ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190718

ผลของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล ของอลูมิเนียมผสมเกรด 6319

ปัทมา อภิชัย

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
กันยายน 2554
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

b00255396

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
190718

ผลของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล ของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319

ปัทมา อภิชัย

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
กันยายน 2554
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ เรื่อง "ผลของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319" ของ ปัทมา อภิชัย เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ของมหาวิทยาลัยนเรศวร

.....ประธาน
(ดร. จุฑาทิพย์ นมะหุต)

.....กรรมการ
(ดร. อัมพร เวียงมูล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชมพูนุช พืชมาก)

.....กรรมการ
(ดร. ศราวุฒิ เถื่อนถ้ำ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นุชธนา พูลทอง)

อนุมัติ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คนึงนิจ ภู่พัฒน์วิบูลย์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
27 กันยายน 2554

ประกาศคุณูปการ

การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. อัมพร เวียงมูล ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ความรู้ แนวคิด และคำแนะนำต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านอันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชมพูนุช พืชมาก ดร. ศราวุฒิ เถื่อนถ้ำ ดร. จุฑาทิพย์ นมะหุต และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นุชธนา พูลทอง ที่ให้คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. จุลเทพ ขจรไชยกูล และ ดร. จอห์น ธอมัส เฮนรี่ เพียสซ์ นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำหรับคำแนะนำและข้อวิจารณ์ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์ปฏิบัติการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศนศาสตร์อิเล็กตรอน และภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และหน่วยวิศวกรรมหล่อโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยผ่านสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัย

ปัทมา อภิชัย

ชื่อเรื่อง	ผลของการปรับสภาพด้วยความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319
ผู้วิจัย	ปัทมา อภิชัย
ประธานที่ปรึกษา	ดร. อัมพร เวียงมูล
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชมพูนุช พืชมาก ดร. ศราวุฒิ เถื่อนถ้ำ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2554
คำสำคัญ	อะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319, การอบละลาย, การบ่มแข็ง, การปรับสภาพด้วยความร้อน, โครงสร้างจุลภาค

บทคัดย่อ

190718

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอะลูมิเนียมผสมหล่อ เอ319 (Al-4.93Si-3.47Cu) โครงสร้างจุลภาคศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแบบส่องผ่าน และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทดสอบความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดร์ทและทดสอบแรงดึง พบว่าโครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อ ประกอบด้วยเดนไดร์ทของ α-Al ล้อมรอบด้วยโครงสร้างยูเทคติกที่ประกอบด้วยเฟสซิลิกอน และสารประกอบโลหะของเฟส Al_2Cu และเฟส Al_5FeSi เมื่อนำมาอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง ทำให้โครงสร้างยูเทคติกมีลักษณะกลมมนขึ้น และเฟส α-Al มีการองค์ประกอบภายในสม่ำเสมอมากขึ้น ขนาดและสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกลดลง หลังการอบละลายได้นำมาบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150-230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-48 ชั่วโมง จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่ามีตะกอนในเมทริกซ์ของ α-Al ที่มีลักษณะต่างกัน คือ ในช่วงแรกหรือ Under-aged ตะกอนเกิดจากการรวมตัวของอะตอมทองแดงที่มีรูปร่างกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7-20 นาโนเมตร ส่วนในช่วงที่สองหรือ Peak-aged ตะกอนน่าจะเป็นเฟส θ″-Al_2Cu หรือ θ′-Al_2Cu ที่มีลักษณะเป็นแผ่น ความหนาประมาณ 3-10 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 15-120 นาโนเมตร และในช่วงสุดท้าย Over-aged ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีความหนาประมาณ 3-15 นาโนเมตร และยาวประมาณ 30-200 นาโนเมตร จากการวัดความแข็งโดยรวมและความแข็งแรงดึงสูงสุดในสภาพหล่อมีค่าเท่ากับ 34 HR_B และ 227 MPa ตามลำดับ โดยชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วย

