

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการ
หล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอน



นายณัฐวัฒน์ พิณรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**MECHANICAL PROPERTIES TESTING OF A356
ALUMINUM ALLOYS PRODUCED BY HORIZONTAL
INDIRECT SQUEEZE CASTING PROCESS**

Nattawat Pinrath



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2014

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัด
ทางอ้อมแบบแนวนอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.วีรชัย อัจหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ปภากร พิทยชวาล)

กรรมการ

(อ. ดร.จกกล ศรีธร)

กรรมการ

(ดร.จักรกฤษ พงษ์พิสุทธินันท์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปีจ้านงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐวัฒน์ พิณรัตน์ : การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ขึ้นรูปโดย
กระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอน (MECHANICAL PROPERTIES TESTING
OF A356 ALUMINUM ALLOYS PRODUCED BY HORIZONTAL INDIRECT
SQUEEZE CASTING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อัจหาญ,
131 หน้า

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมยานยนต์มีความต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่สูง เบา เป็นมิตร
ต่อสิ่งแวดล้อมและราคาถูก ดังนั้นอะลูมิเนียมจึงได้รับความนิยมอย่างมากและการหล่อเป็น
กระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่าง่ายและประหยัดในการเปลี่ยนรูปจากวัตถุดิบมาเป็นชิ้นงาน
อย่างไรก็ตามข้อเสียที่สำคัญอย่างหนึ่งของการหล่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหล่อโดยใช้แรงดันสูง
(High pressure die casting) คือ ฟองอากาศ ส่งผลอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อไม่
สามารถอบชุบที่ความร้อนสูงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนากรรมวิธีการหล่อ
อัดซึ่งมีข้อดีคือ สามารถลดปัญหาเกี่ยวกับฟองอากาศที่เกิดกับชิ้นงานหล่อได้ ส่งผลให้อะลูมิเนียมที่
ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดสามารถอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้

ในการวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการชุบแข็งแบบตกตะกอนของชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียม
เกรด A356 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัด โดยควบคุมตัวแปรในการชุบแข็ง 5 ตัวแปร คือ
อุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลาย เวลาที่ใช้ในการอบละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม เวลาที่ใช้ในการ
บ่มและอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน โดยใช้เทคนิคการอบละลายแบบ T1 T4 T6 ในการศึกษา
คุณสมบัติเชิงกล 3 ชนิด คือ ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรงดึง (Tensile) และการเปลี่ยนแปลง
โครงสร้างภายใน

จากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอน
สามารถชุบแข็งเพิ่มความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ ซึ่งอุณหภูมิการอบละลายและการบ่มส่งผลต่อค่า
ความแข็ง ความแข็งแรง และอัตราการละลายของผลึกซิลิกอน โดยเทคนิคการชุบแข็งแบบ
ตกตะกอน T6 ให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เนื่องจากอัตรา
การละลายตัวของแมกนีเซียมและซิลิกอนดีขึ้น ขณะที่เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานสูงสุดเกิดขึ้น
ที่เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T4

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

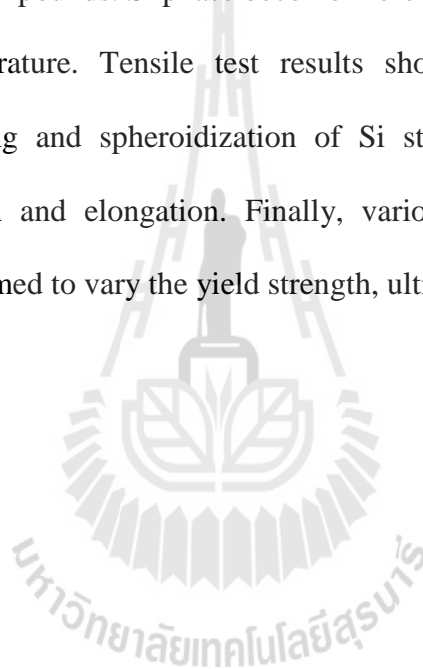
NATTAWAT PINRATH : MECHANICAL PROPERTIES TESTING OF
A356 ALUMINUM ALLOYS PRODUCED BY HORIZONTAL INDIRECT
SQUEEZE CASTING PROCESS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 131 PP.

ARTIFICIAL AGEING/ALUMINIUM ALLOY A356/SQUEEZE CASTING

Today the automotive industries demand material with good mechanical properties, Environment friendly and energy efficiency. Aluminum alloys are lightweight materials which can be produced in many product depending on the manufacturing process. Casting is the most common manufacturing process of aluminum alloys. However, the major drawbacks for conventional advanced casting techniques, e.g., high pressure die casting (HPDC) are the formation of defect such as air entrapment, shrinkage porosity and microporosity. High strength aluminum alloys can be produced by squeeze casting in order to minimize the defects in the conventional casting process. Therefore heat treatment can be applied on the squeeze casting product in order to maximize the mechanical properties of the heat treatment cast aluminum alloys.

This research investigated the influence precipitation hardening of specimen of A356 alloys produced by squeeze casting process. Various 5 parameter solution temperature, Solution time, ageing temperature, Ageing time and Cooling rate. The parameters controlled by heat treatment technique T1 T4 and T6. Microstructure hardness test (HRF) and tensile test were performed to evaluate the mechanical properties of the heat treatment specimens.

The results showed that the squeeze cast specimens are heat treatable at high temperature without blistering. Good improvements of the mechanical properties are achieved by the heat treatment. The maximum hardness value depends on the solution temperature ageing temperature and ageing time. peak hardness was found at 530°C of T6 heat treatment because of the presence of Mg. Higher solution temperature accelerate the peak ageing time. Solid solution temperature also affect the morphologies of the intermetallic compounds. Si phase become more spheroidized depending on the solid solution temperature. Tensile test results show that the control of both precipitation hardening and spheroidization of Si strongly affect the mechanical properties in strength and elongation. Finally, various combinations of the heat treatment were performed to vary the yield strength, ultimate strength and elongation.



School of Industrial Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับคำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือทั้งด้านวิชาการ ด้านการดำเนินการวิจัยและอนุเคราะห์อุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย จากคณาจารย์และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนั้นผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงแต่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อัจฉาญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชवाल อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการศึกษา ใ้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ดร.จักรกฤษ พงษ์พิสุทธินันท์ และดร.พงษ์ศักดิ์ คุลยประพันธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ แนะนำแนวทางการดำเนินงานทดลองและแนวทางการปรับปรุงแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ณัฐวัฒน์ พิณรัตน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|-----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูป..... | ฎ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 12 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย..... | 12 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 12 |
| 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 13 |
| 2.1 ข้อมูลของอะลูมิเนียม..... | 13 |
| 2.1.1 อะลูมิเนียมผสมอัลลอย..... | 14 |
| 2.1.2 อะลูมิเนียมหล่อผสม..... | 14 |
| 2.2 กระบวนการหล่อ..... | 19 |
| 2.2.1 กระบวนการหล่อทราย..... | 19 |
| 2.2.2 กระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อถาวร(Permanent mold)..... | 20 |
| 2.2.3 การหล่อโดยวิธีการฉีดโลหะหลอมเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์ (Die casting)..... | 21 |
| 2.2.4 การหล่อแรงดันสูง..... | 21 |
| 2.2.5 การไหลของโลหะเหลวในการหล่อแรงดันสูง..... | 27 |
| 2.2.6 การหล่ออัด(Squeeze casting)..... | 28 |
| 2.3 การชุบแข็งแบบตกตะกอน..... | 29 |
| 2.3.1 ขั้นตอนการชุบแข็งแบบตกตะกอน..... | 29 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|-----------|
| 2.3.2 | เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน | 30 |
| 2.4 | ทบทวนวรรณกรรม | 32 |
| 3 | วิธีการดำเนินการทดลอง..... | 37 |
| 3.1 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 37 |
| 3.1.1 | อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมการทดลอง | 37 |
| 3.1.2 | อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความแข็ง | 37 |
| 3.1.3 | อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความแข็งแรง | 42 |
| 3.1.4 | อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับโครงสร้างจุลภาค | 42 |
| 3.2 | การเตรียมชิ้นงานทดสอบขั้นต้น..... | 42 |
| 3.2.1 | การทดสอบเบื้องต้นก่อนการทดลอง | 43 |
| 3.3 | การออกแบบการทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 45 |
| 3.3.1 | การทดสอบความแข็ง..... | 47 |
| 3.3.2 | เทคนิคการอบชุบแบบ T1 | 47 |
| 3.3.3 | เทคนิคการอบชุบแบบ T4 | 48 |
| 3.3.4 | เทคนิคการอบชุบแบบ T6 | 51 |
| 3.4 | การทดสอบแรงดึง | 52 |
| 3.4.1 | เทคนิคการอบชุบแบบ T4 | 53 |
| 3.4.2 | เทคนิคการอบชุบแบบ T6 | 54 |
| 3.5 | การศึกษาการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างภายใน | 54 |
| 3.6 | ขั้นตอนการทดลอง | 55 |
| 3.6.1 | ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง..... | 55 |
| 3.6.2 | การเตรียมชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรง | 60 |
| 3.6.3 | การเตรียมชิ้นงานและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค | 62 |
| 3.7 | สรุปวิธีการดำเนินการทดลอง | 64 |
| 4 | ผลการวิจัยและการอภิปรายผล | 67 |
| 4.1 | ค่าความแข็ง..... | 67 |

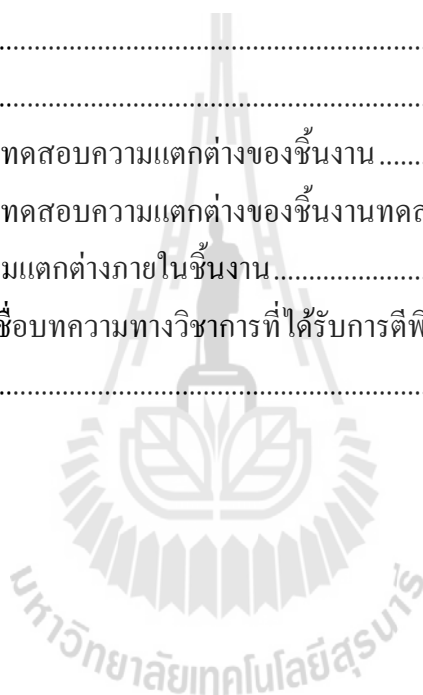
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1.1 | เทคนิคการชุบแข็งแบบ T1..... | 67 |
| 4.1.2 | เทคนิคการชุบแข็งชิ้นงานแบบ T4..... | 70 |
| 4.1.3 | เทคนิคการอบเพิ่มความแข็งแบบ T6..... | 83 |
| 4.2 | การทดสอบแรงดึง | 96 |
| 4.2.1 | ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบกรรมวิธี T1 | 96 |
| 4.2.2 | ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบกรรมวิธี T4 | 96 |
| 4.2.3 | ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบกรรมวิธี T6 | 98 |
| 4.3 | โครงสร้างจุลภาค | 99 |
| 4.3.1 | อิทธิพลของการชุบแข็งต่อโครงสร้างซิติคอน..... | 99 |
| 4.3.2 | โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังจากการหล่ออัด..... | 100 |
| 4.3.3 | โครงสร้างจุลภาคหลังจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง..... | 101 |
| 4.3.4 | โครงสร้างจุลภาคหลังจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง..... | 102 |
| 4.3.5 | โครงสร้างจุลภาคหลังจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง..... | 103 |
| 4.3.6 | โครงสร้างจุลภาคหลังจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง..... | 104 |
| 4.3.7 | โครงสร้างจุลภาคหลังจากการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง..... | 105 |
| 4.3.8 | อิทธิพลของการชุบแข็งต่อโครงสร้างจุลภาค | 106 |
| 5 | สรุปการทดลอง..... | 107 |
| 5.1 | การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานหล่อ | 107 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 5.2 การเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ | 108 |
| 5.3 โครงสร้างจุลภาค | 108 |
| 5.4 ข้อเสนอแนะ | 109 |
| 5.5 แนวทางวิจัยในอนาคต..... | 109 |
| รายการอ้างอิง | 110 |
| ภาคผนวก..... | 113 |
| ภาคผนวก ก. การทดสอบความแตกต่างของชิ้นงาน | 113 |
| ภาคผนวก ข. การทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบระหว่างโพรงของชิ้นงาน ... | 116 |
| ภาคผนวก ค. ความแตกต่างภายในชิ้นงาน..... | 119 |
| ภาคผนวก ง. รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 122 |
| ประวัติผู้เขียน | 131 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| 2.1 | คุณสมบัติของอะลูมิเนียม 13 |
| 3.1 | ธาตุประกอบของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในการทดลอง 37 |
| 3.2 | สถานะที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ 45 |
| 3.3 | พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบความแข็ง 49 |
| 3.4 | เวลาการอบอุ่นของการชุบแข็งแบบตกตะกอน T1 สำหรับการทดสอบความแข็ง 50 |
| 3.5 | อุณหภูมิอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็ง 50 |
| 3.6 | เวลาอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็ง 50 |
| 3.7 | เวลาการวัดความแข็งของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็ง 51 |
| 3.8 | อุณหภูมิอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็ง 51 |
| 3.9 | เวลาอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็ง 52 |
| 3.10 | เวลาอบอุ่นของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็ง 53 |
| 3.11 | อุณหภูมิอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็งแรง 53 |
| 3.12 | เวลาอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็งแรง 53 |
| 3.13 | อุณหภูมิอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็งแรง 54 |
| 3.14 | เวลาอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็งแรง 54 |
| 3.15 | อิทธิพลของระดับอุณหภูมิการอบละลายและเวลาการอบละลาย 55 |
| 3.16 | ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบ โดยเทคนิค T1 สำหรับการทดสอบความแข็ง .. 65 |
| 3.17 | ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็ง .. 65 |
| 3.18 | ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็ง .. 66 |
| 3.19 | ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง 66 |
| 4.1 | ค่าความแข็งของการทดสอบชิ้นงาน T1 _{Air} 68 |
| 4.2 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T1 _{Water} 79 |
| 4.3 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T4 _{490 °C, 2.5 ชั่วโมง} 72 |
| 4.4 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T4 _{510 °C, 2.5 ชั่วโมง} 73 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 4.5 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4 _{530 °C, 2.5 ชั่วโมง} 75 |
| 4.6 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4 _{530 °C, 1 ชั่วโมง} 77 |
| 4.7 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4 _{530 °C, 8 ชั่วโมง} 89 |
| 4.8 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6 _{490 °C, 2.5 ชั่วโมง} 85 |
| 4.9 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6 _{510 °C, 2.5 ชั่วโมง} 86 |
| 4.10 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6 _{530 °C, 2.5 ชั่วโมง} 88 |
| 4.11 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6 _{530 °C, 1 ชั่วโมง} 90 |
| 4.12 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6 _{530 °C, 8 ชั่วโมง} 92 |
| 4.13 | คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง T4 97 |
| 4.14 | คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบ T6 98 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 1.1 | เครื่องหล่อโดยใช้แรงดันที่มีการจดสิทธิบัตรเครื่องแรกของโลก (Bernard, 1925)..... | 1 |
| 1.2 | เครื่องหล่อโดยใช้แรงดันนิวเมตริก (Doehler, 1951) | 2 |
| 1.3 | เครื่องหล่ออะลูมิเนียมอุตสาหกรรมในยุคแรก (Doehler, 1951) | 3 |
| 1.4 | ลักษณะของการหล่อโดยใช้แรงดันในแบบแนวตั้งและแนวนอน (Takach, 1993)..... | 4 |
| 1.5 | เครื่องหล่อโดยใช้แรงดันระบบไฮดรอลิก(Herman & Association, 1991) | 4 |
| 1.6 | แสดงการกักอากาศในชิ้นงานหล่อ (Campbell, 2003) | 5 |
| 1.7 | แสดงขั้นตอนการหล่ออัด (Barresi et al., 1996) | 6 |
| 1.8 | รูปแบบการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) (Vinarcik, 2002)..... | 6 |
| 1.9 | แสดงการหล่ออัดทางตรงแบบโลหะเหลวเคลื่อนที่ (Doehler, 1951) | 7 |
| 1.10 | แสดงการหล่ออัดทางตรงแบบโลหะเหลวไม่เคลื่อนที่ (Doehler, 1951)..... | 8 |
| 1.11 | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผลึกและอัตราการเพิ่มความแข็ง..... | 10 |
| 1.12 | ความแข็งแรงเทียบกับอัตราการเย็นตัว (Sjölander & Seifeddine, 2010) | 10 |
| 2.1 | แสดงกลุ่มของอลูมิเนียมผสม | 16 |
| 2.2 | แสดงการฉีกขาดเนื่องจากความร้อน (Hot tear){Vinarcik, 2002} | 17 |
| 2.3 | ขนาดของเกรนเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ซิลิกอน {Sjölander, 2010} | 19 |
| 2.4 | แม่พิมพ์การหล่อแบบถาวรของการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Permanent mold) | 20 |
| 2.5 | ความแข็งแรงของชิ้นงานจากการหล่อทรายและการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร | 22 |
| 2.6 | เครื่องฉีดแบบห้องเครื่องร้อน (Aungsuwatkakul, 2011) | 23 |
| 2.7 | เครื่องฉีดแบบห้องเครื่องเย็น (ห้องเครื่องเย็น) (Aungsuwatkakul, 2011) | 24 |
| 2.8 | ขั้นตอนการฉีดของเครื่องฉีดแบบห้องเครื่องร้อน {Vinarcik, 2002} | 25 |
| 2.9 | ขั้นตอนการฉีดของเครื่องฉีดแบบห้องเครื่องเย็น {Vinarcik, 2002} | 26 |
| 2.10 | เครื่องฉีดโลหะเหลวแบบแนวตั้งและแนวนอน (Takach, 1993)..... | 27 |
| 2.11 | รูปการไหลแบบราบเรียบของโลหะเหลวภายในแม่พิมพ์ {Vinarcik, 2002} | 28 |
| 2.12 | รูปการไหลแบบปั่นป่วนของโลหะเหลวภายในแม่พิมพ์ {Vinarcik, 2002} | 28 |
| 2.13 | ขั้นตอนการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยเทคนิค T1 | 31 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.14 | ขั้นตอนการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยเทคนิค T431 |
| 2.15 | ขั้นตอนการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยเทคนิค T532 |
| 2.16 | ความแข็งแรงดึงเปรียบเทียบกับจำนวนเมกนีเซียม33 |
| 2.17 | ขั้นตอนการตกผลึกของเมกนีเซียมและซิลิกอนในกระบวนการบ่ม34 |
| 2.18 | ความทนต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบและไม่ผ่านการอบชุบ35 |
| 2.19 | เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบและไม่ผ่าน ณ แรงดันค่าต่างๆ36 |
| 3.1 | เครื่องฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม38 |
| 3.2 | เครื่องเลื่อยสายพาน38 |
| 3.3 | เครื่องตัดชิ้นงาน39 |
| 3.4 | เครื่องขัดผิวชิ้นงาน39 |
| 3.5 | เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบรีอคเวล40 |
| 3.6 | คู่มือควบคุมอุณหภูมิ40 |
| 3.7 | เตาคลวดสำหรับขั้นตอนการอบละลาย41 |
| 3.8 | เตาคลวดสำหรับขั้นตอนการอบอ่อน41 |
| 3.9 | ชิ้นงานหล่อทดสอบ44 |
| 3.10 | ขั้นตอนการหล่ออัดชิ้นงานทดสอบ44 |
| 3.11 | ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ46 |
| 3.12 | ปัญหาฟองอากาศ(Blister) ที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน46 |
| 3.13 | ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงหลังจากผ่านกระบวนการตัดด้วยเลื่อยสายพาน56 |
| 3.14 | ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรง57 |
| 3.15 | ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดค่าความแข็งแรง59 |
| 3.16 | โครงสร้างวงแหวนซิลิกอน60 |
| 3.17 | ชิ้นงานทดสอบรูปกระดูก61 |
| 4.1 | ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งโดยเทคนิค T1Air และ T1Water.....68 |
| 4.2 | ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งโดยเทคนิค T4490 °C , 2.5 ชั่วโมง71 |

สารบัญรูป (ต่อ)

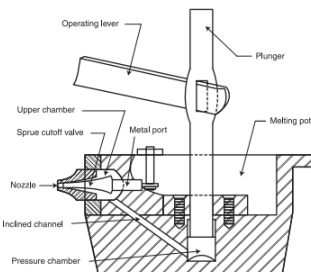
| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 4.3 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4510 °C , 2.5 ชั่วโมง..... 74 |
| 4.4 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4530 °C , 2.5 ชั่วโมง..... 76 |
| 4.5 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4530 °C , 1 ชั่วโมง..... 78 |
| 4.6 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4530 °C , 8 ชั่วโมง..... 80 |
| 4.7 | กราฟความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4490 °C , 2.5 ชั่วโมง , T4510 °C , 2.5 ชั่วโมง 81 |
| 4.8 | กราฟความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4530 °C , 1 ชั่วโมง , T4530 °C , 2.5 ชั่วโมง 82 |
| 4.9 | เปรียบเทียบการเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการอบชุบ T1 และ T4 83 |
| 4.10 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6490 °C , 2.5 ชั่วโมง..... 84 |
| 4.11 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6510 °C , 2.5 ชั่วโมง..... 87 |
| 4.12 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6530 °C , 2.5 ชั่วโมง..... 89 |
| 4.13 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6530 °C , 1 ชั่วโมง..... 91 |
| 4.14 | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6530 °C , 8 ชั่วโมง..... 93 |
| 4.15 | ค่าความของของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง 94 |
| 4.16 | ค่าความของของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง 95 |
| 4.17 | ความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบ T1 T4 และ T6..... 95 |
| 4.18 | การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกซึติกอน..... 99 |
| 4.19 | โครงสร้างซึติกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัดและกระบวนการกัดกรด 100 |
| 4.20 | โครงสร้างผลึกซึติกอน อบละลายที่อุณหภูมิ 490 °C เวลา 2.5 ชั่วโมง 101 |
| 4.21 | โครงสร้างผลึกซึติกอน อบละลายที่อุณหภูมิ 510 °C เวลา 2.5 ชั่วโมง 102 |
| 4.22 | โครงสร้างผลึกซึติกอน อบละลายที่อุณหภูมิ 530 °C เวลา 2.5 ชั่วโมง 103 |
| 4.23 | โครงสร้างผลึกซึติกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัด อบละลายที่ 104 |
| 4.24 | โครงสร้างผลึกซึติกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัด อบละลายที่ 105 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การหล่อเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ประหยัดที่สุดและสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนอย่างมาก (Ghomashchi & Vikhrov, 2000) การหล่อเป็นกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่พันปีก่อนคริสตกาล มีการค้นพบกระบอกบรรจุน้ำ หน้ากากที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยการหล่อ การถูกพบครั้งแรกที่ประเทศจีนเมื่อประมาณ 645 ปีก่อนคริสตกาล และเริ่มมีการคิดค้นและพัฒนากรรมวิธีการหล่อขึ้นมา ต่อมาพบว่าการหล่อขึ้นงานที่มีความบางหรือต้องการพื้นผิวที่ดีต้องมีการใช้แรงดันเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงเริ่มพัฒนากรรมวิธีการหล่อโดยใช้แรงดัน ในยุคแรกการหล่อใช้แรงดันจะใช้แรงดันจากอากาศหรืออาศัยแรงโน้มถ่วงโดยการเพิ่มความสูงของแม่พิมพ์หรือเพิ่มขนาดของชิ้นงานหล่อเพื่อเพิ่มแรงดัน ต่อมามีความต้องการชิ้นงานหล่อที่มีความละเอียดสูงขึ้น เช่น การหล่อขึ้นงานที่มีตัวอักษรที่ผิวของชิ้นงาน ดังนั้นวิธีการหล่อโดยอาศัยแรงดันจากแรงโน้มถ่วงหรือแรงดันจากน้ำหนักที่อยู่ข้างบนแม่พิมพ์ไม่สามารถตอบสนองการหล่อขึ้นงานในลักษณะนี้ได้ ดังนั้นได้มีการพัฒนาและปรับปรุงกรรมวิธีการหล่อแบบรูปแบบใหม่ขึ้น โดยใช้แรงดันผ่านกระบอกสูบในการเข้าไปยังแม่พิมพ์และพบว่าสามารถตอบสนองความต้องการผลิตชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงได้ เครื่องจักรเครื่องแรกที่ผลิตโดยใช้แรงดันจากกระบอกสูบจึงถูกสร้างขึ้นเมื่อปี 1849 ดังรูป 1.1 มีหลักการทำงานโดยการอาศัยแรงดันจากคนในการผลักกระบอกสูบเพื่อดันน้ำโลหะเข้าไปยังแม่พิมพ์

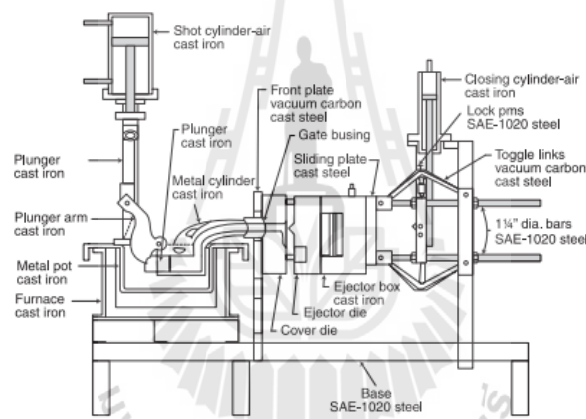


รูปที่ 1.1 เครื่องหล่อโดยใช้แรงดันที่มีการจดสิทธิบัตรเครื่องแรก

ของโลก (Bernard, 1925)

ต่อมาเมื่อมีความต้องการชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงขึ้นจึงมีการพัฒนาเครื่องหล่อโดยใช้แรงดันขึ้น โดยเพิ่มแรงดันจากแรง 1 คน กลายเป็น 2 คน ดังรูปที่ 1.2 ถูกนำไปใช้ในการผลิตชิ้นงานจำพวกชิ้นส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คาร์บูเรเตอร์และชิ้นส่วนยานยนต์อื่นๆ ซึ่งในสมัยนั้นการหล่อโดยใช้แรงดันถูกเฉพาะในงานหล่อสังกะสี ดีบุกและตะกั่วเท่านั้น

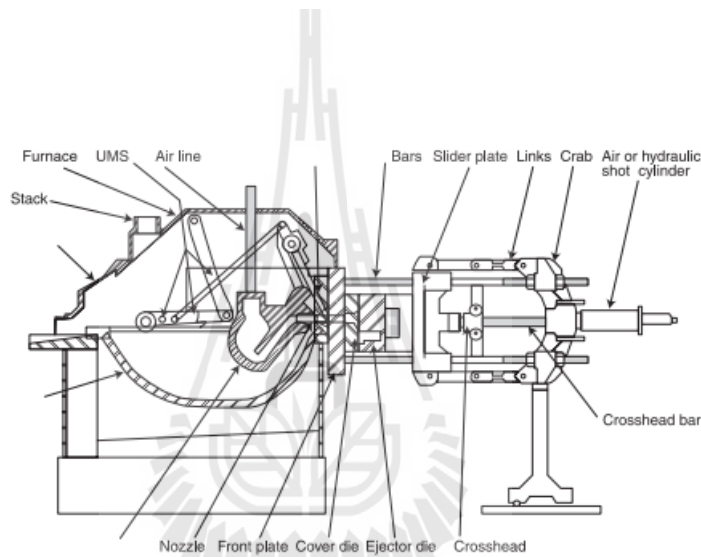
ต่อมาเทคโนโลยีการผลิตมีความก้าวหน้ามากขึ้น ส่งผลให้มีการพัฒนานำระบบวงจรนิวเมตริกเข้ามาใช้ในการผลักดันกระบอกลูกสูบรวมถึงการทำงานอื่นๆ ของเครื่องหล่อโดยใช้แรงดัน เช่น การเปิด-ปิดประตู ส่งผลให้สามารถลดขั้นตอนการทำงานของพนักงาน ชิ้นงานมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และสามารถหล่อชิ้นงานที่มีความบางหรือความละเอียดสูงขึ้นเนื่องจากแรงดันที่สูงขึ้นมากกว่าเครื่องหล่อแบบเดิมที่ใช้แรงคน ทำให้การหล่อโดยใช้แรงดันได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในหลากหลายอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.2 เครื่องหล่อโดยใช้แรงดันนิวเมตริก (Doehler, 1951)

เครื่องหล่ออะลูมิเนียมโดยใช้แรงดันถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรกเพื่อรองรับความต้องการของการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2518 ประกอบไปด้วยกระบอกสูบซึ่งจะอยู่ในอ่างหลอมเหลวอะลูมิเนียม โดยกระบอกสูบจะทำหน้าที่ดันอะลูมิเนียมเข้าไปยังแม่พิมพ์ดังรูปที่ 1.3 หลังจากนั้นการหล่ออะลูมิเนียมโดยใช้แรงดันขยายไปยังอุตสาหกรรมอื่นๆ ปัจจุบันการหล่ออะลูมิเนียมโดยใช้แรงดันได้แพร่หลายไปยังอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ งานก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมชิ้นส่วน ยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้การหล่อด้วยความดันสูงเป็นหลักถึงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์

หลังจากนั้นมีการพัฒนากรรมวิธีการหล่อโดยใช้แรงดันอย่างมากมาย เช่น การออกแบบกรรมวิธีการหล่อโดยให้กระบอบสูบเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical die casting) ซึ่งเป็นการพัฒนาที่ต่างจากวิธีการแบบเดิมๆที่นิยมให้กระบอบสูบเคลื่อนที่ในแนวนอน (Horizontal die casting) ดังรูปที่ 1.4 ต่อมาในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 มีความต้องการชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่มีความบาง น้ำหนักเบาเพื่อใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบินและยานยนต์ ซึ่งการหล่อในสมัยนั้นมีแรงดันไม่เพียงพอที่จะผลิตชิ้นงาน ดังนั้นจึงเริ่มมีการนำเอาระบบไฮดรอลิกมาใช้ควบคุมความเร็วของกระบอบสูบ ทำให้แรงดันที่ใช้ในการหล่อสูงด้วยระบบมีนี้สูงกว่าการหล่อโดยใช้แรงคน และการหล่อโดยใช้ระบบนิวเมตริก ส่งผลให้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและบางมากขึ้นอีก

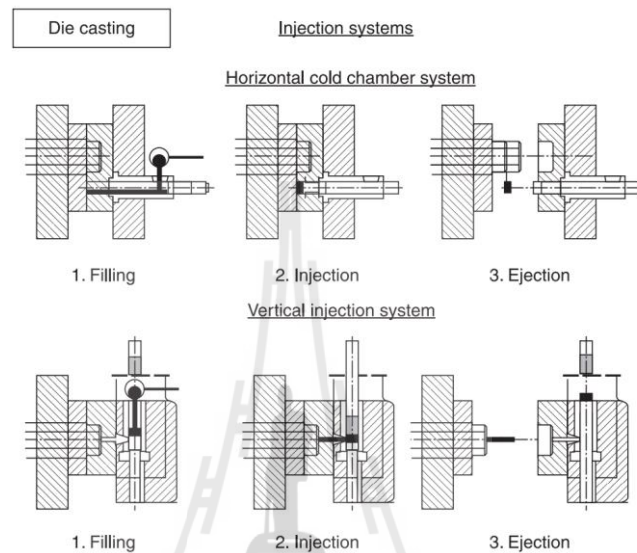


รูปที่ 1.3 เครื่องหล่ออะลูมิเนียมอุตสาหกรรมในยุคแรก (Doehler, 1951)

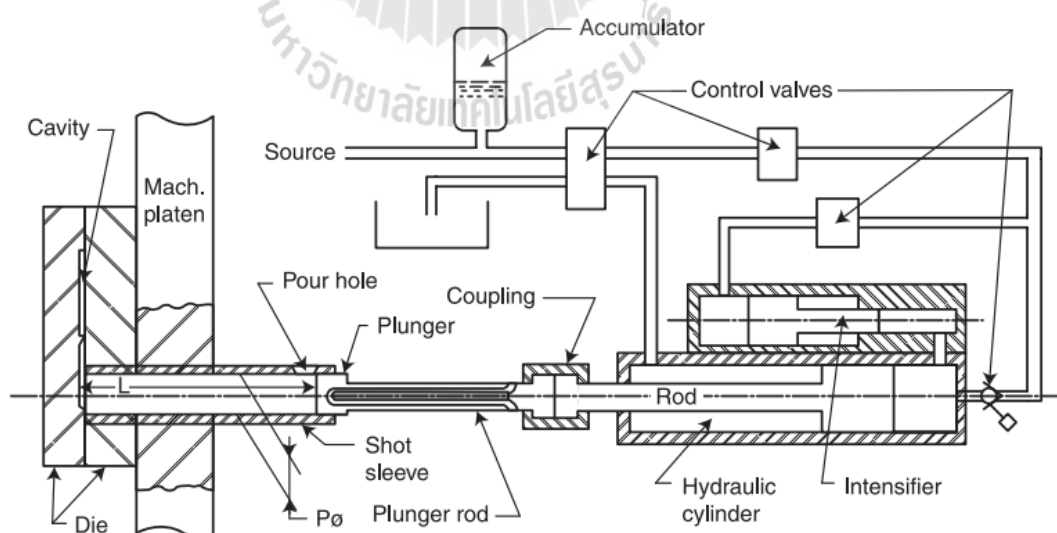
ปัจจุบันการหล่ออะลูมิเนียมด้วยความดันสูง (High Pressure Die casting : HPDC) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. ห้องเครื่องร้อน เป็นกรรมวิธีการหล่อโดยใช้แรงดันการแบบดั้งเดิม คือ เตาลอมจะติดตั้งอยู่ภายในเครื่องฉีดและมีท่อต่อจากแม่พิมพ์เข้ากับเตาลอมโดยตรง นิยมใช้กับโลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเช่น สังกะสี

2. ห้องเครื่องเย็น เป็นวิธีการหล่อที่พัฒนามาจากการหล่อแบบ ห้องเครื่องร้อน คือเตาหลอม จะไม่ได้ติดกับเครื่องหล่อ โดยโลหะจะถูกหลอมเหลวอยู่ในเตาที่แยกออกจากเครื่องหล่อ ซึ่งโลหะเหลวถูกเติมโลหะเหลวผ่านทางกระบวย (Ladle)



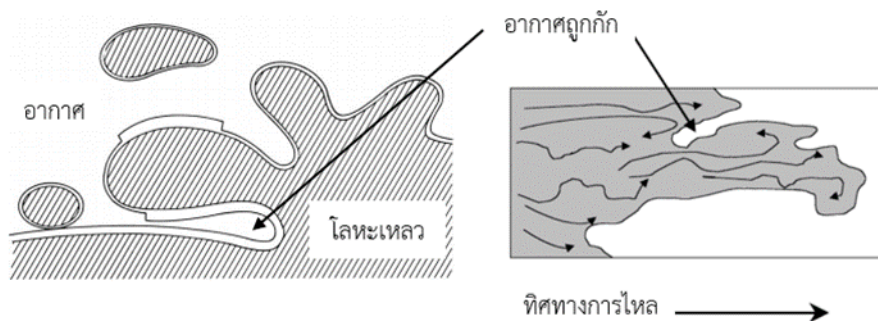
รูปที่ 1.4 ลักษณะของการหล่อโดยใช้แรงดันในแบบแนวตั้งและแนวนอน (Takach, 1993)



รูปที่ 1.5 เครื่องหล่อโดยใช้แรงดันระบบไฮดรอลิก (Herman & Association, 1991)

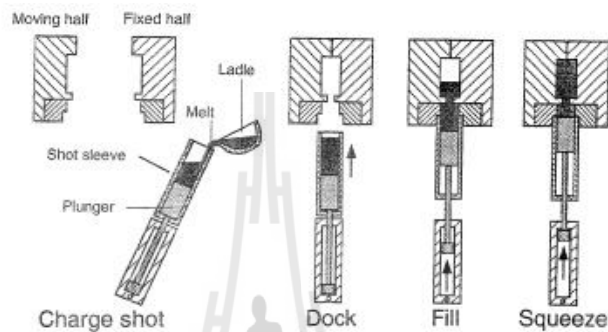
ส่งผลให้สามารถลดการกักตัวของอากาศเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนหลังจากนั้นเมื่อขึ้นงานเต็มแม่พิมพ์และอยู่ในช่วงแข็งตัว (Solidification) จะใช้แรงดันสูงอัดขึ้นงานเพื่อให้ขึ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

