



อุณหภูมิเท และความยาวของรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความ
แข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น
EFFECTS OF POURING TEMPERATURE AND COOLING PLATE LENGTH ON
MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF A319 ALUMINUM ALLOYS BY
COOLING PLATE LENGTH TECHNIQUE

นายพงศกร พงษ์พวง รหัส 54361558
นายยศนนท์ สมนศรี รหัส 54361619
นายอดิศร พลอินทร์ รหัส 54361657

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2557



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ อุดหนุนมิเท และความยาวของรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความ
แข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น

ผู้ดำเนินโครงการ นายพงศกร พงษ์พวง รหัส 54361558
นายศนนท์ สมศรี รหัส 54361619
นายอดิศร พลอินทร์ รหัส 54361657

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์อุปถัมภ์ นาครักษ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์นฤมล สีพลไกร)

ชื่อหัวข้อโครงการ	อุณหภูมิเท และความยาวของรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายพงศกร	พงษ์พวง	รหัส 54361558
	นายยศนนท์	สมศรี	รหัส 54361619
	นายอดิศร	พลอินทร์	รหัส 54361657
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์กฤษณา	พูลสวัสดิ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2557		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก เกรด เอ 319 ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิเทและความยาวของรางเทโลหะหลอมเหลว เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทเป็น 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส และความยาวของรางเทเป็น 150 และ 300 มิลลิเมตร จากการนำชิ้นงานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาควิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่เกรนและความแข็ง

จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิเทต่างกัน ผิวของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเทสูง จะมีความเรียบผิวสูง และมีรูพรุนมาก โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีความกลมใกล้เคียงกันทุกอุณหภูมิเท โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าประมาณ 0.46 แต่ที่อุณหภูมิเทต่ำ โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบที่ความยาวรางเทเท่ากันและมีความแข็งแรงมาก โดยเฉลี่ยประมาณ 118 HB และเมื่อเปรียบเทียบที่ความยาวของรางเทต่างกัน พบว่าผิวของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาวน้อย มีความเรียบผิวสูง และมีรูพรุนมาก โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีความกลมใกล้เคียงกันทุกความยาวของรางเท โดยเฉลี่ยประมาณ 0.47 แต่ที่ความยาวของรางเทมาก โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีขนาดเล็ก และมีความแข็งแรงมาก โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าความแข็งแรงประมาณ 116 HB และเมื่อเปรียบเทียบ ทุกตำแหน่งของชิ้นงาน พบว่าบริเวณตำแหน่งขอบชิ้นงาน โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีความกลมมากกว่าบริเวณอื่น ๆ โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าประมาณ 0.41 มีขนาดเล็กที่สุดและมีความแข็งแรงโดยเฉลี่ย 120 HB

Project title	Effects of Pouring Temperature and Cooling Plate Length on Microstructure and Hardness of A319 Aluminum Alloys by Cooling Plate Length Technique		
Name	Mr. Phongsakon	Phongphuang	ID. 54361558
	Mr. Yossanon	Somsri	ID. 54361619
	Mr. Adisorn	Pol-in	ID. 54361657
Project advisor	Miss. Krisana	Poolawat	
Major	Materials Engineering		
Department	Industrial Engineering		
Academic year	2014		

Abstract

This project studied the aluminium alloys grade A 319 by cooling plate technique. The objectives studied pouring temperature at 680, 700 and 720 degree Celsius and cooling length at 150 and 300 millimeters. After that, the samples were investigate on microstructure, shape factor, grain area and hardness.

The samples at high pouring temperature were low surface roughness and high porosity fraction. Moreover, the microstructure of high pouring temperature samples had similar shape factor around 0.46. However, the samples of low pouring temperature were small size microstructure at all the cooling length and the shape factor had around 0.47. In the same time, the samples of long cooling length were small size microstructure at all the pouring temperature and the hardness had about 116 HB. The position edge of all samples had globular more than other positions. Shape factor had around 0.41 and the hardness had around 120 HB.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูล และความช่วยเหลือทางด้านต่าง ๆ ตลอดจนแนะนำวิธีการในการแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา จนสามารถทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์ อาจารย์อุปลัมภ์ นาครักษ์ และ อาจารย์นฤมล สีพลไกร ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และ นักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ รวมไปถึงการแนะนำใช้อุปกรณ์ และเครื่องมืออย่างถูกวิธี

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นสถานที่ในการศึกษาความรู้ให้กับผู้ทำโครงการ จนงานลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาคารปฏิบัติการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นสถานที่ในการใช้เตาแก๊สหลอดมโลหะ กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และเครื่องมือต่าง ๆ ภายในอาคารจนงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องค่าใช้จ่าย และกำลังใจจนสามารถศึกษา ทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายพงศกร พงษ์พวง

นายยศนนท์ สมศรี

นายอดิศร พลอินทร์

มิถุนายน 2558

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน.....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ.....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมซิลิคอน.....	4
2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง (Semi-solid Metal Processing).....	8
2.3 กลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว.....	12
2.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง.....	15
2.5 ปัจจัยรูปร่าง และพื้นที่ของเกรน (Shape Factor and Grain Area).....	16
2.6 การทดสอบความแข็ง.....	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	24
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	25
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	33
4.1 ผิว และรูปทูน.....	33
4.2 โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่ของเกรน และความแข็งของชิ้นงานหล่อ.....	41
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 บทสรุป.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ การพัฒนา.....	55
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไขปัญหา.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	65
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	85
ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
2.1 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยประมาณ).....	7
2.2 Jeffries Method ที่ค่ากำลังขยายต่าง ๆ	17
2.3 ความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test).....	21
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 (ร้อยละโดยน้ำหนัก).....	25
ก.1 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร	59
ก.2 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร	60
ก.3 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร	61
ก.4 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร	62
ก.5 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร	63
ก.6 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร	64
ข.1 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า	66
ข.2 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า	67
ข.3 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	68
ข.4 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า	69
ข.5 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	70
ข.6 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.7 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร.....	82
ค.8 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร.....	82
ค.9 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร.....	83
ค.10 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร.....	83
ค.11 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร.....	84
ค.12 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร.....	84
ง.1 ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็ง โดยผ่านเทคนิครางเทหล่อเย็น ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร อุณหภูมิเท 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส.....	86
ง.2 ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็ง โดยผ่านเทคนิครางเทหล่อเย็น ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร อุณหภูมิเท 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส.....	87

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน.....	4
2.2 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก.....	5
2.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนยูเทคติก.....	6
2.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก.....	7
2.5 การเกิดโครงสร้างระหว่างโครงสร้างระหว่างการแข็งตัว ในสภาวะกึ่งแข็ง.....	9
2.6 แผนภาพแสดงวิธีกระบวนการตักโซแคสติง (Thixocasting).....	10
2.7 แผนภาพแสดงวิธีกระบวนการรีโอแคสติง (Rheocasting).....	10
2.8 กระบวนการที่ใช้แรงทางกลในการกวนโลหะหลอมเหลว.....	11
2.9 เตาหลอมแม่เหล็กไฟฟ้า.....	11
2.10 การหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น.....	12
2.11 เกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางเทหล่อเย็น.....	12
2.12 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว.....	13
2.13 ภาพจำลองการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของเดนไดรต์ จากผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ.....	14
2.14 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test).....	20
2.15 หัวกด และรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบบริเนล.....	20
3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	24
3.2 เตาหลอมโลหะโดยใช้แก๊ส.....	25
3.3 รางเทหล่อเย็น.....	26
3.4 แม่พิมพ์โลหะ.....	26
3.5 เบ้าหลอมกราไฟท์เคย์.....	27
3.6 เครื่องขัดโลหะ (Grinder Polisher) แบบจานคู่.....	27
3.7 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope).....	28
3.8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลยี่ห้อ GALILEO รุ่น ERGOTEST COMP 25.....	28
3.9 ชุดวัดอุณหภูมิ (Digital Thermometer) และสายวัดอุณหภูมิ ประเภทเค (Type K).....	28
3.10 การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น.....	30
3.11 ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำมาทำการวิจัย.....	31
3.12 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน..... 34
4.2	ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน..... 35
4.3	รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน..... 36
4.4	รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน..... 37
4.5	ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน 38
4.6	ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน 38
4.7	ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน 39
4.8	รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน 40
4.9	รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน 41
4.10	รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน 41
4.11	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก..... 42
4.12	ปัจจัยรูปร่าง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร..... 43
4.13	ปัจจัยรูปร่าง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร..... 43
4.14	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร 44
4.15	พื้นที่เกรน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร 45
4.16	พื้นที่เกรน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร 45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ค่าความแข็งของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร.....	46
4.18 ค่าความแข็งของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร	46
4.19 ปัจจัยรูปร่าง เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง	47
4.20 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร	48
4.21 พื้นที่เกรน เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	49
4.22 ค่าความแข็งของชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	50
4.23 ปัจจัยรูปร่าง เมื่อความยาวของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง	51
4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ความยาวของรางเทต่างกัน ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส.....	51
4.25 พื้นที่เกรน เมื่อความยาวของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	52
4.26 ค่าความแข็งของชิ้นงานเมื่อความยาวของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น และแนวโน้มในการใช้งานสูงมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น ความสามารถในการหล่อ (Castability) ด้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) ทนต่อการสึกหรอ (Wear Resistance) มีความแข็ง (Hardness) และ ความแข็งแรง (Strength) และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ (Low Thermal Expansion Coefficient) เป็นต้น ซึ่งอะลูมิเนียมที่นำมาศึกษาเป็นอะลูมิเนียม เกรด เอ 319 เป็นที่รู้จัก และใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย เช่น เสื้อสูบ ข้อเหวี่ยง และชิ้นส่วนประกอบยานพาหนะ เนื่องจากมีความเหนียวและความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ทำให้มีความต้องการในตลาดอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก

กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งเป็นเทคโนโลยีสำหรับการขึ้นรูปโลหะซึ่งมีความแตกต่างจากเทคโนโลยีการขึ้นรูปโดยทั่วไป คือการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็งนี้จะมีสถานะที่เป็นทั้งของเหลว และของแข็งปนอยู่ด้วยกัน จะมีอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะไม่เป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Non-dendritic Structure) โครงสร้างที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะมีลักษณะเกรนกลม (Globular Structure) ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงสูง กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งซึ่งทำให้ได้โครงสร้างเกรนกลมนั้นมีได้หลายวิธี เช่น การกวนทางกล (Mechanical Stirring) การเติมธาตุเพื่อปรับสภาพเกรน (Grain Refining Element) การเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope) เป็นต้น โดยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น เป็นกระบวนการที่มีข้อดีอยู่มากมาย เช่น รูพรุนบนชิ้นงานจะน้อย ชิ้นงานมีความแข็ง เป็นต้น

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงได้ทดลองนำกระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งแบบการเทผ่านรางเทหล่อเย็นมาใช้กับอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลว และความยาวของรางเท ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ขนาด รูปร่างของเกรน และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 ซึ่งจากการศึกษาโครงการวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาอุตสาหกรรมประเภทอะลูมิเนียมผสมให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิเทที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค พื้นที่ รูปร่างของเกรน และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319

1.2.2 เพื่อศึกษาความยาวของรางเทหล่อเย็น ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค พื้นที่ รูปร่างของเกรน และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน

พื้นที่ รูปร่างของเกรน และความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เท และความยาวของรางเทหล่อเย็น

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ

1.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ และรูปร่างของเกรนอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความยาวของรางเทหล่อเย็น

1.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความยาวของรางเทหล่อเย็น

1.4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค ลักษณะรูปร่าง พื้นที่ของเกรน ที่มีผลต่อสมบัติทางด้านความแข็งของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319

1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319

1.5.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเท คือ 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส

1.5.3 รางเทหล่อเย็น ทำจากทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความยาว 150 และ 300 มิลลิเมตร โดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น ที่ความชัน 45 องศา

1.5.4 แม่พิมพ์ทำจากเหล็ก ขนาดชิ้นงาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร

1.5.5 ใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope) ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

1.5.6 วิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง และวัดพื้นที่ของเกรน

1.5.7 ทดสอบความแข็งแบบบริเนล

1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

ตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2557 ถึง มิถุนายน พ.ศ.2558

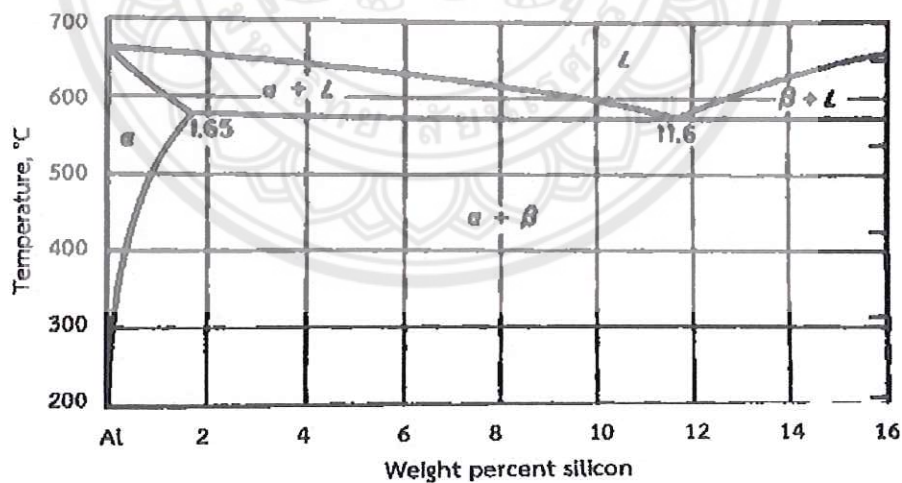
บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมหล่อ กระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็ง ด้วยวิธีการแผ่นรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Techniques) เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การวิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง และพื้นที่ของเกรนเกรน การทดสอบความแข็งของวัสดุ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน

อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนได้รับความนิยมสำหรับอุตสาหกรรมการหล่อโลหะ ขึ้นรูปโลหะ ทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติด้านการหล่อ (Castability) ที่ดี สามารถนำไปกลึง ไส ตัด หรือ เชื่อมได้นอกจากนั้นยังทนต่อการเกิดการกัดกร่อน (Corrosion) และหากนำไปผสมกับโลหะอื่น เช่น แมกนีเซียม ทองแดง ทำให้สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลโดยกระบวนการทางความร้อนได้อีกด้วย ปัจจุบันมีการใช้งานอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนเป็นหลักมากถึง ร้อยละ 75-80 ของโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ เพื่อให้การผลิต และการนำอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน ไปใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ



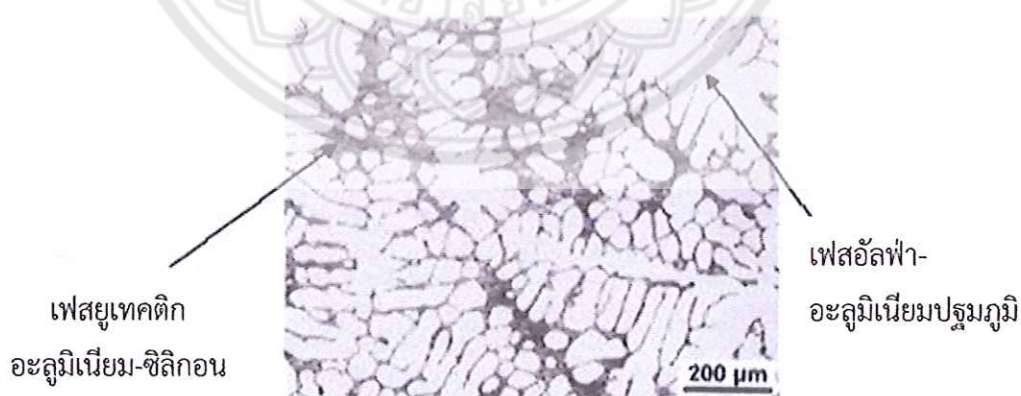
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอน [1]

เมื่อพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียมผสม-ซิลิกอน พบว่าที่ส่วนผสมของซิลิกอนประมาณร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 577 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมจะมีจุดหลอมเหลวต่ำสุด ที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction) โดยเรียกอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่มีส่วนผสมทางเคมี ที่จุดปฏิกิริยายูเทคติก นี้ว่าเป็นอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนยูเทคติก แต่หากอะลูมิเนียม

ผสมซิลิกอน มีปริมาณซิลิกอนอยู่น้อยกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าเป็นอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic Alloys) และในกรณีที่มีซิลิกอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.6 โดยน้ำหนักจะเรียกว่าเป็นอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic Alloys) ทั้งนี้ อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนแต่ละเกรดมีความต้องการเทคนิคสำหรับปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโลหะวิทยาที่แตกต่างกัน และยังมีธาตุอื่น ที่สามารถผสมลงไปประกอบ เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ให้ดีขึ้นเช่นมีการเติมแมกนีเซียม ทองแดง และ นิกเกิล โดยเมื่อเติมในปริมาณเล็กน้อยจะช่วยให้ การปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยวิธีทางความร้อนได้นอกจากนั้นแล้วการมีทองแดงผสมอยู่ในอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนยูเทคติกจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความสามารถการนำความร้อน แต่จะสูญเสียความเหนียว และการต้านทานการกัดกร่อน [1]

2.1.1 อะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทคติก

อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน ที่มีองค์ประกอบแบบไฮโปยูเทคติกซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกอนต่ำกว่าร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก จะประกอบไปด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) และมีโครงสร้างของยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน (Eutectic Al-Si) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้มีช่วงของการแข็งตัวกว้าง (Wide Freezing Range) ดังแสดงรูปที่ 2.2 โดยส่วนใหญ่แล้ว อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนักเนื่องจากข้อจำกัดด้านสมบัติทางกล ดังนั้น อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก มักได้รับการผสมทองแดง หรือแมกนีเซียม รวมเข้าไปด้วย เช่น ASTM A319 ASTM A355 และ ASTM A356 เพื่อให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยกรรมวิธีการตกตะกอนได้

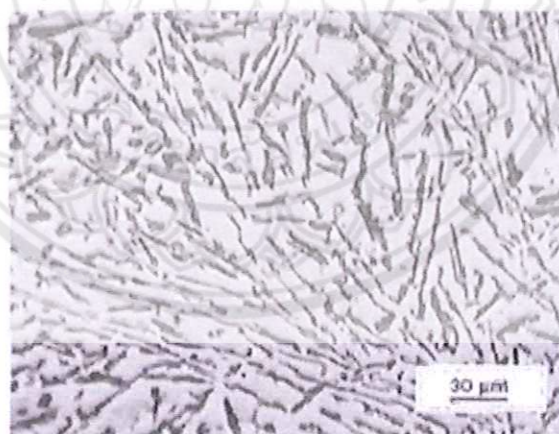


รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก [1]

2.1.2 อะลูมิเนียมผสมยูเทคติก

อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนยูเทคติก (Al-Si Eutectic) สามารถใช้งานได้โดยตรงในลักษณะของโลหะผสมที่อบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงไม่ได้ (Non-heat Treatable Alloys) เช่น ASTM A413

หรือสามารถผสมธาตุทองแดง แมกนีเซียม หรืออื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยกลไกการตกตะกอน เช่น ASTM A336 และ ASTM A360 โลหะอะลูมิเนียมผสมเหล่านี้จะไหลตัวในสภาพหลอมเหลวได้ดีมาก สามารถหล่อได้ทั้งในแบบหล่อทราย (Sand Casting) และแบบหล่อถาวร (Permanent Mold) ส่วน ASTM A413 เมื่อผสมทองแดงจะทำให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น เช่น ASTM A413 จะทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่า ทำให้สามารถใช้เป็นชิ้นงานหล่อสำหรับเรือเดินทะเล ข้อต่อของยานพาหนะ ตัวถัง และคอมไพตาถนน เป็นต้น เฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน (Eutectic Al-Si) ในโลหะอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้สามารถทำให้ละเอียดได้โดยการดัดแปลงโครงสร้าง (Modification) เมื่อหล่อด้วยแบบหล่อทรายหรือแบบหล่อถาวร (Permanent Mold) โดยการเติมธาตุโซเดียม (Na) หรือ สตรอนเซียม (Sr) ในโลหะหลอมเหลวซึ่งผ่านการลดแก๊สมาแล้วก่อนการเทลงแม่พิมพ์ ในปริมาณเพียงร้อยละ 0.025-0.01 โดยน้ำหนัก เป็นต้น การทำเช่นนี้เป็นการทำงานให้ จุดยูเทคติกย้ายจากปริมาณซิลิกอนร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก ไปเป็นร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเฟสซิลิกอนปฐมภูมิ (Primary Si) และทำให้เฟสยูเทคติกซิลิกอนละเอียด แต่อะลูมิเนียมผสมที่ผลิตโดยวิธีการหล่อด้วยแรงดันสูง (Pressure Die Casting) ไม่จำเป็นต้องดัดแปลงโครงสร้างในระหว่างกระบวนการหล่อ เนื่องจากการหล่อแบบนี้อะลูมิเนียมจะเย็นตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกรนมีความละเอียดเสมือนการถูกดัดแปลงโครงสร้าง ความละเอียดของเฟสยูเทคติกซิลิกอนที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว หรือถูกดัดแปลงโครงสร้าง จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนยูเทคติก [1]

