ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249120

การลดปัญหาการหลวมคลายในระบบการต่อหุ้มฉนวนสำหรับงานเหล็กหล่อ

นาย ณัฐดิษย์ หลายอยู่เจริญ

โครงงานวิศวกรรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

b00253627

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชา
249120

การลดปัญหาการหลวมคลอนในกระบวนการหล่อหุ้มอะลูมิเนียมบนชิ้นงานเหล็กหล่อ

นายกิตติชัย หลงอยู่เจริญ วศ.บ. (วิศวกรรมการผลิต)

โครงงานวิจัยอุตสาหการรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2553

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบโครงงานวิจัยอุตสาหกรรม

พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข ..... ประธานกรรมการสอบโครงงานวิจัยอุตสาหกรรม
(ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิจัยอุตสาหกรรม
(รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร)

ไพบูลย์ ช่วงทอง ..... กรรมการ
(ดร.ไพบูลย์ ช่วงทอง)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อการศึกษาโครงการเฉพาะเรื่อง	การลดปัญหาการหลวมคลอนในกระบวนการหล่อหุ้มอะลูมิเนียมบนชิ้นงานเหล็กหล่อ
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายกิตติชัย หลงอยู่เจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2553

บทคัดย่อ

249120

โครงงานวิจัยอุตสาหกรรมนี้เป็นการศึกษาถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาการหลวมคลอนในการหล่อหุ้มซึ่งหล่อหุ้มเหล็กหล่อด้วยอะลูมิเนียมเกรด AC4CH โดยใช้กระบวนการหล่อแบบแรงโน้มถ่วง (Gravity Die Casting) และผ่านกระบวนการบ่มแข็ง T6 (Solution + Quench + Artificial Aging)

เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา ได้ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชิ้นงานที่เกิดการหลวมคลอน และไม่หลวมคลอน ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับผลกระทบจากอุณหภูมิในการอุ่นชิ้นงานเหล็กหล่อ ระบบทางวิ่งแบบ Top Gate กับ Tilting กระบวนการเย็นตัวหลังกระบวนการทางความร้อน และกระบวนการบ่มแข็ง โดยประเมินการหลวมคลอนด้วยการวัดขนาดของช่องว่างระหว่างชิ้นงานเหล็กหล่อและอะลูมิเนียม

จากการวิจัยพบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดการหลวมคลอนของชิ้นงานเหล็กหล่อในการหล่อหุ้ม เกิดจากระบบทางวิ่งในงานหล่อ และกระบวนการบ่มแข็ง ซึ่งระบบทางวิ่งแบบ Top Gate มีผลที่ทำให้ขนาดของช่องว่างกว้างกว่าแบบ Tilting เนื่องจากระบบทางวิ่งแบบ Top gate ส่งผลทำให้เกิดปริมาณของออกไซด์ที่มากกว่า และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งจะมีขนาดของช่องว่างที่กว้างกว่าชิ้นงานที่ไม่บ่มแข็ง เนื่องจากการที่เหล็กหล่อและอะลูมิเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน

เพื่อลดปัญหาการหลวมคลอน จึงอาจทำได้โดยการเลือกใช้ระบบทางวิ่งแบบ Tilting และเปลี่ยนสารตัวกลางในการชุบ โดยการผสมตัวกลางชุบชนิดพอลิเมอร์ลงไปในน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อลด

249120

อัตราการเย็นตัวให้ช้าลง หรือเลือกใช้วัตถุดิบที่ไม่ต้องทำการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุด้วยกระบวนการบ่มแข็ง เช่น เปลี่ยนวัสดุจากอะลูมิเนียมเกรด AC4C เป็น ADC12 แต่ต้องเปลี่ยนกระบวนการหล่อเป็นแบบฉีดแรงดันสูง

คำสำคัญ: กระบวนการบ่มแข็ง (T6) / AC4CH / ADC12 / Top Gate / Tilt / Gating System

Industrial Research Project Title	Reduction of Loosing Defect of Iron Part in Aluminum Insert Casting
Industrial Research Project Credits	6
Candidate	Mr.Kittichai Longyoocharoen
Industrial Research Project Advisor	Assoc. Prof. Dr.Chaowalit Limmaneevichitr
Program	Master of Engineering
Field of Study	Metallurgical Engineering
Department	Production Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2553

Abstract

249129

The purpose of the research was to study the cause of loosing defect found in cast iron part of aluminum insert casting that casting AC4CH aluminum by gravity die Casting and precipitation hardening process (Solution treatment, quench, and artificial aging).