การหล่ออัดเป็นวิธีการที่พัฒนามาจากการขึ้นรูปโดยการตี (Forging) และการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Permanent mold) คิดค้นโดยการร่วมมือกันของบริษัทอุเบอุตสาหกรรมจำกัด (Ube industries Ltd) และบริษัทโตโยต้ามอเตอร์ (Toyota motor Corporation Ltd.) เมื่อปี ค.ศ. 1976 เพื่อแก้ปัญหาโพรงอากาศที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปหล่ออะลูมิเนียม โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการขึ้นรูปขึ้นงานใหม่ที่มีความประหยัด และเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำโลหะไหลแบบปั่นป่วน ทำให้ไม่เกิดการกักตัวของอากาศและใช้แรงอัดสูงอัดขึ้นงานขณะขึ้นงานกำลังแข็งตัว (Solidification) รูปที่ 1.7 การหล่ออัดในช่วงยุคแรกนั้นเป็นการหล่ออัดโดยที่ขึ้นงานไม่เคลื่อนที่ (Direct squeeze casting without metal movement) คือ เครื่องหล่ออัดจะเป็นรูปทรงสมมาตร ประกอบไปด้วยกระบอสูบซึ่งใช้สำหรับการอัดขึ้นงาน ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อหล่อสัลดยนต์เท่านั้น ซึ่งทำให้พบปัญหาในการนำไปใช้ขึ้นรูปกับขึ้นงานอื่นและข้อจำกัดทางด้านน้ำหนักการหล่อที่มีน้ำหนักในการหล่อแต่ละครั้งไม่เกิน 10 กิโลกรัม ส่งผลให้การหล่ออัดยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก ต่อมาได้มีการพัฒนาการหล่ออัดทางอ้อมการหล่อโดยใช้แรงดันสูงนั้นมีข้อดีคือ สามารถผลิตได้ในปริมาณที่มาก (Mass Production) และขึ้นงานที่การไหลของโลหะเหลวเมื่อความดันสูงจะเป็นไปในลักษณะปั่นป่วน (Turbulence) ส่งผลให้อากาศซึ่งตกค้างอยู่ในแม่พิมพ์ไม่สามารถที่จะระบายได้ทันดังแสดงในรูปที่ 1.6 เมื่อมีอากาศตกค้างอยู่ในขึ้นงานจะส่งผลให้เกิดปัญหาด้านของเสียที่เกิดจากกระบวนการปรับแต่งผิวขึ้นงานหลังจากการขึ้นรูป เช่น การกลึงเพื่อตกแต่งรูปร่างได้ นอกจากนี้เมื่อมีอากาศถูกกักเข้าไปยังขึ้นงานแล้วส่งผลให้ขึ้นงานเหล่านี้ไม่สามารถที่จะนำไปอบชุบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลได้ เนื่องจากเมื่อ

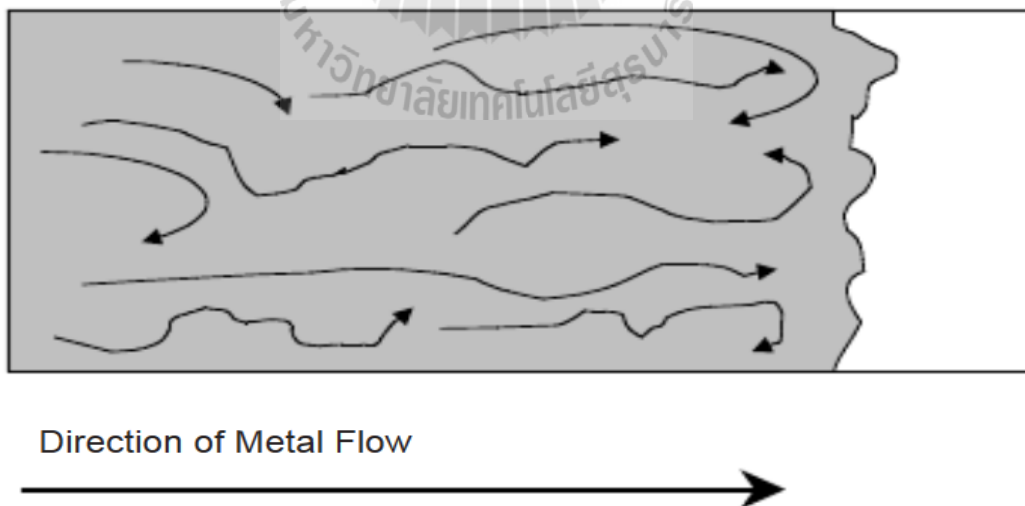


รูปที่ 1.6 แสดงการกักอากาศในขึ้นงานหล่อ (Campbell, 2003)

ชั้นงานได้รับความร้อนสูง อากาศ ที่ถูกกักตัวอยู่นั้นจะเกิดการขยายตัวทำให้คุณสมบัติเชิงกลของชั้นงานต่ำลงเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จึงมีการพัฒนากรรมวิธีการผลิตรูปแบบใหม่ที่มีชื่อว่า “การหล่ออัด (Squeeze casting)” กรรมวิธีการหล่ออัด (Squeeze casting) เป็นวิธีการที่ต่างจากการหล่อโดยใช้แรงดันสูง (High Pressure Die casting: HPDC) คือความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่ำ ทำให้ลักษณะการไหลของโลหะเหลวในแม่พิมพ์มีลักษณะเป็นแบบราบเรียบรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.7 แสดงขั้นตอนการหล่ออัด (Barresi et al., 1996)



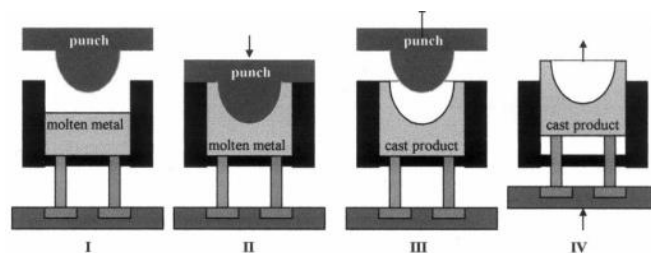
รูปที่ 1.8 รูปแบบการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) (Vinarcik, 2002)

(Indirect squeeze casting) ทำให้การหล่ออัดเริ่มได้รับความนิยมมากขึ้น โดยที่ขนาดของการหล่ออัดขึ้นอยู่กับารออกแบบของเครื่องหล่อ แต่ข้อเสียของการหล่ออัดทางอ้อมคือ ไม่สามารถที่จะหล่อชิ้นงานที่มีความบางน้อยกว่า 4 มิลลิเมตร ได้เนื่องจากใช้ความเร็วในการหล่อต่ำและค่าการแข็งตัวของวัสดุที่ใช้ต่อมาได้มีการพัฒนาการหล่ออัด โดยการประยุกต์ใช้เข้ากับเครื่องหล่อโดยใช้แรงดันต่ำ (Low pressure die casting) ซึ่งทำให้การหล่ออัดสามารถนำไปใช้กับการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้มากยิ่งขึ้น

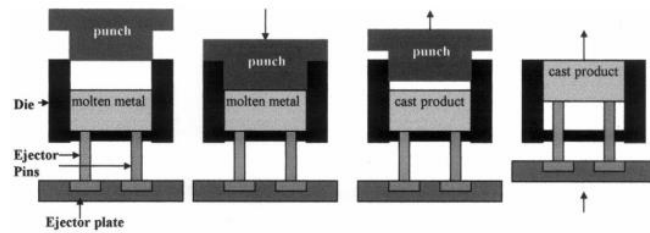
ในปัจจุบันการหล่ออัดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การหล่ออัดทางตรง (Direct squeeze casting)
2. การหล่ออัดทางอ้อม (Indirect squeeze casting)

ซึ่งมีความแตกต่างกันคือ การหล่ออัดทางตรง (Direct squeeze casting) แรงดันจะอัดเข้าไปที่ผิวของชิ้นงานโดยตรง ขณะที่การหล่ออัดทางอ้อม (Indirect squeeze casting) แรงดันจะอัดเข้าไปยังพื้นผิวอื่นที่ไม่ใช่ชิ้นงานโดยตรง โดยที่การหล่ออัดทางตรงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ และการหล่อแบบโลหะเหลวไม่เคลื่อนที่ (Without metal movement) ดังรูปที่ 1.9 และการหล่อแบบโลหะเหลวเคลื่อนที่ (with metal movement) ดังรูปที่ 1.10 ขณะที่การหล่ออัดทางอ้อม สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ 1. โลหะเหลวและพิมพ์เคลื่อนที่ในแนวตั้ง 2. โลหะเหลวและแม่พิมพ์เคลื่อนที่ในแนวนอน 3. โลหะเหลวเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแม่พิมพ์เคลื่อนที่ในแนวนอน 4. โลหะเหลวเคลื่อนที่ในแนวนอนแม่พิมพ์เคลื่อนที่ในแนวตั้ง



รูปที่ 1.9 แสดงการหล่ออัดทางตรงแบบโลหะเหลวเคลื่อนที่ (Doehler, 1951)



รูปที่ 1.10 แสดงการหล่ออัดทางตรงแบบโลหะเหลวไม่เคลื่อนที่ (Doehler, 1951)

ปัจจุบันมีแนวโน้มการผลิตในภาคอุตสาหกรรมเน้นการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูงและมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์เพื่อลดน้ำหนักรวมของยานยนต์ ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ส่งผลให้อะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูงเป็นที่ต้องการเพิ่มมากขึ้น

อะลูมิเนียมเกรด A356 หรือ Al-7Si เป็นอะลูมิเนียมประเภทขึ้นหล่อหลอม (Cast alloy) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ยานอวกาศและอุตสาหกรรมทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากเป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดี สามารถหล่อได้ (Castability) มีการไหลที่ดี (fluidity) ทนต่อการกัดกร่อนได้สูงมีความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก (M. Abdulwahab, I. Madugu, S. Yaro, S. Hassan, & A. Popoola, 2011; M. Abdulwahab, I. A. Madugu, S. A. Yaro, S. B. Hassan, & A. P. I. Popoola, 2011) ซึ่งอะลูมิเนียมเกรด A356 เป็นอะลูมิเนียมที่สามารถอบชุบได้ เนื่องจากมีส่วนผสมของแมกนีเซียมค่อนข้างสูง ส่งผลให้สามารถชุบแข็งแบบตกตะกอน (Precipitation hardening, Age hardening) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลได้

การชุบแข็งแบบตกตะกอน ถูกพบครั้งแรกในกลุ่มอะลูมิเนียม-ทองแดง เป็นกระบวนการทางความร้อนเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในในระดับนาโนเมตรเกิดขึ้นจากการตกตะกอน ซึ่งโครงสร้างขนาดเล็กนี้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่สูง ทำให้คุณสมบัติเชิงกลสูงขึ้น โดยเกิดขึ้นในขณะที่ชิ้นงานยังอยู่ในสถานะของแข็งโดยที่กรรมวิธีการชุบแข็งแบบตกตะกอนประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ

1. การอบละลาย (Solution treatment)
2. จุ่มชุบ (Quenching)
3. การบ่ม (Aging)

การอบละลายเป็นการให้ความร้อนกับอะลูมิเนียมผสม โดยใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมละลาย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อละลายเฟสที่มีส่วนประกอบของแมกนีเซียมทองแดงและซิลิกอน (ธาตุที่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม) และปรับปรุงผลึกซิลิกอน

อัตราการละลายของเฟสแมกนีเซียม ทองแดงและซิลิกอนรวมถึงการเปลี่ยนรูปร่างของผลึกซิลิกอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ คือที่อุณหภูมิสูงหรือเวลานานจะสามารถละลายแมกนีเซียมทองแดงเฟส และปรับปรุงรูปร่างของผลึกซิลิกอนได้ดีกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำหรือใช้เวลาที่สั้น โดยที่อุณหภูมิสูงสุดของการอบละลายขึ้นอยู่กับธาตุแมกนีเซียมและทองแดง เนื่องจากธาตุทั้งสองเป็นธาตุที่มีอุณหภูมิการหลอมละลายที่ต่ำ ส่งผลให้เมื่อให้ความร้อนมากเกินไป จะทำให้เฟสที่ประกอบไปด้วยแมกนีเซียมหรือทองแดงเกิดการละลายส่งผลให้คุณสมบัติทางกลลดลง อะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบมีจุดหลอมเหลวประมาณ 540 – 550 องศาเซลเซียส ขณะที่อะลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบมีจุดหลอมเหลวประมาณ 500 – 519 องศาเซลเซียส

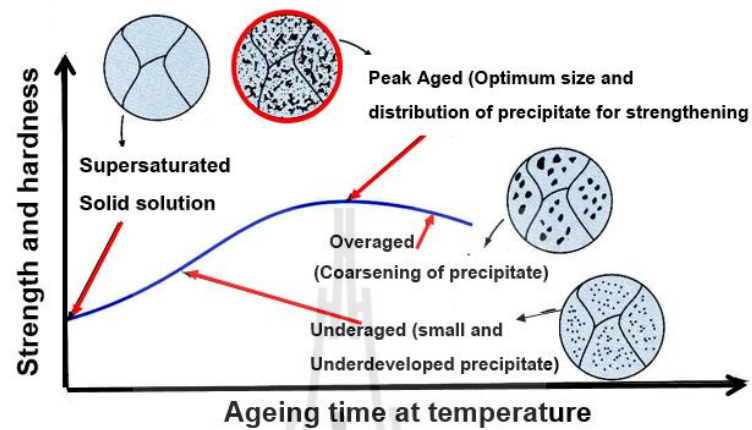
การจุ่มชุบเป็นขั้นตอนการทำให้อะลูมิเนียมเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วหลังจากกระบวนการให้ความร้อนเพื่อคงสภาพโครงสร้างอะลูมิเนียมหลังจากกระบวนการให้ความร้อนเพื่อป้องกันไม่ให้อะตอมมีเวลามากพอที่จะรวมตัวกันกลายเป็นนิวเคลียส ทำให้อะลูมิเนียมอยู่ในสถานะสารละลายเกินจุดอิ่มตัวแบบยิ่งยวด (super saturated solid solution) อัตราการเย็นตัวของอะลูมิเนียมสูงส่งผลให้อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติทางกลที่สูงขึ้นหลังจากกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน เนื่องจากเมื่ออัตราการเย็นตัวสูงอะตอมของแมกนีเซียมและทองแดงจะไม่มีเวลามากพอที่จะรวมตัวกันกลายเป็นนิวเคลียสดังที่กล่าวไปข้างต้น ส่งผลให้มีอะตอมของแมกนีเซียมและทองแดงมากพอที่จะสร้างเฟสที่เพิ่มความแข็งแรงในขั้นตอนการบ่ม

การบ่มมีจุดประสงค์เพื่อสร้างผลึกเล็กๆ ซึ่งผลึกเล็กๆส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยที่การบ่มแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

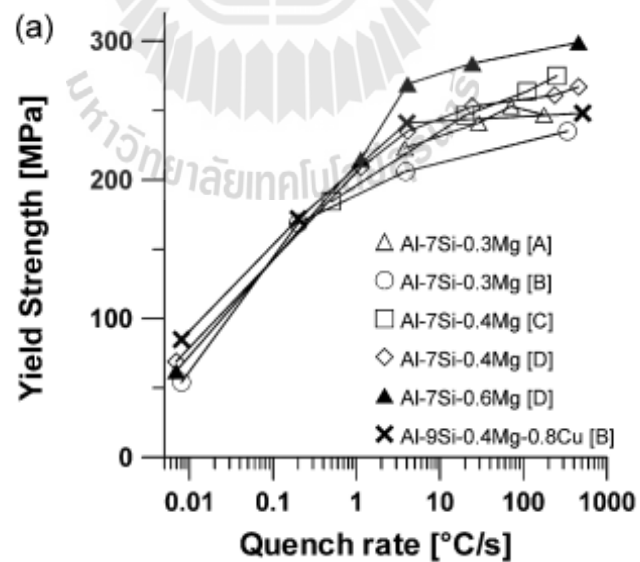
1. การบ่มธรรมชาติ (Natural aging)
2. การบ่มเทียม (Artificial aging)

การบ่มธรรมชาติ เป็นเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานในอุณหภูมิห้อง โดยที่อะลูมิเนียมหลังจากกระบวนการอบละลายและการจุ่มชุบ อยู่ในลักษณะของสารละลายเกินจุดอิ่มตัวอย่างยิ่งยวดส่งผลให้อะตอมที่ละลายตัวอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมมีการจับตัวและตกผลึกเป็นผลึกที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวกันของผลึกเหล่านี้ เป็นการให้ความร้อนที่

อุณหภูมิต่ำ(อุณหภูมิห้อง) ส่งผลให้อะตอมไม่มีพลังงานมากพอในการจับตัวเพื่อตกเป็นผลึกที่ใหญ่ขึ้น ทำให้อัตราการเพิ่มความแข็งต่ำและใช้เวลานาน



รูปที่ 1.11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผลึกและอัตราการเพิ่มความแข็ง (Sjölander & Seifeddine, 2010)



รูปที่ 1.12 ความแข็งแรงเทียบกับอัตราการเย็นตัว (Sjölander & Seifeddine, 2010)

การบ่มเทียม เป็นการเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 150 – 210 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อะลูมิเนียมมีพลังงานในการเคลื่อนที่เพื่อจับตัวกันเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าการบ่มแบบธรรมชาติ ซึ่งขนาดในการตกผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในบ่ม คือ เมื่อใช้เวลานานจะส่งผลให้ผลึกที่ได้มีรูปร่างใหญ่ ซึ่งขนาดของผลึกที่ได้จากกระบวนการบ่มส่งผลต่อค่าความแข็งดังรูปที่ 1.11 จะเห็นว่าเมื่อใช้เวลานานผลึกจะมีรูปร่างที่ใหญ่ขึ้นและค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกมีรูปร่างที่พอเหมาะ (คุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมจะต่ำเมื่อผลึกมีรูปร่างที่เล็กจนเกินไปหรือใหญ่จนเกินไป) ซึ่งอัตราและความเร็วของการตกผลึกขึ้นอยู่กับ

1. อุณหภูมิและเวลาของการอบละลาย
2. อุณหภูมิและเวลาของการบ่ม
3. อัตราการเย็นตัวในขั้นตอนการจุ่มชุบ

การชุบแข็งแบบตกตะกอนแบบตกตะกอนสามารถแบ่งวิธีตามเทคนิคขั้นตอนการชุบแข็งได้ดังนี้

T1 คือ การปล่อยให้อะลูมิเนียมมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง (หลังจากกระบวนการหล่อ)

T4 คือการปล่อยให้อะลูมิเนียมเย็นตัวจากกระบวนการหล่อให้ความร้อนของชิ้นงานในกระบวนการอบละลายหลังจากนั้นจุ่มชุบและปล่อยให้เพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง (การบ่มธรรมชาติ) ทำให้ได้คุณสมบัติทางกลได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความต้านทานแรงดึง

T6 คือ ให้ความร้อนสูงกับอะลูมิเนียมในขั้นตอนการอบละลาย เพื่อละลายเฟสแมกนีเซียมหรือทองแดงและให้ความร้อนต่ำในขั้นตอนการบ่มเทียมเพื่อเร่งอัตราการตกผลึกและควบคุมขนาดของผลึกให้มีขนาดที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ดี จะทำให้ได้คุณสมบัติเชิงกลที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า Tensile strength Yield strength และยังคงรักษาค่า Elongation ไว้ได้

เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการชุบแข็งแบบตกตะกอนส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาวิจัยเพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกับอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนต่อชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแวนอน ทำให้ได้ค่าคุณสมบัติเชิงกล(ความแข็ง ความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัว) ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลอ้างอิงในการพิจารณาเลือกใช้เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอนและเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมอะลูมิเนียมในประเทศไทย โดยใช้ชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบ

แนวนอน รูปกระดูก (Dog bone) เพื่อให้เหมาะกับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบแรงดึง เนื่องจากชิ้นงานรูปกระดูกง่ายต่อการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบ และชิ้นงานรูปกระดูกช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเนื่องการหล่อจากอัด เพราะรูปร่างของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนจะส่งผลต่อการควบคุมพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหล่อส่งผลให้การวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลเพิ่มมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาอิทธิพลของการชุบแข็งแบบตกตะกอนต่อชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียมเกรด A356 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ศึกษาการอบชุบเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดแบบแนวนอนเท่านั้น
2. งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน แบบ T1 T4 T6 เท่านั้น
3. งานวิจัยนี้จะศึกษาระดับของปัจจัยสำหรับการทดลองแบ่งเป็น 5 ตัวแปรคือ
 - 3.1 อุณหภูมิอบละลาย (Solution temperature, °C)
 - 3.2 เวลาอบละลาย (Solution time, min)
 - 3.3 อุณหภูมิการบ่ม (Aging temperature, °C)
 - 3.4 เวลาการบ่ม (Aging time, min)
 - 3.5 อัตราการเย็นตัว (Cooling Rate, °C/S)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลอ้างอิงในการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอน
2. สามารถระบุผลของเวลาและอุณหภูมิการบ่มต่อชิ้นงานต่อชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียม A356 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัด
3. สามารถระบุผลของอุณหภูมิและเวลาการอบละลายต่อชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียม A356 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัด

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้ได้รวบรวมงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้แก่ ข้อมูลของอะลูมิเนียม กรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานและเทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน

2.1 ข้อมูลของอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของอะลูมิเนียม

| คุณสมบัติทางฟิสิกส์ | |
|---|---------------------------------------|
| น้ำหนักอะตอม | 26.97 |
| ระบบผลึก | FCC |
| ความหนาแน่น | 2.70 g/cm ³ |
| อุณหภูมิหลอมเหลว | 658 °C |
| จุดเดือดกลายเป็นไอ | 1800 °C |
| ความร้อนจำเพาะ | 0.2259 cal/g °C |
| ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย | 93 °C |
| อัตราการหดตัวจากสภาพหลอมเหลว | 6.6% |
| สัมประสิทธิ์การขยายตัว(20 °C) | 23.8x10 ⁻⁶ / °C |
| ความต้านทานจำเพาะ (20°C) | 2.699 microhm.cm |
| สภาพตัวนำความร้อน (20 °C) | 0.52 Cal. cm/cm ² . °C.sec |
| คุณสมบัติเชิงกล | |
| ความแข็งแรง(Tensile strength) | 8 – 10 kg/mm ² |
| พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) | 30 kg/mm ² |
| อัตราการยืดตัว | 40 – 45% |
| ความแข็ง(Hardness) | 16 – 20 H _B |
| โมดูลัสของการยืดหยุ่น(Modulus of Elasticity) | 7,800 kg/mm ² |

2.1.1 อะลูมิเนียมผสมอัลลอย

เนื่องจากคุณสมบัติของอะลูมิเนียมที่สามารถรวมตัวกับ โลหะอื่นๆ ได้ง่ายทำให้มีการนำธาตุต่างเข้ามาผสมกับอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติ เรียกว่า อะลูมิเนียมผสมหรืออะลูมิเนียมอัลลอย

อะลูมิเนียมผสมหรืออะลูมิเนียมอัลลอย หมายถึง วัสดุที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบหลักผสมกับธาตุอื่นๆ ในปัจจุบันสามารถแบ่งอะลูมิเนียมผสมออกเป็นสองชนิดตามวิธีการขึ้นรูปได้ คือ อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปร้อน (Wrought alloy) และอะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อหลอมหรืออะลูมิเนียมหล่อผสม(Castable) ซึ่งข้อแตกต่างของอะลูมิเนียมผสมที่ขึ้นรูปเย็น(อะลูมิเนียม 99%) และอะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อหลอม คือ

1. อะลูมิเนียมผสมที่ขึ้นรูปเย็นจะมีน้ำหนักมากกว่าอะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อหลอมที่ขนาดเท่ากัน
2. อะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อหลอมมักจะผสมธาตุอื่น เช่น ซิลิกอน ส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมหล่อหลอมมีความแข็งมากกว่าแต่เปราะ แต่อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นจะมีความเหนียวสูงกว่า
3. อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูปเย็นจะมีราคาที่สูงกว่า

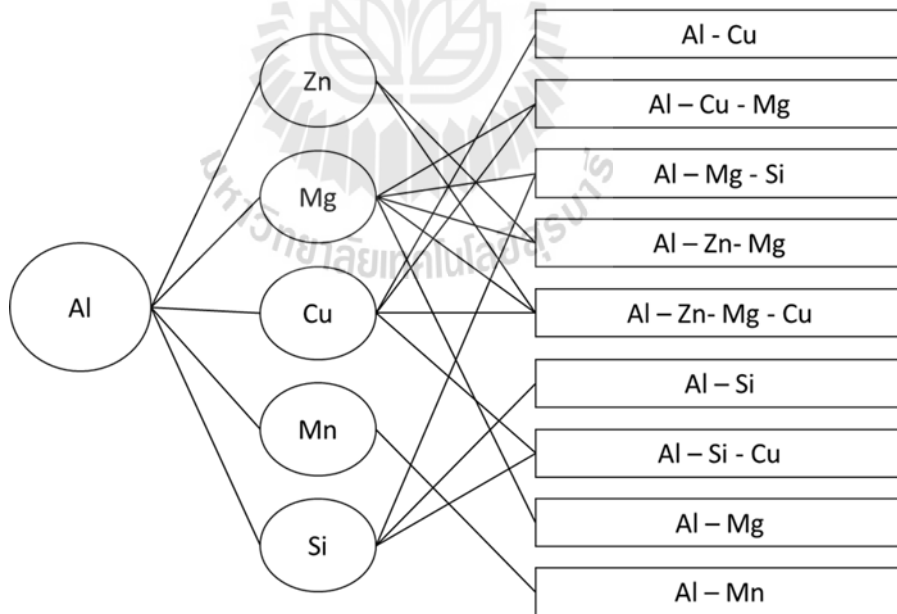
2.1.2 อะลูมิเนียมหล่อผสม(อะลูมิเนียมประเภทหล่อหลอม)

อะลูมิเนียมหล่อผสมเป็นอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การหล่อ คือ มีการไหลที่ดี จุดหลอมเหลวต่ำ ด้านทานการฉีกขาดเนื่องจากความร้อน มีผิวที่ดีเนื่องจากการหล่อและมีส่วนผสมของธาตุต่างๆที่คงที่ โดยธาตุต่างๆที่นิยมผสมในอะลูมิเนียม ประกอบไปด้วย ซิลิกอน (Si) แมกนีเซียม (Mg) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) โดยธาตุต่างๆเหล่านี้จะเป็นธาตุประกอบหลักโดยสามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังรูปที่ 2.1

ซึ่งนอกจากธาตุหลักเหล่านี้แล้ว ยังได้มีการเติมธาตุอื่นๆเข้าไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ เช่น ในกระบวนการหล่อโดยใช้แรงดันสูง (High pressure die casting) เติมธาตุเหล็ก (Fe) เพื่อป้องกันการสึกกร่อนของแม่พิมพ์ (Die soldering)(Lumley, 2010) ธาตุที่ผสมเข้ากับอะลูมิเนียมส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลดังนี้

● ซิลิกอน(Silicon)

ซิลิกอนเป็นธาตุที่ได้รับความนิยมผสมเข้ากับอะลูมิเนียม เนื่องจากซิลิกอนเป็นธาตุที่ส่งผลให้อะลูมิเนียมหล่อผสมมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการหล่อ คือ มีการไหลที่ดี ไม่เกิดปัญหาการแตกหักเมื่อเกิดความร้อนสูงๆ (Abdel-Jaber et al., 2010) ศึกษาอัตราส่วนของซิลิกอน(3 – 15 %Si) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของซิลิกอนต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ เวลาการแข็งตัวของอะลูมิเนียมผสมเพิ่มขึ้น (อุณหภูมิหลอมละลายน้อยลง) ตามการเพิ่มของซิลิกอน แต่เมื่ออัตราส่วนของซิลิกอนมากกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ (12 – 15 เปอร์เซ็นต์) อุณหภูมิการหลอมละลายจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของซิลิกอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามเฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน และพบว่าความแข็งแรงแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนของซิลิกอนเพิ่มจาก 3 – 8 เปอร์เซ็นต์แต่ความแข็งแรงสูงสุดจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออัตราส่วนของซิลิกอนเพิ่มขึ้นในช่วง 8 – 15 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกอนยังส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยึดตัวและความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนของซิลิกอน 12 เปอร์เซ็นต์จะให้ค่าการยึดตัวและความแข็งสูงสุดขณะที่อัตราการยึดตัวและค่าความแข็งจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของซิลิกอนเพิ่มเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการ



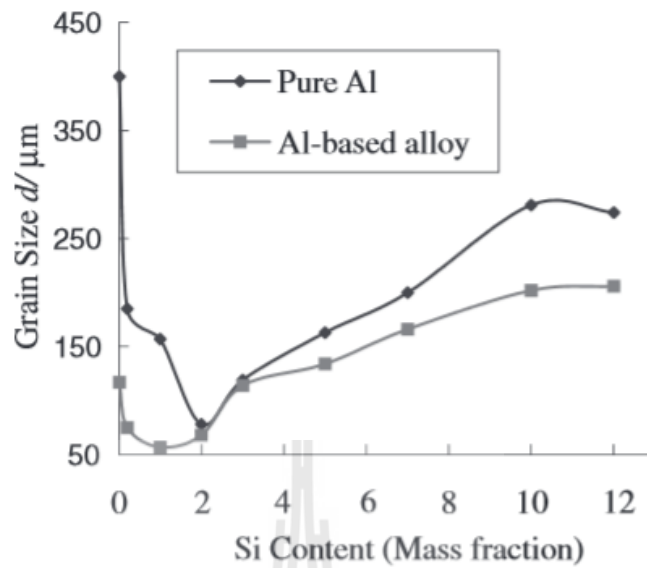
รูปที่ 2.1 แสดงกลุ่มของอะลูมิเนียมผสม

เปลี่ยนแปลงเป็นไฮเปอร์ยูเทคติกซิลิกอน (14 – 25 wt % Si) ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลที่น้อยกว่าไฮโปยูเทคติกซิลิกอน (<12 wt % Si) สามารถสรุปคุณสมบัติที่สำคัญของซิลิกอนในอะลูมิเนียมหล่อผสมได้ดังนี้

1. ช่วยลดการฉีกขาดเนื่องจากความร้อน (Hot tearing) ดังรูปที่ 3.3
2. ซิลิกอนเป็นธาตุที่เมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูงจะส่งผลช่วยให้อะลูมิเนียมหล่อผสมมีคุณสมบัติการไหลที่ดี
3. ต้านทานการสึกหรอ
4. เมื่อรวมตัวกับธาตุที่อยู่ในอะลูมิเนียมหล่อผสม เช่น แมกนีเซียม จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงเมื่อทำการอบชุบชิ้นงาน
5. ช่วยรักษารูปร่างของชิ้นงานเนื่องจากการหล่อ(ป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานหลังจากการหล่อเสร็จสิ้น และนำมาเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง)
6. ช่วยลดการกระจายของอากาศที่เกิดจากชิ้นงาน
7. ซิลิกอนยังส่งผลต่อขนาดของเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งขนาดของซิลิกอนที่มีขนาดเล็กจะมีแรงดึงระหว่างโมเลกุลที่สูงส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 แสดงการฉีกขาดเนื่องจากความร้อน (Hot tear) {Vinarcik, 2002}



รูปที่ 2.3 แสดงขนาดของเกรนเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ซิลิกอน Sjölander, 2010}

- แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)

แมกนีเซียมเป็นธาตุที่นิยมถูกผสมเข้าไปในอะลูมิเนียมผสม เพื่อช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ ความสามารถในการเชื่อม ความแข็ง และความแข็งแรงในขั้นตอนการอบชุบ แมกนีเซียมจะรวมตัวเข้ากับซิลิกอนกลายเป็นเฟส Mg_2Si ซึ่งเป็นผลึกที่สร้างความแข็งและความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียมผสมอย่างมาก นิยมใช้ในอะลูมิเนียมเกรด 356 และ 5XX

- ทองแดง (Copper, Cu)

ทองแดงเป็นธาตุที่มีผลกระทบต่อความแข็ง และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมหล่อผสม ส่งผลต่อความแข็ง และความแข็งแรงในอะลูมิเนียมหล่อผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการอบชุบ นอกจากนี้ทองแดงยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างทำให้ง่ายต่อการตัดและกลึงเพื่อตกแต่งรูปร่างของชิ้นงานแต่ทองแดงส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่น้อยลง อะลูมิเนียมผสมทองแดง (Al-Cu alloy) ที่มีปริมาณซิลิกอนอยู่ในปริมาณที่น้อยหรือปานกลางจะมีความเหนียวที่ค่อนข้างสูง(การไหลไม่ดี) ส่งผลให้ต้านทานต่อการฉีกขาดเนื่องจากความร้อนในช่วงของการแข็งตัว (Hot tearing) ได้ไม่ดี ส่งผลให้ไม่สามารถผสมทองแดงในปริมาณที่มากได้ (มากกว่า 10%) (Shabestari & Moemeni, 2004) ศึกษาอิทธิพลของทองแดงต่อโครงสร้างภายใน

และคุณสมบัติเชิงกล โดยใช้อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 และอัตราส่วนของทองแดง 0.2 – 2.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบตกผลึก T6 ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของทองแดง

- **นิกเกิล (Nickel, Ni)**

นิกเกิลเป็นธาตุที่เพิ่มเข้าไปในอะลูมิเนียมผสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง เช่น เป็นธาตุประกอบในอะลูมิเนียมเกรด 3XX ที่มีซิลิกอนน้อย โดยส่วนมากนิกเกิลนิยมนำไปผสมกับอะลูมิเนียมเกรด 200 (Hanafee, 1963) พบว่านิกเกิลสามารถเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (315 °C) ของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ซึ่งอัตราการเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงขึ้นอยู่กับจำนวนและการกระจายตัวของเฟส นิกเกิล (ผลึกของซิลิกอนไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้)

- **ดีบุก (Tin, Sn)**

ดีบุก (Sn) มีหน้าที่ในการลดแรงเสียดทานในชิ้นงานจำพวกแบริ่งหรือบุช มักจะนิยมใช้ในอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด 8XX ดีบุกเป็นธาตุที่ละลายที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 227.7 °C) นอกจากนี้ดีบุกช่วยป้องกันการแตกหักของแบริ่งได้ดีในช่วงขณะหนึ่งเมื่อแบริ่งหรือบุชมีความร้อนสูงขณะใช้งาน

- **เหล็ก (Iron, Fe)**

เหล็กเป็นธาตุเจือปนอยู่ในอะลูมิเนียม (ผสมอยู่ในอะลูมิเนียมตามธรรมชาติ) มีประโยชน์อย่างมากในกระบวนการหล่อโดยใช้แรงดัน เนื่องจาก (J. A. Taylor, 2004) พบว่าเหล็กประมาณ 0.8% หรือมากกว่านั้นจะช่วยลดการติดกันของชิ้นงานกับแบริ่งพิมพ์ โครงสร้าง Al-Fe-Si จะเกิดขึ้นที่ประมาณ 0.8%Fe

- **ไทเทเนียม (Titanium, Ti)**

(Saheb et al., 2001) พบว่าผลึกไทเทเนียมในรูป Al_3Ti เฟสซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นนอกจากนี้อะลูมิเนียมจะได้รับอิทธิพลจากการชุบแข็งเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนของไทเทเนียมที่ผสมอยู่ ขณะที่ (Jaradeh & Carlberg, 2005) ศึกษาอิทธิพลของอะลูมิเนียมในอะลูมิเนียมหล่อผสมเกรด AA3003 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนไทเทเนียม สามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้ แต่เมื่อไทเทเนียมมากกว่า 0.15 เปอร์เซ็นต์ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของการเพิ่มค่าต้านทานการกัดกร่อน

- **แมงกานีส (Manganese, Mn)**

(Nam & Lee, 2000) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของแมงกานีสในอะลูมิเนียมผสมเพิ่มขึ้นเกินกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแต่ไม่ส่งผลต่อค่าความเหนียว นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในกันเพิ่มค่าความต้านทานการแตกหักเนื่องจากความล้าได้อีกด้วย

- **สังกะสี (Zinc, Zn)**

สังกะสีเป็นธาตุที่พบได้ยากตามธรรมชาติ ซึ่งนิยมผสมเข้าไปยังอะลูมิเนียมในเกรด 7XX เท่านั้น นอกจากนี้สังกะสียังมองเป็นธาตุเจือปน(ของเสีย)ในอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานหล่อโดยใช้แรงดันสูง (Zhu et al., 2010) พบว่าอัตราส่วนของสังกะสี 1.5 เปอร์เซ็นต์ให้ค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุด

2.2 กระบวนการหล่อ

การหล่อเป็นกระบวนการที่ง่ายและประหยัดที่สุดในการเปลี่ยนรูปวัสดุให้กลายเป็นชิ้นงาน โดยมีความหมาย คือเป็นกระบวนการเทโลหะเหลวลงไปยังแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นมาและปล่อยให้เย็นตัวและแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเย็นตัวนี้ถูกพัฒนาขึ้นประมาณ 3500 ปีก่อนคริสตกาล ปัจจุบันการหล่อได้มีการพัฒนาอย่างมากและแบ่งได้หลากหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละเทคนิคต่างมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของชิ้นงานที่ต้องการ

2.2.1 การหล่อทราย

การหล่อทรายเป็นวิธีการหล่ออะลูมิเนียมที่ง่ายที่สุด ในอดีตงานหล่อทรายถูกนำมาใช้ในที่ที่มีปริมาณน้อยๆแต่ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องจักรอัตโนมัติเข้ามาช่วยทำให้งานหล่อทรายถูกนำไปผลิตในปริมาณมากได้ นอกจากนี้งานหล่อทรายยังเหมาะกับงานที่มีขนาดใหญ่ มีความสลับซับซ้อน โดยที่งานหล่อทรายจะเป็นงานที่ได้พื้นผิวที่หยาบและควบคุมได้ยาก ซึ่งความแม่นยำของผิวจะขึ้นอยู่กับชนิดของทรายที่ใช้และวิธีการหล่อ ซึ่งแบ่งงานหล่อทรายออกเป็น 2 ชนิด คือ การหล่อทรายแบบชื้น (green sand) และการหล่อทรายแบบแห้ง (Dry sand) (Lumley, 2010)

ข้อดี

1. สามารถหล่อโลหะได้เกือบทุกชนิด
2. น้ำหนักของงานหล่อไม่จำกัด
3. สามารถนำทรายกลับมาใช้ใหม่ได้(อาจจะต้องผสมทรายใหม่)

