

การศึกษาอุณหภูมิเท และความชันของรางเทที่มีผลต่อความแข็งและ
โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A356 โดยใช้เทคนิครางเท
หล่อเย็น

A STUDY OF POURING TEMPERATURE AND COOLING SLOPE ON
HARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF A356 ALUMINUM
ALLOYS BY COOLING PLATE TECHNIQUE

นางสาวสุทธาทิพย์ ประทุมมาตร รหัส 53364260
นางสาวภิญญา บุญเต็ม รหัส 53364307
นางสาวอรณิสรา สัมเพ็ชร รหัส 53364314

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 25 / 11.0. / 57
เลขทะเบียน.....
เลขเรียกหนังสือ..... ๒5.
มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ ๒๕๕๖

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
ปีการศึกษา 2556



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การศึกษาอุณหภูมิและความชื้นของรางเทที่มีผลต่อความแข็งแรง และ
โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด A356 โดยใช้เทคนิคราง
เทหล่อเย็น

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวสุทธาทิพย์ ประทุมมาตร รหัส 53364260
นางสาวอภิญา บุญแต้ม รหัส 53364307
นางสาวอรณิสา สัมเพ็ชร รหัส 53364314

ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรัตนนคร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์อุปถัมภ์ นาครักษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาอุณหภูมิและความชื้นของรางเทที่มีผลต่อความแข็ง และ โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด เอ 356 โดยใช้เทคนิคราง เทหล่อเย็น	
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวสุทธาทิพย์ ประทุมมาตร	รหัส 53364260
	นางสาวอภิญญา บุญแต้ม	รหัส 53364307
	นางสาวอรณิสสา สัมเพ็ชร์	รหัส 53364314
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ	
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ	
ปีการศึกษา	2556	

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก เกรด เอ 356 หลังผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิและความชื้นของรางเทโลหะหลอมเหลว เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทเป็น 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส และความชื้นของรางเทเป็น 30, 45 และ 60 องศา จากการนำชิ้นงานไปศึกษาโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง ขนาดเกรน และความแข็ง

จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าเมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ผิวของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จะมีความเรียบผิวสูงกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส และ 640 องศาเซลเซียส รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส มีน้อยที่สุด โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีความกลมใกล้เคียงกันทุกอุณหภูมิ โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าประมาณ 0.52 แต่ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบที่ความชื้นเท่า ๆ กัน และชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส จะมีความแข็งมาก โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าความแข็งประมาณ 192 HB และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีความชื้นของรางเทต่างกัน พบว่าผิวของชิ้นงานที่ผ่านรางเทที่มีความชื้น 30 องศา มีความเรียบผิวสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านรางเทที่มีความชื้น 45 และ 60 องศา รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านรางเทที่ความชื้น 30 องศา มีน้อยที่สุด โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีความกลมใกล้เคียงกันทุกความชื้นของรางเท โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าประมาณ 0.53 แต่ที่ความชื้น 30 องศา โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีขนาดใหญ่ที่สุด และชิ้นงานที่ผ่านรางเทที่มีความชื้น 30 องศา จะมีความแข็งมาก โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าความแข็งประมาณ 194 HB

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และความช่วยเหลือทางด้านต่างๆ ตลอดจนแนะนำวิธีการในการแก้ปัญหา และให้กำลังใจในการทำงานตลอดมา จนสามารถทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์ และ อาจารย์อุบลรัตน์ นาครัถย์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอนโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างธวัชชัย ชูลบุตร ครูช่างรณภฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อิสริย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ รวมไปถึงการแนะนำใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นสถานที่ในการศึกษาหาความรู้ให้กับผู้ทำโครงการ จนงานลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาคารปฏิบัติการอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นสถานที่ในการใช้เตาหลอมโลหะไฟฟ้า กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และเครื่องมือต่างๆ ภายในอาคารจนงานเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องค่าใช้จ่าย และกำลังใจจนสามารถศึกษา ทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการนี้จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นางสาวสุทธาทิพย์ ประทุมมาตร

นางสาวอภิญญา บุญเต็ม

นางสาวอรณิสสา สัมเพ็ชร

ธันวาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcomes).....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ.....	4
2.2 อุณหภูมิการเท (Pouring Temperature).....	14
2.3 กลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว.....	15
2.4 การแข็งตัวของโลหะ.....	18
2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing).....	20
2.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope).....	26
2.7 ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรน (Image Analysis).....	28
2.8 การทดสอบความแข็ง.....	30
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3	วิธีดำเนินโครงการ.....	34
3.1	วัสดุ และอุปกรณ์.....	35
3.2	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	36
บทที่ 4	ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	39
4.1	ผิว และรูปพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน.....	39
4.2	โครงสร้างจุลภาค พื้นที่ ปังจัยรูปร่าง และความแข็งของชิ้นงานหล่อ.....	44
บทที่ 5	บทสรุป และข้อเสนอแนะ.....	53
5.1	บทสรุป.....	53
5.2	ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	54
5.3	ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา.....	54
เอกสารอ้างอิง.....		55
ภาคผนวก ก.....		58
ภาคผนวก ข.....		68
ภาคผนวก ค.....		88
ภาคผนวก ง.....		92
ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....		101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ขั้นตอน และแผนการดำเนินงาน..... 3
2.1	สัญลักษณ์ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียม..... 4
2.2	สัญลักษณ์ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียมหล่อ..... 5
2.3	มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยประมาณ)..... 7
2.4	องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 356..... 13
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)..... 35
ก.1	ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียสที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ..... 60
ก.2	ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียสที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ..... 62
ก.3	ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียสที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ..... 65
ข.1	โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 70
ข.2	โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า..... 71
ข.3	โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 45 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 72
ข.4	โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 45 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า..... 73
ข.5	โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 60 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 74
ข.6	โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 60 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า..... 75
ข.7	โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า..... 76
ข.8	โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า..... 77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ง.1	ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็นที่ ความชัน 30 องศาอุณหภูมิต่ำ 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส.....	93
ง.2	ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็นที่ ความชัน 45 องศาอุณหภูมิต่ำ 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส.....	95
ง.3	ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็นที่ ความชัน 60 องศาอุณหภูมิต่ำ 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส.....	98



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภูมิสมดุโลหะลูมิเนียม-ซิลิคอน..... 6
2.2	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อของโลหะผสม Al-Si ร้อยละ 7-Fe ร้อยละ 1 ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้าง..... 7
2.3	แผนภูมิสมดุโลหะลูมิเนียม-ทองแดง..... 8
2.4	โครงสร้างจุลภาคของ Al-Cu ร้อยละ 20..... 9
2.5	แผนภูมิสมดุโลหะลูมิเนียม-แมกนีเซียม..... 9
2.6	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทกติก..... 11
2.7	โครงสร้างจุลภาคของยูเทกติก อะลูมิเนียม-ซิลิคอน..... 12
2.8	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทกติก..... 12
2.9	โครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด เอ 356..... 14
2.10	การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว..... 15
2.11	การแตกหักของเดนไดรต์ เมื่อมีการไหลของโลหะหลอมเหลว..... 17
2.12	ภาพจำลองการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของเดนไดรต์จากผนังแบบหล่อเข้าสู่ใจกลางแบบหล่อ..... 18
2.13	ลักษณะการเกิดผลึกของงานหล่อ..... 20
2.14	ช่วงอุณหภูมิของเฟสกึ่งแข็ง..... 21
2.15	การพัฒนาโครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัว ในสภาวะกึ่งแข็งภายใต้การปั่นป่วนอย่างรุนแรง..... 22
2.16	แผนภาพวิธีของกระบวนการ..... 22
2.17	การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... 24
2.18	ช่วงอุณหภูมิกึ่งแข็งที่ใช้ในการเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... 24
2.19	การฟอร์มตัวของโลหะหลอมเหลวเมื่อเทผ่านรางเทหล่อเย็น..... 25
2.20	กล้องจุลทรรศน์แสง..... 26
2.21	แผนภูมิการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค..... 27
2.22	การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)..... 31
2.23	หวักดและรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบบริเนล..... 31
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน..... 34
3.2	การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น..... 37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็งด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น.....	38
4.1 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 30 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่างกัน.....	40
4.2 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 45 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	40
4.3 รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 30 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	41
4.4 รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 45 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	41
4.5 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของรางเทต่างกัน.....	42
4.6 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของรางเทต่างกัน.....	43
4.7 รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของรางเทต่างกัน.....	44
4.8 รูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของรางเทต่างกัน.....	44
4.9 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทกติก.....	45
4.10 ค่าปัจจัยรูปร่าง เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	46
4.11 ขนาดพื้นที่เกรน เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	47
4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 45 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	47
4.13 ค่าความแข็ง เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	49
4.14 ค่าปัจจัยรูปร่าง เมื่อความชันของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	50
4.15 ขนาดพื้นที่เกรน เมื่อความชันของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	50
4.16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยกรรมวิธีการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับความชันของรางเทต่างกัน.....	51

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ค่าความแข็งของชิ้นงาน เมื่อความชันของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง.....	52
ก.1 ตำแหน่งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น.....	59
ข.2 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น.....	69



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมจัดเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรม และมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความสามารถในการหล่อ (Castability) การเชื่อม (Weldability) ต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) ต้านทานการสึกหรอ (Wear Resistance) อีกทั้งยังมีค่าความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรงสูง (Strength) แต่น้ำหนักเบา ต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Hot Tearing Resistance) และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ (Low Thermal Expansion Coefficient) เป็นต้น ซึ่งอะลูมิเนียมเป็นที่รู้จัก และใช้ในงานอุตสาหกรรมยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย เช่น ล้อ ชิ้นส่วนยานพาหนะ ทางทหาร อากาศยาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม ทำให้อะลูมิเนียมมีความต้องการในตลาดอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก

การขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing; SSM) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพสูงที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการขึ้นรูปโลหะ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ อาทิ เช่น ใช้อุณหภูมิ และพลังงานในการขึ้นรูปต่ำ ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ชิ้นงานมีการหดตัว (Shrinkage) ต่ำ มีขนาดใกล้เคียงสุดท้าย (Near Net Shape) ให้สมบัติทางกลที่ดี การแยกตัวขององค์ประกอบทางเคมี (Segregation) ต่ำ โดยโครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งจะประกอบไปด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะกลม (Globular) สำหรับกระบวนการหล่อกึ่งแข็งมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การกวนด้วยแรงทางกล (Mechanical Stirring) การกวนด้วยแรงทางแม่เหล็ก (Magnetic Stirring) เป็นต้น แต่กระบวนการหล่อกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) เป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตมีราคาถูก และง่ายต่อการดำเนินการ

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิเท และความชันของรางเทโลหะหลอมเหลวโดยนำชิ้นงานหลังผ่านการหล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งโดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็นไปศึกษาโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง ขนาดเกรน และความแข็งของวัสดุ ซึ่งจากการศึกษาโครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิเทของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง ขนาดเกรน และความแข็ง

1.2.2 เพื่อศึกษาความชันของรางเทหล่อเย็น ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง ขนาดเกรน และความแข็ง

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs)

1.3.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น

1.3.2 ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรนของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด เอ 356 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น

1.3.3 ความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcomes)

1.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น

1.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรนของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น

1.4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น

1.4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรนของ อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่มีผลต่อความแข็ง

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

1.5.1 วัสดุที่ใช้ทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356

1.5.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการเท คือ 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

1.5.3 รางเทหล่อเย็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร ทำจาก เหล็กกล้า โดยใช้ไม้เป็นตัวหล่อเย็น ที่ความชัน 30, 45 และ 60 องศา

1.5.4 แม่พิมพ์เหล็กกล้า ขนาดชิ้นงาน เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร

1.5.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

บทที่ 2

หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมหล่อ กระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing) ด้วยวิธีการเทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope) เครื่องมือวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาค การวิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรน การทดสอบความแข็งของวัสดุ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 อะลูมิเนียมผสมหล่อ

อะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสม (Aluminum and Aluminum Alloys) เป็นโลหะที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีความหนาแน่นประมาณ 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ 1/3 ของเหล็กกล้าสมบัติที่สำคัญของอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมผสมมีหลายประการคือ มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวสูง สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวต่ำทำให้ง่ายต่อการหล่อ มีสมบัติการนำความร้อนสูง และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

สมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกาได้แบ่งอะลูมิเนียมผสมหล่อตามธาตุผสมที่เติมเข้าไปในอะลูมิเนียม และตั้งรหัสสำหรับธาตุผสมกลุ่มนั้น ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียม [1]

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียม
1XX.X	เป็นอะลูมิเนียมหล่อที่ไม่มีการเติมธาตุผสมใดเข้าไปเลย มีอะลูมิเนียมเท่ากับ ร้อยละ 99.0 โดยน้ำหนัก หรือมากกว่า
2XX.X	มีทองแดง (Cu) เป็นธาตุผสมหลัก
	มีซิลิคอน (Si) และทองแดง (Cu) หรือแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสมหลัก
4XX.X	มีซิลิคอน (Si) เป็นธาตุผสมหลัก
5XX.X	มีแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุผสมหลัก
6XX.X	มีแมกนีเซียม (Mg) และซิลิคอน (Si) เป็นธาตุผสมหลัก
7XX.X	มีสังกะสี (Zn) เป็นธาตุผสมหลัก
8XX.X	มีดีบุก (Sn) เป็นธาตุผสมหลัก
9XX.X	มีธาตุอื่น ๆ (Other Element) เป็นธาตุผสมหลัก

หมายเหตุ สัญลักษณ์ตัวเลข 4 หลักนี้ ไม่มีความเกี่ยวข้องกับสัญลักษณ์ตัวเลข 4 หลัก ที่ใช้ในโลหะผสมของเหล็กโดยสิ้นเชิง

2.1.1 การกำกับชื่อชิ้นงานหล่อของอะลูมิเนียมผสม (Designation for Cast Aluminum Alloys)

การตั้งชื่อชิ้นงานหล่อของอะลูมิเนียมผสมยังไม่มีมาตรฐานที่ถือเป็นสากลนิยม ในสหรัฐอเมริกาที่มีมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับกันอยู่ 2 มาตรฐาน คือ มาตรฐานแรกของ ASTM เช่น ASTM B26, B85 และ B108 และอีกมาตรฐาน คือ มาตรฐานของบริษัทอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตอะลูมิเนียมที่ใหญ่ที่สุดในสหรัฐอเมริกา มาตรฐานของเขาจึงมีอิทธิพลในวงการค้าเป็นอย่างมากและเป็นที่ยอมรับใช้มากกว่ามาตรฐานของ ASTM

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการตั้งชื่อโลหะผสมตามระบบของบริษัทผลิตอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา ส่วนการตั้งชื่อตามระบบ ASTM นั้น สามารถศึกษาได้จากการตั้งชื่อโลหะแมกนีเซียมซึ่งใช้หลักการเดียวกัน

ระบบการตั้งชื่ออะลูมิเนียมผสมหล่อตามมาตรฐานของบริษัทผลิตอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกานั้น ใช้ตัวเลข 2 หลัก หรือ 3 หลักแทนชื่อโลหะ

ตัวเลข 2 หลักใช้แทนโลหะอะลูมิเนียมผสมที่มีซิลิคอนเป็นธาตุผสมหลัก สำหรับตัวเลข 3 หลักนั้นตัวเลขหลักแรกใช้แทนกลุ่มโลหะผสมที่มีธาตุใดธาตุหนึ่งเป็นธาตุผสมหลัก เช่น 1XX เป็นกลุ่มโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น สัญลักษณ์ที่ใช้แทนธาตุผสมหลักตัวอื่น ๆ ดูได้จากตารางที่ 2.2

โลหะบางตัวอาจมีตัวอักษรภาษาอังกฤษนำหน้าตัวเลขที่แทนชื่อของโลหะ เช่น A, B, C, D เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อแสดงว่ามีการดัดแปลงส่วนผสมของโลหะให้ผิดไปจากเดิม เพื่อให้เหมาะกับเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น วิธีการหล่อดังตัวอย่าง เช่น 214 (3.8 Mg) เหมาะสำหรับหล่อลงแบบทราย (Sand Cast) A 214 (3.8 Mg 1.8 Zn) เหมาะสำหรับหล่อลงแบบโลหะ (Permanent Mold) ฯลฯ

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอะลูมิเนียมผสมหล่อ

กลุ่ม	แทนโลหะผสมระหว่าง	กลุ่ม	แทนโลหะผสมระหว่าง
1-99	Al-Si	4XX	Al-Mn
1XX	Al-Cu	5XX	Al-Ni
2XX	Al-Mg	6XX	Al-Zn
3XX	Al-Si	7XX	Al-Sn

หมายเหตุ กลุ่ม 4XX และกลุ่ม 5XX ไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้สำหรับงานหล่อ

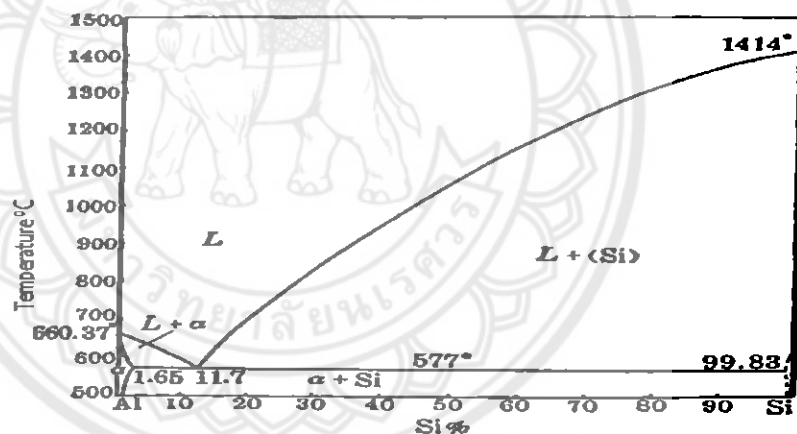
2.1.2 ชนิดของอะลูมิเนียมผสมหล่อ

ชนิดของอะลูมิเนียมผสมหล่อ มี 4 ประเภทหลัก ได้แก่

2.1.2.1 อะลูมิเนียม-ซิลิคอน

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ในปัจจุบันมักมีการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์ที่นำมาใช้ในการผลิตส่วนประกอบของข้อเหวี่ยง ภาครอบน้ำมัน และหัวลูกสูบ เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดี นอกจากนั้นยังมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีอีกด้วย และหากนำธาตุอื่นมาผสม เช่น ทองแดง, แมกนีเซียม เป็นต้น จะทำให้สามารถนำไปปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยกรรมวิธีทางความร้อน ปัจจุบันมีการใช้งานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมากถึงร้อยละ 85-90 ของอะลูมิเนียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ

การผสมซิลิคอนในอะลูมิเนียมจะช่วยให้อะลูมิเนียมมีความสามารถในการไหล (Flowability) ที่ดี จึงส่งผลให้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีความซับซ้อนหรือชิ้นงานที่มีขนาดบางได้ ความสามารถในการไหลที่ดีนั้นเป็นผลมาจากเมื่อซิลิคอนที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียมมีปริมาณสูงขึ้น จุดเริ่มต้นการแข็งตัว (Liquidus) ของอะลูมิเนียมจะต่ำลงนั่นเอง

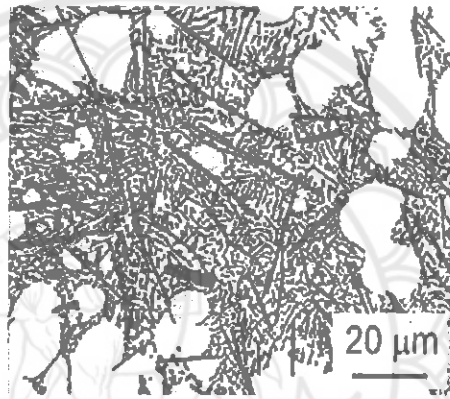


รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม-ซิลิคอน

จากแผนภูมิสมดุล รูปที่ 2.1 ซิลิคอนมีคุณลักษณะหลายประการที่แตกต่างกับอะลูมิเนียม โดยเฉพาะโครงสร้างระบบผลึก และจุดหลอมเหลว ดังนั้นการรวมตัวกันระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนจึงมีขอบเขตจำกัดอย่างมาก โดยซิลิคอนจะละลายให้สารละลายของแข็งกับอะลูมิเนียมได้สูงสุดร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส ให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม (α -Al) และปริมาณของซิลิคอนจะละลายในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ได้น้อยลง เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 544 องศาเซลเซียส จะเหลือปริมาณของซิลิคอนในเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม เพียงร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

จากแผนภูมิสมดุล รูปที่ 2.1 จะมีลักษณะเด่นชัดที่ซิลิคอนแยกตัวและไม่ละลายในอะลูมิเนียม โดยให้ปฏิกิริยายูเทกติก (Eutectic Reaction) ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส

และมีอัตราส่วนของซิลิคอนร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก จะเรียกจุดนี้ว่า อะลูมิเนียม-ซิลิคอน ยูเทกติก (Aluminum-Silicon Eutectic) แต่หากมีอัตราส่วนของซิลิคอนน้อยกว่าร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทกติก (Aluminum-Silicon Hypoeutectic) และในกรณีที่มีอัตราส่วนของซิลิคอนอยู่มากกว่าร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก จะเรียกว่าเป็นอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทกติก (Aluminum-Silicon Hypereutectic) เฟสเบต้า-ซิลิคอน (β -Si) มีสมบัติที่แข็งและเปราะถ้าในโครงสร้างมีการตกผลึกของเฟสเบต้า-ซิลิคอนขนาดใหญ่เกิดมีลักษณะต่อเนื่องมีผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำ และขาดสมบัติด้านความเหนียว อะลูมิเนียมผสมซิลิคอนเป็นโลหะผสมที่มีจุดหลอมเหลวไม่สูงนัก ทำให้โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมีสมบัติด้านความสามารถการหล่อ (Castability) ที่ดี และมีอัตราการหดตัว (Shrinkage) ต่ำ [2]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหล่อของโลหะผสม Al-Si ร้อยละ 7-Fe ร้อยละ 1 ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้าง [3]

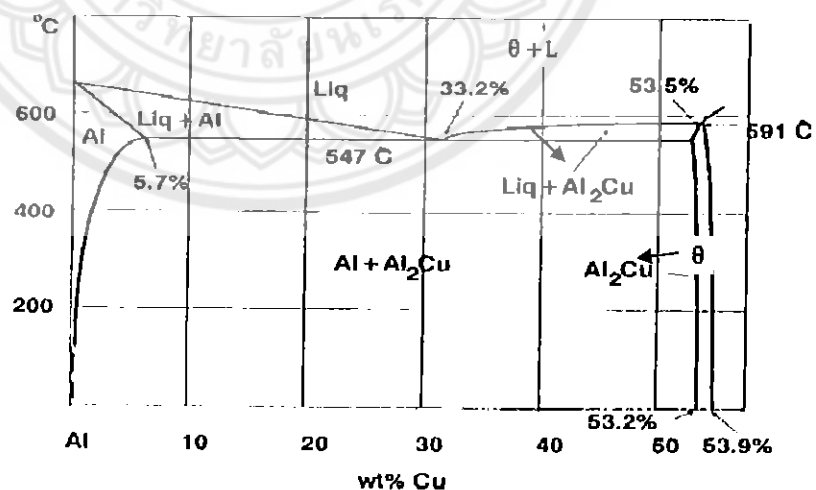
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานอะลูมิเนียม-ซิลิคอนที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมหล่อโลหะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยประมาณ)

มาตรฐาน AA	ซิลิคอน (Si)	ทองแดง (Cu)	แมกนีเซียม (Mg)	เหล็ก (Fe)	แมงกานีส (Mn)	ไทเทเนียม (Ti)	สังกะสี (Zn)
A319.0	5.5-6.5	3.0-4.0	0.1	1.0	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

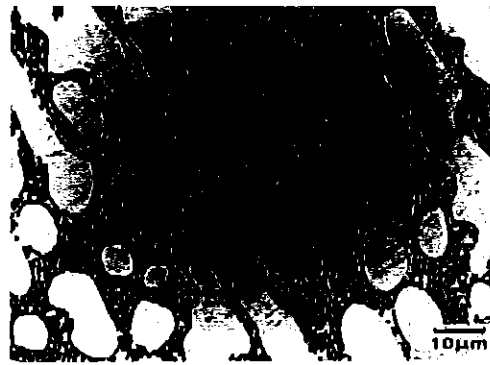
2.1.2.2 อะลูมิเนียม-ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีระบบผลึกเป็นแบบ Face Centered Cubic (FCC) เหมือนกับอะลูมิเนียม จึงทำให้สามารถละลายได้ดีในอะลูมิเนียม [4] โดยโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงเป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอดีต แต่ปัจจุบันมีปริมาณการใช้งานลดลงจากการนำอะลูมิเนียม-ซิลิคอนมาแทนที่ เนื่องจากมีสมบัติทางด้านการหล่อดีกว่าอะลูมิเนียม-ทองแดง ซึ่งส่วนใหญ่มักจะมีปัญหาเรื่องการแตกขณะร้อน (Hot Tearing) และมีรูปทรงขนาดเล็กอยู่มาก ซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวของโครงสร้างจุลภาค นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการไหลตัวของโลหะ-หลอมเหลว (Flowability) ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในการขึ้นรูปจึงต้องอาศัยแรงดันช่วยในการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลว หรือออกแบบช่องทางเดินโลหะหลอมเหลวให้กว้าง และเพื่อรู้นให้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจะสามารถทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้

จากแผนภูมิสมดุล รูปที่ 2.3 จะเห็นว่าทองแดงสามารถละลายได้สูงสุดร้อยละ 5.7 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 547 องศาเซลเซียส และการละลายของทองแดงจะลดปริมาณลงเหลือเพียงร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง จากแผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม-ทองแดงให้ปฏิกิริยายุเทกติก (Eutectic Reaction) ที่อุณหภูมิ 547 องศาเซลเซียส พิจารณาอัตราส่วนของทองแดงที่ร้อยละ 33.2 โดยน้ำหนัก ถึงร้อยละ 53.5 โดยน้ำหนัก ที่ตำแหน่งเหนืออุณหภูมิยูเทกติกเล็กน้อยจะพบเฟสซีต้า (θ - Al_2Cu) และเฟสของเหลว จากจุดดังกล่าวถ้าปล่อยให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจะเกิดเฟสซีตาเฟสเดียว ซึ่งทำให้อะลูมิเนียมมีความแข็งแรงสูง [4]



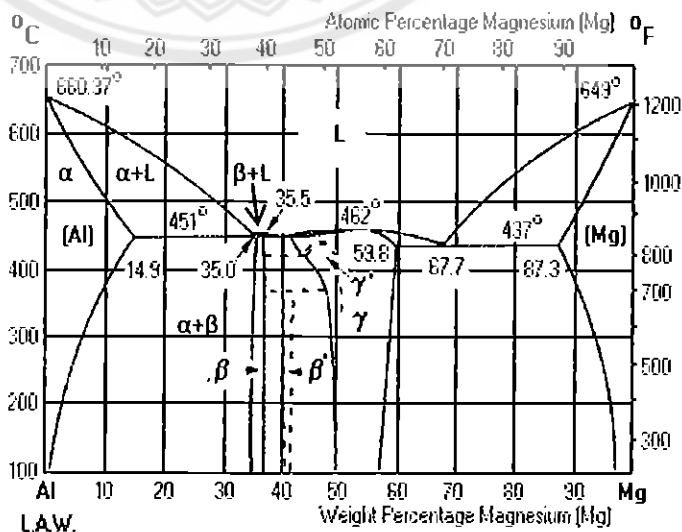
รูปที่ 2.3 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม-ทองแดง [5]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของ Al-Cu ร้อยละ 20 [6]

