สารบัญ

		หน้า
สารบัญ		(6)
รายการตาราง		(8)
รายการรูป		(10)
สัญลักษณ์ คำย่อและตัวย่อ		(14)
บทที่		
1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
	1.3 สมมติฐานของการวิจัย	2
	1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	2.1 โลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อ	3
	2.2 ปัญหาความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานหล่อ	9
	2.3 การทำโมดิฟิเคชั่น(Modification)สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อชนิด Hypoeutectic Al-Si alloys	9
	2.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุและการทดสอบสมบัติเชิงกล	11
	2.5 งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อน	19
3	ขั้นตอนการวิจัย	21
	3.1 การผลิตโลหะอะลูมิเนียมหล่อผสม Al-7%Si โดยใช้อะลูมิเนียมกระป๋องเครื่องดื่มเป็นวัตถุดิบตั้งต้น การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และการนำชิ้นงานทดสอบผ่านกระบวนการทางความร้อน	21
	3.2 การทดสอบสมบัติทางกล	21
	3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค	22
	3.4 แผนภาพการดำเนินการวิจัย	23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	การเตรียมโลหะผสมเพื่อเป็นชิ้นงานทดสอบและกระบวนการทางความร้อน	24
	4.1 การผลิต Al-7%Si จากกระป๋องเครื่องดื่ม การหล่อ A356 และการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	24
	4.2 นำชิ้นงานทดสอบไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่สภาวะต่างๆ	28
	5 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบที่เตรียมขึ้น	29
	5.1 การทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง	29
	5.2 การทดสอบความแข็ง	44
6	การศึกษาโครงสร้างจุลภาค	58
	6.1 ชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาศึกษา	58
	6.2 รูปโครงสร้างจุลภาค	59
	6.3 ปัญหารูพรุนในชิ้นงานหล่อ	66
	6.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุผสมในเฟสต่างๆที่ปรากฏในโครงสร้างด้วย EDX	68
7	สรุปและข้อเสนอแนะ	74
	7.1 สรุป	74
	7.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม		77
ภาคผนวก1	รูปขยายโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม Al-7%Si ที่ผลิตจากกระป๋องและ A356	78
ภาคผนวก 2	ผลงานที่เผยแพร่ในการประชุมวิชาการ	106
ประวัติผู้เขียน		111

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ตารางแสดงสัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อผสมตามมาตรฐานของ ASM	4
2.2	ตารางแสดงสัญลักษณ์การทำ Temper	6
4.1	ส่วนผสมของอะลูมิเนียมตั้งต้น ที่ได้จากการหลอมกระป๋องแล้วเทเป็น Ingot	24
4.2	ส่วนผสมของ Master Alloy Al-23%Si ที่ใช้เติมเพื่อเพิ่มปริมาณ Si ให้เป็น 7%	24
4.3	ส่วนผสม Al-7%Si ที่ผลิตได้จริงและใช้เป็นชิ้นงานทดสอบ	26
4.4	ส่วนผสมของ A356 ตั้งต้น	26
4.5	ส่วนผสมของ A356 ที่หล่อขึ้นรูปชิ้นงานจริง	27
5.1	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	31
5.2	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายอย่างเดียว	31
5.3	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120°C	32
5.4	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150°C	33
5.5	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 175°C	34
5.6	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 205°C	35
5.7	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	37
5.8	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายอย่างเดียว	37
5.9	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120°C	38
5.10	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150°C	39
5.11	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 175°C	40

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
5.12	ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 205˚C	41
5.13	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ไม่ผ่านกระบวนการความร้อน	44
5.14	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายอย่างเดียว	44
5.15	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 120˚C	45
5.16	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 150˚C	46
5.17	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 175˚C	47
5.18	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 205˚C	48
5.19	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการความร้อน	50
5.20	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายอย่างเดียว	50
5.21	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 120˚C	51
5.22	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 150˚C	52
5.23	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 175˚C	53
5.24	ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 205˚C	54
6.1	ชิ้นงานที่เลือกมาตรวจดูโครงสร้าง	58

รายการรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพสมดุลโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน	7
2.2	ลักษณะความเค้นแบบต่างๆ	12
2.3	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point)	13
2.4	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	15
2.5	เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก	16
3.1	แผนภาพการดำเนินการวิจัย	23
4.1	การเตรียมวัตถุดิบก่อนทำการผสมประกอบด้วย Ingot ที่หลอมจากกระป๋องและ Master Alloy แบบแผ่น	25
4.2	การ Preheat วัตถุดิบก่อนใส่ในเบ้าหลอมเพื่อไล่ความชื้น	25
4.3	แบบหล่อทรายที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานทดสอบในงานวิจัยนี้	26
4.4	แบบชิ้นงานทดสอบแรงดึง	27
4.5	ชิ้นงานทดสอบแรงดึงที่กลึงเสร็จแล้ว	27
4.6	นำชิ้นงานเข้าอบตามสภาวะต่างๆ	28
5.1	เครื่องมือทดสอบแรงดึงที่ใช้ในงานวิจัยนี้	30
5.2	การใช้ Extensometer วัดระยะยืดตัวของชิ้นงานทดสอบ	30
5.3	กราฟแสดงผลทดสอบความต้านแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ	36
5.4	กราฟแสดงเปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ	36
5.5	กราฟแสดงความต้านแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ	42
5.6	กราฟแสดงเปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ	42
5.7	ลักษณะการวิบัติของชิ้นงานทดสอบแรงดึง Al-7%Si	43
5.8	ลักษณะการวิบัติของชิ้นงานทดสอบแรงดึง A356	43
5.9	กราฟแสดงความแข็งของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ	49
5.10	กราฟแสดงความแข็งของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ	55

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.1	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	59
6.2	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อที่ผ่านการอบละลายเพียงอย่างเดียว	59
6.3	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อหลังจากผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 120°C	60
6.4	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อหลังจากผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 150°C	61
6.5	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อหลังจากผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 175°C	62
6.6	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อหลังจากผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 205°C	63
6.7	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนสภาวะต่างๆ	64
6.8	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนสภาวะต่างๆ	65
6.9	รูพรุนที่เกิดในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม 7%Si ที่ผลิตจากกระป๋อง	66
6.10	รูพรุนที่เกิดในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม A356	67
6.11	ผลการวิเคราะห์ Matrix ใน AL-7%Si	68
6.12	ผลการวิเคราะห์ Matrix ใน A356	69
6.13	ผลการวิเคราะห์ผลึก Si ใน Al-7%Si ที่ผลิตจากกระป๋องเครื่องดื่ม	70
6.14	ผลการวิเคราะห์ผลึก Si ใน A356	71
6.15	ผลการวิเคราะห์ Intermetallic Phase รูปเข็ม ใน A356	72
6.16	ผลการวิเคราะห์ Intermetallic Phase รูปตัวหนังสือจีน ใน Al-7%Si ที่ผลิตจากกระป๋องเครื่องดื่ม	73
6.17	ผลการวิเคราะห์ Intermetallic Phase รูปแผ่น ใน Al-7%Si ที่ผลิตจากกระป๋องเครื่องดื่ม	74

รายการรูปผนวก

รูปที่		หน้า
ผ.1	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	80
ผ.3	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน	81
ผ.2	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลาย	82
ผ.4	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลาย	83
ผ.5	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	84
ผ.6	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	85
ผ.7	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	86
ผ.8	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	87
ผ.9	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	88
ผ.10	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	89
ผ.11	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	90
ผ.12	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	91
ผ.13	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	92
ผ.14	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	93
ผ.15	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	94

รายการรูปผนวก (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ผ.16	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	95
ผ.17	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	96
ผ.18	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	97
ผ.19	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	98
ผ.20	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	99
ผ.21	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	100
ผ.22	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	101
ผ.23	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 205°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	102
ผ.24	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 205°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	103
ผ.25	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 205°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	104
ผ.26	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 205°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง	105

สัญลักษณ์ คำย่อและตัวย่อ

ASTM	American Society of Testing and Materials
A_0	พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง
A_f	พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด
BS	British Standards
E	โมดูลัสของยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)
%El	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว
F	แรงที่กระทำบนวัตถุ
G	โมดูลัสของความแกร่ง (Modulus of Rigidity)
L_o	ความยาวของเกจเริ่มต้น
L_f	ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด
ΔL	ความยาวที่เปลี่ยนไป
UTS	ความต้านแรงดึงของวัสดุหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa)
MPa	หน่วยวัดความต้านแรงดึงมีค่าเท่ากับ นิวตันต่อตารางเมตร
HV	หน่วยวัดค่าความแข็งของวัสดุโดยวิธีวัดแบบวิกเกอร์