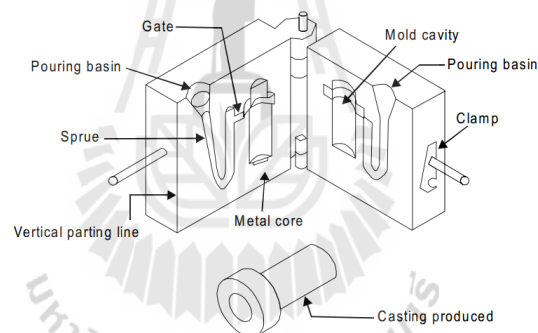
4. ผลิตในปริมาณมากๆ ได้

ข้อเสีย

1. ฝีมือมีลักษณะหยาบ
2. ต้องมีเนื้อขนาดของชิ้นงานมาก
3. แบบทรายมีการสึกกร่อนมาก

2.2.2 การหล่อด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent mold)

การหล่อด้วยแบบหล่อถาวรเป็นการหล่อโดยใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็ก โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อจะใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าทำให้สามารถนำแม่พิมพ์กลับมาใช้ใหม่ได้ มีวิธีการคือโลหะเหลวถูกเทลงในแม่พิมพ์โลหะถาวรภายใต้สถานะแรงโน้มถ่วง อาศัยแรงโน้มถ่วงช่วยในการไหลของโลหะเหลวเข้าไปยังแม่พิมพ์ (Mold cavity)



รูปที่ 2.4 แม่พิมพ์การหล่อแบบถาวรของการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร

(Permanent mold) (Singh, 2006)

ข้อดี

1. ลดการเกิดโพรงแก๊ส (Blow hole) ของชิ้นงาน
2. ต้นทุนในการผลิตต่ำ (แม่พิมพ์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้)
3. ชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวที่สูงส่งผลให้ได้โครงสร้างที่ดี
4. ชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูง
5. ผิวของชิ้นงานมีความเรียบเนียนกว่าการหล่อทราย

6. มีอัตราการผลิตชิ้นงานที่สูง
7. ใช้กำลังคนน้อย
8. เหมาะสำหรับงานหล่อโลหะนอกกลุ่มเหล็ก
9. ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าการหล่อแบบทรายดั่งรูปที่ 2.5 จากรูป จะเห็นการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวรจะให้ความแข็งแรงมากกว่าการหล่อแบบทราย

ข้อเสีย

1. ค่าใช้จ่ายสูงในขั้นตอนเริ่มต้น (เนื่องจากแบบหล่อทำจากเหล็ก)
2. ผิวของชิ้นงานมีความแข็งสูง ยากต่อการตัดแต่ง
3. ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง
4. ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่

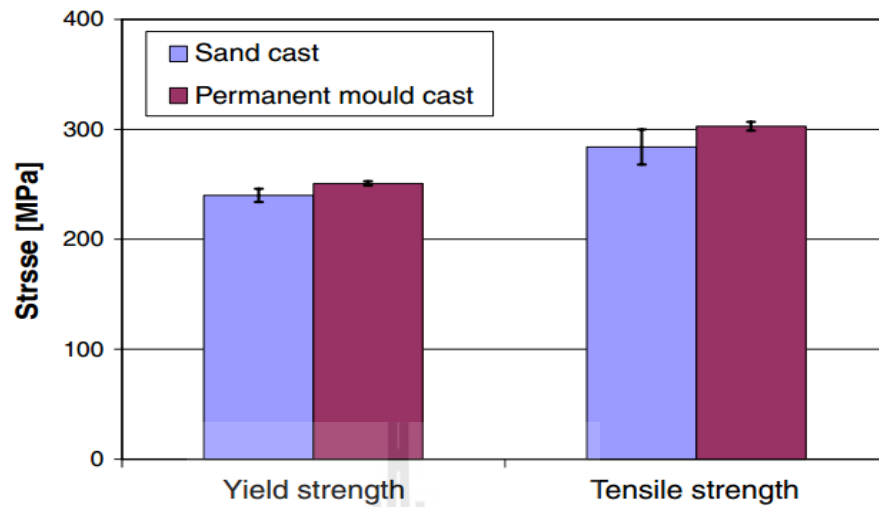
2.2.3 การหล่อโดยวิธีการฉีดโลหะหลอมเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์(Die casting)

หล่อแบบทรายและการหล่อแม่พิมพ์ถาวร คือ ใช้แรงดันจากอากาศหรือระบบไฮดรอลิก บังคับน้ำโลหะเข้าไปยังแม่พิมพ์ ซึ่งแรงดันที่ใช้จะมีประมาณ 70 – 5000 ปาสกาล

2.2.4 การหล่อความดันสูง (High pressure die casting)

การหล่อความดันสูง เป็นการหล่อโดยใช้แรงดันสูงบังคับโลหะหลอมเหลวเข้าไปยังแม่พิมพ์ส่งผลให้น้ำโลหะเหลวมีความเร็วสูง การผลิตชนิดนี้จะถูกเรียกสั้นๆว่าการหล่อตาย (Die casting)(Singh, 2006) ทำให้ผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วและมีต้นทุนต่ำ การหล่อโดยใช้ความดันสูง แบ่งออกเป็น 2 ชนิดจำแนกตามลักษณะของเครื่องจักรที่ใช้ คือ ห้องเครื่องร้อน (Hot chamber) และห้องเครื่องเย็น (Cold chamber)

การหล่อแบบห้องเครื่องร้อนเป็นการหล่อที่นิยมใช้กับโลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเช่น สังกะสี โดยวิธีการหล่อแบบห้องเครื่องร้อน เตาหลอมจะติดตั้งอยู่ภายในเครื่องฉีดและมีท่อต่อจากแม่พิมพ์เข้ากับเตาหลอมโดยตรงดัง 2.6 ส่งผลให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุดและลดขั้นตอนของการเติมน้ำโลหะลงไปยังห้องฉีดโลหะเหลว (Chamber) ส่งผลให้เวลาในการหล่อของห้องเครื่องร้อนน้อยกว่าวิธีการหล่อของเครื่องแบบห้องเครื่องเย็นซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญของเครื่องฉีด ห้องเครื่องเย็น แสดงดังรูปที่ 2.8



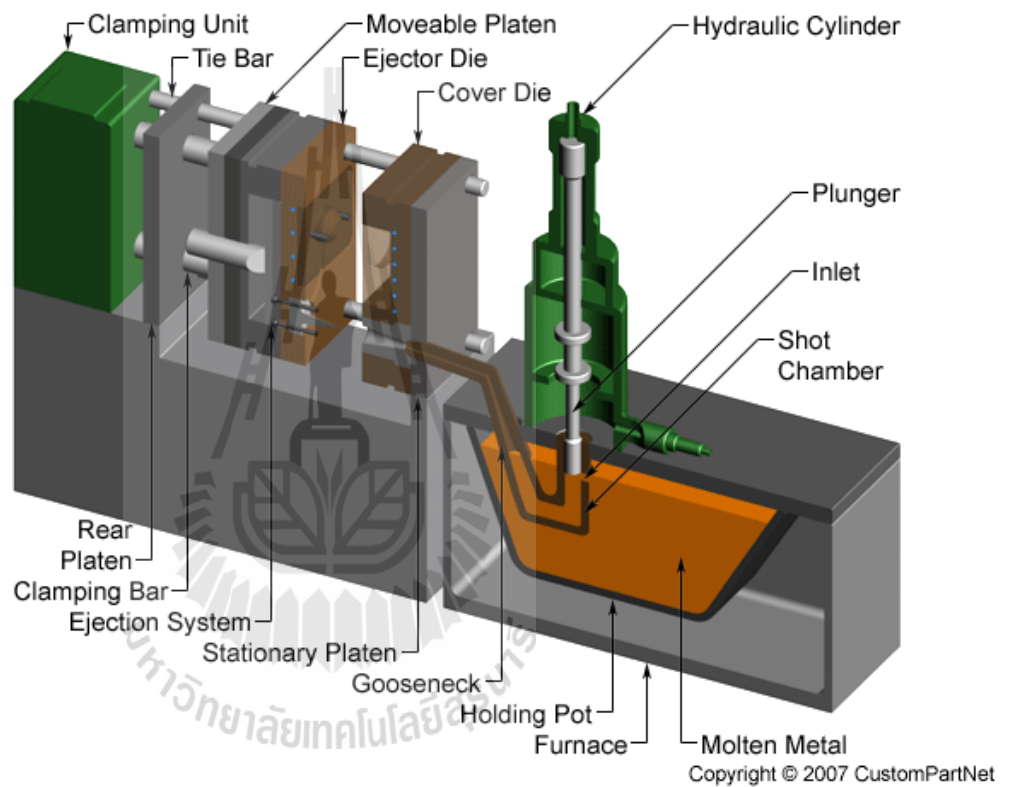
รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากการหล่อทรายและการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวร (Linder, Axelsson, & Nilsson, 2006)

1. ปิดแม่พิมพ์ กระทบกสูบ(Plunger)จะยกขึ้นเพื่อให้โลหะเหลวไหลเข้ามายังห้องฉีด (chamber)
2. กระทบกสูบเลื่อนลง โลหะเหลวจะถูกดันให้วิ่งผ่านคอห่าน (Gooseneck) เข้าไปยังแม่พิมพ์และยังคงแรงดันไว้จนกระทั่งโลหะแข็งตัว
3. แม่พิมพ์เปิดออก
4. นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

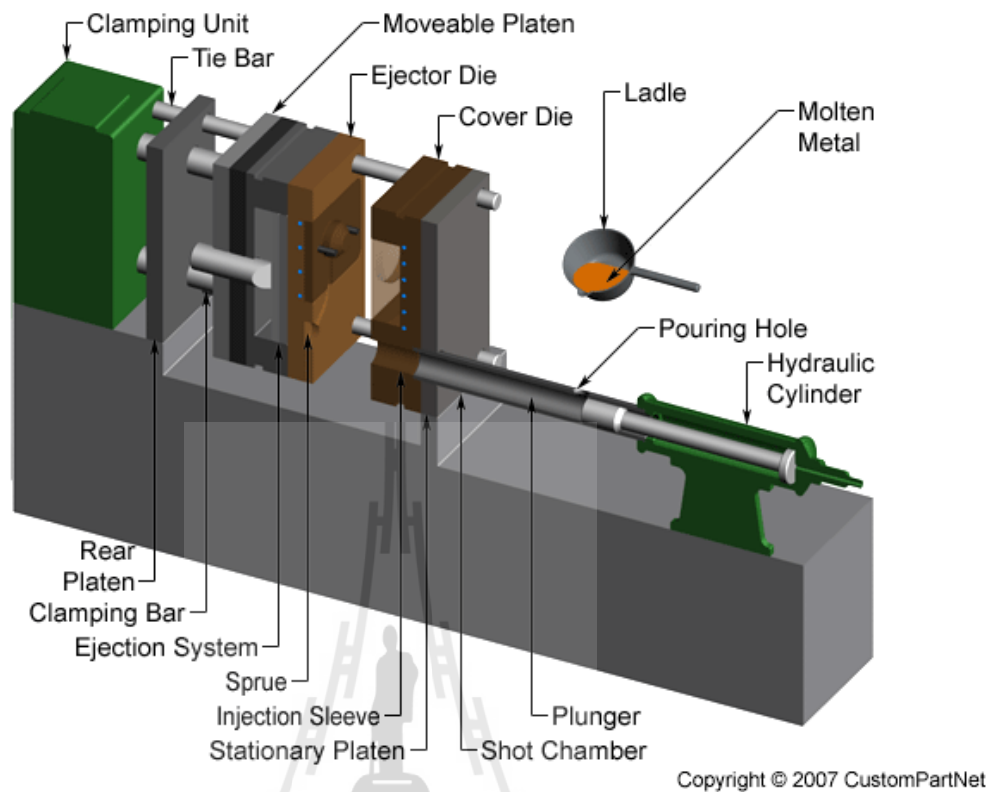
การหล่อแบบห้องเครื่องเย็นรูปที่ 2.7 เป็นวิธีการหล่อที่เหมาะสมกับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่นอะลูมิเนียมผสม วิธีการหล่อแบบห้องเครื่องเย็นแตกต่างจากวิธีการหล่อแบบห้องเครื่องร้อน คือ

1. ตำแหน่งของเตาหลอมโลหะเหลวจะอยู่แยกจากเครื่องหล่อ โดยโลหะเหลวจะถูกเทเข้าที่ห้องฉีดโลหะเหลว (chamber) ผ่านทางกระบวย (Ladle)
2. อุณหภูมิของโลหะเหลวในกระบวนการหล่อแบบห้องเครื่องเย็นจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าการหล่อแบบห้องเครื่องร้อน
3. เนื่องจากเหตุผลในข้อ 2 ทำให้แรงดันของวิธีการหล่อแบบห้องเครื่องเย็นมีค่ามากกว่าการหล่อแบบห้องเครื่องร้อน

4. แรงดันที่สูงกว่าทำให้การไหลของโลหะเหลวมีค่าที่มากกว่า
5. แรงดันที่สูงกว่าทำให้ชิ้นงานมีความแม่นยำมากกว่า และยังลดฟองอากาศ ที่เกิดขึ้นอีกด้วย
6. แรงดันที่สูงกว่าส่งผลให้อายุของแม่พิมพ์น้อยกว่าหรือต้องการแม่พิมพ์ที่มีความแข็งแรงมากกว่า



รูปที่ 2.6 เครื่องฉีดแบบห้องเครื่องร้อน (Aungsuwatkakul, 2011)

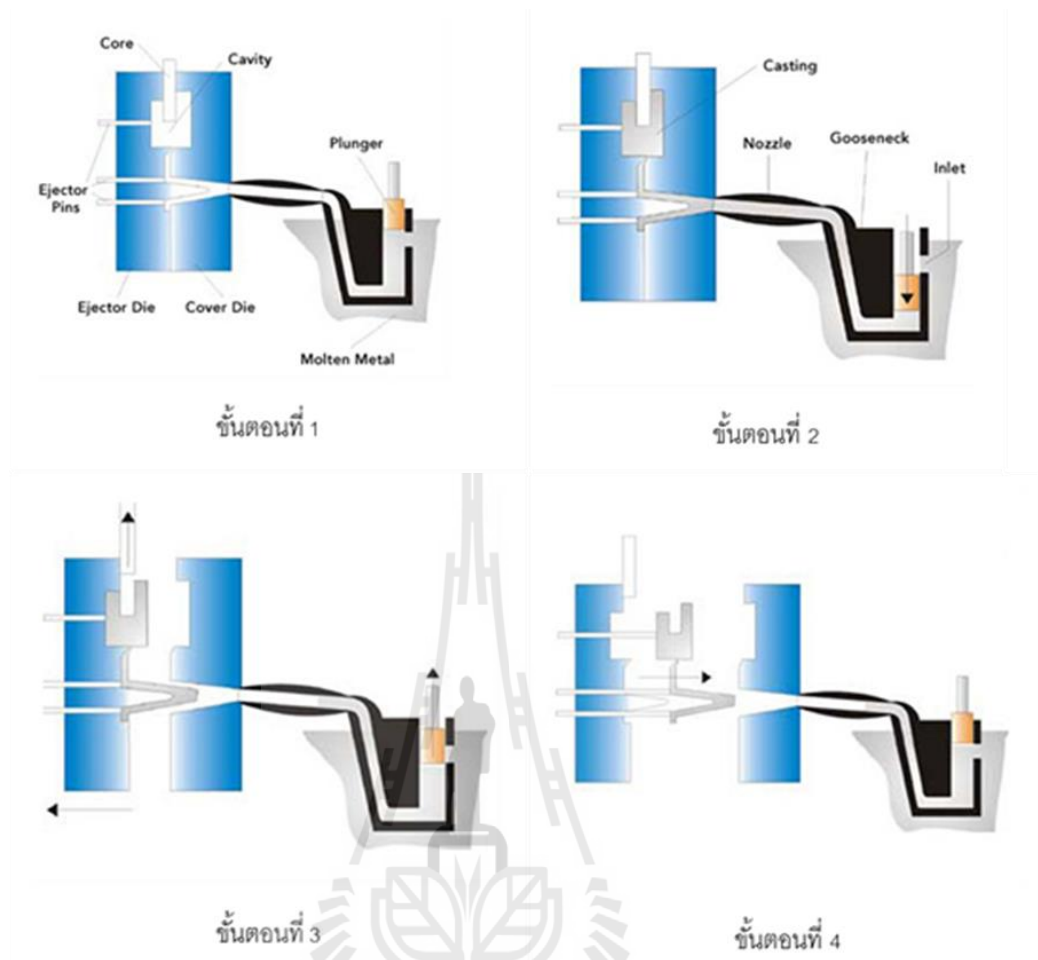


รูปที่ 2.7 เครื่องฉีดแบบห้องเครื่องเย็น (ห้องเครื่องเย็น) (Aungsuwatkakul, 2011)

ซึ่งวิธีการทำงานของการฉีดแบบ ห้องเครื่องเย็น แสดงใน รูปที่ 2.9

1. แม่พิมพ์ปิดเข้าหากัน โลหะเหลวถูกเทลงโดยกระบวย
2. กระบอกสูบ(Plunger) ดันน้ำโลหะเข้าไปยังแม่พิมพ์และคงแรงดันไว้จนกระทั่งโลหะเหลวแข็งตัว
3. แม่พิมพ์ถูกเปิดออก
4. นำชิ้นงานออก เตรียมการฉีดครั้งต่อไป

นอกจากนี้ในกระบวนการหล่อความดันสูงนั้นได้แบ่งกลุ่มตามลักษณะการไหลได้ 2 แบบคือ การฉีดแบบแนวตั้ง (Horizontal chamber system) และการฉีดแบบแนวนอน Vertical injection system ดัง การหล่อความดันสูง



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการฉีดของเครื่องฉีดแบบห้องเครื่องร้อน {Vinarcik, 2002}

ข้อดีคือ

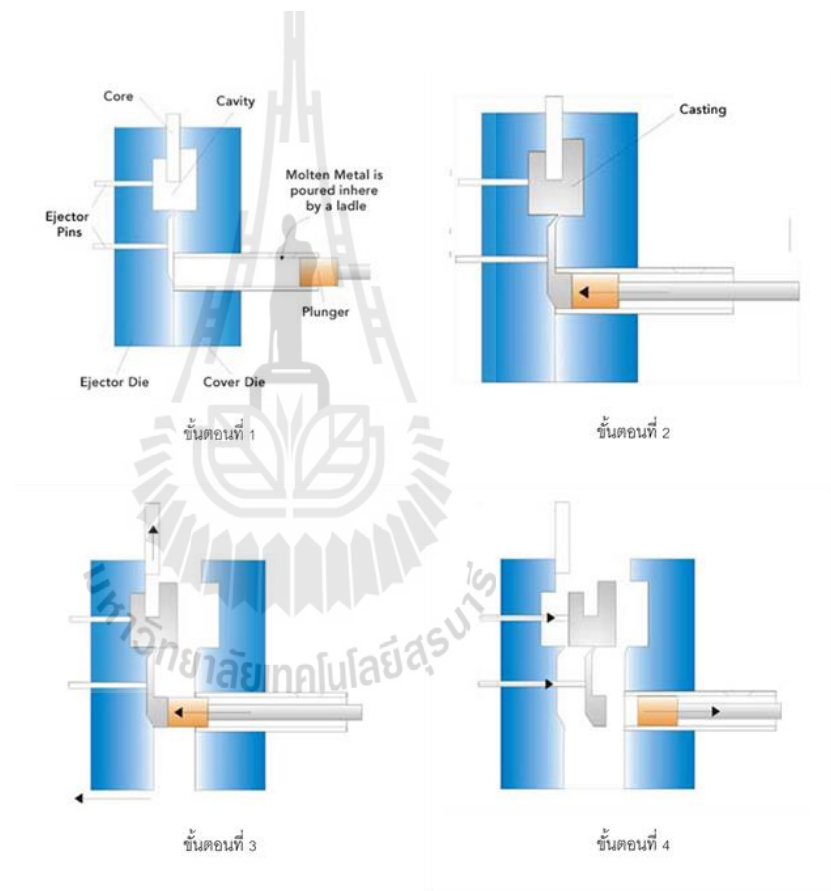
1. มีความรวดเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงานสูง
2. เหมาะสำหรับการผลิตในปริมาณมากๆ
3. เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีความบาง
4. มีความคลาดเคลื่อนต่ำ
5. ได้พื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ
6. ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการน้อย
7. ต้นทุนของชิ้นงานต่ำ
8. ใช้พื้นที่น้อย

9. อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สูง

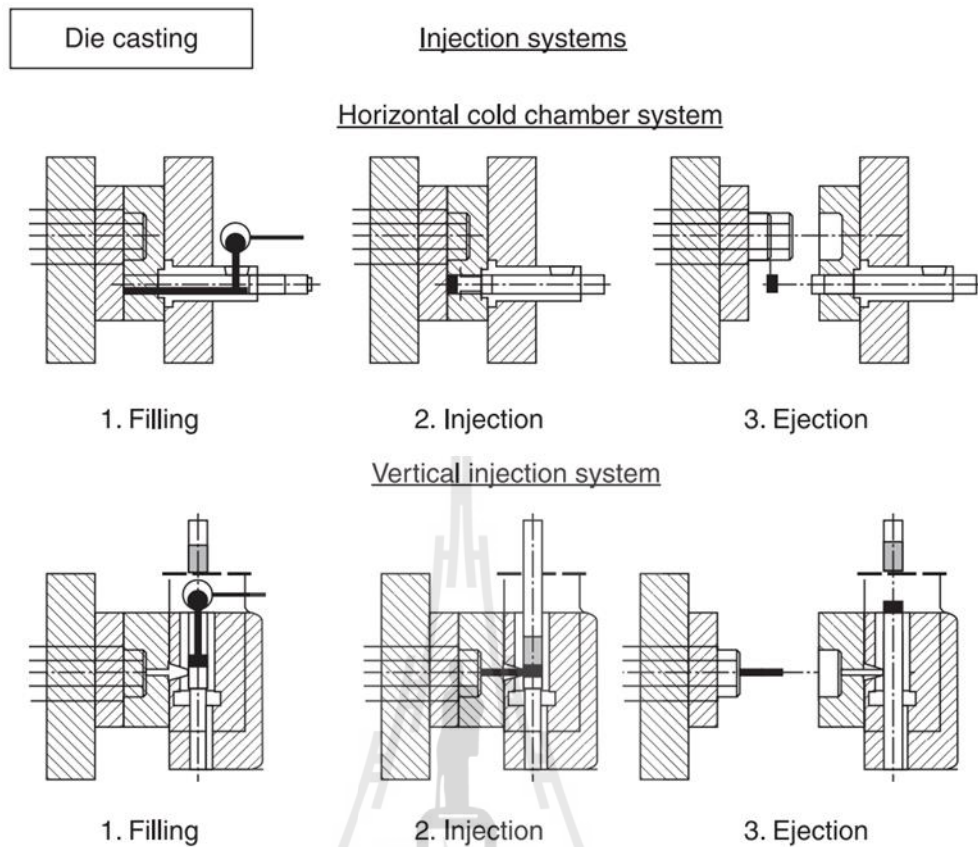
10. ชิ้นงานในแต่ละครั้งของการหล่อมีความแตกต่างกันน้อย

ข้อเสีย

1. ต้นทุนของแม่พิมพ์สูง
2. เหมาะสำหรับชิ้นงานที่บางเท่านั้น
3. ต้องใช้พนักงานที่มีความสามารถ
4. ไม่เหมาะกับการผลิตน้อยๆ



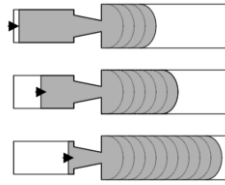
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการฉีดของเครื่องฉีดแบบห้องเครื่องเย็น {Vincik, 2002}



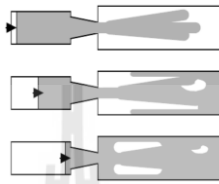
รูปที่ 2.10 เครื่องฉีดโลหะเหลวแบบแนวตั้งและแนวนอน (Takach, 1993)

2.2.5 การไหลของโลหะเหลวในการหล่อแรงดันสูง

การไหลของโลหะเหลวในการหล่อแรงดันสูงขึ้นอยู่กับความเร็วและคุณลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการหล่อ อัตราการไหลต่ำจะส่งผลให้ลักษณะการไหลของโลหะเหลวเป็นแนว (การไหลลักษณะราบเรียบ, laminar flow) แสดงดังรูปที่ 2.11 ในขณะที่ อัตราการไหลสูงจะส่งผลให้โลหะเหลวเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) แสดงดังรูปที่ 2.12 ทำให้เกิดการกักของอากาศในชิ้นงาน



รูปที่ 2.11 รูปการไหลแบบราบเรียบของโลหะเหลวภายในแม่พิมพ์ {Vinarcik, 2002}



รูปที่ 2.12 รูปการไหลแบบปั่นป่วนของโลหะเหลวภายในแม่พิมพ์ {Vinarcik, 2002}

2.2.6 การหล่ออัด (Squeeze casting)

การหล่ออัดเป็นกระบวนการที่พัฒนามาขึ้นมากเพื่อแก้ปัญหาฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากงานหล่อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหล่อโดยใช้แรงดันสูง ซึ่งการหล่ออัดเป็นการนำจุดเด่นของการหล่อแบบแม่พิมพ์ถาวรและการขึ้นรูปโดยการตี ในปัจจุบันการหล่ออัดมักนิยมใช้ขึ้นรูปวัสดุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมอัลลอยและมีอัตราการเจริญเติบโตอย่างมากในอุตสาหกรรมรถยนต์และยานอวกาศ ซึ่ง Pennington(1) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัด Squeeze casting พบว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดมีค่าความเค้นวิกฤตที่ทำให้เกิดการคราด (Yield strength) เพิ่มขึ้น 10 – 15 เปอร์เซ็นต์ ค่าความยืดตัว (Elongation) และความแข็งแรงต่อการล้า (Fatigue strength) เพิ่มขึ้น 50 – 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่อโดยใช้แรงดันสูงและนอกจากนี้ยังพบว่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานจากกระบวนการหล่ออัดมีค่าเท่ากับชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อโดยใช้แรงดันสูง กระบวนการหล่ออัดมีขั้นตอนคือ

1. หลอมโลหะและอุ่นแม่พิมพ์
2. ปิดแม่พิมพ์ เทโลหะเหลวไปยังแม่พิมพ์ ไฮโดรลิกผลักดันโลหะเหลวเข้าไปยังแม่พิมพ์โดยใช้แรงดันต่ำ

3. เมื่อโลหะเหลวเติมเต็มแม่พิมพ์และอยู่ในช่วงแข็งตัวใช้แรงดันสูงอัดโลหะเหลวและคงแรงดันจนกระทั่งโลหะเหลวแข็งตัว
4. เมื่อโลหะเหลวแข็งตัว เปิดแม่พิมพ์และนำโลหะเหลว(ชิ้นงาน) ออกจากแม่พิมพ์

2.3 การชุบแข็งแบบตกตะกอน

กระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้เกิดอนุภาคเล็กๆ กระจายตัวอย่างหนาแน่นในเนื้อของอะลูมิเนียมผสม ซึ่งอนุภาคเล็กๆทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของนิวตริสโลเคชั่น (Dislocation) ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมสูงขึ้น

ขั้นตอนการชุบแข็งแบบตกตะกอนประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ

1. ขั้นตอนการอบละลาย (Solution treatment) เป็นขั้นตอนการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง (ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ) ในระยะเวลาหนึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อละลายสารละลายที่มีแมกนีเซียมและทองแดงเป็นส่วนประกอบ และละลายหรือเปลี่ยนรูปร่างของผลึกซิติคอน
2. ขั้นตอนการจุ่มชุบ (Quenching) อะลูมิเนียมผสมจะถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วมาที่อุณหภูมิห้องผ่านตัวกลาง ส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมอยู่ในสถานะของแข็งอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด (Supersaturated solid solution)
3. ขั้นตอนการบ่ม (Ageing) เป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของผลึกอย่างสม่ำเสมอโดยใช้ความร้อนต่ำ (20 – 220 องศาเซลเซียส) เพื่อให้สารละลายของแข็งที่อิ่มตัวอย่างยิ่งยวดเกิดการแยกตัวของผลึก ซึ่งมีลักษณะเป็นกลุ่มของอนุภาคที่ตกตะกอนเล็ก ๆ (Small Precipitate Cluster) กระจายตัวทั่วไปในเนื้ออะลูมิเนียมขึ้นอยู่ กับเวลาและหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม โดยขนาดของผลึกส่งผลต่ออัตราการเพิ่มความแข็งแรงหรือคุณสมบัติทางกลที่ต่างกัน ดังรูปที่ 1.11 กระบวนการบ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ การบ่มโดยใช้อุณหภูมิห้อง (Natural ageing) และการบ่มโดยใช้ อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องเรียกว่า การบ่มเทียม (Artificial ageing)

2.3.1 ขั้นตอนการเกิดอนุภาคของการชุบแข็งแบบตกตะกอน

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนมีการเปลี่ยนแปลงดังคือ หลังจากอะลูมิเนียมผสมผ่านกระบวนการขึ้นรูป และกระบวนการอบละลาย สารละลายที่ประกอบไปด้วยแมกนีเซียมและซิติคอนจะถูกละลายเข้าไป

ยังอะลูมิเนียมผสม เมื่อถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในกระบวนการจุ่มชุบจะส่งผลให้อะลูมิเนียมอยู่ในสถานะสารละลายของแข็งอิมตัวอย่างยิ่งยวด ซึ่งในสถานะนี้อะลูมิเนียมผสมจะมีพลังงานสูงมาก ทำให้อะลูมิเนียมผสมพยายามเปลี่ยนแปลงสถานะจากสารละลายอิมตัวอย่างยิ่งยวดไปยังเฟสที่ต่ำกว่าคือ metastable phase หรือเฟสสมดุล (Equilibrium phases)

เมื่ออะลูมิเนียมผสมที่อยู่ในสถานะที่มีพลังงานสูงถูกบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ(พลังงานต่ำ) ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของอะตอม ซึ่งเรียกสถานะนี้ว่า GP zone และเมื่อให้พลังงานต่ำต่อไปส่งผลให้อะลูมิเนียมผสมได้รับพลังงานที่มากพอทำให้โครงสร้าง GP zone เกิดการขยายตัวที่ใหญ่ขึ้นและเริ่มเกิดเฟสที่มีความสมดุลมากยิ่งขึ้น

2.3.2 เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน

เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอนสามารถแบ่งออกได้หลากหลายเทคนิคโดยใช้สัญลักษณ์ “T” ในการเรียกเทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอนในแต่ละเทคนิค ดังนี้

T1 คือ ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวจากอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว (อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน) โดยอาศัยตัวกลางต่างๆ เช่น น้ำ น้ำแข็งหรือน้ำมัน และบ่มเพื่อเพิ่มความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง (Natural ageing) ดังรูปที่ 2.13

T2 คือ ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวจากอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว (อุณหภูมิที่ใช้เปลี่ยนรูปร่างอะลูมิเนียม) หลังจากนั้นนำชิ้นงานผ่านขั้นตอน Cold worked และ Natural aging

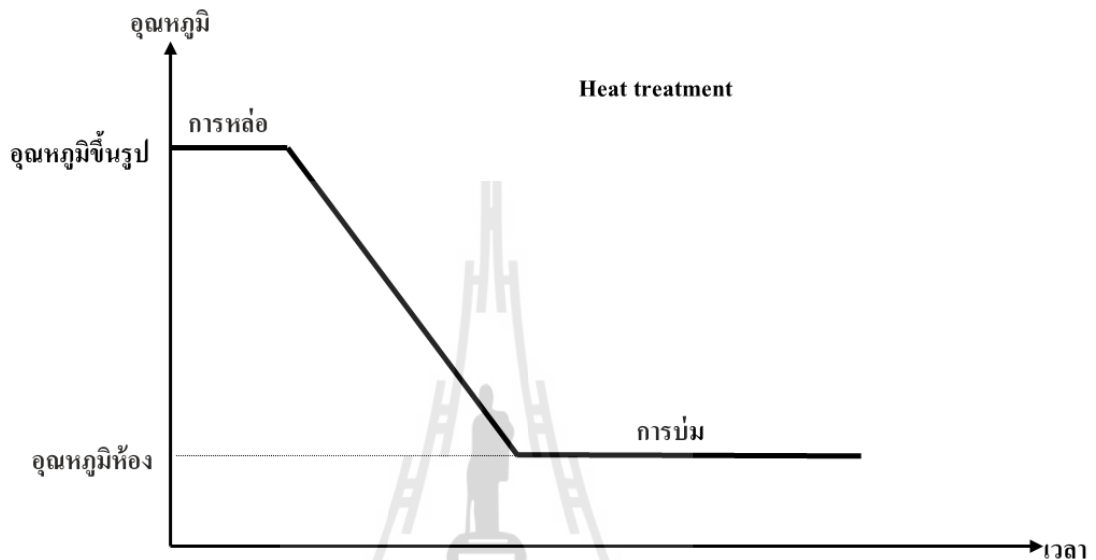
T3 คือ ให้ความร้อนกับอะลูมิเนียมผสมในขั้นตอนการอบละลาย หลังจากนั้นนำชิ้นงานผ่านขั้นตอน Cold worked และ Natural aging

T4 คือ หลังจากขั้นตอนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสม ปล่อยให้เย็นตัวจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง (ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมละลาย) ในระยะเวลาหนึ่งในขั้นตอนการอบละลาย และทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (การจุ่มชุบ) จนชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเพิ่มความแข็งตามธรรมชาติ (ที่อุณหภูมิห้อง) ดังรูปที่ 2.14

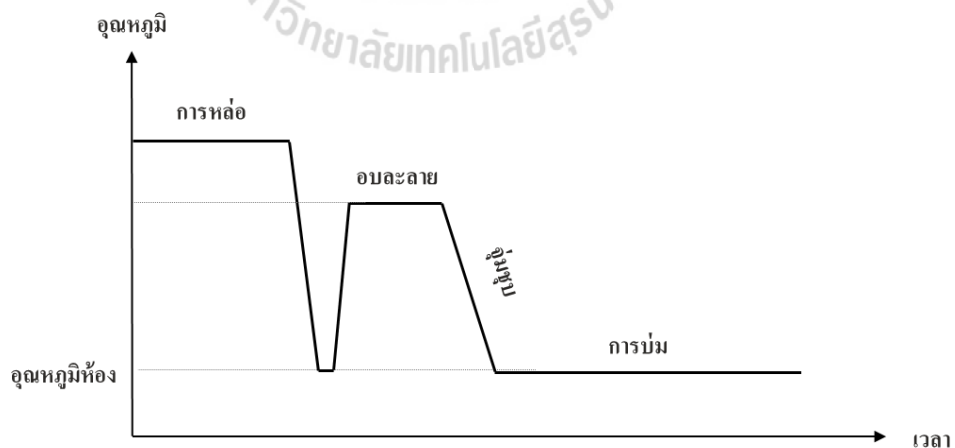
T5 คือ ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวที่อุณหภูมิสูง (อุณหภูมิที่ใช้เปลี่ยนรูปร่างอะลูมิเนียมผสม) และให้ความร้อนต่ำกับอะลูมิเนียมในขั้นตอนการบ่มเทียม (Artificial aging)

T6 คือ หลังจากขั้นตอนการขึ้นรูปอะลูมิเนียมผสม ปล่อยให้เย็นตัวจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นให้ความร้อนกับชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง (ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอม

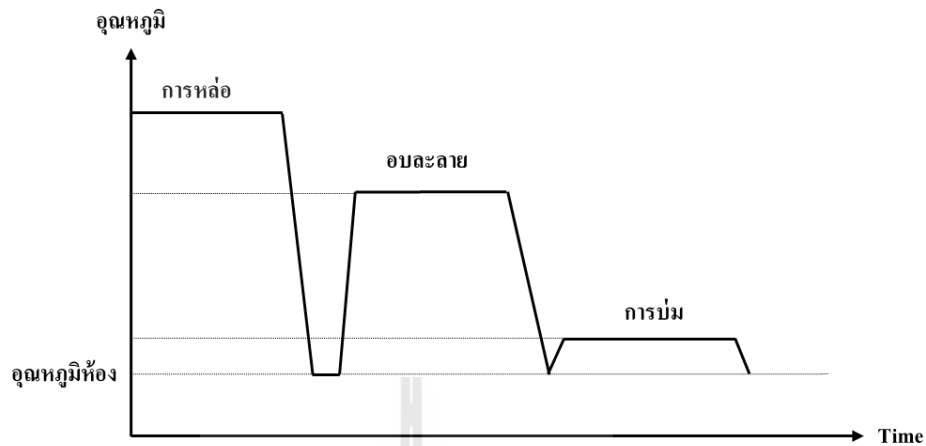
ละลาย) ในระยะเวลาหนึ่งในขั้นตอนการอบละลาย และทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (การจุ่ม
 ชุบ) จนชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นให้ความร้อนต่ำกับชิ้นงานทันทีหลังจาก
 ชิ้นงานเย็นตัวในขั้นตอนการบ่มเทียม (ประมาณ 150 – 220 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยเทคนิค T1