The preheating temperature of cast iron was studied. The top gate system and tilting system were compared during cool down process after casting and during precipitation hardening. The results of temperature comparison will be correlated with the tightness of iron part by means of gap measurement between iron part and aluminum casting.

The results revealed the loosing defect was closely related to the design of gating system and heat treatment process. Castings from top gate system showed larger gap than that of tilting system. It was believed that top gate system resulted in more oxide films. The castings after precipitation hardening showed larger gap than non-precipitated casting. The major reason was believed to be from different thermal expansion coefficients.

Tilting gate system was implemented together with changing a quenching media to be a mixture of polymer quenchant and water at the suitable ratio. It may be possible to change the material from AC4C to ADC12 to avoid precipitation hardening process. However, this must be done by high pressure die casting process.

249120

Keywords: Heat Treatment (T6) / AC4CH / ADC12 / Top Gate / Tilt / Gating System

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมฉบับนี้ ประสบความสำเร็จตามเป้าหายที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เชาวลิต ลิ้มมณีวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่คอยกรุณาให้คำปรึษา แนวความคิดและความรู้ อันมีคุณค่าแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง รวมทั้งฝึกฝนให้มีความอุตสาหะ พยายามในการศึกษาและขอขอบพระคุณ บริษัทเอนไกไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ รวมทั้งสนับสนุนวัสดุ กระบวนการผลิต และอำนวยความสะดวก ในการทดลอง และศึกษาการยึดเกาะของ Insert Casting กับอะลูมิเนียม

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดาของข้าพเจ้า บิดาและมารดาของภรรยา และภรรยา ที่เป็นกำลังใจ ทำให้ข้าพเจ้ามีความพยายาม ในการศึกษาจนทำโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมสำเร็จลุล่วง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำโครงงานวิจัยอุตสาหกรรมระดับบัณฑิตศึกษาฉบับนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
รายการตาราง	ฌ
รายการรูปประกอบ	ฎ

บทที่

1. บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงาน	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**5**
2.1 ข้อมูลทั่วไปของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด JIS AC4C	5
2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน	6
2.3 อิทธิพลของส่วนประกอบทางเคมีที่มีต่ออะลูมิเนียมผสม	9
2.4 Age Hardening หรือ Precipitation Hardening	11
2.5 หลักการทำงานของเครื่อง Spark Emission Spectrometer	16
3. การดำเนินงานวิจัย	**18**
3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย	18
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	19
3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	20
3.4 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	24
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	26
3.6 ออกแบบการทดลองเพื่อหาสาเหตุของปัญหา	29

4. ผลการทดลองและวิจัย **32**

4.1 วิเคราะห์ชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน และไม่หลวมคลอน 32

4.2 วิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting 40

4.3 วิเคราะห์ความแตกต่างของกระบวนการหล่อหุ้ม 50

4.4 วิเคราะห์ความแตกต่างของกระบวนการเย็นตัวหลังการหล่อ 53

4.5 วิเคราะห์ความแตกต่างของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการ T6 และผ่านกระบวนการ T6 56

5. สรุป / อภิปรายผล / ข้อเสนอแนะ **63**

5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง 63

5.2 ข้อเสนอแนะ 62

เอกสารอ้างอิง **67**

ภาคผนวก **68**

ก รูปภาพขนาดช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมจากการทดลอง 69

ประวัติผู้วิจัย **96**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	การเทียบเกรดของอะลูมิเนียมผสมตามมาตรฐานสากลต่างๆ	5
2.2	ส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆ ของอะลูมิเนียมผสมตามมาตรฐาน	5
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียม หล่อเกรด A356 ในการทดลอง	19
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของ Insert Casting เหล็กหล่อกราไฟต์ก้อนกลม เหล็ก-ซิลิกอน-คาร์บอน-แมงกานีส เกรด FCD450 ในการทดลอง	19
4.1	ขนาดของช่องว่างของชิ้นงานที่หลวมคลอน	33
4.2	ขนาดของช่องว่างของชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน	34
4.3	ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 100 ^{o}C	42
4.4	ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 200 ^{o}C	43
4.5	ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 300 ^{o}C	44
4.6	ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 400 ^{o}C	45
4.7	ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 500 ^{o}C	46
4.8	ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 550 ^{o}C	47
4.9	ขนาดของช่องว่างจากกระบวนการหล่อแบบ Tilt	51
4.10	ขนาดของช่องว่างจากกระบวนการหล่อแบบ Tilt ที่เย็นตัวด้วยอากาศ + T6	54
4.11	ขนาดของช่องว่างจากกระบวนการหล่อแบบ Tilt ที่เย็นตัวด้วยอากาศ	57
5.1	คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียม AC4C และ ADC12	64
ก.1	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม ของชิ้นงานที่ Insert Casting ไม่หลวมคลอน	69
ก.2	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม ของชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน	71
ก.3	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม ของชิ้นงานที่อุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิ 100 ^{o}C	73
ก.4	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม ของชิ้นงานที่อุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิ 200 ^{o}C	75
ก.5	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม ของชิ้นงานที่อุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิ 300 ^{o}C	77

