

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
กิตติกรรมประกาศ	3
คำนำ	4
สารบัญ	5
รายการตาราง	9
รายการภาพประกอบ	11
บทที่	
1. บทนำ	18
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	18
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	20
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	20
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	20
1.5 แผนการดำเนินงาน	21
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.1 ขาเทียม	22
2.1.1 ประเภทขาเทียม	22
2.1.2 ขาเทียมได้เข้า	22
2.1.3 ขาเทียมจากต่างประเทศ	23
2.1.4 ขาเทียมที่พัฒนาและผลิตในประเทศ	24
2.2 การทดสอบขาเทียมตามมาตรฐานกายอุปกรณ์เทียม ISO 10328	26
2.2.1 การทดสอบทางวิศวกรรม	26
2.2.2 การทดสอบทางการแพทย์	26
2.3 การทาบขึ้นรูป	27
2.3.1 แม่พิมพ์ทาบขึ้นรูปแบบปิด	28
2.3.2 การทาบขึ้นรูปสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว	28
2.3.3 การเปรียบเทียบระหว่างการทาบขึ้นรูปแบบปกติกับการทาบขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็ง	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การอัดรีดขึ้นรูป	30
2.4.1 ลักษณะการไหลในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม	31
2.4.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม	32
2.5 การฉีดขึ้นรูป	36
2.5.1 การไหลและความหนืดของน้ำโลหะ	36
2.5.2 ลักษณะการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์	37
2.6 การขึ้นรูปโลหะกึ่งของแข็ง	37
2.7 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊ส	38
2.8 การปรับปรุงทางความร้อน	39
2.8.1 โลหกรรมกายภาพของอะลูมิเนียมผสม	39
2.8.2 หลักการทำให้แข็งแรงด้วยการบ่ม	40
2.9 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของกระบวนการการผลิตขึ้นส่วนขาเทียมได้เข้า	47
2.9.1 ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์	47
2.9.2 การวิเคราะห์ต้นทุนโดยการสร้างแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ	49
2.10 เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Development: QFD)	50
2.10.1 ประวัติและเทคนิคของ QFD	51
2.10.2 บ้านแห่งคุณภาพ (House of Quality)	51
2.10.3 ขั้นตอนการทำ QFD	52
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	53
2.11.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานทอบขึ้นรูป	53
2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานอัดรีดขึ้นรูป	54
2.11.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานฉีดขึ้นรูป	56
2.11.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการปรับปรุงทางความร้อน	59
2.11.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต	60
2.11.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ	62
3. วิธีการวิจัย	64
3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	64
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	65

สารบัญญ (ต่อ)	หน้า
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน, ตรวจสอบ โครงสร้างจุดภาคของชิ้นงานและทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ	66
3.4 วิธีการทดลอง	66
3.4.1 การเตรียม โลหะกึ่งของแข็ง	66
3.4.2 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งของ โลหะกึ่งของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS	67
3.4.3 การผลิตชิ้นงานทาบขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง	68
3.4.4 การผลิตชิ้นงานอัดรีดขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง	71
3.4.5 การผลิตชิ้นงานฉีดยุ่ขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง	73
3.4.5.1 การทดลองฉีดข้อเท้าเทียม (Foot Adaptor)	74
3.4.5.2 การทดลองฉีดตัวจับยึด (Tube Adapter) และปิรามิดฐานรองเข้า (Pyramid)	75
3.4.6 ขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน	76
3.4.6.1 การทดลองครั้งที่ 1	76
3.4.6.2 การทดลองครั้งที่ 2	77
3.4.6.3 การทดลองครั้งที่ 3	78
3.5 วิธีการวิเคราะห์	78
3.5.1 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างจุดภาค	78
3.5.2 การวิเคราะห์ธาตุประกอบของวัสดุเกรด 7075 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	80
3.5.3 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน	80
3.5.3.1 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวล Scale B	80
3.5.3.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง	81
3.5.4 การทดสอบหาเทียบตามมาตรฐาน ISO 10328 จากศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟู	81
3.5.4.1 การทดสอบความแข็งแรงแบบสถิตย์ (Static testing)	81
3.5.4.2 การทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักร (Dynamic testing)	81
3.5.4.3 ทดสอบทางการแพทย์	82
3.5.4.4 โครงสร้างบางส่วน	82