190718

การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งอยู่ในสภาวะ Peak-aged มีความแข็งโดยรวมและความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 75 HR_B และ 400 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการอบละลายหรือการบ่มแข็งที่เวลาน้อยหรืออุณหภูมิต่ำเกินไป ทำให้ความแข็งและความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากกระบวนการตะกอนยังไม่สมบูรณ์ ส่วนการอบที่เวลานานหรืออุณหภูมิสูงเกินไปทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากตะกอนมีขนาดใหญ่เกินไป

Title	EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CAST ALUMINIUM ALLOY A319
Author	Pattama Apichai
Advisor	Amporn Wiengmoon, Ph.D.
Co-Advisor	Assistant Professor Chompoonuch Puchmark, Ph.D. Sarawut Thountom, Ph.D.
Academic Paper	Thesis M.S. in Applied Physics, Naresuan University, 2011
Keywords	Cast Aluminium Alloy A319, Solution Treatment, Ageing, Heat Treatment, Microstructure

ABSTRACT

190718

In this research, an as-cast aluminium alloy A319 (Al-4.93Si-3.47Cu) was studied. Microstructures were studied by optical microscopy, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy and X-ray diffractrometry. Macrohardness, microhardness within the dendritic regions and tensile properties were measured. It was found that the microstructure in the as-cast condition consisted of primary dendrites of α-Al surrounded by a eutectic structure of Si and intermetallic phases comprising Al_2Cu and Al_5FeSi. After solution treatment at 503 °C for 2-24 hours, some spheroidisation of the eutectic structure occurred and the alpha matrix was homogenized. The size and area fraction of eutectic structure were decreased. Transmission electron microscopy revealed that after solution treatment at 503 °C for 2-24 hours plus ageing at 150-230 °C for 1-48 hours the precipitation within α-Al matrix occurred. In the initial stages i.e. under-aged condition, the precipitate was circular-like with a diameter of 7-20 nm. In the peak-aged condition, the precipitates were θ″-Al_2Cu or θ′-Al_2Cu with thin plate-like shape and a thickness about 3-10 nm and length about 15-120 nm. In the over-aged condition, the precipitates were plate-like with thickness about 3-15 nm and length about 30-200 nm. The macrohardness and ultimate tensile strength in the as-cast condition were 34 HR_B and 227 MPa, respectively. After solution

190718

treatment at 503 °C for 8 hours plus ageing at 170 °C for 24 hours, the peak macrohardness and maximum ultimate tensile strength were 75 HR_B and 400 MPa, respectively. At shorter time or lower temperature, the hardness and ultimate tensile strength were decreased due to the precipitation process not being complete. At longer time, the hardness and ultimate tensile strength were decreased due to precipitate coarsening.

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	1
	ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
	วัตถุประสงค์	2
	ขอบเขตการศึกษา	2
	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
2	**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	3
	โลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อ	3
	โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน	6
	โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ทองแดง	10
	โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน-ทองแดง	13
	การเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค	17
	การตกตะกอนของอนุภาคในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง	24
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
3	**วิธีดำเนินการวิจัย**	43
	การหล่อขึ้นรูป	43
	การปรับสภาพด้วยความร้อน	45
	การศึกษาชนิดเฟสและโครงสร้างจุลภาค	48
	การศึกษาชนิดเฟส	48
	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวม	49
	การหาสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติก	51
	การวิเคราะห์การเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ	52
	การศึกษาอนุภาคที่ตกตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	การทดสอบสมบัติเชิงกล	56
	การทดสอบความแข็ง	56
	การทดสอบแรงดึง	58
4	**ผลการวิจัย**	59
	การศึกษาชนิดเฟสและโครงสร้างจุลภาค	59
	การศึกษาชนิดเฟส	60
	การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยรวม	61
	การหาสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติก	72
	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ	74
	การศึกษาอนุภาคที่ตกตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	76
	การทดสอบสมบัติเชิงกล	85
	การทดสอบความแข็ง	85
	การทดสอบแรงดึง	89
5	**บทสรุป**	95
	สรุปผลการวิจัย	95
	ข้อเสนอแนะ	96
	บรรณานุกรม	97
	ภาคผนวก	103
	ประวัติผู้วิจัย	121