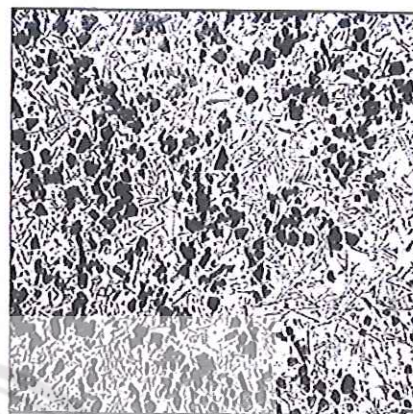
2.1.3 อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก

อะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic Alloys) จะใช้งานในสถานะที่ต้องการการขยายตัวจากความร้อนต่ำ และในขณะเดียวกันต้องทนต่อการเสียดสีได้ดี เช่น ลูกสูบ (Piston) ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine; IC) และเสื้อสูบเครื่องยนต์ที่ผลิตด้วยการหล่อในแม่พิมพ์เหล็ก ซึ่งสามารถใช้ได้โดยไม่ต้องมีปลอกสูบเหล็ก อะลูมิเนียมผสม-

ซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติกเหล่านี้ต้องมีการเติมฟอสฟอรัส (P) เพื่อให้เฟสซิลิกอนปฐมภูมิ (Primary Si) มีขนาดเล็กละเอียด ดังแสดงรูปที่ 2.4



ก)



ข)

รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก [2]

ก) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก ที่ยังไม่ได้
รับการปรับปรุงโครงสร้าง

ข) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮเปอร์ยูเทคติก หลังผ่าน
การปรับปรุงโครงสร้าง

สมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกาได้แบ่งอะลูมิเนียมผสมหล่อตามธาตุผสมที่เติมเข้าไป
ในอะลูมิเนียม และตั้งรหัสสำหรับธาตุผสมกลุ่มนั้น ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

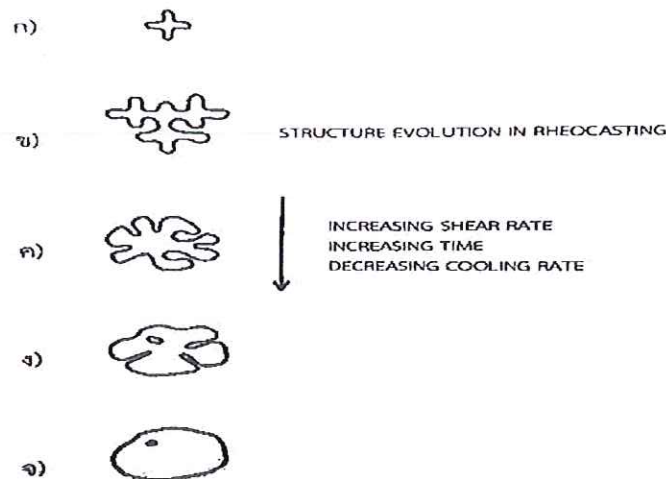
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ
(ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยประมาณ) [3]

มาตรฐาน	ซิลิกอน	ทองแดง	แมกนีเซียม	เหล็ก	แมงกานีส	ไทเทเนียม	สังกะสี
AA	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn
A319.0	5.5-6.5	3.0-4.0	0.1	0.1	0.5	0.25	3.0
A319.1	5.5-6.5	3.0-4.0	0.1	0.8	0.5	0.25	3.0
A332.2	10.5-13.5	0.8-1.5	0.9-1.5	0.6	0.35	-	0.35
A356.0	6.5-7.5	0.2	0.25-0.45	0.2	0.1	0.2	0.1
A360.2	9.0-11.0	0.03	0.25-0.45	0.4	0.45	-	0.1
A390.0	16.0-18.0	4.0-5.0	0.45-0.65	0.5	0.1	0.2	0.1

ตัวอย่างอะลูมิเนียมผสม เกรด A319 เป็นมาตรฐานที่เรียกตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา AA (Aluminum Association) มีส่วนผสมดังนี้ ซิลิกอนร้อยละ 5.5-6.5 ทองแดงร้อยละ 3.0-4.0 แมกนีเซียม สูงสุดร้อยละ 0.1 เหล็ก สูงสุดร้อยละ 1.0 แมงกานีสสูงสุดร้อยละ 0.5 ไทเทเนียมสูงสุดร้อยละ 0.25 และสังกะสีสูงสุดร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมผสม เกรด A319 มีข้อดีหลายประการ เช่น มีสมบัติทางด้านความสามารถในการหล่อ ความสามารถในการเชื่อม ความสามารถต้านทานการกัดกร่อน และความสามารถในการกลึง ตัด เจาะ ด้วยเครื่องจักรได้ดี ในด้านการนำไปใช้งาน อะลูมิเนียมผสม เกรด A319 นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ กระจบบอกสูบของเครื่องยนต์ เพลาค้อเหวี่ยง รวมไปถึงอุปกรณ์ ชิ้นส่วนต่าง ๆ ทางอุตสาหกรรม [3]

2.2 กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง (Semi-solid Metal Processing)

กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งเป็นเทคโนโลยีสำหรับการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งมีความแตกต่างจากการขึ้นรูปโดยทั่วไป โดยการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้จะมีสภาวะที่ประกอบไปด้วยของเหลว และของแข็งอยู่ด้วยกัน กล่าวคือจะมีอนุภาคของของแข็งที่มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์กระจายอยู่ในของเหลว โดยมีขั้นตอนในการปรับเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อจากเดิมที่เป็นเดนไดรต์ (Dendrite) ให้มีลักษณะกลมขึ้น ก่อนนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งโครงสร้างที่มีลักษณะกลมละเอียด และมีความเป็นเนื้อเดียวกันนั้น จะส่งผลให้สมบัติทางกลสูงขึ้น และยังช่วยประหยัดพลังงานในการขึ้นรูปโลหะ เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้ จะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำ ทำให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ในลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ส่งผลให้ลดการจับกับอากาศของโลหะหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ ทำให้ลดการเกิดโพรงอากาศ และจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานให้ดีขึ้น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากลักษณะที่เป็นเดนไดรต์ ไปสู่โครงสร้างที่มีลักษณะกลมมากขึ้น เริ่มจากการเกิดนิวเคลียสขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก) จำนวนมากจากนั้นนิวเคลียสโตขึ้นเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าเดนไดรต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ข) เมื่อได้รับแรงเฉือนอย่างต่อเนื่องระหว่างการแข็งตัว ส่งผลให้โครงสร้างเดนไดรต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette-like Structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ค) นอกจากนี้การโตอย่างต่อเนื่องของโครงสร้างลักษณะคล้ายดอกกุหลาบดังแสดงในรูปที่ 2.5 ง) ระหว่างการเย็นตัวนี้ถ้ามีแรงเฉือน และการเย็นตัวเหมาะสมจะส่งผลให้โครงสร้างสุดท้ายมีลักษณะกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จ)



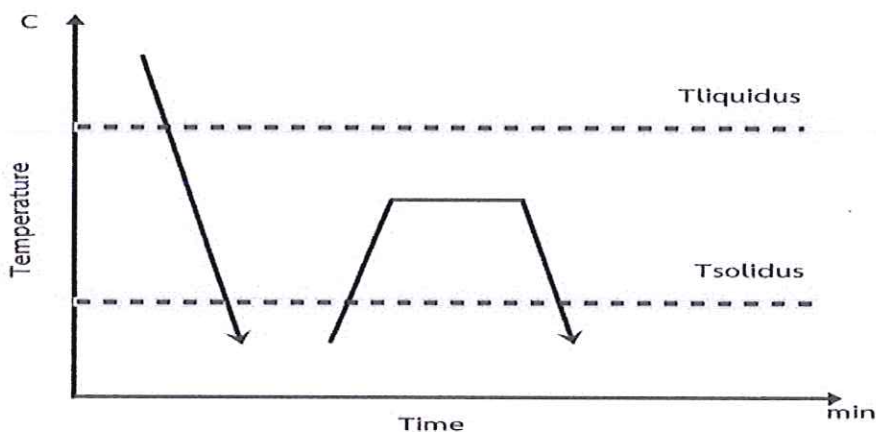
รูปที่ 2.5 การเกิดโครงสร้างระหว่างโครงสร้างระหว่างการแข็งตัว ในสภาวะกึ่งแข็ง [4]

- ก) เกิดนิวเคลียสในช่วงแรก
- ข) นิวเคลียสโตเป็นโครงสร้างเดนไดรต์
- ค) โครงสร้างเดนไดรต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างแฉกคล้ายดอกกุหลาบ
- ง) โครงสร้างแฉกคล้ายดอกกุหลาบโต
- จ) โครงสร้างลักษณะกลม

การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดใกล้เคียงสุดท้าย (Near Net Shape) โดยในกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้ จะผลิตในขณะที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในช่วงกึ่งแข็ง นั่นคือมีอุณหภูมิในช่วงระหว่างเส้นลิกวิดัส (Liquidus) และเส้นโซลิดัส (Solidus) โดยจะเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิอยู่เหนือเส้นลิกวิดัส เพียงเล็กน้อย

2.2.1 กระบวนการติกโซแคสติง (Thixocasting)

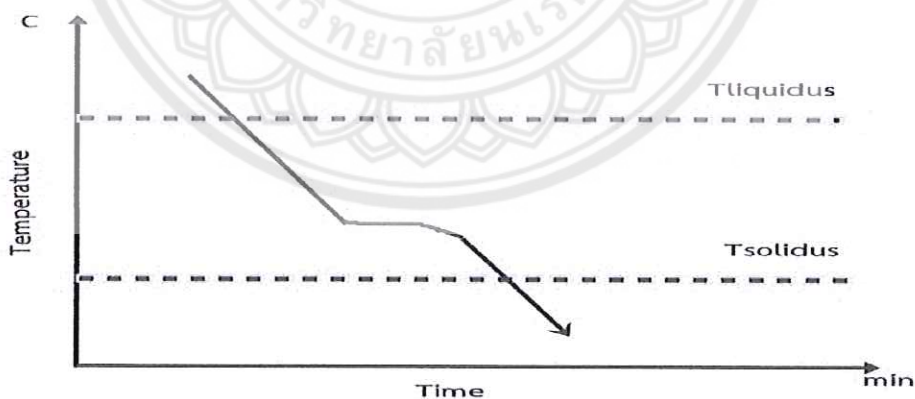
เป็นกระบวนการหล่อโลหะหลอมเหลวให้อยู่ในรูปของ Feedstock โดยมีการควบคุมระบบให้โลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งก่อนที่จะขึ้นรูปให้เป็น Feedstock ต่อจากนั้นมีการให้ความร้อนซ้ำเพื่อให้ Feedstock อยู่ในช่วงกึ่งแข็งแล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่อไปในปัจจุบัน กระบวนการติกโซแคสติงถูกนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมน้อยมากเมื่อเทียบกับกระบวนการรีโอแคสติงเนื่องจากต้นทุนในการเตรียม Feedstock ในขั้นต้น และใช้พลังงานสูงในการให้ความร้อนแก่ Feedstock ในช่วงกึ่งแข็งก่อนนำไปขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [5]



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงวิธีกระบวนการตักไซแคสติง (Thixocasting)

2.2.2 กระบวนการรีโอแคสติง (Rheocasting)

เป็นการเตรียมโลหะในสภาวะกึ่งแข็งจากของเหลวโดยตรง เริ่มจากการหลอมโลหะ จากนั้นทำให้เย็นตัวอยู่ในช่วงกึ่งแข็ง โดยมีการควบคุมระบบของโลหะหลอมเหลวระหว่างการเย็นตัวหรือมีการทำให้แกนของเดนไดรต์เกิดการแตกตัว จะได้โลหะหลอมเหลวที่มีอนุภาคของแข็งผสมอยู่ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน และโครงสร้างที่ได้จากกระบวนการนี้มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์แต่ได้โครงสร้างที่มีลักษณะกลมแทนการเตรียมโลหะในสภาวะกึ่งแข็งในกระบวนการหล่อแบบรีโอแคสติง มีวิธีการเตรียมได้หลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.7

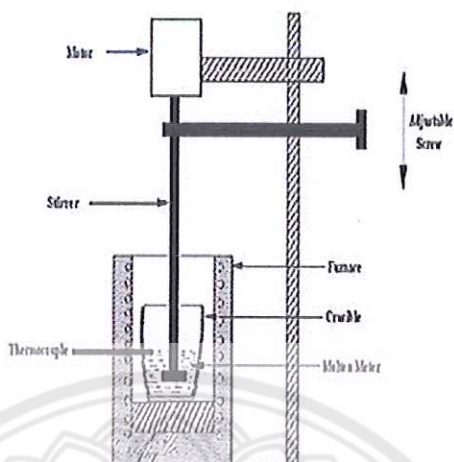


รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงวิธีกระบวนการรีโอแคสติง (Rheocasting)

2.2.2.1 การกวนโลหะหลอมเหลวโดยใช้แรงทางกล (Mechanical Stirring)

เป็นกระบวนการที่ใช้แรงทางกลในการกวนโลหะหลอมเหลวเพื่อให้เกิดแรงเฉือนระหว่างการแข็งตัว ซึ่งเทคนิคนี้สามารถพัฒนาเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยโลหะกึ่งแข็งที่ได้สามารถนำไปขึ้นรูปได้โดยตรง หรือทำให้แข็งตัวเพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับการนำไปให้ความร้อนอีกครั้งสำหรับการขึ้นรูปด้วยเทคนิคตักไซแคสติง สิ่งที่ต้องระวัง คือ แท่งกวน หรือใบพัดกวนเกิดการ

สีทหรอ และหลุดเข้าไประวมอยู่กับโลหะหลอมเหลว ส่งผลให้เกิดสิ่งปนเปื้อน หรืออาจเกิดออกไซด์ในโลหะหลอมเหลวได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [5]



รูปที่ 2.8 กระบวนการที่ใช้แรงทางกลในการกวนโลหะหลอมเหลว [21]

2.2.2.2 การกวนโลหะหลอมเหลวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirring)

เป็นกระบวนการที่ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้ากวนโลหะหลอมเหลวในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเดนไดรต์ให้กลมขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 [6]

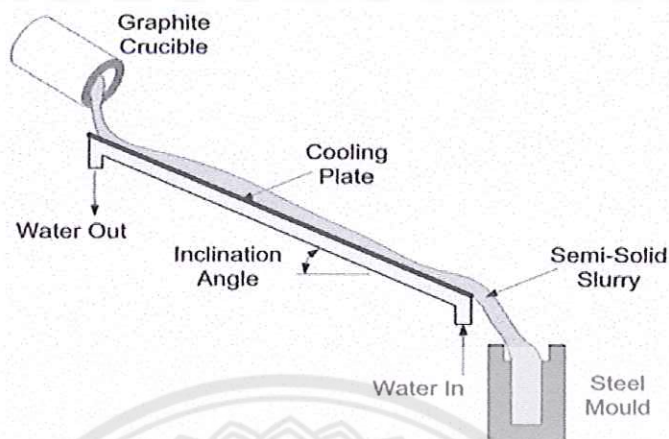


รูปที่ 2.9 เตาหลอมแม่เหล็กไฟฟ้า [6]

2.2.2.3 การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique)

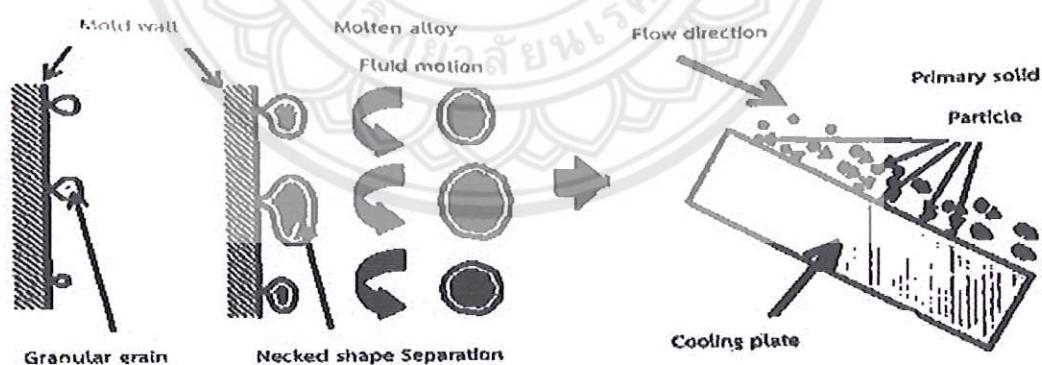
การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น เป็นการหล่อวิธีหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มของ New Rheo-casting Process ซึ่งได้รับการพัฒนาจากโรงงาน UBE ในประเทศญี่ปุ่นโดยใช้ในการผลิตอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม ซึ่งเทคนิคนี้เป็นกระบวนการนำอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม มา

หลอม จนเป็นโลหะหลอมเหลว จากนั้นจึงเทลงแม่พิมพ์โดยผ่านรางเทหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ช่วงอุณหภูมิของการเทผ่านรางเทหล่อเย็น จะอยู่เหนือเส้นลิกวิดัสเพียงเล็กน้อย [20]



รูปที่ 2.10 การหล่อโลหะแบบผ่านรางเทหล่อเย็น [20]

กลไกการเกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางเทหล่อเย็นจะเกิดขึ้น เมื่อเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่อโลหะเกิดการสูญเสียความร้อนไปตามผนังรางเทหล่อเย็น จะส่งผลให้นิวเคลียสที่บริเวณผิวสัมผัสของผิวหน้าระหว่างโลหะหลอมเหลวกับรางเทหล่อเย็น ดึงให้เกิดนิวเคลียสและกลับเข้าไปปนผสมกับโลหะหลอมเหลว เสมือนการเกิดนิวเคลียสจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [4]



รูปที่ 2.11 การเกิดโครงสร้างลักษณะกลมบนรางเทหล่อเย็น [4]

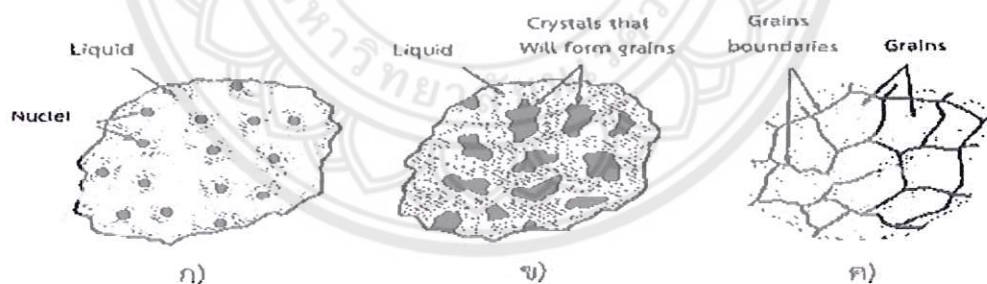
2.3 กลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว

กระบวนการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว ถ้าอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวมาก คือโลหะหลอมเหลวจะเย็นตัวเร็ว ปริมาณนิวเคลียสเริ่มต้นมีจำนวนมากจำนวนเกรนที่เกิดขึ้นก็มีจำนวนมากตามไปด้วยส่งผลให้เกรนที่ได้มีขนาดเล็กละเอียด แต่ถ้าหากอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวต่ำ หรือเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียส

น้อย จำนวนเกรนที่เกิดก็น้อยตามไปด้วย ส่งผลให้เกรนที่ได้มีขนาดใหญ่ และหายาบ กลไกการเกิดนิวเคลียสของโลหะหลอมเหลว มี 3 กลไกดังนี้

2.3.1 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation)

กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบเอกพันธ์ เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งสมดุล (Equilibrium Freezing Temperature) ของโลหะนั้นมาก นิวเคลียสที่เกิดขึ้นโดยกลไกนี้ อะตอมจะเกิดการเคลื่อนตัวอย่างช้า ๆ และเกิดพันธะระหว่างกันเรียกเอมบริโอ (Embryo) และถ้าเกิดพันธะระหว่างกันจนมีความเสถียรเรียกว่าขนาดวิกฤต (Critical Size) ถ้าขนาดของนิวเคลียสมีขนาดเล็กกว่า ขนาดวิกฤต จะถูกหลอมละลายกลับเป็นโลหะหลอมเหลว แต่ถ้านิวเคลียสมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤต จะเติบโตกลายเป็นผลึกต่อไป เมื่ออุณหภูมิโลหะหลอมเหลวลดต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวระบบจะมีแรงขับ (Driving Force) ที่มากพอจะทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น จนโลหะแข็งตัวทั้งหมด โดยอะตอมจะสั่นสะเทือนน้อยลง ระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง จนกระทั่งอะตอมจับรวมตัวกันเกิดเป็นจุดเริ่มต้นของการแข็งตัวเรียกว่า นิวเคลียส (Nuclei) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ก) จากนั้นอะตอมจะรวมตัวกันมากขึ้น กลายเป็นนิวเคลียส (Nucleus) และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อย ๆ จะเกิดการขยายตัวของนิวเคลียส กลายเป็นผลึก (Crystal) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ข) ผลึกขยายตัวทุกทิศทุกทางมาบรรจบกับผลึกอื่น ที่ระนาบต่างกันเรียกว่าขอบเกรน (Grain Boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ค) [7]



รูปที่ 2.12 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว [7]

