สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(i)
กิตติกรรมประกาศ	(iv)
สารบัญ	(v)
รายการตาราง	(vii)
รายการรูป	(viii)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โลหะอลูมิเนียม	3
2.2 ขั้นตอนการบ่ม	7
2.3 กลไกการแพร่ของอะตอม	9
2.4 การเกิดเฟสใหม่	11
2.5 การโตของอนุภาคที่เกิดการแยกเฟส	23
2.6 Precipitate Transformations	25
2.7 การเติบโตของอนุภาค พรีซิพิเทต	27
2.8 กลไกการเพิ่มความแข็งแรงจากอนุภาคที่เกิดขึ้นบนเนื้อเมตริกซ์	28
2.9 ปัจจัยที่มีผลต่อขั้นตอนการบ่ม	30
2.10 การผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีปล่อยฟองแก๊สระหว่างการแข็งตัว	34
2.11 การทดสอบแรงดึง	35
2.12 การทดสอบความแข็ง	38
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
3 การดำเนินงานวิจัย	46
3.1 การขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งโดยวิธี Squeeze casting เกรด A356	46
3.2 ขั้นตอนทดลองการบ่มชิ้นทดสอบ	47

หน้า

3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง 48
3.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) 49
3.5 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็ง 50
3.6 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง 50
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 52
4.1 ชิ้นทดสอบในสภาวะหล่อ 52
4.2 ชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T5 54
4.3 ชิ้นทดสอบหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 58
5 สรุปผลการทดลอง 72
บรรณานุกรม 74
ภาคผนวก 1 ผลงานที่เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ 78

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางแสดงสัญลักษณ์กลุ่มอลูมิเนียมหล่อผสม	3
2.2	ตารางแสดงสัญลักษณ์การทำเทมเปอร์	5
2.3	ตารางแสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของเฟส β'	45
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356 ที่ใช้ในการทดลอง	47
4.1	ตารางแสดงค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่สภาวะต่างๆ	66
4.2	ตารางแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่สภาวะต่างๆ	71

รายการรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอลูมิเนียม – ซิลิกอน – แมกนีเซียม	6
2.2	ขั้นตอนการบ่มของโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356	7
2.3	ความสามารถในการละลายของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมภายในเนื้อเมตริกซ์กับอุณหภูมิ	8
2.4	ลักษณะการแพร่ของอะตอมแบบแทรกตัว	10
2.5	ลักษณะการแพร่ของอะตอมซิลิกอนภายในเฟส $\alpha - Al$ เป็นแบบแทนที่	11
2.6	ลักษณะพลังงานความเครียดภายในโครงสร้างผลึกที่เกิดจากอะตอมที่มีขนาดแตกต่างกันภายในโครงสร้างผลึก	12
2.7	ความแตกต่างพลังงานอิสระภายในเนื้อเมตริกซ์กับอนุภาค Mg_2Si (β Phase)	12
2.8	การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระ (Free Energy) กับการเกิดเฟสใหม่แบบ Homogenous ที่มีรูปร่างทรงกลมมีรัศมีเท่ากับ r	13
2.9	แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกับส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมในขั้นตอน Aging	15
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดเฟสใหม่แบบเนื้อเดียวกันกับอัตราการเย็นตัวของชิ้นทดสอบสำหรับโลหะผสมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ Xo	18
2.11	ลักษณะของการเกิดนิวเคลียสแบบ Heterogeneous ที่เกิดขึ้นตามขอบเกรน	19
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\left(\Delta G^*_{hetero} / \Delta G^*_{\mathrm{hom}\,o}\right)$ กับมุม $\cos\theta$	21
2.13	การลดขนาด $\left(\Delta G^*\right)$ ของอนุภาค พรีซิพิเทต มีบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสแบบ Coherent	21
2.14	การโตของอนุภาค พรีซิพิเทต ด้วยอาศัยการแพร่แบบแทนที่	23
2.15	อัตราการเย็นตัวของชิ้นทดสอบกับความเร็วในการเติบโตของอนุภาคพรีซิพิเทต	25
2.16	ความสัมพันธ์พลังงานอิสระกับความเข้มข้นของซิลิกอนและแมกนีเซียมอะตอมภายในเนื้อเมตริกซ์ภายหลังขั้นตอน Aging	26
2.17	ลำดับการเปลี่ยนเฟสของโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอนเกรด A356 ที่ผ่านการบ่ม	26
2.18	ปรากฏการณ์ Coarsening ของอนุภาคพรีซิพิเทตส่งผลต่อลักษณะการขัดขวางการ เคลื่อนที่ของดีสโลเคชัน ทำให้ชิ้นทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น	28