สารบัญ (ต่อ)	หน้า
3.5.4.5 การตั้งเครื่องทดสอบฝ่าเท้า	82
3.5.5 การประยุกต์ใช้ QFD	85
3.5.5.1 สํารวจความต้องการของผู้ใช้ขาเทียมและเจ้าหน้าที่กายอุปกรณ์	85
3.5.5.2 การนำเสียงจากผู้ใช้ขาเทียมและเจ้าหน้าที่กายอุปกรณ์มาจัดเรียง ถ้อยคำใหม่	85
3.5.5.3 จัดทำแบบสอบถามและตรวจสอบแบบสอบถาม	85
3.5.5.4 ประเมินแบบสอบถาม โดยผู้ขาเทียม	86
3.5.5.5 การหาค่าเฉลี่ยความสำคัญจากแบบสอบถาม	86
3.5.6 การประยุกต์ใช้เทคนิคการวางแผนผลิตภัณฑ์	87
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	90
4.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) ของโลหะที่ใช้ในงานวิจัย	90
4.2 การวิเคราะห์สัดส่วนของแข็งที่เตรียมได้จากกระบวนการ GISS	91
4.3 ผลการทดลองขึ้นรูป	94
4.3.1 ผลการทดลองทาบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง	94
4.3.1.1 ผลของเวลาในการปล่อยฟองแก๊ส (GISS time)	94
4.3.1.2 ผลของเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ (Holding time)	96
4.3.1.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน	98
4.3.2 ผลการทดลองการอัดรีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง	101
4.3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะผิวและความยาวของชิ้นงาน	101
4.3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน	101
4.3.3 ผลการทดลองการฉีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง	103
4.3.3.1 การทดลองฉีดข้อเท้าเทียม (Foot Adapter)	103
4.3.3.2 การทดลองฉีดตัวจับยึด (Tube Adapter) และพีรามิดฐานรองเข้า (Pyramid)	105
4.4 ผลการศึกษาการปรับปรุงทางความร้อน	108
4.4.1 การทดลองครั้งที่ 1	108
4.4.2 การทดลองครั้งที่ 2	111

สารบัญ (ต่อ)	หน้า
4.4.3 การทดลองครั้งที่ 3	117
4.5 การทดสอบขาเทียมตามมาตรฐาน ISO 10328	120
4.5.1 ขั้นตอนการเลือกและประกอบชิ้นส่วนส่งทดสอบ	120
4.5.2 การจัดวางชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบ	121
4.5.3 การอ่านค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักร	122
4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของกระบวนการการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมได้เข้า	124
4.6.1 วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวกับต้นทุน	124
4.6.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ (Product Analysis)	126
4.6.3 การวิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis)	126
4.7 ผลการเตรียมการก่อนการประยุกต์ใช้ QFD	132
4.7.1 ผลการสำรวจความต้องการจากผู้ใช้งาน และเจ้าหน้าที่กายอุปกรณ์	132
4.7.2 จัดทำแบบสอบถาม และตรวจสอบแบบสอบถาม	133
4.7.3 ผลการประเมินแบบสอบถามจากผู้ใช้งาน	133
4.7.4 หาค่าเฉลี่ยความสำคัญจากแบบสอบถาม	133
4.8 ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning)	135
4.8.1 ส่วนของตัวบ้าน	135
4.8.2 ส่วนของเพดานห้อง	135
4.8.3 ส่วนของหลังคาบ้าน	135
4.8.4 คำนวณลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์	138
5. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	140
เอกสารอ้างอิง	143
ภาคผนวก	148