ก.6	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่อุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิ 400 °C	79
ก.7	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่อุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิ 500 °C	81
ก.8	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่อุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิ 550 °C	83
ก.9	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt (ชิ้นที่ 1)	85
ก.10	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt (ชิ้นที่ 2)	86
ก.11	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt (ชิ้นที่ 3)	87
ก.12	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt ที่เย็นตัวในอากาศ + T6 (ชิ้นที่ 1)	88
ก.13	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt ที่เย็นตัวในอากาศ + T6 (ชิ้นที่ 2)	89
ก.14	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt ที่เย็นตัวในอากาศ + T6 (ชิ้นที่ 3)	90
ก.15	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt ที่เย็นตัวในอากาศ (ชิ้นที่ 1)	91
ก.16	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt ที่เย็นตัวในอากาศ (ชิ้นที่ 2)	92
ก.17	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ Tilt ที่เย็นตัวในอากาศ (ชิ้นที่ 3)	93
ก.18	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ High Pressure Die Casting (ด้านที่ 1)	94
ก.19	แสดงรูปภาพขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หล่อแบบ High Pressure Die Casting (ด้านที่ 2)	95

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	การหล่อหุ้ม Insert Casting	1
1.2	ลักษณะของช่องว่างที่ทำให้เกิดการหลวมคลอน	1
1.3	แผนผังกระบวนการหล่อหุ้มที่เกิดปัญหา Insert Casting หลวมคลอน	2
2.1	ตัวอย่างชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตจากอะลูมิเนียมเกรด JIS AC4CH	6
2.2	แผนภาพสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน	7
2.3	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม Hypo-Eutectic	7
2.4	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม Eutectic	8
2.5	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม Hyper-Eutectic	8
2.6	ภาพจำลองการตกตะกอนของโลหะผสม (ก) Non-Coherent Precipitation (ข) Coherent Precipitation	11
2.7	เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมที่เหมาะจะทำ Precipitation Hardening	12
2.8	เฟสไดอะแกรมของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง	12
2.9	ขั้นตอนการทำ Age Hardening	12
2.10	เฟสจากการทำ Age Hardening เปรียบเทียบกับการปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ	13
2.11	ลักษณะของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการทำ Age Hardening	14
2.12	ภาพจำลองอนุภาคโลหะผสม (a) โลหะผสมขณะที่ยังเป็น Super-saturated Solid Solution (b) โลหะผสมที่เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง (θ'') อย่างเหมาะสม (c) โลหะผสมที่เกิดจากการตกตะกรอนของเฟสที่สอง (θ'') มากเกินไป	15
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการบ่มแข็งกับความแข็งของชิ้นงาน	15
2.14	อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่มโลหะผสมต่อความแข็งแรง ณ จุดคราก	16
2.15	เครื่อง Spark Emission Spectrometer	17
2.16	การวางชิ้นงานในช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง Spark Emission Spectrometer	17
3.1	เครื่องยิงเม็ดเหล็ก (Shot Peening)	20
3.2	เม็ดเหล็กกล้าที่ใช้ยิง (Steel Ball)	20
3.3	เตาหลอมอะลูมิเนียม	21
3.4	เบ้าไฟฟ้าชนิดขดลวดต้านทาน	21
3.5	เครื่องหล่อแบบอาศัยแรงโน้มถ่วง	22
3.6	แบบหล่อทำจากเหล็ก SKD11	22