2.1.2.3 อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม

อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม มีการเติมธาตุต่าง ๆ ลงไป เช่น เหล็ก, ซิลิคอน ซึ่งทำให้มีความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการเชื่อมที่ดี (Weldability) และมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง จากแผนภูมิสมดุล รูปที่ 2.5 จะเห็นว่าเฟสเบต้า (β) ละลายในเฟสอัลฟา (α) ได้มากที่สุดที่อัตราส่วนผสมของแมกนีเซียมเท่ากับร้อยละ 14.9 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 451 องศาเซลเซียส เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แมกนีเซียมจะละลายในอะลูมิเนียมได้ในอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเท่านั้น เกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 451 องศาเซลเซียส มีอัตราส่วนแมกนีเซียมร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยายูเทคติกนี้จะให้โครงสร้างอะลูมิเนียม และโครงสร้างเบต้า มีสูตรทางเคมีว่า Mg_2Al_3 มีสมบัติแข็งและเปราะ ดังนั้นจึงไม่เป็นที่นิยมที่จะผสมแมกนีเซียมเกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เพราะไม่เกิดผลดีต่อการทำกรรมวิธีทางความร้อน อย่างไรก็ตาม โลหะอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมนี้แม้จะมีน้ำหนักเบาแต่มีความต้านทานการกัดกร่อนของบรรยากาศ และน้ำเกลือได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเพิ่มสมบัติเกี่ยวกับความสามารถในการขึ้นรูป (Machinability) อีกด้วย [4]



รูปที่ 2.5 แผนภูมิสมดุลอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม [7]

2.1.2.4 อะลูมิเนียม-ซิลิคอน-ทองแดง

อะลูมิเนียม-ซิลิคอน-ทองแดง มักใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์ เนื่องจากมีสมบัติทางกล และความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี [8] ธาตุที่มักนำมาผสมในโลหะผสมนี้ ยกตัวอย่างเช่น แมกนีเซียม (Mg), แมงกานีส (Mn), สตรอนเชียม (Sr), เซอร์โคเนียม (Zr) และเหล็ก (Fe) ซึ่งทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงทั้งที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิสูง แต่ความเหนียวจะลดลง

2.1.3 ชนิดของอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานหล่อ

โลหะอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานหล่อพัฒนามาจากระบบยูเทกติกของระบบ 2 ธาตุ เช่น อะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Al-Si), อะลูมิเนียม-ทองแดง (Al-Cu) และอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม (Al-Mg) อย่างไรก็ตาม โลหะที่ใช้งานส่วนใหญ่จะพัฒนามาจากระบบอะลูมิเนียม-ซิลิคอน โดยการเติมธาตุ แมกนีเซียม (Mg) และ/หรือทองแดง (Cu) ทำให้โลหะผสมเหล่านี้สามารถชุบแข็งได้ด้วยกระบวนการ ตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง (Precipitation Hardening Heat Treatment) การเพิ่มธาตุผสม บางอย่าง เช่น นิกเกิล (Ni), โครเมียม (Cr) และแมงกานีส (Mn) เป็นต้น ยังช่วยทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (Solid Solution Hardening) และยังสามารถช่วยปรับปรุงความแข็งแรงในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ด้วย แต่โดยส่วนมากแล้ว ธาตุที่จะนำมาผสมในอะลูมิเนียมสำหรับใช้ในงานหล่อก็คือซิลิคอน เพราะซิลิคอนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล (Flowability) และต้านทานการแตกร้าว (Cracking Resistance) ของงานหล่อได้อีกด้วย

ชนิดของโลหะอะลูมิเนียมผสม ที่ใช้ทั่วไปมี 3 แบบหลัก ๆ ได้แก่

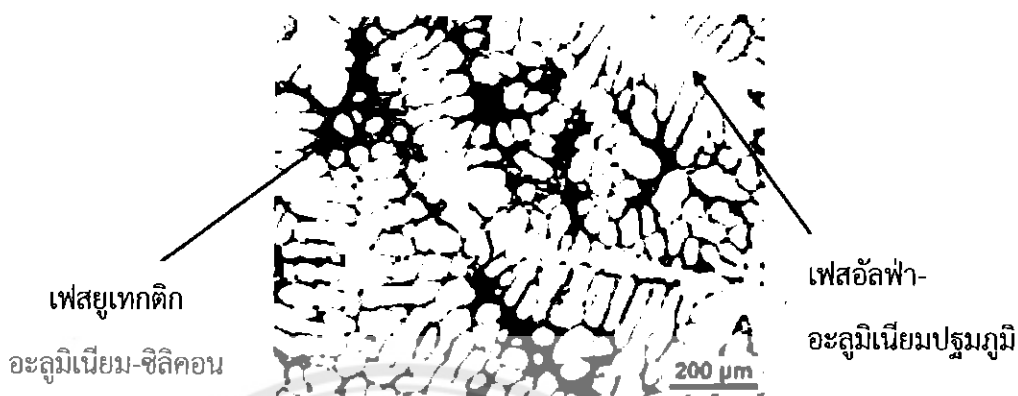
- โลหะผสมไฮโปยูเทกติก (Hypoeutectic Alloys) เช่น ASTM A319, ASTM A356
- โลหะผสมยูเทกติก (Eutectic Alloys) เช่น ASTM A384, ASTM A413
- โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทกติก (Hypereutectic Alloys) เช่น LM28 (UK Standard)

2.1.3.1 อะลูมิเนียมผสมไฮโปยูเทกติก

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ที่มีองค์ประกอบแบบไฮโปยูเทกติกซึ่งมีส่วนผสมของซิลิคอนต่ำกว่าร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก จะประกอบไปด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) และมีโครงสร้างของยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Eutectic Al-Si) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และจะเห็นโพรงหดตัว (Shrinkage Pore) กระจายอยู่บ้าง เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้มีช่วงของการแข็งตัวกว้าง (Wide Freezing Range) แสดงดังรูปที่ 2.6

โดยส่วนใหญ่แล้ว โลหะผสมไฮโปยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากนักเนื่องจากข้อจำกัดด้านสมบัติทางกล ดังนั้น อะลูมิเนียมไฮโปยูเทกติกมักได้รับการผสม

ทองแดง และ/หรือแมกนีเซียม รวมเข้าไปด้วย เช่น ASTM A319, ASTM A355 และ ASTM A356 เพื่อให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยกรรมวิธีการตกตะกอนได้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮโปยูเทกติก

2.1.3.2 อะลูมิเนียมผสมยูเทกติก

โลหะผสมยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิคอน (Al-Si) สามารถใช้งานได้โดยตรงในลักษณะของโลหะผสมที่อบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงไม่ได้ (Non-Heat Treatable Alloys) เช่น ASTM A413 หรือสามารถผสมธาตุทองแดง และ/หรือแมกนีเซียม 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 (Cases) และโคมไฟตามถนน เป็นต้น

เฟสยูเทกติกซิลิคอน (Eutectic Si) ในอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้สามารถทำให้ละเอียดได้โดยการดัดแปลงโครงสร้าง (Modification) เมื่อหล่อด้วยแบบหล่อทรายหรือแบบหล่อถาวร (Permanent Mold) โดยการเติมธาตุโซเดียม (Na) หรือ สตรอนเซียม (Sr) ในโลหะหลอมเหลว ซึ่งผ่านการลดแก๊สมาแล้วก่อนการเทลงแม่พิมพ์ ในปริมาณเพียงร้อยละ 0.025-0.01 โดยน้ำหนัก เป็นต้น การทำเช่นนี้เป็นการทำให้จุดยูเทกติกย้ายจากปริมาณซิลิคอนร้อยละ 11.7 โดยน้ำหนัก ไปเป็นร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเฟสซิลิคอนปฐมภูมิ (Primary Si) และทำให้เฟสยูเทกติกของซิลิคอนละเอียด แต่อะลูมิเนียมผสมที่ผลิตโดยวิธีการอัดด้วยความดัน (Pressure Die Casting) ไม่จำเป็นต้องดัดแปลงโครงสร้างในระหว่างกระบวนการหล่อ เนื่องจากการหล่อแบบนี้ อะลูมิเนียมจะเย็นตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกรนมีความละเอียดเสมือนการถูกดัดแปลงโครงสร้าง ความละเอียดของเฟสซิลิคอนที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหรือถูกดัดแปลงโครงสร้าง จะช่วยให้ความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมเพิ่มสูงขึ้น



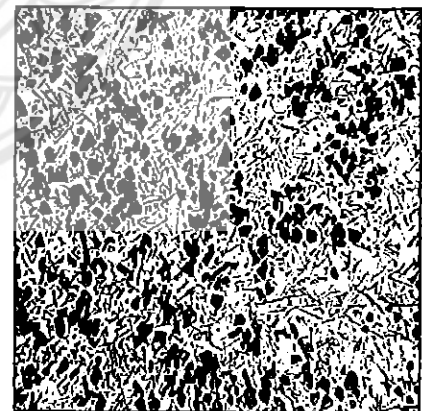
รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของยูเทกติก อะลูมิเนียม-ซิลิกอน [10]

2.1.3.3 อะลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทกติก

อะลูมิเนียมผสมชนิดไฮเปอร์ยูเทกติก (Hypereutectic Alloys) จะใช้งานในสถานะที่ต้องการการขยายตัวจากความร้อนต่ำ และในขณะเดียวกันต้องทนต่อการเสียดสีได้ดี เช่น ลูกสูบ (Piston) ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine; IC) และเสื้อสูบเครื่องยนต์ที่ผลิตด้วยการหล่อในแม่พิมพ์เหล็ก ซึ่งใช้ได้โดยไม่ต้องมีปลอกสูบเหล็ก อะลูมิเนียมผสมไฮเปอร์ยูเทกติกเหล่านี้ต้องมีการเติมฟอสฟอรัส (P) เพื่อทำให้เฟสซิลิคอนปฐมภูมิ (Primary Si) มีขนาดเล็กละเอียด แสดงดังรูปที่ 2.8 [12]



ก)



ข)

รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทกติก [11]

ก) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทกติก ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงโครงสร้าง

ข) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไฮเปอร์ยูเทกติก หลังผ่านการปรับปรุงโครงสร้าง

2.1.4 อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356

อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 เป็นมาตรฐานที่เรียกตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา AA (Aluminum- Association) มีองค์ประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 356

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละของธาตุโดยน้ำหนัก
ซิลิคอน (Si)	6.5-7.5
แมกนีเซียม (Mg)	0.30-0.45
เหล็ก (Fe)	0.15
แมงกานีส (Mn)	0.10
สังกะสี (Zn)	0.07
ทองแดง (Cu)	0.02
อะลูมิเนียม (Al)	Balance

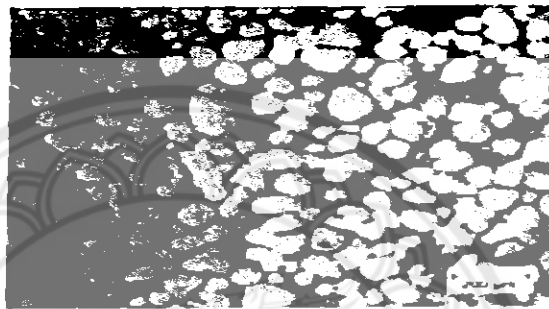
โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน เกรด เอ 356 เป็นอะลูมิเนียมผสมประเภทไฮโปยูเทกติก ซึ่งอะลูมิเนียมผสมเกรด เอ 356 นี้เป็นที่รู้จักและใช้ในงานอุตสาหกรรมยานยนต์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความสามารถในการหล่อ (Castability) ที่ดี มีอัตราการหดตัว (Shrinkage) ต่ำ ด้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Hot Tearing) ด้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) และสามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยกรรมวิธีบ่มแข็งได้

จากแผนภูมิสมดุล รูปที่ 2.1 อธิบายได้ว่า ซิลิคอนที่ร้อยละ 6.5-7.5 โดยน้ำหนักมีการรวมตัวกับอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนของอะลูมิเนียมร้อยละ 92.5-93.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 640 องศาเซลเซียส โดยซิลิคอนจะละลายให้สารละลายของแข็งกับอะลูมิเนียมได้สูงสุดร้อยละ 1.65 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 577 องศาเซลเซียส

อะลูมิเนียมผสมเกรด เอ 356 มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยการเพิ่มโซเดียมร้อยละ 0.025 โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดการละลายโครงสร้างยูเทกติกจากการหล่อ และทำให้อนุภาคของซิลิคอนในยูเทกติกมีขนาดเล็กและมีมุนน้อยลง วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการปรับปรุงสมบัติทางกลของแบบหล่อทรายที่มีการแข็งตัวอย่างช้า ๆ และการหล่อแบบหล่อถาวร (Permanent Mold) ซึ่งจะทำให้เกิดอนุภาคซิลิคอนเล็กลง การปั่นป่วนของโลหะหลอมเหลวในระหว่างการแข็งตัวน้อยลง ดังนั้น อะลูมิเนียมที่มีการเติมโซเดียมจึงมีช่องว่างเล็ก ๆ (Micro-Shrinkage) ระหว่างเดนไดรต์น้อยกว่า อะลูมิเนียมที่ไม่ได้รับการปรับปรุง [2]



ก)



ข)

รูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด เอ 356 [13]

ก) ขึ้นรูปโดยวิธีหล่อแบบดั้งเดิม

ข) ขึ้นรูปโดยวิธีหล่อกึ่งแข็ง

จากรูปที่ 2.9 อธิบายได้ว่าแถบโครงสร้างที่เป็นสีขาวคือเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม ซึ่งอะลูมิเนียมคือเฟสแรกที่เกิดขึ้น และอีกเฟสหนึ่งที่เป็นสีขาวสลับดำคือเฟสอะลูมิเนียม-ซิลิคอนยูเทกติก (Aluminum-Silicon Eutectic) ซึ่งเป็นเฟสที่เกิดหลังสุด

2.2 อุณหภูมิการเท (Pouring Temperature)

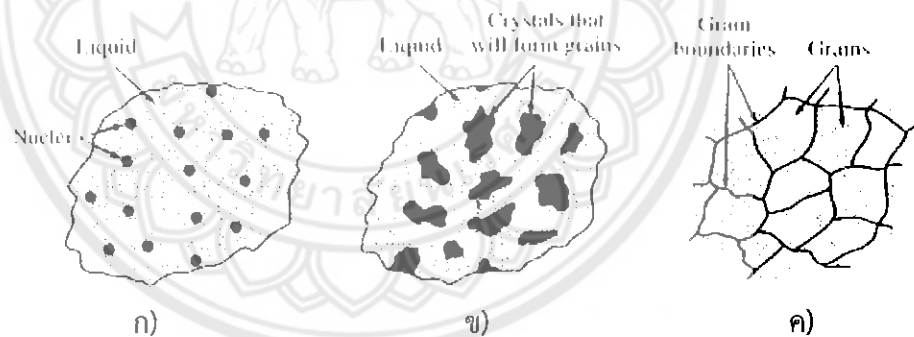
อุณหภูมิการเทมีผลต่อการเติมเต็มของชิ้นงาน คือ เมื่ออุณหภูมิเทต่ำเกินไปจะทำให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าเต็มเต็มแม่พิมพ์ได้ไม่ดีและอาจมีข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหล่อ ยิ่งไปกว่านั้นแก๊สที่เกิดขึ้นในระหว่างการเทโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์จะไม่มีเวลามากพอในการระเหยออกสู่ด้านนอกชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลทำให้ชิ้นงานหล่อที่ได้มีรูพรุนเกิดขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเทสูงเกินไป การรั่วซึมของโลหะหลอมเหลว การขยายตัวของแม่พิมพ์และการไหม้ของแบบหล่อทรายอาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นการเทหล่อจึงควรเลือกอุณหภูมิเทที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากขนาด รูปร่าง และความหนาของชิ้นงาน

อุณหภูมิเทสำหรับงานหล่อที่มีขนาดบางและมีความยาว ควรเลือกใช้อุณหภูมิเทที่สูงขึ้น เนื่องจากระยะทางที่โลหะหลอมเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์มีความยาวมากขึ้นโลหะหลอมเหลวจึงเกิด

การลดอุณหภูมิและอาจเกิดการแข็งตัวก่อนเข้าเตาเติมแม่พิมพ์ โลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิตำ่เริ่มเมื่อเริ่มเกิดการแข็งตัวจะทำให้แก๊ส และสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในโลหะหลอมเหลว (Slag) ไม่สามารถระเหยออกมาได้ทันเป็นผลทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อ แต่ถ้าอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวสูง สิ่งเจือปนและฟองอากาศเหล่านี้จะระเหยหรือถูกรวมเข้าไปในรูสัน (Riser) ของแม่พิมพ์ [14]

2.3 กลไกการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว

เมื่อปล่อยให้โลหะหลอมเหลวเย็นตัว จะทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น จนโลหะหลอมเหลวแข็งตัวทั้งปริมาตร โดยอะตอมจะเกิดการสั่นสะเทือนน้อยลง และอะตอมเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้น ตามการลดลงของอุณหภูมิ จนเกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียส (Nuclei) นั่นคือจุดเริ่มต้นของการแข็งตัว จากนั้นอะตอมจะจับรวมตัวกันมากขึ้นกลายเป็นนิวเคลียส (Nucleus) และเมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ จะเกิดการขยายตัวของนิวเคลียสกลายเป็นผลึก (Crystal) โดยที่ผลึกแต่ละผลึกจะขยายตัวขึ้นในทิศทางอิสระ เมื่อเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบที่แตกต่างกันและโตมาบรรจบกัน จะเป็นผลให้อะตอมบริเวณดังกล่าวมีการจัดเรียงตัวที่ต่างกันได้ด้วย เกิดเป็นแนวรอยต่อที่เรียกว่าขอบเกรน (Grain Boundary) และเรียกพื้นที่ที่ถูกปิดล้อมรอบด้วยเส้นขอบเกรนนี้ว่า เกรน (Grain) แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว [15]

ก) การเกิดนิวเคลียส

ข) การโตของนิวเคลียสเป็นผลึก

ค) การเชื่อมต่อกันของผลึกกลายเป็นเกรน และมีเส้นแบ่งขอบเกรน

ปริมาณของนิวเคลียสจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลว ถ้าหากโลหะหลอมเหลวมีอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว จะทำให้มีนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็กได้โครงสร้างละเอียด แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวช้า จะทำให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยลง ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ได้โครงสร้างที่หยาบ

กลไกการเกิดนิวคลีโอในโลหะหลอมเหลว ซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ๆ ที่อยู่ในโลหะหลอมเหลว มี 3 กลไกด้วยกัน คือ กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation) กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation) และกลไกการเกิดนิวคลีโอแบบสภาวะพลศาสตร์ (Dynamic Nucleation) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Nucleation)

กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบเอกพันธ์ เป็นกลไกที่ง่ายที่สุดและมักถูกนำมาพิจารณาก่อนเสมอ กล่าวคือ กลไกนี้เกิดขึ้นในกระบวนการแข็งตัวของโลหะ ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของจุดเยือกแข็งสมดุล (Equilibrium Freezing Temperature) ของโลหะนั้นมาก ๆ นิวคลีโอที่ที่เกิดขึ้นโดยกลไกนี้ จะเกิดการเคลื่อนตัวของอะตอมโลหะอย่างช้า ๆ และเกิดพันธะระหว่างกันเรียกว่าเอมบริโอ (Embryo) และถ้าเกิดพันธะระหว่างกันจนกระทั่งมีขนาดที่มีความเสถียรภาพเรียกว่า ขนาดวิกฤต (Critical Size) ถ้าขนาดของเอมบริโอมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤต จะถูกละลายกลับเป็นโลหะหลอมเหลว แต่ถ้าเอมบริโอมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤตเรียกว่า นิวคลีโอ ซึ่งจะอยู่ตัว และเติบโตเป็นผลึกต่อไป

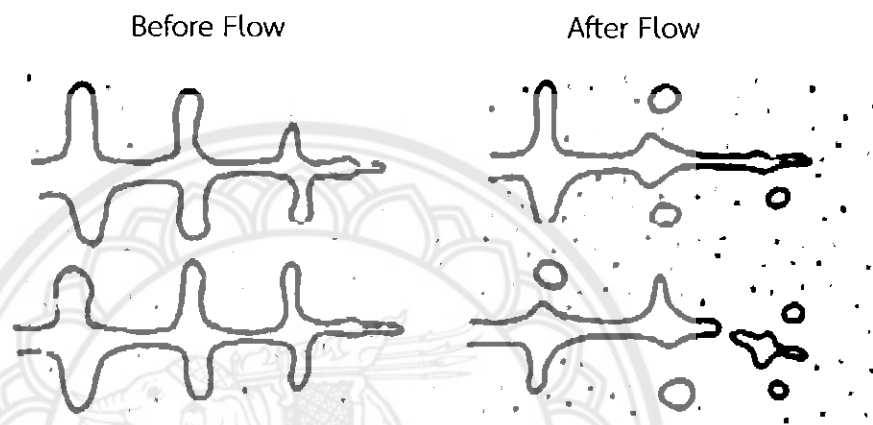
2.3.2 กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Nucleation)

กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบวิวิธพันธ์ เป็นกระบวนการเกิดนิวคลีโอจากสิ่งเจือปนในโลหะหลอมเหลว หรือพื้นผิวของแม่พิมพ์เป็นตัวช่วย การเกิดนิวคลีโอแบบนี้มักเกิดขึ้นบ่อยครั้งกับงานหล่อโลหะมากกว่าการเกิดแบบเอกพันธ์ โดยสิ่งเจือปนจะเข้าไปทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอเทียมซึ่งนิวคลีโอเทียมเหล่านี้มาจากผนังของแม่พิมพ์ วัสดุทนไฟที่ใช้ภายในเตา หรือเบ้ารองรับโลหะหลอมเหลวที่กระเทาะหลุดร่วง อนุภาคเหล่านี้มักอยู่ในลักษณะของสารแขวนลอย มีขนาดโตกว่ารัศมีวิกฤต และเป็นผลให้อะตอมของโลหะหลอมเหลวแพร่เข้ามารวมตัวและโตเป็นผลึกต่อไป [16]

2.3.3 กลไกการเกิดนิวคลีโอแบบสภาวะพลศาสตร์ (Dynamic Nucleation)

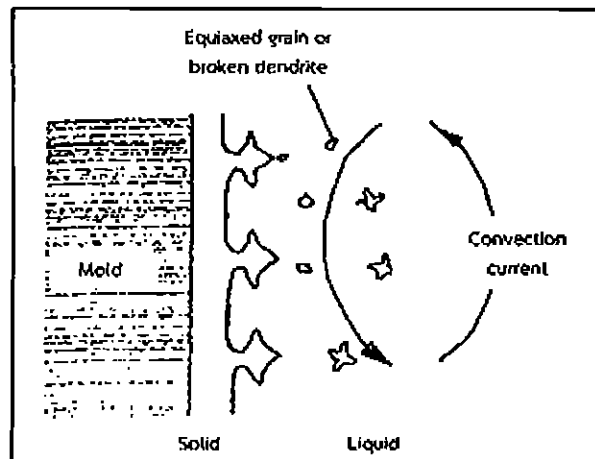
นอกจากกลไกการเกิดนิวคลีโอแบบเอกพันธ์ และวิวิธพันธ์แล้ว ยังพบว่าในสภาวะพลศาสตร์ หรือสภาวะที่เกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการแข็งตัว ก็สามารถเกิดนิวคลีโอได้เช่นกัน โดยในระหว่างการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวโครงสร้างเดนไดรต์จะเกิดการแตกหัก (Crystal Fragmentation) เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทลงแม่พิมพ์ จะเกิดการไหลวนเนื่องจากการแทรกกับการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Solutal Convection) ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของโลหะหลอมเหลวบริเวณต่างๆ กล่าวคือโลหะหลอมเหลวในบริเวณที่อยู่ติดกับผนังแม่พิมพ์เป็นส่วนที่เย็นตัวเร็วกว่า จะมีความหนาแน่นมากกว่าโลหะหลอมเหลวที่อยู่ตรงกลางของแม่พิมพ์ ทำให้เกิดการไหลในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วงในขณะเดียวกันบริเวณผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลวจะเกิดการไหลบริเวณผิวสัมผัส

เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดความแตกต่างของปริมาณตัวถูกละลาย (Solute) โดยทิศทางไหลจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างตัวถูกละลาย และตัวทำละลาย (Solvent) เมื่อนำเอาผลมารวมกัน จะเกิดการเคลื่อนที่ของโลหะหลอมเหลวบนผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง และของเหลว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหลอมเหลวเฉพาะจุด (Local Remelting) ของเดนไดรต์แบบแท่ง (Columnar Dendritic) และทำให้เกิดการแตกหักของเดนไดรต์ (Dendrite Fragmentation) แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การแตกหักของเดนไดรต์ เมื่อมีการไหลของโลหะหลอมเหลว [17]

โดยการเกิดในลักษณะนี้ จะเกิดมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงของการไหลเวียนโลหะหลอมเหลว (Convection) เช่น การทำให้สั้นสะเทือนด้วยคลื่นอัลตราโซนิค หรือการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก เป็นต้น ซึ่งกลไกการเกิดนิวคลีโอเมื่ออยู่ในสภาวะพลศาสตร์นี้ จะเกิดขึ้นเมื่อมีนิวคลีโอของเดนไดรต์ขนาดเล็ก (Pre-Dendritic Nuclei) และเกิดขึ้นขณะเทโลหะหลอมเหลว โดยเดนไดรต์ขนาดเล็กดังกล่าวเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วบริเวณผนังแม่พิมพ์ และถูกพัดเข้าสู่โลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแม่พิมพ์จากการไหลที่รุนแรงในช่วงแรกของการเทโลหะหลอมเหลว เมื่อถูกพาเข้าสู่โลหะหลอมเหลว เดนไดรต์ขนาดเล็กบางส่วนจะถูกละลายกลับไปเป็นโลหะหลอมเหลว และเมื่อโลหะหลอมเหลวบริเวณกลางแม่พิมพ์อยู่ในสภาวะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว เดนไดรต์ขนาดเล็กที่ยังเหลือ จะทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอ และเติบโตเป็นเกรนที่มีขนาดใกล้เคียงกันในทุกทิศทาง สามารถอยู่ได้โดยไม่ถูกละลายกลับ (Remelt) [18] แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพจำลองการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของเดนไดรต์ จากผนังแม่พิมพ์เข้าสู่ใจกลางแม่พิมพ์ [18]

2.4 การแข็งตัวของโลหะ

การแข็งตัวของโลหะนั้น สามารถแยกเป็น 2 ประเภท

2.4.1 การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์

เมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่บริสุทธิ์ลงสู่แม่พิมพ์แล้ว โลหะหลอมเหลวจะถ่ายเทความร้อนจนเกิดนิวเคลียส ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการตกผลึก และจุดเริ่มต้นนั้นก็จะขยายตัวโตขึ้น ในขณะที่จุดเริ่มต้นใหม่ ๆ ก็จะมีเกิดขึ้นด้วย ปฏิกริยาต่าง ๆ ดังกล่าวนี้อาจเกิดขึ้นทุกส่วนของโลหะหลอมเหลว โดยจะเกิดบริเวณที่โลหะหลอมเหลวถ่ายเทความร้อนได้ดีก่อน ซึ่งได้แก่บริเวณที่โลหะหลอมเหลวสัมผัสกับแม่พิมพ์ และในที่สุดโลหะหลอมเหลวทั้งหมดก็จะกลายเป็นผลึก (Grain) หลาย ๆ ผลึกโดยมีขอบของผลึก (Grain Boundary) แบ่งแยกผลึกทั้งหลายออกจากกัน