ก) การเกิดนิวเคลียส

ข) การโตของนิวเคลียสเป็นผลึก

ค) การเชื่อมต่อของผลึกกลายเป็นเกรน และมีเส้นแบ่งขอบเกรน

2.3.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogenous Nucleation)

กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ เป็นกระบวนการการเกิดนิวเคลียสจากสิ่งเจือปนในโลหะหลอมเหลว หรือพื้นผิวของแบบหล่อเป็นตัวช่วย การเกิดนิวเคลียสแบบนี้มักจะเกิดขึ้นบ่อยกับงานหล่อโลหะมากกว่าการเกิดแบบเอกพันธ์ โดยสิ่งเจือปนจะเข้าไปทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียม

ซึ่งนิวคลีโอเทียมเหล่านี้จะหลุดมาจากผนังแบบหล่อ เบ้ารองรับโลหะหลอมเหลวที่หลุดติดมา หรือจากการเติมเข้าไป อนุภาคเหล่านี้มักอยู่ในลักษณะสารแขวนลอย ซึ่งมีขนาดโตกว่ารัศมี นิวคลีโอ ขนาดวิกฤต ส่งผลให้อะตอมของโลหะหลอมเหลวแพร่เข้ามารวมตัว และโตเป็นผลึกต่อไป

2.3.3 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบสภาวะพลศาสตร์ (Dynamic Nucleation)

สภาวะการเกิดนิวคลีโอแบบสภาวะพลศาสตร์ หรือสภาวะที่เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวในระหว่างการแข็งตัว ก็สามารถเกิดนิวคลีโอได้เช่นกัน โดยระหว่างการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลว โครงสร้างเดนไดรท์จะเกิดการแตกหัก (Crystal Fragmentation) และได้โครงสร้างที่เป็นอีควิแอกซ์ (Equiaxed) เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงแบบหล่อ จะเกิดการไหลวน เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ (Thermal Solutal Convection) ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของโลหะหลอมเหลวบริเวณต่าง ๆ คือบริเวณที่ติดอยู่กับผนังแบบหล่อเป็นส่วนที่เย็นตัวเร็ว จะมีความหนาแน่นมากกว่าโลหะหลอมเหลวที่อยู่ตรงกลางแบบหล่อ ทำให้เกิดการไหลทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วง ในขณะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลวจะเกิดการไหลบริเวณผิวสัมผัส เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดความแตกต่างของปริมาณตัวถูกละลาย (Solute) โดยทิศทางของการไหลจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย (Solvent) เมื่อนำผลมารวมกันจะเกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวบนผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลวซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวเฉพาะจุด (Local Remelting) ของเดนไดรท์แบบแท่ง และทำให้เกิดการแตกหักของเดนไดรท์ (Dendrite Fragmentation) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของเดนไดรท์จากผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ [7]

โดยการเกิดแบบนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มแรงของการเกิดการไหลเวียนโลหะหลอมเหลว (Convection) เช่น การทำให้สั่นสะเทือนด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonics) การกวาดด้วยแรงทางกล การเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก เป็นต้น กลไกการเกิดนิวคลีโอเมื่ออยู่ในสภาวะพลศาสตร์เกิดขึ้นเมื่อนิวคลีโอของเดนไดรท์ขนาดเล็ก (Pre-dendritic Nuclei) และเกิดขึ้นขณะเทโลหะ

หลอมเหลว โดยเดนไดรต์ขนาดเล็กดังกล่าวเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วบริเวณผนังแบบหล่อ จากการไหลที่รุนแรงในช่วงแรกของการเทโลหะหลอมเหลว เมื่อถูกพาเข้าแบบหล่อ เดนไดรต์บางส่วนจะถูกละลายกลับไปเป็นโลหะหลอมเหลว และเมื่อโลหะหลอมเหลวที่อยู่กลางแบบหล่อมืดจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว เดนไดรต์ขนาดเล็กที่ยังเหลือ จะทำหน้าที่เป็นนิวคลีไอ และเติบโตเป็นอควิแอคสามารถอยู่ได้โดยไม่ถูกละลายกลับเป็นโลหะหลอมเหลว [7]

2.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

กล้องจุลทรรศน์แสง คือ กล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงใช้ส่องให้เห็นวัตถุขยายใหญ่กว่าเดิม โดยมีหลักการทำงาน คือ เลนส์รวมแสง (Condenser Lens) จะรวบรวมแสงไฟจากหลอดไฟซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงให้ไปตกที่วัตถุที่วางอยู่บนแท่นวางวัตถุ (Specimen Stage) จากนั้นเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) จะทำการขยายวัตถุให้ได้ภาพขนาดใหญ่ขึ้นแล้วส่งต่อไปยังเลนส์ใกล้ตา (Ocular Lens) เพื่อขยายภาพสุดท้าย ดังนั้นกำลังขยายของวัตถุได้มาจากผลคูณของความสามารถกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ และเลนส์ใกล้ตา ซึ่งกำลังขยายได้มากที่สุดสองพันเท่า และไม่อาจมีกำลังขยายที่ใหญ่ขึ้นกว่านี้อีกได้ เนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นภายในกล้องจุลทรรศน์เป็นภาพที่เกิดจากคลื่นแสงซึ่งมีขีดจำกัดขึ้นอยู่กับขนาดของภาพ และช่วงคลื่นแสง ถ้าภาพมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงคลื่นแสงก็จะไม่อาจส่องขยายภาพให้มีขนาดใหญ่มาได้ [8]

2.4.1 การตัดชิ้นงาน

ในการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างต้องระวังไม่ให้ชิ้นงานร้อน และห้ามตัดด้วยแก๊ส เพราะความร้อนจะเป็นสาเหตุทำให้ลักษณะโครงสร้าง ขนาดของโครงสร้าง และผลึกเปลี่ยนแปลงได้ การตัดนิยมใช้กันมากคือ เลื่อยมือ เครื่องเลื่อย ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และประหยัดเหมาะสำหรับตัดโลหะที่มีความแข็งต่ำกว่าใบเลื่อย

2.4.2 การขึ้นเรือนชิ้นงาน (Mounting)

การขึ้นเรือนชิ้นงานทดสอบด้วยวัสดุอื่น เช่น สารสังเคราะห์ พลาสติก หรือ เรซิน (Resin) เพื่อให้สามารถจับถือได้สะดวก และขนาดเหมาะสมกับเครื่องมือ เครื่องจักรอุปกรณ์ หรือกล้องที่ใช้ตรวจสอบ นอกจากนี้เพื่อให้สามารถทำเครื่องหมายได้ง่าย

2.4.3 การขัดหยาบ (Grinding)

เป็นขั้นตอนในการปรับระนาบผิวให้ได้ระดับ และเป็นการขัดผิวหน้าให้เรียบโดยใช้กระดาษทรายขัดจากเบอร์กระดาษทรายที่มีความละเอียดต่ำไปจนถึงเบอร์กระดาษทรายที่มีความละเอียดสูง คือ เบอร์ 180 320 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ

2.4.4 การขัดละเอียด (Polishing)

เป็นขั้นตอนในการลดรอยขีดข่วนที่เกิดจากการขัดผิวด้วยกระดาษทราย และทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น เรียบเป็นมันเงา โดยการขัดมันมี 2 แบบ คือการขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ (Oxide Polishing) เช่น ผงอะลูมินา เป็นต้น และการขัดมันด้วยผงขัดเพชร (Diamond Polishing) ซึ่งการขัดมันด้วยผงขัดเพชรจะมีความสามารถในการขัดสูง และได้ระนาบดีกว่าการขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากผงขัดมีความแข็งประมาณ 8000 HV ทำให้สามารถขัดวัสดุได้ทุกชนิด

2.4.5 การกัดกรด (Etching)

เป็นขั้นตอนในการนำชิ้นงานไปทำการกัดกรดหรือกัดผิวหน้าด้วยสารเคมีเพื่อให้สามารถเห็นโครงสร้างได้เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

2.5 ปัจจัยรูปร่าง และพื้นที่ของเกรน (Shape Factor and Grain Area)

ขนาดเกรนจะขึ้นอยู่กับจำนวนนิวเคลียส และพื้นที่ในการโตของเกรน ถ้าจำนวนนิวเคลียสมาก รวมถึงพื้นที่ในการโตของเกรนน้อย จะส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก และละเอียด แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าจำนวนนิวเคลียสน้อย พื้นที่ในการโตของเกรนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นสุดท้ายเกรนจึงหยาบมากขึ้น อัตราการเย็นตัวมีผลต่อการเกิดนิวเคลียสเช่นกัน ถ้ามีอัตราการเย็นตัวเร็ว นิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก และละเอียด แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวช้า นิวเคลียสจึงเกิดขึ้นจำนวนน้อยลง ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ และหยาบ นอกจากนี้เกรนที่มีขนาดเล็กหรือใหญ่ อาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายประการ เช่น การมีธาตุบางธาตุที่เป็นตัวเริ่มต้นของการเกิดนิวเคลียส ตัวอย่างในการผลิตเหล็กกล้า ถ้าใส่ธาตุแมกนีเซียมลงไปก่อนโลหะหลอมเหลวจะเกิดการแข็งตัว ธาตุแมกนีเซียมจะทำให้เกิดนิวเคลียสขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก และละเอียดขึ้น

2.5.1 การหาขนาดเกรน

เพื่อให้ทราบว่าขนาดของเกรนส่งผลอย่างไรต่อสมบัติของโลหะซึ่งมีวิธีการหาขนาดของเกรนได้หลายวิธี [9]

2.5.1.1 วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison Method)

โดยปกติจะถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายประมาณ 100 เท่า แล้วพิจารณาขนาดเกรนโดยเปรียบเทียบกับภาพโครงสร้างจุลภาคมาตรฐาน แล้วกำหนดเป็นหมายเลขมาตรฐานที่เรียกว่า “ASTM Grain Size Number” โดยหมายเลขยิ่งมีค่ามาก ขนาดเกรนยิ่งละเอียด วิธีนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนแบบ Equiaxed Grain (คือเกรนค่อนข้างกลม) อย่างไรก็ตาม สามารถคำนวณหา ASTM Grain Size Number โดยการนับจำนวนเกรนในพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว ที่กำลังขยาย 100 เท่า แล้วคำนวณตามดังสมการที่ 2.1

$$N = 2^{n-1} \quad (2.1)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเกรนในหนึ่งตารางนิ้วที่ขนาดกำลังขยาย 100 เท่า
n คือ ขนาดเกรนตามมาตรฐาน ASTM (Grain Size Number)

2.5.1.2 วิธีกำหนดพื้นที่ (Planimetric Method หรือ Jeffries Method)

สร้างพื้นที่วงกลม หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส บนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคให้มีพื้นที่ 5,000 ตารางมิลลิเมตร ทั้งนี้ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคนั้นจะต้องมีจำนวนเกรนไม่น้อยกว่า 50 เกรน และมีจำนวนเกรนไม่เกิน 100 เกรน แล้วหาจำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตร (N_A) ได้ตามดั่งสมการที่ 2.2

$$N_A = f(N_{\text{inside}} + \frac{N_{\text{intercept}}}{2}) \quad (2.2)$$

เมื่อ N_A คือ จำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่า
F คือ Jeffries Multiplier
 N_{inside} คือ จำนวนเกรนที่อยู่ภายในพื้นที่
 $N_{\text{intercept}}$ คือ จำนวนเกรนที่ถูกตัดผ่าน

ตารางที่ 2.2 Jeffries Method ที่ค่ากำลังขยายต่าง ๆ

กำลังขยาย	Jeffries Multiplier	กำลังขยาย	Jeffries Multiplier
1	0.0002	150	4.5
10	0.02	200	8.0
25	0.125	300	18.0
50	0.5	500	50.0
75	1.125	750	112.5
100	2.0	1000	200.0

ขนาดพื้นที่ 5,000 ตารางมิลลิเมตรในรูปทรงต่าง ๆ เป็นดังนี้ ก) วงกลมจะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 79.8 มิลลิเมตร ข) สี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาด 70.7 x 70.7 มิลลิเมตร ค) สี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 50.0 x 100.0 มิลลิเมตร

2.5.1.3 วิธีการลากเส้นตัดผ่าน (Intercept Method)

Heyn Lineal Intercept Procedure กระทำโดยลากเส้นตัดผ่านบนภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค แล้วนับจำนวนเกรนที่เส้นตรงตัดเกรนทำจำนวนหลาย ๆ เส้น แล้วหาค่าเฉลี่ย (Arithmetic Average) ในบางครั้งอาจใช้วิธีขีดเส้นลงบนผิวของตัวอย่างโลหะที่จะวัดขนาดเกรนด้วยความยาว 0.005 นิ้ว แล้วขยายดูจากกล้องไมโครสโคป เมื่อขยายที่ 500 เท่า ความยาวของเส้นที่ขีดจะเป็น 2.5 นิ้ว และ 3.75 นิ้วที่กำลังขยาย 750 เท่า ในทางปฏิบัติถ้าเส้นที่ขีดตัดเกรนจำนวน 8-11 เกรน จัดว่ามีลักษณะเกรนหยาบ ถ้านับได้ 12-15 เกรนจัดว่าเป็นเกรนละเอียด ถ้ามีมากกว่า 15 เกรนจัดว่าเป็นเกรนที่ละเอียดมาก

2.5.2 ปัจจัยรูปร่าง

ปัจจัยรูปร่างเป็นจำนวนมิติที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างจากกล้องจุลทรรศน์ที่อธิบายรูปร่างของอนุภาคที่ไม่สมมาตร ปัจจัยรูปร่างจะคำนวณจากการวัดขนาดเกรน ได้แก่ การวัดอนุภาคแบบ 2 มิติ ที่มาจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ ปัจจัยรูปร่างปกติในช่วงค่า 0-1 ถ้าเท่ากับ 1 มักจะมีรูปร่างสมมาตร เช่น วงกลม ทรงกลม สี่เหลี่ยม หรือก้อน ปัจจัยรูปร่างส่วนใหญ่เป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันของเกรนขนาดใหญ่ และเกรนขนาดเล็กแสดงดังสมการที่ 2.5

$$A_r = \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \quad (2.5)$$

เมื่อ d_{\min} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนต่ำสุด

d_{\max} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนสูงสุด

การหาค่าปัจจัยรูปร่างเป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันเส้นรอบรูป P^2 และพื้นที่ A_r แสดงดังสมการที่ 2.6

$$F_{\text{cric}} = \frac{4\pi A_r}{P^2} \quad (2.6)$$

เมื่อ F_{cric} คือ ปัจจัยรูปร่าง

P คือ เส้นรอบรูป

ผลจากการคำนวณหาปัจจัยรูปร่าง ถ้าค่าที่คำนวณได้เท่ากับ 1 แสดงว่าขนาดของรูปร่างมีความกลม และถ้าผลการคำนวณน้อยกว่า 1 แสดงว่ามีความกลมที่ต่ำลง

2.5.3 ความยาวของรางเท

การขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งด้วยการเทผ่านรางเทหล่อเย็น มีปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง ดังต่อไปนี้ความยาวของรางเทหล่อเย็น มีผลต่ออัตราส่วนของแข็งในของเหลว (Solid Fraction) ซึ่งอัตราส่วนของแข็งในของเหลว คือปริมาณของแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างที่โลหะนั้นยังอยู่ในสภาพหลอมเหลวโดยที่ ถ้าความยาวของรางเทหล่อเย็นน้อย ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็นก็จะมาก ทำให้โลหะหลอมเหลวมีระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนน้อย แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นก็จะน้อยตามไปด้วย ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดเล็ก และละเอียด ถ้าความยาวของรางเทหล่อเย็นมาก ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็นก็จะน้อย ทำให้โลหะหลอมเหลวมีระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนมาก แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นก็จะมากตามไปด้วย ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดใหญ่ และหยาบ

2.5.4 อุณหภูมิการเท (Pouring Temperature)

อุณหภูมิการเทมีผลต่อการเติมเต็มของชิ้นงาน คือ เมื่ออุณหภูมิเตต่ำเกินไปจะทำให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าเติมเต็มแม่พิมพ์ที่ได้ไม่ดีและอาจมีข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ ยิ่งไปกว่านั้น แก๊สที่เกิดขึ้นในระหว่างการเทโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์จะไม่มีเวลามากพอในการระเหยออกสู่ด้านบนของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลทำให้ชิ้นงานหล่อที่ได้เกิดรูพรุน แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเทสูงเกินไป การรั่วซึมของโลหะหลอมเหลว การขยายตัวของแม่พิมพ์และการไหม้ของแบบหล่อทรายอาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นการเทหล่อจึงควรเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากขนาด รูปร่าง และความหนาของชิ้นงาน อุณหภูมิการเทสำหรับงานหล่อที่มีขนาดบางและมีความยาว ควรเลือกใช้ อุณหภูมิที่ที่สูงขึ้น เนื่องจากระยะทางที่โลหะหลอมเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์มีความยาวมากขึ้น โลหะหลอมเหลวจึงเกิดการลดอุณหภูมิและอาจเกิดการแข็งตัวก่อนเข้าเติมเต็มแม่พิมพ์ โลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำนี้เมื่อเริ่มเกิดการแข็งตัวจะทำให้แก๊ส และสิ่งเจือปนต่างๆ ในโลหะหลอมเหลว (Slag) เป็นผลทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อ แต่ถ้าอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวสูง สิ่งเจือปนและฟองอากาศเหล่านี้จะถูกรวมเข้าไว้ในรูสัน (Riser) ของแม่พิมพ์ [10]

2.6 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อแรงกด การขีดสี และการกลึงของวัสดุ ดังนั้นการทดสอบความแข็งจึงสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในเชิงโลหะวิทยา การวัดความแข็งจะเป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ โดยมีวิธีในการทดสอบที่นิยมใช้งานดังนี้ [11]

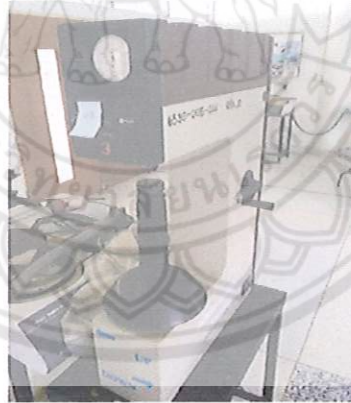
2.6.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กิโลกรัมแรง สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กิโลกรัมแรง สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (Indentation) ค่าความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness Number) จะใช้สูตรคำนวณดังนี้คือ ดังสมการที่ 2.7 [12]

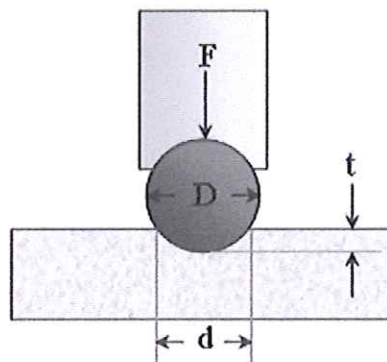
$$\text{BHN} = \frac{\text{แรงที่ใช้กด}}{\text{พื้นที่รอยบุ๋ม}} = \frac{F}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.7)$$

- เมื่อ BHN คือ Brinell Hardness Number มีหน่วยเป็นแรง ต่อหน่วยพื้นที่
 F คือ แรงที่ใช้กด (กิโลกรัมแรง)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล (มิลลิเมตร)
 d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (มิลลิเมตร)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยกด



รูปที่ 2.14 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)



รูปที่ 2.15 หัวกด และรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบบริเนล [15]

2.6.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test)

การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่า และแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้ และชนิดหรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อคเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูงแสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กิโลกรัมแรง จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กิโลกรัมแรง ขึ้นอยู่กับขนาด และชนิดของหัวกด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อคเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยกดมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 2.3 สเกลความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) [13]

สเกล	แรงกด	ชนิดของหัวกด	ชนิดของวัสดุที่ต้องการทดสอบ
A	60	หัวเพชร	โลหะคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ ที่มีความแข็งสูง
B	100	1/16 ลูกบอล	เหล็กกล้า ทองเหลือง และวัสดุที่มีความแข็งปานกลาง
C	100	หัวเพชร	เหล็ก และโลหะที่ผ่านการชุบแข็ง
D	100	หัวเพชร	เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งผิว
E	100	1/8 ลูกบอล	เหล็กหล่อ อะลูมิเนียมผสม
F	60	1/16 ลูกบอล	ทองเหลือง และทองแดงที่ผ่านการอบอ่อน
G	100	1/16 ลูกบอล	ส่วนผสมทองแดง บรอนซ์
H	60	1/8 ลูกบอล	อะลูมิเนียมแผ่น
K	100	1/8 ลูกบอล	เหล็กหล่อ อะลูมิเนียมผสม
L	60	¼ ลูกบอล	ตะกั่ว พลาสติก วัสดุอ่อน
M	100	¼ ลูกบอล	ตะกั่ว พลาสติก วัสดุอ่อน
P	100	¼ ลูกบอล	ตะกั่ว พลาสติก วัสดุอ่อน
R	60	¼ ลูกบอล	ตะกั่ว พลาสติก วัสดุอ่อน
S	100	¼ ลูกบอล	ตะกั่ว พลาสติก วัสดุอ่อน
V	100	¼ ลูกบอล	ตะกั่ว พลาสติก วัสดุอ่อน

