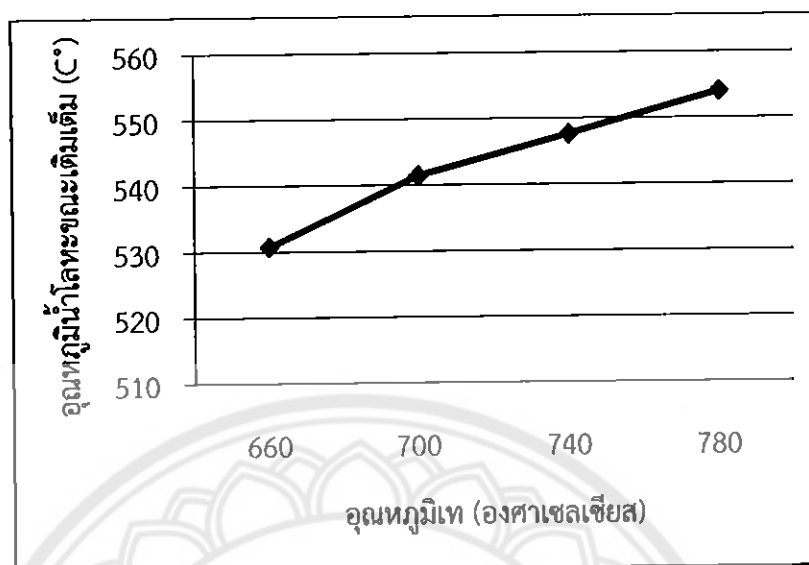


รูปที่ 4.16 การตรวจสอบข้อบกพร่องในชั้นงานภายหลังการจำลองการล่อที่อุณหภูมิเหน้าโลหะต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที  
 ก) ชั้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส  
 ข) ชั้นงานที่มีอุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส  
 ค) ชั้นงานที่มีอุณหภูมิเท 740 องศาเซลเซียส  
 ง) ชั้นงานที่มีอุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส

จากการตรวจสอบดังกล่าว พบว่า ขณะทำการตรวจสอบข้อบกพร่องในชั้นงาน ชั้นงานแสดงสีม่วงตลอดการตรวจสอบ เมื่อพิจารณาแถบสีการเกิดข้อบกพร่องทำให้ทราบว่า ชั้นงานที่แสดงสีม่วงจะพบการเกิดข้อบกพร่องเท่ากับศูนย์ นั้นแสดงว่า การจำลองการล่อไม่เกิดข้อบกพร่องขึ้นในชั้นงาน ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจาก น้ำโลหะมีการเติมเต็มชั้นงานที่มีความบางได้ดี ใช้ระยะเวลาที่สั้นในการเติมเต็มน้ำโลหะ ซึ่งระยะเวลาในการเติมเต็มน้ำโลหะดังกล่าว เป็นสาเหตุที่ทำให้ชั้นงานล่อไม่เกิดข้อบกพร่อง เนื่องจาก ระยะเวลาในการเติมเต็มน้ำโลหะที่สั้นจะทำให้ น้ำโลหะมีโอกาสสัมผัสกับอากาศได้น้อย จึงส่งผลให้ภายในชั้นงานเกิดฟองอากาศในปริมาณที่น้อยตามไปด้วย อีกทั้งความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ ณ อุณหภูมิเทต่างๆ ส่งผลให้น้ำโลหะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนในปริมาณที่น้อยมากในกระบวนการล่อ ทำให้ลดปริมาณการเกิดฟองอากาศในชั้นงาน ชั้นงานจึงไม่เกิดข้อบกพร่องแบบรูปพรุณขึ้น

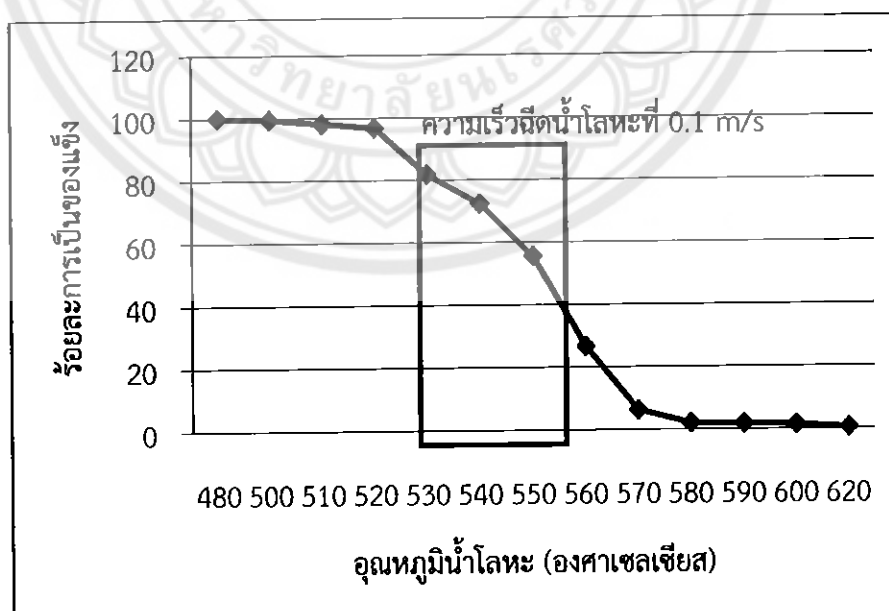
อุณหภูมิขณะเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชั้นงาน ส่งผลให้ไม่เกิดการหดตัวของชั้นงานหลังการล่อ เนื่องจาก เมื่อน้ำโลหะเติมเต็มทุกส่วนของชั้นงาน น้ำโลหะจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน แสดงดังรูป 4.17 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขณะน้ำโลหะเติมเต็มชั้นงานกับอุณหภูมิเหน้าโลหะที่แตกต่างกัน โดยมีความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที จากรูปจะพบว่า ช่วงอุณหภูมิในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชั้นงานจะมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเทที่ต่างกัน โดยชั้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส จะมีอุณหภูมิขณะเติมเต็มชั้นงาน เท่ากับ

534, 541, 547 และ 554 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะส่งผลต่อปริมาณการเป็นของแข็งในชิ้นงานหล่อ และการเกิดการหดตัวของชิ้นงาน