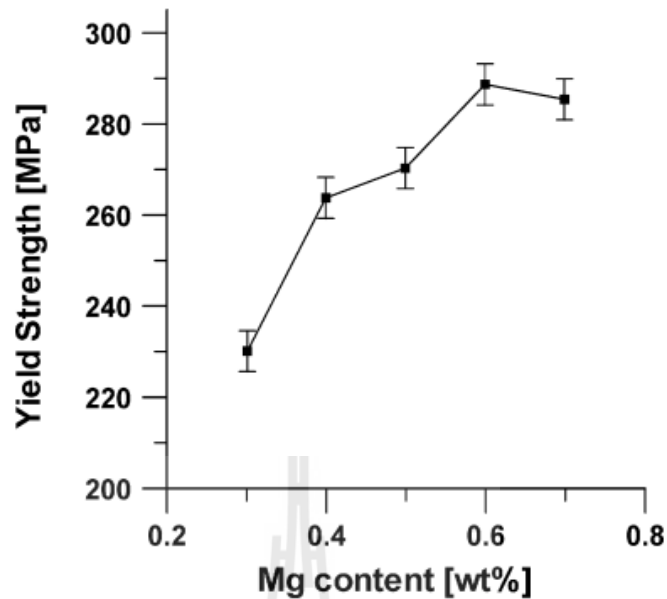
รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยเทคนิค T4



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยเทคนิค T5

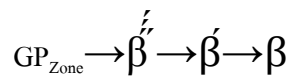
2.4 ทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาการเพิ่มคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานโดยการอบชุบนั้นมีการศึกษามาอย่างยาวนาน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอิทธิพลของการอบชุบขึ้นอยู่กับ วัสดุประกอบต่างๆของวัสดุและกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน อะลูมิเนียมเกรด A356 เป็นอะลูมิเนียมหล่อผสมที่มีธาตุประกอบหลัก คือ อะลูมิเนียม ซิลิกอนและแมกนีเซียม โดยที่ซิลิกอนและแมกนีเซียมเป็นธาตุที่สำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานจากการอบชุบเนื่องจากในขั้นตอนการเอจิงแมกนีเซียมและซิลิกอนจะรวมตัวกันกลายเป็น Mg_2Si ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอย่างชัดเจน (Apelian, Shivkumar, & Sigworth, 1989) ขณะที่ (J. Taylor, St John, Barresi, & Couper, 2000) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของแมกนีเซียมที่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูงขึ้นเมื่อแมกนีเซียมมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจนถึงประมาณ 0.5wt% ดังรูปที่ 2.16 ความแข็งแรงจะมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อแมกนีเซียมมีค่าสูงมากจะไปรวมตัวกับเหล็กส่งผลให้ชิ้นงานมีคุณสมบัติทางกลลดลง



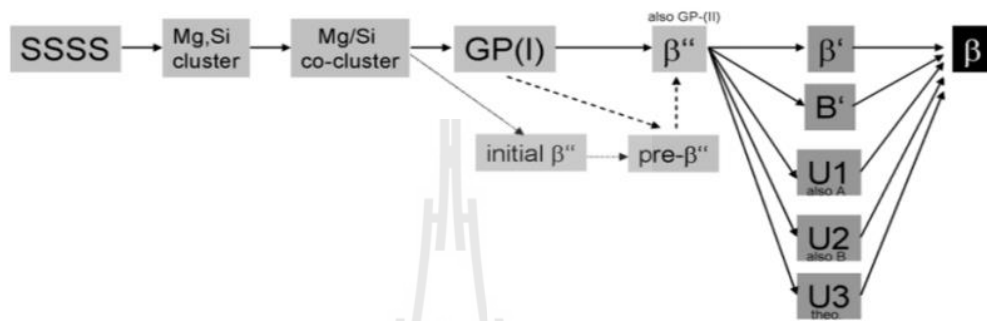
รูปที่ 2.16 แสดงความแข็งแรงดึงเปรียบเทียบกับจำนวนแมกนีเซียม
{Apelian, 1989 #1024}

นอกจากการศึกษาอิทธิพลของธาตุต่างๆที่ส่งผลต่อความแข็งแรงแล้วแต่ไม่ได้มีการศึกษาขั้นตอนการตกผลึกของ Mg_2Si คือ (Shivkumar, Keller, & Apelian, 1990) ศึกษาขั้นตอนการเกิดผลึก Mg_2Si เป็นดังนี้



โดยเริ่มต้นธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมจะเริ่มรวมตัวกันเป็นผลึกมีลักษณะทรงกลม เรียกว่า GP_{Zone} ต่อมาผลึกจะขยายตัวเป็นแขนออกมาเพื่อยึดติดกับผลึกที่อยู่ข้างๆกัน เรียกว่า β'' หลังจากนั้นแขนที่ใช้ยึดติดผลึกเข้าด้วยกันจะเริ่มขยายใหญ่ขึ้นขึ้นเรียกว่า β สุดท้ายแขนขยายใหญ่จนกลายเป็นแผ่นเรียกว่า β ซึ่งเป็นผลึกที่มีความเสถียร (Apelian et al., 1989) ศึกษาพฤติกรรมของการอบอ่อนและพบว่าผลึกที่ราบเรียบของ $\beta-Mg_2Si$ จะส่งผลในการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลอย่างมาก รูปร่างของผลึก $\beta-Mg_2Si$ นั้นขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและเวลาของการอบอ่อน และได้สรุปขั้นตอนการตกผลึกของ Mg_2Si ขึ้นมาใหม่เป็นดังรูปที่ 2.17

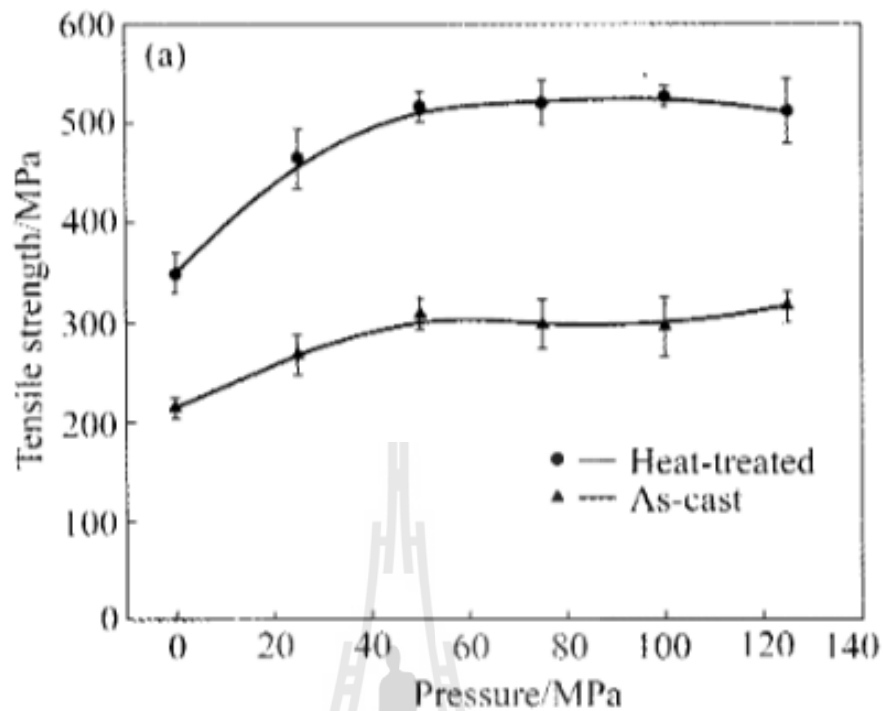
ขณะที่การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่ออัดนั้นมีความคู่ไปกับการพัฒนากรรมวิธีการหล่ออัด งานวิจัยที่ศึกษากระบวนการหล่อสามารถแบ่งแบ่งเป็น 1. ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยของการหล่อที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกล 2. ศึกษากรรมวิธีการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่ออัด



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนการตกผลึกของแมกนีเซียมและซิลิกอนในกระบวนการบ่ม (Apelian et al., 1989)

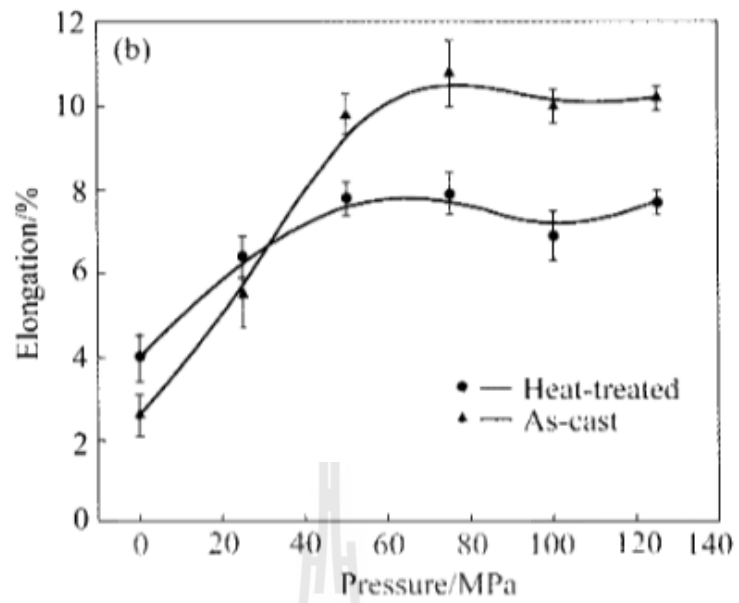
การศึกษาปัจจัยของการหล่ออัดที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกล ขึ้นอยู่กับวัสดุและประเภทของการหล่ออัดที่ใช้ Wenfei Mo และคณะศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการหล่อที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยใช้วัสดุ Mg-12Zn-4Al-0.5Ca อัลลอย พบว่าเมื่อใช้แรงดันจะส่งผลกระทบต่อรูปร่างของโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลอย่างมีนัยสำคัญ คือ เมื่อเพิ่มแรงดันในการหล่อ ชิ้นงานมีโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และยังพบว่า อุณหภูมิเท(Pouring temperature) ของอะลูมิเนียมเหลวที่ใช้ในการหล่อจะส่งผลกระทบต่อรูปร่างและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน เช่นเดียวกัน คือ อุณหภูมิเทต่ำ ส่งผลให้ชิ้นงานมีโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่าใช้อุณหภูมิเทสูง(Mo et al., 2014)

การศึกษการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการหล่ออัดนั้นมีการศึกษาอย่างมากมาย ซึ่งกรรมวิธีที่ใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่ออัด คือการอบชุบ โดยที่อิทธิพลของการอบชุบ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการหล่ออัดและประเภทของวัสดุที่ใช้ในการหล่ออัด (Zhang, 2007) ได้ศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอะลูมิเนียม



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบความทนต่อแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบและไม่ผ่าน ณ แรงดันในการหล่อค่าต่างๆ (Zhang, Zhang, Zhao, Zhang, & Li, 2007)

(Zhu, 2012) พบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบชุบเพิ่มความต้านทานแรงดึงสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบแต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบชุบ เมื่อใช้แรงดันในการหล่อกว่า 20 เมกะปาสกาล



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบและไม่ผ่าน ณ แรงดันค่าต่างๆ (Zhang et al., 2007)

บทที่ 3

การดำเนินการทดลอง

บทนี้นำเสนอการทดลองซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง การเตรียมชิ้นงานทดลองและการออกแบบทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ขั้นตอนการทดสอบขั้นต้น และการทดสอบชุบแข็งชิ้นงาน

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง

1. เครื่องฉีดอะลูมิเนียมของบริษัท Toshiba Machine ขนาด 350 ตัน รูปที่ 3.1
2. เลื่อยสายพานรูปที่ 3.2
3. อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ธาตุประกอบของอะลูมิเนียมผสมดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ธาตุประกอบของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในการทดลอง

| ธาตุประกอบ(wt.%) | ซิลิกอน | แมกนีเซียม | ทองแดง | เหล็ก | Sr | Ti | อะลูมิเนียม |
|------------------|---------|------------|--------|-------|------|------|-------------|
| A356 | 8.60 | 0.51 | 0.01 | 0.10 | 0.35 | 0.07 | balance |

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความแข็ง

1. เครื่องเลื่อยสายพาน รูปที่ 3.2
2. เครื่องตัดชิ้นงาน รูปที่ 3.3
3. เครื่องขัดผิวชิ้นงาน รูปที่ 3.4
4. ทรายทรายเบอร์ 600
5. เครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล (Rockwell hardness) รูปที่ 3.5
6. ตู้ควบคุมอุณหภูมิรูปที่ 3.6 สำหรับควบคุมอุณหภูมิในขั้นตอนการอบอ่อน

7. เตาสําหรับขั้นตอนการอบละลาย รูปที่ 3.7
8. เตาสําหรับขั้นตอนการอบอ่อน รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.2 เครื่องเลื่อยสายพาน



รูปที่ 3.3 เครื่องตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบร็อคเวล



รูปที่ 3.6 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.7 เตาขดลวดสำหรับขั้นตอนการอบละลาย



รูปที่ 3.8 เตาขดลวดสำหรับขั้นตอนการอบอ่อน

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความแข็งแรง

1. เครื่องเลื่อยสายพาน รูปที่ 3.2
2. เครื่องทดสอบความแข็งแรง
3. ผู้ควบคุมอุณหภูมิรูปที่ 3.6 สำหรับควบคุมอุณหภูมิในขั้นตอนการอบอ่อน
4. เตาสำหรับขั้นตอนการอบละลาย รูปที่ 3.7
5. เตาสำหรับขั้นตอนการอบอ่อน รูปที่ 3.8

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

1. เครื่องเลื่อยสายพาน
2. เครื่องตัด
3. เตาสำหรับขั้นตอนการอบละลาย รูปที่ 3.8
4. เครื่องขัดผิวชิ้นงาน
5. กระดาษทรายเบอร์ 600, 1200, 1800, 2,400, และ 4,000
6. ผ้าสักหลาด
7. ฟองลูมิน่าขนาด 6 ไมครอนและ 1 ไมครอน
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
10. เครื่องเป่าลม

3.2 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบขั้นต้น

ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง เริ่มจากการหล่อชิ้นงานทดสอบและการเตรียมชิ้นงานทดสอบเพื่อให้มีความเหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติเชิงกล

3.2.1 การหล่อชิ้นงานทดสอบ

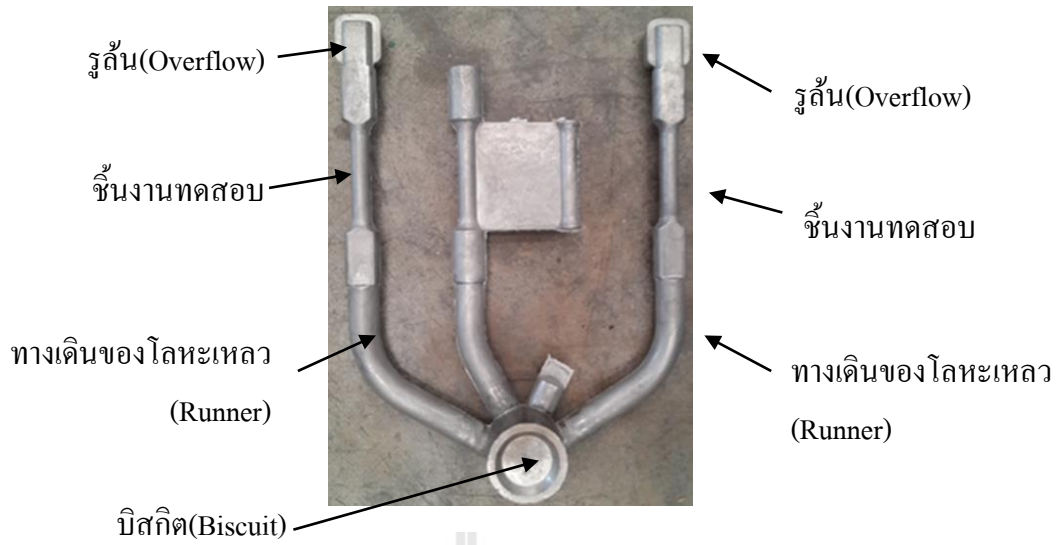
ในการหล่อชิ้นงานทดสอบชิ้นงานทดสอบใช้เครื่องฉีดอะลูมิเนียมดังรูปที่ 3.1 ในการหล่ออัดชิ้นงานทดลองและใช้แม่พิมพ์ที่มี 2 โพรงแม่พิมพ์ (Die cavity) คือในกระบวนการหล่อ

1 ครั้งจะได้ชิ้นงานทดสอบ 2 ชิ้นและออกแบบรูปร่างชิ้นงานทดสอบเป็นรูปกระดูกเพื่อใช้สำหรับการทดสอบแรงดึง มีขั้นตอนการหล่ออัดดังนี้

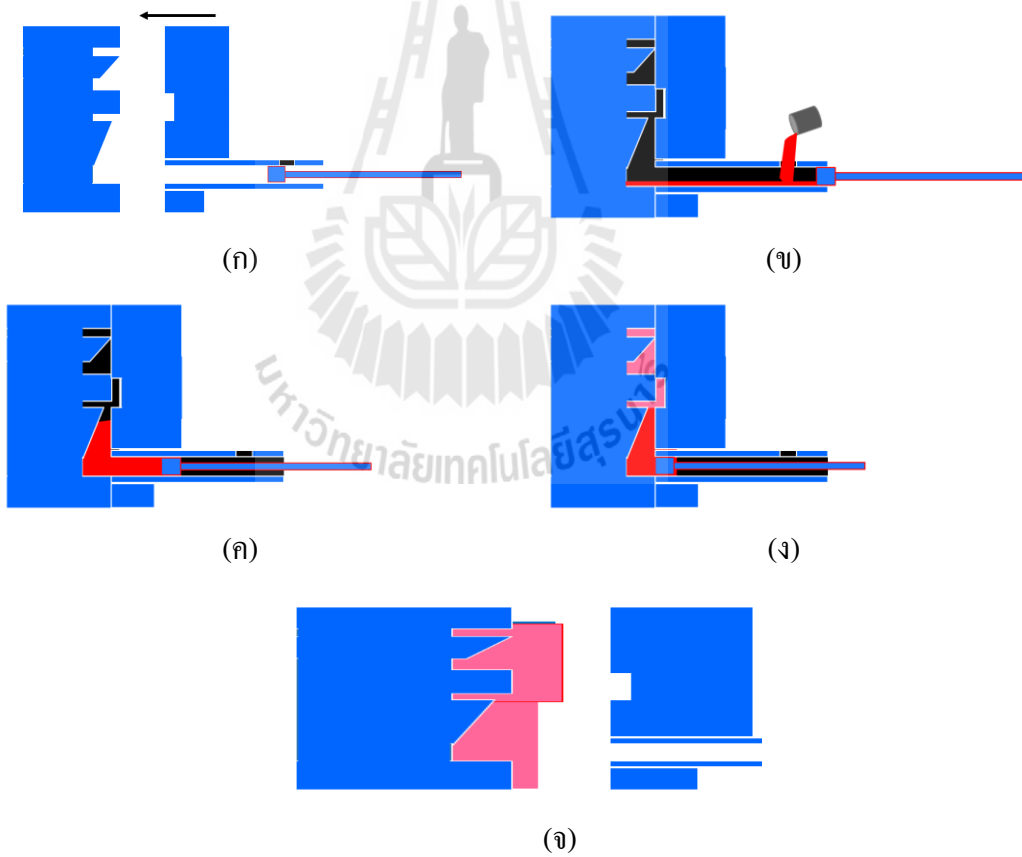
1. แม่พิมพ์ทั้งสองฝั่งเลื่อนเข้าหากัน รูปที่ 3.10(ก)
2. ระบายตักโลหะเหลวเตาหลอมและเทโลหะเหลวไปยังทางเดินของแม่พิมพ์ รูปที่ 3.10(ข)
3. ระบายกสูบดันโลหะเหลวเข้าไปยังโพรงแม่พิมพ์ รูปที่ 3.10(ค)
4. ใช้แรงดันสูงอัดแม่พิมพ์ในช่วงชิ้นงานกำลังเย็นตัว(หลังจากชิ้นงานเติมเต็มแม่พิมพ์เสร็จสิ้น) รูปที่ 3.10(ง)
5. แม่พิมพ์ทั้งสองเปิดออก และนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
6. รูปที่ รูปที่ 3.10(จ) รูปร่างของชิ้นงานหล่อหลังจากผ่านกระบวนการหล่ออัด แสดงรูปที่ 3.9

3.2.2 สภาวะการหล่ออัด

ก่อนการทดลองได้ศึกษาสภาวะที่ใช้ในการหล่ออัดชิ้นงานสำหรับการทดลองที่สามารถหล่อชิ้นงานทดสอบโดยไม่พบปัญหาของเสียเนื่องจากการหล่อดังเช่นรูปที่ 2.11 ซึ่งปัญหาของเสียเนื่องจากการทดลองจะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานและในการทดลองใช้เครื่องฉีดอะลูมิเนียมในการหล่ออัดชิ้นรูปชิ้นงานทดสอบดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.2.1.1 ดังนั้นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ในการขึ้นรูปชิ้นงานประกอบไปด้วย 4 ตัวแปร คือ ความเร็วต่ำสุด (Low Speed) แรงดัน อุณหภูมิโลหะเหลว อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ในการทดลองใช้โปรแกรมจำลองการหล่อแมกมา (Magma Soft) ในการจำลองหาค่าความเร็วของตัวแปรทั้งสองตัวแปร โดยอ้างอิงจากค่าความเร็วต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องฉีดอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองสามารถทำได้และใช้การทดลองฉีดจริงเพื่อหาสภาวะที่สามารถหล่ออัดชิ้นงานทดสอบได้โดยไม่พบปัญหาของเสีย หลังจากได้สภาวะการหล่อที่สามารถหล่ออัดโดยไม่พบปัญหาของเสีย นำชิ้นงานหล่อมาทดสอบอบชุบที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อหาสภาวะการหล่ออัดที่สามารถอบชุบแข็งชิ้นงานได้เนื่องจากสภาวะของการหล่ออัดบางสภาวะสามารถหล่อชิ้นงานโดยไม่พบปัญหาของเสียภายนอกแต่พบปัญหาฟองอากาศหลังจากนำชิ้นงานไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 2.12 ดังนั้นสภาวะที่ใช้ในการหล่ออัดชิ้นงานทดสอบโดยไม่พบปัญหาของเสียและสามารถอบชุบชิ้นงานโดยไม่พบปัญหาเกี่ยวกับฟองอากาศหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานหล่อทดสอบ



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการหล่ออัดชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

| | |
|---------------------|-----------------|
| อุณหภูมิโลหะเหลว | 720 °C |
| อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น | 260 °C |
| ความเร็วกระบอบกสูบ | 0.1 เมตร/วินาที |
| แรงดัน | 130 เมกกะปาสกาล |

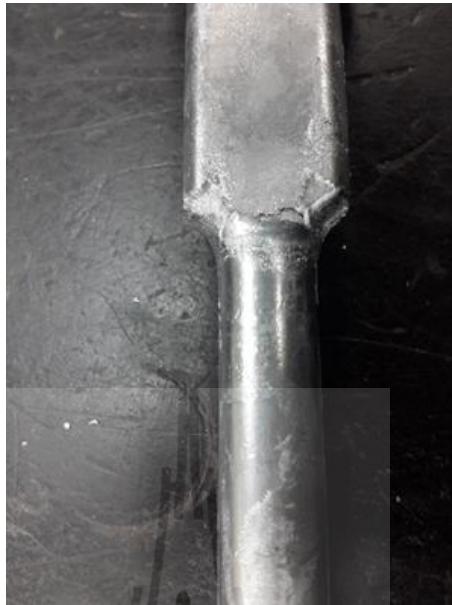
3.2.3 การทดสอบเบื้องต้นก่อนการดำเนินการทดลอง

ก่อนการดำเนินการกำหนดแผนการทดลองได้ทดสอบเบื้องต้นก่อนการทดลองเพื่อศึกษาความแตกต่างที่ของชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอน ความแตกต่างระหว่างโพรงของแม่พิมพ์และความแตกต่างภายในชิ้นงาน พบว่าจากผลการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานระหว่างการหล่อหรือความแตกต่างภายในชิ้นงานและความแตกต่างระหว่างโพรงของแม่พิมพ์ ไม่มีการแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงใน ภาคผนวก ก ข และ ค

3.3 การออกแบบการทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

จากการทดสอบเบื้องต้นหัวข้อ 3.2.2 พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปในกระบวนการหล่ออัดแต่ละครั้งมีคุณสมบัติเชิงกลที่เท่ากันและไม่พบความแตกต่างภายในชิ้นงานดังนั้นในการทดลองจึงไม่จำเป็นต้องมีการทดลองซ้ำ จึงกำหนดให้ชิ้นงานทดสอบจากการหล่อ 1 ครั้ง (ชิ้นงานทดสอบจากโพรงแม่พิมพ์ซ้ายและขวา) เป็นตัวแทนค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบชิ้นงานทดสอบ 1 เป็นตัวแทนของค่าความแข็งในการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการอบชุบชิ้นงานที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานคือ ค่าความแข็ง ค่าความแข็งแรงและโครงสร้างภายในของชิ้นงาน ซึ่งในการทดลองจะใช้เทคนิคการอบชุบชิ้นงาน 3 ชนิดคือ

1. เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T1
2. เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T4
3. เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T6



รูปที่ 3.11 ปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในการหล่ออัด



รูปที่ 3.12 ปัญหาฟองอากาศ (Blister) ที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน

ซึ่งเทคนิคทั้งสามชนิดเป็นเทคนิคที่ง่าย เหมาะสำหรับการชุบแข็งชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อและเป็นเทคนิคที่มีข้อดีที่แตกต่างกัน คือ เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T1 เป็นเทคนิคที่ง่ายและใช้พลังงานต่ำแต่เป็นเทคนิคที่ให้ค่าคุณสมบัติทางกลโดยรวมต่ำ ขณะที่เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T4 เป็นเทคนิคที่ง่ายและให้คุณสมบัติทางกลดีที่กว่า T1 แต่ใช้พลังงานมากกว่า T1 เนื่องจากขั้นตอนการอบละลาย และเทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T6 เป็นเทคนิคที่ให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลสูงสุดแต่มีขั้นตอนการชุบแข็งที่ซับซ้อนและใช้พลังงานสูงเนื่องจากประกอบไปด้วยขั้นตอนการอบละลายและการบ่มเทียบ

ซึ่งเทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอนทั้งสามเทคนิคต่างประกอบไปด้วยขั้นตอนการชุบแข็งที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาได้ ดังนี้

1. อุณหภูมิอบละลาย (Solution treatment temperature)
2. เวลาอบละลาย (Solution treatment time)
3. อุณหภูมิอบอ่อน (Ageing treatment temperature)
4. เวลาการอบอ่อน (Ageing treatment time)
5. อัตราการเย็นตัว (Cooling rate)

3.3.1 การทดสอบค่าความแข็ง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบค่าความแข็งของเทคนิคการอบชุบ T1 T4 และ T6 สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองได้ดังตาราง 3.3

3.3.2 เทคนิคการอบชุบแบบ T1

3.3.2.1 ระดับของอุณหภูมิอบละลาย (Solution treatment temperature) ของเทคนิคการชุบแข็งแบบ T1

เนื่องจากกรรมวิธีการอบชุบแบบ T1 ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบละลาย ดังนั้นไม่ต้องกำหนดปัจจัยสำหรับอุณหภูมิการอบละลาย

3.3.2.2 ระดับเวลาการอบละลาย (Solution treatment time)

เนื่องจากกรรมวิธีการอบชุบแบบ T1 ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบละลายทำให้ไม่ต้องกำหนดปัจจัยสำหรับเวลาอบละลาย

3.3.2.3 อุณหภูมิการอบอ่อน (Ageing temperature) ของเทคนิคการอบชุบแบบ T1

กรรมวิธีการอบชุบแบบ T1 ในขั้นตอนการอบอ่อนเป็นการอบชุบแข็งชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นกำหนดปัจจัยของอุณหภูมิต่ำสำหรับการเทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T1 คือ 25°C

3.3.2.4 ระดับเวลาการอบอ่อน (Ageing time)

กำหนดระดับเวลาในขั้นตอนการอบอ่อนของการชุบแข็งแบบตกตะกอนเทคนิค T1 ดังตารางที่ 3.4

3.3.3 เทคนิคการอบชุบแบบ T4

เทคนิคการอบชุบแบบ T4 คือ นำชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการอบละลายเพื่อละลายโครงสร้างซิริคอนและแมกนีเซียมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการหล่อ หลังจากนั้นนำมาเย็นตัวอย่างรวดเร็วและปล่อยให้ชิ้นงานเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง

3.3.3.1 ระดับของอุณหภูมิอบละลาย (Solution treatment temperature) ของเทคนิคการชุบแข็งแบบ T4

กรรมวิธีการอบละลายแบบการชุบแข็งแบบ T4 คือการให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือ ละลายแมกนีเซียมและซิริคอน โดยกำหนดอุณหภูมิการอบละลายสำหรับการทดสอบโดยเทคนิค T4 ดังตารางที่ 3.5

3.3.3.2 ระดับเวลาการอบละลาย (Solution treatment time)

ระดับเวลาการอบละลายของเทคนิคการอบชุบแบบ T4 ใช้ระดับเวลาการอบละลายดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบค่าความแข็ง

| เทคนิคการ ชุบแข็ง แบบ ตกตะกอน | การชุบ แข็ง | อบละลาย | | อุณหภูมิการบ่ม | | จำนวนจุดที่ใช้ ในการวัดค่า ความแข็ง |
|--|----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|---|
| | | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (ชั่วโมง) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา | |
| T1 | อากาศ | - | - | 25 | 0 – 2 เดือน | 10 |
| | น้ำ | - | - | 25 | 0 – 2 เดือน | 10 |
| T4 | น้ำ | 490 | 2.5 | 25 | 0 – 2 เดือน | 10 |
| | น้ำ | 510 | 2.5 | 25 | 0 – 2 เดือน | 10 |
| | น้ำ | 530 | 1 | 25 | 0 – 2 เดือน | 10 |
| | น้ำ | 530 | 2 | 25 | 0 – 2 เดือน | 10 |
| | น้ำ | 530 | 8 | 25 | 0 – 2 เดือน | 10 |
| T6 | อากาศ | 490 | 2.5 | 180 | 0 – 64 ชั่วโมง | 10 |
| | อากาศ | 510 | 2.5 | 180 | 0 – 64 ชั่วโมง | 10 |
| | อากาศ | 530 | 1 | 180 | 0 – 64 ชั่วโมง | 10 |
| | อากาศ | 530 | 2 | 180 | 0 – 64 ชั่วโมง | 10 |
| | อากาศ | 530 | 8 | 180 | 0 – 64 ชั่วโมง | 10 |

ตารางที่ 3.4 เวลาการอบอุ่นของการชุบแข็งแบบตกตะกอน T1 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| เวลาการวัดความแข็งของอุณหภูมิ T1 | |
|----------------------------------|-----------|
| 0 ชั่วโมง | 1 วัน |
| 0.5 ชั่วโมง | 2 วัน |
| 1 ชั่วโมง | 5 วัน |
| 2 ชั่วโมง | 1 สัปดาห์ |
| 4 ชั่วโมง | 2 สัปดาห์ |
| 8 ชั่วโมง | 1 เดือน |
| 16 ชั่วโมง | 2 เดือน |

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| ระดับของอุณหภูมิอบละลายสำหรับการทดลอง T4 |
|--|
| 530 °c |
| 510 °c |
| 490 °c |

ตารางที่ 3.6 เวลาอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| ระดับเวลาของอุณหภูมิอบละลายสำหรับการทดลอง T4 |
|--|
| 1 ชั่วโมง |
| 2.5 ชั่วโมง |
| 8 ชั่วโมง |

3.3.3.3 อุณหภูมิการอบอุ่น (Ageing temperature) ของเทคนิคการอบชุบแบบ

T4

กรรมวิธีการอบชุบแบบ T1 ในขั้นตอนการอบอ่อนเป็นการอบชุบแข็งชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นกำหนดปัจจัยของอุณหภูมิอบอ่อนสำหรับการเทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T1 คือ 25°C

3.3.3.4 ระดับเวลาการอบอ่อน(Ageing time)

กำหนดระดับเวลาในขั้นตอนการอบอ่อนของการชุบแข็งแบบตกตะกอนเทคนิค T4 ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 เวลาการวัดความแข็งของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| เวลาการวัดความแข็งของอุณหภูมิ T4 | |
|----------------------------------|-----------|
| 0 ชั่วโมง | 1 วัน |
| 0.5 ชั่วโมง | 2 วัน |
| 1 ชั่วโมง | 5 วัน |
| 2 ชั่วโมง | 1 สัปดาห์ |
| 4 ชั่วโมง | 2 สัปดาห์ |
| 8 ชั่วโมง | 1 เดือน |

3.3.4 เทคนิคการอบชุบแบบ T6

3.3.4.1 ระดับของอุณหภูมิอบละลาย (Solution treatment temperature) ของเทคนิคการชุบแข็งแบบ T6

กรรมวิธีการอบละลายแบบการชุบแข็งแบบ T6 คือการให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือ ละลายแมกนีเซียมและซิลิกอน โดยกำหนดอุณหภูมิการอบละลายสำหรับการทดสอบโดยเทคนิค T6 ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 อุณหภูมิอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| ระดับของอุณหภูมิอบละลายสำหรับการทดลอง T6 |
|--|
| 530 °c |

| |
|--------|
| 510 °c |
| 490 °c |

3.3.4.2 ระดับเวลาการอบละลาย (Solution treatment time) ของเทคนิคการชุบแข็งแบบ T6

ระดับเวลาการอบละลายของเทคนิคการอบชุบแบบ T6 ใช้ระดับเวลาการอบละลายดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 แสดงเวลาอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| ระดับเวลาของอุณหภูมิอบละลายสำหรับการทดลอง T6 |
|--|
| 1 ชั่วโมง |
| 2.5 ชั่วโมง |
| 8 ชั่วโมง |

3.3.4.3 อุณหภูมิการอบอ่อน (Ageing temperature) ของเทคนิคการอบชุบแข็งแบบ T6

จากการศึกษาการอบชุบชิ้นงานโดยเทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอนพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งขึ้นในขั้นตอนการอบอ่อนอยู่ที่ 150 – 220 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองนี้เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาอิทธิพลของการชุบแข็ง จึงกำหนดให้อุณหภูมิของการชุบแข็งชิ้นงานคือ 180 องศาเซลเซียส

3.3.4.4 ระดับเวลาการอบอ่อน(Ageing time)

เวลาการอบอ่อนแบ่งเป็นเงื่อนไขของเทคนิคการอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงดังตาราง 3.10

3.4 การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

การทดสอบความแข็งแรงเป็นการนำชิ้นงานทดสอบที่เตรียม โดยขั้นตอน 3.6.2 มาอบชุบ ชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยใช้เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยเทคนิค T1 T4 และ T6 และ วัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องวัดค่าความแข็งของชิ้นงาน

ตารางที่ 3.10 แสดงเวลาอบอ่อนของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| เวลาการวัดความแข็งของอุณหภูมิ T6 | |
|----------------------------------|------------|
| 0 นาที | 120 นาที |
| 5 นาที | 240 นาที |
| 10 นาที | 360 นาที |
| 15 นาที | 480 นาที |
| 30 นาที | 960 นาที |
| 45 นาที | 1,920 นาที |
| 60 นาที | 3,840 นาที |

3.4.1 เทคนิคการอบชุบแบบ T4

ในการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานชุบแข็งแบบตกตะกอนโดยเทคนิค T4 ทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิละลาย เวลาอบละลาย และกำหนดให้อุณหภูมิอบอ่อนและเวลาอบอ่อนมีค่าคงที่ที่ 180 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

ตารางที่ 3.11 อุณหภูมิละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็งแรง

| อุณหภูมิละลายของการทดสอบความแข็งแรงดึงของเทคนิค T4 |
|--|
| 530 °c |
| 510 °c |
| 490 °c |

ตารางที่ 3.12 เวลาอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็งแรง

| |
|--|
| เวลาอบละลายของการทดสอบความแข็งแรงดึงของเทคนิค T4 |
| 1 ชั่วโมง |
| 2.5 ชั่วโมง |
| 1 ชั่วโมง |

3.4.2 เทคนิคการอบชุบแบบ T6

ในการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานชุบแข็งแบบตกตะกอน โดยเทคนิค T6 ทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายและเวลาการอบละลาย โดยกำหนดให้อุณหภูมิอบอ่อนและเวลาอบอ่อนมีค่าคงที่ที่ 180 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ตามลำดับ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ตารางที่ 3.13 อุณหภูมิอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็งแรง

| |
|--|
| อุณหภูมิอบละลายของการทดสอบความแข็งแรงดึงของเทคนิค T6 |
| 530 °c |
| 510 °c |
| 490 °c |

ตารางที่ 3.14 เวลาอบละลายของการอบชุบโดยใช้เทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็งแรง

| |
|--|
| เวลาอบละลายของการทดสอบความแข็งแรงดึงของเทคนิค T6 |
| 1 ชั่วโมง |
| 2.5 ชั่วโมง |
| 1 ชั่วโมง |

3.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน(ผลึกซิลิกอน)

ในการศึกษาโครงสร้างภายในที่ได้รับอิทธิพลมาจากการชุบแข็งแบบตกตะกอน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งมีกำลังขยายสูงสุด 200,000 เท่าทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างของซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงไปได้เท่านั้นและขั้นตอนของการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างซิลิกอนคือขั้นตอนการอบละลาย

ดังนั้นในการศึกษาโครงสร้างซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงจึงกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาเฉพาะ ขั้นตอนการอบละลายเท่านั้น โดยศึกษาอิทธิพลของระดับอุณหภูมิการอบละลายและเวลาการอบละลาย ดังแสดงในตาราง 3.15

3.6 ขั้นตอนการทดลอง

การดำเนินการทดลองเพื่อหาค่าอิทธิพลของการอบชุบแบบตกตะกอนที่ส่งผลต่อชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอน โดยค่าความแข็งและความแข็งแรงของชิ้นงานขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างซึ่งในการทดลองได้กำหนดรูปร่างการหล่ออัดเป็นรูปกระดูกเพื่อลดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างและลักษณะการไหลของชิ้นงาน และเหมาะแก่การทดสอบโดยใช้แรงดึง ซึ่งในการทดลองได้ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการอบชุบชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอน วิเคราะห์คุณสมบัติคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ดังนี้