2.4.2 การแข็งตัวของโลหะผสม

โลหะผสมนั้นจะเกิดจากการรวมกันของธาตุมากกว่า 1 ชนิดถูกเทลงสู่แม่พิมพ์โลหะผลึกของโลหะผสมที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากผลึกของโลหะบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่น โลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุเอ และธาตุบีเกิดการแข็งตัว ผลึกที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่ผลึกของธาตุเอ และธาตุบีแยกกันอยู่ แต่จะเป็นผลึกที่ประกอบด้วยธาตุเอ และธาตุบีรวมกัน อยู่ในลักษณะที่ธาตุเอจะถูกละลายเข้าไปในธาตุบี หรือธาตุบีในบางครั้งอาจเกิดการรวมกันของธาตุเอ และธาตุบี ซึ่งธาตุทั้งสองมีปริมาณใกล้เคียงกัน การรวมกันในลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า สารประกอบโลหะ (Intermetallic Compound) นอกจากสารละลายของแข็งและสารประกอบโลหะทั้ง 2 แล้ว ยังมีบางกรณีที่สามารถพบได้ไม่บ่อยนัก คือกรณีที่ธาตุเอ หรือธาตุบี หรือทั้งธาตุเอ และธาตุบี จะปรากฏในสภาพผลึกบริสุทธิ์โดยไม่รวมตัวกัน

ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าผลึกของโลหะผสมนั้นเกิดจากปฏิกิริยา 3 ลักษณะดังนี้ คือ ผลึกจะเกิดในสภาพสารละลายของแข็ง หรือสารประกอบโลหะ หรือเกิดในสภาพโลหะบริสุทธิ์ โดยไม่รวมตัวกัน

2.4.3 โครงสร้างจากการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ

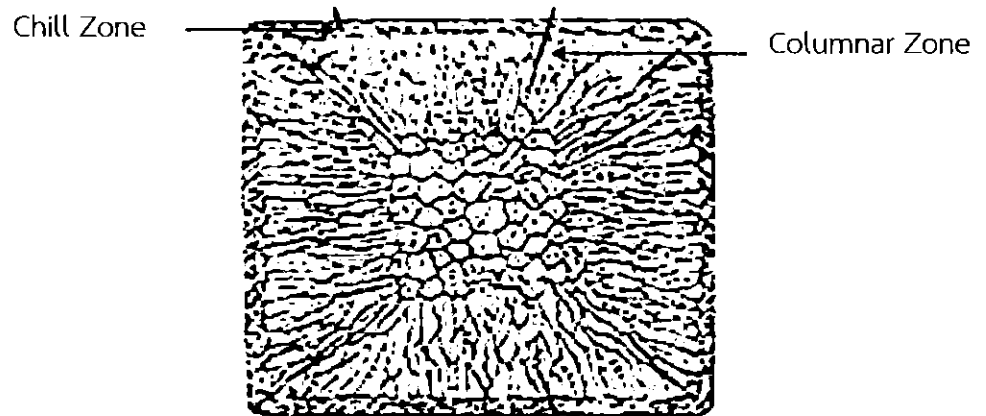
โลหะหลอมเหลวจากเตาหลอมเมื่อถูกเทลงสู่แม่พิมพ์ การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวก็จะเริ่มขึ้น โดยชิ้นงานหล่อนั้นจะเริ่มเย็นตัวจากบริเวณที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ และเมื่อความร้อนจากโลหะหลอมเหลวถูกส่งถ่ายไปยังแม่พิมพ์ โลหะหลอมเหลวที่ส่วนนั้นจะเย็นตัวลงจนถึงจุดแข็งตัว และเกิดผลึก (Chill Crystals) ซึ่งผลึกเหล่านั้นจะมีจำนวนมากและในขณะเดียวกันบริเวณภายในของชิ้นงานหล่อจะเย็นตัวลงด้วย แต่การเย็นตัวจะเกิดขึ้นช้ากว่าภายนอก ดังนั้นผลึกจะขยายตัวจากจุดเริ่มต้นของการเย็นตัวบริเวณภายนอก เข้าสู่ภายในของแม่พิมพ์ จึงทำให้ผลึกมีลักษณะเรียวยาว (Columnar) อีกประการหนึ่งก็คือ ในขณะหลอมละลายโลหะในเตาหลอมนั้น ย่อมมีสารมลทินเกิดขึ้น และสารมลทินเหล่านั้นจะรวมอยู่กับโลหะหลอมเหลวในขณะที่เทโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ และเมื่อโลหะหลอมเหลวเกิดการเย็นตัว สารมลทินก็จะแยกตัวออกมา โดยสารมลทินเหล่านั้นอาจจะรวมตัวกันอยู่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน (Major Segregation) แต่เกรนที่กำลังเติบโตอาจผลักดันสารมลทินบางส่วนให้ออกไปอยู่บริเวณขอบเกรน ทั้งนี้ก็เพราะว่าเกรนทุกเกรนต่างก็เติบโต และผลักดันสารมลทินออกไปสู่ขอบเกรนทั้งสิ้น เราเรียกการรวมที่บริเวณนี้ว่า Minor Segregation

จากสิ่งที่ได้กล่าวมาแล้ว อาจสรุปลักษณะสำคัญบางอย่างในการแข็งตัวของชิ้นงานหล่อ ดังนี้

2.4.3.1 ปรางูผลึกลักษณะเรียวยาว (Columnar) อย่างชัดเจนในชิ้นงานหล่อก็คือ ต่อเมื่อ มีความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิภายนอก และภายในชิ้นงานหล่อ ลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับชิ้นงานหล่อที่ผ่านการหล่อโดยใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะ หรืองานหล่อที่หลอมละลายโลหะที่อุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิเทมากเกินไป

2.4.3.2 ปรางูผลึกลักษณะเรียวยาวไม่ชัดเจน คือ เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิภายนอก และภายในชิ้นงานไม่มากนัก ลักษณะเช่นนี้จะเกิดกับงานหล่อที่ผ่านการหล่อโดยใช้แบบหล่อทราย

อนึ่ง บริเวณตรงกลางของชิ้นงานหล่อจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่มาก และจะเกิดเป็นผลึกขนาดเล็ก (Fine-Axed Grain) ที่เติบโตได้หลายทิศทางจนทำให้ผลึกลักษณะเรียวยาวที่เกิดขึ้นภายนอกไม่สามารถขยายตัวออกไปได้

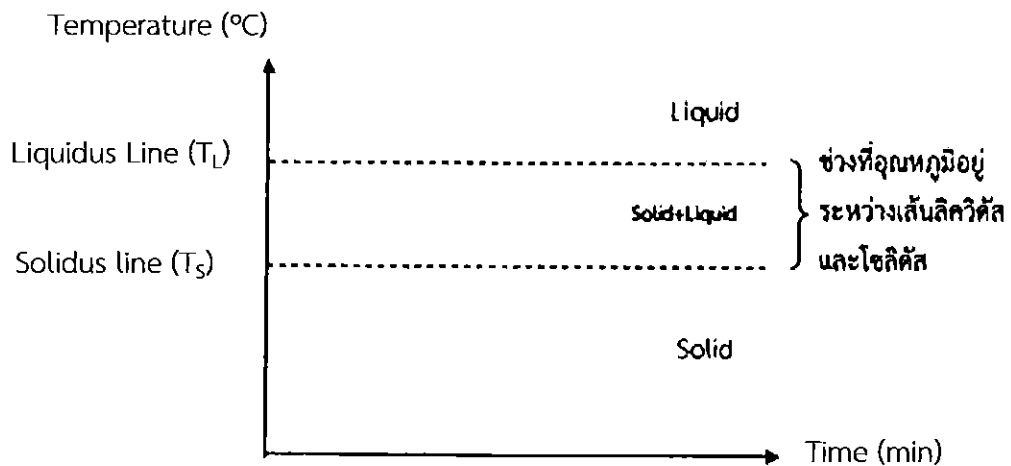


รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดผลึกของงานหล่อ [16]

2.5 กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing)

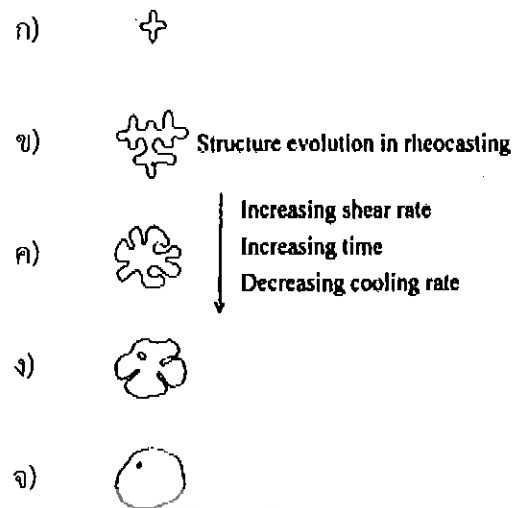
กระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งมีความแตกต่างจากเทคโนโลยีการขึ้นรูปโดยทั่วไป โดยการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้จะมีสภาวะที่ประกอบไปด้วยของเหลว และของแข็งรวมอยู่ด้วยกัน กล่าวคือจะมีอนุภาคของของแข็งที่มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์กระจายอยู่ในของเหลว โดยมีขั้นตอนในการปรับเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อจากเดิมที่เป็นเดนไดรต์ (Dendrite) ให้มีลักษณะกลมขึ้น (Globular) ก่อนนำไปขึ้นรูปขึ้นงาน ซึ่งโครงสร้างที่มีลักษณะกลมละเอียดและมีความเป็นเนื้อเดียวกันนั้น จะส่งผลให้สมบัติทางกลสูงขึ้น และยังช่วยประหยัดพลังงานในการขึ้นรูปโลหะ เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้ จะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำ ทำให้โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ในลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ส่งผลให้ลดการจับกับอากาศของโลหะหลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ ทำให้ลดการเกิดโพรงอากาศ และจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานให้ดีขึ้น [19]

การหล่อโลหะแบบหล่อกึ่งแข็ง เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดใกล้เคียงสุดท้าย (Near Net Shape) โดยในกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งนี้ จะผลิตในขณะที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในสถานะกึ่งแข็ง นั่นคือมีอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่างเส้นลิกวิดัส (Liquidus) และเส้นโซลิดัส (Solidus) โดยจะเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิอยู่เหนือเส้นลิกวิดัส เพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ช่วงอุณหภูมิของเฟสกึ่งแข็ง [20]

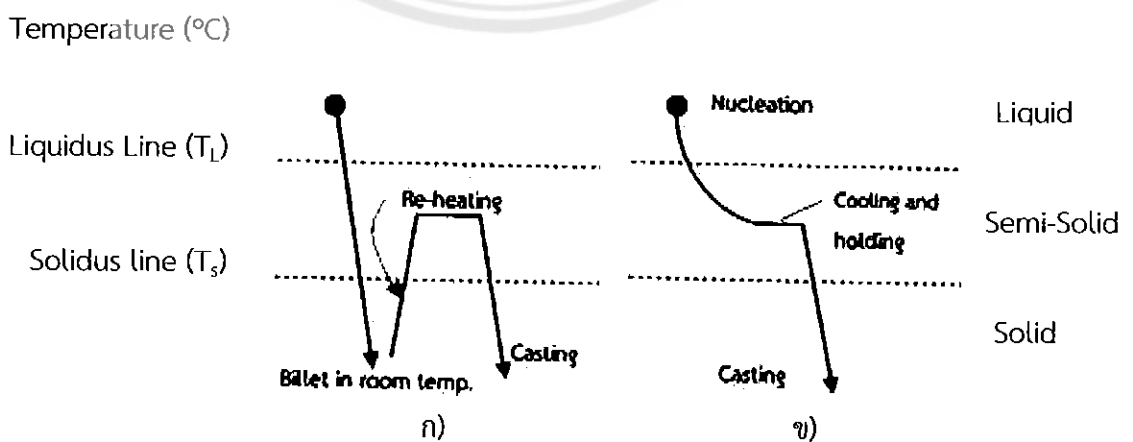
ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นเดนไดรต์ ให้กลายเป็นโครงสร้างที่มีรูปร่างกลมของกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง เมื่อได้รับแรงกระทำภายใต้การเคลื่อนที่ของของเหลวโดยการเพิ่มแรงเฉือน เพิ่มระยะเวลาในการกวนระบบ และลดอัตราการเย็นตัวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากลักษณะที่เป็นเดนไดรต์ ไปสู่โครงสร้างที่มีลักษณะกลมมากขึ้น เริ่มจากการเกิดนิวเคลียสขนาดเล็กจำนวนมาก แสดงดังรูปที่ 2.15 ก) จากนั้นนิวเคลียสโตขึ้นเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 2.15 ข) เมื่อมีการปรับปรุงโครงสร้างในช่วงที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง โดยการเพิ่มแรงเฉือน เพิ่มระยะเวลาในการกวนระบบ และลดอัตราการเย็นตัวจะทำให้เดนไดรต์เกิดการแตกหัก จากนั้นเดนไดรต์ที่เกิดการแตกหักจะโตขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อได้รับแรงเฉือนกระทำอย่างต่อเนื่องในระหว่างการแข็งตัว ส่งผลให้เดนไดรต์เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosette-Like Structure) แสดงดังรูปที่ 2.15 ค) นอกจากนี้การโตอย่างต่อเนื่องของโครงสร้างที่เป็นแฉกคล้ายดอกกุหลาบ แสดงดังรูปที่ 2.15 ง) ในระหว่างการเย็นตัวถ้ามีแรงเฉือน และอัตราการเย็นตัวที่ช้าเพียงพอ จะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้มีลักษณะกลม แสดงดังรูปที่ 2.15 จ) [21]



รูปที่ 2.15 การพัฒนาโครงสร้างที่เกิดขึ้นระหว่างการแข็งตัว ในสภาวะกึ่งแข็งภายใต้การปั่นป่วนอย่างรุนแรง [22]

- ก) เกิดนิวเคลียสในช่วงแรก
- ข) นิวเคลียสโตเป็นโครงสร้างเดนไดรต์
- ค) โครงสร้างเดนไดรต์เปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่มีแฉกคล้ายดอกกุหลาบ
- ง) โครงสร้างที่มีแฉกคล้ายกุหลาบโตขึ้น
- จ) โครงสร้างลักษณะกลม

โดยทั่วไปกระบวนการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ดิกโซแคสติง (Thixocasting) และรีโอแคสติง (Rheocasting) แผนภาพวิธีการทั้งสองกระบวนการแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพวิธีของกระบวนการ [20]

- ก) Thixocasting
- ข) Rheocasting

2.5.1 กระบวนการตักโซแคสติง (Thixocasting)

เป็นกระบวนการหล่อโลหะหลอมเหลวให้อยู่ในรูปของ Feedstock โดยมีการกวนระบบให้โลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งก่อนที่จะขึ้นรูปให้เป็น Feedstock ต่อจากนั้นมีการให้ความร้อนซ้ำเพื่อให้ Feedstock อยู่ในช่วงกึ่งแข็ง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต่อไป แสดงดังรูปที่ 2.16 ก) ในปัจจุบันกระบวนการตักโซแคสติงถูกนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมน้อยมากเมื่อเทียบกับกระบวนการรีโอแคสติง เนื่องจากมีต้นทุนในการเตรียม Feedstock ในขั้นต้น และใช้พลังงานสูงในการให้ความร้อนแก่ Feedstock ในช่วงกึ่งแข็งก่อนนำไปขึ้นรูป [19]

2.5.2 กระบวนการรีโอแคสติง (Rheocasting)

เป็นการเตรียมโลหะในสภาวะกึ่งแข็งจากของเหลวโดยตรง เริ่มจากการหลอมโลหะ จากนั้นทำให้เย็นตัวอยู่ในช่วงกึ่งแข็ง โดยมีการกวนระบบของโลหะหลอมเหลวระหว่างการเย็นตัวหรือมีการทำให้แกนของเดนไดรต์เกิดการแตกตัว จะได้โลหะหลอมเหลวที่มีอนุภาคของแข็งผสมอยู่ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.16 ข) และโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการนี้มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์แต่ได้โครงสร้างที่มีลักษณะกลมแทน

การเตรียมโลหะในสภาวะกึ่งแข็งในกระบวนการหล่อแบบรีโอแคสติง มีวิธีการเตรียมได้หลายวิธี เช่น

2.5.2.1 การกวนโลหะหลอมเหลวโดยใช้แรงทางกล (Mechanical Stirring)

วิธีการนี้เป็นการใช้แท่งกวนที่มีความเย็นในการกวนโลหะหลอมเหลว หรือการใช้ใบพัดกวนโลหะหลอมเหลว ในขณะที่โลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็ง สิ่งที่ควรระวังคือแท่งกวน หรือใบพัดกวนอาจเกิดการสึกหรอ และหลุดเข้าไปรวมอยู่กับโลหะหลอมเหลว ส่งผลให้เกิดสิ่งปนเปื้อน หรือเกิดออกไซด์ในโลหะหลอมเหลวได้

2.5.2.2 การกวนโลหะหลอมเหลวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirring)

วิธีการนี้มีหลักการคล้ายกับการกวนโลหะหลอมเหลวด้วยแรงทางกล แต่ต่างกันตรงที่ใช้การเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทน โครงสร้างที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเดนไดรต์ แต่มีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบแทน ซึ่งโครงสร้างที่ได้นี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก

2.5.2.3 การเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ (Low Pouring Temperature)

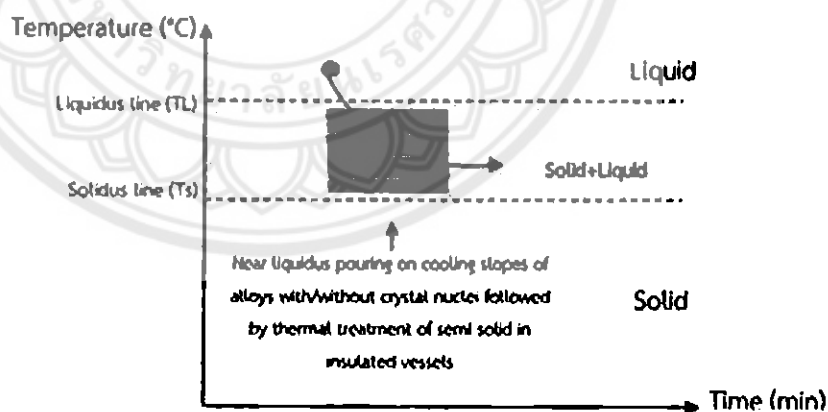
วิธีการนี้เป็นการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้นลิกวิดัส (Liquidus Line) เล็กน้อย โครงสร้างที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกันในทุกทิศทาง (Equiaxed) และมีขนาดเกรนละเอียด

2.5.2.4 การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique)

การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น เป็นการหล่อวิธีหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มของ New Rheocasting Process ซึ่งได้รับการพัฒนาจากโรงงาน UBE ในประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ในการผลิตโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการนำอะลูมิเนียมผสมมาหลอม จนเป็นโลหะหลอมเหลว จากนั้นจึงเทลงสู่แม่พิมพ์โดยผ่านรางเทหล่อเย็น แสดงดังรูปที่ 2.17 ช่วงอุณหภูมิของการเทผ่านรางเทหล่อเย็น จะอยู่เหนือเส้นลิกวิดัสเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 การหล่อโลหะแบบเทผ่านรางเทหล่อเย็น [23]



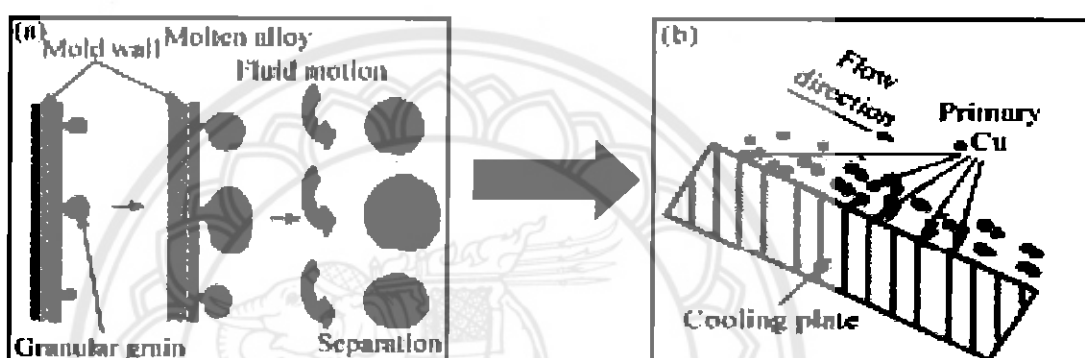
รูปที่ 2.18 ช่วงอุณหภูมิที่แข็งที่ใช้ในการเทผ่านรางเทหล่อเย็น [20]

โดยวิธีการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งด้วยวิธีการเทผ่านรางเทหล่อเย็นนี้ มีลำดับขั้นตอนในการฟอร์มตัวเป็นโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง ดังต่อไปนี้

ก. นำโลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัว (Liquidus) เพียงเล็กน้อย เทลงสู่แม่พิมพ์ โดยผ่านรางเทหล่อเย็น

ข. เมื่อโลหะหลอมเหลวถูกเทผ่านรางเทหล่อเย็น ระหว่างผิวสัมผัสของรางเทหล่อเย็น กับโลหะหลอมเหลว ความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับผนังของรางเทหล่อเย็น ทำให้เกิดนิวเคลียสขนาดเล็กที่ผนังของรางเทจำนวนมาก แสดงดังรูปที่ 2.19

ค. เนื่องจากการไหลของโลหะหลอมเหลว ทำให้เกิดความเค้นไปกระทำกับเดนไดรต์ เป็นผลทำให้เดนไดรต์เกิดการแตกหัก และการไหลของโลหะหลอมเหลวยังทำให้เกิดการหลอมใหม่อีกครั้งซึ่งทำให้เกิดนิวเคลียสใหม่ควบคู่กันไป การเกิดในลักษณะนี้ซ้ำไปซ้ำมา จึงทำให้มีการกระจายตัวของความร้อน และการกระจายตัวของนิวเคลียส ส่งผลให้โครงสร้างที่ได้มีการกระจายตัวที่ดี และมีการเกิดเดนไดรต์น้อยลง จากนั้นโลหะหลอมเหลวจึงไหลลงสู่แม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การฟอร์มตัวของโลหะหลอมเหลวเมื่อเทผ่านรางเทหล่อเย็น [24]

การขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็งด้วยการเทผ่านรางเทหล่อเย็น มีปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปโลหะในสภาวะกึ่งแข็ง ดังต่อไปนี้

ก. ความชันของรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope)

ความชันของรางเทหล่อเย็น มีผลต่ออัตราส่วนของแข็งในของเหลว (Solid Fraction) ซึ่งอัตราส่วนของแข็งในของเหลว คือปริมาณของของแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างที่โลหะนั้นยังอยู่ในสภาพหลอมเหลว โดยที่

ก.1 ถ้าความชันของรางเทหล่อเย็นมาก ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็นก็จะมาก ทำให้โลหะหลอมเหลวมีระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนน้อย แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นก็จะน้อยตามไปด้วย ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดเล็ก และละเอียด

ก.2 ถ้าความชันของรางเทหล่อเย็นน้อย ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็นก็จะน้อย ทำให้โลหะหลอมเหลวมีระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนมาก ทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นก็จะน้อยตามไปด้วย ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีขนาดใหญ่ และหยาบ

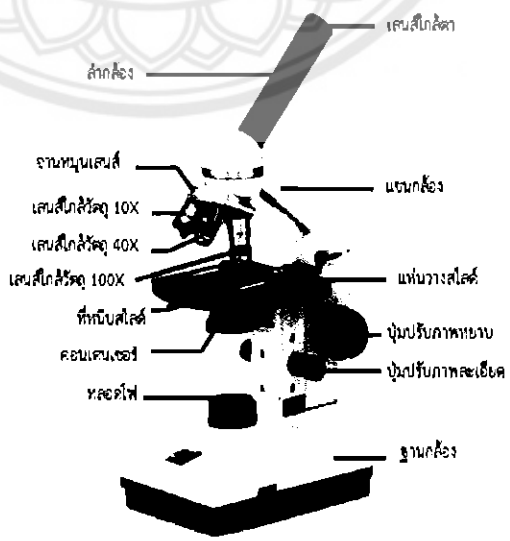
ข. อุณหภูมิเท (Pouring Temperature)

ข.1 ในขณะที่มีการเทโลหะหลอมเหลวบนรางเทหล่อเย็น ถ้าโลหะหลอมเหลวมีอุณหภูมิต่ำ จะส่งผลให้นิวเคลียสที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยลง

ข.2 การเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง จะได้โครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดใหญ่ และหยาบ แต่ความสามารถการเติมเต็มแม่พิมพ์ (Mold Filling) สูง ในทางตรงกันข้าม ถ้าเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ จะได้โครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดเล็ก และละเอียด แต่ความสามารถในการเติมเต็มแม่พิมพ์ต่ำลง

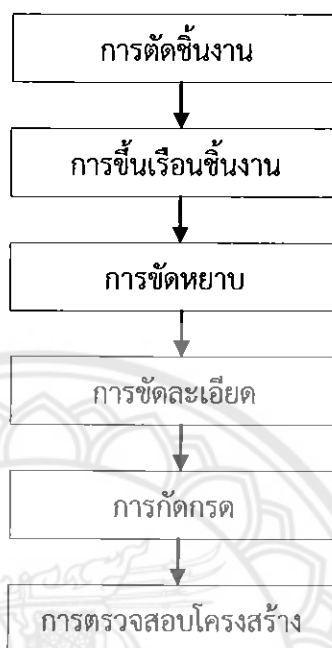
2.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แสง คือ กล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยแสงใช้ส่องให้เห็นวัตถุขยายใหญ่กว่าเดิม โดยมีหลักการทำงาน คือ เลนส์รวมแสง (Condenser Lens) จะรวบรวมแสงไฟจากหลอดไฟซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงให้ไปตกที่วัตถุที่วางอยู่บนแท่นวางวัตถุ (Specimen Stage) จากนั้นเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) จะทำการขยายวัตถุให้ได้ภาพที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วส่งต่อไปยังเลนส์ใกล้ตา (Eyepiece) เพื่อขยายภาพสุดท้าย ดังนั้นกำลังขยายของวัตถุได้มาจากผลคูณของความสามารถกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา ซึ่งกำลังขยายได้มากที่สุดประมาณสองพันเท่า และไม่อาจมีกำลังขยายที่ใหญ่ขึ้นไปกว่านี้อีกได้ เนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นภายในกล้องจุลทรรศน์เป็นภาพที่เกิดจากคลื่นแสงซึ่งมีขีดจำกัดขึ้นกับขนาดของภาพและช่วงคลื่นของแสง ถ้าภาพมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับช่วงคลื่นของแสงก็จะไม่อาจส่องขยายภาพให้มีขนาดใหญ่มาก ๆ ได้ กล้องจุลทรรศน์แสง แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กล้องจุลทรรศน์แสง [25]

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน แบ่งขั้นตอนการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนภูมิการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค [26]

2.6.1 การตัดชิ้นงาน

ในการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างต้องระวังไม่ให้ชิ้นงานร้อน และห้ามตัดด้วยแก๊ส (Gas Cutting) เพราะความร้อนจะเป็นสาเหตุทำให้ลักษณะโครงสร้าง ขนาดของโครงสร้าง และผลึกเปลี่ยนแปลงได้ การตัดนิยมใช้กันมากคือเลื่อยมือ เครื่องเลื่อย ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และประหยัด เหมาะสำหรับตัดโลหะที่มีความแข็งต่ำกว่าใบเลื่อย

2.6.2 การขึ้นเรือนชิ้นงาน (Mounting)

การขึ้นเรือนชิ้นงานทดสอบด้วยวัสดุอื่น เช่น สารสังเคราะห์ พลาสติก หรือเรซิน (Resin) เพื่อให้สามารถจับถือได้สะดวกและขนาดเหมาะสมกับเครื่องมือ เครื่องจักรอุปกรณ์ หรือกล้องที่ใช้ตรวจสอบ นอกจากนี้เพื่อให้สามารถทำเครื่องหมายได้ง่าย เช่น ใส่หมายเลข ใส่รหัส หรือสัญลักษณ์อื่น ๆ

2.6.3 การขัดหยาบ (Grinding)

เป็นขั้นตอนในการปรับระนาบผิวให้ได้ระดับและเป็นการขัดผิวหน้าให้เรียบโดยใช้กระดาษทรายขัดจากเบอร์กระดาษทรายที่มีความละเอียดต่ำไปจนถึงเบอร์กระดาษทรายที่มีความละเอียดสูง คือ เบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