2.6.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่าค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันว่าหัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปพีระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กิโลกรัมแรง ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ การคำนวณค่า Vickers Hardness ดังสมการ ที่ 2.8

$$HV = \frac{1.8544F}{D^2} \quad (2.8)$$

เมื่อ F คือ น้ำหนักที่กด (กิโลกรัมแรง)
D คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นทแยงมุม (มิลลิเมตร)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุทธาทิพย์ อภิญญา และอรณิสสา [15] จากการทดลองที่ได้ พบว่าโครงสร้างที่ได้มีความกลมใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส จะมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับที่มีความชื้นเท่ากัน และที่ความชื้น 30 องศา โครงสร้างจุลภาคจะมีขนาดใหญ่ที่สุด ส่วนค่าความแข็งที่ได้ขึ้นงานที่มีอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส จะแข็งที่สุด เช่นเดียวกับความแข็งขึ้นงานที่ผ่านรางเทหล่อเย็น ที่มีความชื้น 30 องศา เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นในขึ้นงานมีจำนวนน้อย

T. Haga และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาปัจจัยของรางเทหล่อเย็นที่ส่งผลกระทบต่อการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง จากการศึกษาพบว่า ความยาวของรางเทมีผลต่อการระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลว โดยการระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลวจะมีค่ามากก็ต่อเมื่อความยาวของ รางเทหล่อเย็นมีความยาวมาก อีกทั้งความชื้นของรางเทก็ส่งผลต่ออัตราการไหลของโลหะหลอมเหลวด้วย โดยหากรางเทมีความชื้นมากจะส่งผลให้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวมีค่ามาก ทำให้การระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลวบนรางเทมีค่าน้อยตามไปด้วย

Tahavi และ Ghassmi [17] ได้ทำการศึกษาปัจจัยของรางเทหล่อเย็นที่ส่งผลกระทบต่อการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง จากการศึกษาพบว่า ความยาวของรางเทมีผลต่อการระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลว โดยการระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลวจะมีค่ามากก็ต่อเมื่อความยาวของรางเทหล่อเย็นมีความยาวมาก อีกทั้งความชื้นของรางเทหล่อเย็นก็ส่งผลต่ออัตราการไหลของโลหะหลอมเหลวด้วย โดยหากรางเทมีความชื้นมากจะส่งผลให้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวมีค่ามาก ทำให้การระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลวบนรางเทมีค่าน้อยตามไปด้วย

Guan และคณะ [18] ได้ทำการศึกษามุมของรางเทหล่อเย็น พบว่ามุมของรางเทหล่อเย็นมีผลต่อการกระจายตัวของโลหะหลอมเหลว โดยเมื่อมุมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมุมเพิ่มขึ้นทำให้โลหะหลอมเหลวไหลบนรางเทหล่อเย็นได้เร็วขึ้นส่งผลให้นิวคลีโอที่่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นมีน้อย จึงทำให้ได้โครงสร้างเป็นเดนไดรต์

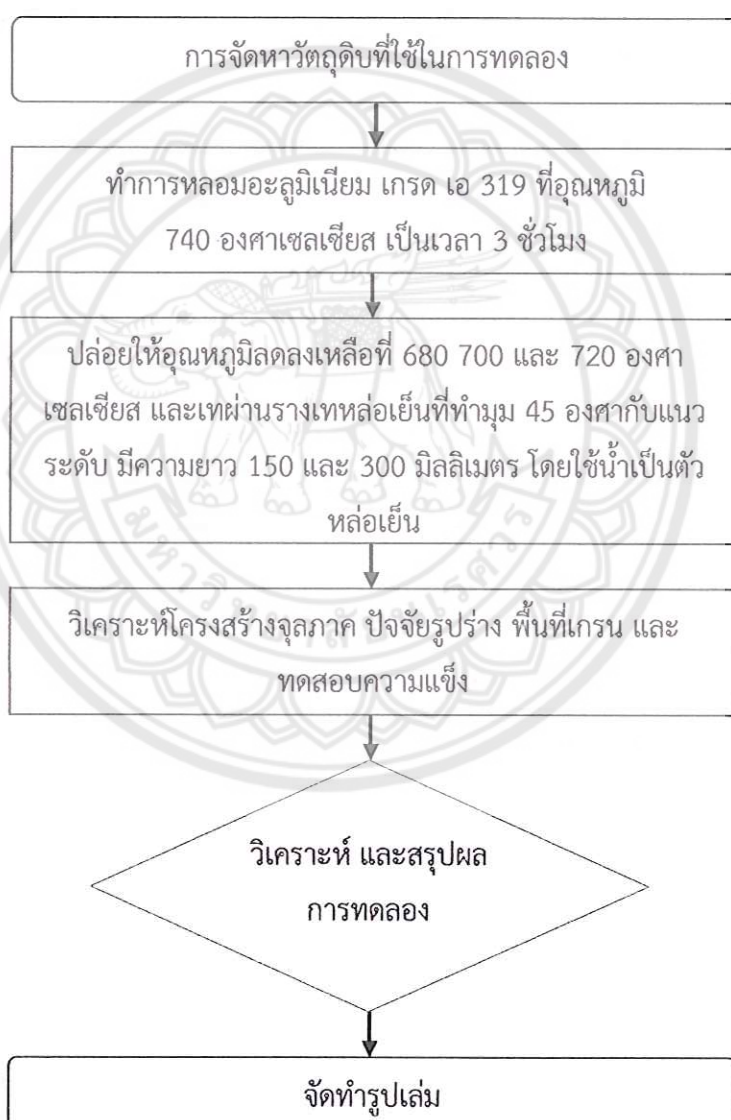
Ghomashchi [19] ได้ทำการศึกษาปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทของโลหะหลอมเหลวที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค ที่อุณหภูมิ 651 630 645 675 และ 695 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า เมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะเปลี่ยนจากเดนไดรต์ กลายเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลมและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องมาจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้ความหนาแน่นของเกรนมากขึ้น สามารถปรับปรุงโครงสร้าง

และสมบัติทางกลของชิ้นงานได้ดี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 645 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็น 695 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีโครงสร้างที่เป็นเดนไดรท์



บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ

สำหรับวิธีการดำเนินโครงการนี้จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ โดยขั้นตอนการดำเนินงานในการศึกษาผลของการเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope) ที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่เกรน และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 ดังแสดงในรูป 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในโครงการ

อะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบกึ่งแข็ง เทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละของธาตุโดยน้ำหนัก
ซิลิกอน (Si)	5.5-6.5
แมกนีเซียม (Mg)	0.1
แมงกานีส (Mn)	0.5
เหล็ก (Fe)	0.5
ไทเทเนียม (Ti)	0.25
ทองแดง (Cu)	3.0-4.0
สังกะสี (Zn)	3.0
อะลูมิเนียม (Al)	Balance

3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

ก. เตาหลอมโลหะแบบใช้แก๊ส ซึ่งจะทำให้โลหะหลอมเหลว แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เตาหลอมโลหะโดยใช้แก๊ส

ข. รางเทหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ทำจากทองแดง มีความยาว 300 มิลลิเมตร และมีน้ำเป็นตัวหล่อเย็นอยู่บริเวณด้านล่างของรางเทหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รางเทหล่อเย็น

ค. แม่พิมพ์โลหะ ที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 ชิ้น ประกอบเข้าด้วยกัน โดยกำหนดให้ขนาดของแม่พิมพ์ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์โลหะ

ง. เบ้าหลอมกราไฟท์เคย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เบ้าหลอมกราไฟท์เคย์

3.1.2.2 สารเคมี

ก. สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร

ข. น้ำกลั่น

3.1.2.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ก. เครื่องขัดโลหะที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องขัดโลหะ (Grinder Polisher) แบบจานคู่ โดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็นขณะขัดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องขัดโลหะ (Grinder Polisher) แบบจานคู่

ข. กระดาษทรายเบอร์ 180 320 400 600 800 1000 และ 1200

ค. ผงขัดอะลูมินาความละเอียดขนาด 1 และ 0.25 ไมครอน

ง. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope) ใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

จ. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลลี่หัด GALILEO รุ่น ERGOTEST OMP 25 ใช้เพื่อวัดความแข็งของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลลี่หัด GALILEO รุ่น ERGOTEST COMP 25

ฉ. ชุดวัดอุณหภูมิ (Digital Thermometer) และสายวัดอุณหภูมิ ประเภทเค (Type K) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชุดวัดอุณหภูมิ (Digital Thermometer) และสายวัดอุณหภูมิ ประเภทเค (Type K)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 ศึกษาทฤษฎี และรวบรวมข้อมูล

3.2.1.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมหล่อ และอะลูมิเนียมผสมเกรด เอ 319 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกล เป็นต้น

3.2.1.2 ศึกษาทฤษฎีกรรมวิธีการหล่อแบบกึ่งแข็ง เพื่อศึกษาการหล่อกึ่งแข็งด้วยวิธีต่าง ๆ ผลของการหล่อกึ่งแข็ง ที่มีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกล นอกจากนี้ยังศึกษาข้อมูลของการหล่อโดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล

3.2.1.3 ศึกษาเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เพื่อศึกษาวิธีการใช้งาน และการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุ

3.2.1.4 ศึกษาปัจจัยรูปร่าง เพื่อศึกษาการคำนวณปัจจัยรูปร่าง และพื้นที่เกรน

3.2.1.5 ศึกษาทฤษฎีการทดสอบความแข็งของวัสดุ เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบความแข็งแบบต่างๆ

3.2.2 การจัดหาวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสมเกรด เอ 319 ใช้ทองแดงทำรางเทหล่อเย็นซึ่งมีความยาว 150 และ 300 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทำแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 ชั้นที่ประกบเข้าด้วยกัน โดยกำหนดให้ขนาดของแม่พิมพ์ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร

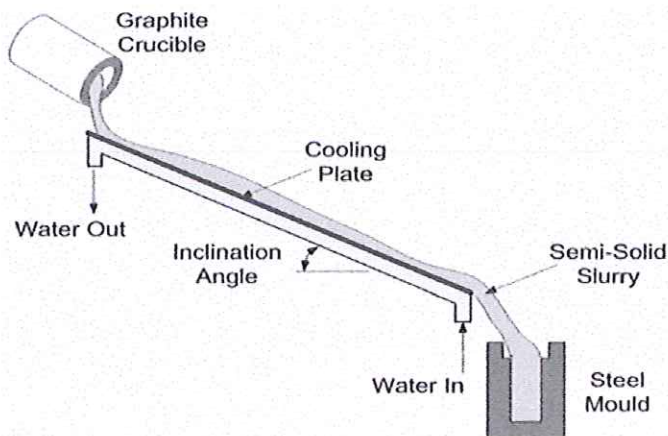
3.2.3 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงาน

3.2.3.1 การเตรียมแม่พิมพ์

การเตรียมแม่พิมพ์ในการหล่อชิ้นงาน จะใช้แม่พิมพ์แบบหล่อถาวร ที่ทำมาจากเหล็กกล้าเหมือนกัน 2 ชั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร โดยนำแม่พิมพ์ 2 ชั้นมาประกบเข้าด้วยกันให้แนบสนิท จากนั้นนำแม่พิมพ์มาวางให้ติดกับปลายรางเท เพื่อรองรับโลหะหลอมเหลว

3.2.3.2 การเตรียมรางเทหล่อเย็น

ติดตั้งรางเทหล่อเย็นที่ทำจากทองแดง โดยกำหนดให้รางเทมีความยาว 300 มิลลิเมตร โดยปรับให้มีความชันกับระนาบพื้น 45 องศา และให้ปลายรางเทติดกับแม่พิมพ์ โดยส่วนด้านล่างของรางเทจะมีระบบน้ำหล่อเย็นไหลเวียนอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้โลหะหลอมเหลวเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูป 3.10



รูปที่ 3.10 การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น [20]

3.2.3.3 การหล่ออะลูมิเนียมเกรด เอ 319

ทำการหลอมแท่งอะลูมิเนียมเกรด เอ 319 ที่อุณหภูมิ 740 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส และแต่ละอุณหภูมิจะเทที่ความยาวของรางเทเท่ากับ 150 และ 300 มิลลิเมตร ที่ความชัน 45 องศา

3.2.4 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

3.2.4.1 นำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.2.4.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทรายมาขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน และ 0.25 ไมครอน

3.2.4.3 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียดแล้วไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้น 0.2 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น 99.8 มิลลิลิตร โดยนำชิ้นงานจุ่มลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นเป่าให้แห้ง

3.2.4.4 นำชิ้นงานที่กัดกรดเรียบร้อยแล้ว มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง โดยจะตรวจสอบ 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งขอบชิ้นงาน ตำแหน่งถัดจากขอบชิ้นงาน และ ตำแหน่งกลางชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 50 และ 100 เท่า

3.2.5 วิเคราะห์ความเรียบผิว และรูพรุน

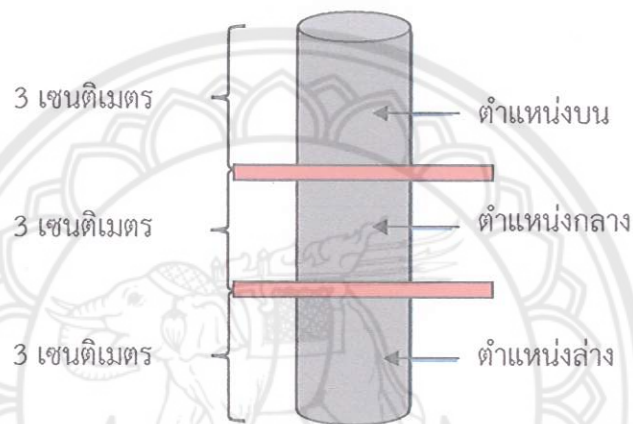
นำชิ้นงานมาวิเคราะห์ความเรียบผิวด้วยตาเปล่า และวิเคราะห์รูพรุนด้วยวิธีร้อยละโดยพื้นที่

3.2.6 วิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรน

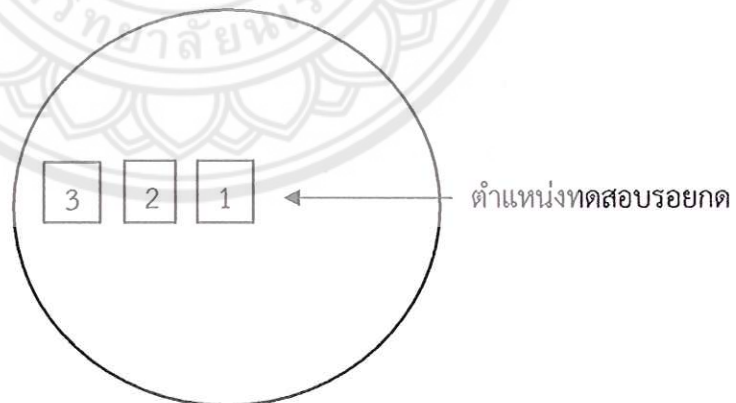
นำรูปที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ที่กำลังขยาย 100 เท่า มาวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยรูปร่าง พื้นที่เกรน แล้วหาค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์

3.2.7 ทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็งที่เทผ่านรางเทหล่อเย็นมาแบ่งเป็นสามส่วนแสดงดังรูปที่ 3.11 มาทดสอบความแข็งแบบบริเนล โดยกดลงบนชิ้นงาน 3 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และหาค่าเฉลี่ยโดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของชิ้นงานที่นำมาทำการวิจัย



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน

3.2.5.1 นำชิ้นงาน มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ

3.2.5.2 ใช้เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล โดยใช้หัวกดแบบลูกบอลเหล็กขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ใช้น้ำหนักกด 187.5 กิโลกรัมแรง เป็นเวลา 15 วินาที โดยทำการวัด 3 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.8 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็นมา วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค พื้นที่เกรน ปัจจัยรูปร่าง และความแข็งของ อะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความยาวของรางเทหล่อเย็น จากนั้นทำการสรุปผลการทดลอง

3.2.9 จัดทำรูปเล่ม

รวบรวมข้อมูลทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง วิธีดำเนินการทดลอง ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง มาจัดทำเป็นรูปเล่ม



บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเท และความยาวของรางเท โดยทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในเรื่องของผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหล่อ โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่ของเกรน และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

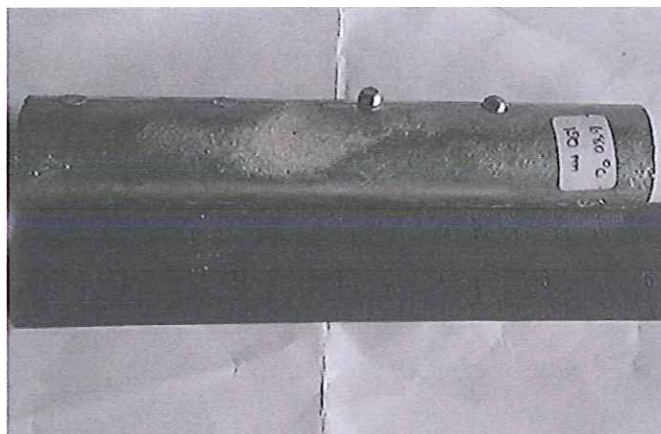
4.1 ผิว และรูพรุน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง ผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเท และความยาวของรางเทหล่อเย็น

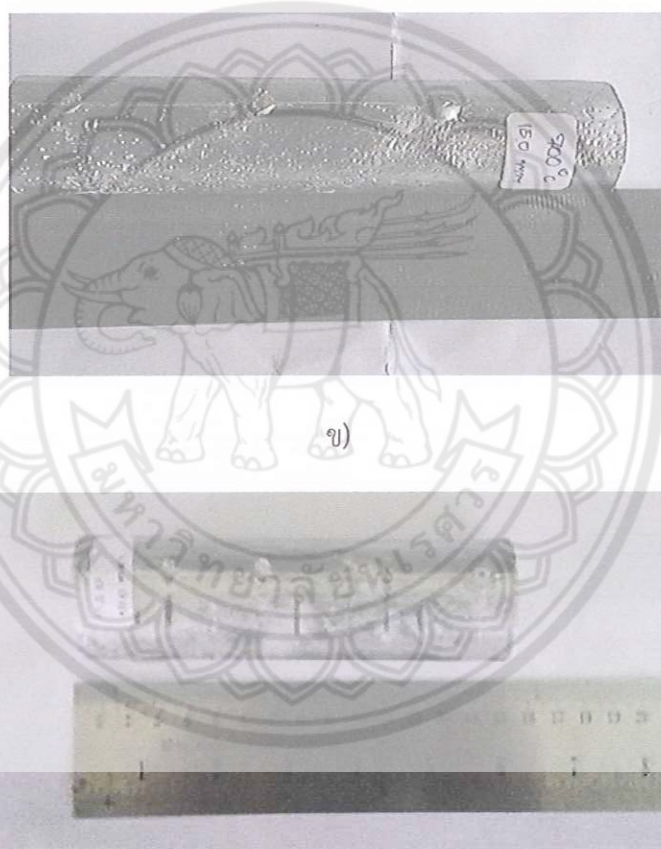
4.1.1 ผิว และรูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน

4.1.1.1 ผิวของชิ้นงาน

จากการศึกษาผิวชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความยาว 150 และ 300 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิเท 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า พบว่าผิวของชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส จะมีความเรียบผิวมากกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 700 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เทมีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน การเทโลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้โลหะหลอมเหลวมีความสามารถในการไหล (Fluidity) ได้ดีกว่า โลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำ เพราะโลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนืดน้อยกว่า จะส่งผลให้โลหะหลอมเหลวสามารถไหลเข้าเต็มเต็มแม่พิมพ์ได้ดี และโลหะหลอมเหลวบางส่วนยังไม่เกิดการแข็งตัวก่อนไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ อีกทั้งการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำอาจทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวที่บริเวณผิวของแม่พิมพ์ก่อน ทำให้ชิ้นงานมีความเรียบผิวดำ ดังนั้นชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส จึงมีความเรียบผิวที่ดีกว่าชิ้นงานที่เทด้วยอุณหภูมิ 700 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับในทุก ๆ ความยาวของรางเท ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



ก)

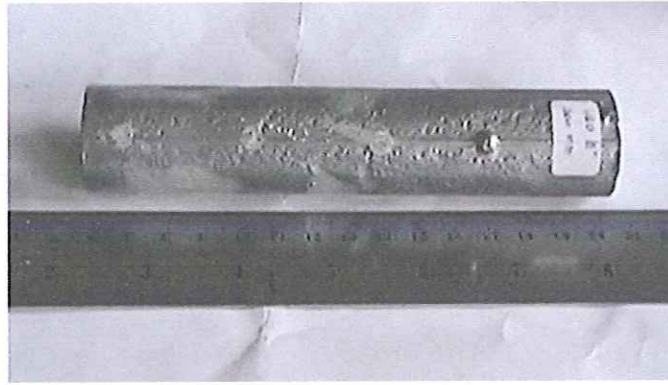


ข)