1. ค่าความแข็ง
2. ความแข็งแรง (ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength), ค่าความต้านทานการคราก (Yield strength), เปร้อ์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation)
3. อิทธิพลของการชุบแข็งแบบตกตะกอนต่อโครงสร้างภายในของชิ้นงาน

ตารางที่ 3.15 อิทธิพลของระดับอุณหภูมิการอบละลายและเวลาการอบละลาย

| อุณหภูมิการอบละลาย | ระยะเวลาการอบละลาย |
|--------------------|--------------------|
| 490 °C | 2.5 ชั่วโมง |
| 510 °C | 2.5 ชั่วโมง |
| 530 °C | 2.5 ชั่วโมง |
| 530 °C | 1 ชั่วโมง |
| 530 °C | 8 ชั่วโมง |

3.6.1 ขั้นตอนการทดสอบความแข็ง

3.6.1.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบความแข็ง

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งใช้เครื่องทดสอบแบบร็อกเวล (Rockwell Hardness) รูปที่ 3.5 ซึ่งจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าสเกล (Scale) ที่เหมาะสมกับการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบคือ สเกล HRF ซึ่งการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งมีขั้นตอนดังนี้

1. หลังจากหล่อชิ้นงานทดสอบได้ดังรูปที่ 3.9 ใช้เลื่อยสายพานรูปที่ ตัดชิ้นงานทดสอบในส่วนช่องทางเดิน โลหะเหลว (Runner) รูล้น (Overflow) และบริเวณด้ามจับของชิ้นงานทดสอบจะได้ชิ้นงานทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการตัดด้วยเลื่อยสายพานดังรูปรูปที่ 3.13
2. นำชิ้นงานบริเวณบ่าของชิ้นงานหล่อในขั้นตอนที่ 1 รูปที่ 3.13 ตัดแบ่งเป็นเหรียญที่มีขนาด 40 มิลลิเมตรจะได้ทั้งสิ้น 15 ชิ้นดังรูปรูปที่ โดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานรูปที่ 3.3
3. ปรับแต่งผิวชิ้นงานให้มีความเรียบ โดยใช้เครื่องขัดกระดาษทรายเบอร์ 600 ดังรูปที่ 3.4 เนื่องจากการวัดความแข็งแบบร็อกเวล ผิวชิ้นงานทดสอบจะต้องมีผิวที่เรียบ จึงจะสามารถวัดค่าความแข็งได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานทดสอบความแข็งหลังจากผ่านกระบวนการตัดด้วยเลื่อยสายพาน

3.6.1.2 ขั้นตอนการวัดค่าความแข็ง

1. นำหลังจากชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบจากขั้นตอน 3.6.1.1 ไปอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งชิ้นงาน
2. วัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งแบบรีอคเวล สเกล HRF โดยกดจุดทดสอบชิ้นงานทดสอบทั้งสิ้น 7 จุดและใช้ค่าเฉลี่ย 5 จุดจากการทดสอบ 7 จุดเป็นตัวแทนของค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานแสดงในรูป รูปที่ 3.15
3. นำค่าเฉลี่ยค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจากข้อที่ 2 (จากโพรงแม่พิมพ์ฝั่งซ้ายและฝั่งขวา) มาเฉลี่ยเป็นตัวแทนค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจะถูกควบคุมเพื่อรักษาระยะห่างระหว่างตำแหน่งของจุดกด เนื่องจากการทดสอบค่าความแข็งโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแบบรีอคเวล ส่งผลให้บริเวณรอบๆตำแหน่งจุดกดมีค่าความแข็งที่สูงกว่าตำแหน่งอื่นๆและหลีกเลี่ยงตำแหน่งของวงแหวนซีลิกอนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการหล่ออะลูมิเนียม เนื่องจากลักษณะของรูปร่างและการยื่นตัวของชิ้นงานทดสอบทำให้เกิดการรวมตัวกันของโครงสร้างยูเทคติกซีลิกอนเป็นลักษณะวงแหวนดังรูปที่ 3.16 ซึ่งส่งผลให้เกิดค่าความแข็งสูงแตกต่างจากบริเวณอื่น ดังนั้นเพื่อขจัดปัญหาความคลาดเคลื่อนเนื่องจากลักษณะการวัดค่าความแข็งและตำแหน่งที่มีค่าความแข็งสูงเนื่องจากปัจจัยที่มาจากชิ้นงาน จึงกำหนดตำแหน่งการวัดค่าความแข็งดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบความแข็ง

3.6.1.3 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มความแข็งของเทคนิคการอบชุบแบบ

T1

1. หล่อชิ้นงานทดสอบโดยใช้สภาวะการหล่อ ดังตาราง 3.2
2. แบ่งชิ้นงานทดสอบออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1. เมื่อแม่พิมพ์เปิดนำชิ้นงานทดสอบเย็นตัวในน้ำอย่างรวดเร็ว ($T1_{water}$) 2. เมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แม่พิมพ์ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ ($T1_{Air}$) การทดลองนี้จะใช้ผู้ควบคุมอุณหภูมิในการเก็บชิ้นงานโดยใช้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
3. เตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบความแข็งตามขั้นตอนที่ 3.6.1.1
4. ปล่อยให้ชิ้นงานทิ้งไว้ให้เพิ่มความแข็งตามโดยธรรมชาติ โดยใช้ผู้เก็บชิ้นงานโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส
5. วัดค่าความแข็งของชิ้นงาน ตาม ขั้นตอนที่ 3.6.1.2

3.6.1.4 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มความแข็งของเทคนิคการอบชุบแบบ

T4

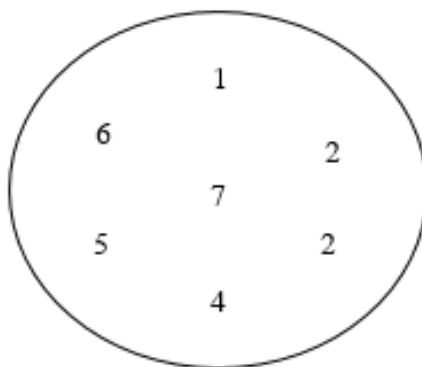
1. หล่อชิ้นงานทดสอบโดยใช้สภาวะการหล่อ ดัง ตาราง 3.2
2. หลังจากการหล่อนำชิ้นงานทดสอบไปเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง
3. เตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบความแข็งตามขั้นตอนที่ 3.6.1.1

4. ให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบในขั้นตอนการอบละลายที่อุณหภูมิ และเวลาแตกต่างกัน ดังตาราง 3.6 หลังจากนั้นนำชิ้นงานเย็นตัวอย่าง รวดเร็วโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง
5. ปล่อยชิ้นงานทิ้งไว้ให้เพิ่มความแข็งตามโดยธรรมชาติ โดยใช้ตู้เก็บ ชิ้นงาน โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส
6. วัดค่าความแข็งของชิ้นงาน ตามตาราง 3.7

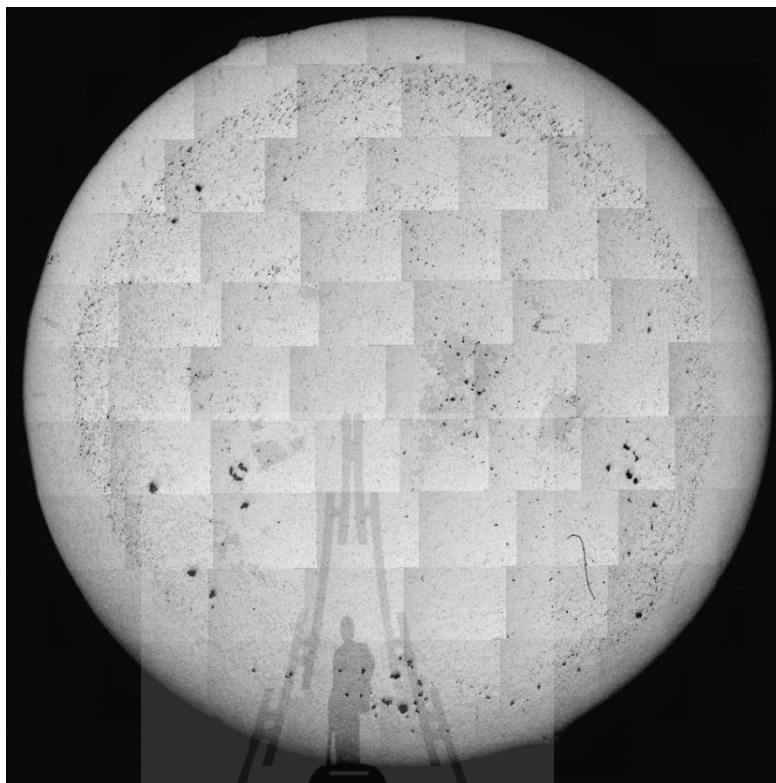
3.6.1.5 ขั้นตอนการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มความแข็งของเทคนิคการอบชุบแบบ

T6

1. หล่อชิ้นงานทดสอบโดยใช้สภาวะการหล่อ ดังตาราง 3.2
2. ปล่อยให้ชิ้นงานการหล่อเย็นตัวที่อุณหภูมิห้องหลังจากการหล่อ
3. เตรียมชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบความแข็งตามขั้นตอนที่ 3.6.1.1
4. ให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบในขั้นตอนการอบละลายที่อุณหภูมิ และเวลาแตกต่างกัน ดังตาราง 3.8 และ ตาราง 3.9 หลังจากนั้นนำ ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง
5. ให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสทันที หลังจากชิ้นงานอย่างรวดเร็วจนในขั้นตอนที่ 4
6. วัดค่าความแข็งของชิ้นงาน โดยที่ให้นำชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ ก่อนนำชิ้นงานวัดค่าความแข็งทันที ตามตาราง 3.10



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งที่ใช้ในการวัดค่าความแข็ง



รูปที่ 3.16 โครงสร้างวงแหวนซิลิกอน

3.6.2 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบความแข็งแรง

3.6.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบความแข็งแรง

1. หล่อชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 3.9
2. ใช้เลื่อยสายพานรูปที่ 3.2 ตัดบริเวณส่วของทางเดินโลหะเหลว (Runner) และรูล้น (Overflow) จะได้ชิ้นงานทดสอบเป็นรูปกระดุกดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานทดสอบรูปกระดูก

3.6.2.2 การทดสอบความแข็งแรงของเทคนิคการชุบแข็งแบบ T1

ในการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานชุบแข็งแบบตกตะกอน โดยเทคนิค T1 แบ่งชิ้นงานเป็น 2 ตัวแปรคือ ชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ ($T1_{Air}$) และชิ้นงานที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำ ($T1_{water}$) มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ชิ้นงานทดสอบผ่านการเย็นตัวในอากาศ
2. หลังจากแม่พิมพ์เปิดและนำชิ้นงานออกจากเครื่องหล่ออัด นำชิ้นงานทดสอบเย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้อง
3. เตรียมชิ้นงานทดสอบ
4. ปลดปล่อยให้ชิ้นงานทดสอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง (ใช้ผู้ควบคุมอุณหภูมิรูปที่ 3.6) ระยะเวลา 1 เดือน วัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบผ่านการเย็นตัวในน้ำ

1. หลังจากแม่พิมพ์เปิดและนำชิ้นงานออกจากเครื่องหล่ออัด นำชิ้นงานทดสอบจุ่มลงน้ำทันที
2. เตรียมชิ้นงานทดสอบ
3. ปลดปล่อยให้ชิ้นงานทดสอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง (ใช้ผู้ควบคุมอุณหภูมิรูปที่ 3.6) ระยะเวลา 1 เดือน

4. วัดขึ้นความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

3.6.2.3 การทดสอบความแข็งแรงของเทคนิคการชุบแข็งแบบ T4

1. หลังจากแม่พิมพ์เปิดนำชิ้นงานออกจากเครื่องหล่ออัด และให้เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้อง
2. เตรียมชิ้นงานทดสอบตามขั้นตอน 3.6.2 ให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลายดัง และเวลาสำหรับการอบละลายแสดงในตาราง 3.12
3. ให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังจากขั้นตอนที่ 3
4. ปลดปล่อยให้ชิ้นงานทดสอบเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง (ใช้ผู้ควบคุมอุณหภูมิรูปที่ 3.6) ระยะเวลา 2 สัปดาห์
5. วัดค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ

3.6.2.4 การทดสอบความแข็งแรงของเทคนิคการชุบแข็งแบบ T6

1. หลังจากแม่พิมพ์เปิดนำชิ้นงานออกจากเครื่องหล่ออัดและให้เย็นตัวในอากาศที่อุณหภูมิห้อง
2. เตรียมชิ้นงานทดสอบตามขั้นตอน 3.6.2.1
3. ให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลายดัง และเวลาสำหรับการอบละลายในตาราง 3.14
4. ให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำทันทีหลังจากขั้นตอนที่ 3
5. ให้ความร้อนกับชิ้นงานในขั้นตอนการอบอ่อนทันทีหลังจากขั้นตอนที่ 3 อุณหภูมิอบอ่อนเท่ากับ 180 องศาเซลเซียสที่เวลา 4 ชั่วโมง
6. ให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มน้ำทันทีหลังจากขั้นตอนที่ 5
7. วัดค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ

3.6.3 การเตรียมชิ้นงานและการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ในการทดลองนี้ใช้การวิเคราะห์โครงสร้างภายใน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope) มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบดังนี้

3.6.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสำหรับกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์

ชิ้นงานทดสอบที่ใช้สำหรับการศึกษาโครงสร้างภายในของอะลูมิเนียมผสม ของกล่องจุลทรรศน์เกรด จะต้องมีการเตรียมผิวชิ้นงานทดลองให้เรียบและเงาเพื่อให้สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาค โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. หลังจากหล่อชิ้นงานทดสอบได้ดังรูปที่ 3.9 ใช้เลื่อยสายพานรูปที่ 3.2 ตัดชิ้นงานทดสอบในส่วนของทางเดินโลหะเหลว (Runner) รูล้น (Overflow) และบริเวณด้ามจับของชิ้นงานทดสอบจะได้ชิ้นงานทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการตัดด้วยเลื่อยสายพานดังรูปที่ 3.13
2. นำชิ้นงานบริเวณบ่าของชิ้นงานหล่อในขั้นตอนที่ 1 รูปที่ 3.13 ตัดแบ่งเป็นเหรียญที่มีขนาด 40 มิลลิเมตรจะได้ทั้งสิ้น 15 ชิ้นดังรูปรูปที่ โดยใช้เครื่องตัดชิ้นงานรูปที่ 3.3
3. นำชิ้นงานผ่านกระบวนการชุบแข็ง
4. หลังจากกระบวนการชุบแข็ง ขัดชิ้นงานทดสอบในขั้นตอนการขัดหยาบ ด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงานรูปที่ 3.4 (Hand Grinding) ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 1,200 1,800 2,400 และ 4,000 ตามลำดับ โดยมีน้ำไหลผ่านบริเวณหน้าชิ้นงานและกระดาษทรายตลอดเวลา จนกระทั่งผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ
5. ขัดชิ้นงานด้วยผ้าสักหลาดในขั้นตอนการขัดมัน (Polishing) และใช้ผงขัดอะลูมิเนียมขนาด 6 ไมครอนและ 1 ไมครอน ตามลำดับจนผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอและเกิดเงา
6. นำชิ้นงานที่ขัดด้วยผ้าสักหลาดล้างด้วยแอลกอฮอล์และใช้เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลม
7. นำชิ้นงานทดสอบตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์

3.6.3.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับกล่องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด

การศึกษาโครงสร้างภายในของอะลูมิเนียมผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะต้องมีการเตรียมผิวชิ้นงานทดลองให้เรียบและเงาเพื่อให้สามารถมองเห็นโครงสร้างจุลภาค โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ขัดชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบ ในขั้นตอนการขัดหยาบ (Hand Grinding) ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 1,200 1,800 2,400 และ 4,000 ตามลำดับ โดยมีน้ำไหลผ่านบริเวณหน้าชิ้นงานและกระดาษทรายตลอดเวลา จนกระทั่งผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ
2. ขัดชิ้นงานด้วยผ้าสักหลาดในขั้นตอนการขัดมัน (Polishing) และใช้ผงขัดอลูมินาขนาด 6 ไมครอน และ 1 ไมครอน ตามลำดับจนผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอและเกิดเงา
3. กัดกรด (Etching) หลังจากผ่านกระบวนการขัดผิวมัน โดยใช้เวลา 15 นาที
4. ล้างชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการกัดกรด ด้วยแฮลกอฮอล์และน้ำเปล่า แล้วใช้เครื่องเป่าลมเป่าชิ้นงานทดสอบให้แห้ง
5. นำชิ้นงานทดสอบตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7 สรุปขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การทดลองความเพิ่มความแข็งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อโดยเทคนิคการชุบแข็งแบบ T1 T4 และ T6 โดยมีความคุมตัวแปรสำหรับการอบชุบ คือ อุณหภูมิอบละลาย เวลาอบละลาย อุณหภูมิอบอ่อนและเวลาอบอ่อน โดยตัวแปรที่ใช้ควบคุมต่างๆขึ้นอยู่กับขั้นตอนการอบชุบของเทคนิคการชุบแข็ง โดยสามารถสรุปดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.16 ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T1 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T1 | | | | |
|--|-------------|-------------------|---------------|-----------|
| อุณหภูมิการอบละลาย | เวลาอบละลาย | อุณหภูมิการอบอ่อน | เวลาการอบอ่อน | |
| - | - | 25 °c | 0 ชั่วโมง | 1 วัน |
| | | | 0.5 ชั่วโมง | 2 วัน |
| | | | 1 ชั่วโมง | 5 วัน |
| | | | 2 ชั่วโมง | 1 สัปดาห์ |
| | | | 4 ชั่วโมง | 2 สัปดาห์ |
| | | | 8 ชั่วโมง | 1 เดือน |
| | | | 16 ชั่วโมง | 2 เดือน |

ตารางที่ 3.17 ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T4 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T4 | | | | |
|--|---------------------------------------|-------------------|---------------|-----------|
| อุณหภูมิการอบละลาย | เวลาอบละลาย | อุณหภูมิการอบอ่อน | เวลาการอบอ่อน | |
| 490 °c 510 °c 530 °c | 1 ชั่วโมง 2.5 ชั่วโมง 8 ชั่วโมง | 25 °c | 0 ชั่วโมง | 1 วัน |
| | | | 0.5 ชั่วโมง | 2 วัน |
| | | | 1 ชั่วโมง | 5 วัน |
| | | | 2 ชั่วโมง | 1 สัปดาห์ |
| | | | 4 ชั่วโมง | 2 สัปดาห์ |
| | | | 8 ชั่วโมง | 1 เดือน |
| | | | 16 ชั่วโมง | 2 เดือน |

ตารางที่ 3.18 ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค T6 สำหรับการทดสอบความแข็ง

| ตัวแปรที่ใช้ในการชุบแข็งชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T6 | | | | |
|--|---------------------------------------|-------------------|---------------|------------|
| อุณหภูมิการอบละลาย | เวลาอบละลาย | อุณหภูมิการอบอ่อน | เวลาการอบอ่อน | |
| 490 °c 510 °c 530 °c | 1 ชั่วโมง 2.5 ชั่วโมง 8 ชั่วโมง | 180 °c | 0 นาที | 120 นาที |
| | | | 5 นาที | 240 นาที |
| | | | 10 นาที | 360 นาที |
| | | | 15 นาที | 480 นาที |
| | | | 30 นาที | 960 นาที |
| | | | 45 นาที | 1,920 นาที |
| | | | 60 นาที | 3,840 นาที |

ตารางที่ 3.19 ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง

| เทคนิคการอบชุบ | ระยะเวลาการอบชุบ |
|-------------------------|------------------|
| T1 (Air) | 1 เดือน |
| T1 (Water) | 1 เดือน |
| T4 (490 °c 2.5 ชั่วโมง) | 2 สัปดาห์ |
| T4 (510 °c 2.5 ชั่วโมง) | 2 สัปดาห์ |
| T4 (530 °c 2.5 ชั่วโมง) | 2 สัปดาห์ |
| T4 (490 °c 1 ชั่วโมง) | 4 ชั่วโมง |
| T4 (490 °c 8 ชั่วโมง) | 4 ชั่วโมง |
| T6 (490 °c 2.5 ชั่วโมง) | 4 ชั่วโมง |
| T6 (510 °c 2.5 ชั่วโมง) | 4 ชั่วโมง |
| T6 (530 °c 2.5 ชั่วโมง) | 4 ชั่วโมง |
| T6 (530 °c 1 ชั่วโมง) | 4 ชั่วโมง |
| T6 (530 °c 8 ชั่วโมง) | 4 ชั่วโมง |

บทที่ 4

ผลการทดลอง

บทนี้นำเสนอผลการทดลองการทดลองซึ่งประกอบไปด้วยอัตราการเพิ่มความแข็งแรง ความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบ

4.1 ความแข็ง

4.1.1 ค่าความแข็งเทคนิคการชุบแข็งชิ้นงานแบบ T1 Heat treatment

จากการทดลองการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง โดยแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ

1. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานหลังจากปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ (T_{Air})
2. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานหลังจากปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ (T_{Water})

4.1.1.1 การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบหลังจากปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ (T_{Air})

การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องหลังจากปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในอากาศ (T_{Air}) ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจากเทคนิคการชุบแข็งแบบ T_{Air} จากตารางที่ 4.1 พบว่า $T_{(Air)}$ อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบในช่วงแรกมีค่าต่ำ (1 ชั่วโมง – 1 วัน) เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานทดสอบสูงต่ำ (ชิ้นงานทดสอบใช้เวลานานในการเย็นตัว) ส่งผลให้ผลึกซิติกอนและแมกนีเซียมบางส่วนรวมและตกผลึกในช่วงที่ชิ้นงานเย็นตัว หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 48 ชั่วโมง (2 วัน) และอัตราการเพิ่มความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามเวลาเนื่องจากการตกผลึกของซิติกอนและแมกนีเซียมที่ตกค้างอยู่ในสถานะสารละลายยิ่งยวด จนกระทั่งอัตราการเพิ่มขึ้นของชิ้นงานคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 504 ชั่วโมง (2 สัปดาห์) และให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดเมื่อปล่อยชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 720 ชั่วโมง (1 เดือน)

4.1.1.2 การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบหลังจากปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ

($T_{1_{Water}}$)

การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องหลังจากปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวภายในน้ำ ($T_{1_{Water}}$) ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจากเทคนิคการชุบแข็งแบบ $T_{1_{Water}}$

ตารางที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงของการทดสอบชิ้นงาน $T_{1_{Air}}$

| เวลา (ชั่วโมง) | ค่าความแข็งแรง (HRF) |
|----------------|----------------------|
| 1 | 54.10 |
| 2 | 52.54 |
| 4 | 55.30 |
| 24 | 56.02 |
| 48 | 59.48 |
| 120 | 57.74 |
| 168 | 59.80 |
| 336 | 59.70 |
| 504 | 60.30 |
| 720 | 61.54 |
| 1080 | 61.36 |
| 1440 | 62.22 |

จากตารางที่ 4.2 พบว่า $T_{1_{(water)}}$ อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเย็นตัวโดยน้ำและเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง พบว่าอัตราการเพิ่มความแข็งแรงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทันทีหลังจากปล่อยชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้อง เกิดจากโครงสร้างของผลึกซึลิกอนจนกระทั่งเวลาผ่านไป 168 ชั่วโมง(1 สัปดาห์) อัตราการเพิ่มความแข็งแรงลดลงและคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 504 ชั่วโมง(2 สัปดาห์) เนื่องจากผลึกซึลิกอนรวมตัวกับแมกนีเซียมเกิดเป็นผลึกที่ใหญ่ขึ้นทำให้อัตราการต้านทานแรงเฉือนภายในชิ้นงานลดลง โดยที่ค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงานเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือนแต่ค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงานไม่แตกต่างกับค่าความแข็งแรงของชิ้นงานที่เวลา 2 สัปดาห์มากนัก

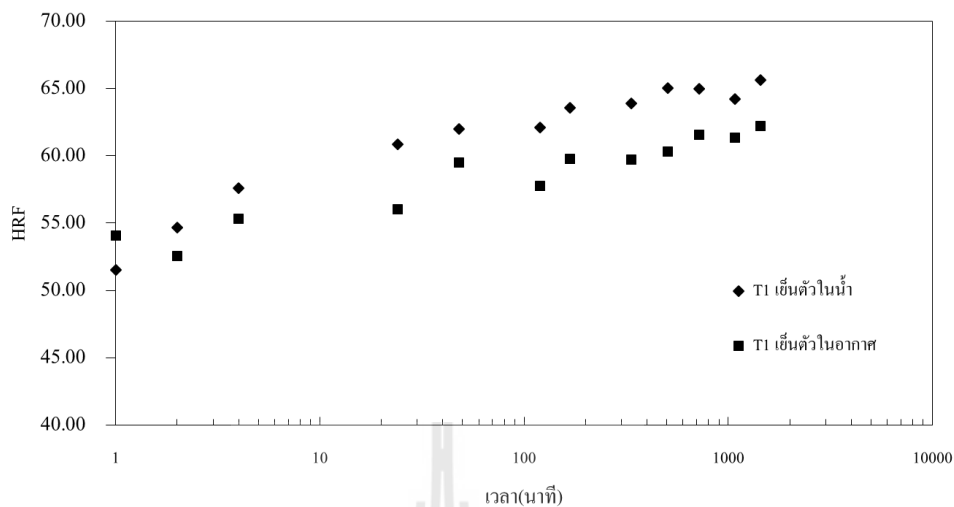
4.1.1.3 เปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งโดยเทคนิค T1 ที่เย็นตัวในอากาศ ($T1_{Air}$) และเย็นตัวในน้ำ ($T1_{Water}$)

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อหล่ออัดขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ ($T1_{Water}$) หรือปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ($T1_{Air}$) และปล่อยให้เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง (Natural Ageing) พบว่า การเย็นตัวในน้ำทันทีหลังจากเปิดแม่พิมพ์ ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะสูงกว่า การปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในน้ำจะมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าการปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ เมื่ออัตราการเย็นตัวของชิ้นงานสูงจะทำให้ชิ้นงานทดลองสามารถรักษาสถานะสารละลายของแข็ง (Solid Solution) ได้ดีกว่าอัตราการเย็นตัวต่ำ

อัตราการเพิ่มความแข็งแรงโดยการปล่อยให้เย็นตัวธรรมชาติพบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดลองของ $T1_{Air}$ และ $T1_{Water}$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อทิ้งชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยในระยะแรกค่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ช่วง 1 ถึง 120 ชั่วโมง) หลังจากนั้นค่าความแข็งแรงจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคงที่ โดยที่ค่าความแข็งแรงสูงสุดของ $T1_{Air}$ และ $T1_{Water}$ คือ 62.22 ที่เวลา 1440 ชั่วโมง และ 65.66 ที่เวลา 1440 ชั่วโมงตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ $T1_{Water}$

| เวลา (ชั่วโมง) | ค่าความแข็งแรง (HRF) |
|----------------|----------------------|
| 1 | 51.50 |
| 2 | 54.68 |
| 4 | 57.62 |
| 24 | 60.88 |
| 48 | 62 |
| 120 | 62.10 |
| 168 | 63.56 |
| 336 | 63.88 |
| 504 | 65.02 |
| 720 | 65.00 |
| 1080 | 64.24 |
| 1440 | 65.66 |



รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งโดยเทคนิค T1_{Air} และ T1_{Water}

4.1.2 ค่าความแข็งแรงเทคนิคการชุบแข็งชิ้นงานแบบ T4 Heat treatment

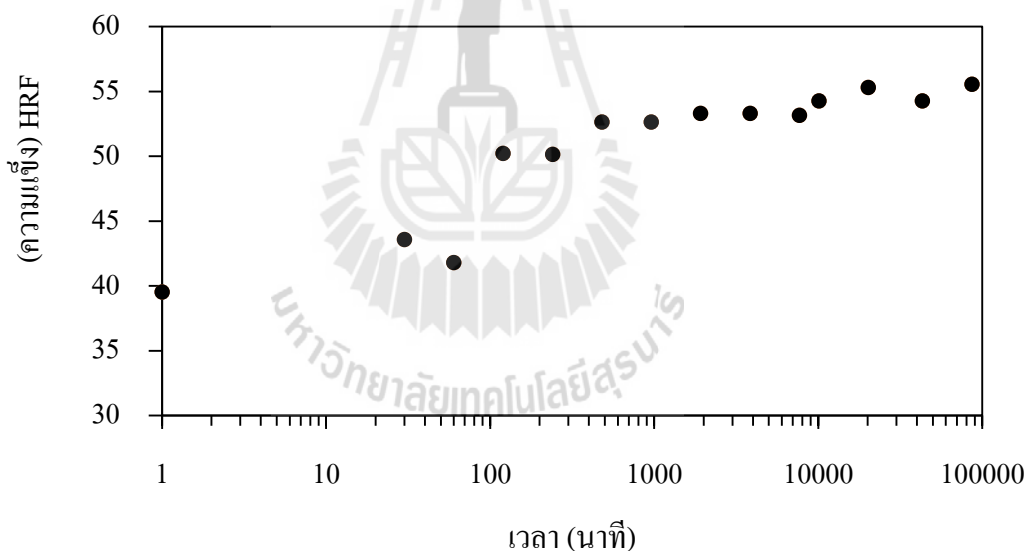
เทคนิคการชุบแข็งแบบ T4 เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบในขั้นตอนการอบละลายและเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดัง ซึ่งแบ่งได้ดังนี้ตารางที่ 3.17

1. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 490 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง (T4_{490 °C, 2.5 ชั่วโมง})
2. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 510 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง (T4_{510 °C, 2.5 ชั่วโมง})
3. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง (T4_{530 °C, 2.5 ชั่วโมง})
4. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 1 ชั่วโมง (T4_{530 °C, 1 ชั่วโมง})
5. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 8 ชั่วโมง (T4_{530 °C, 8 ชั่วโมง})

4.1.2.1 การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 490 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง ($T_{490}^{\circ\text{C}}, 2.5$ ชั่วโมง)

ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 490°C 2.5 ชั่วโมงและเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง แสดงในตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีอัตราการเพิ่มความแข็งแรงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (1 – 120 นาที) เนื่องจากในช่วงแรกชิ้นงานอยู่ในสถานะสารละลายยิ่งยวด ทำให้โครงสร้างซิลิกอนและแมกนีเซียมสามารถรวมตัวกลายเป็นผลึก Mg_2Si ได้ดีหลังจากนั้นอัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีอัตราการเพิ่มความแข็งแรงลดลงและคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 10,080 นาที (1 สัปดาห์) และค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงานทดสอบเกิดขึ้นที่เวลา 86,400 นาที (2 เดือน) มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 55.56 HRF



รูปที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งโดยเทคนิค $T_{490}^{\circ\text{C}}, 2.5$ ชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T4_{490 °C, 2.5 ชั่วโมง}

| เวลาเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง(นาท) | ความแข็ง(HRF) |
|---------------------------------------|---------------|
| 0 | 39.54 |
| 30 | 43.58 |
| 60 | 41.82 |
| 120 | 50.24 |
| 240 | 50.16 |
| 480 | 52.66 |
| 960 | 52.66 |
| 1920 | 53.32 |
| 3840 | 53.32 |
| 7680 | 53.16 |
| 10080 | 54.28 |
| 20160 | 55.32 |
| 43200 | 54.28 |
| 86400 | 55.56 |

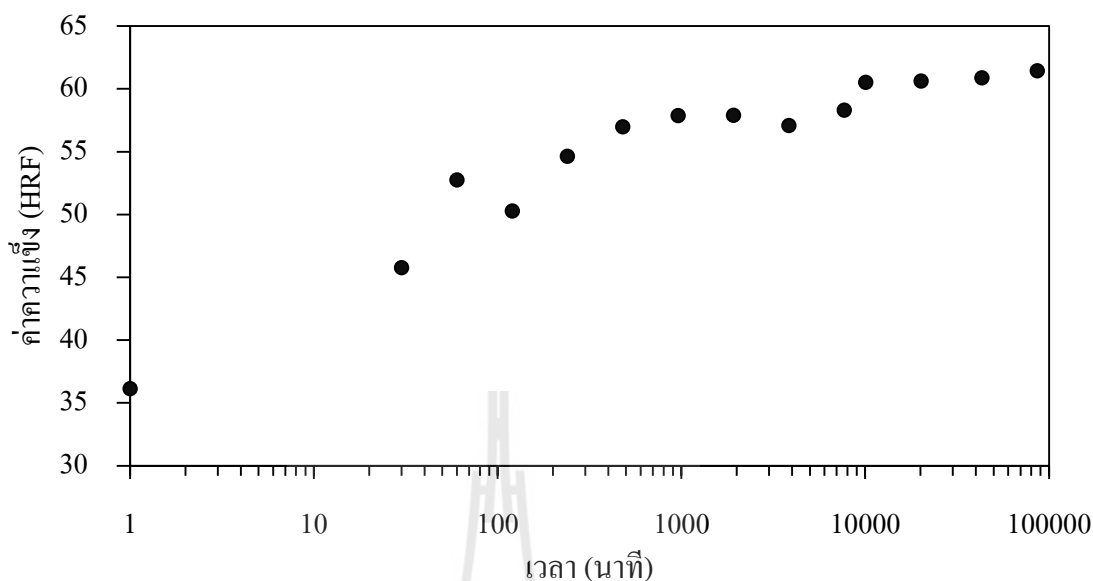
4.1.2.2 การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 510 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง(T4_{510 °C, 2.5 ชั่วโมง})

ค่าความแข็งของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 510°C 2.5 ชั่วโมงและเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้องแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ โดยเทคนิค $T_{4,510}^{\circ C, 2.5}$ ชั่วโมง

| เวลาเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง(นาท) | ความแข็ง(HRF) |
|---------------------------------------|---------------|
| 0 | 36.12 |
| 30 | 45.77 |
| 60 | 52.75 |
| 120 | 50.27 |
| 240 | 54.63 |
| 480 | 56.98 |
| 960 | 57.86 |
| 1920 | 57.90 |
| 3840 | 57.08 |
| 7680 | 58.31 |
| 10080 | 60.51 |
| 20160 | 60.63 |
| 43200 | 60.89 |
| 86400 | 61.43 |

จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีอัตราการเพิ่มความแข็งอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (1 – 120 นาที) เนื่องจากในช่วงแรกชิ้นงานอยู่ในสถานะสารละลายยิ่งยวด ทำให้โครงสร้างซัลฟิดอนและแมกนีเซียมสามารถรวมตัวกลายเป็นผลึก Mg_2Si ได้ดีหลังจากนั้นหลังจากนั้นอัตราการเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าลดลงเมื่อในช่วง 240 – 7,680 นาที และเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 10,0080(1 สัปดาห์) เนื่องจากอัตราการเกิดโครงสร้างผลึก Mg_2Si น้อยลง และโครงสร้างผลึกใหญ่ขึ้นทำให้อัตราการต้านทานแรงเฉือนน้อยลง หลังจากนั้นค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าคงที่ ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าสูงสุดที่เวลา 86,400 นาที(2 เดือน) ค่าความแข็งเท่ากับ 61.43 HRF



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ $T_{4_{510}^{\circ}C, 2.5}$ ชั่วโมง

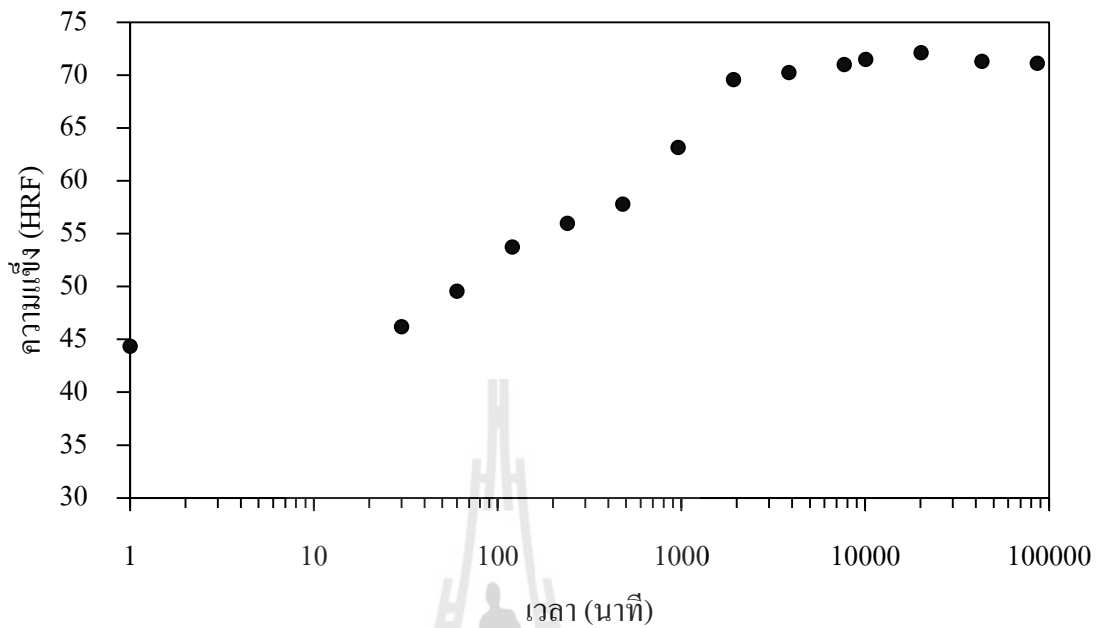
4.1.2.3 การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง ($T_{4_{530}^{\circ}C, 2.5}$ ชั่วโมง)