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1	ลักษณะการโตของ (ก) แขนเดนไดร์ทปฐมภูมิ (ข) แขนเดนไดร์ททุติยภูมิ และ (ค) แขนเดนไดร์ททไรภูมิ.....	4
2	แผนภูมิสมดุลของระบบอะลูมิเนียม-ซิลิกอน.....	7
3	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสมหล่อ (ก) Al-5Si (ไฮโปยูเทคติก) (ข) Al-8Si (ใกล้ยูเทคติก) (ค) Al-18Si (ไฮเปอร์ยูเทคติก).....	8
4	แผนภูมิสมดุลของระบบอะลูมิเนียม-ทองแดง.....	11
5	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) Al-17Cu (ไฮโปยูเทคติก) (ข) Al-32.5Cu (ยูเทคติก) (ค) Al-50Cu (ไฮเปอร์ยูเทคติก).....	12
6	แผนภูมิสมดุลของโลหะผสม Al-5%Si-Cu	14
7	แผนภาพวงจรลำดับขั้นการแข็งตัวของอะลูมิเนียม เอ319 โดยที่ (ก) ลำดับที่ 1 การเกิดโครงสร้างเดนไดร์ทของ α-Al (ข) ลำดับที่ 2 การเกิดเฟสซิลิกอนยูเทคติก (ค) ลำดับที่ 3 การรวมตัวกันของ α-Al กับซิลิกอนยูเทคติก และเกิดเฟสAl_2Cu.....	16
8	ขั้นตอนการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค.....	19
9	ลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคของโลหะผสม Al-4Cu ในแต่ละสภาวะต่างๆ.....	21
10	ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อความแข็งและความแข็งแรง และลักษณะการตกตะกอน.....	21
11	การตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็ก (Precipitate phases) (ก) Coherent Forms และ (ข) Non-coherent Forms	22
12	การเคลื่อนที่ของดิสโลเกชัน (ก) การเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างตะกอน (ข) การเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งตามสนามความเค้นของตะกอน.....	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
13	แผนภาพการเปลี่ยนรูปโครงสร้างผลึกของ θ'' เป็น θ' ในโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง โดยกลไกของช่องว่าง.....	25
14	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็ง (ก) ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส (ข) ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส.....	27
15	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของโลหะอะลูมิเนียมผสม เอ319 ที่ผ่านการปรับสภาพทางความร้อน แบบ T5.....	29
16	ภาพถ่ายของอะลูมิเนียม เอ319 (ก) ด้วย Bright-field TEM (แกนโซน [001 $_{Al}$) (ข) แบบรูปการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน และ (ค) ภาพถ่าย TEM หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง.....	30
17	(ก) ภาพถ่าย BF-TEM ของโลหะผสม Al-2Cu แสดงตะกอนของเฟส θ' หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ข) ภาพถ่าย Dark-field ในทิศ $1\bar{1}2_{\theta'}$.....	32
18	(ก) ภาพถ่าย BF-TEM ของโลหะผสม Al-1Si แสดงตะกอนของเฟส Si หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ในทิศ 200 $_{Al}$ (ข) ภาพถ่าย Dark-field ในทิศ 220_{Si}.....	33
19	(ก) ภาพถ่าย BF-TEM ของโลหะผสม Al-2Cu-1Si แสดงตะกอนของเฟส Si และ θ'-Al_2Cu ในโครงสร้างพื้น หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ข) ภาพถ่าย Dark-field ในทิศ $1\bar{1}2_{\theta'}$ (ค) ภาพถ่าย Dark-field ในทิศ $1\bar{1}1_{Si}$.....	34
20	(ก) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนยืนยันโครงสร้างผลึกของโลหะผสม หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (แกนโซน [001] $_{Al}$) เฟส θ' ในโครงสร้างพื้นของ Al-2Cu (ข) เฟส Si ในโครงสร้างพื้นของ Al-1Si (ค) เฟส θ' และ เฟส Si ในโครงสร้างพื้นของโลหะผสม Al-2Cu-1Si.....	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
21	ภาพถ่าย Dark-field แสดงอนุภาคที่ตกตะกอนในโลหะผสม Al-2Cu-1Si หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส (ก) เฟส θ′ บ่มแข็งเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ข) เฟส θ′ บ่มแข็งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ค) เฟส Si บ่มแข็งเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ง) เฟส Si บ่มแข็งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง.....	36
22	ภาพถ่ายของอะลูมิเนียม เอ319 หลังการปรับสภาพด้วยความร้อน แบบ T7 (ก) การเปลี่ยนรูปโครงสร้างพื้น หลังการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (ข) การเปลี่ยนรูปโครงสร้างพื้น หลังการทดสอบที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส.....	40