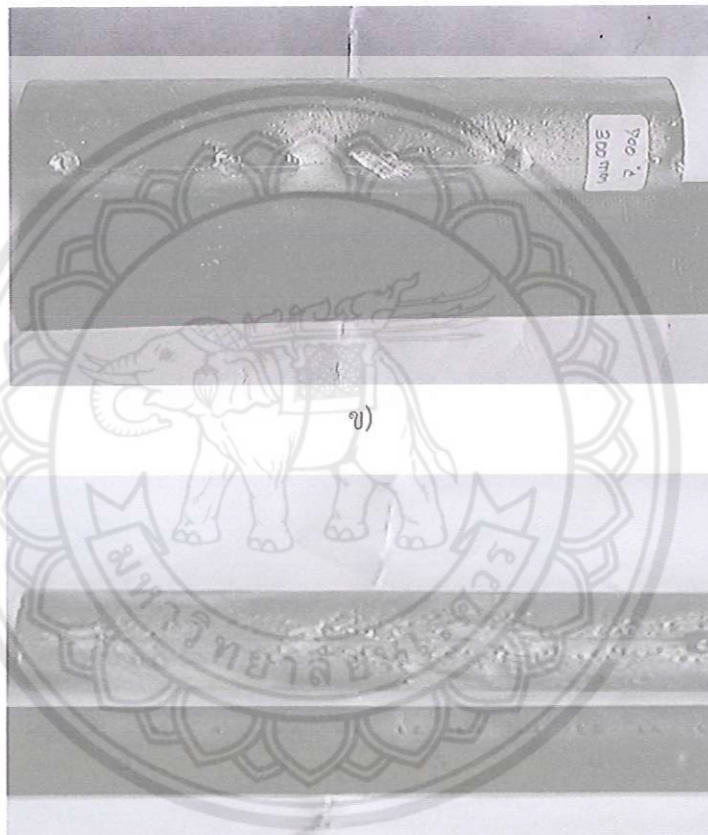
ค)

รูปที่ 4.1 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเทต่างกัน

ก) อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส
 ข) อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส
 ค) อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส



ก)



ข)

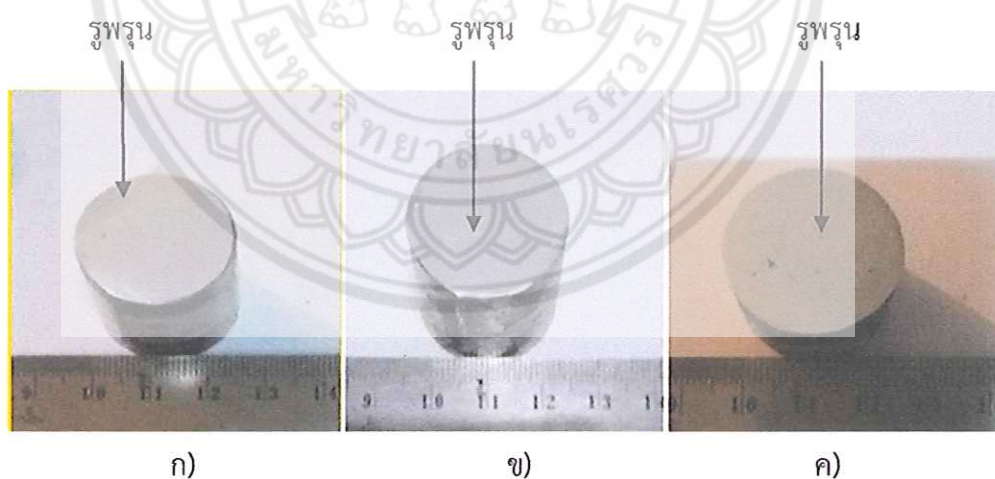
ค)

รูปที่ 4.2 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ก) อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส
 ข) อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส
 ค) อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส

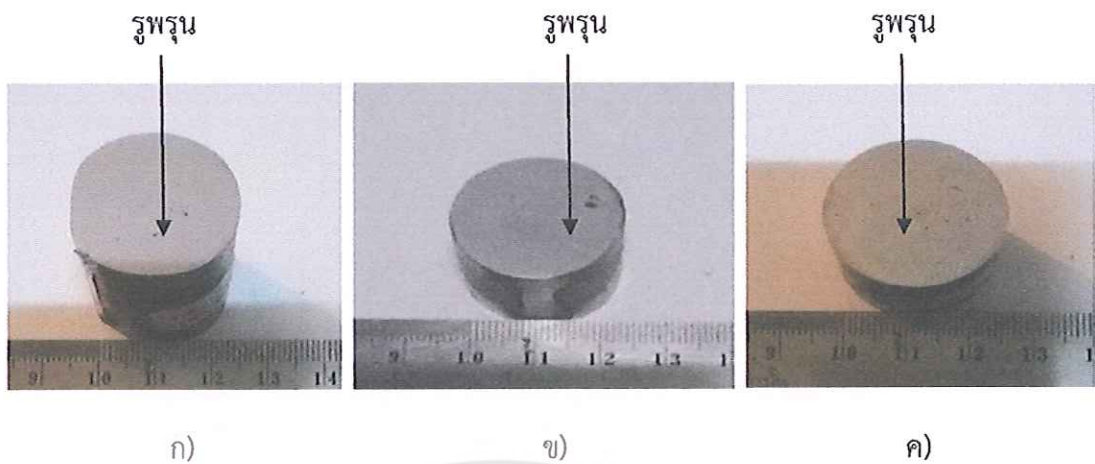
4.1.1.2 รูพรุน

จากการศึกษารูพรุนของชิ้นงาน พบว่าค่ารูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส มีค่ารูพรุนประมาณร้อยละ 18 โดยพื้นที่ (ความยาว 150 มิลลิเมตร) และร้อยละ 16 โดยพื้นที่ (ความยาว 300 มิลลิเมตร) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสมีค่ารูพรุนประมาณร้อยละ 23 โดยพื้นที่ (ความยาว 150 มิลลิเมตร) และร้อยละ 21 โดยพื้นที่ (ความยาว 300 มิลลิเมตร) และชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส มีค่ารูพรุนประมาณร้อยละ 40 โดยพื้นที่ (ความยาว 150 มิลลิเมตร) และร้อยละ 38 โดยพื้นที่ (ความยาว 300 มิลลิเมตร) จะเห็นว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จะมีค่ารูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 700 และ 720 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานที่มีการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง โลหะหลอมเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้เร็วกว่า เนื่องจากมีความหนืดต่ำ แต่โลหะหลอมเหลวที่มีการเทที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมได้ง่าย อีกทั้งการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ยังเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำ โลหะหลอมเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ช้า เนื่องจากมีความหนืดสูง ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์มีความราบเรียบ และโอกาสในการเกิดฟองแก๊สระหว่างที่โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จะน้อย ดังนั้นชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จึงมีรูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิ 700 และ 720 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 รูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทต่อเนื่อง บนรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างกัน

- ก) อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส
- ข) อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส
- ค) อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส



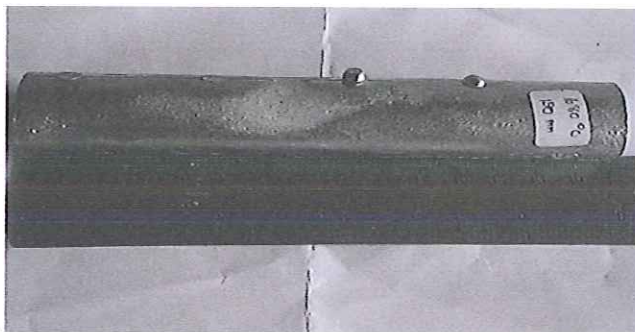
รูปที่ 4.4 รูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิต่างกัน

- ก) อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส
- ข) อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส
- ค) อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส

4.1.2 ผิว และรูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้น เมื่อความยาวของรางเทต่างกัน

4.1.2.1 ผิวของชิ้นงาน

จากการศึกษาผิวชิ้นงานที่ความยาวของรางเท 150 และ 300 มิลลิเมตรเมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า พบว่าผิวของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร มีความเรียบผิวมากกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร เนื่องจากความยาวของรางเทมีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน ถ้ารางเทมีความยาวน้อย โลหะหลอมเหลวจะมีระยะเวลาอยู่บนรางเทน้อย ส่งผลให้มีการระบายความร้อนเกิดขึ้นน้อย แต่ถ้ารางเทมีความยาวมากโลหะหลอมเหลวจะมีระยะเวลาอยู่บนรางเทได้นานกว่าทำให้การระบายความร้อนเกิดขึ้นได้มาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โลหะหลอมเหลวที่เทผ่านรางเทที่มีความยาวน้อย มีผิวของชิ้นงานที่เรียบกว่ารางเทที่มีความยาวมาก ดังนั้นชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร จึงมีผิวที่เรียกว่า ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร ในทุก ๆ อุณหภูมิเท ดังแสดงในรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



ก)



ข)

รูปที่ 4.5 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน

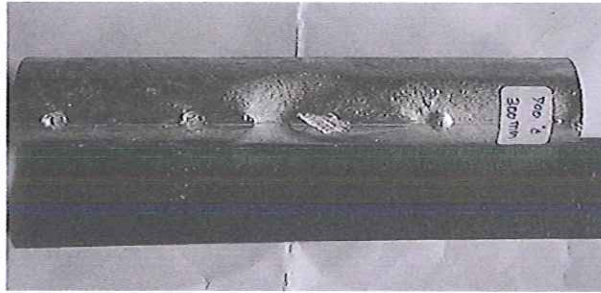
- ก) ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร
- ข) ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร



ก)

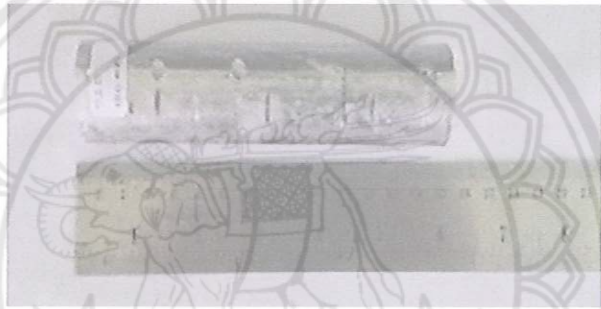
รูปที่ 4.6 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน

- ก) ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร



ข)

รูปที่ 4.6 (ต่อ) ผิวนองขึ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน
ข) ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร



ก)

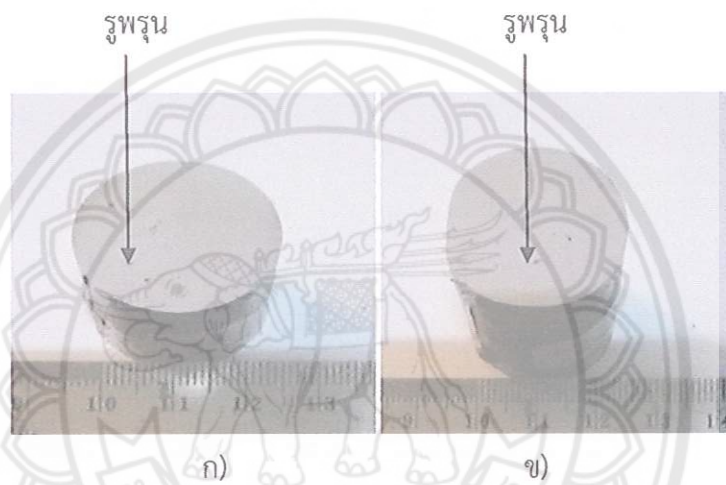


ข)

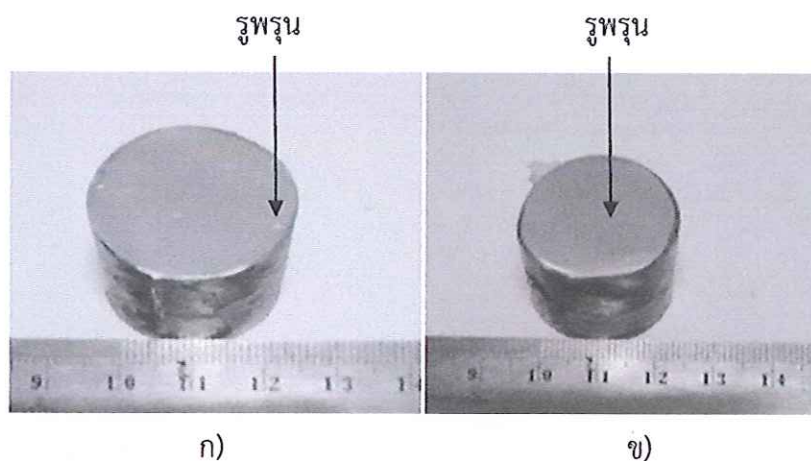
รูปที่ 4.7 ผิวนองขึ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน
ก) ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร
ข) ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร

4.1.2.2 รูพรุน

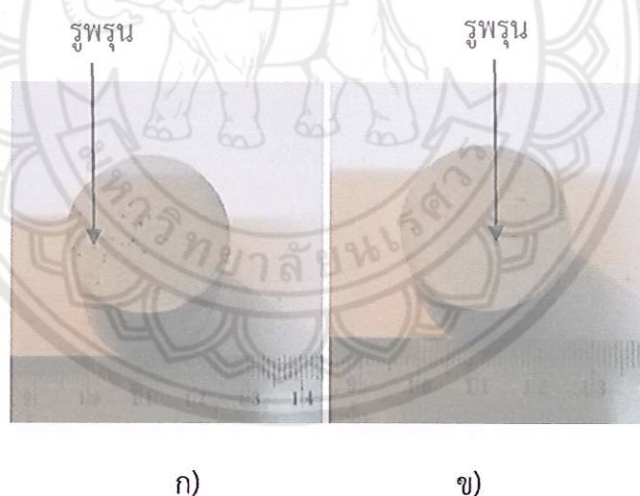
จากการศึกษารูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 150 และ 300 มิลลิเมตร เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ พบว่าค่ารูพรุนของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร จะมีค่ารูพรุนประมาณร้อยละ 16 ถึง 38 โดยพื้นที่ และค่ารูพรุนของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร จะมีค่ารูพรุนประมาณร้อยละ 18 ถึง 40 โดยพื้นที่ จะเห็นว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร จะมีค่ารูพรุนใกล้เคียงกับชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร จากการทดลองนี้ไม่สามารถสรุปได้ว่า ความยาวของรางเทมีผลโดยตรงกับการเกิดรูพรุนบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 รูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน
 ก) ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร
 ข) ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.9 รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน
 ก) ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร
 ข) ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.10 รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบบนรางเทที่มีความยาวต่างกัน
 ก) ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร
 ข) ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร

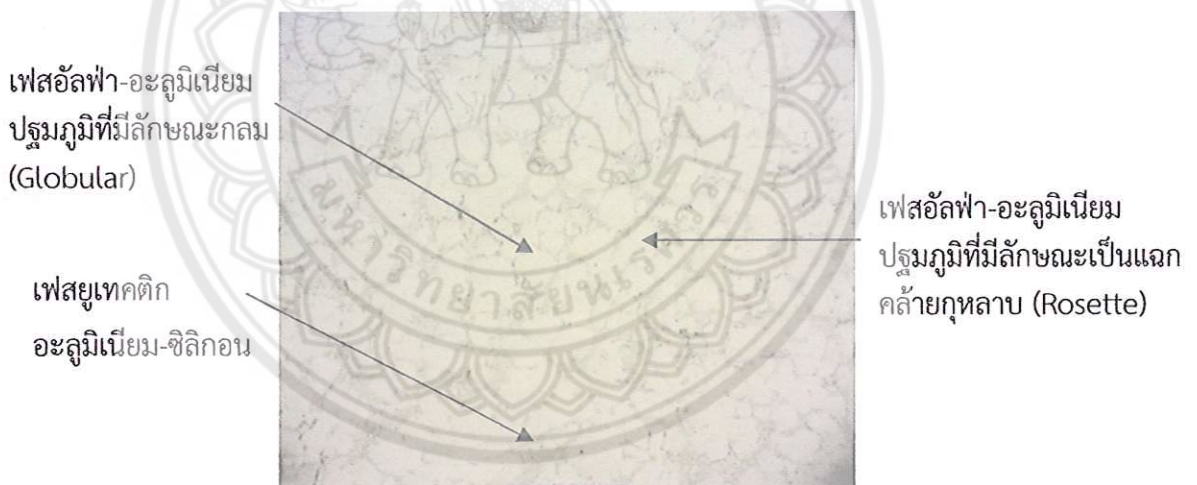
4.2 โครงสร้างจุลภาค ปังจัยรูปร่าง พื้นที่ของเกรน และความแข็งของชิ้นงานหล่อ

โครงสร้างจุลภาค ปังจัยรูปร่าง และขนาดของชิ้นงานหล่อ จะส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงาน ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ปังจัยรูปร่าง และขนาด หลังจากผ่านกระบวนการ

หล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและความยาวของรางเทหล่อเย็น

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก เกรด เอ 319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) และเฟสอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนยูเทคติก (Al-Si Eutectic) โดยที่เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีลักษณะกลม (Globular) และมีสีขาวกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน เนื่องจากการไหลของโลหะหลอมเหลว ทำให้เกิดความเค้นไปกระทำกับเดนไดรต์ เป็นผลทำให้เดนไดรต์เกิดการแตกหักแต่บางส่วนของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ จะเห็นโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette Structure) และพบเฟสยูเทคติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่มีสีขาวสลับดำแทรกอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.11



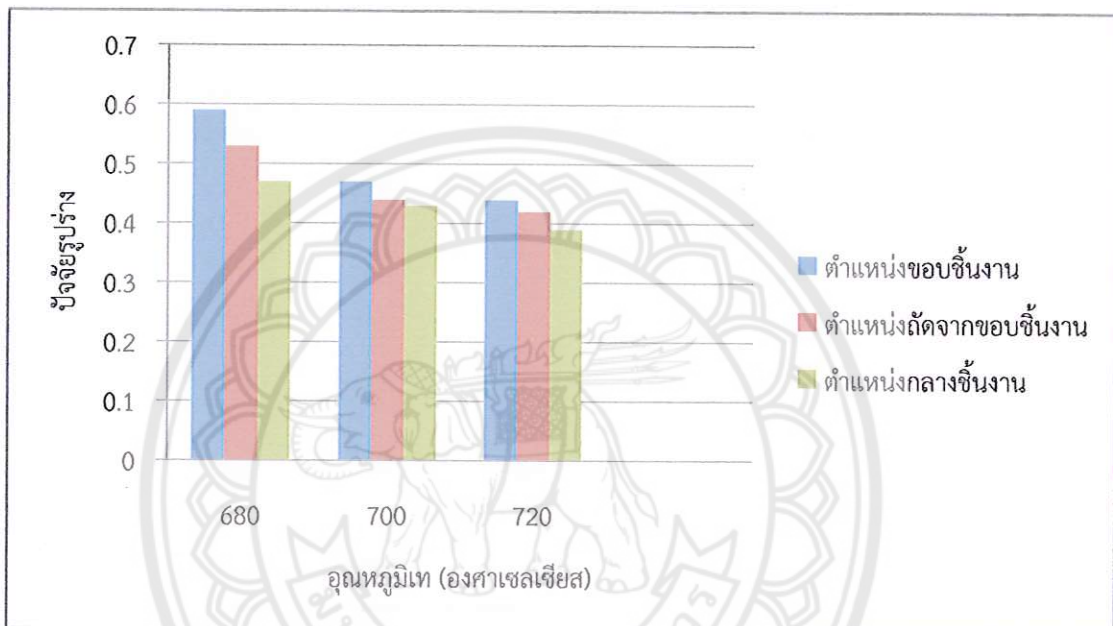
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนไฮโปยูเทคติก

4.2.2 โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่ของเกรน และความแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆบนชิ้นงาน

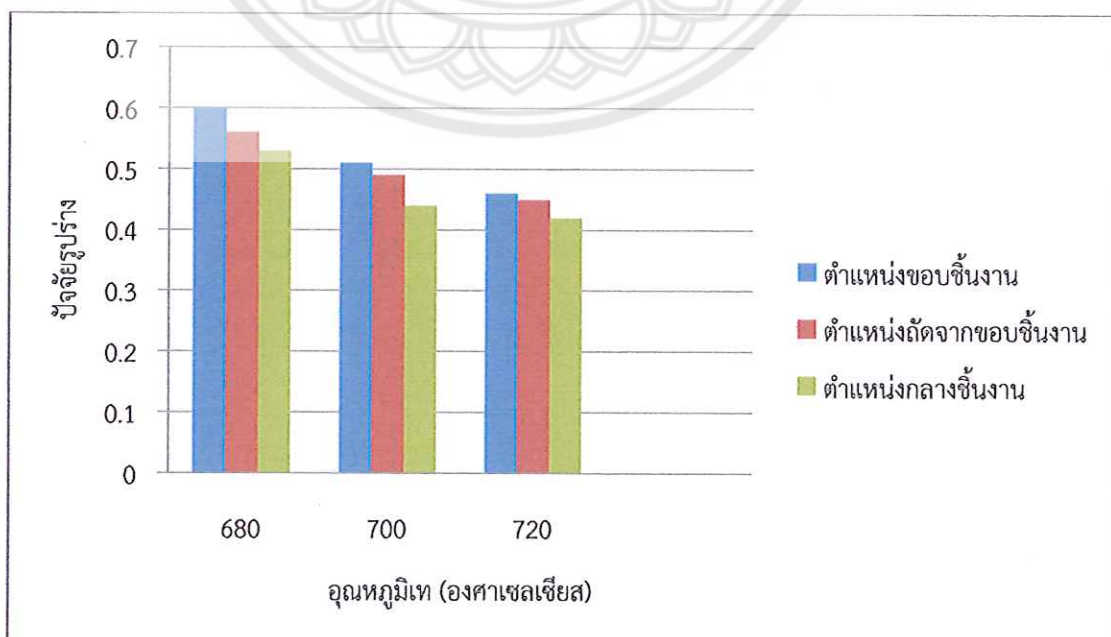
4.2.2.1 ปัจจัยรูปร่าง

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก เกรด เอ 319 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณตำแหน่งขอบชิ้นงาน มีค่าเฉลี่ยของ

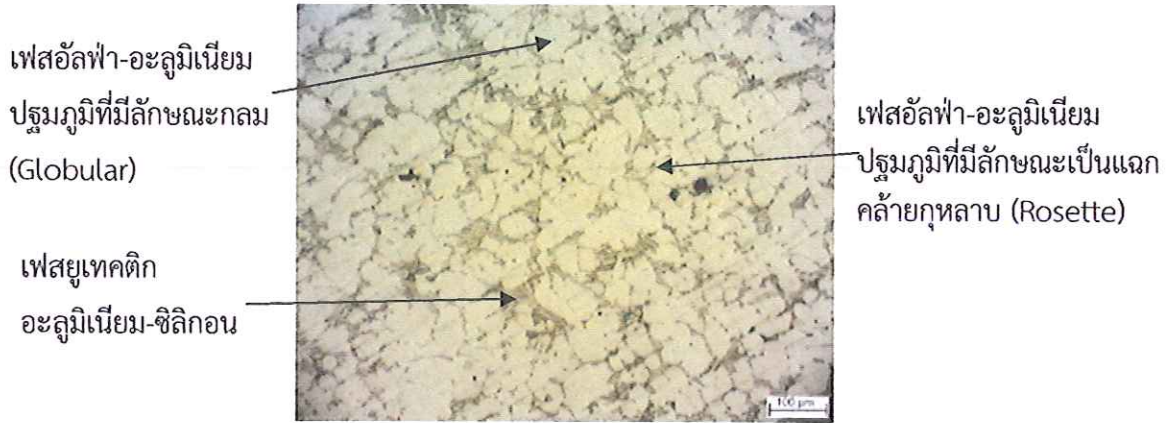
เฟสอัลฟ่า-อะลูมิเนียมปฏิกิริยาที่มีความกลมมากกว่าบริเวณถัดจากขอบชิ้นงาน และบริเวณกลางชิ้นงาน ตามลำดับในทุกอุณหภูมิ และความยาวรางของรางเท เนื่องจากเมื่อชิ้นงานเกิดการแข็งตัว บริเวณตำแหน่งขอบชิ้นงานจะมีระยะเวลาในการแข็งตัวที่เร็วกว่าบริเวณตำแหน่งถัดจากขอบชิ้นงาน และบริเวณตำแหน่งกลางชิ้นงาน ทำให้โครงสร้างจุลภาคบริเวณตำแหน่งขอบชิ้นงานมีความกลม แต่บริเวณถัดจากขอบชิ้นงาน และบริเวณกลางชิ้นงานโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 4.13 และ 4.14



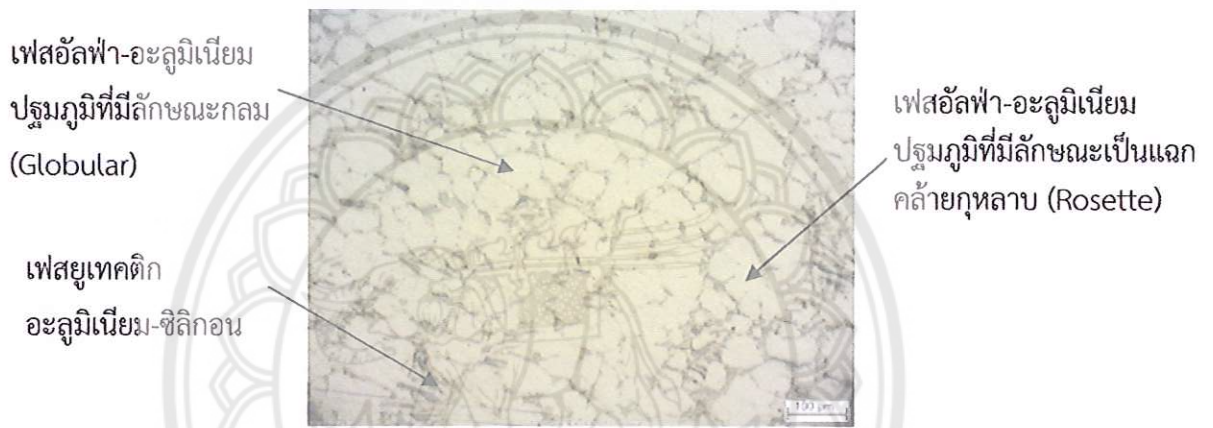
รูปที่ 4.12 ปัจจัยรูปร่าง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.13 ปัจจัยรูปร่าง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร



ก)



ข)



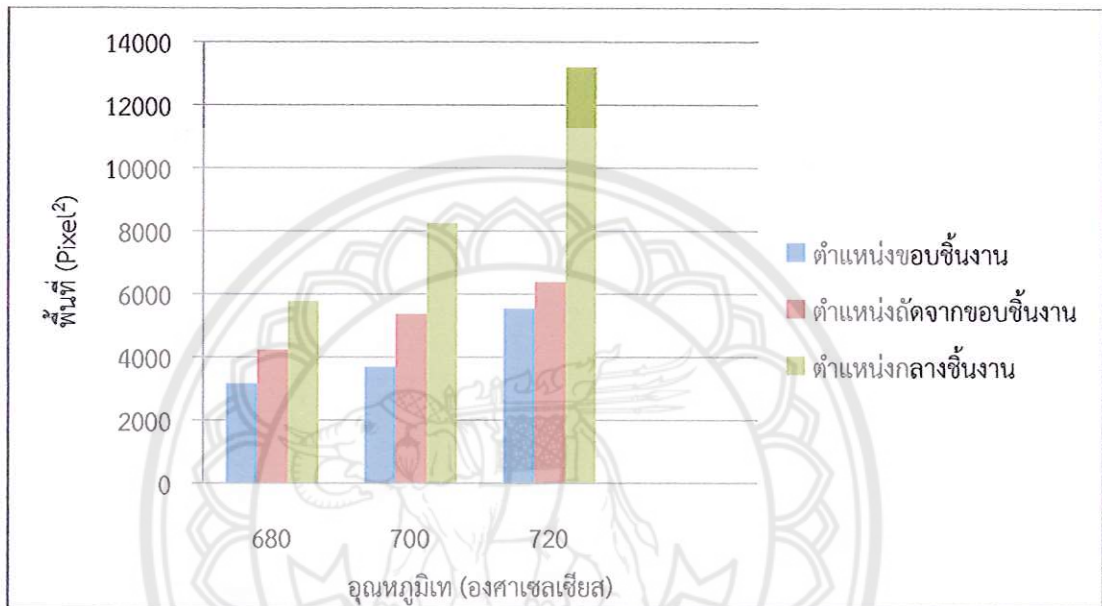
ค)

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

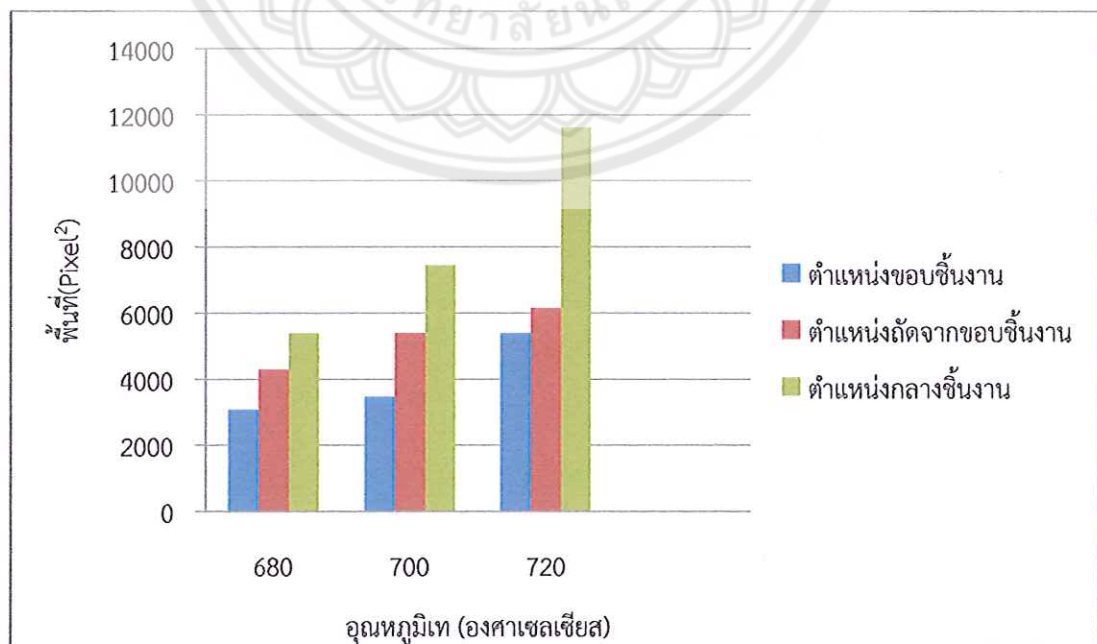
- ก) ตำแหน่งกลางชิ้นงาน
- ข) ตำแหน่งถัดจากขอบชิ้นงาน
- ค) ตำแหน่งขอบชิ้นงาน

4.2.2.2 พื้นที่เกรน

จากการศึกษา ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานพบว่า บริเวณตำแหน่งกลางชิ้นงาน โครงสร้างจุลภาคเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีขนาดใหญ่กว่าบริเวณอื่น ๆ ในทุก อุณหภูมิเท และทุก ๆ ความยาวของรางเท เนื่องจากบริเวณกลางชิ้นงานมีระยะเวลาในการแข็งตัวที่ช้า ส่งผลให้ พื้นที่เกรนมีขนาดใหญ่ ส่วนบริเวณขอบชิ้นงานและบริเวณถัดจากขอบชิ้นงานมีระยะเวลาในการ แข็งตัวที่เร็ว พื้นที่เกรนจึงมีขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16



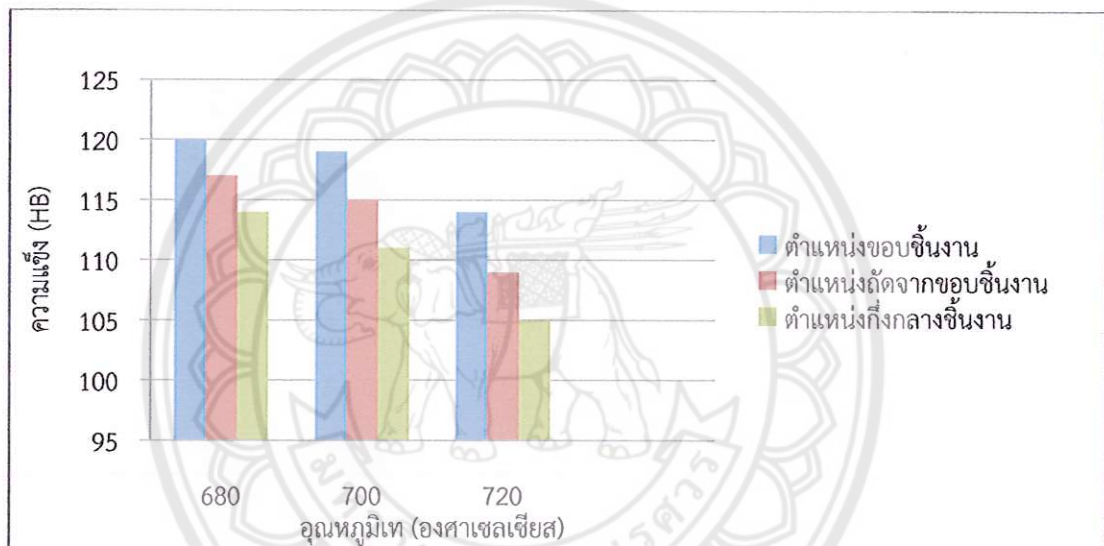
รูปที่ 4.15 พื้นที่เกรน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร



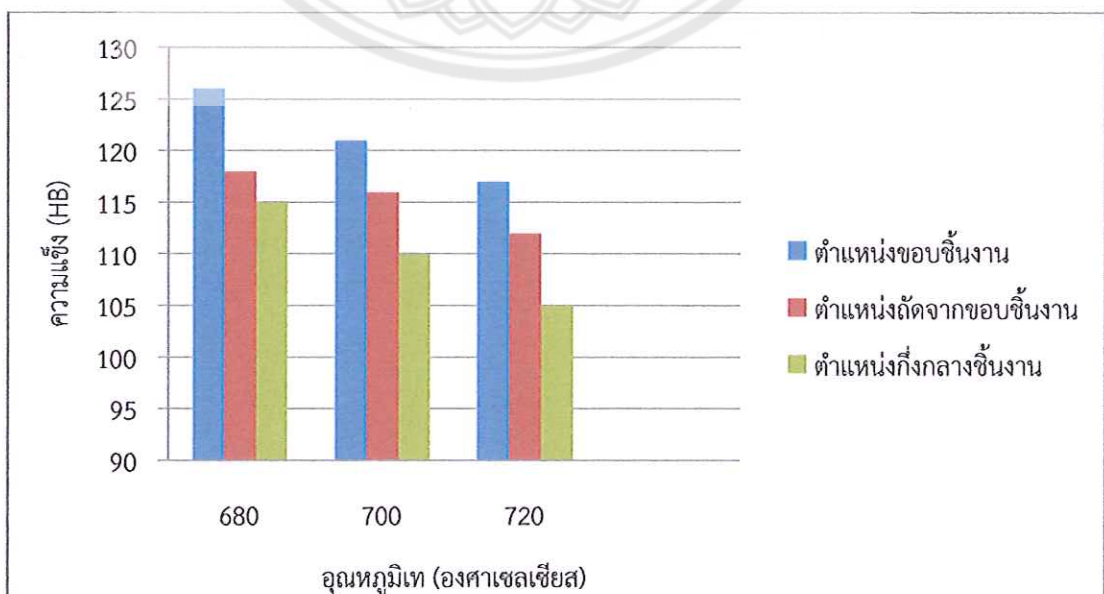
รูปที่ 4.16 พื้นที่เกรน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร

4.2.2.3 ความแข็ง

จากการศึกษาความแข็ง (Hardness Test) ของชิ้นงาน ด้วยการทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) ด้วยหัวบอลขนาด 2.5 มิลลิเมตร น้ำหนักกด 187.5 กิโลกรัมแรง ใช้เวลาในการกด 15 วินาที พบว่า บริเวณตำแหน่งขอบชิ้นงาน จะมีค่าความแข็งมากกว่า บริเวณตำแหน่งถัดจากขอบชิ้นงาน และบริเวณตำแหน่งกลางชิ้นงาน ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณตำแหน่งขอบชิ้นงานมีความกลมของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิมากกว่า และมีขนาดเกรนเล็กที่สุด ส่งผลให้มีค่าความแข็งมาก เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างจุลภาคเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette) และมีขนาดเกรนใหญ่ ทำให้ความแข็งลดลงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

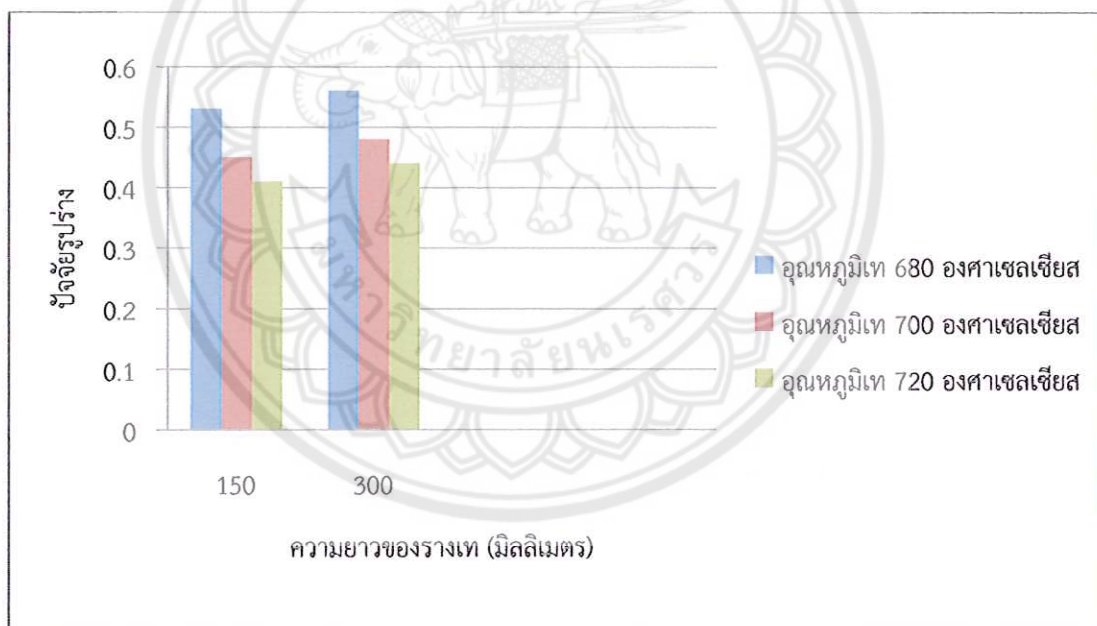


รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร

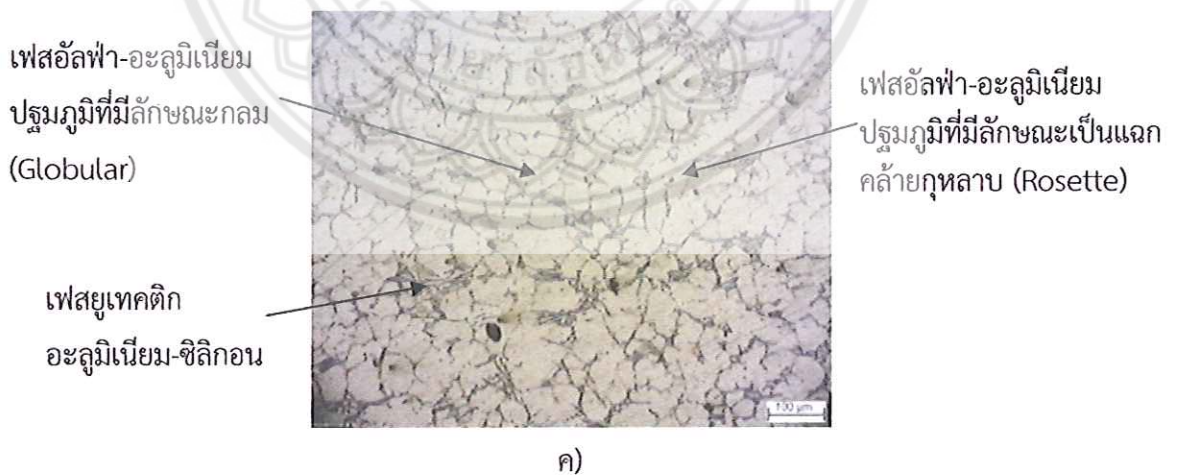
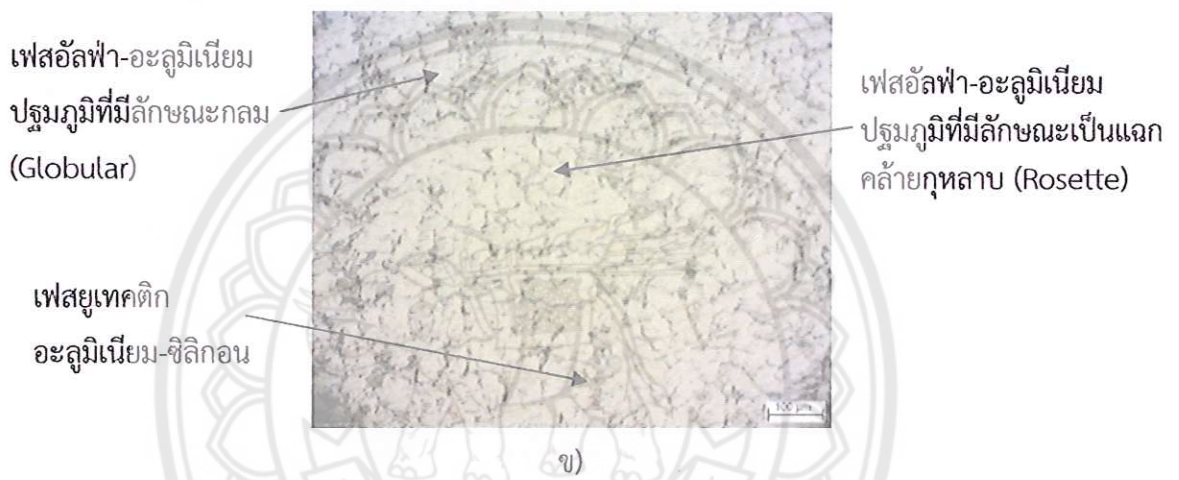
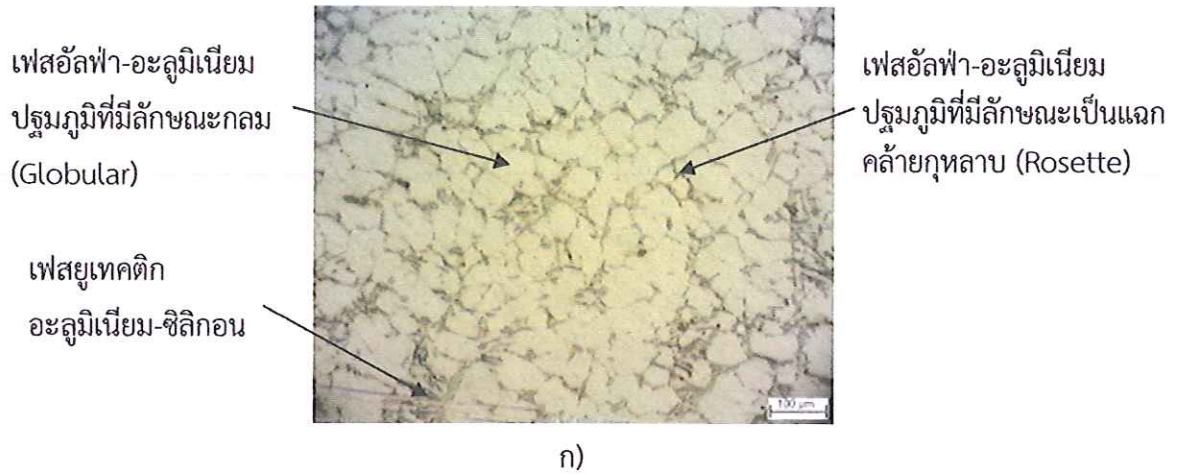
4.2.3 โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่ของเกรน และความแข็ง เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน

4.2.3.1 ปัจจัยรูปร่าง

จากการศึกษา เมื่อเปรียบเทียบ ที่อุณหภูมิ 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส มีค่าความกลมเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปริมาณมากกว่าที่อุณหภูมิ 700 และ 720 ตามลำดับ เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ จะส่งผลให้มีปริมาณอัตราส่วนของแข็งในของเหลวมาก (Solid fraction) รวมถึงความหนืดของโลหะหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเท จึงเพียงพอต่อการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเดนไดรต์เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลม ประกอบกับมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิการแข็งตัว (Solidus Temperature) ของโลหะหลอมเหลว จึงส่งผลให้โลหะหลอมเหลวมีระยะเวลาในการแข็งตัวน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น นิวเคลียสบนรางเทจะเกิดขึ้นน้อย เมื่อนิวเคลียสเข้าไปในแม่พิมพ์จะไม่มีแรงเฉือนมากระทำอีกทั้งเมื่อโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิสูง ทำให้โครงสร้างจุลภาคมีโอกาพัฒนาจากแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette) กลายเป็นเดนไดรต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ปัจจัยรูปร่าง เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

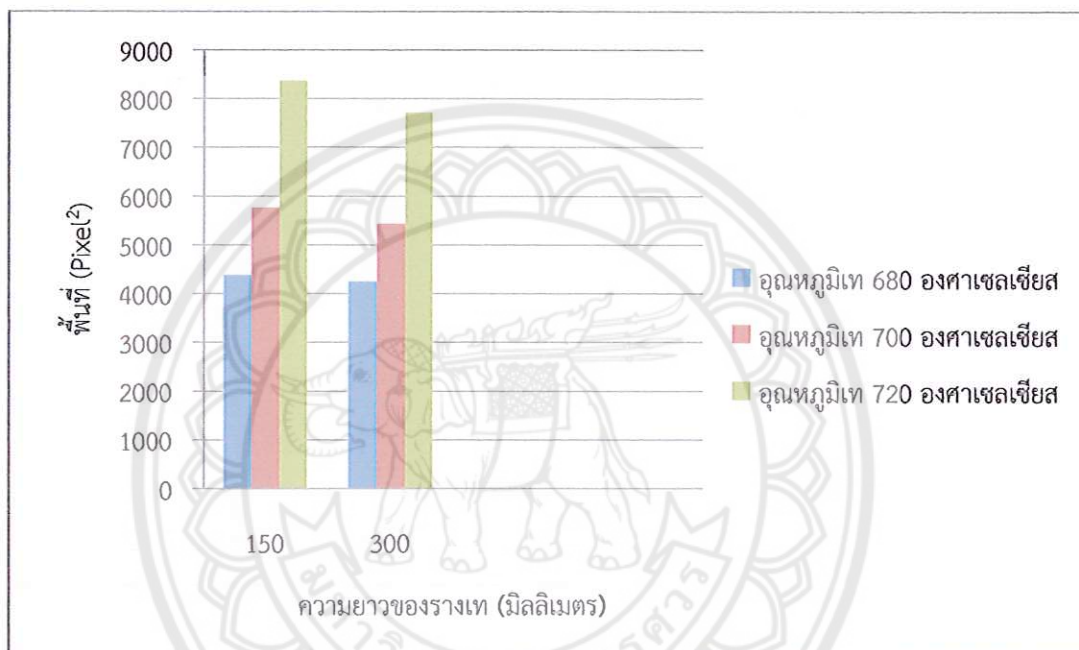


รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

- ก) 680 องศาเซลเซียส
- ข) 700 องศาเซลเซียส
- ค) 720 องศาเซลเซียส

4.2.3.2 พื้นที่เกรน

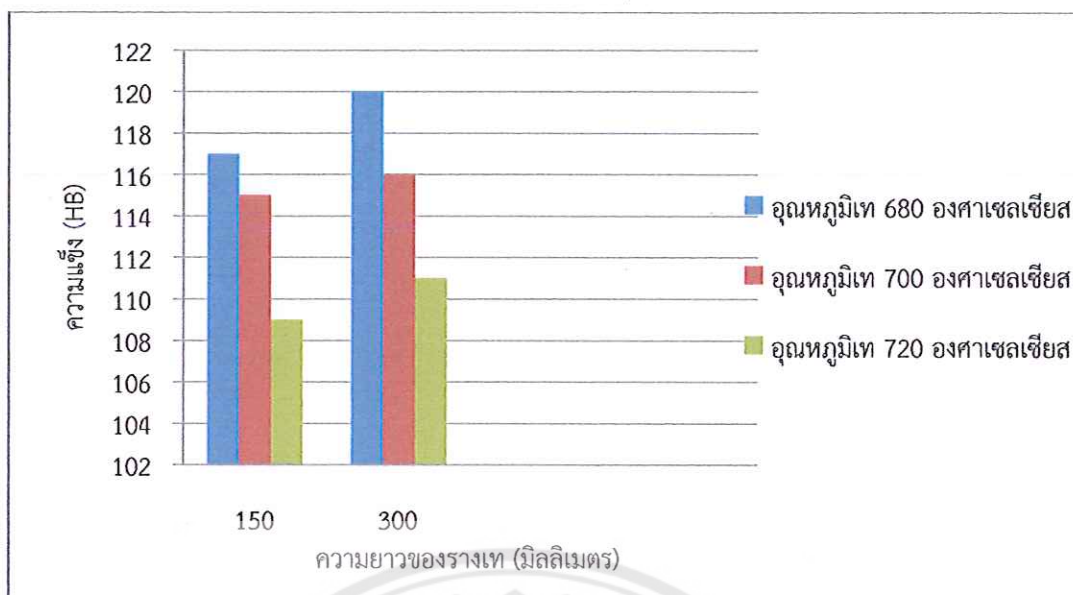
จากการศึกษา พบว่าที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคบริเวณ เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดเล็กกว่าที่อุณหภูมิเท 700 และ 720 องศาเซลเซียส ในทุก ๆ ความยาวของราง เนื่องจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ จะส่งผลให้อัตราส่วนของแข็งในของเหลวมาก ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นก็จะมากตามไปด้วย ทำให้พื้นที่เกรนที่ได้มีขนาดเล็ก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทสูงขึ้น อัตราส่วนของแข็งในของเหลวจะน้อยลง ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นก็จะน้อยลงตามไปด้วย ทำให้พื้นที่เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 พื้นที่เกรน เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง

4.2.3.3 ความแข็ง

จากการศึกษา พบว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งเฉลี่ยมากกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 700 และ 720 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีขนาดเล็ก และกลมเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเทสูง ประกอบกับที่อุณหภูมิต่ำ ชิ้นงานจะพบรูพรุนปริมาณน้อยกว่า ส่วนชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเทสูง รูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานมีค่ามาก จึงส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.22

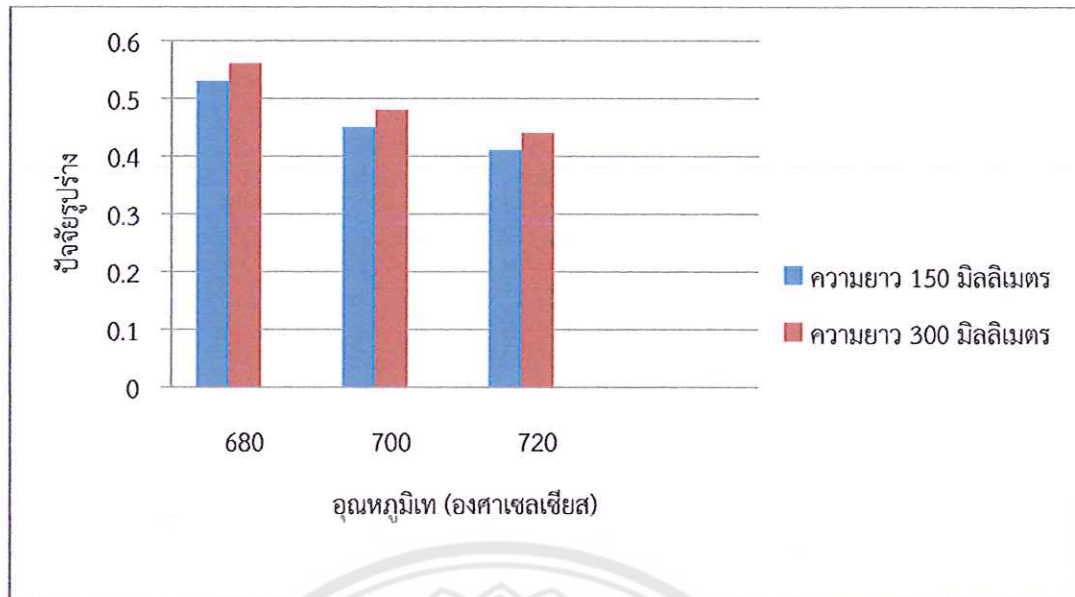


รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งของชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

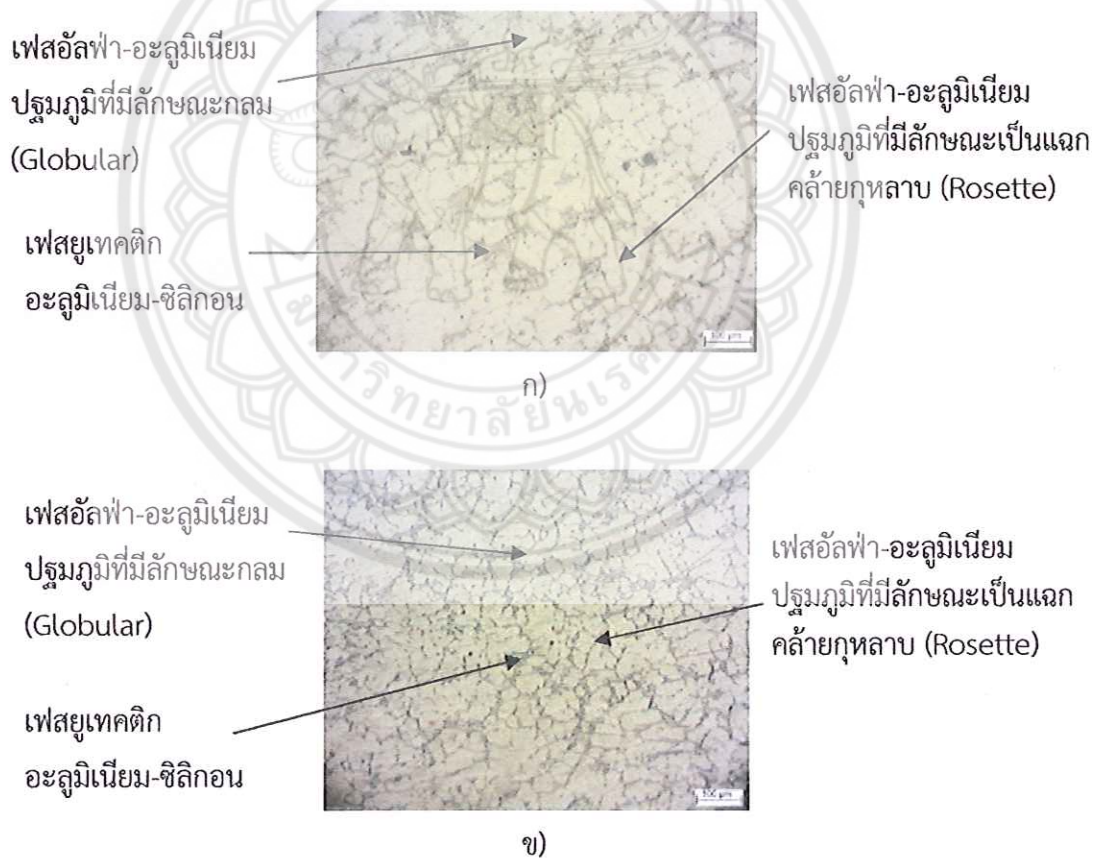
4.2.4 โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่ของเกรน และความแข็ง เมื่อความยาวของรางเทต่างกัน

4.2.4.1 ปัจจัยรูปร่าง

จากการศึกษา ที่อุณหภูมิ 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส ตามลำดับ บนรางเทที่มีความยาว 150 และ 300 มิลลิเมตร พบว่า โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมนุมี ที่มีความกลมมากกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร ในทุก ๆ อุณหภูมิ เนื่องจากถ้าความยาวของรางเทมาก ส่งผลต่อระยะเวลาที่โลหะหลอมเหลวอยู่บนรางเทที่มากกว่า ทำให้ช่วงเวลาในการเย็นตัวเร็วขึ้น ออกจากรางมากและที่ปลายรางเทมีอุณหภูมิต่ำ เมื่อโลหะหลอมเหลวไหลลงแม่พิมพ์จะใช้เวลาในการโตของเกรนน้อย เกรนจึงมีลักษณะกลม และไม่พัฒนาเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette) หรือเดนไดรต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24



รูปที่ 4.23 ปัจจัยรูปร่าง เมื่อความยาวของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง



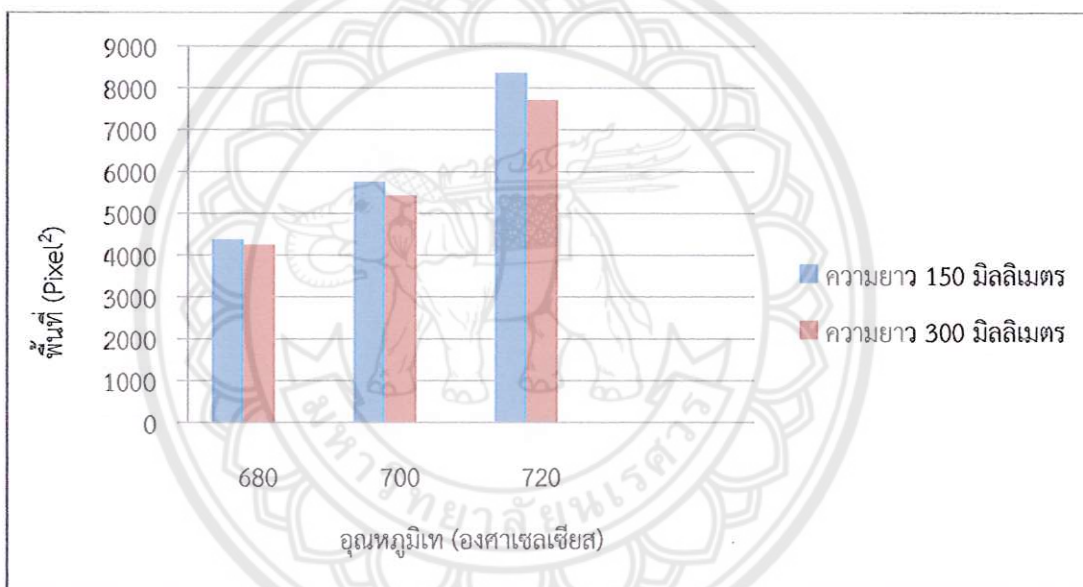
รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ความยาวของรางเทต่างกัน ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

ก) 150 มิลลิเมตร

ข) 300 มิลลิเมตร

4.2.4.2 พื้นที่เกรน

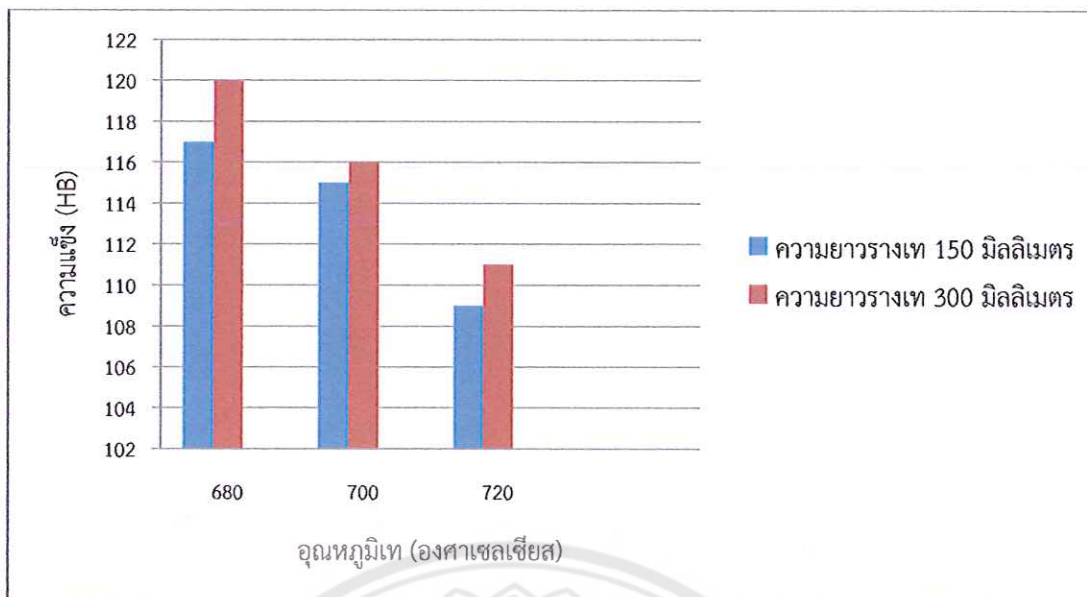
จากการศึกษา พบว่า ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตรโครงสร้างจุลภาคบริเวณ เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร ในทุก ๆ อุณหภูมิเท เนื่องจากถ้าความยาวของรางเทน้อย โลหะหลอมเหลวจะมีช่วงระยะเวลาในการระบายความร้อนที่สั้น และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเทเท่ากัน อุณหภูมิที่ปลายรางเทสั้นจะสูงกว่า เมื่อโลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์จะสูง ทำให้เกรนโตได้มากกว่า แต่ถ้ารางเทมีความยาวเพิ่มขึ้น โลหะหลอมเหลวจะมีระยะเวลาในการระบายความร้อนที่ยาวขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเทเท่ากัน อุณหภูมิที่ปลายรางเทยาวจะต่ำกว่า เมื่อโลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ทำให้อุณหภูมิโลหะหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาในการโตของเกรนถูกจำกัด ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 พื้นที่เกรน เมื่อความยาวของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง

4.2.4.3 ความแข็ง

จากการศึกษา พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่มีความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร มีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ในทุก ๆ อุณหภูมิเท เนื่องจาก ที่ความยาวของรางเท 300 มิลลิเมตร โครงสร้างจุลภาคเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมามีค่าความกลมเฉลี่ยมากกว่า และขนาดเกรนเล็กกว่า ส่งผลให้มีความแข็งมาก ส่วนที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร โครงสร้างจุลภาคเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมามีค่าความกลมเฉลี่ยน้อยกว่า และขนาดเกรนใหญ่กว่า ส่งผลให้ความแข็งลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อความยาวของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง



บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะ การพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาของโครงการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส จะมีความเรียบผิวสูงกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 700 และ 680 องศาเซลเซียส แต่ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จะมีรูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 700 และ 720 องศาเซลเซียส

5.1.2 ผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเมื่อเปรียบเทียบที่ความยาวของรางเทหล่อเย็นต่างกัน พบว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร มีความเรียบผิวสูงกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร และไม่สามรถสรุปได้ว่าความยาวของรางเทมีผลต่อรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

5.1.3 ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่เกรน และความแข็งของชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบที่ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงาน พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ตำแหน่งบริเวณขอบชิ้นงาน มีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีความกลมมาก และมีพื้นที่เกรนน้อยกว่าบริเวณอื่น ส่งผลให้ตำแหน่งขอบชิ้นงานมีความแข็งมากที่สุดในทุกอุณหภูมิ และความยาวของรางเท

5.1.4 ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่เกรน และความแข็งของชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีความกลมมาก และมีพื้นที่เกรนน้อยกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิ 700 และ 720 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีความแข็งมากที่สุดในทุกความยาวของรางเท

5.1.5 ปัจจัยรูปร่าง พื้นที่เกรน และความแข็งของชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบที่ความยาวของรางเทต่างกัน พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 300 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีความกลมมาก และพื้นที่เกรนน้อยกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร ส่งผลให้ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีความแข็งมากที่สุดในทุกอุณหภูมิ

5.2 ข้อเสนอแนะ การพัฒนา

5.2.1 ควรมีการทดลองซ้ำ เพื่อตรวจสอบข้อมูล

5.2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งมีหลายเทคนิค อาจใช้เทคนิคอื่น ๆ มาทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองได้

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ไขปัญหา

5.3.1 อุณหภูมิเท และความยาวของรางเทที่ใช้ในกระบวนการหล่อ ไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่ชัดเจน ซึ่งอาจต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างอุณหภูมิเท และความยาวของรางเทหล่อเย็นให้มากกว่าเดิม

5.3.2 ในการทดลองครั้งแรกได้ตั้งตัวแปรอุณหภูมิไว้ที่ 630 650 และ 680 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 630 องศาเซลเซียส โลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวบนรางเทหล่อเย็น จึงปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทมาเป็น 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส เพื่อแก้ปัญหาโลหะหลอมเหลวแข็งตัวบนรางเทหล่อเย็น



เอกสารอ้างอิง

- [1] JIS HAND BOOK. (1998). Non-Ferrous Metals & Metalloy. Japanese Standards associate.
- [2] ดิสนีย์ชาติเศรษฐีพงษ์. (ตุลาคม 2557). โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน. สืบค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2557, จาก :
http://www.aluminiumlearning.com/html/index_c4xx_x.html
- [3] รศ.ดร. เขาวลดี ลิ้มมณีวิจิตร. ตัวอย่างโลหะอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรดA319. สืบค้นเมื่อ 14 ตุลาคม 2557, จาก :
<http://www.cemct.net/web/images/stories//alsi001.pdf>
- [4] กนกกาญจน์ ศรีม่วง. (2553). การพัฒนากระบวนการผลิตรีโอดีแคสติงแบบรางเทหล่อเย็น สำหรับอะลูมิเนียมผสม. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- [5] อาภาส อุตตาลกาญจนาน. (2553). การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปขึ้นส่วนอะลูมิเนียมผสม ในกระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็ง. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- [6] นุชชานา พูลทอง. (2545). อิทธิพลของธาตุผสมและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อกึ่งแข็ง. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร
- [7] พรวิสา วงศ์ปัญญา. (2551). การแข็งตัวของโลหะ. วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา
- [8] Microscope. Slideshare. สืบค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2557, จาก : www.slideshare.net/hexhell/microscope-5639551
- [9] รองศาสตราจารย์ แมน อมรสิทธิ์. (ตุลาคม 2557). การหาขนาดเกรน. สืบค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2557, จาก http://www.coe.or.th/_COE/_download/training/P_Materials.pdf
- [10] บัณฑิต ใจชื่น. (2007). โลหวิทยากายภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ประกอบเม-ไตร
- [11] การทดสอบความแข็ง. สืบค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2557,
จาก : [http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-7.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-7.pdf)
- [12] การทดสอบความแข็งแบบบริเนล. สืบค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2557,
จาก : http://www.calservethailand.com/Reference_Brinell_th.pdf
- [13] การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล. สืบค้นเมื่อ 19 ตุลาคม 2557, จาก :
<http://www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/termwork/hardness/12.html>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] การทดสอบความแข็ง. สืบค้นเมื่อ 21 ตุลาคม 2557,
จาก : <http://www.wilsonhardness.com/Products/BrinellTesters/.aspx>
- [15] สุทธาทิพย์, อภิญญา และอรณิสสา (2557). การศึกษาอุณหภูมิเท และความชันของรางเทที่มีผลต่อความแข็ง และโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A356 โดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น. วศ.บ., สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- [16] T. HAGA and R. NAKAMURA. (2010). Effects of casting factors of cooling slope on semisolid condition. Osaka Institute of Technology, Japan
- [17] Taghavi and Ghassemi. (2009). Study on the effects of the length and angle of inclined plate on the thixotropic microstructure of A356 aluminum alloy. Engineering Department, Iran
- [18] Guan. (2007). Three-Dimensional Analysis of the Modified slope Cooling/Shearing process, vol 14 (No2) 146-150
- [19] Ghomashchi. (2006). Microstructural characterization of rheo-cast billets prepared by variant pouring temperatures. University of Quebec at Chicoutimi, Canada
- [20] Motegi, T. and Tanabe, F. (2004). New Semi-Solid Casting of Copper Alloys Using and Inclined Cooling Plate, Processing of Alloy and Composite, Limassol, Cyprus.
- [21] Takagi, Hidetoshi, (2007). Effects of Mechanical Stirring and Vibration on the Microstructure of Hypereutectic Al-Si-Cu-Mg Alloy Billets. สืบค้นเมื่อ 17 มิถุนายน 2558, จาก : <http://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/48/05/960.pdf>



ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบ
กึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น

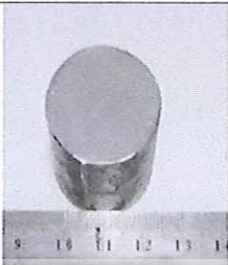
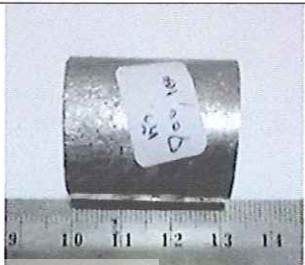

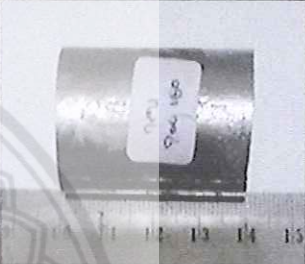

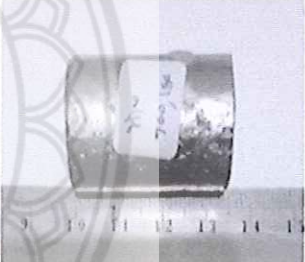
ตารางที่ ก.1 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคแรงเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาวรางเท	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
680/150	บน		
	กลาง		
	ล่าง		

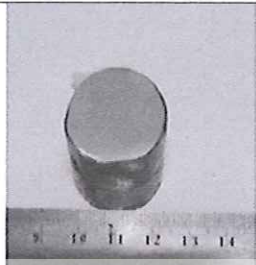
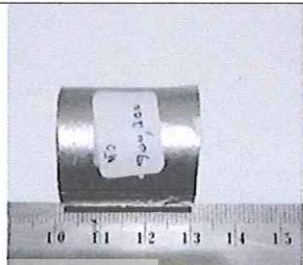




ตารางที่ ก.2 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาวรางเท	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
680/300	บน		
	กลาง		
	ล่าง		


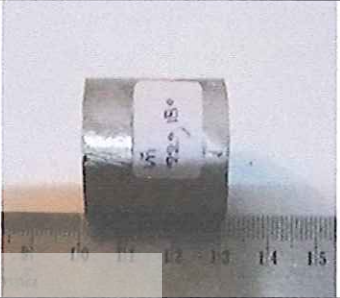



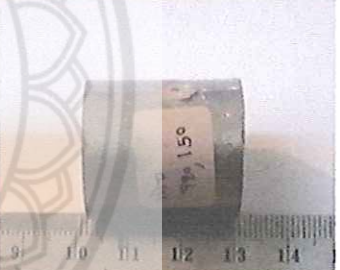
ตารางที่ ก.3 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาวรางเท	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
700/150	บน		
	กลาง		
	ล่าง		






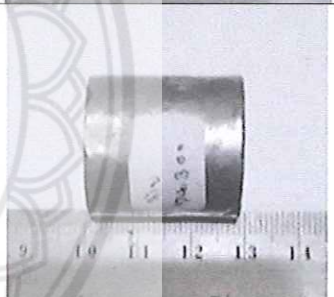
ตารางที่ ก.4 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิควางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ความยาววางเท 300 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาววางเท	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
700/300	บน		
	กลาง		
	ล่าง		

ตารางที่ ก.5 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคทรายเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาวรางเท	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
720/150	บน		
	กลาง		
	ล่าง		

ตารางที่ ก.6 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร






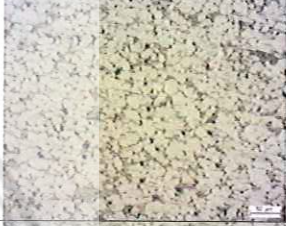



อุณหภูมิเท/ ความยาวรางเท	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
720/300	บน		
	กลาง		
	ล่าง		












ภาคผนวก ข

โครงสร้างจุดภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 หลังผ่านการ
หล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น

ตารางที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิคการหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรังเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า










ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			

ตารางที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิควางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรังเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			

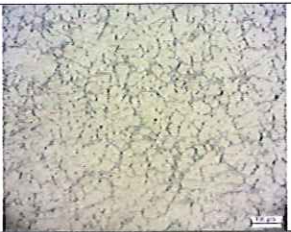

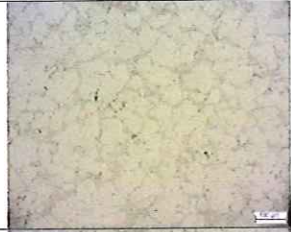








ตารางที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า










ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			



ตารางที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า


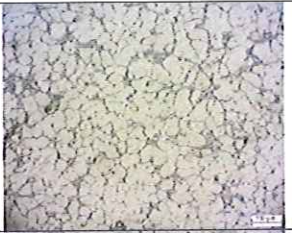





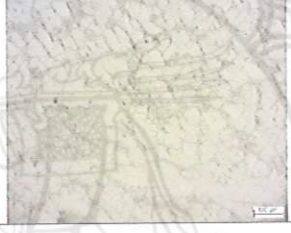

ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			

ตารางที่ ข.5 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า


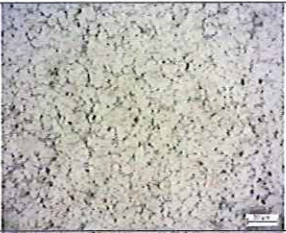







ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			



ตารางที่ ข.6 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า










ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			

ตารางที่ ข.7 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า










ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			










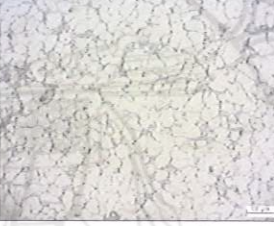

ตารางที่ ข.8 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			










ตารางที่ ข.9 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า

ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			

ตารางที่ ข.10 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรังเท 150 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า










ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			

ตารางที่ ข.11 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 50 เท่า

ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 50 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			



ตารางที่ ข.12 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร ที่กำลังขยาย 100 เท่า

ตำแหน่ง ที่	โครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 100 เท่า		
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง
1			
2			
3			



ภาคผนวก ค

พื้นที่ และปัจจัยรูปร่างของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 หลัง
ผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น

ตารางที่ ค.1 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ เท 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย รูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง	ค่าเฉลี่ย รูปร่างแต่ ละจุด	ค่าเฉลี่ย รูปร่างทั้ง ชิ้นงาน
680/150	1	บน	0.49	0.19	0.47	0.53
		กลาง	0.47	0.20		
		ล่าง	0.45	0.18		
	2	บน	0.59	0.19	0.53	
		กลาง	0.53	0.16		
		ล่าง	0.49	0.20		
	3	บน	0.60	0.16	0.59	
		กลาง	0.59	0.17		
		ล่าง	0.59	0.20		

ตารางที่ ค.2 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ เท 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย รูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง	ค่าเฉลี่ย รูปร่างแต่ ละจุด	ค่าเฉลี่ย รูปร่างทั้ง ชิ้นงาน
680/300	1	บน	0.56	0.16	0.53	0.56
		กลาง	0.54	0.18		
		ล่าง	0.50	0.18		
	2	บน	0.59	0.22	0.56	
		กลาง	0.56	0.15		
		ล่าง	0.53	0.19		
	3	บน	0.61	0.16	0.60	
		กลาง	0.60	0.18		
		ล่าง	0.59	0.21		

ตารางที่ ค.3 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ เท 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย รูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง	ค่าเฉลี่ย รูปร่างแต่ละ จุด	ค่าเฉลี่ย รูปร่างทั้ง ชิ้นงาน
700/150	1	บน	0.45	0.22	0.43	0.45
		กลาง	0.43	0.17		
		ล่าง	0.42	0.19		
	2	บน	0.47	0.21	0.44	
		กลาง	0.42	0.22		
		ล่าง	0.42	0.19		
	3	บน	0.49	0.16	0.47	
		กลาง	0.47	0.23		
		ล่าง	0.45	0.21		

ตารางที่ ค.4 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ เท 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย รูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง	ค่าเฉลี่ย รูปร่างแต่ละ จุด	ค่าเฉลี่ย รูปร่างทั้ง ชิ้นงาน
700/300	1	บน	0.47	0.17	0.44	0.48
		กลาง	0.45	0.23		
		ล่าง	0.42	0.20		
	2	บน	0.52	0.16	0.49	
		กลาง	0.49	0.15		
		ล่าง	0.45	0.21		
	3	บน	0.54	0.20	0.51	
		กลาง	0.50	0.19		
		ล่าง	0.49	0.16		

ตารางที่ ค.5 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ เท 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของ ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย รูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง	ค่าเฉลี่ย รูปร่างแต่ ละจุด	ค่าเฉลี่ย รูปร่างทั้ง ชิ้นงาน
720/150	1	บน	0.40	0.19	0.39	0.41
		กลาง	0.40	0.19		
		ล่าง	0.38	0.17		
	2	บน	0.44	0.21	0.42	
		กลาง	0.42	0.23		
		ล่าง	0.40	0.16		
	3	บน	0.46	0.18	0.44	
		กลาง	0.44	0.16		
		ล่าง	0.41	0.21		

ตารางที่ ค.6 ปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ เท 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย รูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง	ค่าเฉลี่ย รูปร่างแต่ ละจุด	ค่าเฉลี่ย รูปร่างทั้ง ชิ้นงาน
720/300	1	บน	0.45	0.24	0.42	0.44
		กลาง	0.42	0.18		
		ล่าง	0.40	0.18		
	2	บน	0.47	0.15	0.45	
		กลาง	0.45	0.21		
		ล่าง	0.43	0.19		
	3	บน	0.48	0.16	0.46	
		กลาง	0.47	0.22		
		ล่าง	0.45	0.19		

ตารางที่ ค.7 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ (Pixel ²)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ย พื้นที่แต่ละ จุด	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ทั้ง ชิ้นงาน
680/150	1	บน	7226.42	26511.65	5767.81	4382.54
		กลาง	6742.72	13546.02		
		ล่าง	3334.31	4590.70		
	2	บน	6548.75	9685.18	4227.65	
		กลาง	3340.87	6021.90		
		ล่าง	2793.34	4326.84		
	3	บน	3545.77	6608.65	3152.16	
		กลาง	3431.49	6360.47		
		ล่าง	2479.22	3675.31		

ตารางที่ ค.8 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ (Pixel ²)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ย พื้นที่แต่ละ จุด	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ทั้ง ชิ้นงาน
680/300	1	บน	6551.43	26423.55	5385.25	4245.6
		กลาง	5375.66	24654.73		
		ล่าง	4228.65	22533.97		
	2	บน	5468.64	15765.40	4281.17	
		กลาง	3778.33	4210.61		
		ล่าง	3596.54	40856.54		
	3	บน	3540.88	6675.19	3070.4	
		กลาง	3354.68	4590.75		
		ล่าง	2315.64	4023.70		

ตารางที่ ค.9 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของ ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ (Pixel ²)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ย พื้นที่แต่ละ จุด	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ทั้ง ชิ้นงาน
700/150	1	บน	16065.32	35023.76	8242.25	5761.09
		กลาง	5638.87	12530.64		
		ล่าง	3022.56	11600.54		
	2	บน	7456.02	10112.84	5365.64	
		กลาง	5320.45	9361.54		
		ล่าง	3320.45	4361.54		
	3	บน	4165.32	5523.76	3675.58	
		กลาง	3638.87	4730.64		
		ล่าง	3222.56	4670.54		

ตารางที่ ค.10 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐุมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 700 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของ ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ (Pixel ²)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ย พื้นที่แต่ละ จุด	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ทั้ง ชิ้นงาน
700/300	1	บน	8453.43	11265.40	7444.63	5432.28
		กลาง	7556.05	10340.51		
		ล่าง	6324.43	90536.70		
	2	บน	6438.90	10054.89	5389.85	
		กลาง	5462.77	8905.51		
		ล่าง	4267.90	7598.95		
	3	บน	4086.22	7239.88	3462.34	
		กลาง	3454.47	6654.19		
		ล่าง	2846.35	4289.76		

ตารางที่ ค.11 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 150 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของ ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ (Pixel ²)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ย พื้นที่แต่ละ จุด	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ทั้ง ชิ้นงาน
720/150	1	บน	26403.78	48956.98	13200.54	8372.1
		กลาง	7576.40	16548.62		
		ล่าง	5621.45	10045.76		
	2	บน	8273.33	24035.71	6383.96	
		กลาง	6126.96	12556.80		
		ล่าง	4751.60	7341.58		
	3	บน	6678.43	23521.46	5531.99	
		กลาง	5835.84	19124.76		
		ล่าง	4081.70	12097.64		

ตารางที่ ค.12 พื้นที่ของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 319 หลังผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 720 องศาเซลเซียส ที่ความยาวของรางเทหล่อเย็น 300 มิลลิเมตร

อุณหภูมิเท/ ความยาว ของรางเท หล่อเย็น	ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่ง ของ ชิ้นงาน	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ (Pixel ²)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ย พื้นที่แต่ละ จุด	ค่าเฉลี่ย พื้นที่ทั้ง ชิ้นงาน
720/300	1	บน	22458.43	44768.96	11627.7	7721.96
		กลาง	7034.54	15976.74		
		ล่าง	5390.21	9674.80		
	2	บน	7754.86	23654.89	6143.43	
		กลาง	5420.78	11876.40		
		ล่าง	5254.66	10352.20		
	3	บน	5832.44	21645.23	5394.72	
		กลาง	5421.52	19856.11		
		ล่าง	4930.22	15320.88		

ภาคผนวก ง

ความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 319 หลังผ่าน
กระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ได้จากการ
ทดสอบความแข็งแบบบริเนล

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ ง.1 ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็ง โดยผ่านเทคนิคการเทหล่อเย็นความยาวรางเท 150 มิลลิเมตร อุณหภูมิเท 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเท/ ความยาว	ตำแหน่งที่	ตำแหน่งของ ชิ้นงาน	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ยความ แข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ยความ แข็ง (HB)
680/150	1	บน	120.68	114.06	117.38
		กลาง	116.85		
		ล่าง	104.67		
	2	บน	121.66	117.3	
		กลาง	119.70		
		ล่าง	110.54		
	3	บน	123.66	120.78	
		กลาง	122.57		
		ล่าง	115.02		
700/150	1	บน	117.79	111.29	115.55
		กลาง	111.41		
		ล่าง	104.67		
	2	บน	120.68	115.76	
		กลาง	117.79		
		ล่าง	108.82		
	3	บน	125.71	119.59	
		กลาง	121.66		
		ล่าง	111.41		
720/150	1	บน	113.18	105.01	109.61
		กลาง	106.30		
		ล่าง	95.54		
	2	บน	114.09	109.74	
		กลาง	109.67		
		ล่าง	105.48		
	3	บน	115.02	114.09	
		กลาง	114.09		
		ล่าง	113.18		

ตารางที่ ง.2 ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็ง โดยผ่านเทคนิครางเทหล่อเย็นความยาวรางเท 300 มิลลิเมตร อุณหภูมิเท 680 700 และ 720 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเท/ ความยาว	ตำแหน่งที่	ตำแหน่งของ ชิ้นงาน	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ยความ แข็ง (HB)
680/300	1	บน	120.68	115.51	120.37
		กลาง	118.74		
		ล่าง	107.13		
	2	บน	124.68	118.84	
		กลาง	122.66		
		ล่าง	113.18		
	3	บน	135.50	126.76	
		กลาง	128.86		
		ล่าง	115.92		
700/300	1	บน	115.92	110.93	116.52
		กลาง	111.41		
		ล่าง	105.48		
	2	บน	122.66	116.68	
		กลาง	116.85		
		ล่าง	110.54		
	3	บน	128.86	121.94	
		กลาง	124.68		
		ล่าง	112.29		
720/300	1	บน	113.18	105.48	111.97
		กลาง	106.30		
		ล่าง	96.98		
	2	บน	116.85	112.93	
		กลาง	112.29		
		ล่าง	109.67		
	3	บน	119.70	117.50	
		กลาง	117.79		
		ล่าง	115.02		

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายพงศกร พงษ์พวง
ภูมิลำเนา 10/9 หมู่ 8 ต.หนองหลุม อ.วชิรบารมี จ.พิจิตร
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวชิรบารมี
จ.พิจิตร
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: pongsakon1558@hotmail.com



ชื่อ นายศพนนท์ สมศรี
ภูมิลำเนา 378/37 หมู่ 7 ต.บางระกำ อ.บางระกำ จ.พิษณุโลก
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนผดุงราชกุล
จ.พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
สาขาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: toey_24558@msn.com

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ (ต่อ)



ชื่อ นายอดิศร พลอินทร์
 ภูมิลำเนา 107 ถนนศรีอุทัย ต.อุทัยใหม่ อ.เมือง จ.อุทัยธานี
 ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุทัยวิทยาคม จ.อุทัยธานี
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Top_0909@hotmail.com