ค่าความแข็งของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ $530^{\circ}C$ 2.5 ชั่วโมงและเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้องตารางที่ 4.5

จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีอัตราการเพิ่มความแข็งทันทีหลังจากขั้นตอนการอบละลาย ซึ่งในช่วงแรกอัตราการเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 – 7,680 นาทีก (5 วัน) เนื่องจากการตกผลึกของซิลิกอนและแมกนีเซียม (Mg_2Si) ทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าต่ำลงและความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าคงที่ ณ เวลา 7,680 นาทีกเนื่องจากจำนวนซิลิกอนและแมกนีเซียมที่ถูกละลายในขั้นตอนของอบละลายน้อยลงและผลึก Mg_2Si มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้การต้านทานแรงเฉือนลดลง ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าสูงสุดที่เวลา 20,160 นาทีก (2 สัปดาห์) ค่าความแข็งเท่ากับ 71.85 HRF

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4_{530 °C, 2.5 ชั่วโมง}

| เวลาเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง(นาท) | ความแข็ง(HRF) |
|---------------------------------------|---------------|
| 0 | 48.99 |
| 30 | 50.50 |
| 60 | 51.47 |
| 120 | 55.42 |
| 240 | 58.76 |
| 480 | 60.57 |
| 960 | 64.05 |
| 1920 | 67.48 |
| 3840 | 69.21 |
| 7680 | 70.43 |
| 10080 | 71.27 |
| 20160 | 71.85 |
| 43200 | 71.46 |
| 86400 | 71.25 |



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ $T_{4_{530}^{\circ}C, 2.5}$ ชั่วโมง

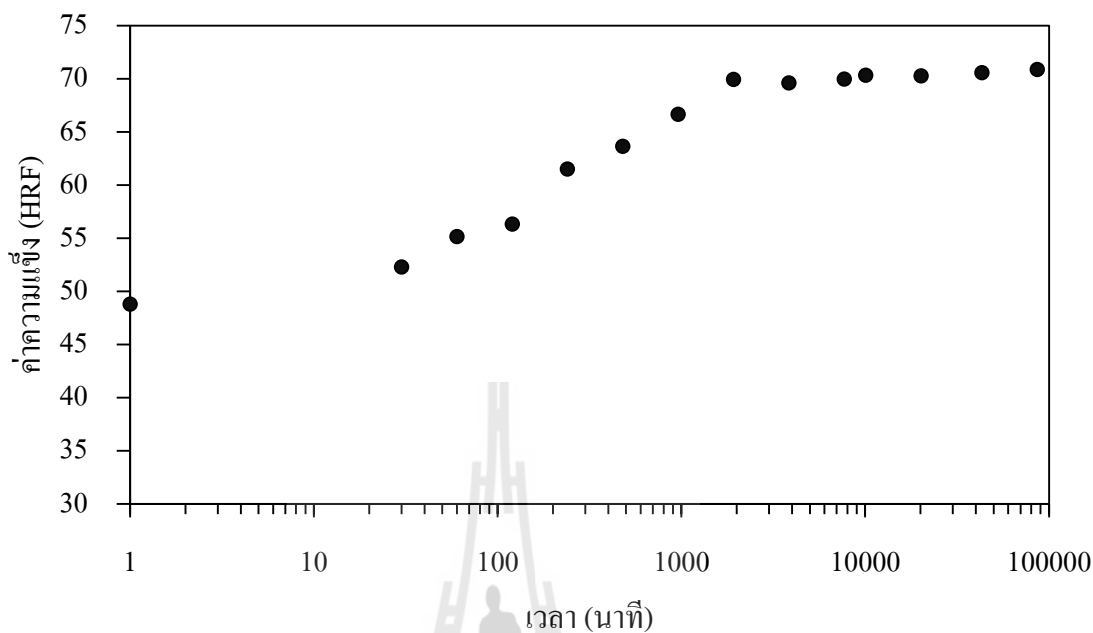
4.1.2.4 การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 1 ชั่วโมง ($T_{4_{530}^{\circ}C, 1}$ ชั่วโมง)

ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530°C 1 ชั่วโมง และเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้องแสดงดัง ตารางที่ 4.6

จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีอัตราการเพิ่มความแข็งแรงทันทีหลังจากขั้นตอนการอบละลาย ซึ่งในช่วงแรกอัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1 – 240 นาที เนื่องจากในช่วงแรกเกิดการตกผลึกของซิลิกอนและแมกนีเซียม (Mg_2Si) หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบลดลงในช่วง 240 – 10,080 นาที (1 สัปดาห์) และค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีค่าคงที่ เมื่อเวลาประมาณ 7,680 นาที ค่าความแข็งแรงสูงสุดมีค่า 70.88 HRF ที่เวลา 86,400 นาที (2 เดือน)

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4_{530 °C, 1 ชั่วโมง}

| เวลาเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง(นาที) | ความแข็ง(HRF) |
|--|---------------|
| 0 | 48.80 |
| 30 | 52.30 |
| 60 | 55.16 |
| 120 | 56.35 |
| 240 | 61.53 |
| 480 | 63.66 |
| 960 | 66.67 |
| 1920 | 69.86 |
| 3840 | 69.61 |
| 7680 | 69.98 |
| 10080 | 70.34 |
| 20160 | 70.28 |
| 43200 | 70.57 |
| 86400 | 70.88 |



รูปที่ 4.5 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ $T4_{530}^{\circ}\text{C}$, 1 ชั่วโมง

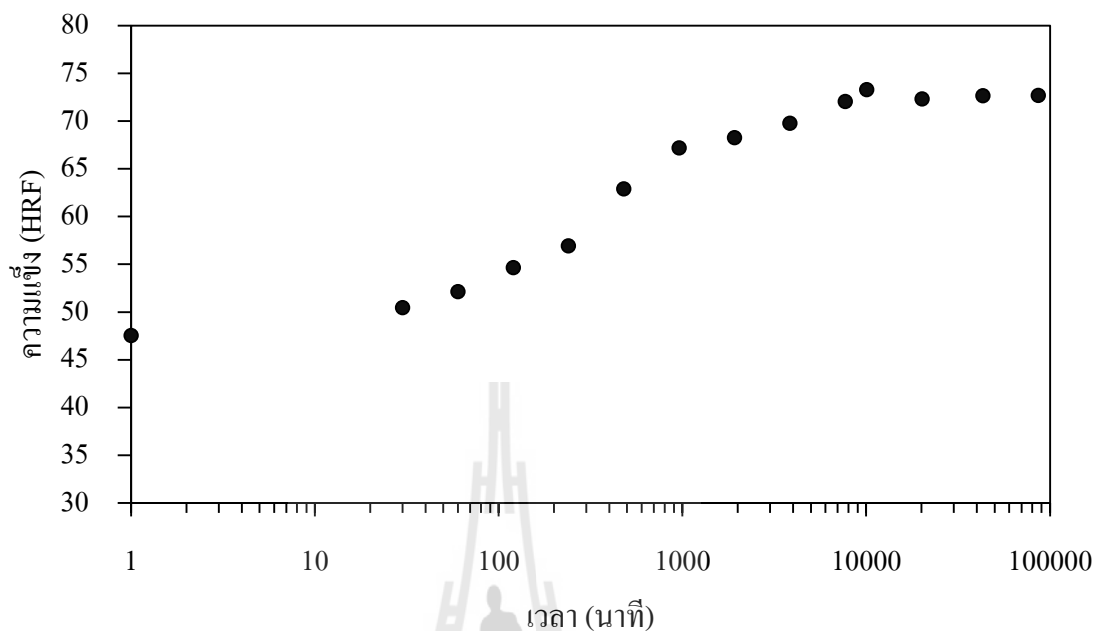
4.1.2.5 การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 8 ชั่วโมง ($T4_{530}^{\circ}\text{C}$, 8 ชั่วโมง)

ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530°C 8 ชั่วโมงและเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้องดังตารางที่ 4.7

จากรูปที่ 4.6 พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นทันทีเมื่อทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นในระยะแรกช่วง 1 – 480 นาที เนื่องจากในช่วงแรกเกิดการตกผลึกของซิลิกอนและแมกนีเซียม (Mg_2Si) หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงจนกระทั่งค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 7,680 นาทีหรือ 5 วัน เนื่องจากจำนวนซิลิกอนและแมกนีเซียมที่ถูกละลายในขั้นตอนของอบละลายน้อยลงและผลึก Mg_2Si มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้การต้านทานแรงเหนือนลดลง ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีค่าสูงสุดที่เวลา 86,400 นาที (2 เดือน) ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 72.68 HRF

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T4_{530 °C, 8 ชั่วโมง}

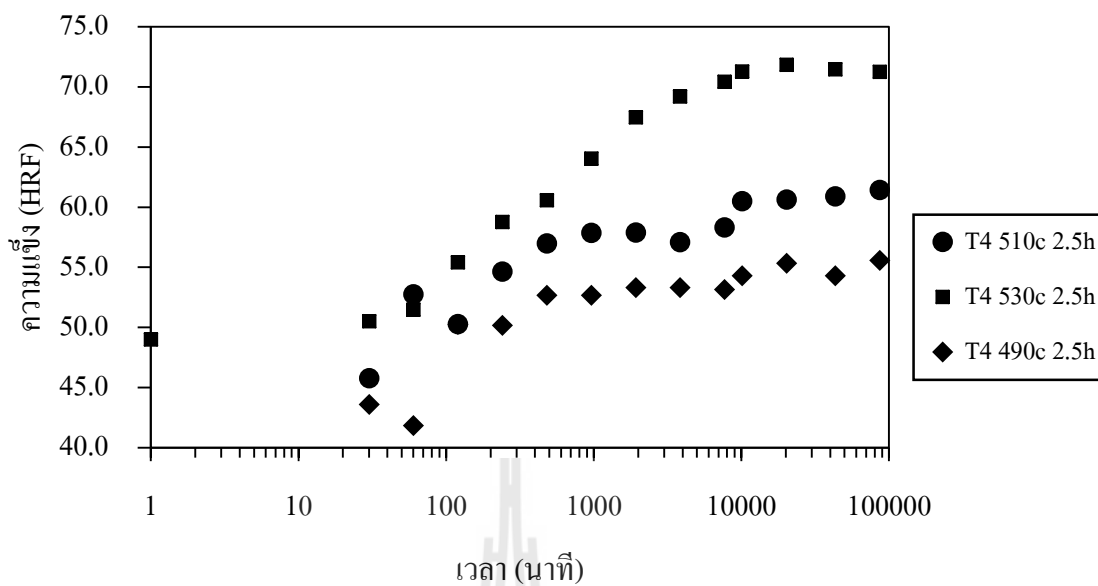
| เวลาเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง(นาที) | ความแข็ง(HRF) |
|--|---------------|
| 0 | 47.53 |
| 30 | 50.47 |
| 60 | 52.13 |
| 120 | 54.65 |
| 240 | 56.91 |
| 480 | 62.89 |
| 960 | 67.19 |
| 1920 | 68.27 |
| 3840 | 69.76 |
| 7680 | 72.06 |
| 10080 | 73.28 |
| 20160 | 72.32 |
| 43200 | 72.66 |
| 86400 | 72.68 |



รูปที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ T4_{530 °C, 8 ชั่วโมง}

4.1.2.6 อิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายของเทคนิคการเพิ่มความแข็งแรงแบบ T4

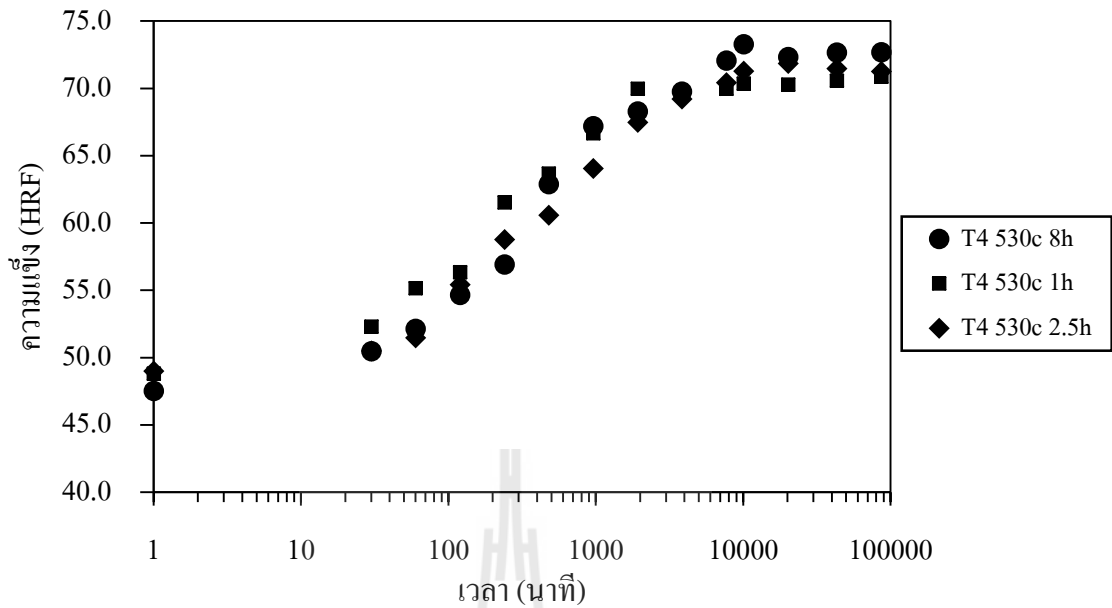
จาก รูปที่ 4.7 จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ T4_{530 °C, 2.5 ชั่วโมง} ให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบสูงสุดและค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบน้อยลงเมื่ออุณหภูมิน้อยลงโดย T4_{490 °C, 2.5 ชั่วโมง} ให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานต่ำสุด เนื่องจากอัตราการละลายของผลึกแมกนีเซียมและซิลิกอนซึ่งเป็นผลึกที่สร้างความแข็งแรงให้กับชิ้นงานสามารถละลายได้ดีที่อุณหภูมิสูง ขณะที่อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ T4_{490 °C, 2.5 ชั่วโมง}, T4_{510 °C, 2.5 ชั่วโมง} และ T4_{530 °C, 2.5 ชั่วโมง} มีอัตราการเพิ่มความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความแข็งของชิ้นงานทดสอบ $T_{490}^{\circ}\text{C}, 2.5$ ชั่วโมง, $T_{510}^{\circ}\text{C}, 2.5$ ชั่วโมง และ $T_{530}^{\circ}\text{C}, 2.5$ ชั่วโมง

4.1.2.7 อิทธิพลของเวลาอบละลายของเทคนิคการเพิ่มความแข็งแบบ T4

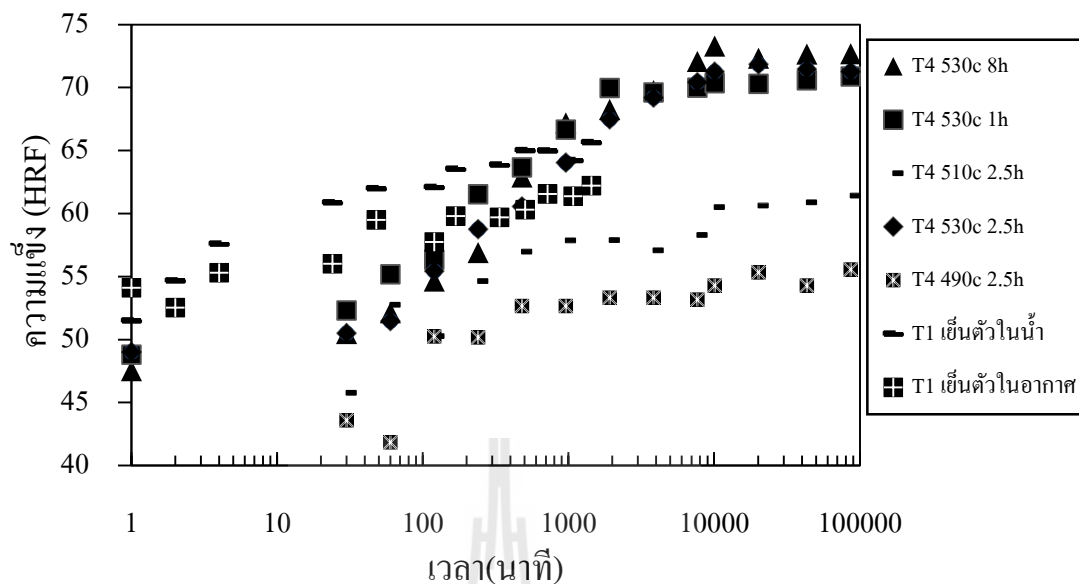
จาก รูปที่ 4.8 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าระยะเวลาในการอบละลายของชิ้นงานทดสอบไม่ส่งผลต่ออัตราการเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ T4_{530 °C}, 1 ชั่วโมง, T4_{530 °C}, 2.5 ชั่วโมง

อิทธิพลการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบด้วยเทคนิค T1 และ T4

รูปที่ 4.9 จะเห็นว่าเมื่อค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงานเกิดขึ้นที่เทคนิคการอบชุบ T4 อุณหภูมิการอบละลายเท่ากับ 530°C ขณะที่ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบโดยใช้อุณหภูมิการอบละลายเท่ากับ 490 °C เพิ่มค่าความแข็งแรงของชิ้นงานต่ำสุด นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ T1_(Air) และ T1_(Water) ให้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่ากระบวนการอบชุบแบบ T4 อุณหภูมิอบละลาย 490°C และ 510°C เวลา 2.5 ชั่วโมงเนื่องจากอัตราการเย็นตัวของกระบวนการหล่ออัดมีค่าสูงทำให้ผลึกซิลิกอนและแมกนีเซียมไม่มีเวลามากพอในการตกผลึกทำให้ สามารถเกิดผลึก Mg₂Si ที่มีเล็ก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าสูง



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการอบชุบ T1 และ T4

4.1.3 การอบเพิ่มความแข็งแรงแบบ T6

เทคนิคการชุบแข็งแบบ T6 เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบในขั้นตอนการอบละลายและเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานภายใต้อุณหภูมิต่ำ (150 – 220 °C) ซึ่งการศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงชิ้นงาน โดยใช้เทคนิค T6 treatment ได้แบ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาเป็น 3 ชนิดคือ

1. อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการอบละลาย
2. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลาย
3. อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการอบอ่อน

โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3.18 ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

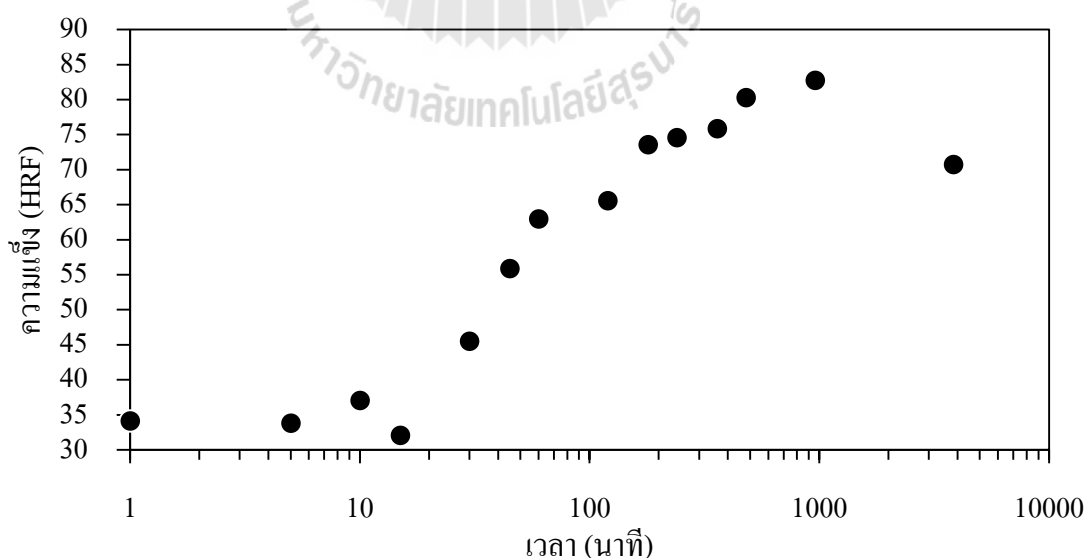
1. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 490 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C (T6_{490 °C, 2.5 ชั่วโมง})
2. การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 510 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C (T6_{510 °C, 2.5 ชั่วโมง})

3. การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C (T6_{530 °C, 2.5 ชั่วโมง})
4. การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 1 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C (T6_{530 °C, 1 ชั่วโมง})
5. การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 8 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C (T6_{530 °C, 8 ชั่วโมง})

4.1.3.1 การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 490 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C (T6_{490 °C, 2.5 ชั่วโมง})

ค่าความแข็งของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 490 °C 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนที่อุณหภูมิ 180 °C ดังตารางที่ 4.8

รูปที่ 4.10 พบว่าอัตราการเพิ่มความแข็งของชิ้นงานโดยเทคนิค T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 490 °C เวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง และอุณหภูมิอบอ่อน 180 °C ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเวลา 360 นาทีหรือ 6 ชั่วโมงหลังจากนั้นชิ้นงานมีค่าความแข็งสูงสุดในช่วง 360 นาทีที่ค่าความแข็ง 80.18 HRF



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6_{490 °C, 2.5 ชั่วโมง}

ตารางที่ 4.8 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ $T_{6_{490}^{\circ}\text{C}, 2.5}$ ชั่วโมง

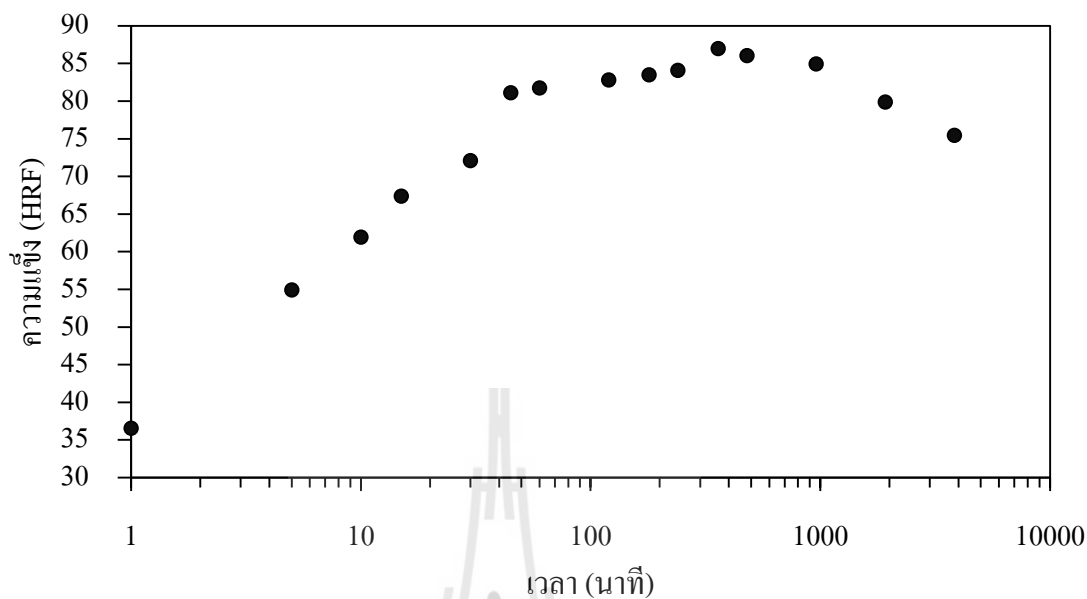
| เวลาอบอ่อน(นาที) | ความแข็ง(HRF) |
|------------------|---------------|
| 0 | 45.21 |
| 5 | 47.32 |
| 10 | 49.55 |
| 15 | 57.91 |
| 30 | 61.40 |
| 45 | 62.83 |
| 60 | 63.99 |
| 120 | 67.11 |
| 180 | 71.88 |
| 240 | 75.40 |
| 360 | 80.18 |
| 480 | 79.30 |
| 960 | 77.60 |
| 1920 | 71.94 |
| 3840 | 70.06 |

4.1.3.2 การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 510 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C ($T_{6_{510}^{\circ}\text{C}, 2.5}$ ชั่วโมง)

ค่าความแข็งของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 510°C 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนที่อุณหภูมิ 180°C แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6_{510 °C, 2.5 ชั่วโมง}

| เวลาอบอ่อน(นาที) | ความแข็ง(HRF) |
|------------------|---------------|
| 0 | 36.54 |
| 5 | 54.92 |
| 10 | 61.91 |
| 15 | 67.38 |
| 30 | 72.10 |
| 45 | 81.09 |
| 60 | 81.74 |
| 120 | 82.82 |
| 180 | 83.50 |
| 240 | 84.08 |
| 360 | 86.97 |
| 480 | 86.04 |
| 960 | 84.94 |
| 1920 | 79.89 |
| 3840 | 75.47 |



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ T6_{510 °C, 2.5 ชั่วโมง}

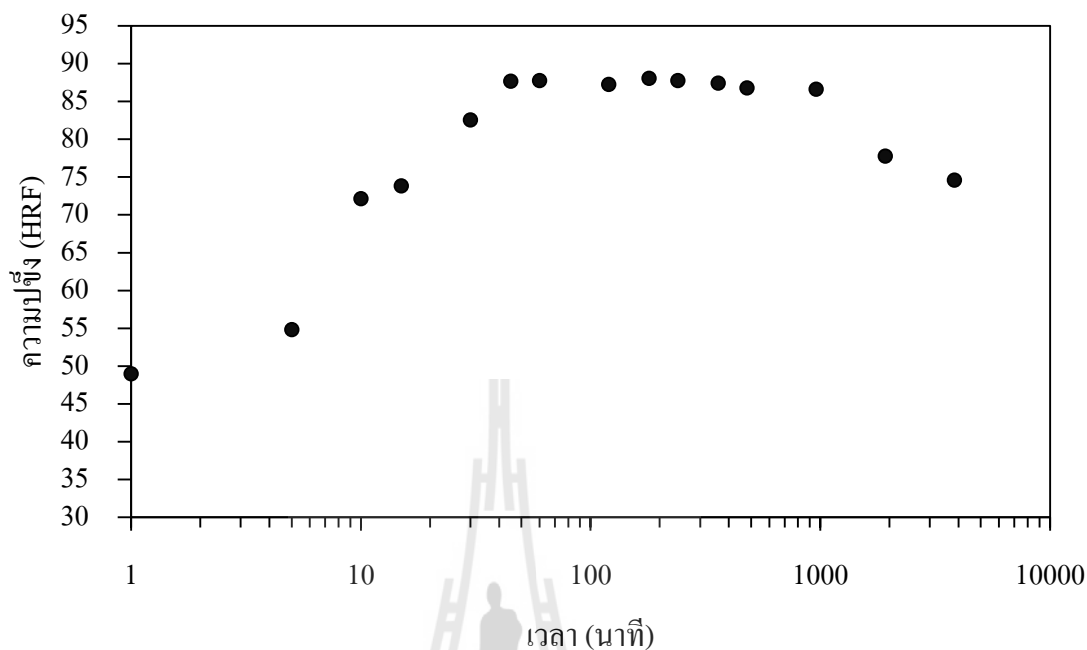
จากรูปที่ 4.11 อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานโดยเทคนิค T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 510 °C เวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง และอุณหภูมิอบอ่อน 180 °C ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเวลา 360 นาทีหรือ 6 ชั่วโมง เนื่องจากการเกิดผลึกของซิลิกอนและแมกนีเซียม (Mg₂Si) โดยที่ชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 86.97 HRF เวลา 360 นาที หลังจากนั้นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีค่าลดลงเมื่อเวลาอบละลายสูงขึ้น เนื่องจากผลึก Mg₂Si ซึ่งเป็นผลึกที่ให้ค่าความแข็งแรงมีขนาดใหญ่ทำให้ความต้านทานแรงเฉือนมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีค่าน้อยลง

4.1.3.3 การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C (T6_{530 °C, 2.5 ชั่วโมง})

ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 °C 2.5 ชั่วโมงและอบอ่อนที่อุณหภูมิ 180 °C แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6₅₃₀ °C, 2.5 ชั่วโมง

| เวลาอบอ่อน(นาที) | ความแข็ง(HRF) |
|------------------|---------------|
| 0 | 48.99 |
| 5 | 54.81 |
| 10 | 722.13 |
| 15 | 73.82 |
| 30 | 82.56 |
| 45 | 87.67 |
| 60 | 87.75 |
| 120 | 87.24 |
| 180 | 88.04 |
| 240 | 87.77 |
| 360 | 87.42 |
| 480 | 86.76 |
| 960 | 86.62 |
| 1920 | 77.75 |
| 3840 | 74.58 |



รูปที่ 4.12 ค่าความถี่ของชิ้นงานทดสอบ $T_{6_{530}^{\circ}\text{C}, 2.5}$ ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.12 พบว่าอัตราการเพิ่มความถี่ของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกของการอบละลาย (1 – 60 นาที) เนื่องจากการเกิดผลึกของซิลิกอนและแมกนีเซียม (Mg_2Si) มีการเปลี่ยนแปลงจาก สารละลายของแข็งอ้อมตัวยิ่งยวด (SSS) ที่เกิดจากขั้นตอนการอบละลายกลาย Mg_2Si ซึ่งเป็น โครงสร้างที่มีรูปร่างเล็กส่งผลให้ความถี่ของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มความถี่จะลดลงและค่าความถี่ของชิ้นงานคงที่ในช่วง 120 – 960 นาที หลังจากนั้นค่าความถี่ของชิ้นงานจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาอบอ่อนมากกว่า 960 นาที (16 ชั่วโมง) เนื่องจากผลึก Mg_2Si มีรูปร่างขนาดใหญ่ส่งผลให้แรงต้านทานแรงเฉือนลดลง ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลง

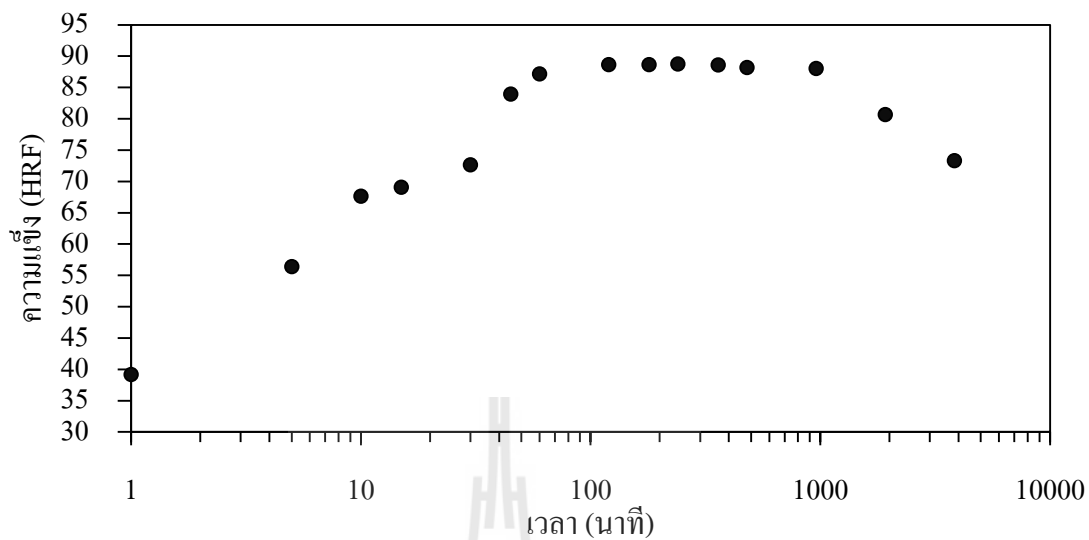
4.1.3.4 การเพิ่มความถี่ของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 1 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C ($T_{6_{530}^{\circ}\text{C}, 1}$ ชั่วโมง)

ค่าความถี่ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 °C 1 ชั่วโมง และอบอ่อนที่อุณหภูมิ 180 °C แสดงดังตารางที่ 4.11

รูปที่ 4.13 อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน โดยเทคนิค T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 510 °C เวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง และอุณหภูมิอบอ่อน 180 °C ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามเวลาการอบอ่อนที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเวลา 360 นาที หรือ 6 ชั่วโมง เนื่องจากการเกิดผลึกของซิลิกอนและแมกนีเซียม (Mg_2Si) มีการเปลี่ยนแปลงจาก สารละลายของแข็งอิมพัยซ์ยาว (SSS) ที่เกิดจากขั้นตอนการอบละลาย โดยที่ชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 86.97 HRF เวลา 360 นาที หลังจากนั้นค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบมีค่าลดลงเมื่อเวลาอบละลายสูงขึ้น เนื่องจากผลึกแมกนีเซียม-ซิลิกอน Mg_2Si ซึ่งเป็นผลึกที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดกลายเป็นผลึก ที่มีรูปร่างเป็นผลึกใหญ่ส่งผลให้ความต้านทานแรงเฉือนลดลง ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง

ตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ T6_{530 °C, 1 ชั่วโมง}

| เวลาอบอ่อน(นาที) | ความแข็งแรง(HRF) |
|------------------|------------------|
| 0 | 39.17 |
| 5 | 56.37 |
| 10 | 67.65 |
| 15 | 69.05 |
| 30 | 72.66 |
| 45 | 83.95 |
| 60 | 87.18 |
| 120 | 88.63 |
| 180 | 88.64 |
| 240 | 88.73 |
| 360 | 88.60 |
| 480 | 88.18 |
| 960 | 88.03 |
| 1920 | 80.67 |
| 3840 | 73.31 |



รูปที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ T6₅₃₀ °C, 1 ชั่วโมง

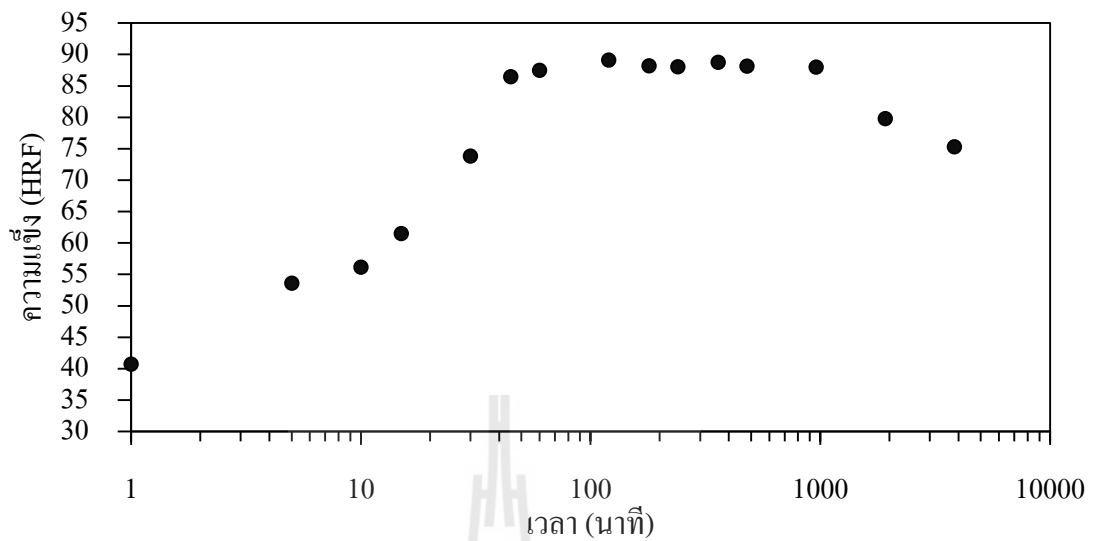
4.1.3.5 การเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 8 ชั่วโมงและอบอ่อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 180 °C (T6₅₃₀ °C, 8 ชั่วโมง)

ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530°C 8 ชั่วโมงและอบอ่อนที่อุณหภูมิ 180°C แสดงในตารางที่ 4.12

รูป 4.14 อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานโดยเทคนิค T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 530 °C เวลาอบละลาย 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิอบอ่อน 180 °C อัตราการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานคงที่และในช่วงเวลาอบละลาย นาทีและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 0 – 120 นาที เนื่องจากการเกิดผลึกของซิลิกอนและแมกนีเซียม(Mg₂Si) มีการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายของแข็งอัมตวียังยวด(SSS) ที่เกิดจากขั้นตอนการอบละลาย หลังจากนั้นความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าสูงสุดและคงที่ เนื่องจากผลึก Mg₂Si เป็นผลึกที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด จนกระทั่งเวลา 960 นาที ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง เนื่องจากโครงสร้าง Mg₂Si กลายเป็นโครงสร้าง Mg₂Si ที่มีรูปร่างขนาดใหญ่ ส่งผลให้แรงต้านทานแรงเฉือนลดลง ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดลง

ตารางที่ 4.12 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ T6_{530 °C, 8 ชั่วโมง}