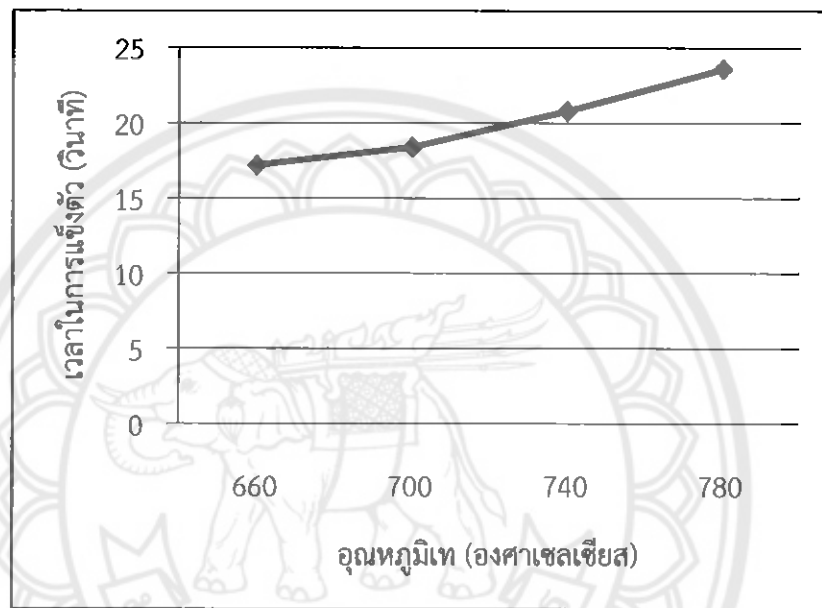
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขณะน้ำโลหะเต็มเต็มชิ้นงานกับอุณหภูมิหน้าโลหะที่แตกต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที

เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิหน้าโลหะขณะเต็มเต็มชิ้นงานกับข้อมูลร้อยละการเป็นของแข็งของอะลูมิเนียม เอ 332 ในโปรแกรมโปรคาส พบว่า ที่อุณหภูมิหน้าโลหะดังกล่าว ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณการเป็นของแข็งร้อยละ 80.8, 72.4, 64.5 และ 46.3 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเป็นของแข็งของอะลูมิเนียม เอ 332 กับอุณหภูมิหน้าโลหะ

ปริมาณการเป็นของแข็งดังกล่าว จะส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.19 โดยชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการแข็งตัว เท่ากับ 17.2, 18.4, 20.8 และ 23.6 วินาที ตามลำดับ จากปริมาณการเป็นของแข็งและระยะเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน พบว่า หลังจากให้น้ำโลหะเติมเต็มชิ้นงานจนชิ้นงานเกิดการแข็งตัวทั้งหมดมีระยะเวลาที่สั้น อีกทั้งน้ำโลหะสามารถเติมเต็มชิ้นงานที่มีความบางได้เป็นอย่างดี เมื่อชิ้นงานเกิดการแข็งตัวครบทุกส่วน จึงไม่เกิดการดึงน้ำโลหะจากส่วนอื่นของชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโดยใช้ความเร็วในการฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่เกิดการหดตัวขึ้น

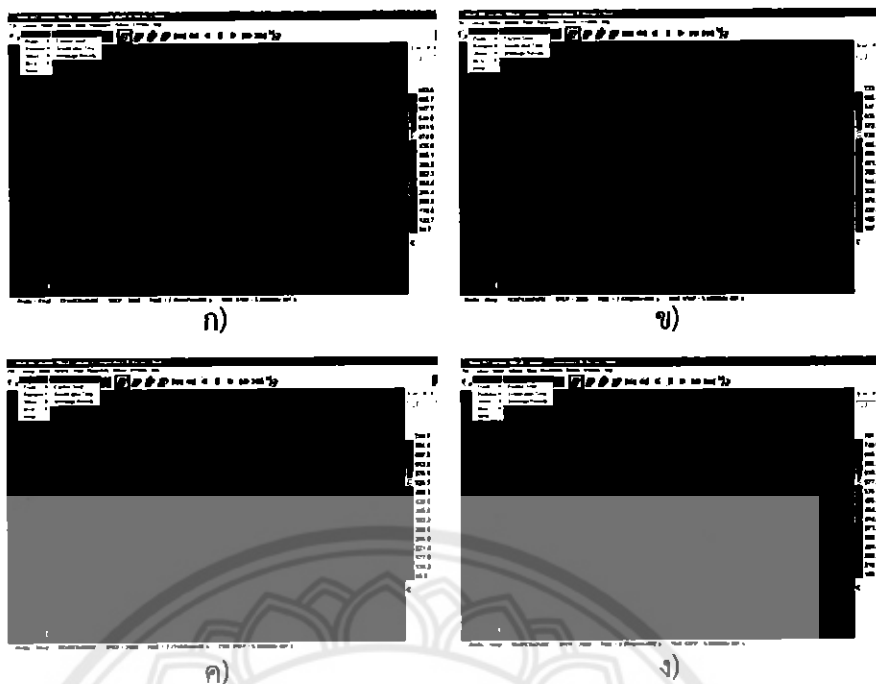


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานกับอุณหภูมิเหน้ำโลหะ ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 0.1 เมตรต่อวินาที

#### 4.3.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิเหน้ำโลหะ ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที

การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที พบว่า ณ อุณหภูมิต่างๆ น้ำโลหะสามารถไหลเข้าไปเติมเต็มในส่วนของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและส่วนที่มีความบางได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.20 การที่น้ำโลหะสามารถเติมเต็มชิ้นงานดังกล่าวได้ดีนั้น เนื่องจาก น้ำโลหะใช้ระยะเวลาในการไหลเข้าเติมเต็มชิ้นงานใกล้เคียงกันมาก โดยน้ำโลหะใช้เวลาในการไหลเข้าเติมเต็มชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.48, 1.48, 1.46 และ 1.43 วินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงานกับอุณหภูมิที่ต่างกัน