2.6.4 การขัดละเอียด (Polishing)

เป็นขั้นตอนในการลดรอยขีดข่วนที่เกิดจากการขัดผิวด้วยกระดาษทราย และทำให้ได้ผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น เรียบเป็นมันเงา โดยการขัดมันมี 2 แบบ คือการขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ (Oxide Polishing; OP) เช่น ผงขัดอะลูมินา เป็นต้น และการขัดมันด้วยผงขัดเพชร (Diamond Polishing; DP) ซึ่งการขัดมันด้วยผงขัดเพชรจะมีความสามารถในการขัดสูง และได้ระนาบดีกว่าการขัดมันด้วยผงขัดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากผงขัดมีความแข็งประมาณ 8,000 HV ทำให้สามารถขัดวัสดุได้ทุกชนิด

2.6.5 การกัดกรด (Etching)

เป็นขั้นตอนในการนำชิ้นงานไปทำการกัดกรดหรือกัดผิวหน้าด้วยสารเคมีเพื่อให้สามารถเห็นโครงสร้างได้เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

2.6.6 การตรวจสอบโครงสร้าง (Microstructure Examination)

เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจดูโครงสร้างภายในเนื้อโลหะ ในการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงนั้นจะมีวิธีการทำโดยขั้นแรกวางชิ้นงานที่จะทำการตรวจสอบบนแท่นวางของกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งแท่นวางนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และเคลื่อนที่ไปทางซ้าย-ขวาได้ เพื่อปรับชิ้นงานตรวจสอบให้ตรงกับเลนส์ใกล้วัตถุ และยังเป็น การปรับระยะความชัดเจนของภาพอีกด้วย จากนั้นเปิดสวิตซ์ ทำการปรับความเข้มของแสงตามต้องการ แล้วปรับระยะชัดเจนของภาพ (Focus) ซึ่งสามารถปรับได้ 2 ระบบคือ การปรับหยาบ (Coarse Focus Control) จะปรับระยะชัดของภาพได้รวดเร็ว แต่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ และการปรับละเอียด (Fine Focus Control) จะได้ภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นภายหลังการปรับหยาบ และจะไม่มี ความผิดพลาดเกิดขึ้นเมื่อได้ภาพชัดเจนแล้วทำการถ่ายภาพไว้ เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป เมื่อต้องการหยุดการทำงาน ให้ปิดสวิตซ์ และนำชิ้นงานตรวจสอบออกจากแท่นวาง

2.7 ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรน (Image Analysis)

2.7.1 ขนาดเกรน

ขนาดเกรนจะขึ้นอยู่กับจำนวนของนิวเคลียส และพื้นที่ในการโตของเกรน ถ้าจำนวนนิวเคลียสมาก รวมทั้งพื้นที่ในการโตของเกรนน้อย จะส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก และละเอียด แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าจำนวนนิวเคลียสน้อย พื้นที่ในการโตของเกรนมีมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น สุดท้ายเกรนจึงหยาบมากขึ้น อัตราการเย็นตัวก็มีผลต่อการเกิดนิวเคลียสเช่นกัน ถ้ามีอัตราการเย็นตัวเร็ว นิวเคลียสที่เกิดขึ้นก็จะมีจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก และละเอียด แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวช้า นิวเคลียสที่เกิดขึ้นก็จะมีจำนวนน้อยลง ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ และหยาบ

นอกจากนี้เกรนที่มีขนาดเล็ก หรือใหญ่อาจเกิดจากปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายประการ เช่น การมีธาตุผสมบางธาตุที่เป็นตัวเริ่มต้นของการเกิดนิวเคลียส ตัวอย่างในการผลิตเหล็กกล้า ถ้าใส่ธาตุแมงกานีสเข้าก่อนโลหะหลอมเหลวจะเกิดการแข็งตัว ธาตุแมงกานีสจะช่วยให้มีนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกรนมีขนาดเล็ก และละเอียดขึ้น

2.7.2 ปัจจัยรูปร่าง

ปัจจัยรูปร่างเป็นจำนวนมิติที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปจากกล้องจุลทรรศน์ที่อธิบายรูปร่างของอนุภาคที่ไม่สมมาตร ปัจจัยรูปร่างจะคำนวณจากการวัดขนาดเกรน ได้แก่ การวัดอนุภาคแบบ 2 มิติ ที่มาจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์ ปัจจัยจะมีรูปร่างปกติที่ช่วงค่าจาก 0-1 ถ้าเท่ากับ 1 มักจะมีรูปร่างสมมาตร เช่น วงกลม ทรงกลม สี่เหลี่ยม หรือก้อน

ปัจจัยรูปร่างส่วนใหญ่เป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันของเกรนขนาดใหญ่ และเกรนขนาดเล็ก แสดงดังสมการที่ 2.1

$$A_r = \frac{d_{min}}{d_{max}} \quad (2.1)$$

เมื่อ d_{min} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนต่ำสุด

d_{max} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนสูงสุด

การหาค่าปัจจัยรูปร่างเป็นอัตราส่วนของฟังก์ชันเส้นรอบรูป p และพื้นที่ A_r แสดงดังสมการที่ 2.2

$$F_{cric} = \frac{4\pi A_r}{p^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ F_{cric} คือ ปัจจัยรูปร่าง

p คือ เส้นรอบรูป

ผลจากการคำนวณการหาปัจจัยรูปร่าง ถ้าค่าที่คำนวณได้เท่ากับ 1 แสดงว่าขนาดของรูปร่างมีความกลม และถ้าผลจากการคำนวณได้ค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่ามีความกลมที่ต่ำลง

2.8 การทดสอบความแข็ง

2.8.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) เป็นวิธีวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยการวัดความลึกระยะกดที่ถูกหัวกด กดด้วยแรงคงที่ ซึ่งการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวลนี้ นิยมใช้มากในอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีทดสอบที่ทำได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากสามารถอ่านค่าความแข็งจากเครื่องทดสอบได้ทันที และสามารถใช้ทดสอบความแข็งของชิ้นงานตั้งแต่อ่อนจนถึงแข็งมากได้ เพราะมีให้เลือกใช้หลายสเกล แต่ละสเกลก็เหมาะสำหรับโลหะแต่ละชนิด โดยใช้หัวกดและขนาดแรงกดที่ทดสอบแตกต่างกัน เช่น อะลูมิเนียมผสมหล่อ เหมาะกับการทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล สเกล บี โดยใช้ลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งขนาด 1/16 นิ้ว และใช้น้ำหนักกด 100 กิโลกรัมแรง ปล่อน้ำหนักให้กดอยู่บนผิวชิ้นงาน ขณะนั้นเข็มบนหน้าปัดนาฬิกาจะเคลื่อนที่เมื่อเข็มหยุดนิ่งให้จับเวลาประมาณ 15-20 วินาที แล้วนำน้ำหนักที่กดออก จากนั้นอ่านค่าความแข็งจากตัวเลขสเกลบนหน้าปัดของสเกลบี

2.8.2 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบบริเนล เป็นการวัดความแข็งโดยอาศัยแรงกดคงที่ กระทำกับลูกบอลเหล็กกล้าชุบแข็งบนผิวชิ้นงานทดสอบ ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยพื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นผิวโค้ง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความแข็งได้จำนวนน้อยมาก แสดงดังสมการที่ 2.3

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi Dt} \quad (2.3)$$

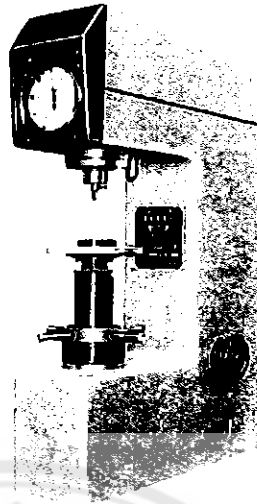
เมื่อ P คือ น้ำหนักกด (กิโลกรัมแรง)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวบอล (มิลลิเมตร)

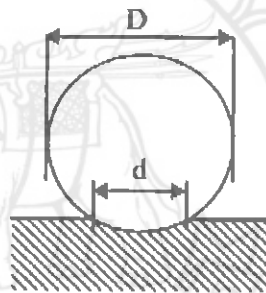
d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด (มิลลิเมตร)

t คือ ความลึกของรอยกด (มิลลิเมตร)

แรงกดสำหรับการทดสอบจะอยู่ในช่วง 500-3000 กิโลกรัมแรง และลูกบอลเหล็กกล้าจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0-10 มิลลิเมตร โดยใช้ระยะเวลาในการกดประมาณ 10-15 วินาที สำหรับเหล็ก หรือเหล็กกล้า และ 30 วินาที สำหรับโลหะนิ่ม (เช่น ตะกั่ว, ดีบุก เป็นต้น) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโลหะมีความแข็งที่แตกต่างกัน หากโลหะที่นำมาใช้ทดสอบนิ่มและใช้แรงกดมาก จะมีผลทำให้ระยะที่หัวกดจมลงไปในชิ้นงานลึกมากจนอาจเกินกว่าครึ่งลูก ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณค่าความแข็งผิดพลาดได้ หรือหากเลือกแรงกดน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับขนาดของลูกบอลเหล็กกล้าก็จะทำให้การแปลผลทำได้ไม่แม่นยำเช่นกัน



รูปที่ 2.22 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) [27]



รูปที่ 2.23 หัวกดและรอยกดในการทดสอบความแข็งแบบบริเนล [28]

2.8.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ เป็นการทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ซึ่งมีมุมของปลายแหลม 136 องศา และน้ำหนักกดที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 5-120 กิโลกรัมแรง การทดสอบนี้มีหลักการเดียวกันกับการทดสอบความแข็งแบบบริเนล คือ ค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด แสดงดังสมการที่ 2.4

$$HV = \frac{2P \sin(\theta/2)}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักกด (กิโลกรัมแรง)

d คือ ความยาวเส้นทแยงมุมของรอยกดโดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)

θ คือ มุมระหว่างหน้าตรงข้ามของหัวกด เท่ากับ 136 องศา

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

N.K.Kund and P.Dutta (2010) ได้ทำการศึกษาอัตราการแข็งตัวของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด เอ 356 โดยกรรมวิธีร่างเทหล่อเย็น จากผลการศึกษาพบว่า ความชื้นของรางเทมีผลต่ออัตราส่วนของแข็งในโลหะหลอมเหลว โดยถ้าความชื้นของรางเทมีน้อยจะมีอัตราส่วนของแข็งมากกว่ารางเทที่มีความชื้นมาก ในขณะที่เดียวกันหากรางเทมีความชื้นมากจะทำให้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวมีมากขึ้น ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย และขณะที่โลหะหลอมเหลวไหลผ่านรางเทจะเกิดการถ่ายเทความร้อนเป็นผลทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวและเกิดแรงเค้นขึ้น สรุปได้ว่า ความชื้นของรางเทมีผลกระทบอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน [28]

T. Haga และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาปัจจัยของรางเทหล่อเย็นที่ส่งผลกระทบต่อการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง จากการศึกษาพบว่า ความยาวของรางเทมีผลต่อการระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลว โดยการระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลวจะมีค่ามากก็ต่อเมื่อความยาวของรางเทหล่อเย็นมีความยาวมาก อีกทั้งความชื้นของรางเทก็ส่งผลต่ออัตราการไหลของโลหะหลอมเหลวด้วย โดยหากรางเทมีความชื้นมากจะส่งผลให้ความเร็วในการไหลของโลหะหลอมเหลวมีค่ามาก ทำให้การระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลวบนรางเทมีค่าน้อยตามไปด้วย [29]

Taghavi and Ghassemi (2009) ได้ทำการศึกษาความชื้นของรางเทที่ส่งผลโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่ความชื้น 30, 40, 50 และ 60 องศา ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่ความชื้น 40 และ 50 องศา โครงสร้างเดนไดรต์มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลม เนื่องมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและแรงเค้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นบนรางเทหล่อเย็นมีมากขึ้น สำหรับที่ความชื้น 30 องศา ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างเดนไดรต์ ไปเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลม แต่โครงสร้างเดนไดรต์ที่ได้มีขนาดเล็กและละเอียดมากขึ้น และในรางเทที่มีความชื้น 60 องศา พบว่ามีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่ารางเทที่มีความชื้น 40 และ 50 องศา ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแต่ก็มีความหยาบมากกว่ารางเทที่มีความชื้น 40 และ 50 องศา [30]

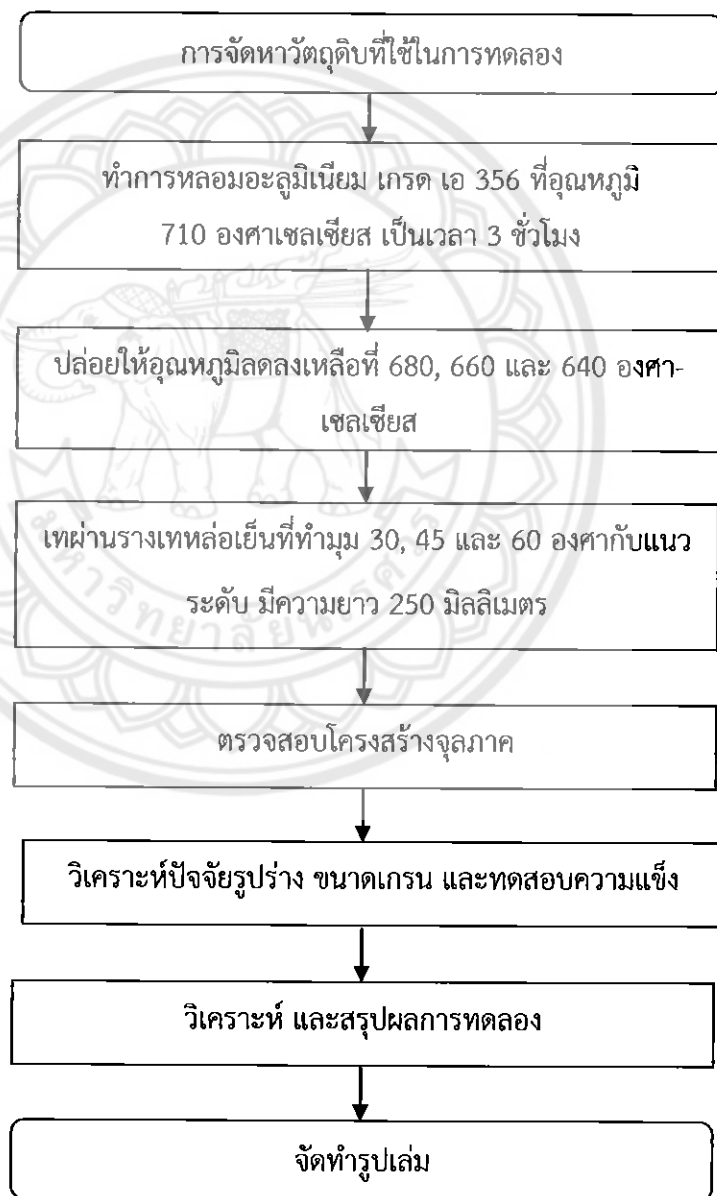
Ghomashchi (2006) ได้ทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทของโลหะหลอมเหลวที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค ที่อุณหภูมิ 615, 630, 645, 675 และ 695 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า เมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะเปลี่ยนจากเดนไดรต์กลายเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลมและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องมาจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้ความหนาแน่นของเกรนมีมากขึ้น สามารถปรับปรุงโครงสร้างและสมบัติทางกลของชิ้นงานได้ดี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทเป็น 645 องศาเซลเซียส โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทให้สูงขึ้นเป็น 695 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีโครงสร้างที่เป็นเดนไดรต์ [31]

T.Haga and P.Kapranos (2002) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด เอ 356 ด้วยวิธี Rheocasting ที่ผ่านการเทด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) และหล่อด้วยอุณหภูมิต่ำ (Low Superheat Casting) ที่อุณหภูมิ 620, 650 องศาเซลเซียส รางเทมีความชัน 60 องศา กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ทำการอุ่นแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 350, 450, 500 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จากการศึกษาพบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น มีรูปร่างลักษณะกลมและมีขนาดที่เล็กกว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโดยใช้การเทที่อุณหภูมิเตต่ำ จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็นสูงกว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโดยใช้การเทที่อุณหภูมิเตต่ำ [32]



บทที่ 3 วิธีดำเนินการโครงงาน

สำหรับวิธีการดำเนินการโครงงานนี้จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงาน โดยขั้นตอนการดำเนินงานในการศึกษาผลของการเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope) ที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง ขนาดเกรน และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 แสดงดังรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในโครงการงาน

อะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing) เทผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope) ที่อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละของธาตุโดยน้ำหนัก
ซิลิคอน (Si)	6.5-7.5
แมกนีเซียม (Mg)	0.30-0.45
เหล็ก (Fe)	0.15
แมงกานีส (Mn)	0.10
สังกะสี (Zn)	0.07
ทองแดง (Cu)	0.02
อะลูมิเนียม (Al)	Balance

3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการเตรียมชิ้นงาน

- ก. เตาทอมโลหะไฟฟ้า
- ข. รางเทหล่อเย็น (Cooling Slope)
- ค. เครื่องขัดโลหะ
- ง. กระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200
- จ. ผงขัดอะลูมินาความละเอียดขนาด 1 ไมครอน

3.1.2.2 สารเคมี

- ก. สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร

- ข. น้ำกลั่น

3.1.2.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ก. กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)
- ข. เครื่องทดสอบความแข็ง
- ค. โปรแกรมวิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรน

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 ศึกษาทฤษฎี และรวบรวมข้อมูล

3.2.1.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมหล่อ และอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 356 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี กระบวนการผลิต สมบัติทางกล เป็นต้น

3.2.1.2 ศึกษาทฤษฎีกรรมวิธีการหล่อแบบกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing) เพื่อศึกษาการหล่อกึ่งแข็งด้วยวิธีต่างๆ ผลของการหล่อกึ่งแข็ง ที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล นอกจากนี้ยังศึกษาข้อมูลของการหล่อโดยใช้เทคนิครางเทหล่อเย็น (Cooling Plate Technique) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล

3.2.1.3 ศึกษาเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ เพื่อศึกษาวิธีการใช้งาน และการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุ

3.2.1.4 ศึกษาปัจจัยรูปร่าง เพื่อศึกษาการคำนวณปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรน

3.2.1.5 ศึกษาทฤษฎีการทดสอบความแข็งของวัสดุ เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบความแข็งแบบต่างๆ

3.2.2 การจัดหาวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

อะลูมิเนียมผสมหล่อที่ได้นำมาใช้ในการทดลอง คือ เกรด เอ 356 จากนั้นขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing) ผ่านรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope) ที่ทำมาจากทองแดง ซึ่งมีความยาว 250 มิลลิเมตร แม่พิมพ์ที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 ชิ้น ประกบเข้าด้วยกัน โดยกำหนดให้ขนาดของชิ้นงาน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร ทำมาจากเหล็กกล้า

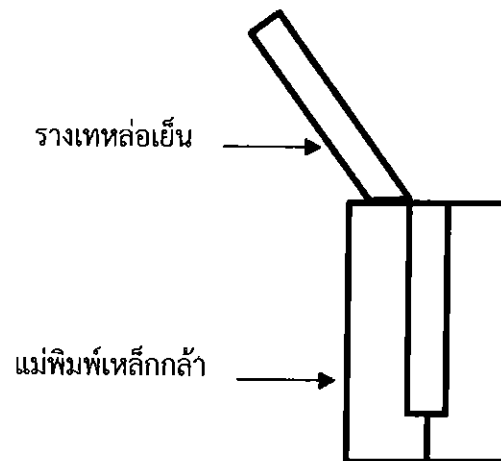
3.2.3 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงาน

3.2.3.1 การเตรียมแม่พิมพ์

นำแม่พิมพ์ 2 มาขึ้นประกบเข้าด้วยกันให้แนบสนิท จากนั้นนำแม่พิมพ์มาวางให้ติดกับปลายรางเท เพื่อรองรับโลหะหลอมเหลว

3.2.3.2 การเตรียมรางเทหล่อเย็น (Cooling Slope)

ติดตั้งรางเทหล่อเย็นที่ทำจากทองแดง โดยกำหนดให้รางเทมีความยาว 250 มิลลิเมตร สามารถปรับเปลี่ยนความชันได้ โดยปรับให้มีความชันกับระนาบพื้น 30, 45 และ 60 องศา ตามลำดับ และให้ปลายรางเทติดกับแม่พิมพ์ โดยส่วนด้านล่างของรางเทจะมีระบบน้ำหล่อเย็นไหลเวียนอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้โลหะหลอมเหลวเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วและเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 3.2 การเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางเทหล่อเย็น

3.2.3.3 การหล่ออะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356

ทำการหลอมแท่งอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่อุณหภูมิ 710 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเทโลหะหลอมเหลวผ่านรางที่อุณหภูมิ 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส และแต่ละอุณหภูมิจะเทที่ความชันของรางเท่ากับ 30, 45 และ 60 องศา

3.2.4 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Processing) ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น (Cooling Slope) มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope) โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังต่อไปนี้

3.2.4.1 นำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ

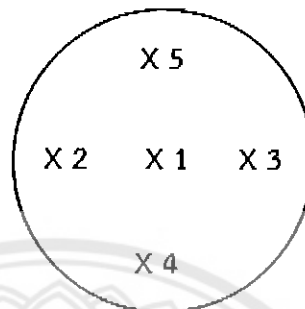
3.2.4.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดกระดาษทรายมาขัดด้วยผงอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน

3.2.4.3 นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียดแล้วไปกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Etching) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ในน้ำกลั่น 99.5 มิลลิลิตร โดยนำชิ้นงานจุ่มลงในกรดแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นเป่าให้แห้ง

3.2.4.4 นำชิ้นงานที่กัดกรดเรียบร้อยแล้ว มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope)

3.2.5 ทดสอบความแข็ง

นำชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็งเทผ่านรางเทหล่อเย็นมาทดสอบความแข็งแบบบริเนล โดยกดลงบนชิ้นงาน 5 จุด แสดงดังรูปที่ 3.3 แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็งด้วยเทคนิค รางเทหล่อเย็น

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

3.2.5.2 ใช้เครื่องวัดความแข็งแบบบริเนล โดยใช้หัวกดแบบลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/16 นิ้ว ใช้น้ำหนักกด 300 กิโลกรัมแรง เป็นเวลา 15 วินาที โดยทำการวัด 5 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.6 วิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรน

นำรูปที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จำนวน 5 ตำแหน่ง ที่กำลังขยาย 100 เท่า มาวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยรูปร่าง ขนาดเกรน แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.2.7 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำข้อมูลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งโดยเทคนิครางเทหล่อเย็นมา วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง ขนาดเกรน และความแข็ง จากนั้นทำการสรุปผลการทดลอง

3.2.8 จัดทำรูปเล่ม

จัดทำเอกสารรวบรวมผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเท และความชันของรางเท โดยทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในเรื่องของผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหล่อ โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง ขนาด และความแข็ง ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

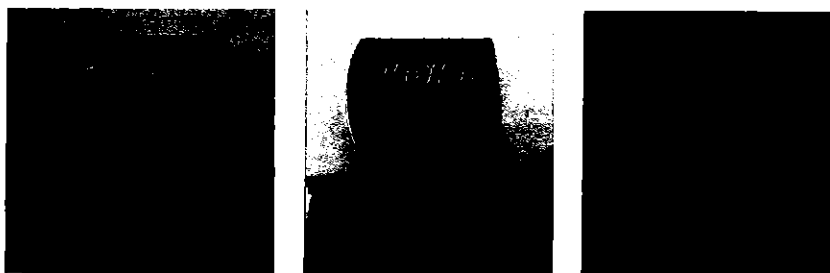
4.1 ผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง ผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเท และความชันของรางเทหล่อเย็น

4.1.1 ผิว และรูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน

4.1.1.1 ผิวของชิ้นงาน

จากการศึกษาผิวของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบความชันเท่ากัน ที่อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า พบว่าผิวของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส จะมีความเรียบผิวมากกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส และ 640 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เทมีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน การเทโลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้โลหะหลอมเหลวมีความสามารถการไหล (Fluidity) ได้ดีกว่า โลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำ เพราะโลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนืดน้อยกว่า ซึ่งจะส่งผลให้โลหะหลอมเหลวสามารถไหลเข้าเต็มเต็มแม่พิมพ์ได้ดี และโลหะหลอมเหลวบางส่วนยังไม่เกิดการแข็งตัวก่อนไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ อีกทั้งการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำอาจทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแข็งตัวที่บริเวณผิวของแม่พิมพ์ก่อน ทำให้ชิ้นงานมีความเรียบผิวดำ ผิวของชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเปลือกส้ม (Cold Lap) ดังนั้นชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส จึงมีความเรียบผิวสูงกว่าชิ้นงานที่เทด้วยอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส และ 640 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 4.1 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 30 องศา เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างกัน

ก) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

ข) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ค) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 4.2 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 45 องศา เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ก) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

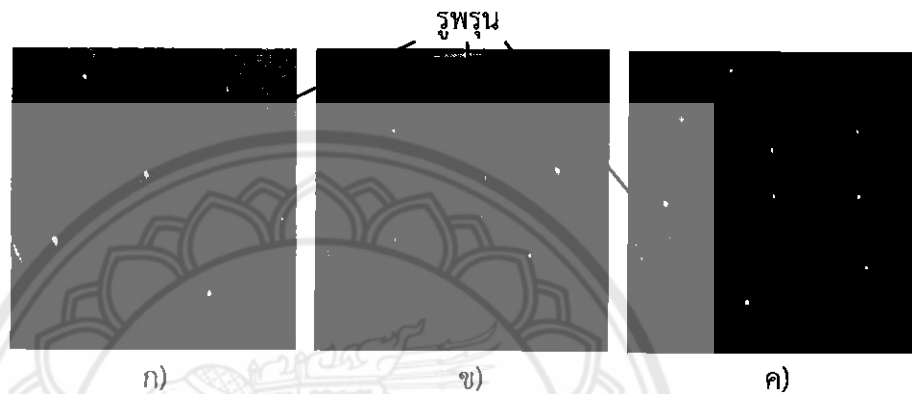
ข) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

ค) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

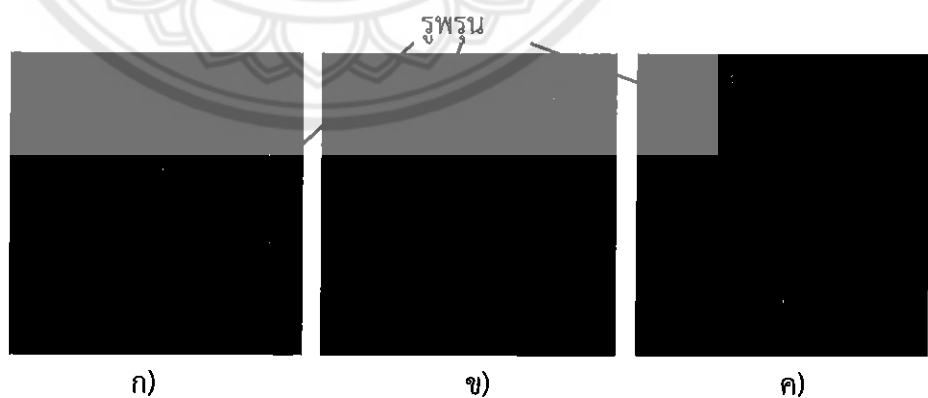
4.1.1.2 รูพรุน

จากการศึกษารูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบความชันเท่ากัน ที่อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า พบว่ารูพรุนที่เกิดในชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส มีน้อยกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิเท 640 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 เนื่องจากอุณหภูมิเทมีผลต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานที่มีการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง โลหะหลอมเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้เร็วกว่า เนื่องจากมีความหนืดต่ำ แต่โลหะหลอมเหลวที่มีการเทที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยากับอากาศได้ง่าย อีกทั้งการไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ยังเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิเทต่ำ โลหะหลอมเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ช้า เนื่องจากมีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์มีความ