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการทดสอบชิ้นส่วนขาเทียมที่ทางกลุ่มวิจัยสามารถขึ้นรูปได้	27
2.2	แสดงความสามารถของธาตุในการละลายในของแข็งของอะลูมิเนียม	40
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัย	64
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ใช้ในงานวิจัย	64
3.3	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการชุบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งกรณีไม่มีเวลาปล่อยทิ้งไว้	69
3.4	การทดลองชุบขึ้นรูปที่สภาวะต่าง ๆ กัน	70
3.5	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการชุบขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็งกรณีมีเวลาปล่อยทิ้งไว้	70
3.6	การทดลองชุบขึ้นรูปที่สภาวะต่าง ๆ กันที่มีการเพิ่มส่วนของการปล่อยทิ้งไว้	70
3.7	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษากระบวนการอัดรีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของแข็ง	72
3.8	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปข้อเท้าเทียมในสภาวะกึ่งของแข็ง	74
3.9	การศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปข้อเท้าเทียม ในสภาวะกึ่งของแข็ง	74
3.10	ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปปริมาตรในสภาวะกึ่งของแข็ง	75
3.11	การศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปพีระมิดที่ Gate thickness 3 mm ในสภาวะกึ่งของแข็ง	76
4.1	ตัวแปรการทดลองหาปริมาณสัดส่วนแข็งเริ่มต้นของอะลูมิเนียมเกรด 7075	91
4.2	แสดงสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	92
4.3	แสดงสัดส่วนของแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสมอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	93
4.4	ผลการทดลองชุบขึ้นรูปที่สภาวะต่าง ๆ กัน	94
4.5	ผลการทดลองชุบขึ้นรูปที่สภาวะ GISS +Holding time ที่เวลาแตกต่างกัน	96
4.6	แสดงรูปโครงสร้างจากบริเวณกลางและขอบของชิ้นงานจากแต่ละความเร็วในการอัดรีด	101

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.7	สภาวะดีที่สุดในกรณีคิดขึ้นรูปข้อเท้าเทียมในสภาวะกึ่งของแข็ง	104
4.8	สภาวะดีที่สุดในกรณีคิดขึ้นรูปปริมาตรฐานรองเข้าในสภาวะกึ่งของแข็ง	105
4.9	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงแบบวัฏจักร	122
4.10	การอ่านค่าจากสีที่ปรากฏจากกราฟ	123
4.11	ค่าน้ำหนักความสำคัญความต้องการของผู้ใช้ขาเทียมเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย	133
4.12	ข้อกำหนดทางเทคนิคที่แปลงมาจากความต้องการของผู้ใช้ขาเทียมและเจ้าหน้าที่กายอุปกรณ์	135
4.13	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ของเมตริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์	137
4.14	การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์และโดยเปรียบเทียบ	138

รายการภาพประกอบ

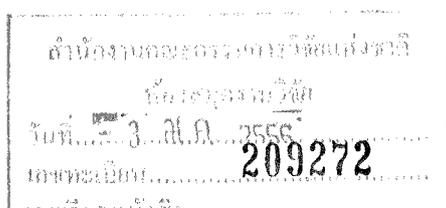
รูปที่		หน้า
2.1	แสดงส่วนประกอบของขาเทียมใต้เข่า	23
2.2	ชิ้นส่วนโลหะของขาเทียมใต้เข่าที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (บริษัท Ossur)	24
2.3	ตัวอย่างชิ้นส่วนขาเทียมของบริษัทจากต่างประเทศ	24
2.4	ตัวอย่างขาเทียมที่ผลิตภายในประเทศโดยหน่วยงานต่างๆ	25
2.5	แสดงลักษณะของการทอบขึ้นรูป	28
2.6	แม่พิมพ์ทอบขึ้นรูปแบบปิด (Closed Die Forging)	28
2.7	การทอบขึ้นรูปสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Rheoforging)	29
2.8	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปในงานวิจัย	30
2.9	แสดงลักษณะของการอัดรีดขึ้นรูป	31
2.10	แสดงลักษณะการไหลในการอัดรีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม	31
2.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและระยะการเคลื่อนที่ของแรม	32
2.12	แสดงลักษณะการไหลในช่วงสุดท้ายของการอัดรีดขึ้นรูป	33
2.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการรีดกับระยะเคลื่อนที่แรม	33
2.14	แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการอัดรีดต่อความดันที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป	34
2.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเริ่มต้นในการอัดรีดและความดันที่ใช้ในการอัดรีด	34
2.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการอัดรีดและการเพิ่มของอุณหภูมิ	34
2.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนและความดันที่ใช้ในการอัดรีด	35
2.18	แสดงการขึ้นรูปด้วย Clod chamber die casting	36
2.19	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสมที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์ อะลูมิเนียมผสม โลหะกึ่งของแข็ง (กลาง) และ สมบัติการไหลคล้ายไอศกรีมของโลหะกึ่งของแข็ง (ขวา)	38
2.20	แผนภาพสมดุแสดงช่วงโลหะที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว	38