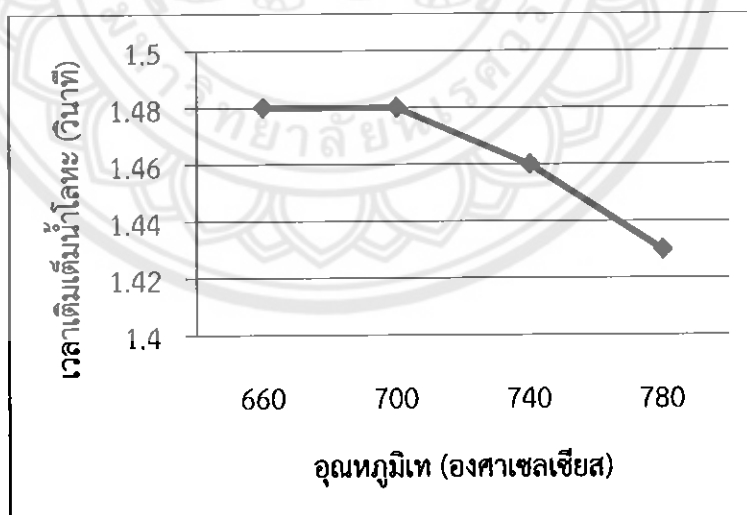




รูปที่ 4.20 ลักษณะชิ้นงานจากการจำลองการหล่อที่มีอุณหภูมิหน้าโลหะที่แตกต่างกันที่

ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที

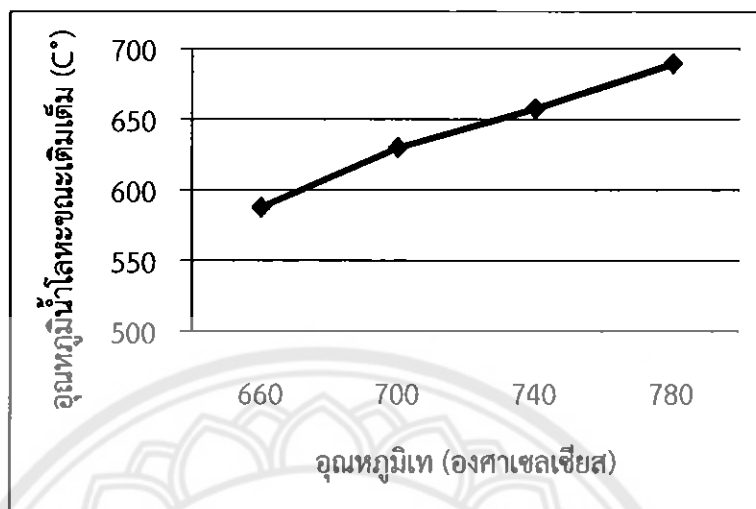
- ก) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส
- ข) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส
- ค) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 740 องศาเซลเซียส
- ง) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส



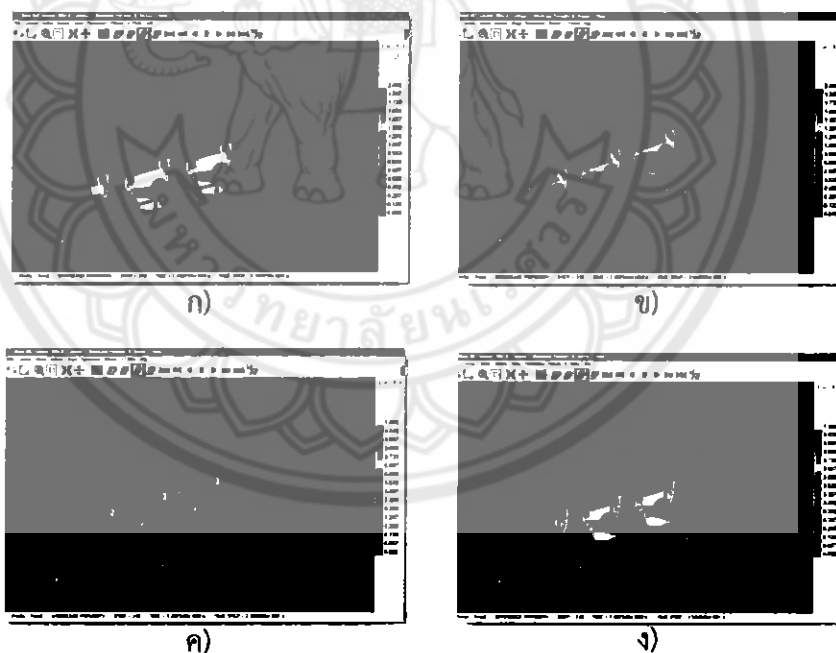
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงานกับอุณหภูมิหน้าโลหะ ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที

ระยะเวลาการเติมเต็มน้ำโลหะที่ใกล้เคียงกันเป็นผลมาจาก ความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะและอุณหภูมิขณะที่น้ำโลหะเติมเต็มชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิหน้าโลหะขณะเติมเต็มชิ้นงาน เท่ากับ 587.7, 629.9, 657.5 และ

689.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยอุณหภูมิดังกล่าวถือเป็นอุณหภูมิที่สูง ส่งผลให้น้ำโลหะมีความหนืดน้อยมาก น้ำโลหะจึงไหลเข้าเติมเต็มชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วและทั่วทั้งชิ้นงาน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขณะน้ำโลหะเติมเต็มชิ้นงานกับอุณหภูมิเหน้าโลหะที่แตกต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที

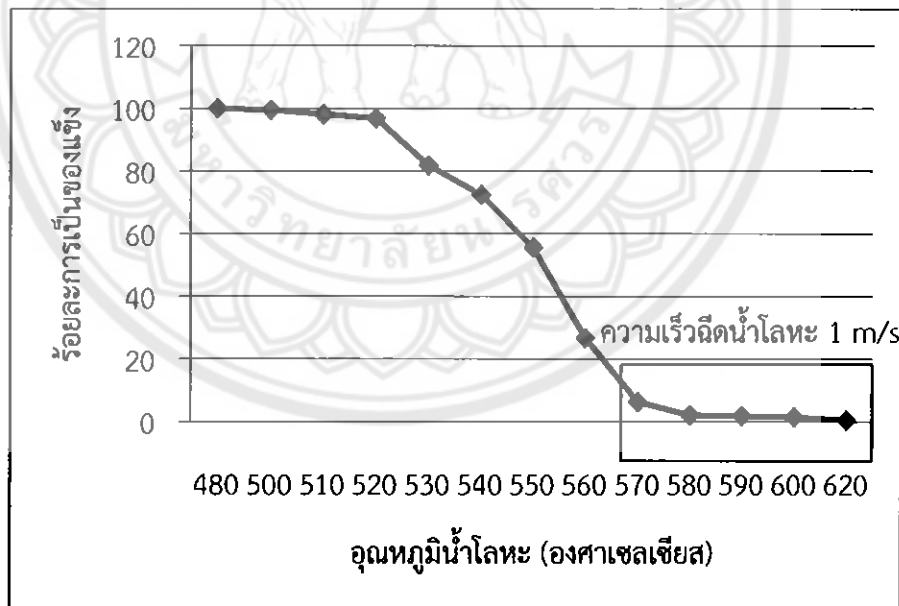


รูปที่ 4.23 การตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อที่อุณหภูมิเหน้าโลหะต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที

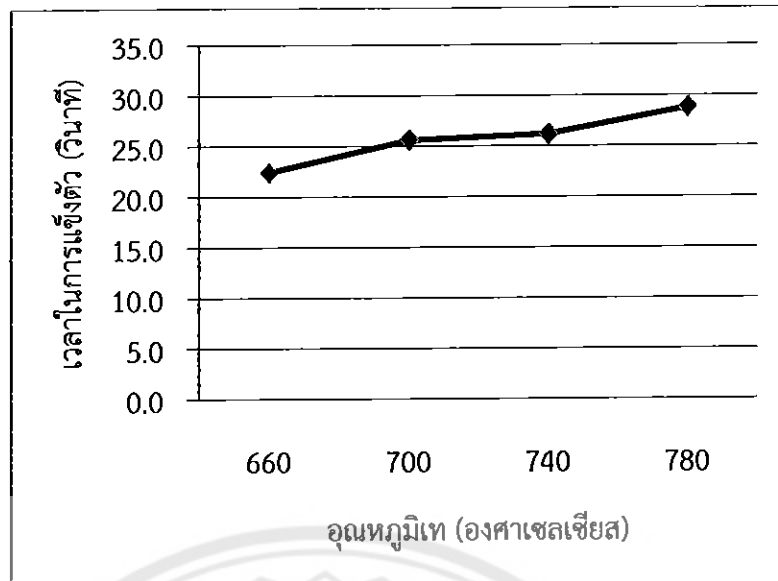
- ก) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส
- ข) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส
- ค) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 740 องศาเซลเซียส
- ง) ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส

การตรวจสอบข้อบกพร่องเชิงปริมาตรในชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเหนือน้ำโลหะแตกต่างกัน ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 4.23 จากการตรวจสอบและพิจารณา พบว่า ขณะทำการตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงาน ชิ้นงานแสดงสีม่วงตลอดการตรวจสอบนั้นแสดงว่า ชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการหล่อไม่เกิดข้อบกพร่องในชิ้นงาน เนื่องจาก น้ำโลหะมีการเติมเต็มชิ้นงานที่มีความบางได้ดี และใช้ระยะเวลาที่สั้นในการเติมเต็มน้ำโลหะ ทำให้น้ำโลหะมีโอกาสสัมผัสกับอากาศน้อยมาก แม้ว่าความเร็วฉีดที่สูงจะทำให้เกิดน้ำโลหะเกิดการไหลแบบปั่นป่วน แต่เนื่องจากชิ้นงานหล่อใช้เวลานานในการแข็งตัว อีกทั้งชิ้นงานที่มีความบางยังช่วยเพิ่มแรงอัดของน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นงาน เมื่อน้ำโลหะเกิดการแข็งตัวจึงไม่เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน

ระยะเวลาที่สั้นในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงาน ส่งผลให้น้ำโลหะยังมีอุณหภูมิสูง และมีปริมาณการเป็นของแข็งที่น้อยมาก แสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งปริมาณการเป็นของแข็งในน้ำโลหะส่งผลดีต่อชิ้นงาน กล่าวคือ เมื่อน้ำโลหะไหลเข้าเติมเต็มชิ้นงาน ปริมาณการเป็นของแข็งในน้ำโลหะจะทำให้ชิ้นงานใช้เวลานานในการแข็งตัว และจากการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการแข็งตัว เท่ากับ 22.4, 25.6, 26.2 และ 28.8 วินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะมีระยะเวลาในการแข็งตัวที่ใกล้เคียงกัน และถือเป็นระยะเวลาที่ค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่น้ำโลหะเติมเต็มชิ้นงาน ระยะเวลาการแข็งตัวที่ช้าส่งผลให้การแข็งตัวของน้ำโลหะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันทั้งชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานส่วนที่เป็นของแข็งมีการดึงน้ำโลหะจากส่วนอื่นๆ ในปริมาณที่น้อยมาก ชิ้นงานหล่อจึงไม่เกิดการหดตัวขึ้น



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเป็นของแข็งของอะลูมิเนียม เอ 332 กับอุณหภูมิน้ำโลหะ



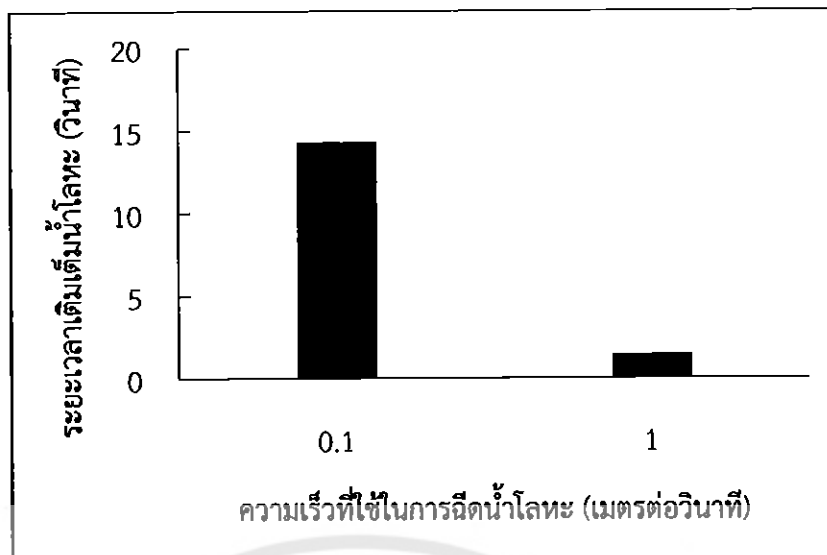
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานกับอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ที่ความเร็วฉีดน้ำโลหะ 1 เมตรต่อวินาที