3.7	เตาอบ Solution และบ่มแข็ง (T6)	23
3.8	แสดงภาพรวมของกระบวนการผลิต	23
3.9	อุปกรณ์ และขั้นตอนในการตรวจสอบการคลอนของดุมล้อ	24
3.10	เครื่องขัดแบบจานหมุนอัตโนมัติ	24
3.11	กระดาษทราย, และผ้าสักหลาด	25
3.12	กล้องส่องจุลภาพ (Microscope)	25
3.13	ดุมล้อ Insert Casting	26
3.14	ขดลวดสำหรับอุ่นดุมล้อ โดยควบคุมอุณหภูมิด้วย Sensor	26
3.15	หลอมอะลูมิเนียม โดยควบคุมอุณหภูมิโดยเปิด และปิดหัวเผาอัตโนมัติ	27
3.16	เกรนซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างด้วย Sr	27
3.17	การเทน้ำอะลูมิเนียมลงในแบบหล่อ	28
3.18	การวัดขนาดช่องว่างในแต่ละส่วนของดุมล้อ	28
4.1	กราฟเปรียบเทียบชิ้นงานที่ดุมล้อหลวมคลอน และไม่หลวมคลอน	34
4.2	การป้อนเติมน้ำอะลูมิเนียมที่เพียงพอกับอัตราการหดตัวของน้ำอะลูมิเนียม	36
4.3	การป้อนเติมน้ำอะลูมิเนียมที่ไม่เพียงพอกับอัตราการหดตัวของน้ำอะลูมิเนียม	36
4.4	ตัดขวางส่วนบน และผิวของอะลูมิเนียมส่วนบนชิ้นงานที่หลวมคลอน	37
4.5	ตัดขวางส่วนกลาง และผิวของอะลูมิเนียมส่วนกลางชิ้นงานที่หลวมคลอน	37
4.6	ตัดขวางส่วนล่าง และผิวของอะลูมิเนียมส่วนล่างชิ้นงานที่หลวมคลอน	37
4.7	ตัดขวางส่วนบน และผิวของอะลูมิเนียมส่วนบนชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน	38
4.8	ตัดขวางส่วนกลาง และผิวของอะลูมิเนียมส่วนกลางชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน	38
4.9	ตัดขวางส่วนล่าง และผิวของอะลูมิเนียมส่วนล่างชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน	39
4.10	ผิวของอะลูมิเนียม และส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่หลวมคลอน	39
4.11	ผิวของอะลูมิเนียม และส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน	40
4.12	Sensor ควบคุมอุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting	41
4.13	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 100 ^{O}C	42
4.14	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 200 ^{O}C	43
4.15	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 300 ^{O}C	44
4.16	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 400 ^{O}C	45
4.17	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 500 ^{O}C	46
4.18	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 550 ^{O}C	47
4.19	กราฟ Box Pot เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยช่องว่างในแต่ละอุณหภูมิ	48
4.20	แสดงรูปดุมล้อที่กลึงผิวงานหล่อของดุมล้อ Insert ไม่หมด	48

4.21	ตัดขวางดุมล้อที่อุ่นที่อุณหภูมิ 100 ^{O}C	49
4.22	ตัดขวางดุมล้อที่อุ่นที่อุณหภูมิ 550 ^{O}C	49
4.23	การหล่อแบบเทด้านบน (Top Gate)	50
4.24	การหล่อแบบรินน้ำอะลูมิเนียม (Tilt)	50
4.25	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่หล่อหุ้มแบบ Tilt	52
4.26	กราฟ Box Pot เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยช่องว่างการหล่อทั้ง 2 แบบ	52
4.27	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่หล่อหุ้มแบบ Tilt ที่เย็นตัวด้วยอากาศ + T6	55
4.28	กราฟ Box Pot เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยช่องว่างการเย็นตัวทั้ง 2 แบบ	55
4.29	แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่หล่อหุ้มแบบ Tilt ที่เย็นตัวด้วยอากาศ	58
4.30	กราฟ Box Pot เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยช่องว่างชิ้นงานที่ T6 และไม่ T6	58
5.1	Phase ใหม่ที่เกิดขึ้นที่ผิว และ Kirkendall Voids ที่เกิดหลัง T6	62
5.2	กราฟอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของเปอร์เซ็นต์ Polymer	63
5.3	ชิ้นงานที่ Quench หลังกระบวนการ Solution	63
5.4	เปรียบเทียบช่องว่างของชิ้นงานที่หล่อด้วยวิธีการต่างๆ	64