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.21	การทำงานของกระบวนการ GISS และโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมที่ผลิตได้	39
2.22	แสดงเฟสไดอะแกรมของ Al-Zn-Mg ที่ปริมาณ Zn-5.3 at%	41
2.23	แสดงสัดส่วนพื้นที่ของเฟสอื่นๆ นอกเหนือจากเฟส α -Al เมื่อทำการอบละลายที่อุณหภูมิ 400, 420, 440, และ 460°C ที่ระยะเวลาต่างๆ ของอะลูมิเนียมผสม a) Alloy A1 (7050) b) Alloy 2 (7010)	41
2.24	แสดงภาพถ่าย SEM a) As-Cast ของอะลูมิเนียมผสม 7050 และ 7010 b) ภาพกำลังขยายสูงของ (a) (c) อะลูมิเนียมผสม 7050 อบละลายที่ 460°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (d) อะลูมิเนียมผสม 7010 อบละลายที่ 460°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (e) รูปร่างของอนุภาคขนาดใหญ่ (f) ภาพกำลังขยายสูงของ(e)	42
2.25	แสดงอิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อความแข็งแรงต่อการดึงในอะลูมิเนียมผสมชนิดต่างๆ	43
2.26	นิเวศลิเอชันไดอะแกรมระหว่างการทำใหเย็นตัวในอะลูมิเนียมผสม 7010	43
2.27	แสดง GP Zone โดย element mapping 3DAP ใน Al-Zn-Mg-Cu (a) GP Zone ทรงกลม(b) GP Zone ทรงรี (ellipsoidal)	44
2.28	ภาพ HREM แสดง (a) GP Zone I และ GP Zone II (b) ภาพขยาย GP Zone II	45
2.29	(a) แสดงภาพ η' ใน Al-1.7Zn-3.4Mg-0.1Ag ด้วย HRTEM (b) แสดงโครงสร้างผลึกของ η'	46
2.30	แสดงไดอะแกรม TTT สำหรับการบ่ม Al-6.1Zn-2.4Mg-1.6Cu	46
2.31	แสดงการบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง	47
2.32	โครงสร้างแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ	50
2.33	บ้านแห่งคุณภาพ (House of Quality)	51
2.34	เครื่องมือที่ใช้ในการผลิต	55
2.35	รูปชิ้นงานที่ผลิตได้	55
2.36	สมบัติของกลของชิ้นงานหลังการอัดรีดโดยวิธีต่างๆ	55
2.37	แสดงผลจากการใช้โปรแกรมจำลองการไหลของน้ำโลหะ	56

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.38	แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่เงื่อนไขต่างๆ	56
2.39	กราฟแสดงสัดส่วนของแข็งของชิ้นงานที่บริเวณต่างๆ	57
2.40	แสดงโครงสร้างชิ้นงานที่เวลาในการปล่อยฟองแก๊สต่างๆ (a) 5, (b) 10 และ (c) 15 วินาที	58
2.41	แสดงภาพถ่ายมาโครของชิ้นงาน (a) liquid casting, (b) SSM gate 3mm, (c) SSM gate 6mm	58
2.42	แบบจำลองการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีแบบกึ่งของแข็ง	61
2.43	รูปแบบการประเมินต้นทุน	62
3.1	อินกอทอะลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัย	64
3.2	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการทดลอง	65
3.3	กระบวนการ Gas Induced Semi Solid	66
3.4	แม่พิมพ์ทองแดง	67
3.5	ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนของแข็ง (ก) การสร้าง Threshold ด้วยโปรแกรม Photoshop (ข) การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Tools	68
3.6	กระบวนการทอบขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็ง หรือ Semi-Solid Forging	68
3.7	แสดงลักษณะแม่พิมพ์ที่ออกแบบได้สำหรับใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป	71
3.8	ชุดหล่อเย็นชิ้นงานที่ผ่านแม่พิมพ์ออกมาเพื่อให้แข็งตัว	71
3.9	ชุดอัดรีดแบบอะลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง	73
3.10	รูปแสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการอัดรีดที่ความเร็วต่างๆ กัน	73
3.11	แสดงภาพถ่ายมาโครของชิ้นงาน (a) liquid casting, (b) SSM casting	73
3.12	ภาพสเก็ทข้อเท้าเทียม	74
3.13	ภาพสเก็ทตัวจับยึด	75
3.14	ภาพสเก็ทปริมาตรฐานรองเข้า	75
3.15	แสดง (a) แผ่นตัวอย่างอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัด (b) ขนาดตัวอย่างอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่นำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน	77
3.16	แสดงไดอะแกรมกระบวนการทางความร้อนที่ทำการศึกษา	77



รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.17	แสดง (a) แผ่นตัวอย่างอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัด (b) ขนาดตัวอย่างอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่นำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน	78
3.18	เครื่องขัดขัดละเอียดและขัดหยาบที่ใช้ในงานวิจัย	79
3.19	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและระบบคอมพิวเตอร์	79
3.20	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	80
3.21	เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Scale B	80
3.22	(ก) เครื่องทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึง (ข) คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล(ค) ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	81
3.23	แนวในการวางชิ้นงานบนเครื่องทดสอบ	83
3.24	ชิ้นงานขณะทดสอบและหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลการทดสอบขาเทียมได้เข้าชนิดแกนในแบบวัฏจักร	84
3.25	เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์	88
4.1	กราฟแสดงเส้นการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เมื่อไม่ผ่านกระบวนการ GISS ที่นำมาใช้ในกระบวนการวิจัย	90
4.2	กราฟแสดงเส้นการเย็นตัว (Cooling curve) ของน้ำโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 เมื่อไม่ผ่านกระบวนการ GISS ที่นำมาใช้ในกระบวนการวิจัย	91
4.3	ชิ้นงานจากแม่พิมพ์ทองแดงและบริเวณตรงกลางเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	92
4.4	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานและเปอร์เซ็นต์ของแข็งในอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075	92
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปล่อยฟองแก๊สและปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นของอะลูมิเนียมผสมเกรด 356 ที่ใช้ในงานวิจัย	93
4.6	ชิ้นงานที่ผ่านการทุบขึ้นรูป	94
4.7	ตำแหน่งชิ้นงานที่นำไปตัดขวาง (A) ชิ้นงานตัดขวางที่นำไปดูโครงสร้างจุลภาค (B)	95
4.8	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งต่างๆกัน ของชิ้นงานบริเวณที่ 3 (ไม่มี Holding time)	95

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่สภาวะปล่อยฟองแก๊ส 10 วินาทีพร้อมทั้งปล่อยทิ้งไว้ 10 วินาที	96
4.10	โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่สภาวะปล่อยฟองแก๊ส 15 วินาทีพร้อมทั้งปล่อยทิ้งไว้ 5 วินาที	97
4.11	ตำแหน่งที่เกิดการแยกเฟสของของเหลว (a) การทดลองแรก (b) การทดลองที่สองและเส้นประที่แสดงบริเวณที่นำไปทำเป็นท่อขาเทียม	98
4.12	กระบวนการปรับปรุงทางความร้อนแบบ T6 ของอะลูมิเนียมกิ่งของแข็งเกรด 7075	98
4.13	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อน (A) และหลัง (B) ผ่านกระบวนการทางความร้อน	99
4.14	กราฟแสดงค่าความแข็งก่อนและหลังปรับปรุงทางความร้อน	99
4.15	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานก่อนและหลังปรับปรุงทางความร้อน	100
4.16	ท่อขาเทียมที่ได้ภายหลังการกลึงตกแต่ง	100
4.17	ลักษณะของผิวที่ถูกปฏิเสธจากกระบวนการผลิต	101
4.18	โครงสร้างจุลภาคของแต่ละบริเวณ (โคน กลาง และปลาย) ของชิ้นงานอัดรีด	103
4.19	จุดบกพร่องที่เกิดในชิ้นงานข้อเท้าเทียมที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งแข็ง	104
4.20	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งแตกต่างกันของชิ้นงานในสภาวะที่ดีที่สุด (SSM B-1)	105
4.21	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งแตกต่างกันของชิ้นงานตัวจับยึดที่ความหนาเกจ 3 มิลลิเมตร	106
4.22	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งแตกต่างกันของชิ้นงานตัวจับยึดที่ความหนาเกจ 4 มิลลิเมตร	106
4.23	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งแตกต่างกันของชิ้นงานพีระมิดที่ความหนาเกจ 3 มิลลิเมตร	107
4.24	โครงสร้างจุลภาคที่ตำแหน่งแตกต่างกันของชิ้นงานตัวจับยึดที่ความหนาเกจ 4 มิลลิเมตร	107

