สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญ	ช
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ประวัติอะลูมิเนียม	5
2.2 อะลูมิเนียมและโลหะผสมของอะลูมิเนียม	6
2.3 อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought Aluminium and Wrought Aluminium Alloys)	8
2.3.1 อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมซิลิกอน หมายเลข 6063	10
2.3.2 การประยุกต์ใช้งานของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน หมายเลข 6063	11
2.4 กระบวนการแข็งตัวของอะลูมิเนียมเหลว	12
2.5 กระบวนการอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion process)	12
2.6 กระบวนการโฮโมจีไนซ์	13
2.6.1 กระบวนการโฮโมจีไนซ์ของอะลูมิมิเนียมผสม	15

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอินเตอร์เมทัลลิกเฟสต่ออะลูมิเนียมผสม 18
2.6.3 ประเภทของเตาโฮโมจีไนซ์ 19
2.6.3.1 เตาโฮโมจีไนซ์แบบธรรมดา 20
2.6.3.2 เตาโฮโมจีไนซ์แบบต่อเนื่อง 20
2.7 กล้องจุลทรรศน์แสง 21
2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิค 23
เอ็นนีจีดีสเพอร์ซีฟสเปคโตรสโกปี (SEM/EDS)
2.8.1 สัญญาณต่างๆ (Various types of signal) 25
2.9 การทดสอบความแข็ง 25
2.9.1 การวัดความแข็งแบบนูป (Knoop Hardness Test) 26
2.10 เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชั่น (XRD) 26
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 27

บทที่ 3 วิธีดำเนินวิจัย 30
3.1 การวิจัยตัวอย่างในระดับสเกลห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ 30
3.2 การวิจัยตัวอย่างในระดับสเกลโรงงานอุตสาหกรรม 31
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง 32
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ
เครื่องทดสอบความแข็งแบบนูป
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ 32
3.3.2 วิธีการ 32
3.4 การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยหลักการการเลี้ยวเบน 33
ของรังสีเอกซ์
3.4.1 วัสดุอุปกรณ์ 33
3.4.2 วิธีการ 33

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการวิจัย 34
4.1 ผลการวิจัยตัวอย่างในระดับสเกลห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ 34
4.1.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคทางแสง 34
4.1.1.1โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนส์นาน 2 ชั่วโมง 34
4.1.1.1.1 ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลม 34
4.1.1.1.2 ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำ 36
4.1.1.1.3 ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็ง 37
4.1.1.2โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 4 ชั่วโมง 39
4.1.1.2.1 ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลม 39
4.1.1.2.2 ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำ 41
4.1.1.2.3 ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็ง 42
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคอิเล็กตรอนแบบส่องกราด 44
4.1.2.1 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 2 ชั่วโมง 44
4.1.2.2 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 4 ชั่วโมง 48
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็นเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปคโตรสโคปี (Energy dispersive spectroscopy) 52
4.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกรรมวิธีแมบปิง (Mapping) 58
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็ง 59
4.1.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 62
4.2 ผลการวิจัยในระดับสเกลโรงงานอุตสาหกรรม 64
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคทางแสง 66
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคอิเล็กตรอนแบบส่องกราด 68
4.2.2.1 ภาพทางโครงสร้างจุลภาค 68

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค เอ็นเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟสเปคโตรสโคปี 70
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งแบบนูป 73
4.3 ค่าความแข็งกับกระบวนการเย็นตัวหลังผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ 75
4.4 กลไกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค 77

บทที่ 5 78
5.1 สรุปผลการวิจัย 78
5.2 ข้อเสนอแนะ 79

เอกสารอ้างอิง 80

ภาคผนวก 82
ภาคผนวก ก 83
ภาคผนวก ข 88
ภาคผนวก ค 96
ภาคผนวก ง 118

ประวัติผู้เขียน 119

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ส่วนผสมทางเคมี สมบัติทางกล และ การใช้ สำหรับโลหะผสมของอะลูมิเนียมหลายชนิด	7
2.2	สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็น และ อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม	8
2.3	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมซิลิกอนหมายเลข 6063 ตามมาตรฐานของ TIMCO-STANDARD-TANDEM	10
2.4	คุณสมบัติทางอุณหภูมิของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและ ซิลิกอน หมายเลข 6063	11
2.5	คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม และ ซิลิกอน หมายเลข 6063	11
2.6	อัตราส่วนของ Fe และ Si ที่พบในอินเตอร์เมททัลลิกเฟส AlFeSi (Weight%)	29
4.1	แสดงปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่างอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ และ ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 และ 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวลงด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง	55
4.2	แสดงปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่างอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ และ ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 และ 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวลงด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง	56
4.3	แสดงปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่างอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ และ ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 และ 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 ˚C	57
4.4	แสดงปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่างอะลูมิเนียมแท่ง 6063 เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์	70
4.5	แสดงปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่างอะลูมิเนียมแท่ง 6063 เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 นิ้ว ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์	71