ราบเรียบการไหลที่ดีกว่า และถึงแม้ว่าโอกาสในการเกิดฟองแก๊สระหว่างที่โลหะหลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จะน้อย แต่ในระหว่างการเทโลหะหลอมเหลวลงบนรางเทก็อาจทำให้มีฟองแก๊สเกิดขึ้น จากการปั่นป่วนของ โลหะหลอมเหลวบนรางเท อีกทั้งโลหะหลอมเหลวมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิการแข็งตัว (Solidus Temperature) ทำให้โลหะหลอมเหลวมีระยะเวลาในการแข็งตัวน้อย ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจึงไม่มีโอกาสระเหยออกจากโลหะหลอมเหลว ดังนั้นชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส จึงมีรูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่อุณหภูมิเท 640 และ 680 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 รูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 30 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเทต่างกัน
 ก) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส
 ข) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส
 ค) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

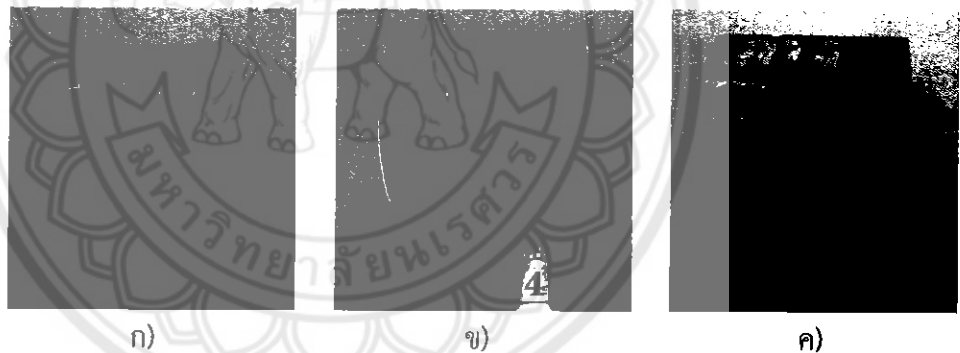


รูปที่ 4.4 รูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 45 องศา เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเทต่างกัน
 ก) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส
 ข) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส
 ค) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

4.1.2 ผิว และรูปพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่อความชันของรางเทหล่อเย็นต่างกัน

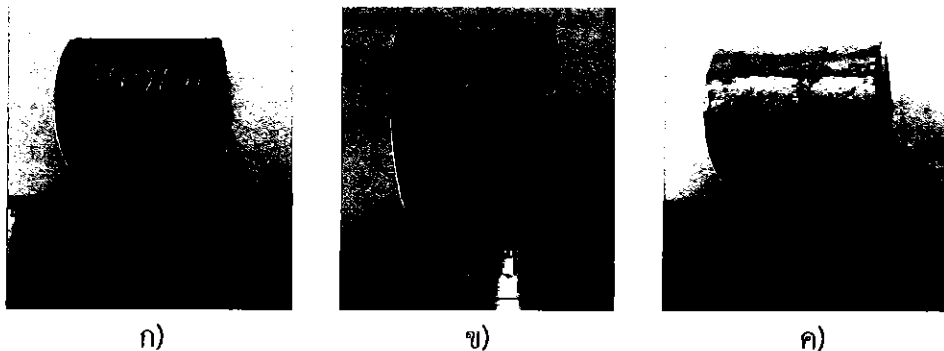
4.1.2.1 ผิวของชิ้นงาน

จากการศึกษาผิวของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเท่ากัน ที่ความชันของรางเท 30, 45 และ 60 องศา เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า พบว่าผิวของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา มีความเรียบผิวมากกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา เนื่องจากความชันของรางเทมีผลต่ออัตราเร็วการไหลของโลหะหลอมเหลว ถ้าความชันของรางเทหล่อเย็นน้อย โลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทก็จะมีความเร็วต่ำ นอกจากนี้การไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเทที่มีความชันน้อยยังมีความราบเรียบ การไหลของโลหะหลอมเหลวมากกว่ารางเทที่มีความชันมาก แต่ถ้ารางเทหล่อเย็นมีความชันมาก โลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทก็จะมีความเร็วสูง โลหะหลอมเหลวที่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จึงเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โลหะหลอมเหลวที่เทผ่านรางเทที่มีความชันต่ำ มีผิวของชิ้นงานที่เรียบกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชันสูง ดังนั้นชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา จึงมีผิวที่เรียบกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบที่ความชันของรางเทต่างกัน

- ก) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา
- ข) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 องศา
- ค) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 60 องศา

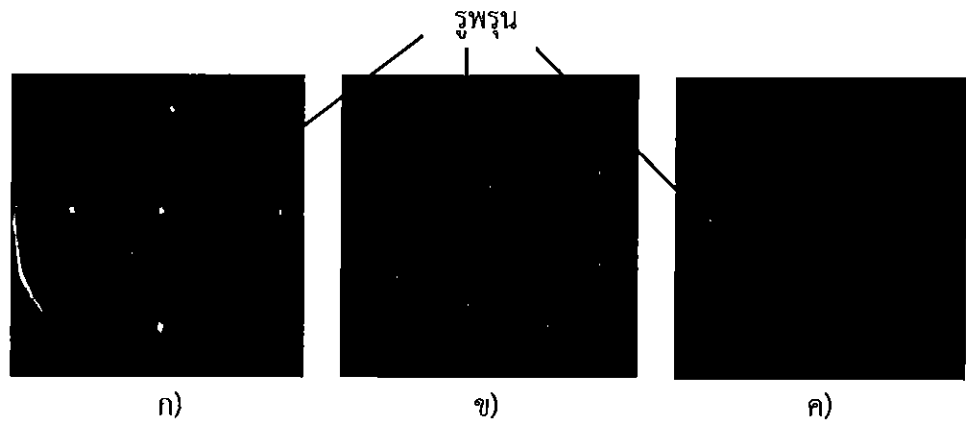


รูปที่ 4.6 ผิวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบที่ความชันของรางแตกต่างกัน

- ก) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา
- ข) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 องศา
- ค) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 60 องศา

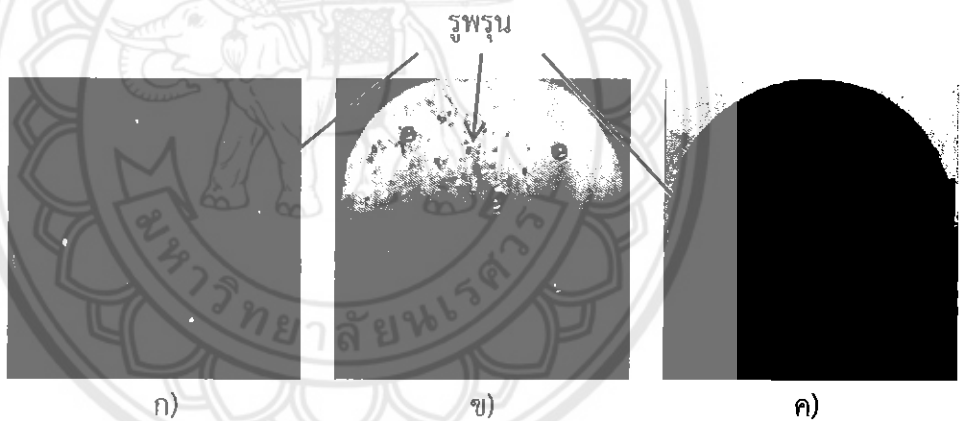
4.1.2.2 รูพรุน

จากการศึกษารูพรุนของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเทเท่ากัน ที่ความชันของรางเท 30, 45 และ 60 องศา เมื่อนำชิ้นงานมาวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า พบว่ารูพรุนที่เกิดในชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่ความชัน 30 องศา มีน้อยกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่ความชัน 45 และ 60 องศา เนื่องจากความชันของรางเทมีผลต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน ถ้ารางเทหล่อเย็นมีความชันมาก โลหะหลอมเหลวจะมีระยะเวลาอยู่บนรางเทน้อย ส่งผลให้มีการระบายความร้อนเกิดขึ้นน้อย โลหะหลอมเหลวจึงมีความหนืดต่ำ เมื่อไหลผ่านรางเทจะมีความเร็วสูง และเกิดการไหลแบบปั่นป่วน อีกทั้งโลหะหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิสูง จะมีโอกาสทำปฏิกิริยากับแก๊สในอากาศมากกว่า ทำให้มีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระหว่างการไหลเต็มเต็มแม่พิมพ์ แต่ถ้ารางเทหล่อเย็นมีความชันน้อย โลหะหลอมเหลวที่ไหลผ่านรางเทหล่อเย็นก็จะมีความเร็วต่ำ เนื่องจากโลหะหลอมเหลวที่เทผ่านรางเทที่มีความชันน้อย มีระยะเวลาอยู่บนรางเทได้นานกว่า ทำให้การระบายความร้อนเกิดขึ้นได้มาก โลหะหลอมเหลวจึงมีอุณหภูมิต่ำลง ความหนืดเพิ่มมากขึ้น ขณะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จึงไม่เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นได้น้อยในระหว่างการเต็มเต็มแม่พิมพ์ ดังนั้นชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา จึงมีรูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 รูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบที่ความชันของรางแตกต่างกัน

- ก) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา
- ข) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 องศา
- ค) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 60 องศา



รูปที่ 4.8 รูพรุนของชิ้นงานที่เกิดขึ้นในการหล่อด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบที่ความชันของรางแตกต่างกัน

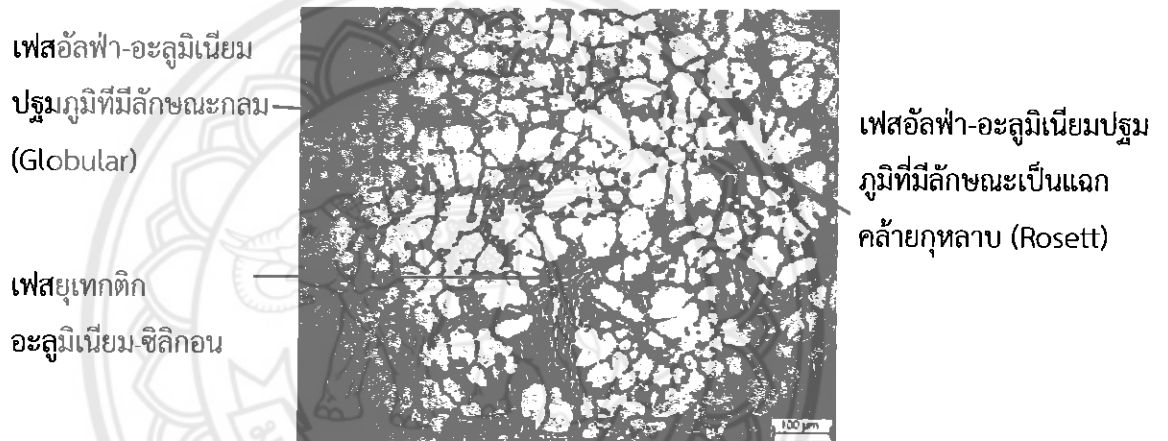
- ก) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา
- ข) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 องศา
- ค) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 60 องศา

4.2 โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง ขนาด และความแข็งของชิ้นงานหล่อ

โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง และขนาดของชิ้นงานหล่อ จะส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงาน ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง และขนาด หลังจากผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการเทหล่อเย็น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการเท และความชันของรางเทหล่อเย็น

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปของอะลูมิเนียมผสมหล่อเกรด เอ 356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทกติก เกรด เอ 356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) และเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน (Eutectic Al-Si) โดยที่เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ จะมีลักษณะกลม (Globular) และมีสีขาวกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน บางส่วนของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ จะเห็นเป็นโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosett) และพบเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ที่มีสีดำแทรกอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.9



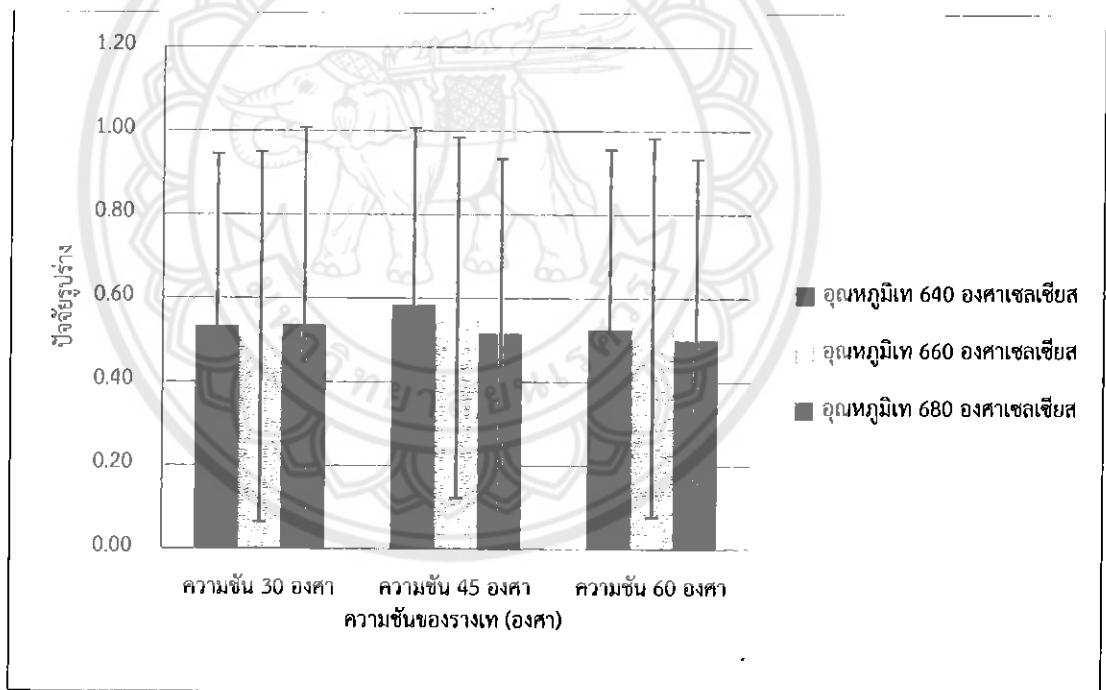
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ไฮโปยูเทกติก

4.2.2 โครงสร้างจุลภาค, ปัจจัยรูปร่าง, ขนาด และความแข็ง ของการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน

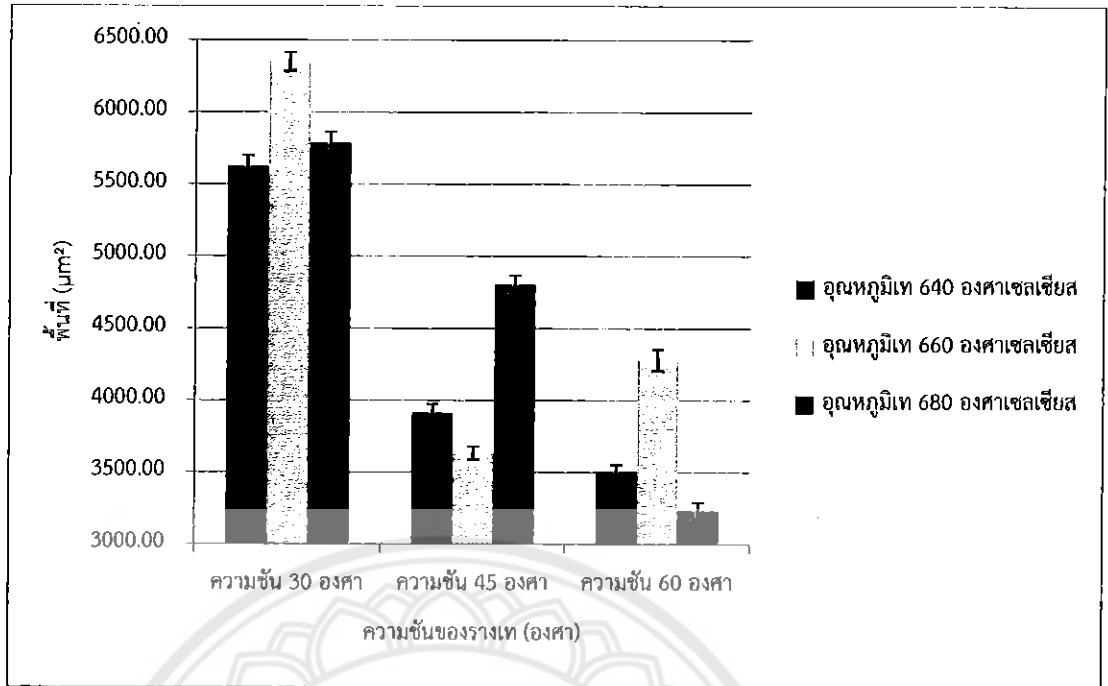
4.2.2.1 โครงสร้างจุลภาค, ปัจจัยรูปร่าง และขนาด

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทกติก เกรด เอ 356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) และเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน (Eutectic Al-Si) โดยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มีลักษณะกลม (Globular) และกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน บางส่วนของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ จะเห็นเป็นโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosett) ส่วนเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน จะแทรกตัวอยู่ระหว่างเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ และเมื่อเปรียบเทียบความชันของรางเทเท่ากัน ที่อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีความกลมมากกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส

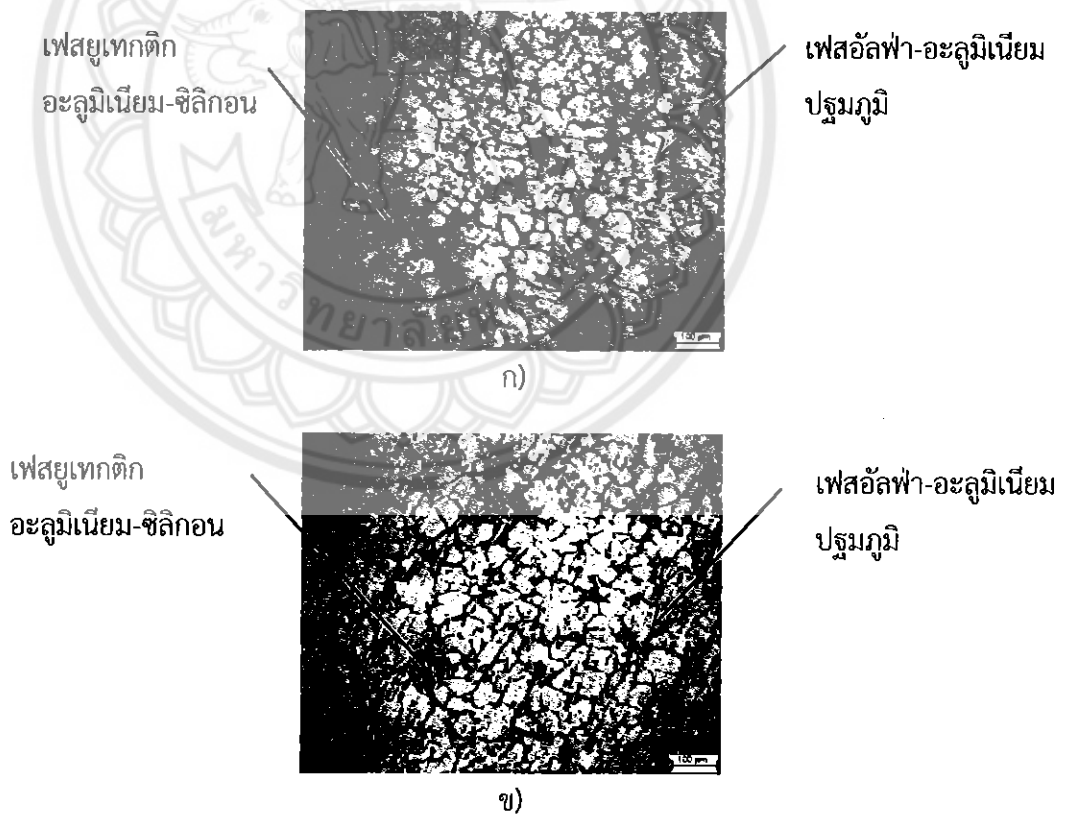
แต่โดยรวมแล้วทุกอุณหภูมิจะมีเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีความกลมใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมิขนาดเล็กละเมื่อเทียบที่ความชันเท่า ๆ กัน แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 เนื่องมาจากการเทโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ จะส่งผลให้มีปริมาณอัตราส่วนของแข็งในของเหลวมาก ปริมาณของนิวเคลียสที่เกิดขึ้นก็จะมีจำนวนมากตามไปด้วย รวมถึงความหนืดของโลหะหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น แรงเฉือนที่เกิดในระหว่างการไหลของโลหะหลอมเหลวบนรางเท จึงเพียงพอต่อการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเดนไดรต์เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะกลม ประกอบกับมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิการแข็งตัว (Solidus Temperature) ของโลหะหลอมเหลว จึงส่งผลให้โลหะหลอมเหลวมีอัตราการเย็นตัวสูง ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเทให้สูงขึ้น โลหะหลอมเหลวจะใช้เวลานานในการแข็งตัว โครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีความกลมลดลงและมีขนาดใหญ่ขึ้น และโครงสร้างจุลภาคบางส่วนมีลักษณะเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ หรืออาจไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้เป็นเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 ค่าปัจจัยรูปร่าง เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.11 ขนาดพื้นที่ที่เกรน เมื่ออุณหภูมิเทมีการเปลี่ยนแปลง

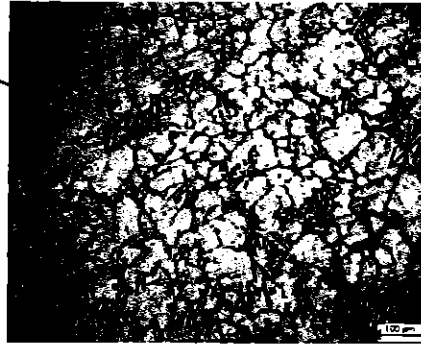


รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 45 องศา เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเทต่างกัน

ก) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส

ข) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส

เฟสยูเทคติก
อะลูมิเนียม-ซิลิกอน



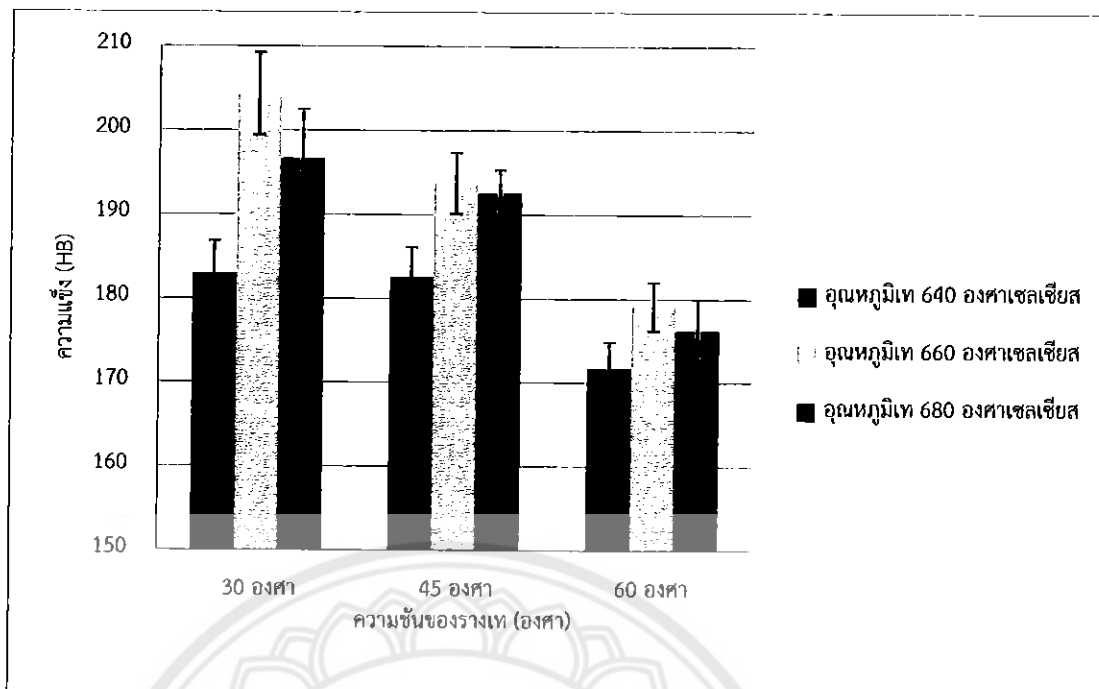
เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียม
ปฐมภูมิ

ค)

รูปที่ 4.12 (ต่อ) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น บนรางเทที่มีความชัน 45 องศา เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
ค) ชิ้นงานที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส

4.2.2.2 ความแข็ง

จากการศึกษาความแข็ง (Hardness Test) ของชิ้นงาน ด้วยการทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness) ด้วยหัวบอลขนาด 2.5 มิลลิเมตร น้ำหนักกด 300 กิโลกรัมแรง ใช้เวลาในการกด 15 วินาที พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 640 และ 680 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิเทมีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน แต่ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ไม่เป็นไปตามทฤษฎีเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานมีค่าต่ำ ยกเว้นรางเทหล่อเย็นที่มีความชัน 45 องศา สำหรับอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ควรมีการทดลองซ้ำ แต่ในที่นี้จะพิจารณารางเทหล่อเย็นที่มีความชัน 45 องศา เมื่อมีการใช้อุณหภูมิเทต่ำ ชิ้นงานจะมีอัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจุลภาคที่ได้จึงมีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) ที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบที่ความชันเท่า ๆ กัน ประกอบกับที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ชิ้นงานมีรูพรุนน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 640 และ 680 องศาเซลเซียส ซึ่งชิ้นงานที่ใช้อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสจะมีอัตราการเย็นตัวที่ต่ำลง โครงสร้างจุลภาคที่ได้ส่วนใหญ่ จึงมีโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็นแฉกคล้ายกุหลาบ (Rosett) และบางส่วนยังคงเป็นเดนไดรต์ (Dendrite) ค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมิขนาดใหญ่เมื่อเทียบที่ความชันเท่า ๆ กัน อีกทั้งรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานยังส่งผลให้ความแข็งที่ได้มีค่าต่ำลง แสดงดังรูปที่ 4.13

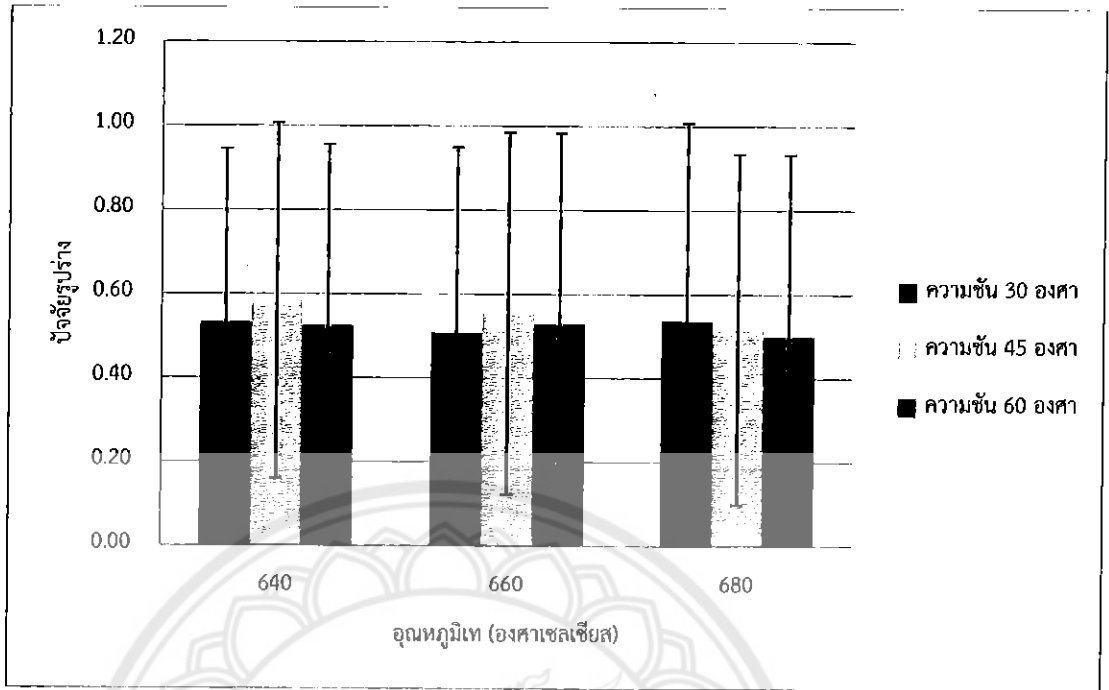


รูปที่ 4.13 ค่าความแข็ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มการเปลี่ยนแปลง

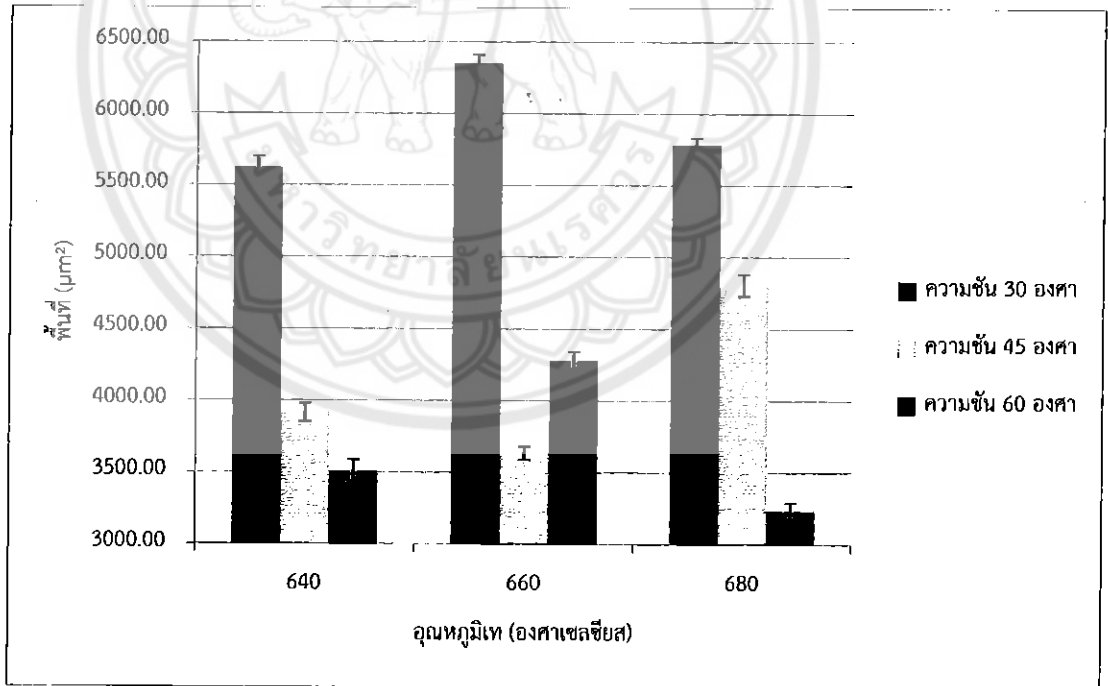
4.2.3 โครงสร้างจุลภาค, ปัจจัยรูปร่าง, ขนาด และความแข็ง ของการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่อความชื้นของรางเทหล่อเย็นต่างกัน

4.2.3.1 โครงสร้างจุลภาค, ปัจจัยรูปร่าง และขนาด

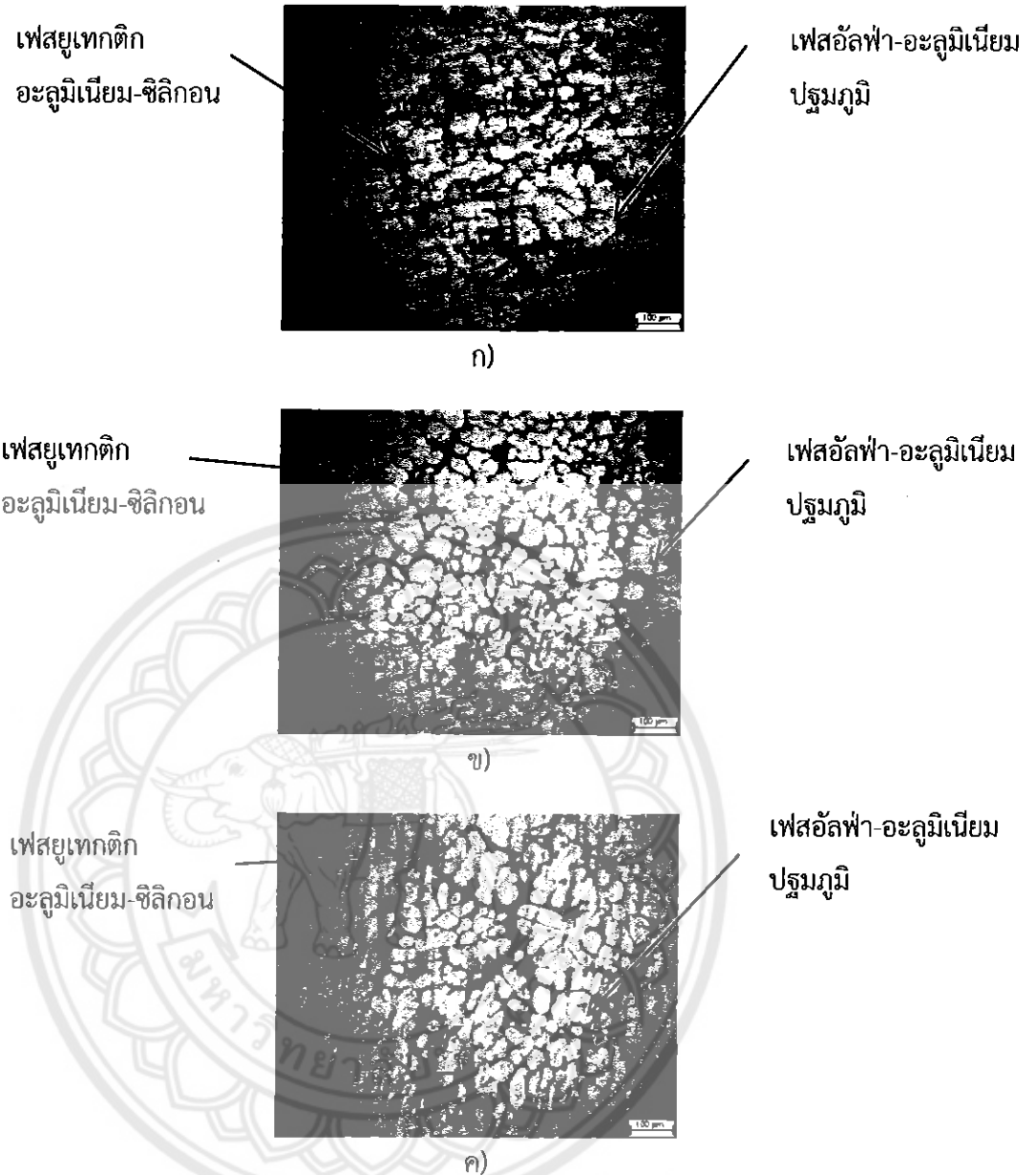
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมหล่อประเภทไฮโปยูเทกติก เกรด เอ 356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิคการเทผ่านรางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเทเท่ากัน ที่ความชื้นของรางเท 30, 45 และ 60 องศา ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ (Primary α -Al) และเฟสยูเทกติกอะลูมิเนียม-ซิลิกอน (Eutectic Al-Si) โดยโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชื้น 45 องศา มีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีความกลมมากกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชื้น 30 และ 60 องศา แต่โดยรวมแล้วทุกความชื้นของรางเทให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีความกลมใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.14 แต่ที่ความชื้น 30 องศา โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชื้น 45 และ 60 องศา แสดงดังรูปที่ 4.15 เนื่องจากความชื้นส่งผลต่อความเร็วการไหลของโลหะหลอมเหลว ถ้ารางเทมีความชื้นน้อยการระบายความร้อนของโลหะหลอมเหลวบนรางเทจะมีมาก โลหะหลอมเหลวมีความหนืดสูง อัตราเร็วการไหลของโลหะหลอมเหลวจึงต่ำ อุณหภูมิในขณะที่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ก็จะต่ำลงด้วย อีกทั้งโลหะหลอมเหลวใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวน้อย ในขณะที่อัตราส่วนของแข็งในของเหลวมีมาก ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีความกลม แต่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นโครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นแกนคล้ายกุหลาบ และอาจไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้เป็นเดนไดรต์ แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.14 ค่าปัจจัยรูปร่าง เมื่อความชื้นของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.15 ขนาดพื้นที่ที่เกรน เมื่อความชื้นของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบที่ความชันของรางแตกต่างกัน

ก) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา

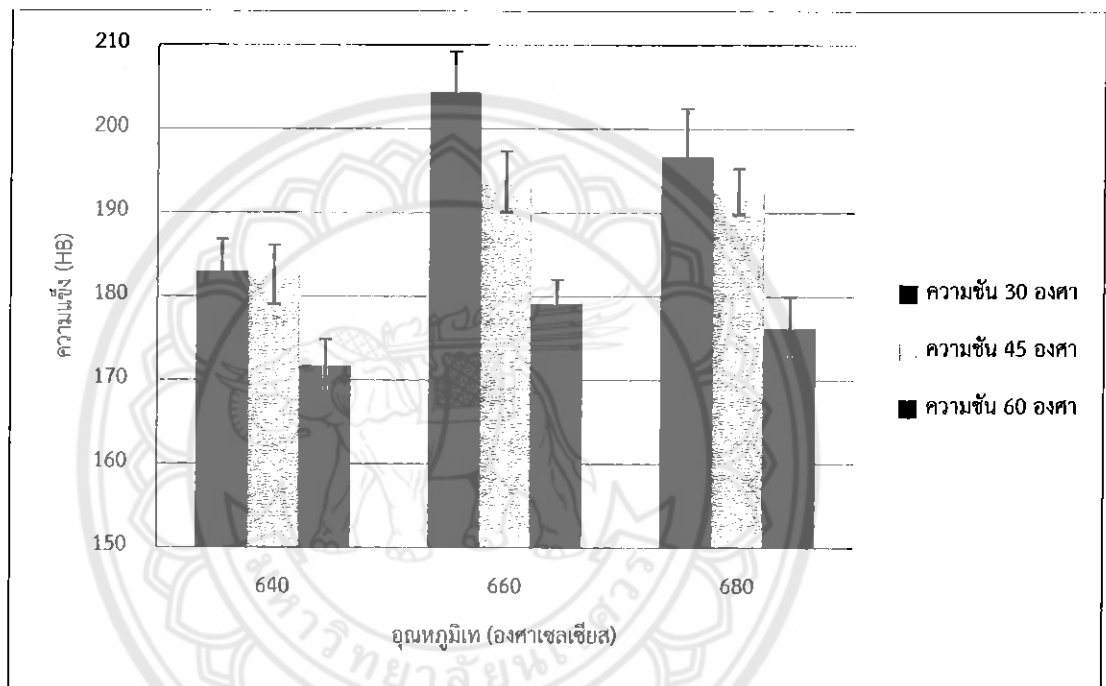
ข) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 องศา

ค) ชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 60 องศา

4.2.3.2 ความแข็ง

จากการศึกษาความแข็ง (Hardness Test) ของชิ้นงาน ด้วยการทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness) ด้วยหัวบอลขนาด 2.5 มิลลิเมตร น้ำหนักกด 300 กิโลกรัมแรง ใช้เวลาในการกด 15 วินาที พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา มีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา เนื่องจากความชัน

ของรางเทส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ที่ความชัน 30 องศา โลหะหลอมเหลวจะมีระยะเวลาอยู่บน รางเทนานกว่าที่ความชัน 45 และ 60 องศา ทำให้สามารถระบายความร้อนได้ดีกว่า อุณหภูมิของ โลหะหลอมเหลวที่ปลายรางเทมีค่าต่ำ ความหนืดของโลหะหลอมเหลวเพิ่มมากขึ้น อัตราเร็วการไหล ช้าลง ส่งผลให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากการป่นป่วนของโลหะหลอมเหลวมีน้อย เนื่องจากโลหะ- หลอมเหลวมีความราบเรียบการไหลที่ดีกว่ารางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา เมื่อชิ้นงานเกิดการ แข็งตัว รุพพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจึงมีน้อย แม้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมจะมีขนาดใหญ่ แต่ความ แข็งที่ได้มีค่าสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน เมื่อความชันของรางเทมีการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุป ข้อเสนอแนะ การพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางในการแก้ปัญหา ของโครงการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 บทสรุป

5.1.1 ผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยมีอุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส จะมีความเรียบผิวสูงกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 640 และ 660 องศาเซลเซียส แต่ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส จะมีรูพรุนน้อยกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิ 640 และ 680 องศาเซลเซียส

5.1.2 ผิว และรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบที่ความชันของรางเทหล่อเย็นต่างกัน โดยรางเทมีความชัน 30, 45 และ 60 องศา ตามลำดับ พบว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา มีความเรียบผิวสูงกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา อีกทั้งรูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา ยังมีน้อยกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา

5.1.3 โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง และขนาดของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยมีอุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีความกลมมากกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิ 660 และ 680 องศาเซลเซียส แต่โดยรวมแล้วทุกอุณหภูมิเทจะมีเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีความกลมใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส พบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิมิขนาดเล็เมื่อเทียบที่ความชันเท่า ๆ กัน

5.1.4 โครงสร้างจุลภาค ปัจจัยรูปร่าง และขนาดของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบที่ความชันของรางเทหล่อเย็นต่างกัน โดยรางเทมีความชัน 30, 45 และ 60 องศา ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา มีเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา แต่โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 องศา มีค่าเฉลี่ยของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ที่มีความกลมมากกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 และ 60 องศา แต่โดยรวมแล้วทุกความชันของรางเทให้เฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิที่มีความกลมใกล้เคียงกัน

5.1.5 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยมีอุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิเท 640 และ 680 องศาเซลเซียส

5.1.6 ความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง ด้วยเทคนิครางเทหล่อเย็น เมื่อเปรียบเทียบที่ความชันของรางเทหล่อเย็นต่างกัน โดยรางเทมีความชัน 30, 45 และ 60 องศา ตามลำดับ พบว่าความแข็งของชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 30 องศา มีค่าความแข็งมากกว่าชิ้นงานที่เทผ่านรางเทที่มีความชัน 45 และ 60 องศา

5.2 ข้อเสนอแนะ การพัฒนา

5.2.1 ควรควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง เช่น อุณหภูมิเท ความชันของรางเท อุณหภูมิของแม่พิมพ์ และความเร็วที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แม่พิมพ์รวมทั้งการคำนึงถึงอุณหภูมิเท และความชันของรางเทที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ชัดเจน

5.2.2 ควรมีการทดลองซ้ำ เพื่อตรวจสอบข้อมูล

5.2.3 ควรทำการศึกษา และเปรียบเทียบแผนภูมิสมดุของโลหะที่สนใจทำการศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการหาข้อมูล และเพื่อตัดสินใจในการเลือกใช้วัสดุ

5.2.4 กระบวนการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็งมีหลายเทคนิคด้วยกัน อาจใช้เทคนิคอื่น ๆ มาทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา

5.3.1 อุณหภูมิเท และความชันของรางเทที่ใช้ในกระบวนการหล่อ ไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่ชัดเจน ซึ่งอาจต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างอุณหภูมิเท และความชันของรางเทให้มากขึ้น

5.3.2 การขัดหยาบ และการขัดละเอียด ใช้แรงกดในการขัดมากเกินไป ส่งผลให้ความลึกที่เกิดขึ้นบนผิวของอะลูมิเนียมมีมาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการขัดละเอียดนานขึ้น ผู้ขัดควรใช้แรงกดน้อยลง

5.3.3 การวิเคราะห์ปัจจัยรูปร่าง และขนาดเกรน เกิดความไม่แน่นอน ในระหว่างการเติมสี ขาว-ดำให้โครงสร้างจุลภาค ซึ่งอาจทำให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่ไม่แท้จริง ในขั้นตอนนี้ควรมีความระมัดระวัง และมีความละเอียดอ่อนสูง จึงต้องใช้เวลาานพอสมควร

5.3.4 การวัดความแข็ง เนื่องจากเครื่องวัดความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงหัวกดและน้ำหนักที่ใช้ทำการกดโดยไม่แจ้งนักวิทยาศาสตร์ ดังนั้นก่อนทำการวัดทุกครั้ง ควรตรวจสอบหัวกด และน้ำหนักกดจากเครื่องทดสอบให้แน่นอน เพราะอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการทดสอบได้

เอกสารอ้างอิง

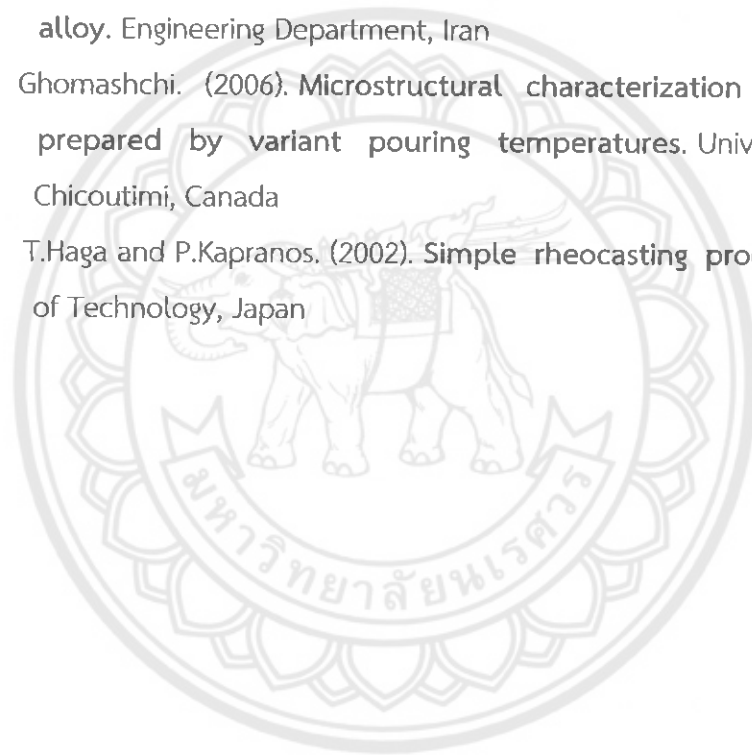
- [1] ปัทมา อภิชัย. (2554). ผลของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของวัสดุ. วิทยานิพนธ์ วท.ม., สาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- [2] JIS HAND BOOK. (1998). Non-Ferrous Metals & Metallurgy. Japanese Standards associate.
- [3] พิสิทธิ์ เมืองน้อย และ กฤตธี เอียดเหตุ. (2554). การพัฒนาโลหะแม่ Al-Mn ร้อยละ 10-Sr ร้อยละ 1 สำหรับการปรับสภาพเฟสเบต้าและยูเทกติกซิลิคอนในงานหล่อโลหะผสม Al-Si ร้อยละ 7-Fe ร้อยละ 1. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [4] มนัส สติรจินดา.(2541). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [5] Lucio F. Mondolfo. (1976). Aluminum alloys: structure and properties. University of Michigan
- [6] ศุภสรโรช หมั่นสิทธิ์. โลหะวิทยาฟิสิกส์. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
- [7] อะลูมิเนียม-แมกนีเซียมหล่อผสม. สืบค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม 2556, จาก : http://www.aluminumlearning.com/html/c_5xx_x.html#phase
- [8] Martinez D., et al. (2005). Effect of strontium and cooling rate upon eutectic temperatures of A319 aluminum alloy. Scripta Materialia. p. 439-443.
- [9] X.M. Pan, C. Lin, J.E. Morral, and H.D. Brody, An Assessment of Thermodynamic Data for the Liquid Phase in the Al-Rich Corner of the Al-Cu-Si System and Its Application to the Solidification of a 319 Alloy, J. Phase Equilib. Diffus., 2005, 26(3), p 255-233.
- [10] Jinguo Qiao. (2005). Relationship between microstructures and contents of Ca/P in near-eutectic Al-Si piston alloy, Materials Letters, Shondong University, China
- [11] ประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียม. สืบค้นเมื่อ 16 มิถุนายน 2556, จาก : http://eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/Pages_65-96_Book_431204_18_09_55-3.pdf
- [12] Jonh.T.H. Pearce และบัญชา ธนบุญสมบัติ. (2542). เทคโนโลยีและโลหะวิทยาของเหล็กหล่อโครเมียมสูง. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] รอมฎอน บุระพา, รังสิณี แคนยุกต์ และเจษฎา วรรณสินธ์. (2552). การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7: การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอะลูมิเนียมเกรด A356.
- [14] บัณฑิต ใจชื่น. (2007). โลหวิทยากายภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ประกอบเมโทร
- [15] การแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว. สืบค้นเมื่อ 4 กรกฎาคม 2556, จาก : http://www.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/2/material/ie2302_ch4.pdf
- [16] พรวิสา วงศ์ปัญญา. (2551). การแข็งตัวของโลหะ. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [17] A.Hellawell, J.R Jarazinn, and R.S Steube: Phill Trans. R. Soc. London. 1993, vol. A345
- [18] Stefanescu DM. Science and Engineering of Casting Solidification. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2002.
- [19] อาภาส อุตตลาภาณุจนา. (2553). การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมในกระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็ง. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- [20] Figueredo, A.D. (2001). Science and Technology of Semi-Solid Metal Processing. Worcester Polytechnic Institute, United State.
- [21] สุวรรณ ฤพา. (2553). การผลิตอะลูมิเนียมผสมในสภาวะกึ่งของแข็งโดยการหล่อแบบรีโอ ร่วมกับการหล่อแบบกดอัด. วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- [22] กนกกาญจน์ ศรีม่วง. (2553). การพัฒนากระบวนการผลิตรีโอไดแคสติงแบบรางเทหล่อเย็น สำหรับอะลูมิเนียมผสม. วศ.ม., มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- [23] Birol, Y. (2007). A357 Thixoforming Feedstock Produced by Cooling Slope Casting. Journal of Materials Processing Technology, PP. 94-101.
- [24] 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.
- [25] Microscope. Slideshare. สืบค้นเมื่อ 4 กรกฎาคม 2556, จาก : www.slideshare.net/hexhell/microscope-5639551
- [26] ไพโรจน์ ฐานวิเศษ. 2540. โลหะวิทยา. นครราชสีมา. : สำนักพิมพ์นายนิรุทธ์.
- [27] การทดสอบความแข็ง. สืบค้นเมื่อ 4 กรกฎาคม 2556, 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)

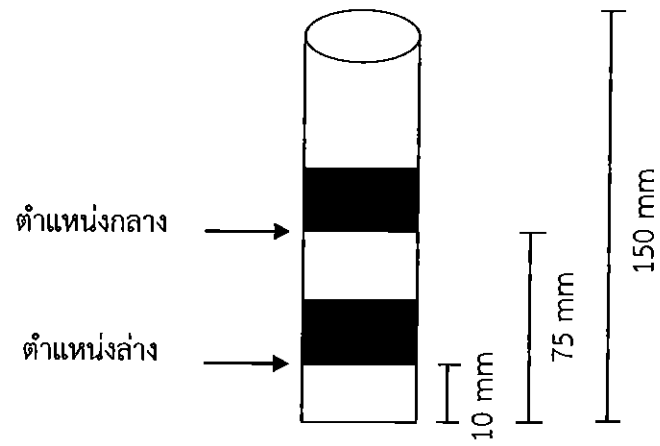
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [28] N.K. Kund and P. Dutta. (2010). Numerical simulation of solidification of liquid aluminum alloy flowing on cooling slope. Indian Institute of Science, India
- [29] T. HAGA and R. NAKAMURA. (2010). Effects of casting factors of cooling slope on semisolid condition. Osaka Institute of Technology, Japan
- [30] 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
- [31] Ghomashchi. (2006). Microstructural characterization of rheo-cast billets prepared by variant pouring temperatures. University of Quebec at Chicoutimi, Canada
- [32] T.Haga and P.Kapranos. (2002). Simple rheocasting processes. Osaka Institute of Technology, Japan



ภาคผนวก ก
ชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 ที่ผ่านกระบวนการหล่อ
โลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น

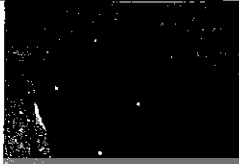



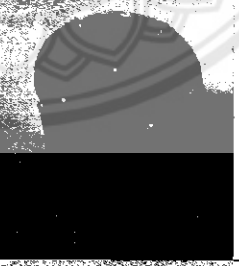
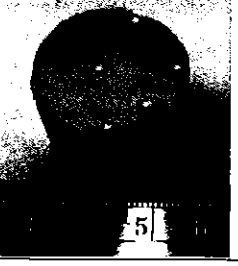
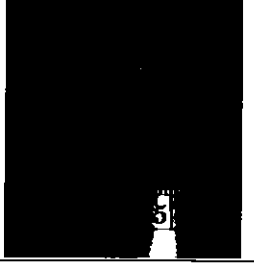




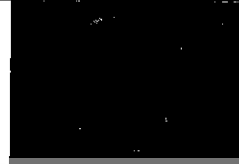




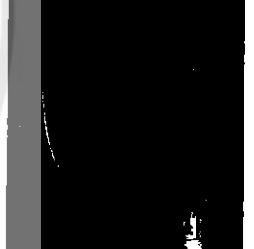
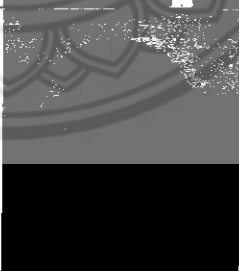
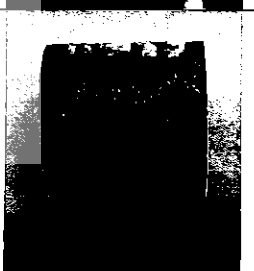

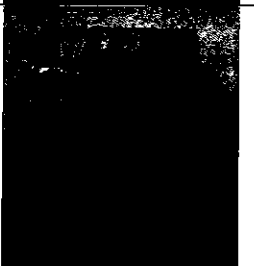
รูปที่ ก.1 ตำแหน่งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น



ตารางที่ ก.1 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
640/30	1	กลาง		
		ล่าง		
	2	กลาง		
		ล่าง		
640/45	1	กลาง		

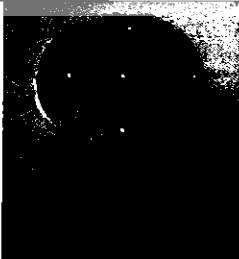

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
640/45	1	ล่าง		
	2	กลาง		
		ล่าง		
640/60	1	กลาง		
		ล่าง		

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
640/60	2	กลาง		
		ล่าง		

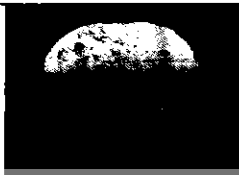
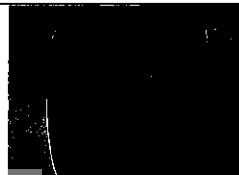







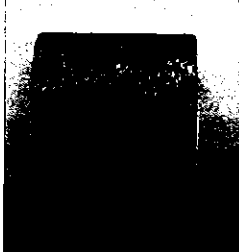
ตารางที่ ก.2 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
660/30	1	กลาง		

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ
660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
660/30	1	ล่าง		
	2	กลาง		
		ล่าง		
660/45	1	กลาง		
		ล่าง		

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิควางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
660/45	2	กลาง		
		ล่าง		
660/60	1	กลาง		
		ล่าง		
660/60	2	กลาง		