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.25	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดแบบ SSM (a) กำลังขยาย 50X (b) กำลังขยาย 100X	108
4.26	แสดงโครงสร้าง (a), (c) อะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็งกึ่งของเหลวด้วยเทคนิค GISS (SSM) (b) อะลูมิเนียมผสม 7050-As Cast ที่ประกอบด้วย α -Al+MgZn ₂ และอินเตอร์เมทัลลิกเฟส Al ₂ Mg ₃ Zn ₃ (T phase)	109
4.27	(a) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS (SSM) (b) เฟสอื่นๆ (สีดำ) นอกเหนือจากเฟส α -Al (สีขาว) ในรูป a (c) โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม 7075 SSM ที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 °C 8 ชั่วโมง (d) เฟสอื่นๆ (สีดำ) นอกเหนือจากเฟส α -Al (สีขาว) ในรูป c	109
4.28	แสดงโครงสร้างจุลภาคของ (a) อะลูมิเนียมผสม 7075-SSM หลังการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 °C 8 ชั่วโมง (b) โครงสร้างจุลภาคในกรอบสี่เหลี่ยมสีขาวในรูป (a) (c) โครงสร้างจุลภาคผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 °C 4 ชั่วโมง (d) อินเตอร์เมทัลลิกเฟส ในอะลูมิเนียมผสม 7075	110
4.29	ภาพถ่าย SEM ของ (a)-(b) อะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดแบบ SSM (b) ผล EDS ของเฟสสีขาวในขอบเกรน (d) ผล EDS ของเฟสสีดำในขอบเกรน	111
4.30	แสดงผล XRD ของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านหล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็ง GISS(As-cast) และตัวอย่างที่ผ่านการอบละลายที่ 450 °C 1 ชั่วโมง (SHT 450-1) และ 480 °C 1 ชั่วโมง (SHT 480-1)	112
4.31	ภาพถ่าย OM ของตัวอย่าง (a) as-cast และตัวอย่างที่ผ่านการอบละลายที่ (b) 450 °C 1 ชั่วโมง (c) 450 °C 4 ชั่วโมง (d) 450 °C 8 ชั่วโมง (e) 480 °C 1 ชั่วโมง (f) 480 °C 8 ชั่วโมง	113
4.32	สัดส่วนพื้นที่ของขอบเกรนหลังจากผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 450 °C และ 480 °C ที่ระยะเวลาต่างๆ	114

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.33	(a), (c), (e) ภาพถ่าย SEM (b), (d), (f) ผล EDS ของเฟสขอบเกรนที่เหลืออยู่หลังจากอบ ละลายที่อุณหภูมิ 450 °C 1 ชั่วโมง	114
4.34	Element mapping ของ constituent particle ในตัวอย่างที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 480 °C 1 ชั่วโมง	115
4.35	Tensile strength และ %Elongation ของตัวอย่างที่ผ่านการอบละลาย (SHT)	116
4.36	อิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบละลายต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน	116
4.37	กราฟความแข็งแรงหลังการบ่มที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS	117
4.38	กราฟแท่งแสดงค่าความแข็งแรงจากการดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดของอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิค GISS หลังการบ่มที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ	118
4.39	ชิ้นงานขาเทียมโลหะใต้เข่าชนิดแกนในที่ส่งทดสอบ	120
4.40	ท่อขาเทียมที่ผ่านการชุบผิวสีต่างๆ	121
4.41	การจัดวางชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบ	121
4.42	ตัวแปรวัฏจักรภาระในการทดสอบวัฏจักรแยกสำหรับเท้าเทียมแบบมีข้อและเท้าเทียม	122
4.43	กราฟจริงที่ปรากฏหน้าจอคอมพิวเตอร์ขณะทำการทดสอบ	122
4.44	โครงสร้างการวิเคราะห์ต้นทุนต่อชิ้นของผลิตภัณฑ์เพื่อสร้างแบบจำลองต้นทุน	124
4.45	แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียม	125
4.46	แสดงแผนภาพต้นไม้ของความต้องการ	132