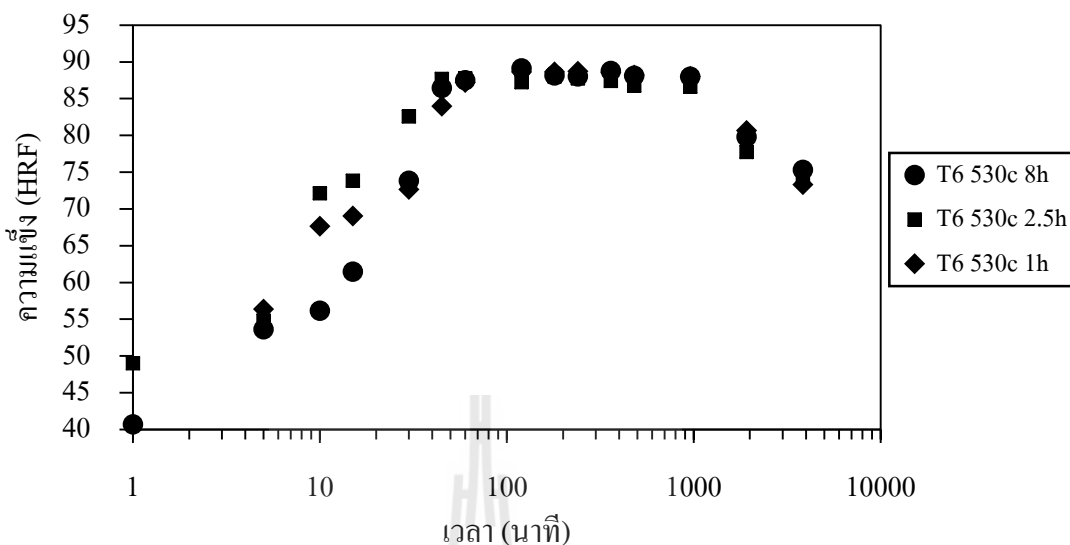
| เวลาอบอ่อน(นาที) | ความแข็ง(HRF) |
|------------------|---------------|
| 0 | 40.69 |
| 5 | 53.62 |
| 10 | 56.15 |
| 15 | 61.48 |
| 30 | 73.83 |
| 45 | 86.47 |
| 60 | 87.49 |
| 120 | 89.10 |
| 180 | 88.17 |
| 240 | 88.02 |
| 360 | 88.75 |
| 480 | 88.12 |
| 960 | 87.97 |
| 1920 | 79.79 |
| 3840 | 75.31 |



รูปที่ 4.14 แสดงค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ T6₅₃₀ °C, 8 ชั่วโมง

4.1.3.6 อิทธิพลของอุณหภูมิอบละลายต่อการชุบแข็งโดยเทคนิค T6

จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิสูง 530°C จะมีค่าความแข็งแรงสูงสุดและค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบลดลงเมื่ออุณหภูมิอบละลายมีค่าต่ำลง แสดงว่าอัตราการละลายซิติคอนและแมกนีเซียมมีอัตราการละลายที่ต่างกัน ในอุณหภูมิที่ต่างกัน กล่าวคือ ยิ่งอุณหภูมิสูงอัตราการละลายซิติคอนและแมกนีเซียมสูงทำให้ชิ้นงานทดสอบมีค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกับเทคนิคการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงานด้วยเทคนิค T4 นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิสูงสามารถเร่งอัตราการเพิ่มค่าความแข็งแรงได้รวดเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำอีกด้วย



รูปที่ 4.15 ค่าความของของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบ

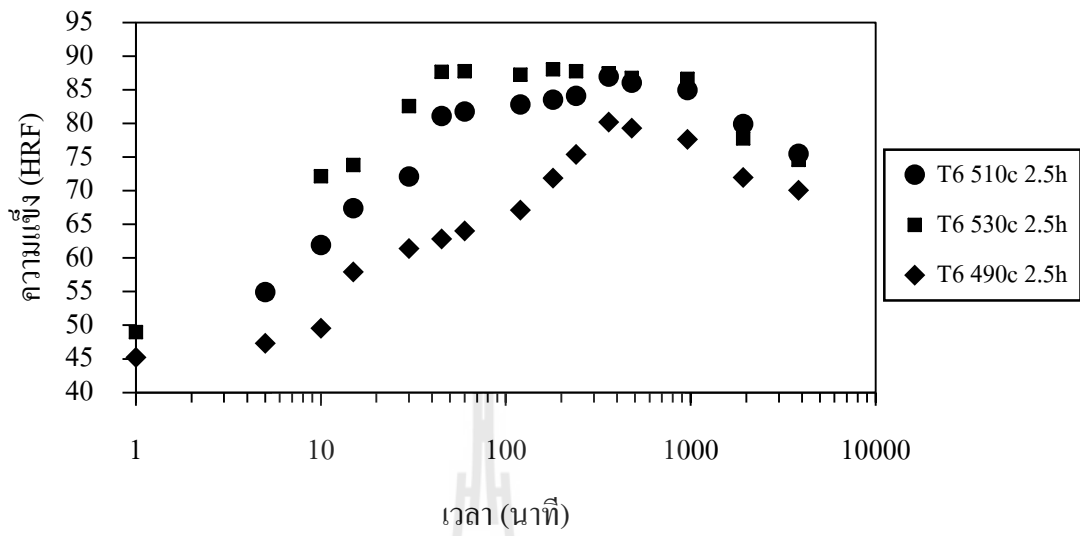
T6_{490 °C, 2.5 ชั่วโมง}, T6_{510 °C, 2.5 ชั่วโมง} และ T6_{530 °C, 2.5 ชั่วโมง}

จากรูป 4.16 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อใช้เวลาอบละลายที่ 1 , 2.5 และ 8 ชั่วโมง แสดงว่าอัตราการละลายซิติคอนและแมกนีเซียมมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกับการเพิ่มความแข็งชิ้นงาน โดยเทคนิค T4 รูปที่ 4.8 และพบว่าอัตราการเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบมีอัตราการเพิ่มที่ใกล้เคียงกัน (กราฟมีลักษณะคล้ายกัน)

4.1.3.7 สรุปการเพิ่มความแข็งของการอบชุบชิ้นงาน

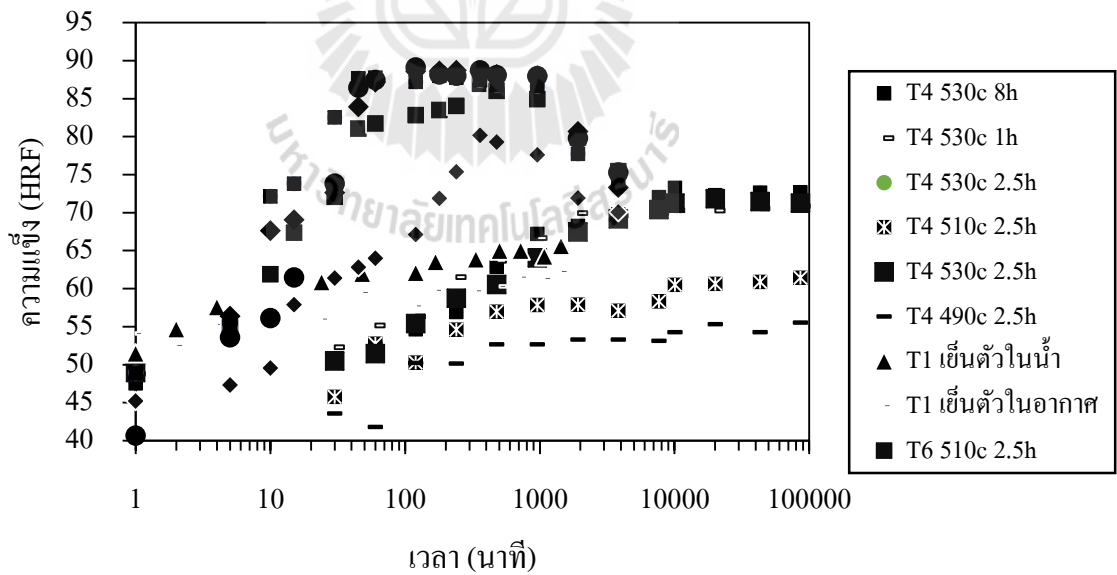
จากรูปที่ 4.17 เทคนิคการชุบแข็งชิ้นงานแบบ T6 ให้ค่าความแข็งสูงสุด โดยค่าความแข็งสูงสุดอยู่ในช่วงของอุณหภูมิอบละลาย 530 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 1 – 8 ชั่วโมง ขณะที่เทคนิคการชุบแข็งลักษณะ T4 ที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียสและเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมงให้ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบต่ำสุด

อัตราการเพิ่มความแข็งของชิ้นงานจะพบว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งของชิ้นงาน โดยเทคนิค T6 จะมีอัตราการเพิ่มความแข็งที่รวดเร็วและให้ค่าความแข็งสูงสุดเร็วกว่าเทคนิคการชุบแข็ง T1 และ T4



รูปที่ 4.16 ค่าความของของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งแบบ

T6_{530 °C}, 1 ชั่วโมง, T6_{530 °C}, 2.5 ชั่วโมง และ T6_{530 °C}, 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.17 แสดงความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบ T1 T4 และ T6

4.2 การทดสอบแรงดึง

4.2.1 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบโดยกรรมวิธี

T1

ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 เดือนพบว่า ชิ้นงานมีค่าความต้านทานความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เท่ากับ 222 เมกกาปาสคาล และค่าความเค้นวิกฤตที่ทำให้เกิดการคราก (Yield strength) เท่ากับ 111.7 เมกกาปาสคาล และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) เท่ากับ 6.1 เปอร์เซ็นต์

ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่นำมาเย็นตัวภายในน้ำทันทีหลังจากหล่ออัดขึ้นรูป และปล่อยให้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 เดือนพบว่า ค่าความต้านทานความแข็งแรงดึงสูงสุด เท่ากับ 236.4 เมกกาปาสคาล ค่าความเค้นวิกฤตที่ทำให้เกิดการครากเท่ากับ 236.4 เมกกาปาสคาลและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 6.5 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบโดยเทคนิค T1 พบว่า ชิ้นงานทดสอบที่เย็นตัวในน้ำทันทีหลังจากการหล่ออัดและเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้องให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าชิ้นงานทดสอบที่เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องหลังจากการหล่ออัดและเพิ่มความแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 4.1

4.2.2 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบโดยกรรมวิธี

T4

ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการหล่ออัด โดยใช้เทคนิคการอบชุบแบบ T4 ที่อุณหภูมิและเวลาอบชุบต่างๆเป็นดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการชุบแข็ง T4

| อุณหภูมิอบ ละลาย (เซลเซียส) | เวลาอบ ละลาย (เซลเซียส) | ค่าความต้านทาน แรงดึงสูงสุด (เมกกะปาสกาล) | ค่าความเค้น วิกฤต (เมกกะปาสกาล) | เปอร์เซ็นต์การยืด ตัว (%) |
|-----------------------------------|-------------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------|
| 490 | 2.5 | 242.2 | 120.6 | 12.7 |
| 510 | 2.5 | 266.6 | 144.2 | 12.6 |
| 530 | 2.5 | 278.5 | 146.9 | 12.9 |
| 530 | 8 | 264.3 | 140.6 | 11.3 |
| 530 | 1 | 275.8 | 148.5 | 10.4 |

จากตารางที่ 4.13 พบว่าคุณสมบัติเชิงกลของการอบชุบชิ้นงานโดยเทคนิค T4 ที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียสให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเค้นวิกฤตต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบชุบที่อุณหภูมิอื่น ขณะที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียสมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเค้นวิกฤตสูงที่สุด

ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นวิกฤตมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบละลายเพิ่มขึ้น ณ เวลาการอบละลายเท่ากัน นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 530 เวลาการอบละลาย 1 และ 2.5 ชั่วโมงให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นวิกฤตที่ใกล้เคียงกันแต่เมื่อเวลาอบละลายสูงขึ้น 8 ชั่วโมงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความเค้นวิกฤตลดลงใกล้เคียงต่ำกว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความเค้นวิกฤตที่อุณหภูมิอบละลาย 510 องศาเซลเซียสเวลาอบละลาย 2.5 ชั่วโมง

เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ 490 510 และ 530 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทดสอบมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาด้านเวลาการอบละลายพบว่าที่ระยะเวลาการอบละลายต่ำ 1 ชั่วโมงชิ้นงานทดสอบมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำและเพิ่มขึ้นเมื่อเวลา 2.5 ชั่วโมงและมีค่าลดลงเมื่อเวลาอบละลายเป็น 8 ชั่วโมง

4.2.1 ค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบโดยกรรมวิธี

T6

ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการหล่ออัด โดยใช้เทคนิคการอบชุบแบบ T6 ที่อุณหภูมิและเวลาอบชุบต่างๆเป็นดังตารางที่ 3.19

ตารางที่ 4.14 พบว่าคุณสมบัติเชิงกลของการอบชุบชิ้นงาน โดยเทคนิค T6 ที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียสให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเค้นวิกฤตต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การอบชุบที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียสมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ขณะที่ ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบที่อุณหภูมิ 490 มีอัตราการยืดตัวที่ต่ำที่สุดขณะที่ระยะ อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียสให้อัตราการยืดตัวที่สูงสุด

ความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความเค้นวิกฤตมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงและ เพิ่มขึ้น ณ เวลาการอบชุบเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเวลาการอบชุบพบว่าที่เวลาการอบชุบ 1 และ 2.5 และ 8 ชั่วโมงให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเค้นวิกฤตและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็ง ดังรูป ขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทดสอบ ที่เวลา 1 2.5 และ 8 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิลดลง 530 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการเพิ่มความแข็งของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.15

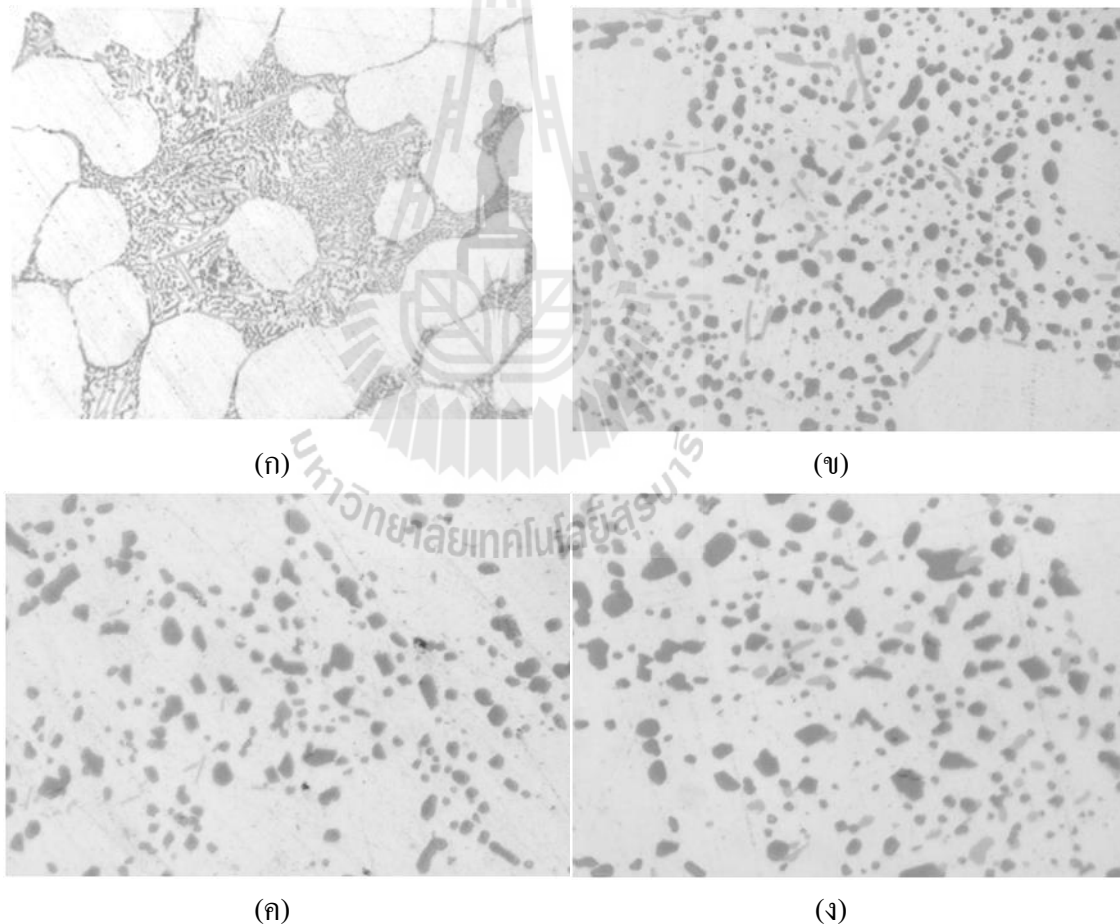
ตารางที่ 4.14 คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบแข็งแบบ T6

| อุณหภูมิลดลง (เซลเซียส) | เวลาอบชุบ (ชั่วโมง) | อุณหภูมิอบอ่อน (เซลเซียส) | เวลาอบชุบ (ชั่วโมง) | ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (เมกกะปาสคาล) | ค่าความเค้นวิกฤต (เมกกะปาสคาล) | เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%) |
|-------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|--|--------------------------------|--------------------------|
| 490 | 2.5 | 180 | 4 | 293.5 | 239 | 3.9 |
| 510 | 2.5 | | | 315.9 | 256.9 | 5.1 |
| 530 | 2.5 | | | 330.8 | 271.7 | 4.3 |
| 530 | 8 | | | 326.9 | 272 | 4.5 |
| 530 | 1 | | | 330.3 | 262.5 | 4.8 |

4.3 โครงสร้างจุลภาค

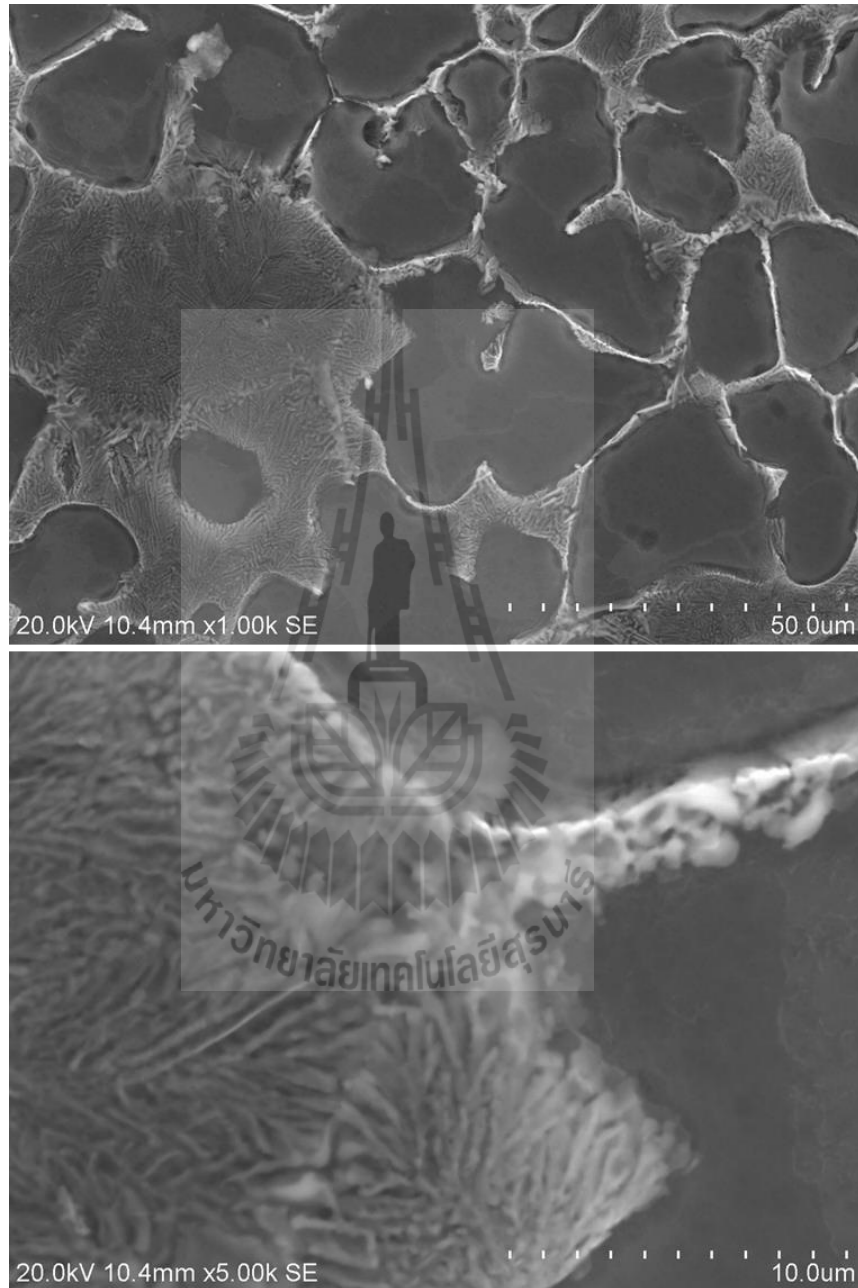
4.3.1 อิทธิพลของการชุบแข็งต่อโครงสร้างซลิคอน

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่อพบว่า จากรูปที่ (ก) และรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าหลังจากกระบวนการหล่อ โครงสร้างซลิคอนมีความละเอียดสูงเนื่องจาก อัตราการเย็นตัวของกระบวนการหล่ออัดที่สูงและ โครงสร้างซลิคอนรวมตัวกันเป็นเครือข่าย ผลึกซลิคอนมีรูปร่างเล็กและกลมลงเมื่อผ่านกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 °C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.18(ข) แต่ผลึกซลิคอนยังจับตัวกันเป็นเครือข่ายและเมื่อใช้ระยะเวลาการอบละลายที่สูงขึ้นผลึกซลิคอนบางส่วนมีรูปร่างที่ใหญ่ขึ้นและแยกตัวกันออกไป ไม่จับเป็นเครือข่าย ดังรูปที่ 4.18 (ค) และ (ง)



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกซลิคอนโดย ภาพ ก คือหลังจากงานหล่อ(As Cast) ภาพ ข ผ่านกระบวนการอบละลายที่ 530 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภาพ ค ผ่านกระบวนการอบละลายที่ 530 °C เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมงและ ภาพ ง ผ่านกระบวนการอบละลายที่ 530 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

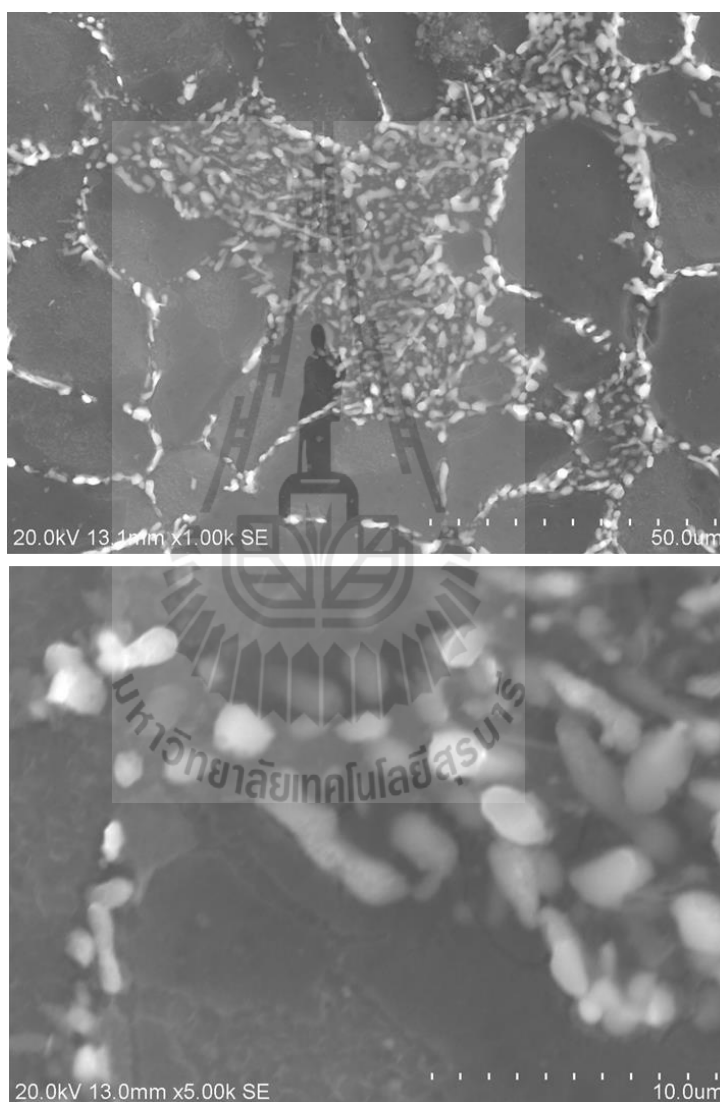
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังจากการหล่ออัด



รูปที่ 4.19 โครงสร้างซึลิกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัดและกระบวนการกัดกรด

4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง

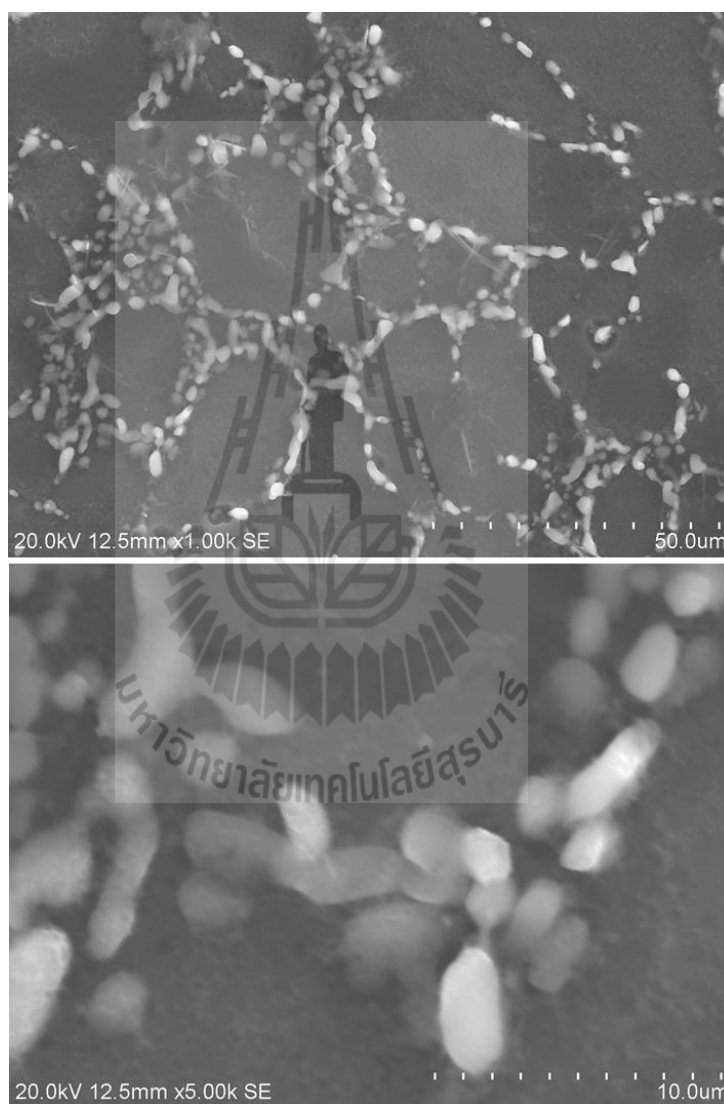
จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของซิลิกอนบางส่วนมีรูปร่างกลมมนและมีขนาดเล็ก บางส่วนที่มีรูปร่างเป็นก้อนวงรีขนาดที่ใหญ่ และบางส่วนมีรูปร่างเป็นแผ่น



รูปที่ 4.20 แสดงโครงสร้างผลึกซิลิกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัด อบละลายที่อุณหภูมิ 490 °C ระยะเวลา 2.5 ชั่วโมงและกัดกรด

4.3.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง

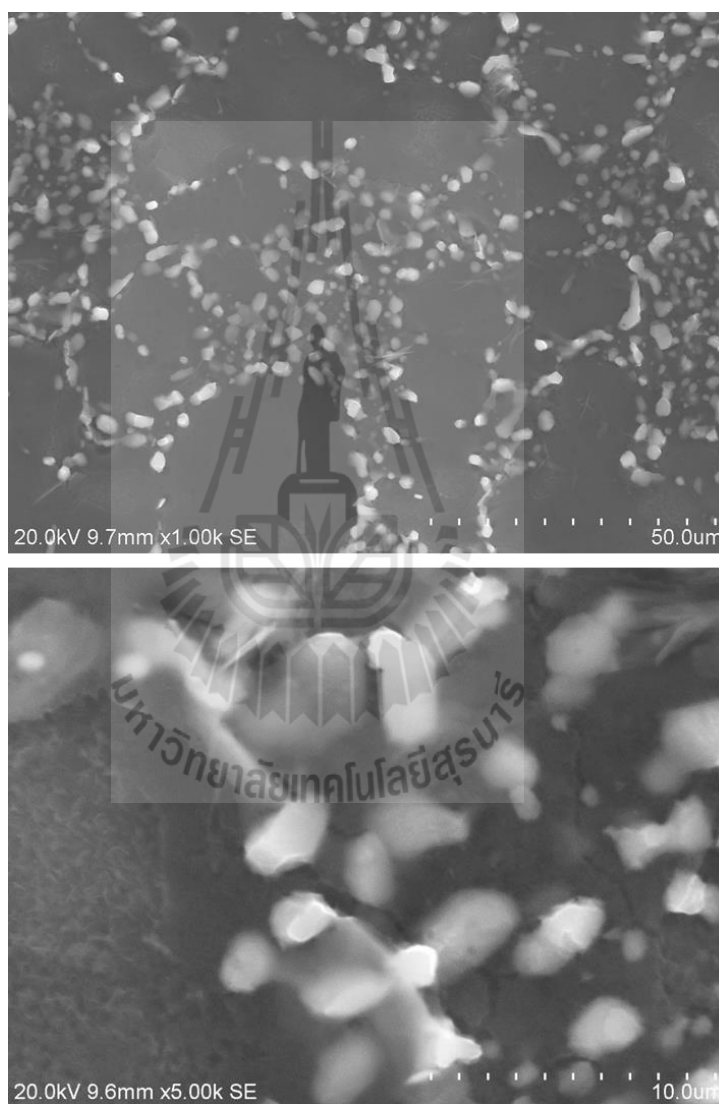
จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของซิลิกอนมีรูปร่างกลมมนและมีขนาดเล็ก บางส่วนที่มีรูปร่างเป็นก้อนวงรีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.21 โครงสร้างผลึกซิลิกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัด อบละลายที่อุณหภูมิ 510 °C ระยะเวลา 2.5 ชั่วโมงและกัดกรด

4.3.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เวลา 2.5 ชั่วโมง

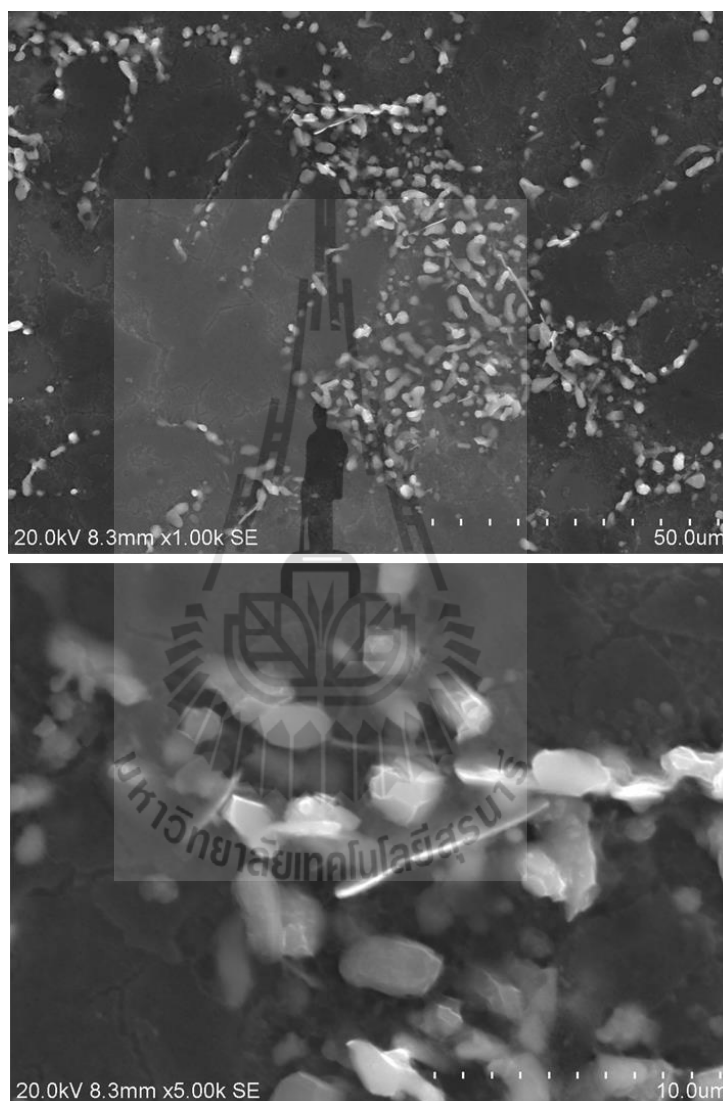
จากรูปที่ จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของซิลิกอนมีรูปร่างกลมมนและมีขนาดเล็กมาก



รูปที่ 4.22 แสดง โครงสร้างผลึกซิลิกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัด อบละลายที่อุณหภูมิ 530 °C ระยะเวลา 2.5 ชั่วโมงและกัดกรด

4.3.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง

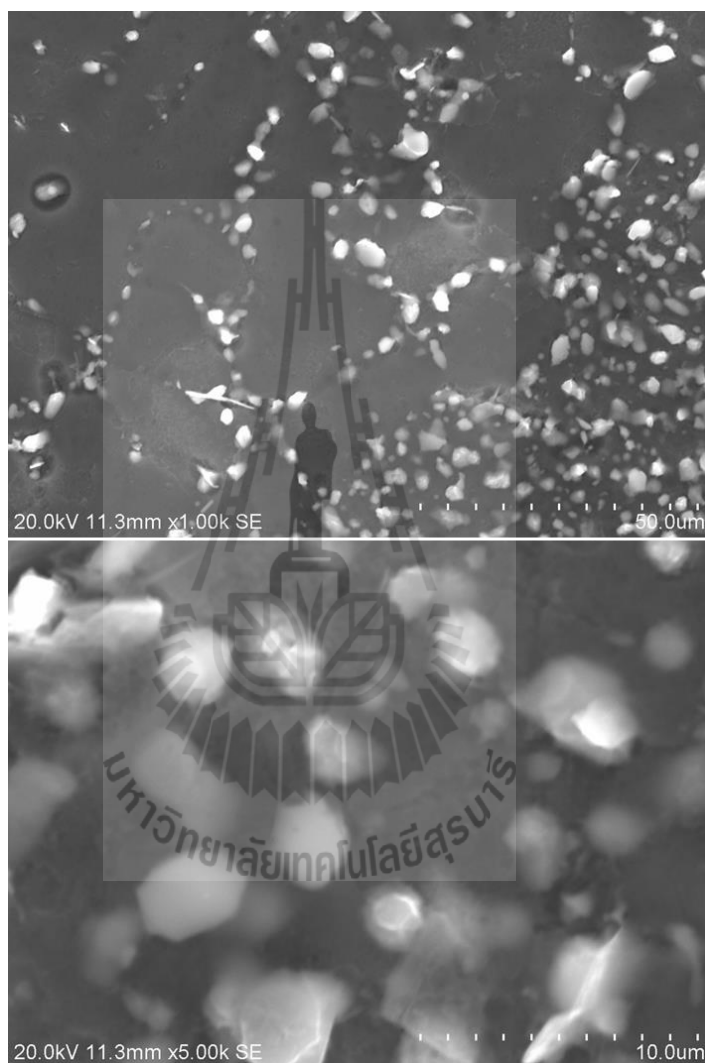
จากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของซิลิกอนมีรูปร่างกลมมนและมีขนาดเล็ก



รูปที่ 4.23 โครงสร้างผลึกซิลิกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัด อบละลายที่อุณหภูมิ 530 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมงและกัดกรด

4.3.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอบละลายที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.24 จะเห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของซิลิกอนมีรูปร่างกลมมนและมีขนาดเล็ก



รูปที่ 4.24 โครงสร้างผลึกซิลิกอนหลังจากกระบวนการหล่ออัด อบละลายที่อุณหภูมิ 530 °C ระยะเวลา 8 ชั่วโมงและกัดกรด

4.3.8 อิทธิพลของการชุปแข็งต่อโครงสร้างจุลภาค

จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่า รูปร่างของซิลิกอนของชิ้นงานทดสอบหลังจากการหล่อชิ้นงาน มีรูปร่างขนาดเล็กและมีความละเอียดสูง เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของกระบวนการหล่ออัดสูง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อให้ความร้อนของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส ผลึกซิลิกอนมีรูปร่างที่ค่อนข้างกลมและมีขนาดเล็กลงแต่พบว่ามีบางส่วนที่มีขนาดใหญ่และยังยึดติดกันเป็นโครงข่าย ต่อเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 510 องศาเซลเซียสผลึกซิลิกอนมีขนาดที่เล็กลงและ โครงสร้างเครือข่ายได้แยกออกจากกัน และเมื่ออุณหภูมิอบละลายที่ 530 องศาเซลเซียสอุณหภูมิอบละลายผลึกซิลิกอนมีรูปร่างใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมกันของซิลิกอน เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการอบละลายพบว่าที่เวลาอบละลาย 1 ชั่วโมงผลึกซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างกลมและมีขนาดเล็ก ต่อมาพบว่ารูปร่างของซิลิกอนมีความกลมมนและมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อเวลาอบละลายเป็น 2.5 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

บทนี้นำเสนอสรุปอิทธิพลของการชุบแข็งแบบตกตะกอนที่ส่งผลต่อ ค่าความแข็ง ความแข็งแรงและ โครงสร้างภายใน และเสนอข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยในอนาคต

5.1 การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานหล่อ

1. เทคนิคการอบชุบชิ้นงาน T6 ให้ค่าความแข็งสูงสุด คือ จากการทดลองพบว่า การอบชุบชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T6 ให้ค่าความแข็งของชิ้นงานสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการอบชุบชิ้นงาน T1 และ T4
2. อุณหภูมิในขั้นตอนการอบละลายส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน คือ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิอบละลายของเทคนิคการอบชุบ T4 และ T6 พบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายสูงขึ้น ขณะที่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายต่ำค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบจะต่ำ
3. อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ คือ จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อสูง(เย็นตัวในน้ำ) ค่าความแข็งของชิ้นงานสูงกว่าอัตราการเย็นตัวต่ำ(เย็นตัวในอากาศ)
4. การอบชุบชิ้นงานแบบ T1 ให้ค่าความแข็งที่สูง คือ จากการทดลองพบว่าอัตราการอบชุบชิ้นงานแบบ T1 ให้ค่าความแข็งของชิ้นงานสูงกว่าอัตราการอบชุบชิ้นงานแบบ T4 ที่อุณหภูมิอบละลาย 490 °C และเวลาอบละลายเท่ากับ 2.5 ชั่วโมง
5. กระบวนการหล่ออัดใช้ระยะเวลาการอบละลายเพื่อละลายซัลไฟคอนและแมกนีเซียมต่ำ จากการทดลองพบว่าระยะเวลาการอบละลาย 1 2.5 และ 8 ชั่วโมงในเทคนิคการอบชุบ T4 และ T6 ที่อุณหภูมิอบละลาย 530°C ให้ค่าความแข็งและอัตราการแข็งที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเทคนิค แสดงว่าระยะเวลาการอบละลาย 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิอบละลาย 530°C สามารถละลายผลึกซัลไฟคอนและแมกนีเซียมได้หมดและทำให้ชิ้นงานทดสอบอยู่ในสถานะของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Saturated Solid Solution) การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยเทคนิค T1 และ T4 อาจมีแนวโน้มการเพิ่มความแข็งที่สูงขึ้นหลังจาก

ระยะเวลาสูงสุดของการทดลองคือ 2 เดือนได้ ขณะที่การเพิ่มความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบโดยเทคนิค T6 กราฟค่าความแข็งมีแนวโน้มเป็นไปตามขั้นตอนการของการตกผลึก Mg_2Si ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ให้ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ

5.2 การเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ

1. อัตราการเย็นตัวสามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ คือ เมื่อพิจารณาการอบชุบเทคนิค $T1_{Air}$ และ $T1_{Water}$ ค่า Yield strength และ UTS ของการอบชุบแบบ $T1_{Air}$ มีค่าน้อยกว่าการอบชุบแบบ $T1_{Water}$
2. อุณหภูมิในขั้นตอนการอบละลายส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน คือ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิละลายของเทคนิคการอบชุบ T4 และ T6 พบว่าค่า Yield strength และ UTS ของชิ้นงานทดสอบสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายสูงขึ้น ขณะที่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบละลายต่ำ ค่า Yield strength และ UTS ของชิ้นงานทดสอบต่ำ
3. กระบวนการหล่ออัดใช้ระยะเวลาการอบละลายพบว่าระยะเวลาการอบละลาย 1 2.5 และ 8 ชั่วโมงในเทคนิคการอบชุบ T4 และ T6 ที่อุณหภูมิละลาย $530^{\circ}C$ ให้ค่า Yield strength และ UTS ที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเทคนิค แสดงว่าระยะเวลาการอบละลาย 1 ชั่วโมง

5.3 โครงสร้างจุลภาค

1. ผลึกซิลิกอนของชิ้นงานทดสอบหลังจากการหล่อมีขนาดเล็ก เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของกระบวนการหล่ออัดที่สูง
2. อุณหภูมิการอบละลายส่งผลให้ผลึกซิลิกอนมีรูปร่างกลมขึ้นโดยเมื่ออุณหภูมิการอบละลายสูงซิลิกอนจะมีรูปร่างที่กลมมากกว่าช่วงที่อุณหภูมิละลายต่ำ คือ ที่อุณหภูมิละลาย $490^{\circ}C$ ซิลิกอนมีรูปร่างกลมแต่ยังเห็นโครงสร้างที่เป็นเครือข่าย (Network of eutectic Si) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น $510^{\circ}C$ ผลึกซิลิกอนมีขนาดกลมและตัดขาดจากเครือข่ายเดิมและที่อุณหภูมิ $530^{\circ}C$ ผลึกซิลิกอนมีรูปร่างกลมและมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจาก เปลี่ยนรูปร่างของทรงกลม (Spheroidization) และการรวมตัวกันของผลึก (Particle coarsening)

3. ผลึกซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นผลึกที่มีความกลมมนอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงแต่ยังมีบางส่วนที่เป็นโครงข่ายยูเทคติก และเมื่อเวลาอบละลายเพิ่มขึ้นซิลิกอนมีรูปร่างกลมมนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะเวลาอบละลายที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของทรงกลม (Spheroidization) และการรวมตัวกันของผลึก (Particle coarsening)

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การหล่ออัดชิ้นงานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงควรรีบใช้ความเร็วของโลหะเหลวต่ำสุดเพื่อลดการกัดตัวของฟองอากาศซึ่งจะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเมื่อผ่านกระบวนการชุบแข็ง
2. เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T1 ควรนำชิ้นงานผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็วภายหลังจากการหล่ออัดทันที
3. เทคนิคการชุบแข็งแบบตกตะกอน T4 ควรนำชิ้นงานมาเพิ่มความแข็งแรงอย่างรวดเร็วหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการหล่ออัด
4. เทคนิคการชุบแข็ง T6 ควรให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังจากให้ความร้อนในกระบวนการอบละลายและให้ความร้อนกับชิ้นงานทันทีในขั้นตอนการอบละลาย

5.5 แนวทางวิจัยในอนาคต

ชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอนสามารถนำมาชุบแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ ส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติทางกลดีขึ้น ดังนั้นควรมีการศึกษาความสามารถในการชุบแข็งแบบตกตะกอนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอนโดยใช้อะลูมิเนียมผสมเกรดอื่นๆ

รายการอ้างอิง

- Abdel-Jaber, G., Omran, A., Khalil, K. A., Fujii, M., Seki, M., & Yoshida, A. (2010). An Investigation into Solidification and Mechanical Properties behavior of Al-Si Casting Alloys. **International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering**, 10(4).
- Abdulwahab, M., Madugu, I., Yaro, S., Hassan, S., & Popoola, A. (2011). Effects of multiple-step thermal ageing treatment on the hardness characteristics of A356.0-type Al-Si-Mg alloy. **Materials & Design**, 32(3), 1159-1166.
- Abdulwahab, M., Madugu, I. A., Yaro, S. A., Hassan, S. B., & Popoola, A. P. I. (2011). Effects of multiple-step thermal ageing treatment on the hardness characteristics of A356.0-type Al-Si-Mg alloy. **Materials & Design**, 32(3), 1159-1166. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.028>
- Apelian, D., Shivkumar, S., & Sigworth, G. (1989). Fundamental aspects of heat treatment of cast Al-Si-Mg alloys. **AFS transactions**, 97, 727-742.
- Aungsuwatkakul, C. (2011). **Enhancing the Efficiency of Management and Cost Reduction in Container Trailers: A Case Study of ABC Co., Ltd.** University of the Thai Chamber of Commerce.
- Barresi, J., Chen, Z., Davidson, C., Murray, M., Nguyen, T., St John, D., & Thorpe, W. (1996). **Casting of aluminium alloy components.** Paper presented at the MATERIALS FORUM-RUSHCUTTERS BAY-
- Bernard, N. C. (1925, Feb 5, 1925). Die casting - 1. **Machinery Forum.**
- Campbell, J. (2003). **Castings:** Butterworth-Heinemann.
- Doehler, H. H. (1951). **Die casting:** McGraw-Hill.

- Ghomashchi, M., & Vikhrov, A. (2000). Squeeze casting: an overview. **Journal of Materials Processing Technology**, 101(1), 1-9.
- Hanafee, J. (1963). Effect of Nickel on Hot Hardness of Aluminum-Silicon Alloys. **Modern Castings**, 44(4), 514-520.
- Herman, E. A., & Association, N. A. D. C. (1991). **Die Casting Process, Engineering and Control**: North American Die Casting Association.
- Jaradeh, M., & Carlberg, T. (2005). Effect of titanium additions on the microstructure of DC-cast aluminium alloys. **Materials Science and Engineering: A**, 413, 277-282.
- Linder, J., Axelsson, M., & Nilsson, H. (2006). The influence of porosity on the fatigue life for sand and permanent mould cast aluminium. **International Journal of Fatigue**, 28(12), 1752-1758.
- Lumley, R. (2010). **Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications**: Elsevier.
- Mo, W., Zhang, L., Wu, G., Zhang, Y., Liu, W., & Wang, C. (2014). Effects of processing parameters on microstructure and mechanical properties of squeeze-cast Mg-12Zn-4Al-0.5Ca alloy. **Materials & Design**, 63(0), 729-737. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.005>
- Nam, S. W., & Lee, D. H. (2000). The effect of Mn on the mechanical behavior of Al alloys. **Metals and Materials**, 6(1), 13-16.
- Saheb, N., Laoui, T., Daud, A., Harun, M., Radiman, S., & Yahaya, R. (2001). Influence of Ti addition on wear properties of Al-Si eutectic alloys. **Wear**, 249(8), 656-662.
- Shabestari, S., & Moemeni, H. (2004). Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, 153, 193-198.

- Shivkumar, S., Keller, C., & Apelian, D. (1990). Aging behavior in cast Al-Si-Mg alloys. **AFS Trans**, 98, 905-911.
- Singh, R. (2006). **Introduction to basic manufacturing processes and workshop technology**: New age International(P) Ltd.
- Sjölander, E., & Seifeddine, S. (2010). The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, 210(10), 1249-1259. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.03.020>
- Takach, B. V. (1993). **Pressure Die casting knowledge**. Australia: John Wiley & Sons.
- Taylor, J., St John, D., Barresi, J., & Couper, M. (2000). An empirical analysis of trends in mechanical properties of T6 heat treated Al-Si-Mg casting alloys. **International Journal of Cast Metals Research**, 12(6), 419-430.
- Taylor, J. A. (2004). **The effect of iron in Al-Si casting alloys**. Paper presented at the 35th Australian Foundry Institute National Conference.
- Vinarcik, E. J. (2002). **High Integrity Die Casting Processes**. New york: John Wiley & Sons.
- Zhang, M., Zhang, W.-w., Zhao, H.-d., Zhang, D.-t., & Li, Y.-y. (2007). Effect of pressure on microstructures and mechanical properties of Al-Cu-based alloy prepared by squeeze casting. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 17(3), 496-501. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(07\)60122-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60122-8)
- Zhu, M.-J., Ding, D.-Y., Gao, Y.-J., Chen, G.-Z., Ming, L., & Mao, D.-L. (2010). Effect of Zn content on tensile and electrochemical properties of 3003 Al alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 20(11), 2118-2123.



ภาคผนวก ก

การทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบ

การทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบ

ในการทดลองได้ศึกษาความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอนในแต่ละครั้ง และวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบในแต่ละโพรงแม่พิมพ์ และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA test ตั้งสมมุติฐานในการทดลองดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\text{กำหนดให้ } \alpha = 0.05$$

ตาราง ก1ค่าความแข็งของการทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบ

| ครั้งที่ | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ | |
|----------|----------------------------|------|
| | X1 | X2 |
| 1 | 56.2 | 55.1 |
| 2 | 56.3 | 55.9 |
| 3 | 55.8 | 56.8 |
| 4 | 55.1 | 56.1 |
| 5 | 55.1 | 55.4 |
| 6 | 55.4 | 55.5 |
| 7 | 56.4 | 55.4 |
| 8 | 56.7 | 56.3 |
| 9 | 56.7 | 56.3 |
| 10 | 55.3 | 56.8 |
| 11 | 56.5 | 56.5 |
| 12 | 55.9 | 56.9 |
| 13 | 56.8 | 56.0 |
| 14 | 56.3 | 55.1 |
| 15 | 55.1 | 56.4 |

และใช้โปรแกรม Micro soft excel ในการคำนวณตาราง ANOVA

Anova: Single

Factor

SUMMARY

| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> |
|---------------|--------------|------------|----------------|-----------------|
| Column 1 | 15 | 839.6 | 55.97333 | 0.39781 |
| Column 2 | 15 | 840.5 | 56.03333 | 0.376667 |

ANOVA

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-------------|-----------|-----------|----------|----------------|---------------|
| Between Groups | 0.027 | 1 | 0.027 | 0.069725 | 0.793672 | 4.195972 |
| Within Groups | 10.84266667 | 28 | 0.387238 | | | |
| Total | 10.86966667 | 29 | | | | |

จากตารางวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA พบว่าค่า P-value ของการทดลองมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ชี้นงานหล่อทดสอบที่ถูกขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบ แนวนอนในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาคผนวก ข

การทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบระหว่างโพรงของชิ้นงาน

การทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบ

ในการทดลองได้ศึกษาความแตกต่างของโปรแกรมพิมพ์ที่ใช้ชิ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอนในแต่ละครั้ง และวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบในแต่ละโปรแกรมพิมพ์ และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA test ตั้งสมมุติฐานในการทดลองดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\text{กำหนดให้ } \alpha = 0.05$$

ตาราง ก2 ค่าความแข็งของการทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบ

| ครั้งที่ | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ | |
|----------|----------------------------|------|
| | X1 | X2 |
| 1 | 55.5 | 55.7 |
| 2 | 55.9 | 55.2 |
| 3 | 56.5 | 56 |
| 4 | 55.9 | 55 |
| 5 | 55.5 | 55.4 |
| 6 | 55.9 | 56 |
| 7 | 56.9 | 55.9 |
| 8 | 55.6 | 56.1 |
| 9 | 55.7 | 56.8 |
| 10 | 55.8 | 55.5 |
| 11 | 55.9 | 56.6 |
| 12 | 56.9 | 55.2 |
| 13 | 56.5 | 56 |
| 14 | 56.9 | 55.3 |
| 15 | 55.5 | 55.3 |

และใช้โปรแกรม Micro soft excel ในการคำนวณตาราง ANOVA

Anova: Single

Factor

SUMMARY

| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> |
|---------------|--------------|------------|----------------|-----------------|
| X1 | 15 | 840.9 | 56.06 | 0.282571 |
| X2 | 15 | 836 | 55.73333 | 0.279524 |

ANOVA

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|---------------|
| Between Groups | 0.800333 | 1 | 0.800333 | 2.847679 | 0.102617 | 4.195972 |
| Within Groups | 7.869333 | 28 | 0.281048 | | | |
| Total | 8.669667 | 29 | | | | |

จากตารางวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA พบว่าค่า P-value ของการทดลองมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ชิ้นงานหล่อทดสอบที่ถูกขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบ แนวนอนในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาคผนวก ค

ความแตกต่างภายในชิ้นงาน

การทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบ

ในการทดลองได้ศึกษาความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบแนวนอนในแต่ละครั้ง และวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบโดยวัดค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบในแต่ละโพรงแม่พิมพ์ และใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA test ตั้งสมมุติฐานในการทดลองดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

กำหนดให้ $\alpha = 0.05$

ตาราง ก3 ค่าความแข็งของการทดสอบความแตกต่างของชิ้นงานทดสอบ

| ครั้งที่ | ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบ | |
|----------|----------------------------|------|
| | X1 | X2 |
| 1 | 56.2 | 55.1 |
| 2 | 56.3 | 55.9 |
| 3 | 55.8 | 56.8 |
| 4 | 55.1 | 56.1 |
| 5 | 55.1 | 55.4 |
| 6 | 55.4 | 55.5 |
| 7 | 56.4 | 55.4 |
| 8 | 56.7 | 56.3 |
| 9 | 56.7 | 56.3 |
| 10 | 55.3 | 56.8 |
| 11 | 56.5 | 56.5 |
| 12 | 55.9 | 56.9 |
| 13 | 56.8 | 56.0 |
| 14 | 56.3 | 55.1 |
| 15 | 55.1 | 56.4 |

และใช้โปรแกรม Micro soft excel ในการคำนวณตาราง ANOVA

Anova: Single

Factor

SUMMARY

| <i>Groups</i> | <i>Count</i> | <i>Sum</i> | <i>Average</i> | <i>Variance</i> |
|---------------|--------------|------------|----------------|-----------------|
| Column 1 | 15 | 839.6 | 55.97333 | 0.39781 |
| Column 2 | 15 | 840.5 | 56.03333 | 0.376667 |

ANOVA

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-------------|-----------|-----------|----------|----------------|---------------|
| Between Groups | 0.027 | 1 | 0.027 | 0.069725 | 0.793672 | 4.195972 |
| Within Groups | 10.84266667 | 28 | 0.387238 | | | |
| Total | 10.86966667 | 29 | | | | |

จากตารางวิเคราะห์ทางสถิติ ANOVA พบว่าค่า P-value ของการทดลองมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ชี้นงานหล่อทดสอบที่ถูกขึ้นรูปโดยกระบวนการหล่ออัดทางอ้อมแบบ แนวนอนในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาคผนวก จ

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Nattawat Pinrath, Weerachai Arjharn, Chakkrist Phongphisutthinan, Pongsak Dulyapraphant . (2014). **Influence of Heat treatment on Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg Alloy Produced by squeeze Casting**. Paper presented at the 8th International Conference on Materials Science and Technology.

Nattawat Pinrath, Weerachai Arjharn, Prapakorn Pitayachaval, Watcharakorn Susiwab, Pongsak Dulyapraphant. (2015). **Effect of parameter in high pressure die casting on surface quality**. Paper presented at 9th SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM (SEATUC) SYMPOSIUM.



**Influence of Heat treatment on Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg Alloy Produced by squeeze
Casting**

Nattawat Pinrath^a, Weerachai Arjarn^a

Chakkrist Phongphisutthinan^b, Pongsak Dulyapraphant^b

^a*Suranaree University of technology, Nakhonratsima, 30000, Thailand.*

^b*National Metal and Materials Technology Center, Pathum Thani, 12120, Thailand*

*nattawatpinrath@gmail.com

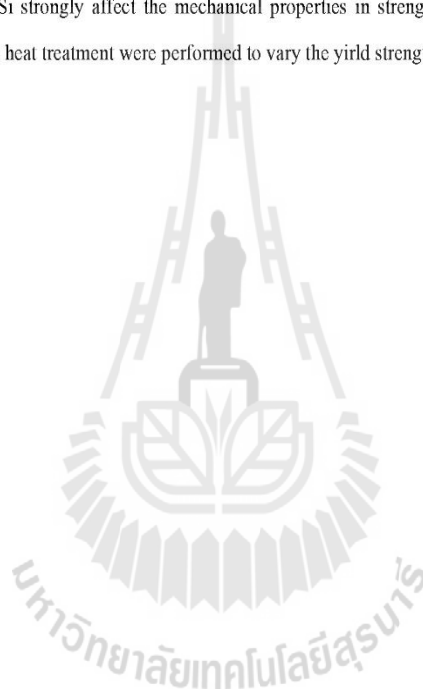
Keywords : Heat treatment, aluminium alloy, squeeze casting

Today the automotive industries demand material with good mechanical properties, Environment friendly and energy efficiency. Aluminum alloys are lightweight materials which can be produced in many product depending on the manufacturing process. Casting is the most common manufacturing process of aluminum alloys. However, the major drawbacks for conventional advanced casting techniques, e.g., high pressure die casting (HPDC) are the formation of defect such as air entrapment, shrinkage porosity and microporosity.

High strength aluminum alloys can be produced by squeeze casting in order to minimize the defects in the conventional casting process. Squeeze casting is a combination process of conventional casting and applying pressure. This process requires non turbulence flow which can produce air entrapment during die filling. Moreover, the squeeze casting or applying pressure can increase the solidification rate and minimize the porosity during solidification. Therefore heat treatment can be applied on the squeeze casting product in order to maximize the mechanical properties of the heat treatment cast aluminum alloys.

This research investigated the influence of T4, T5 and T6 heat treatment and natural aging of specimen of Al-Si-Cu-Mg alloys produced by squeeze casting process. Various solution treatment (at 460^oC, 480^oC, 495^oC and 530^oC) Incorporating with artificial aging (at 180^oC) and natural aging were performed. Hardness test (HRB) and tensile test were performed to evaluate the mechanical properties of the heat treatment specimens.

The results showed that the squeeze cast specimens are heat treatable at high temperature without blistering. Good improvements of the mechanical properties are achieved by the heat treatment. The maximum hardness value depends on the solution temperature and holding time. The peak hardness was found at 495°C because of the presence of Cu. Higher solution temperature accelerates the peak aging time. Solid solution temperature also affects the morphologies of the intermetallic compounds. Si phase becomes more spheroidized depending on the solid solution temperature. Tensile test results show that the control of both precipitation hardening and spheroidization of Si strongly affects the mechanical properties in strength and elongation. Finally, various combinations of the heat treatment were performed to vary the yield strength, ultimate strength and elongation.



Effect of parameter in high pressure die casting on surface quality

Nattawat Pinrath^a, Weerachai Arjarn^a, Prapakorn Pitayachaval^a
Watchrakorn Susiwab, Pongsak Dulyapraphant^b

^aSuranaree University of technology, Nakhonratsima, 30000, Thailand.

^bNational Metal and Marerials Technology Center, Pathum Thani, 12120, Thailand

ABSTRACT

Beside die and liquid temperature, Surface's Quality of HPDC part also depend on the level of back pressure inside. In this study, Effect of back air pressure on the surface quality is instigated. A commercial casting process simulation software in used to identify the process parameters contributing to the surface quality of the casting based on the level of back air pressure. A bearing housing is used as a case study. Then casting experiment is performed to validate the result from simulation. Result from the study has shown that (1) Flow pattern of liquid metal inside cavity (2) area of vent (3) speed of liquid metal pass though the ingate area (4) fill time are four main process parameters affect the quality of casting surface

1. INTRODUCTION

High pressure die casting (HPDC) is one of most economical casting process for manufacturing precision shaped parts in mass production and capable of producing casting with good surface finish [1]. In high pressure die casting process Liquid metal (generally aluminium, magnesium or zinc) is injected into the steel die high speed and under high pressure through complex gate and runner systems.

Today's competitive environment high pressure die casting process is playing a vital role in meeting the needs of modern manufacturing industries by reducing lead time from design to manufacture and facilitating high volume economical production of complex automotive parts (such as automatictransmission housing, piston heads, gear box components, etc.) requiring better surface finish and higher dimensional accuracy, as high as 0.2% of casting dimensions

Surface's quality in casting depends on three main parameters, Die roughness, Metal molten temperature and level of air back pressure. The level of Air back pressure occurs during stage of filling die cavity, In HPDC, the liquid metal was injected with high pressure and high speed into the metal mold through narrow gate and runner systems. The molten metal velocity at ingate can be as high as several 30 100 meters per hour, Molten metal filling die cavity quickly made the air inside the cavity is expelled by vent. If the air cannot ejected before the die cavity is completely filled up or the volume of metal flow exceeds the volume of air escaping out of the die cavity, The air inside the mold cavity will be compressed and air back pressure can be created [2] .In addition to surface's quality problems, Air back pressure lead to increase the filling time change filling sequence [3] incomplete die filling and main cause for porosity[4] and [5]

In this study, we study effect of process parameter on air back pressure using computer simulation program (magma software) and casting experiment. In casting experiment air back pressure describe by surface quality.

2. EXPERIMENT

2.1 Simulation program

Computer simulation of casting mold filling has been used by engineers to evaluate and optimize geometry design of castings and dies (or molds) as well as casting processing parameter. In this study using simulation software called Magma for describe. Magma software applied by finite differential mathematical model through the enmeshment. The simulation starts from the beginning of HPDC casting process (filling the molten metal in to shot sleeve) until the end of process (remove casting out from die). The program is capable of displaying the factors related to casting process such as molten metal flow pattern and velocity while filling mold cavity, pressure, molten metal temperature inside mold cavity, filling time and metal cooling rate after filled to the die. The procedures are as follows:

1. Create the 3D model (by CAD) and acquire to the 3D model file to the simulation program. These parts should be specified; biscuit size, the position of vent and CC point.
2. Enmeshment: In the Magna software, the shape of mesh is continuous cubic (the shape of mesh affects the program's accuracy) See Fig1
3. Determination of program parameters
 - 3.1 Materials (determination of injection materials, die coating material and die cooling system which affect to the calculation of sample cooling rate and heat transfer during injection)
 - 3.2 Machines (determination of injector size, distances and diameter of plunger)
 - 3.3 Injection procedures (determination of die surface cleaning procedures while injecting in maximum/minimum speed and the distance of maximum/minimum speed.
 - 3.4 Determination of die opening time and the time usage when taking the sample out from die



Fig1. Shown Enmeshment of housing bearing

2.2 Validate simulation

Comparison between simulation result and actual casting. The comparison was conducted using result from calculation and actual casting, by considering at calculated flow pattern. The flow pattern at each position of plunger distance as shown in figure 2 was used for comparison. As shown in figure of plunger distance in each position, the flow pattern from simulation software was similar to the result from actual injection.



Figure 3 bearing housing sample

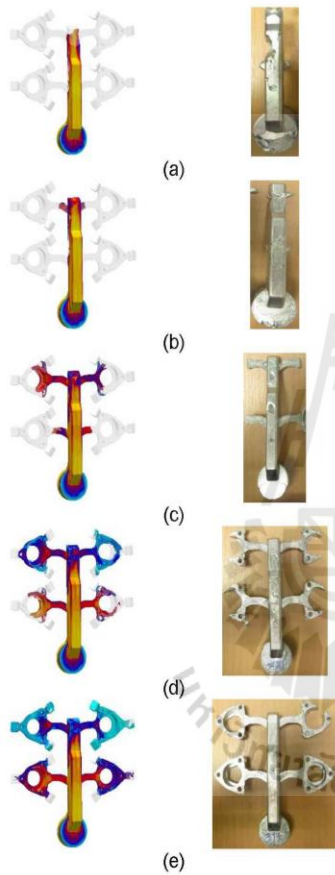


Figure 2 compare flow pattern from simulation program with actual casting (a) at plunger position 275 mm (b) at plunger position 280 mm (c) at plunger position 290 mm (d) at plunger position 300 mm (e) at plunger position 313 mm

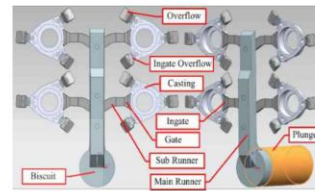


Figure 4 Cast sample



Figure 5 surface quality

In fig 6, Flow pattern is cause of air entrapment and the overflow will be filled by molten metal and sealed vent ingate before completely as shown in Figure 7. It affect to ventilation. Low time consumed led to high quantity of remained air which remained air will be pushed to the end filling position (Area A in fig 5) and self-compressed, As a result to higher pressure as area A as shown in Figure 7 and led to surface quality after casting as Figure 5

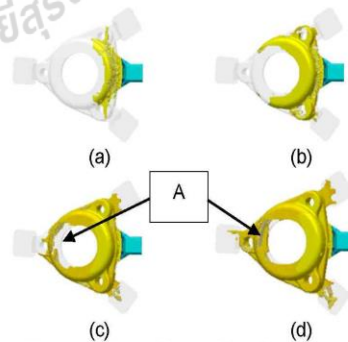


Figure 5 shown flow pattern in mold cavity

2.3 Using simulation techniques to solve the problem of remained air pressure in the bearing housing sample.

Figure 3 shown the bearing housing sample which is molded by HPDC. Casting sample shown in Figure 4. Currently, the problem of surface quality of bearing housing as shown in Figure 5. In this experiment using casting simulation program call Magma software, to analysis problem. The flow pattern from magma software shown in Figure 6.

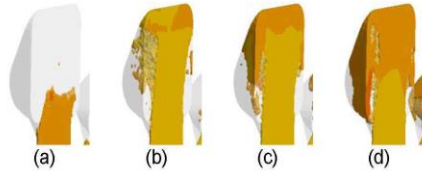


Figure 6 shown flow pattern in overflow

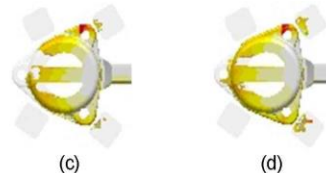


Figure 9 Flow pattern in die cavity when add bridge.

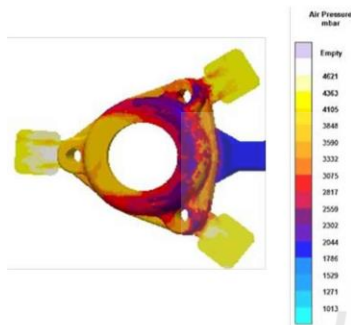


Figure 7 shown air pressure in bearing housing sample

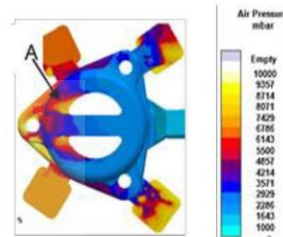


Figure 10. Air pressure in die cavity when add bridge.

3. Resulting & Analysis

3.1 The pattern of molten metal flow in die cavity.

The study in the influence of flow pattern led to the die design to change the flow pattern by adding bridge as Figure 8 for change flow pattern and reduce fill time in area A. The experimental result from simulation program found the flow as shown in Figure 9. Flow pattern after add bridge led to the improved filling at area A and the remained air in die was release to the end position of filling. But the high air pressure at some positions in area A are found as Figure 10. Due to the flow pattern of molten metal can't fill the area A well, and at area A, the flow pattern led to air entrapment as shown in Figure 9(c) and (d) and resulted in higher pressure

3.2 Molten metal flow speed during passing ingate.

The study in the influence of velocity of molten metal flow during passing ingate area was conducted by ingate area. The affect of ingate area as an equation;

$$A(\text{plunger}) \times V(\text{plunger}) = A(\text{ingate}) \times V(\text{ingate}) \quad (1)$$

The size and speed of plunger are constant, there are inverse variation between molten metal speed while passing ingate with ingate area. In the experiment, the size of ingate was increased as Figure 11(a) which shows the existing ingate area and Figure 11(b) show the adjusted ingate area. The ingate speed calculated from above formula ; 51.67 m/s for existing speed and 23.49 m/s for new speed (2 m/s of plunger speed and 60 mm of plunger diameter).

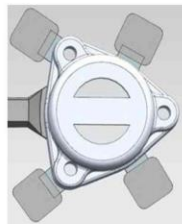


Figure 8 shown bearing sample add bridge

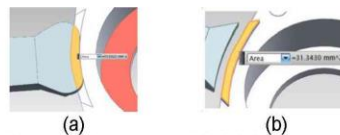
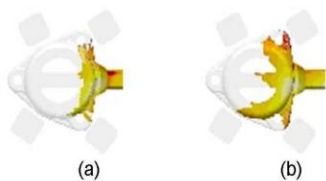


Figure 11. Ingate area (a) Original ingate area (b) Increase ingate area



The results obtained from simulation software found that when ingate area was increased, the air pressure at area A was reduced as shown in figure 12(b). Because of increased ingate area led to lower ingate speed, the time usage for filling die cavity was greater led to better air released at vent because of the remained air in die has longer time to be released.

When compared to the actual casting sample, the increased size ingate provided higher surface quality.

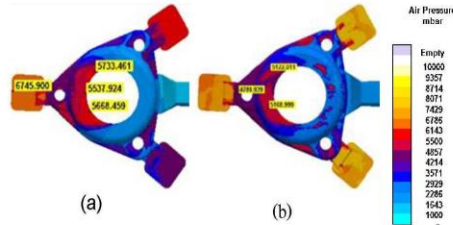


Figure 12. (a) Air pressure in bearing housing old (b) Air pressure in bearing housing old when increase ingate area

Figure 18 (a) Overflow in current (b) Increase Overflow

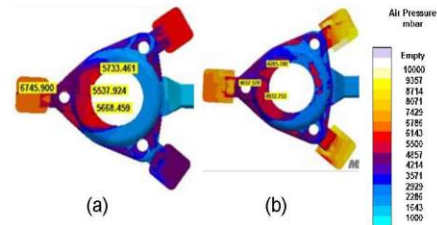


Figure 19 (a) Air pressure in current mold (b) Air pressure when increase overflow

3.3 Size of vent

Experiment for influence size of vent will be conducted by actual sample casting. Since there're some limitations of Magma software, the vent simulated shape can not made to similar to actual. The depth of vent was increased from 20 μm to 40 μm as shown in figure 13. After actual injection, we've found that the increased vent size led to higher quality surface sample see in fig 14 because the better air releasing come from deeper vent as observed from greater vent flash.

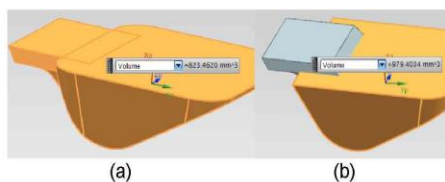


Figure 13. (a) Original vent (b) Vent when increase depth



Figure 14. Surface quality when increase vent

The overflow size increase experiment was conducted by simulation software. The overflow size was expanded from existing and the volume of overflow was increased as Figure 15. The results indicated when overflow size was increased, the air pressure was lower. When the volume of overflow increased, the remained air was better released and the overflow confine more air volume, then the remained air was reduced while the air pressure at overflow was higher as Figure 16.



(a) (b)

3.4 Time usage of die filling by molten metal

From the experiment of filling time adjustment by adjust the characteristics of overflow to increase time usage in die filling. As the overflow changed as figure 17, the remained air pressure in die was reduced due to the increased time of shutting ingate of vent by molten metal as shown in Figure 18. Due to the change of flow pattern of molten metal while filling overflow, the time usage for releasing is longer and the remained air reduced which affects to air pressure

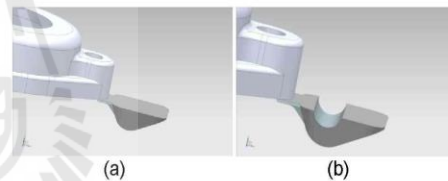


Figure 20 (a) Original overflow design (b) Redesign overflow

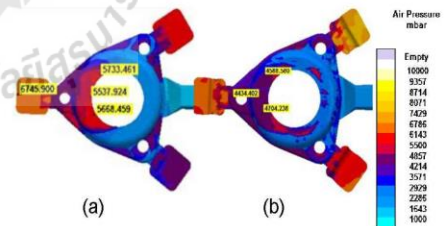


Figure 21 (a) Air pressure in current design (b) Air pressure when change overflow shape

4. Conclusion

From the study of air back pressure which affects to the problem of flow line in housing bearing, the factors influent to air pressure are:

1. Flow pattern of molten metal while filling die: the air back pressure occurred at the last filling position or the position of air confinement due to the non-flat filling flow of molten metal.
2. The speed of molten metal while passing ingate: when molten metal speed affects to air pressure, the high speed of molten metal while passing ingate led to the less time for releasing (faster filling) and resulted in high remained air in die. The lower speed of molten

metal while passing ingate led to longer time of air releasing due to the longer filling time.

3. The size of vent affects to air releasing rate: better air releasing comes from larger area and the remained air pressure in die is reduced.

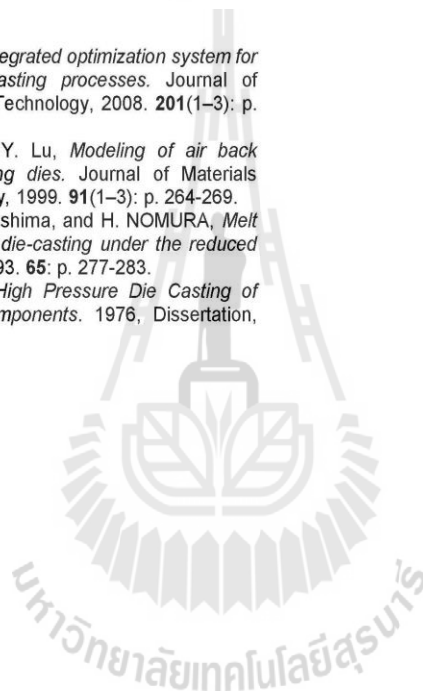
4. The time used in injection affects to the air releasing rate: when increased the time of filling at vent ingate, it affects to longer air releasing time and the remained air pressure in die is reduced.

6. Acknowledge

This research has been supported by the research and development supporting fund, Suranaree University of Technology and Near Net Shape Metal Manufacturing Lab, National Metal and Materials Technology Center

5. REFERENCES

1. Kong, L.X., et al., *Integrated optimization system for high pressure die casting processes*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **201**(1–3): p. 629-634.
2. Lee, W.B. and H.Y. Lu, *Modeling of air back pressure in die-casting dies*. Journal of Materials Processing Technology, 1999. **91**(1–3): p. 264-269.
3. Tanaka, K., K. Terashima, and H. NOMURA, *Melt filling behavior during die-casting under the reduced pressure*. Foundry, 1993. **65**: p. 277-283.
4. Lee, W.-B., *The High Pressure Die Casting of Quality Thin-Wall Components*. 1976, Dissertation, Brunel University.



ประวัติผู้เขียน

นายณัฐวัฒน์ พิณรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดภูเก็ต เริ่มการศึกษา
ระดับอนุบาลศึกษาที่โรงเรียนเซนต์ปอลหนองคาย จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาระดับ
มัธยมศึกษาจากโรงเรียนปทุมเทพวิทยาคารจังหวัดหนองคาย ภายหลังจากได้ศึกษาต่อใน
ระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2552 ในสาขา
วิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2556 ภายหลังจาก
สำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรม
ศาสตร์ และได้นำเสนอบทความทางวิชาการชื่อ Influence of Heat treatment on Mechanical Properties
of Al-Si-Cu-Mg Alloy Produced by squeeze Casting ที่โรงแรมสวิสโฮเทล เลอ คองคอร์ด