23	(ก) เตาอินดักชั่น (ข) แผงวงจรควบคุมการทำงานของเตา ของหน่วยวิศวกรรมหล่อโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ.....	44
24	(ก) เครื่องเทแบบอัตโนมัติ (ข) แผงวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องเท ของหน่วยวิศวกรรมหล่อโลหะศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ.....	44
25	ตัวอย่างชิ้นงาน (ก) หลังการหล่อ (ข) ตำแหน่งชิ้นงานสำหรับศึกษาโครงสร้างและทดสอบความแข็ง และ (ค) ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง.....	45
26	แผนภาพการปรับสภาพด้วยความร้อนแบบ T6.....	45
27	แผนภูมิสมดุลของโลหะผสม อะลูมิเนียม-5%ซิลิกอน-ทองแดง.....	46
28	เตาไฟฟ้า ยี่ห้อ Nabertherm รุ่น P300.....	47
29	ชุดอุปกรณ์การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว.....	47
30	เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) รุ่น X′Pert ของบริษัท Philips.....	48
31	เครื่องขัดยี่ห้อ Struers รุ่น LaboPol-1.....	49
32	กล้องจุลทรรศน์แสง บริษัท Wuzhou New Found Instrument รุ่น XJL-101 Reflected Light Metallurgical Microscope.....	50
33	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP ที่ต่อกับ EDS เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
34	ตัวอย่างการหาสัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกด้วยโปรแกรม Scentis ของบริษัท Stuers (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) แสดงโครงสร้างยูเทคติก (สีแดง) และโครงสร้างพื้น (สีเขียว).....	51
35	(ก) เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น DSC1 (ข) ชิ้นงานเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบด้วยเครื่อง DSC.....	52
36	การเตรียมชิ้นงานบางที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร.....	53
37	(ก) เครื่อง Twin-jet Electropolishing (ข) ชิ้นงานหลังการขัดเงาด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้า-เคมี.....	54
38	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของ JEOL รุ่น JEM-2010.....	54
39	เครื่องวัดความแข็งโดยรวม (Macrohardness) ของบริษัท Galileo รุ่น Egotest comp 25 RS.....	57
40	(ก) เครื่องวัดความแข็งจุลภาค (Microhardness) ของบริษัท Galileo รุ่น Microscan OD (ข) ตัวอย่างรอยกดและวัดค่า d	57
41	(ก) เครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานของ JIS ยี่ห้อ Shimadzu Autograph รุ่น AG_25TB^{R4} (ข) ตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบแรงดึง.....	58
42	แบบรูปการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงเฟสที่เกิดขึ้นในโลหะผสมอะลูมิเนียมเอ319 (ก) ในสภาพหล่อ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง.....	60
43	โครงสร้างจุลภาคในสภาพหล่อ (ก) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ข) ภาพถ่ายBEI จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
44	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในสภาพหล่อ และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS แบบ Point analysis	63
45	(ก) ภาพถ่าย BEI จากกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และ (ข-จ) X-ray Mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุ Al, Si, Cu และ Fe ตามลำดับ.....	64
46	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ภาพถ่าย BEI จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	66
47	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสง (ข) ภาพถ่าย BEI จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	67
48	ผลของเวลาในการอบละลายต่อโครงสร้างยูเทคติก (ก) ในสภาพหล่อ (ข-ฉ) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ.....	68
49	ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อโครงสร้างยูเทคติก (ก-ฉ) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 6, 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ.....	69
50	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศนอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (BEI) แสดงบริเวณของเดนไดร์ทที่ทำการวัดปริมาณธาตุ.....	71
51	สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติก ในสภาพหล่อ และหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ.....	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ หน้า