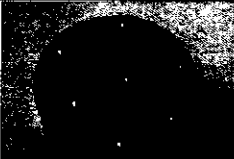


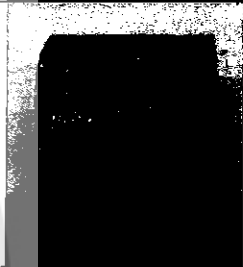

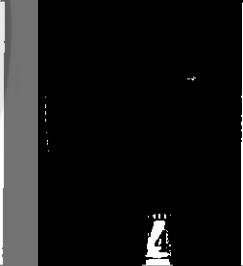




ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
660/60	2	ล่าง		

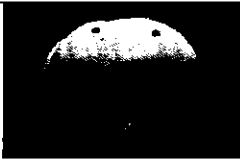




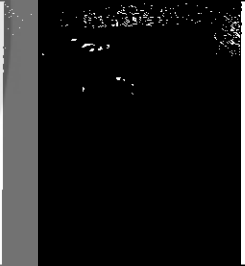


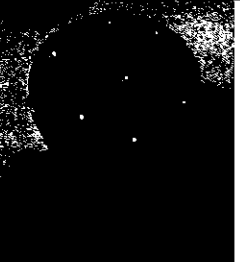



ตารางที่ ก.3 ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
680/30	1	กลาง		
		ล่าง		

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคแรงเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
680/30	2	กลาง		
		ล่าง		
680/45	1	กลาง		
		ล่าง		
	2	กลาง		

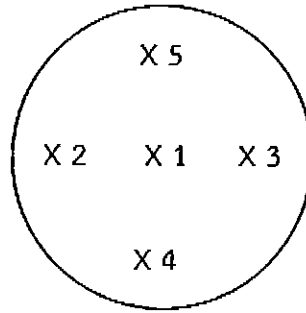
ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30, 45 และ 60 ตามลำดับ

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	หน้าตัดของชิ้นงาน	ผิวชิ้นงาน
680/45	2	ล่าง		
		กลาง		
680/60	1	ล่าง		
		กลาง		
	2	กลาง		
		ล่าง		

ภาคผนวก ข

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 หลัง
ผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น

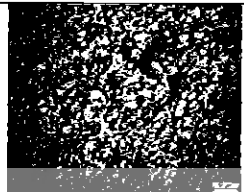
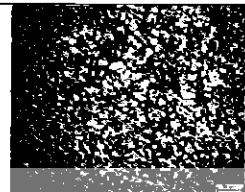
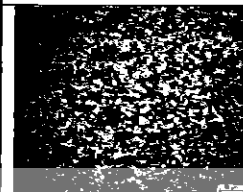
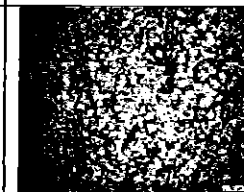
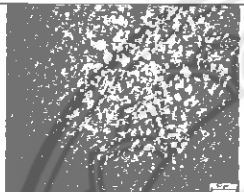
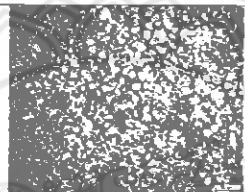
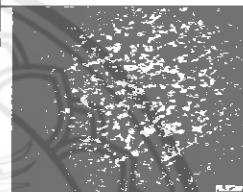
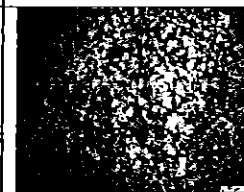
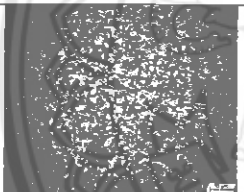
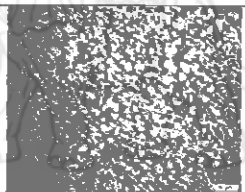
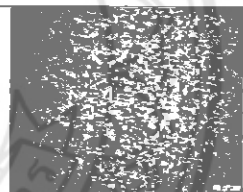
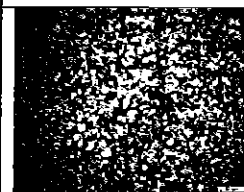
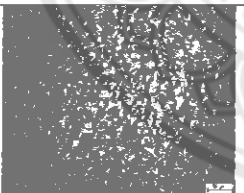
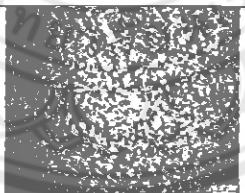
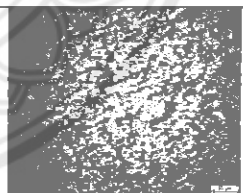
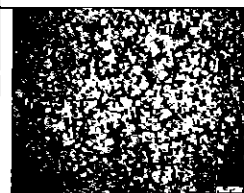
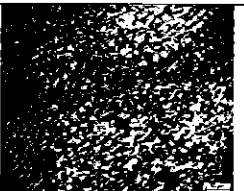
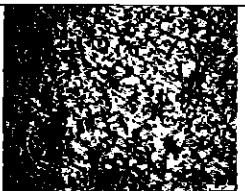
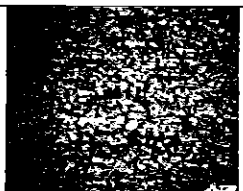
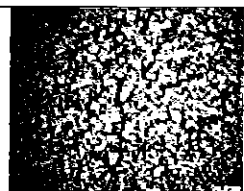




รูปที่ ข.2 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง
โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น



ตารางที่ ข.1 โครงสร้างจุลภาคหลังการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่
อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

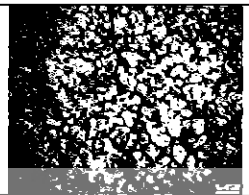
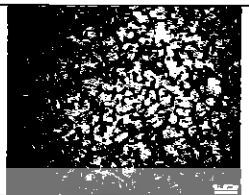
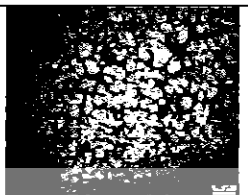
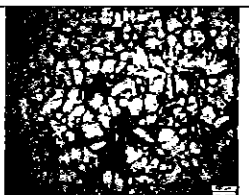
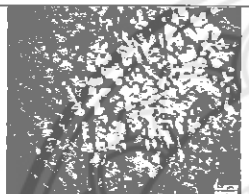
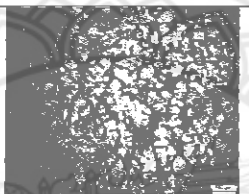
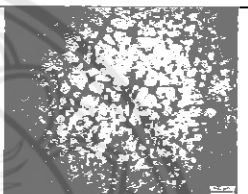
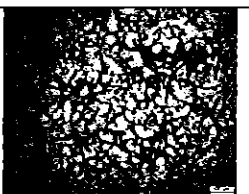
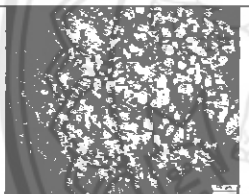
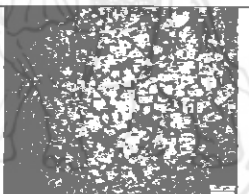
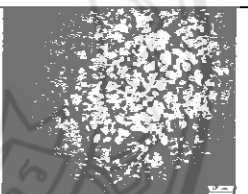
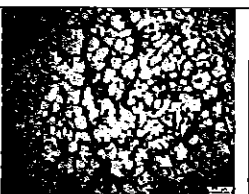
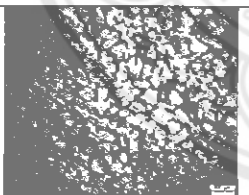
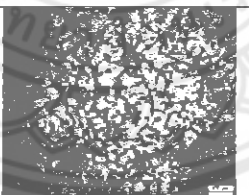
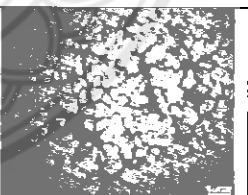
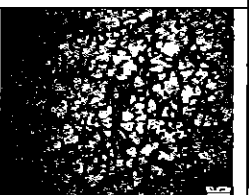
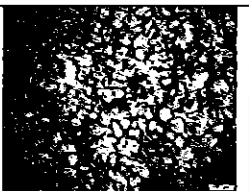
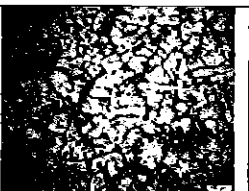
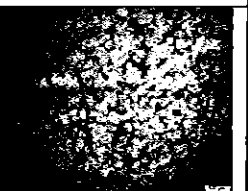
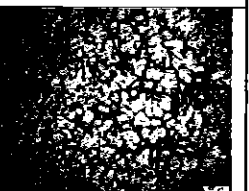
ตารางที่ ข.2 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิควางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

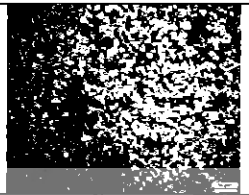
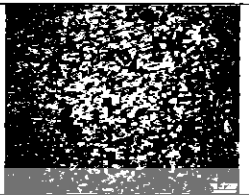
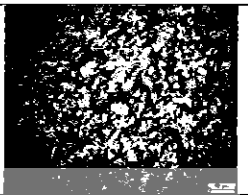
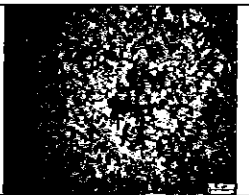
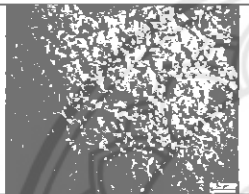
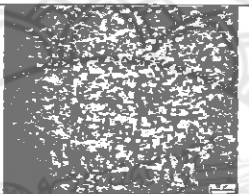
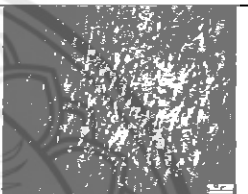
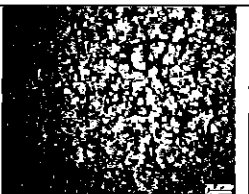
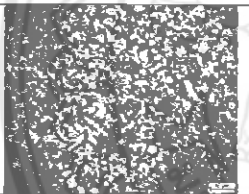
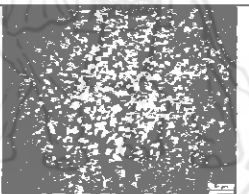
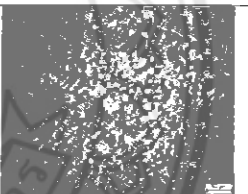
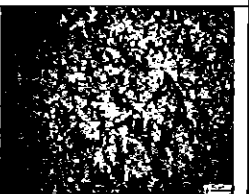
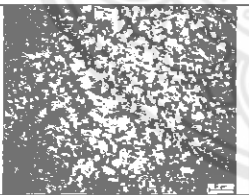
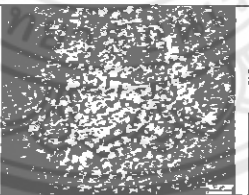
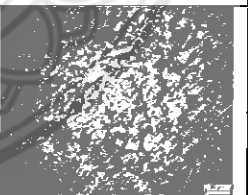
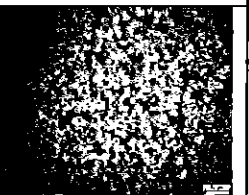
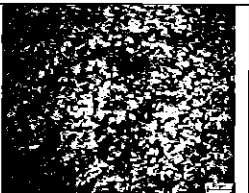
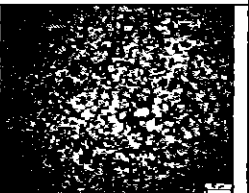
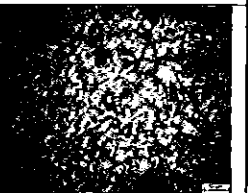
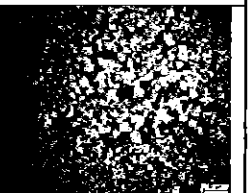
ตารางที่ ข.3 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 45 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

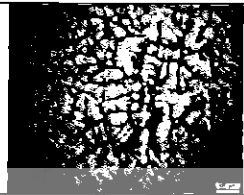
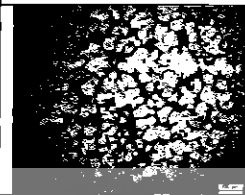
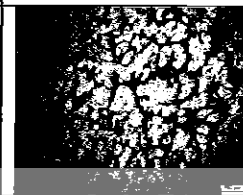
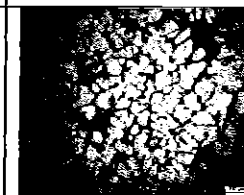
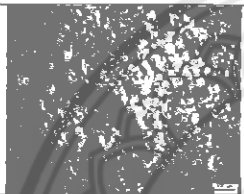
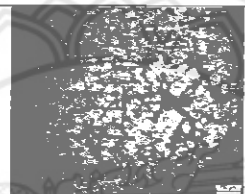
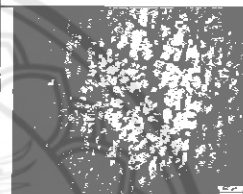
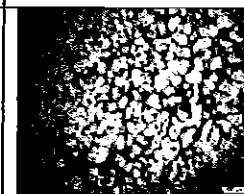
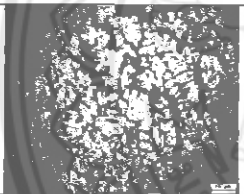
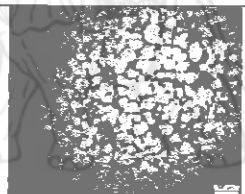
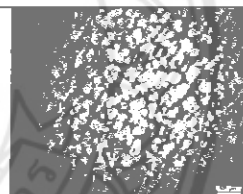
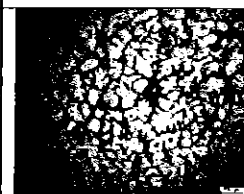
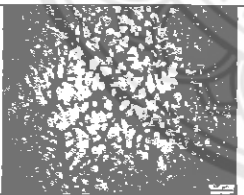
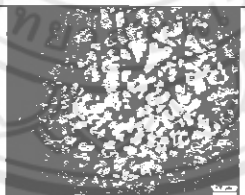
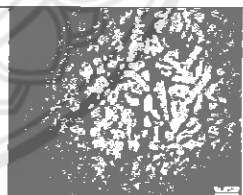
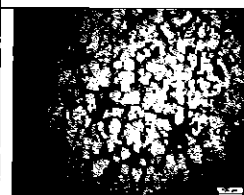
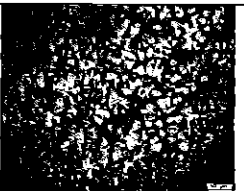
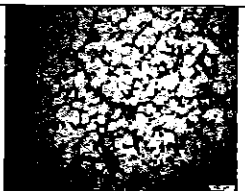
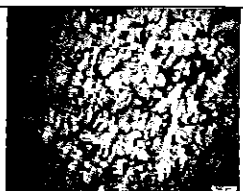
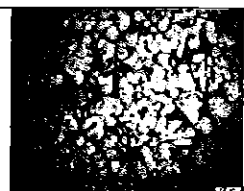
ตารางที่ ข.4 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 45 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

ตารางที่ ข.5 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 60 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

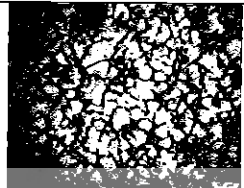
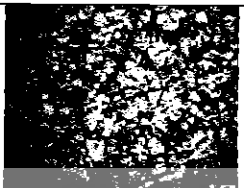
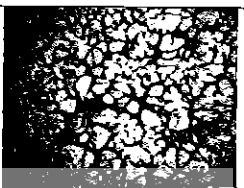
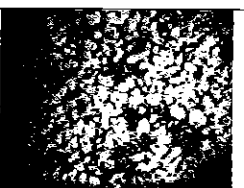
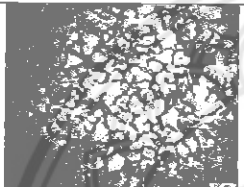
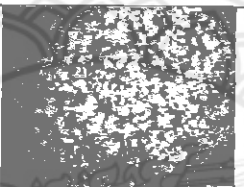
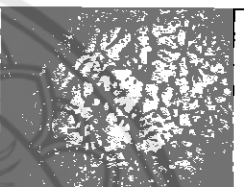
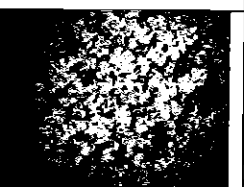
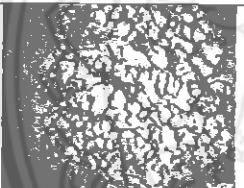
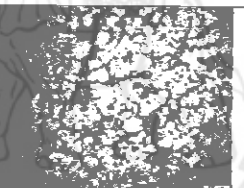
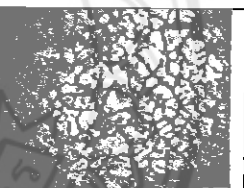
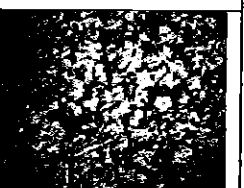
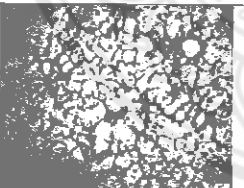
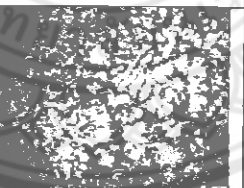
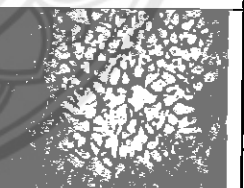
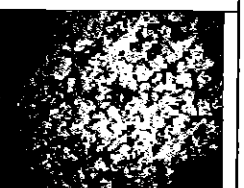
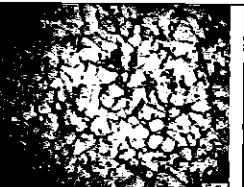
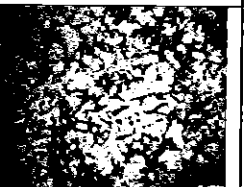
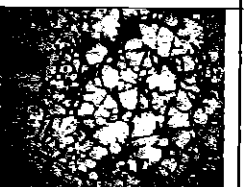
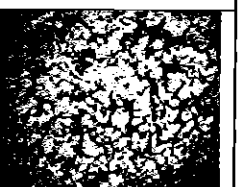
ตารางที่ ข.6 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 60 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

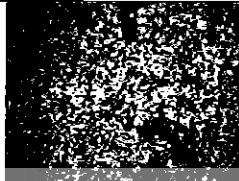
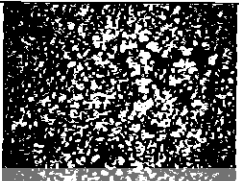
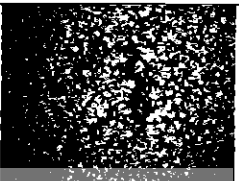
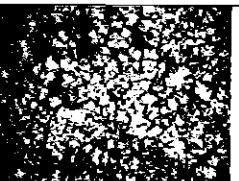
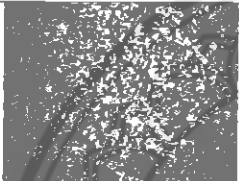
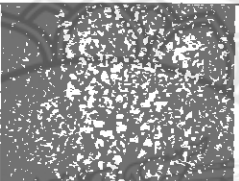
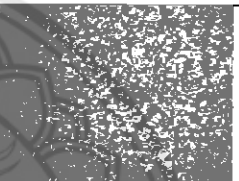
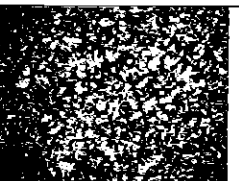
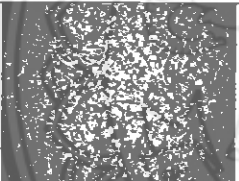
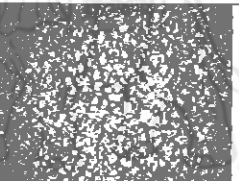
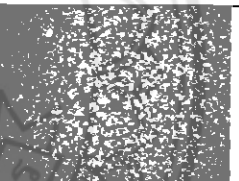
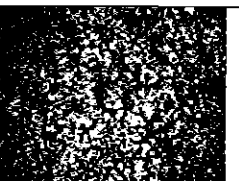
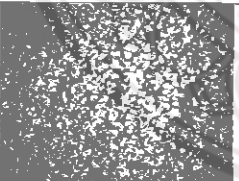
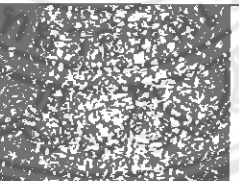
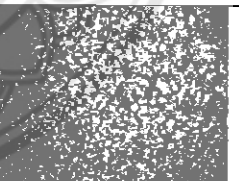
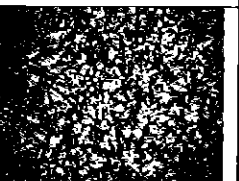
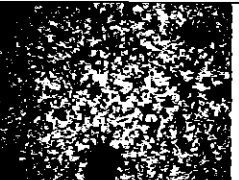
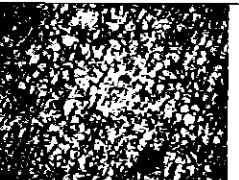
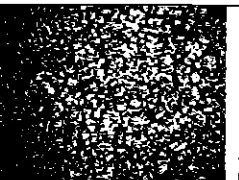
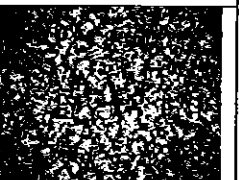
ตารางที่ ข.7 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

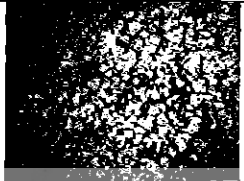
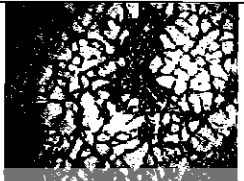
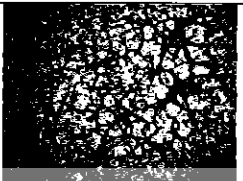
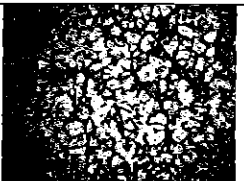
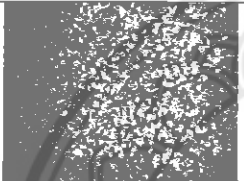
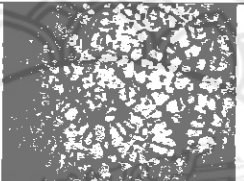
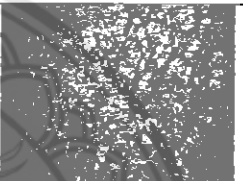
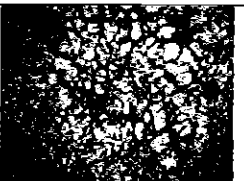
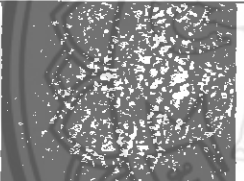
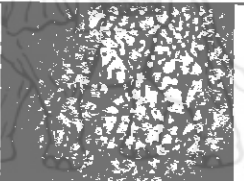
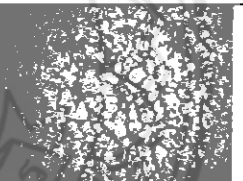
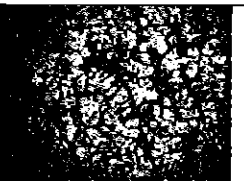
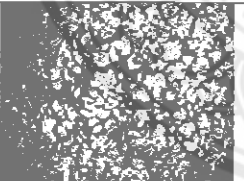
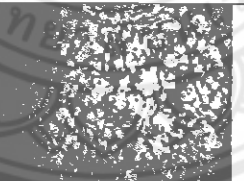
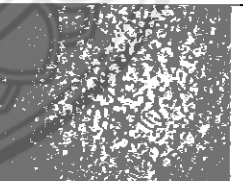

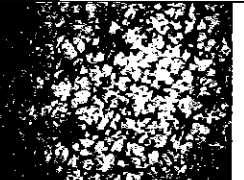
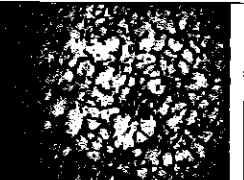
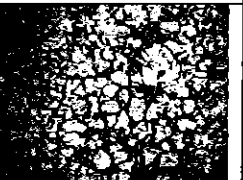
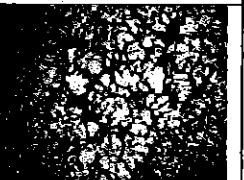
ตารางที่ ข.8 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

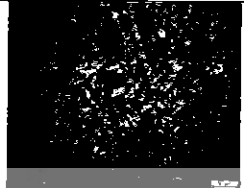
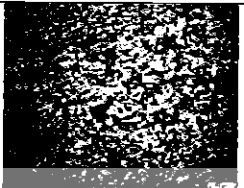
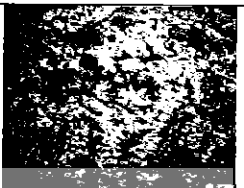
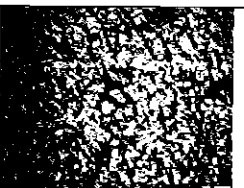
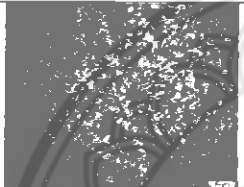
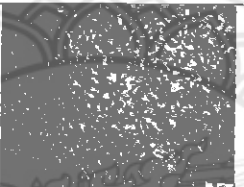
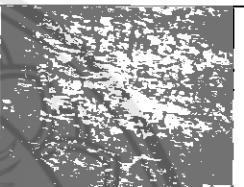
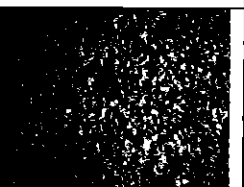
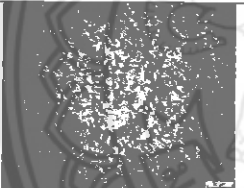
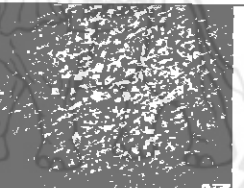
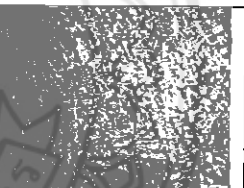
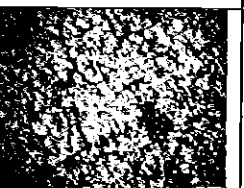
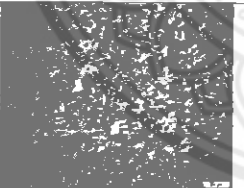

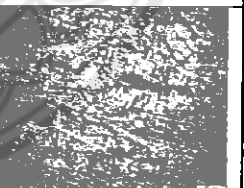
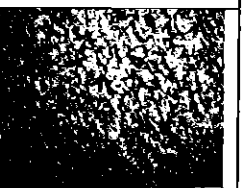
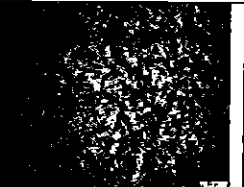
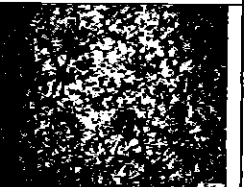
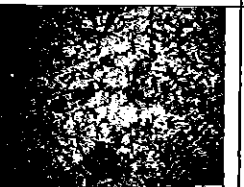
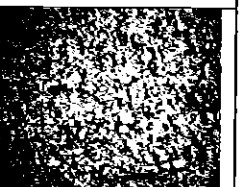
ตารางที่ ข.9 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่
อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 45 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

ตารางที่ ข.10 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 45 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