#### 4.3.2 อิทธิพลของความเร็วฉีดน้ำโลหะที่มีผลต่อการเติมเต็มน้ำโลหะ และการเกิดข้อบกพร่องเชิงปริมาตรในชิ้นงานหล่อ

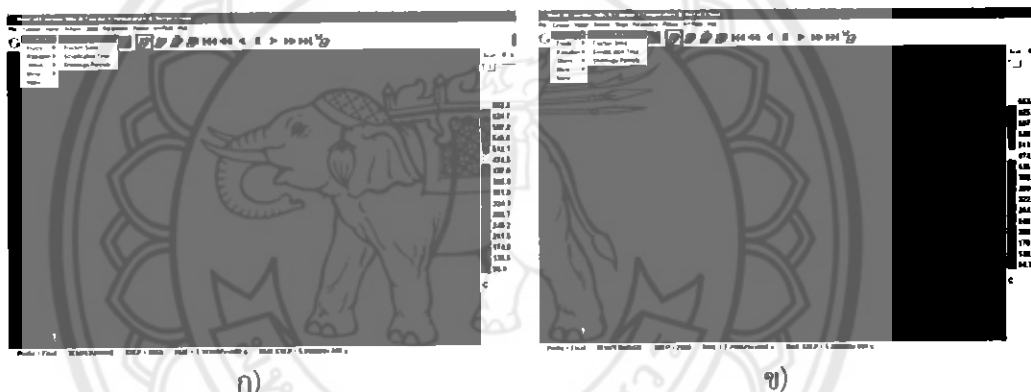
ความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ เป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเติมเต็มน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นงาน และการเกิดรูพรุนในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อ เนื่องจาก สาเหตุหลักของการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน เกิดจากพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะในกระบวนการหล่อ ในส่วนนี้จึงให้ความสำคัญในการพิจารณาการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงาน และการเกิดรูพรุนในชิ้นงานเป็นหลัก สำหรับการหดตัวของชิ้นงานสามารถอธิบายได้โดยปัจจัยด้านความแตกต่างของอุณหภูมิเทน้ำโลหะ ดังที่แสดงในหัวข้อ 4.3.1 ซึ่งการทดลองนี้ได้กำหนดความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที เพื่อแสดงความแตกต่างของผลการทดลองด้านความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะที่ชัดเจน ได้มีการพิจารณาชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเทสูงสุดและต่ำสุด ดังนี้

##### 4.3.2.1 อิทธิพลของความเร็วฉีดน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการหล่อ ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ถือเป็นชิ้นงานที่น้ำโลหะสามารถเกิดการแข็งตัวได้เร็วที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิเทดังกล่าวเป็นอุณหภูมิเทที่ต่ำที่สุดที่ใช้ในการทดลอง การนำปัจจัยด้านความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะมาใช้ในการทดลอง จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงาน โดยความเร็วที่ใช้ในการฉีด 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาในการเติมเต็มน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นงาน เท่ากับ 16.1 และ 1.48 วินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.26 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่า ความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะที่สูงขึ้นทำให้ระยะเวลาการเติมเต็มน้ำโลหะลดลง โดยลักษณะชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อโดยใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ เท่ากับ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

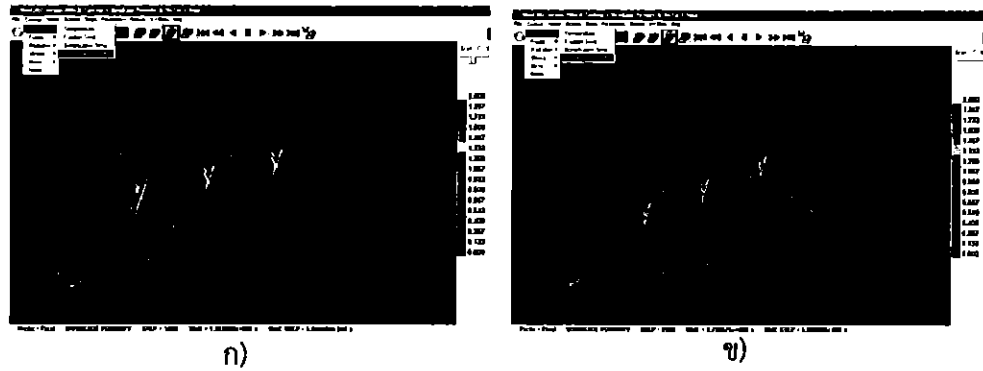


ก)

ข)

รูปที่ 4.27 ลักษณะชิ้นงานจากการจำลองการหล่อที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะ 660 องศาเซลเซียส  
 ก) ความเร็วที่ใช้ในการฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที  
 ข) ความเร็วที่ใช้ในการฉีด 1 เมตรต่อวินาที

การตรวจสอบรูพรุนในชิ้นงานที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ เท่ากับ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.28 ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า ชิ้นงานแสดงสีม่วงตลอดการตรวจสอบ นั้นแสดงว่า ที่ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะต่างกัน ไม่ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน เนื่องจาก ความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะช่วยให้ น้ำโลหะไหลเข้าสู่ชิ้นงานอย่างรวดเร็ว จึงทำให้น้ำโลหะสัมผัสกับอากาศในปริมาณที่น้อยมาก โดยความเร็วที่ใช้ในการฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที น้ำโลหะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนน้อย จึงไม่เกิดรูพรุนในชิ้นงาน ส่วนความเร็วที่ใช้ในการฉีด 1 เมตรต่อวินาที น้ำโลหะมีการไหลแบบปั่นป่วน แต่ใช้เวลานานในการแข็งตัว อีกทั้งความบางของชิ้นงานยังมีส่วนช่วยในการเพิ่มแรงอัดของน้ำโลหะ ทำให้ไม่เหลือช่องว่างในการเกิดฟองอากาศในชิ้นงาน ชิ้นงานจึงไม่เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนขึ้น



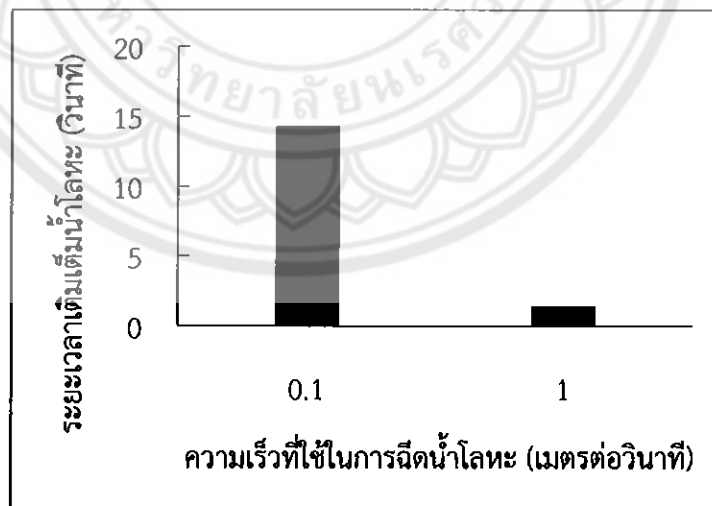
รูปที่ 4.28 การตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะต่างกัน ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ก) ความเร็วที่ใช้ในการฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