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.19	กลไกการเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นทดสอบในขั้นตอนการบ่ม	28
2.20	การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่านอนุภาคด้วยกลไก Particle Cutting	29
2.21	การเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันผ่านอนุภาคด้วยกลไก Particle Bowing	30
2.22	อัตราการเย็นตัวของชิ้นทดสอบกับอนุภาค Mg_2Si หลังจากขั้นตอน Aging	31
2.23	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวของชิ้นทดสอบกับบริเวณ Precipitate Free Zone (PFZ) ที่เกิดขึ้นของทดสอบที่ผ่านขั้นตอน Aging	32
2.24	Schematic ของกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส	34
2.25	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	36
2.26	เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	37
3.1	Mold ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน	46
3.2	ชิ้นงานหล่อที่ได้จากการขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็งโดยวิธี Squeeze cast เกรด A356	47
3.3	ขั้นตอนการบ่มชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการทางความร้อนแบบ T6	48
3.4	ลักษณะรูปร่างของชิ้นงานที่นำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	49
3.5	ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM เบอร์ E 8M-04	50
3.6	ชิ้นงานทดสอบแรงดึงภายหลังการเตรียมตามมาตรฐาน ASTM เบอร์ E 8M-04	50
4.1	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบก่อนการบ่ม	52
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ultimate Tensile Strength และ Percent Elongation ของชิ้นทดสอบในสภาวะหล่อต่างๆ	54
4.3	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน T5 ที่สภาวะต่างๆ	55
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาที่ใช้ในการบ่มของชิ้นทดสอบ ที่อุณหภูมิการบ่ม 135, 165 และ195°C	56
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบกับเวลาที่ใช้ในการบ่มชิ้นทดสอบ ที่อุณหภูมิ 135 และ195°C	57
4.6	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 520 และ 540°C เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง	58

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบละลาย ณ อุณหภูมิ 520°C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง และบ่ม ณ อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน	59
4.8	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบละลาย ณ อุณหภูมิ 520°C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง และบ่ม ณ อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน	60
4.9	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบละลาย ณ อุณหภูมิ 540°C เป็น ระยะเวลา 4 ชั่วโมง และบ่ม ณ อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน	61
4.10	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบละลาย ณ อุณหภูมิ 540°C เป็น ระยะเวลา 8 ชั่วโมง และบ่ม ณ อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน	62
4.11	ภาพถ่าย TEM แสดงโครงสร้างจุลภาคทั่วไปของชิ้นงาน ณ สภาวะ Under-aging	63
4.12	(ก) ภาพถ่าย TEM แสดงให้เห็นเฟส β'' ที่เรียงตัวในทิศทาง <001> ของเฟส α-Al (ข) อิเล็คตรอนดิฟแฟรคชันแพทเทิร์นของรูปที่ 4.12 (ก) และ (ค) โครงสร้างจุลภาคทั่วไป ของชิ้นงาน ณ สภาวะ Optimum-aging	64
4.13	(ก) ภาพถ่าย TEM แสดงให้เห็นเฟส β' ที่เรียงตัวในทิศทาง <001> ของเฟส α-Al (ข) อิเล็คตรอนดิฟแฟรคชันแพทเทิร์นของรูปที่ 4.13 (ก) และ (ค) โครงสร้างจุลภาคทั่วไปของ ชิ้นงาน ณ สภาวะ Over-aging	65
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอุณหภูมิและเวลาใน การบ่มที่อุณหภูมิและเวลาในการอบละลายดังนี้ (ก) 520°C, 4 ชั่วโมง (ข) 520°C, 8 ชั่วโมง (ค) 540°C, 4 ชั่วโมง (ง) 540°C, 8 ชั่วโมง	69