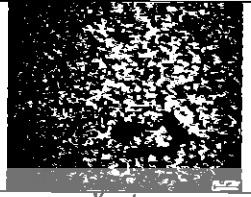
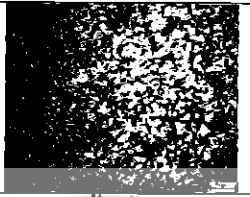
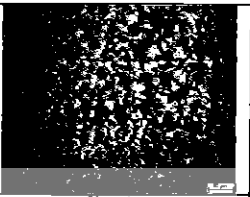
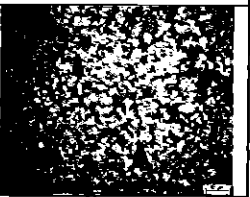
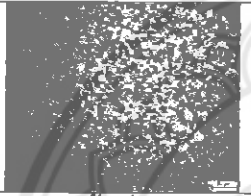
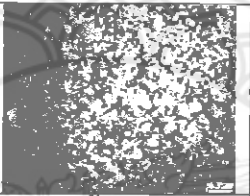
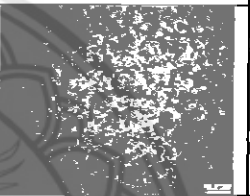
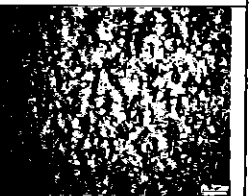
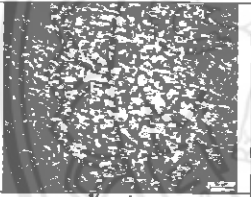
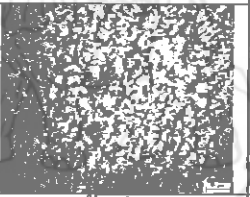
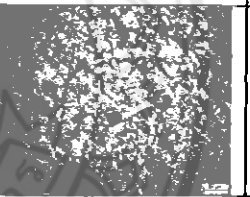
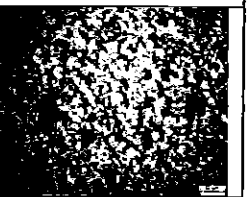
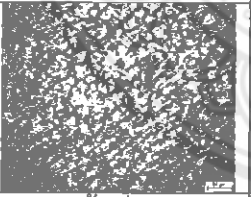
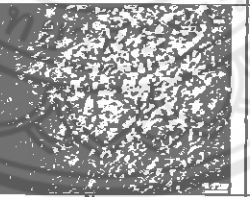
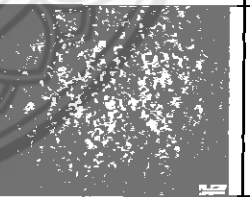

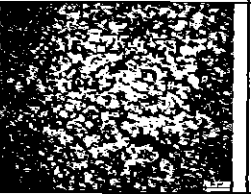
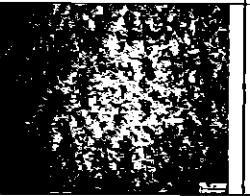
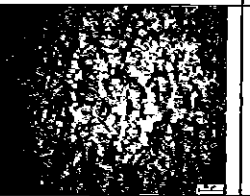
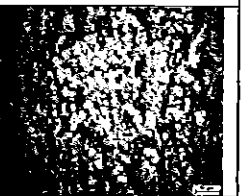
ตารางที่ ข.11 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 60 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
4	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
5	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				

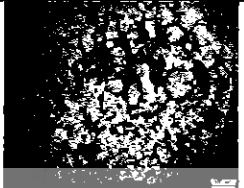
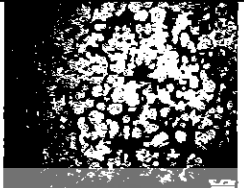

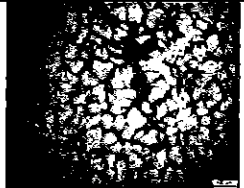
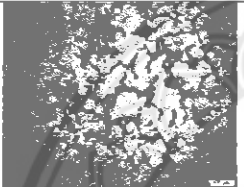
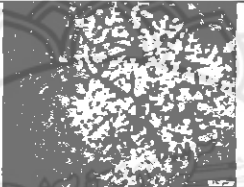
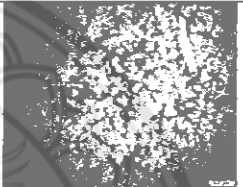
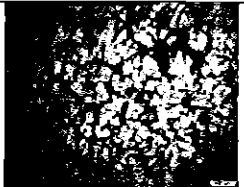
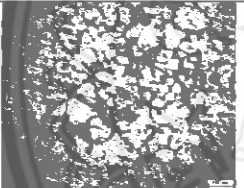
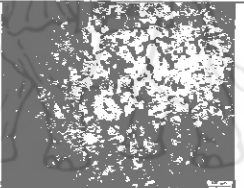
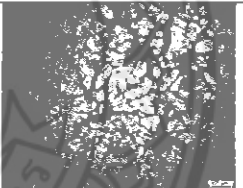
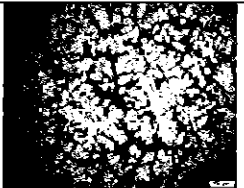
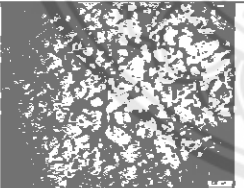
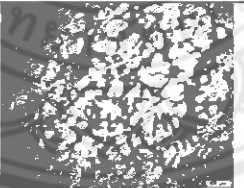
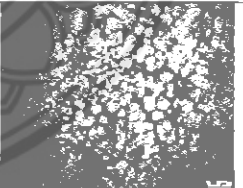
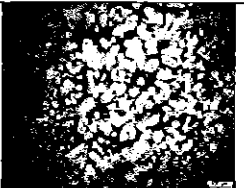
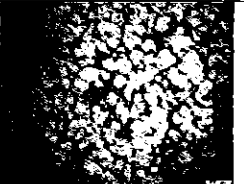
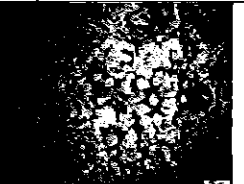
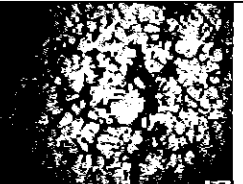
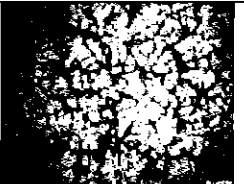
ตารางที่ ข.12 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 60 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

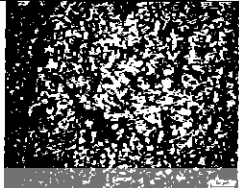
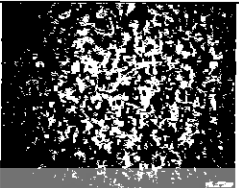
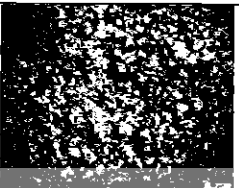
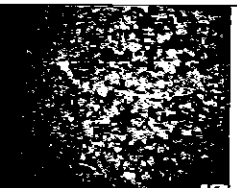
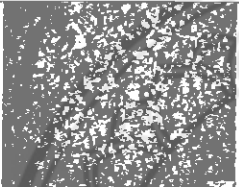
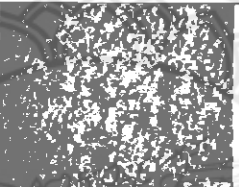
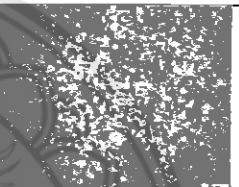
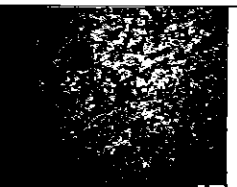
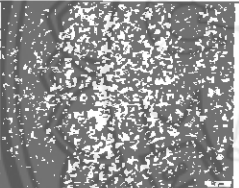
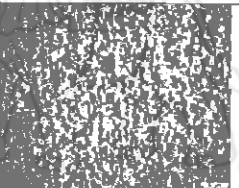
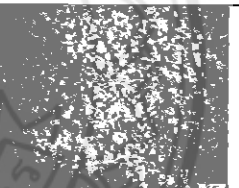
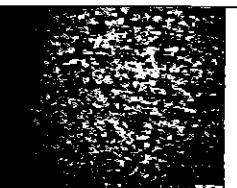
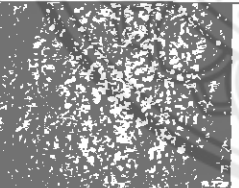
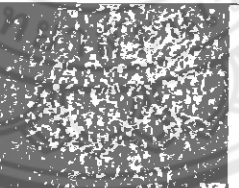
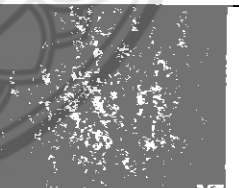
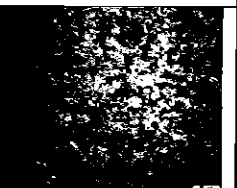
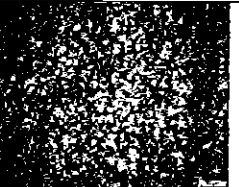
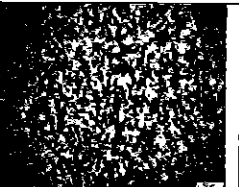
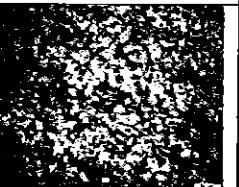
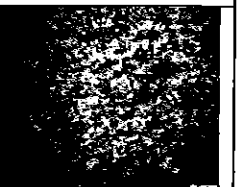
ตารางที่ ข.13 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
4	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
5	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				

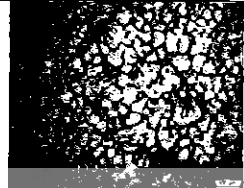
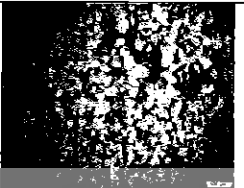
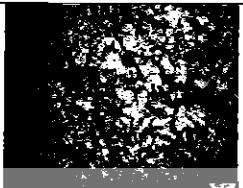
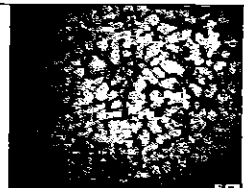
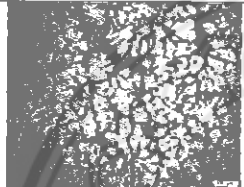
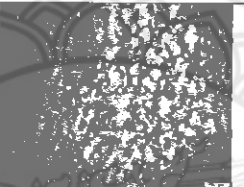
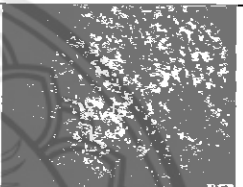
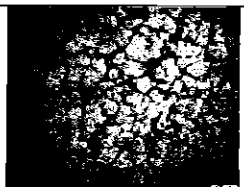
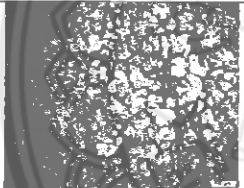
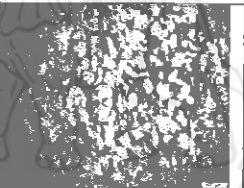
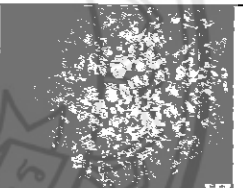
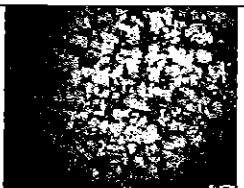
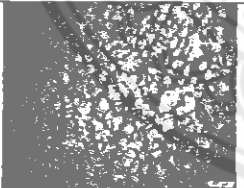
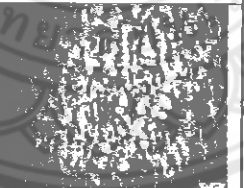
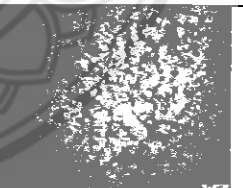
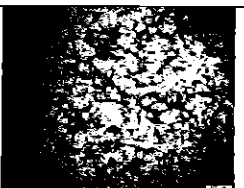
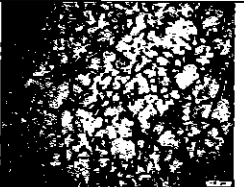
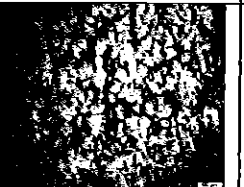
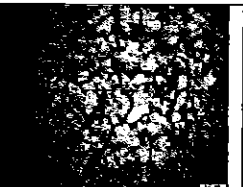
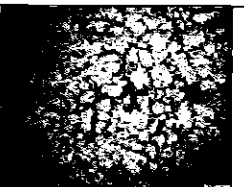
ตารางที่ ข.14 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 30 องศาที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

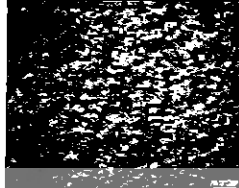
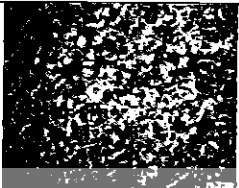
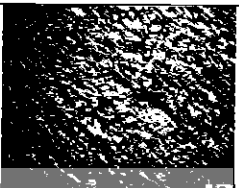
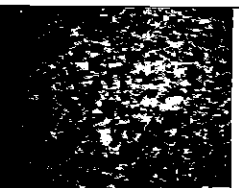
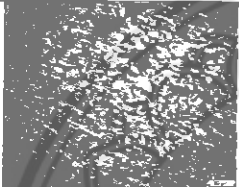
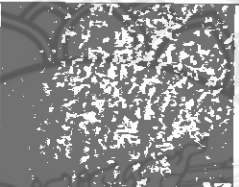
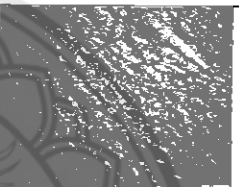

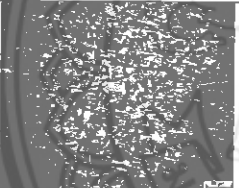
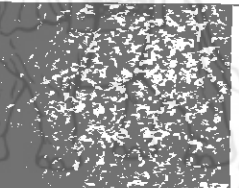
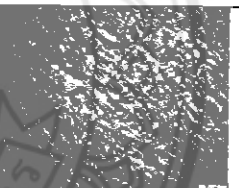
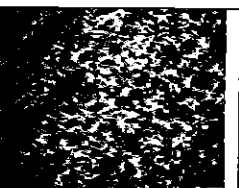
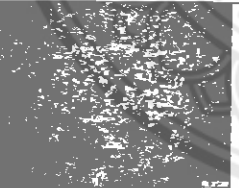
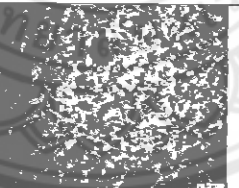
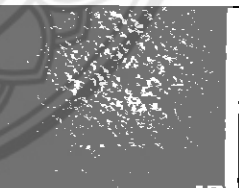
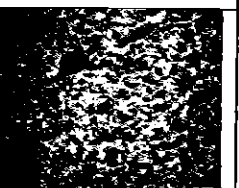
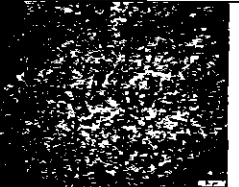
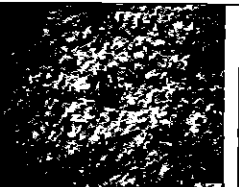
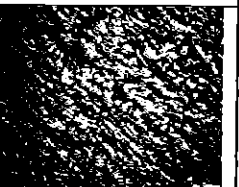

ตารางที่ ข.15 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิคการหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 45 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
4	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
5	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				

ตารางที่ ข.16 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 45 องศาที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

ตารางที่ ข.17 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 60 องศา ที่กำลังขยาย 50 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 50 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
4	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				
5	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
				

ตารางที่ ข.18 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่ อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส ที่ความชัน 60 องศา ที่กำลังขยาย 100 เท่า

จุด ที่	กำลังขยาย 100 เท่า			
	ตำแหน่งกลาง		ตำแหน่งล่าง	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
1				
2				
3				
4				
5				

ภาคผนวก ค

ขนาด และปัจจัยรูปร่างของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356
หลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น



ตารางที่ ค.1 ขนาด และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด เอ 356 หลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 640 องศาเซลเซียส ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 30, 45 และ 60 องศา

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ (μm^2)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ยรูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง
640/30	1	กลาง	6651.51	27426.22	0.53	0.19
		ล่าง	5378.53	23777.05	0.57	0.16
	2	กลาง	10319.60	22865.76	0.50	0.19
		ล่าง	3769.77	8035.56	0.52	0.15
640/45	1	กลาง	7226.89	26511.86	0.52	0.20
		ล่าง	5462.47	15751.23	0.59	0.20
	2	กลาง	3148.29	3705.04	0.60	0.16
		ล่าง	2425.85	3059.89	0.60	0.17
640/60	1	กลาง	3597.85	6675.19	0.59	0.19
		ล่าง	2310.59	4028.70	0.53	0.16
	2	กลาง	6793.95	13676.05	0.49	0.20
		ล่าง	3334.31	4590.70	0.47	0.18

ตารางที่ ค.2 ขนาด และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด เอ 356 หลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 30, 45 และ 60 องศา

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ (μm^2)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ยรูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง
660/30	1	กลาง	7456.02	10267.82	0.43	0.17
		ล่าง	3320.17	4361.20	0.59	0.16
	2	กลาง	11063.62	29260.95	0.45	0.22
		ล่าง	9241.26	16633.59	0.42	0.19

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ขนาด และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงาน อะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 356 หลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิค รางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 660 องศาเซลเซียส ที่ความชันของรางเทหล่อ เย็น 30, 45 และ 60 องศา

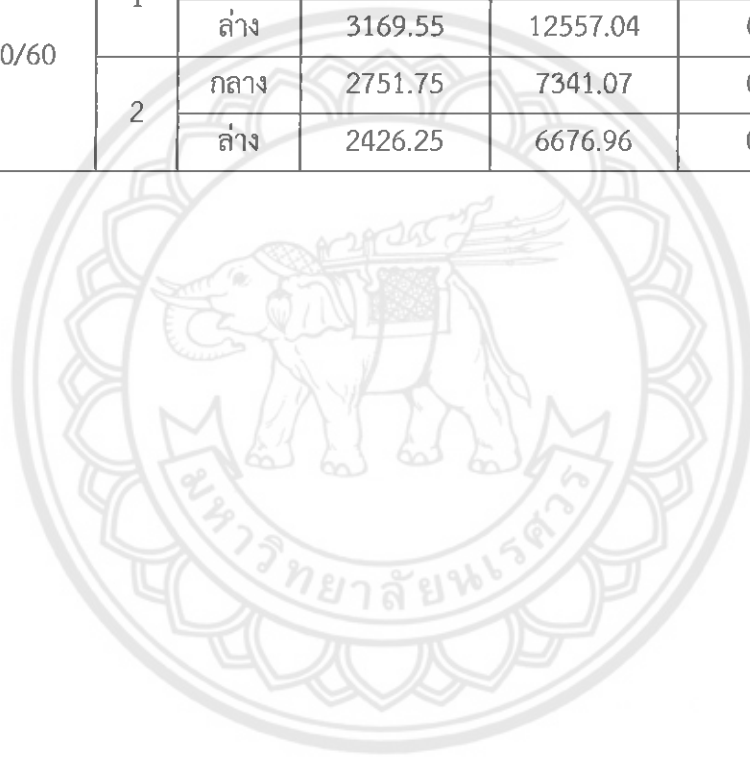
อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ (μm^2)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ยรูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง
660/45	1	กลาง	5095.04	11787.69	0.53	0.21
		ล่าง	2750.15	4731.75	0.56	0.19
	2	กลาง	5358.34	9188.05	0.50	0.18
		ล่าง	2767.14	3540.84	0.59	0.16
660/60	1	กลาง	2853.12	5529.29	0.54	0.18
		ล่าง	2938.83	9730.00	0.53	0.21
	2	กลาง	26015.33	77662.98	0.45	0.23
		ล่าง	4122.49	12700.31	0.54	0.22


ตารางที่ ค.3 ขนาด และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 356 หลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิ เท 680 องศาเซลเซียส ที่ความชันของรางเทหล่อเย็น 30, 45 และ 60 องศา

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ (μm^2)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ยรูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง
680/30	1	กลาง	16407.84	48957.17	0.47	0.22
		ล่าง	5564.05	16193.59	0.47	0.21
	2	กลาง	6114.41	21002.03	0.52	0.23
		ล่าง	3626.95	10041.03	0.59	0.21
680/45	1	กลาง	2678.86	3521.36	0.58	0.15
		ล่าง	7835.84	19198.34	0.48	0.20
	2	กลาง	10604.50	22508.37	0.48	0.19
		ล่าง	4081.30	12097.72	0.47	0.17

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ขนาด และปัจจัยรูปร่างของเฟสอัลฟา-อะลูมิเนียมปฐมภูมิ ของชิ้นงาน อะลูมิเนียมผสม เกรด เอ 356 หลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิค รางเทหล่อเย็น ที่อุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียส ที่ความชันของรางเทหล่อ เย็น 30, 45 และ 60 องศา

อุณหภูมิเท/ ความชัน ของรางเท หล่อเย็น	ชั้นที่	ตำแหน่ง	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ (μm^2)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน พื้นที่	ค่าเฉลี่ยรูปร่าง	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน รูปร่าง
680/60	1	กลาง	8273.23	24035.71	0.40	0.18
		ล่าง	3169.55	12557.04	0.48	0.18
	2	กลาง	2751.75	7341.07	0.52	0.18
		ล่าง	2426.25	6676.96	0.53	0.18





ภาคผนวก ง
ความแข็งของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อ เกรด เอ 356 หลังผ่านการ
หล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทผ่านรางเทหล่อเย็น ที่ได้จากการทดสอบ
ความแข็งแบบบริเนล

ตารางที่ ง.1 ความแข็งแรงของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็นที่
ความชัน 30 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ รางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็งแรง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็งแรง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็งแรง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
640/30	1	กลาง	1	201.35	194.51	9.13	189.65	9.29
			2	193.52				
			3	205.43				
			4	182.52				
			5	189.75				
	2	ล่าง	1	179.04	184.79	7.20	189.65	9.29
			2	197.38				
			3	182.52				
			4	182.52				
			5	182.52				
640/30	2	กลาง	1	138.38	174.17	23.73	176.33	16.60
			2	165.97				
			3	186.09				
			4	201.35				
			5	179.04				
	1	ล่าง	1	172.34	178.48	6.73	176.33	16.60
			2	189.75				
			3	175.65				
			4	179.04				
			5	175.65				
660/30	1	กลาง	1	197.38	186.09	21.02	197.92	29.58
			2	193.52				
			3	193.52				
			4	148.64				
			5	197.38				

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิควางเทหล่อ-
เย็นที่ความชัน 30 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ วางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
660/30	1	ล่าง	1	193.52	209.76	34.30	197.92	29.58
			2	189.75				
			3	270.65				
			4	201.35				
			5	193.52				
660/30	2	กลาง	1	189.75	212.67	22.10	210.78	16.02
			2	201.35				
			3	197.38				
			4	237.44				
			5	237.44				
	ล่าง	1	201.35	208.88	6.32			
		2	205.43					
		3	209.63					
		4	218.37					
		5	209.63					
680/30	1	กลาง	1	165.97	186.32	18.42	200.67	43.65
			2	182.52				
			3	175.65				
			4	213.94				
			5	193.52				
	ล่าง	1	318.23	215.02	58.60			
		2	172.34					
		3	197.38					
		4	197.38					
		5	189.75					

ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็นที่ความชัน 30 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ รางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
680/30	2	กลาง	1	162.91	180.62	17.27	192.65	21.30
			2	182.52				
			3	162.91				
			4	197.38				
			5	197.38				
	ล่าง	1	201.35	204.68	18.99			
		2	201.35					
		3	193.52					
		4	189.75					
		5	237.44					

ตารางที่ ง.2 ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็นที่ความชัน 45 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ รางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
640/45	1	กลาง	1	169.12	166.23	8.72	178.45	15.12
			2	172.34				
			3	172.34				
			4	165.97				
			5	151.36				

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิควางเทหล่อ-
เย็นที่ความชัน 45 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ วางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
640/45	1	ล่าง	1	179.04	190.68	8.05	178.45	15.12
			2	189.75				
			3	189.75				
			4	193.52				
			5	201.35				
640/45	2	กลาง	1	197.38	188.67	11.64	186.67	8.33
			2	189.75				
			3	182.52				
			4	201.35				
			5	172.34				
	1	ล่าง	1	182.52	184.68	3.23	197.12	6.34
			2	186.09				
			3	182.52				
			4	189.75				
			5	182.52				
660/45	1	กลาง	1	182.52	193.66	7.02	197.12	6.34
			2	197.38				
			3	193.52				
			4	193.52				
			5	201.35				
	1	ล่าง	1	205.43	200.58	3.36	197.12	6.34
			2	201.35				
			3	197.38				
			4	201.35				
			5	197.38				

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิควางเทหล่อ-เย็นที่ความชัน 45 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ วางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
660/45	2	กลาง	1	175.65	178.38	2.87	190.27	17.27
			2	179.04				
			3	182.52				
			4	175.65				
			5	179.04				
	ล่าง	1	186.09	202.17	17.57			
		2	222.94					
		3	218.37					
		4	186.09					
		5	197.38					
680/45	1	กลาง	1	189.75	193.72	8.54	192.53	6.97
			2	205.43				
			3	182.52				
			4	197.38				
			5	193.52				
	ล่าง	1	186.09	191.34	5.72			
		2	197.38					
		3	186.09					
		4	189.75					
		5	197.38					
680/45	2	กลาง	1	197.38	197.40	2.77	192.61	2.83
			2	197.38				
			3	197.38				
			4	193.52				
			5	201.35				

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อ-
เย็นที่ความชัน 45 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ รางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
680/45	2	ล่าง	1	172.34	187.82	9.62	192.61	8.37
			2	197.38				
			3	189.75				
			4	193.52				
			5	186.09				

ตารางที่ ง.3 ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิครางเทหล่อเย็นที่
ความชัน 60 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ รางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
640/60	1	กลาง	1	162.91	160.56	3.81	163.27	4.35
			2	162.91				
			3	162.91				
			4	154.15				
			5	159.92				
	1	ล่าง	1	162.91	165.99	3.11	163.27	4.35
			2	169.12				
			3	165.91				
			4	162.91				
			5	169.12				

ตารางที่ ง.3 (ต่อ) ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิควางเทหล่อ-
เย็นที่ความชัน 60 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ วางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
640/60	2	กลาง	1	186.09	183.96	3.16	180.17	5.39
			2	182.52				
			3	179.04				
			4	186.09				
			5	186.09				
	ล่าง	1	172.34	176.38	4.41			
		2	179.04					
		3	172.34					
		4	182.52					
		5	175.65					
660/60	1	กลาง	1	169.12	180.03	10.07	180.96	7.63
			2	186.09				
			3	169.12				
			4	189.75				
			5	186.09				
	ล่าง	1	182.52	181.89	5.24			
		2	182.52					
		3	189.75					
		4	175.65					
		5	179.04					
660/60	2	กลาง	1	175.65	171.92	8.58	177.26	8.85
			2	179.04				
			3	165.97				
			4	179.04				
			5	159.92				

ตารางที่ ง.3 (ต่อ) ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านการหล่อโลหะแบบกึ่งแข็ง โดยเทคนิควางเทหล่อ-
เย็นที่ความชัน 60 องศา อุณหภูมิเท 640, 660 และ 680 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ เท/ความ ชันของ วางเทหล่อ เย็น	ชั้น ที่	ตำแหน่ง	จุด ที่	ความแข็ง (HB)	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย ความแข็ง ของ ชิ้นงาน	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน ของ ชิ้นงาน
660/60	2	ล่าง	1	182.52	182.61	5.58	177.26	8.85
			2	179.04				
			3	186.09				
			4	189.75				
			5	175.65				
680/60	1	กลาง	1	175.65	179.07	3.43	184.46	7.27
			2	175.65				
			3	182.52				
			4	182.52				
			5	179.04				
	ล่าง	1	197.38	189.85	5.88	167.99	14.45	
		2	182.52					
		3	186.09					
		4	189.75					
		5	193.52					
680/60	2	กลาง	1	165.97	168.62	20.65	167.99	14.45
			2	138.38				
			3	162.91				
			4	189.75				
			5	186.09				
	ล่าง	1	159.92	167.36	6.53	167.99	14.45	
		2	172.34					
		3	165.97					
		4	162.91					
		5	175.65					