ข) ความเร็วที่ใช้ในการฉีด 1 เมตรต่อวินาที

#### 4.3.2.2 อิทธิพลของความเร็วฉีดน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส

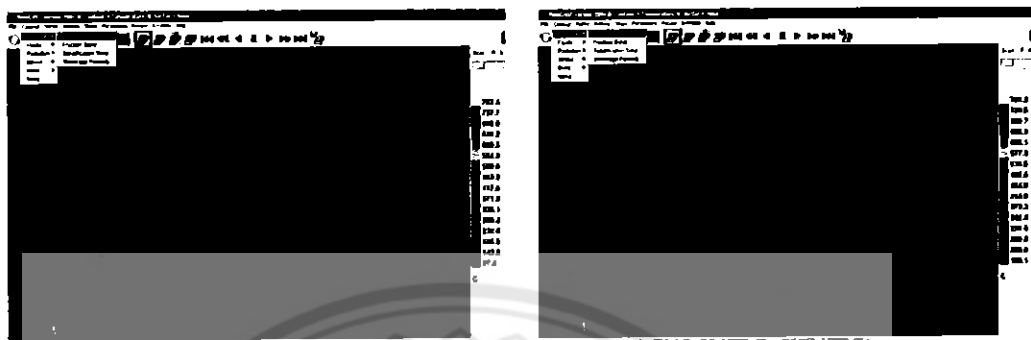
ชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการหล่อ ที่อุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส ถือเป็นชิ้นงานที่น้ำโลหะสามารถเกิดการแข็งตัวได้ช้าที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิเทดังกล่าวเป็นอุณหภูมิเทที่สูงที่สุดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะที่ใช้ในการทดลอง ส่งผลต่อระยะเวลาในการเติมเติมน้ำโลหะสู่ชิ้นงาน โดยความเร็วที่ใช้ในการฉีด 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาในการเติมเติมน้ำโลหะเข้าสู่ชิ้นงาน เท่ากับ 14.3 และ 1.43 วินาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.29 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเติมชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเติมเติมชิ้นงานกับความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังกล่าวทำให้ทราบว่า ความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะที่ต่างกัน สามารถเติมเติมชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ แต่มีระยะเวลาในการไหลของน้ำโลหะเข้าเติมเติมชิ้นงานต่างกัน โดยลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการหล่อ แสดงดังรูปที่ 4.30 และจากการพิจารณาการ

เกิดรุกรุ่นในชิ้นงาน พบว่า ขณะทำการตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงาน ชิ้นงานแสดงสีม่วงตลอดการตรวจสอบ นั้นแสดงว่าที่ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะต่างกัน ไม่ทำให้เกิดรุกรุ่นขึ้นในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.31 ซึ่งสาเหตุที่ไม่เกิดรุกรุ่นขึ้นในชิ้นงาน สามารถอธิบายโดยใช้หลักการเดียวกับการพิจารณาการเกิดรุกรุ่นในชิ้นงาน โดยใช้ความเร็วในการฉีดแตกต่างกัน ณ อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส



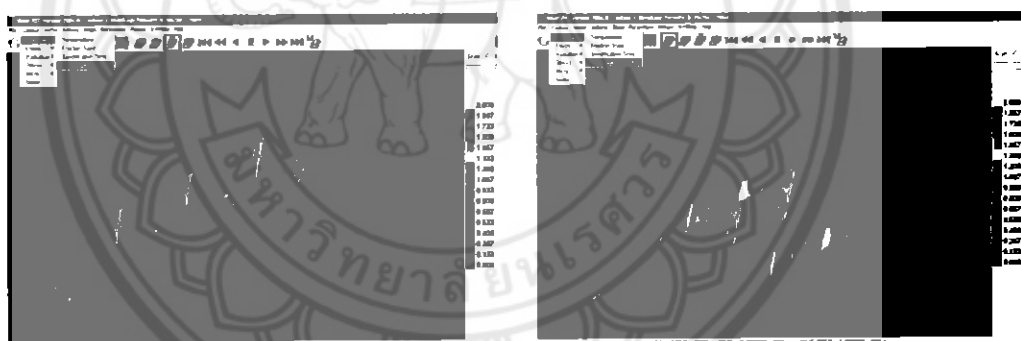
ก)

ข)

รูปที่ 4.30 ลักษณะชิ้นงานจากการจำลองการหล่อที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิเหน้าโลหะ 780 องศาเซลเซียส

ก) ความเร็วที่ใช้ในการฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

ข) ความเร็วที่ใช้ในการฉีด 1 เมตรต่อวินาที



ก)

ข)

รูปที่ 4.31 การตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานภายหลังการจำลองการหล่อที่ใช้ความเร็วในการฉีดน้ำโลหะต่างกัน ที่อุณหภูมิเท 780 องศาเซลเซียส

ก) ความเร็วที่ใช้ในการฉีด 0.1 เมตรต่อวินาที

ข) ความเร็วที่ใช้ในการฉีด 1 เมตรต่อวินาที

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

ในบทนี้ได้สรุปผลการทดลองจากการจำลองการหล่อ โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ปัจจัยด้านอุณหภูมิเท และความเร็วในการฉีดน้ำโลหะ อีกทั้งยังกล่าวถึงข้อเสนอนแนะ และปัญหาที่พบในการทดลอง ดังนี้

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองการหล่อชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ โดยอะลูมิเนียม เอ 332 ที่มีอุณหภูมิเท น้ำโลหะที่แตกต่างกัน ได้แก่ 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส และความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ เท่ากับ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

5.1.1 ชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเทน้ำโลหะแตกต่างกัน ณ ความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะ เท่ากับ 0.1 และ 1 เมตรต่อวินาที ไม่เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนและการหดตัวชิ้นในชิ้นงาน และน้ำโลหะสามารถเติมเต็มชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ แต่มีระยะเวลาในการแข็งตัวที่ต่างกัน โดยชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเทสูงชิ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานสูงขึ้นด้วย

5.1.2 ชิ้นงานที่ใช้ความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิเทน้ำโลหะเท่ากับ 660, 700, 740 และ 780 องศาเซลเซียส ไม่เกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนในชิ้นงาน และน้ำโลหะสามารถเติมเต็มชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ แต่มีระยะเวลาในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงานที่ต่างกัน ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะที่สูงขึ้น จะทำให้ระยะเวลาในการเติมเต็มน้ำโลหะสู่ชิ้นงานลดลง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในครั้งนี้ ได้ศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิเท และความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะโดยใช้โปรแกรมโปรคาส เพื่อศึกษาข้อบกพร่องเชิงปริมาตรในชิ้นงานเพียงอย่างเดียว หากเป็นไปได้ควรมีการนำไปทดลองทำชิ้นงานตัวอย่างจริง เพื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการหล่อจริงมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการหล่อ เพื่อให้การทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น รวมถึงควรมีการปรับเปลี่ยนความเร็วที่ใช้ในการฉีดน้ำโลหะและอุณหภูมิเทน้ำโลหะให้มีความแตกต่างกันมากขึ้น เพื่อแสดงข้อบกพร่องที่ชัดเจนในชิ้นงาน

### 5.3 ปัญหาที่พบในการทดลอง

จากการจำลองการหล่อโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ พบว่า ปัญหาที่พบในการทดลองเกิดจากปัจจัยต่าง ดังนี้

5.3.1 ข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ร่วมกับโปรแกรมในการจำลองการหล่อ กล่าวคือ ในการจำลองการหล่อโดยใช้โปรแกรมโปรคาส จะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจาก ชิ้นงานที่มีความซับซ้อนใช้เวลานานในการจำลองการหล่อแต่ละครั้ง หากคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพไม่สูงพอ จะไม่สามารถจำลองการหล่อจนเสร็จสิ้นได้ ในบางกรณีอาจทำให้คอมพิวเตอร์เกิดความเสียหายได้



5.3.2 การเรียนรู้การใช้โปรแกรมจำลองการหล่อด้วยตนเองถือเป็นสิ่งที่ทำความเข้าใจได้ยากมาก เนื่องจาก ขั้นตอนการจำลองการหล่อมักมีความซับซ้อนค่อนข้างสูง หากเกิดสนใจการจำลองการหล่อโดยใช้โปรแกรมหักแล้ว ผู้ที่สนใจควรได้รับการฝึกอบรมหรือได้รับคำแนะนำจากผู้ที่มีความชำนาญ ซึ่งจะทำให้การศึกษาสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

5.3.3 ในการจำลองการหล่อชิ้นงานที่มีความซับซ้อนจะใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างนาน ก่อนการทดลองทุกครั้งจึงควรประมาณเวลาให้สามารถจำลองชิ้นงานจนเสร็จสิ้น เนื่องจาก หากยกเลิกการจำลองการหล่อก่อนที่การหล่อจะเสร็จสมบูรณ์ จะต้องทำการเริ่มจำลองการหล่อใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนแรก

5.3.4 การสร้างชิ้นงาน 3 มิติ เพื่อใช้ในการจำลองการหล่อ เป็นขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน เนื่องจากผู้ทดลองต้องศึกษาการใช้โปรแกรมด้วยตนเอง อีกทั้งชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีความซับซ้อน จึงทำให้ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานดังกล่าวเกิดความล่าช้า



## เอกสารอ้างอิง

- กนกกาญจน์ ศรีม่วง. (2553). การพัฒนากระบวนการผลิตรีโอดีคลาสติงแบบรางเทหล่อเย็น สำหรับอะลูมิเนียมผสม. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- จตุรงค์ ลังกาพินธุ์. คู่มือการใช้โปรแกรม Solid Work เบื้องต้น. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: [www.en.rmutt.ac.th/ae/images/stories/.../solidworks1.pdf](http://www.en.rmutt.ac.th/ae/images/stories/.../solidworks1.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล: 4 กันยายน พ.ศ. 2555)
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2553). วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ณ์รัฐภูมิ ภูมิจอหอ, สุรียพันธ์ อุดมจิตร และอนุวัตร วังหนองลาด. อะลูมิเนียมผสม. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: [http://www.aluminiumlearning.com/html/index\\_c3xx\\_x.html](http://www.aluminiumlearning.com/html/index_c3xx_x.html) (วันที่ค้นข้อมูล: 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2555)
- ธนาธรณ์ วรพงษ์สาธิต. (2553). การออกแบบแม่พิมพ์. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://www.coezinc.com/index.php?mode=preview&lay=show&ac=article&id=539321622&Ntype=4> (วันที่ค้นข้อมูล: 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2555)
- ปรารภ กฤตบุญฤทธิ์. (2552). อิทธิพลของการออกแบบระบบทางเดินโลหะเหลวต่อคุณภาพชิ้นงาน ในกระบวนการหล่อความดันสูง. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: [www.tsme.org/ME\\_NETT/ME\\_NETT23/topic/file/AMM-004249.pdf](http://www.tsme.org/ME_NETT/ME_NETT23/topic/file/AMM-004249.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล: 8 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2537). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- รัชณี ฮาโต๊ะ และอรณพ เรืองวิเศษ. (2551). Q&A ไขข้อสงสัยกระบวนการขึ้นรูป. พิมพ์ครั้งที่ 1. ชลบุรี : อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันไทย-เยอรมัน
- วรวิทย์ จิรัฐติเจริญ. เทคโนโลยีการออกแบบงานหล่อโลหะเชิงวิศวกรรม. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://bsid.dip.go.th/LinkClick.aspx?fileticket=8hQivi%2Bdpln%3D&tabid=171> (วันที่ค้นข้อมูล: 8 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- วิหาร ดีปัญญา. (2548). วิศวกรรมการหล่อโลหะ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์
- สารัตน์ ปามา. (2550). ข้อบกพร่องในงานหล่อ. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://www.scribd.com/doc/50116926/23/General-Defects-Misrun> (วันที่ค้นข้อมูล: 19 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์, ศศิธร พิทักษ์ฐาปนพงษ์. อิทธิพลของอุณหภูมิเทน้ำโลหะในกระบวนการหล่ออะลูมิเนียม. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: [http://www.tsme.org/ME\\_NETT/ME\\_NETT20/article/pdf/amm/AMM013.pdf](http://www.tsme.org/ME_NETT/ME_NETT20/article/pdf/amm/AMM013.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล: 19 สิงหาคม พ.ศ. 2555)