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.6	แสดงปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่างอะลูมิเนียมแท่ง 6063 เส้นผ่าศูนย์กลาง 7 นิ้ว ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์	72
4.7	แสดงปริมาณธาตุที่พบในตัวอย่างอะลูมิเนียมแท่ง 6063 เส้นผ่าศูนย์กลาง 7 นิ้ว ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์	73
ผ- 1	แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียมผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง	88
ผ- 2	แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียมผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง	89
ผ- 3	แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียมผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง	90
ผ- 4	แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียมผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง	91
ผ- 5	แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียมผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งอุณหภูมิ 0 °C	92
ผ-6	แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียมผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งอุณหภูมิ 0 °C	93
ผ-7	แสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 5” จากภาคอุตสาหกรรม	94
ผ-8	ตารางแสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 5” จากภาคอุตสาหกรรม	95

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	แผนภาพกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมหน้าตัดต่างๆ กระบวนการโฮโมจีไนซ์ และ กระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อน	2
2.1	กลไกการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียม	12
2.2	แผนภาพกระบวนการอัดรีดขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมหน้าตัดต่างๆ (การอัดรีดขึ้นรูปร้อน)	13
2.3	โครงสร้างจุลภาคของแท่งอะลูมิเนียมผสมแมงกานีส เกรด AA3003 (1% Mn + 0.67%Fe + 0.16%Si)	14
2.4	ฟังก์ชันการกระจายตัวของธาตุที่ตกตะกอนในโลหะผสม ตัวอย่างเช่น ตะกอนของ แมงกานีส และ เหล็ก ในโลหะผสม อะลูมิเนียมแมงกานีส	15
2.5	แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสอินเตอร์เมทัลลิกเฟส จาก β เป็น α ในอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม ซิลิกอนเกรด 6005A (Al-Mg-Si alloys [AA 6005A series]) โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แสง	16
2.6	แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสอินเตอร์เมทัลลิกเฟส จาก β เป็น α ในอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม ซิลิกอนเกรด 6005A (Al-Mg-Si alloys [AA 6005A series]) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	17
2.7	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม AA6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ในช่วงอุณหภูมิ 540 – 580 ˚C และอบแช่ในช่วง 2-6 ชั่วโมง	17
2.8	เตาโฮโมจีไนซ์แบบธรรมดา	20
2.9	แสดงภาพกระบวนการโฮโมจีไนซ์ด้วยเตาโฮโมจีไนซ์แบบต่อเนื่อง	21
2.10	แสดงแผนภาพการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แสง	22
2.11	ภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	24
2.12	แผนภาพแสดงสัญญานแบบต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอะตอมกับสสาร	25

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.13	แสดงลักษณะและหัวกดแบบนูป	26
3.1	แผนผังการวิจัยตัวอย่างในระดับสเกลห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์	31
3.2	แผนผังการวิจัยตัวอย่างในระดับสเกลโรงงานอุตสาหกรรม	32
4.1	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 600 เท่า ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง	35
4.2	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 600 เท่าของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง	37
4.3	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 600 เท่าของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็ง 0 ˚C	38
4.4	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 600 เท่าของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 4 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง	40
4.5	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 600 เท่าของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง	41
4.6	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 600 เท่าของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็ง 0 ˚C	43
4.7	แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	45

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการ
โฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง
ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง

4.8 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 46
ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการ
โฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง
ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง

4.9 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 47
ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการ
โฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง
เย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็ง 0 ˚C

4.10 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 49
ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการ
โฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 4 ชั่วโมง
ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง

4.11 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 50
ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการ
โฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 4 ชั่วโมง
ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง

4.12 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 51
ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการ
โฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C นาน 4 ชั่วโมง
ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็ง 0 ˚C

4.13 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียม 52
ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์