52 สัดส่วนโดยพื้นที่ของโครงสร้างยูเทคติกในสภาพหล่อ หลังการอบละลาย ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ..... 73

53 กราฟ DSC แสดงการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสมในสภาพหล่อ... 74

54 (ก) ภาพ Bright-field TEM แสดงโครงสร้างเมทริกซ์ของ α-Al ในสภาพหล่อ (ข) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนยืนยันโครงสร้างผลึกแบบ FCC ของเฟส α-Al (แกนโซน [001] $_{Al}$)..... 77

55 (ก) ภาพ Bright-field TEM แสดงลักษณะของอนุภาคที่ตกตะกอนในเมทริกซ์ของ α-Al อะลูมิเนียมในช่วง Under-aged ที่กำลังขยาย 120,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 200,000 เท่า..... 80

56 (ก) ภาพ Bright-field TEM แสดงลักษณะของอนุภาคที่ตกตะกอนในช่วง Peak-aged ที่กำลังขยาย 120,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 200,000 เท่า (ค) แบบรูปการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนจาก α-Al เมทริกซ์ และตะกอนในแกนโซน [001] $_{Al}$..... 82

57 (ก) ภาพ Bright-field TEM แสดงลักษณะของอนุภาคที่ตกตะกอนจาก α-Al เมทริกซ์ ในช่วง Over-aged ที่กำลังขยาย 80,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 120,000 เท่า..... 83

58 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS แบบ Point Analysis ของตกตะกอนใน α-Al เมทริกซ์..... 84

59 ผลของเวลาในการอบละลายต่อความแข็งโดยรวม เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส..... 87

60 ผลของเวลาในการอบละลายต่อความแข็งจุลภาคในเดนไดร์ท เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส..... 87

61 ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อความแข็งโดยรวม เมื่ออบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ..... 88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
62	ผลของเวลาในการบ่มแข็งต่อความแข็งจุลภาค เมื่ออบละลาย ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วย การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ.....	88
63	ผลของการบ่มแข็งต่อค่า 0.2% ความเค้นพิสูจน์ เมื่ออบละลาย ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วย การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ.....	90
64	ผลของการบ่มแข็งต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด เมื่ออบละลาย ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วย การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ.....	90
65	ผลของการบ่มแข็งต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว เมื่ออบละลาย ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ตามด้วย การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ/เวลาต่างๆ.....	91
66	ภาพ BEI เปรียบเทียบลักษณะการแตกของผิวหน้าหลังการทดสอบ แรงดึง (ก) ในสภาพหล่อ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายที่ อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) ชิ้นงาน ที่ผ่านการอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	93
67	ภาพ BEI เปรียบเทียบลักษณะการแตกของภาคตัดขวางหลังการ ทดสอบแรงดึง (ก) ในสภาพหล่อ (ข) ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย ที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ค) ชิ้นงานหลัง การอบละลายและตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	94

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

1 โครงสร้างหลักในโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ..... 5

2 สมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม..... 9

3 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม เอ319..... 13

4 การเปลี่ยนเฟสระหว่างกระบวนการแข็งตัวของโลหะผสม เอ319 จากงานวิจัยของ Bäckerud 17

5 ผลการวิเคราะห์ด้วย DSC ของ Ovono, D. O., Guillot, I. and Massinon, D..... 30

6 สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมผสม เอ319.0..... 37

7 งานวิจัยที่ผ่านมาในการปรับสภาพด้วยความร้อนของอะลูมิเนียมผสม เอ319..... 38

8 องค์ประกอบเคมีของอินก็อตโลหะอะลูมิเนียมผสม เอ319..... 43

9 การกระจายตัวของธาตุในเมทริกซ์..... 71

10 การเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ ของชิ้นงานในสภาพหล่อ เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา..... 75

11 องค์ประกอบทางเคมีของโลหะผสมที่ใช้ในงานวิจัยต่างๆ..... 75

12 สมบัติเชิงกลหลังการปรับสภาพด้วยความร้อน..... 91

13 ความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดร์ทของชิ้นงานในสภาพหล่อ และหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ..... 104

14 ความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดร์ทของชิ้นงานหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ..... 105

15 ความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดร์ทของชิ้นงานหลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ..... 106

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

16 ความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดร์ทของชิ้นงาน
หลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ..... 107
17 ความแข็งโดยรวมและความแข็งจุลภาคภายในเดนไดร์ทของชิ้นงาน
หลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 503 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
และตามด้วยการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ..... 108