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี. (2550). Solid Works ขั้นพื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- หริส สูตะบุตร, เคนยิ จิยอิวะ. (2543). หล่อโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ดวงกมล
- อาณัฐ อ้วนศรี. (2553). การจำลองกระบวนการหล่อโลหะอะลูมิเนียมโดยใช้โปรแกรม ProCAST. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: [http://www.ex-mba.buu.ac.th/Research/Bangsaen/Ex-24-Bs/51710939/02\\_abs.pdf](http://www.ex-mba.buu.ac.th/Research/Bangsaen/Ex-24-Bs/51710939/02_abs.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล: 13 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- เอกชัย กิติแก้วทวีเสริฐ และพงษ์กร รักการ. (2554). อิทธิพลของตัวแปรในการออกแบบ Fan gate ที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของโลหะเหลว ในกระบวนการหล่อความดันสูง. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: [digital.lib.kmutt.ac.th/journal/loadfile.php?A\\_ID=454](http://digital.lib.kmutt.ac.th/journal/loadfile.php?A_ID=454) (วันที่ค้นข้อมูล: 9 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- เรืองศักดิ์ แก้วธรรมชัย. (2551). เทคนิคการขึ้นรูปวัสดุและแม่พิมพ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. ชลบุรี : อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันไทย-เยอรมัน
- เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร. (2551). โลหะวิทยาของอะลูมิเนียม-ซิลิคอนใน-อุตสาหกรรมหล่อโลหะ. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: [www.cemct.net/web/images/stories//alsi001.pdf](http://www.cemct.net/web/images/stories//alsi001.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล: 21 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- ระบบทางวิ่งน้ำโลหะ. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://www.vulcanmold.com/article/Basic+Terminology.html> (วันที่ค้นข้อมูล: 1 กันยายน พ.ศ. 2555)
- แม่พิมพ์ถาวร. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://diecastingtechnology.blogspot.com> (วันที่ค้นข้อมูล: 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2555)
- C. Beckermann. (2009). Porosity Simulation for High Pressure Die Castings. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://www.engineering.uiowa.edu/~becker/documents.dir/DieCasting09.pdf> (วันที่ค้นข้อมูล: 28 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- Matti Sirvio. Complete Simulation of High Pressure Die Casting Process. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://www.rodbay.net/Documents/VTTpaperShotSleeveSimulation.pdf> (วันที่ค้นข้อมูล: 4 กันยายน พ.ศ. 2555)
- simulation HPDC. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: [http://webhotel2.tut.fi/projects/caeds/tekstit/HPDC\\_design/HPDCdesign\\_simulation\\_ex.pdf](http://webhotel2.tut.fi/projects/caeds/tekstit/HPDC_design/HPDCdesign_simulation_ex.pdf) (วันที่สืบค้นข้อมูล: 1 กันยายน พ.ศ. 2555)



ภาคผนวก ก

เอกสารราชการขอเชิญเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ  
และขอความอนุเคราะห์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ที่ ศธ 0527.09/1048



คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร  
อำเภอเมืองพิษณุโลก  
จังหวัดพิษณุโลก 65000

26 กรกฎาคม 2555

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เรียน ดร.วรวิทย์ จิรจิตติเจริญ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม

ด้วยภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้จัดการเรียนการสอนในรายวิชา 309494 วิศวกรรมทางวิศวกรรมวัสดุ 1 และ 309495 วิศวกรรมทางวิศวกรรมวัสดุ 2 ในปีการศึกษา 2555 ซึ่งได้มีนิสิตทำการศึกษาโครงการเรื่อง "การศึกษาระบบทางวิ่งของนำโลหะ อุนหภูมิเทและความเร็วฉัดโลหะในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูงของอะลูมิเนียมผสม A332 ในชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ ที่มีผลต่อข้อบกพร่องเชิงปริมาตรโดยไฟไนต์เอลิเมนต์" โดยมีอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ในการนี้ ภาควิชาฯ ได้พิจารณาแล้ว เห็นว่าท่านเป็นผู้มีความรู้ความเชี่ยวชาญในเรื่องดังกล่าวเป็นอย่างดี ทางภาควิชาฯ จึงใคร่ขอความอนุเคราะห์ท่าน ดร.วรวิทย์ จิรจิตติเจริญ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในโครงการวิจัยดังกล่าว จักขอบพระคุณยิ่ง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรินทร์ทิพย์ แทนธานี)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดี  
คิมพ์  
รองคณบดี



## บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ โทรศัพท์ 0-5596-4255  
ที่ ศธ 0527.09.05/๐๕๓๑ วันที่ 12 พฤศจิกายน 2555  
เรื่อง ขออนุญาตการใช้ License program SolidWorks

เรียน หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ด้วยภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้จัดให้มีการเรียนการสอนในรายวิชา 309495 Materials Engineering Project II โครงการทางวิศวกรรมวัสดุ 2 ประจำปีการศึกษา 2555 ซึ่งได้มีนิสิตทำการศึกษาโครงการเรื่อง "การศึกษาอุณหภูมิและแรงดันน้ำโลหะ ในกระบวนการหล่อฉีดด้วยแรงดันสูงของอะลูมิเนียมผสม เอ 332 ในชิ้นงานลูกสูบรถจักรยานยนต์ที่มีผลต่อข้อบกพร่องเชิงปริมาตรโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์" ของนายนพพล บุคคะวัน, นายบุญกุล ยางสันเทียะ และ นายวุฒิชัย ขมเล็ก นิสิตชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ โดยมีอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ในการนี้ ภาควิชา จึงใคร่ขออนุญาตการใช้ License program SolidWorks เพื่อดำเนินการทำโครงการดังกล่าว โดยนิสิตมีความประสงค์ขอใช้ License program SolidWorks ในระหว่างเดือน พฤศจิกายน 2555 – มีนาคม 2556

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาให้ความอนุเคราะห์

(ดร.ภาณุ บุรณจารุกร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

เรียน หัวหน้าภาควิชา,

เพื่อใช้ในการเรียน

2/5/๕๖

18 พ.ย. 55

ในลักษณะอนุมัติ

13 พ.ย. 55