4.14 บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียม 53
ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 ˚C นาน 2 ชัวโมงผ่านกระบวนการ
เย็นตัวด้วยพัดลม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.15	บริเวณที่ใช้เทคนิค SEM/EDS วิเคราะห์โครงสร้างของแท่งอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 ˚C นาน 4 ชั่วโมงผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลม	54
4.16	การกระจายของธาตุบริเวณอินเตอร์เมททัลลิกเฟสซึ่งวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีแมปปิง	58
4.17	ลักษณะรอยกดด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งแบบนูป	59
4.18	กราฟแสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง	59
4.19	กราฟแสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง	60
4.20	กราฟแสดงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580 590 และ 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งอุณภูมิ 0 ˚C	61
4.21	กราฟแสดงพีคความเข้มที่มุม 2θ ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ และ ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C ตามลำดับนาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลม	62
4.22	กราฟแสดงพีคความเข้มที่มุม 2θ ของอะลูมิเนียมแท่ง 6063 ที่ไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ และ ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590 และ 600 ˚C ตามลำดับนาน 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลม	63
4.23	ตำแหน่งที่สนใจศึกษาโครงสร้างจุลภาค และ ค่าความแข็ง	64
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแท่งบิลเลตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5” ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์จากโรงงานอุตสาหกรรม	65
4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแท่งบิลเลตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7” ที่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์จากโรงงานอุตสาหกรรม	65

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.26	โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์ 5 นิ้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 600 เท่า	66
4.27	โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 600 เท่า	67
4.28	โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดำลังขยาย 10000 เท่า	68
4.29	โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดำลังขยาย 10000 เท่า	69
4.30	กราฟแสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5”	74
4.31	กราฟแสดงค่าความแข็งของตัวอย่างอะลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 7”	74
4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหวางอุณหภูมิโฮโมจีไนซ์ และ กระบวนการเย็นตัว กับค่าความแข็งที่ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 2 ชัวโมง	75
4.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหวางอุณหภูมิโฮโมจีไนซ์ และ กระบวนการเย็นตัว กับค่าความแข็งที่ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการโฮโมจีไนซ์นาน 4 ชัวโมง	76
ผ-1	เฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน (Solidus)	84
ผ-2	เฟสไดอะแกรมของอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอน (Solvus)	84
ผ-3	สารละลายซิลิกา ผงขัดอะลูมิเนียม 5 และ 1 ไมครอน	85
ผ-4	เครื่องขัดชิ้นงาน	85
ผ-5	เครื่องปรับระนาบตัวอย่างก่อนทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	85
ผ-6	กล้องจุลทรรศน์แสง	86
ผ-7	เครื่องเอกซ์เรย์	86
ผ-8	เครื่องวัดค่าความแข็งแบบนูป	86
ผ-9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM-6335F	87
ผ-10	โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า (a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f) ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง	96
ผ-11	โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 400 เท่า	97

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง
ผ-12 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า 98
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง
ผ-13 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 400 เท่า 99
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง
ผ-14 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า 100
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 2 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง
ผ-15 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 400 เท่า 101
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 4 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง
ผ-16 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า 102
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 4 ชั่วโมงเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง
ผ-17 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 400 เท่า 103
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 4 ชั่วโมงเย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง
ผ-18 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า 104

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 2 ชั่วโมงเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0˚C

ผ-19 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 400 เท่า 105
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 2 ชั่วโมงอเย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 ˚C

ผ-20 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 100 เท่า 106
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 4 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

ผ-21 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 400 เท่า 107
(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 4 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 ˚C

ผ-22 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า 108
ของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง5 นิ้ว

ผ-23 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 400 เท่า 109
ของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว

ผ-24 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า 110
ของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว

ผ-25 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 400 เท่า 111
ของตัวอย่างอะลูมิเนียม 6063 เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว

ผ-26 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 112
1000 เท่า (a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f)
ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 ˚C
นาน 2 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง

ผ-27 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 113

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1000 เท่า(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f) ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 °C นาน 4 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยพัดลมที่อุณหภูมิห้อง

ผ-28 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 114
1000 เท่า(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f) ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 °C นาน 2 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง

ผ-29 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 115
1000 เท่า (a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f) ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 580, 590, 600 °C นาน 4 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง

ผ-30 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 116
1000 เท่า(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f) ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 508, 590, 600 °C นาน 2 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 °C

ผ-31 โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 117
1000 เท่า(a) ตัวอย่างไม่ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ (b), (c), (d), (e) และ (f) ผ่านกระบวนการโฮโมจีไนซ์ที่อุณหภูมิ 560, 570, 508, 590, 600 °C นาน 4 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยน้ำผสมน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0 °C

ผ-32 JCPDF ของอะลูมิเนียม 118

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved