สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(18)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการ	3
1.2.1 อะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม (Aluminum and Aluminum Alloys)	3
1.2.2 การจำแนกประเภทของอะลูมิเนียมผสม	4
1.2.3 โลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Al-Zn Alloys)	12
1.2.4 การเพิ่มความแข็งแรงโดยการเอจจิง (Aging or Precipitation Hardening) ของอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 7XXX	13
1.2.5 อะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651	14
1.2.6 การคืบ (Creep)	15
1.2.7 กลไกการคืบ (Creep Mechanisms) ของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมชนิด M (Class M Alloy) และโลหะชนิดสารละลาย-ของแข็งชนิด A (Class A Alloy)	20
1.3 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการ	28
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	28
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	28
1.7 สถานที่ทำการวิจัย	28
2. วิธีการวิจัย	29
2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	29
2.2 ชิ้นทดสอบการคืบ (Specimen for Creep Test)	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบ (Specimen Holder)	30
2.4 เครื่องทดสอบและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล	31
2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของชิ้นตัวอย่าง	32
2.6 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)	32
2.7 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)	33
2.8 การทดสอบการคืบ (Creep Test)	33
2.9 การตรวจโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมก่อนและหลังการทดสอบการคืบ	34
3. ผลและการอภิปรายผล	36
3.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของตัวอย่างอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651	36
3.2 ผลการทดสอบความแข็ง	37
3.3 ผลการทดสอบแรงดึง	38
3.4 ผลการทดสอบการคืบ	41
3.4.1 เส้นโค้งการคืบ (Creep Curve)	41
3.4.2 ค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n)	45
3.4.3 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep, Q_c)	51
3.5 โครงสร้างจุลภาค (Microstructures)	55
3.5.1 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ตามสภาพที่รับมา (As-Received Plate)	56
3.5.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ผ่านการให้ความร้อน (Pre-Heated) ก่อนการทดสอบการคืบ	57
3.5.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150°C	58
3.5.4 โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C	58
3.5.5 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การอภิปรายผล	60
3.6.1 ค่ายกกำลังของความเค้น (Stress Exponent, n)	60
3.6.2 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ (Activation Energy for Creep, Q_c)	62
3.6.3 ตารางเปรียบเทียบค่า Q_c และค่า n	63
3.6.4 โครงสร้างจุลภาค (Microstructures)	64
4. บทสรุปและเสนอแนะ	65
4.1 สรุปผล	65
4.2 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	71
ก. แบบชิ้นทดสอบการคืบ	72
ข. แบบประกอบอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบ	74
ค. ภาพถ่ายอุปกรณ์บันทึกข้อมูลทดสอบการคืบ	77
ง. ขั้นตอนการสอบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอนุพันธ์ที่แปรค่าได้แบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer)	85
จ. ขั้นตอนการกำหนดค่าโปรแกรมการดึงสำหรับการทดสอบการคืบ(Creep Test) และขั้นตอนการกำหนดค่าโปรแกรมการบันทึกข้อมูลการคืบ	90
ประวัติผู้เขียน	104

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 กลุ่มของโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ขึ้นรูป (Wrought Aluminum)	6
1.2 แสดงขั้นตอนของ Precipitation-Hardening	13
1.3 อุณหภูมิเกิดการคืบของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมต้านทานอุณหภูมิสูง	16
3.1 องค์ประกอบเคมีของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ใช้ในการวิจัยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจาก ASM Handbook	36
3.1 (ต่อ) องค์ประกอบเคมีของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ใช้ในการวิจัยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจาก ASM Handbook	37
3.2 ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651	37
3.2 (ต่อ) ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651	38
3.3 สมบัติเชิงกลของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 จากการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียด (Strain Rate) คงที่ 1×10^{-3} s^{-1} และที่อุณหภูมิต่างๆ	38
3.4 สมบัติเชิงกลโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 150°C และ Strain Rate ($\dot{\varepsilon}$) ต่างๆ	41
3.5 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\varepsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง 100-440 MPa	46
3.6 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\varepsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง 80-380 MPa	47
3.7 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\varepsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง 80-200 MPa	48
3.8 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\varepsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C ที่ระดับความเค้นการคืบระหว่าง 40-120 MPa	50
3.9 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\varepsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่ความเค้นการคืบ 80 MPa และที่อุณหภูมิต่างๆ	52
3.10 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\varepsilon}_{ss}$) จากการทดสอบการคืบที่ความเค้นการคืบคงที่ 100 MPa และที่อุณหภูมิต่างๆ	53

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.11 ค่า Minimum Creep Rate ($\dot{\varepsilon}_s$) ความเค้นการคืบคงที่ 120 MPa และที่อุณหภูมิต่างๆ	54
3.12 ค่ายกกำลังของความเค้น ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C	61
3.13 พลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ ทำการทดสอบที่ความเค้นคงที่ 80, 100 และ 120 MPa	62
3.14 ตารางเปรียบเทียบค่า Q_c และค่า n	63
ผง. 1 ข้อมูลการสอบเทียบ LVDT	88

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	ตัวอย่างแม่พิมพ์งานฉีดพลาสติกทำจากโลหะอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูง	2
1.2	ผลิตภัณฑ์ของโลหะอะลูมิเนียมผสม	5
1.3	แผนภาพสมดุลเฟสของอะลูมิเนียม-สังกะสี	12
1.4	ลักษณะของเส้นโค้งการคืบ	16
1.5	เส้นโค้งการคืบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่ และค่าความเค้นต่างๆ ($\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3>\sigma_4$)	17
1.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $log\,\dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $log\,\sigma$	18
1.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $log\,\dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $log\,\sigma$	18
1.8	เส้นโค้งการคืบที่อุณหภูมิต่างๆ ($T_1>T_2>T_3>T_4$) และความเค้นคงที่ σ	19
1.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $ln\,\dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$	20
1.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\sigma)$ และ $\log(\dot{\varepsilon}_{ss})$ ของโลหะบริสุทธิ์ และโลหะผสมชนิด M (Class M Alloy)	21
1.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\sigma)$ และ $\log(\dot{\varepsilon}_{ss})$ ของโลหะผสม ชนิดสารละลายของแข็งชนิด A (Class A Alloy)	23
2.1	ชิ้นทดสอบมาตรฐาน ASTM 557M-94	30
2.2	ชิ้นทดสอบการคืบ	30
2.3	อุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบ (Specimen Holder)	31
2.4	ภาพถ่ายเครื่องทดสอบการคืบพร้อมอุปกรณ์บันทึกข้อมูล	32
2.5	ไดอะแกรมแสดงเครื่องทดสอบการคืบพร้อมอุปกรณ์ควบคุมและบันทึกข้อมูล	35
3.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม ของโลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 7075-T651 ทดสอบแรงดึงที่ Strain Rate ($\dot{\varepsilon}$) คงที่ $1\times10^{-3}\ s^{-1}$ และที่อุณหภูมิ ต่างๆ	39
3.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม โลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 7075-T651 ทดสอบที่อุณหภูมิคงที่ 150°C และค่า Strain Rate ($\dot{\varepsilon}$) ต่างๆ ระหว่าง 5.6×10^{-6} และ $1\times10^{-3}s^{-1}$	40

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.3	เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C ที่ค่าความเค้น 100, 150, 200, 400 และ 410 MPa	42
3.4	เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 150°C ที่ค่าความเค้น 80, 100, 150, 200, 300, 320 และ 360 MPa	43
3.5	เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 200°C ที่ค่าความเค้น 80, 100, 120 และ 140 MPa	44
3.6	เส้นโค้งการคืบทดสอบที่อุณหภูมิ 250°C ที่ค่าความเค้น 40, 60, 80, 100 และ 120 MPa	45
3.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 100°C	46
3.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 150°C	48
3.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 200°C	49
3.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 250°C	50
3.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\log \sigma$ ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200 และ 250°C	51
3.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ทดสอบที่ความเค้น 80 MPa	52
3.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ทดสอบที่ความเค้น 100 MPa	53
3.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ทดสอบที่ความเค้น 120 MPa	54
3.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \dot{\varepsilon}_{ss}$ และค่า $\frac{1}{T}$ ทดสอบที่ความเค้นการคืบ 80, 100 และ 120 MPa	55
3.16	โครงสร้างจุลภาคของแผ่นโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ตามสภาพที่รับมา (As-Received Plate) (a) ภาพด้านหน้า (b) ภาพด้านข้าง และ (c) ภาพด้านบน กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO_3, 1.5 mL HCl, 1.5 mL HF, 95 mL Water	56

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.17 โครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ที่ผ่านการให้ความร้อน (Pre-Heated) 30 นาที ที่อุณหภูมิ (a) 100, (b) 150, (c) 200 และ (d) 250°C กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO_3, 1.5 mL HCl, 1.5 mL HF, 95 mL Water 57

3.18 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบ (As-Received) (b) ตัวอย่างภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 150°C ความเค้นการคืบ 100 MPa กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO_3, 1.5 mL HCl, 1.5 mL HF, 95 mL Water 58

3.19 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบ (As-Received) (b) ตัวอย่างภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 200°C ความเค้นการคืบ 100 MPa กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO_3, 1.5 mL HCl, 1.5 mL HF, 95 mL Water 59

3.20 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 (a) แผ่นตัวอย่างก่อนการทดสอบ (As-Received) (b) ตัวอย่างภายหลังการทดสอบการคืบที่อุณหภูมิ 250°C ความเค้นการคืบ 100 MPa กัดด้วยสารละลาย 2.5 mL HNO_3, 1.5 mL HCl, 1.5 mL HF, 95 mL Water 60

3.21 ค่ายกกำลังของความเค้น ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ในช่วงอุณหภูมิ 100-250°C 61

3.22 ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการคืบ ของโลหะอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075-T651 ในช่วงความเค้นการคืบ 80-120 MPa 63

ผค. 1 OMEGA Miniature Displacement Transducers ±5.0 mm. รุ่น LD400 – 5 78

ผค. 2 National Instruments P/N 778629-01 PCI-6031 Low-Cost Multifunction I/O Board for PCI 200 ks/s, 16 - Bit, 16SE/8DI Inputs, 8 DIO, 2 Counter/Time. Kit Includes Hardware and NI-DAQ Driver Software

ผค. 3 National Instruments P/N 776844-01 SCB-68 Shielded Connector Block. I/O Signal Termination Accessory for 68 - Pin MIO Boards. Order SH6868 or R6868 Cable Separately. 79

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ผค. 4	National Instruments P/N 184749-01 SH68-68-EP 68-pin to 68-Pin Enhanced Performance Shielded Cable, 1 Meter	79
ผค. 5	แหล่งจ่ายไฟปรับค่าได้ 3 เอ๊าทพุต (Triple Output DC Power Supply) รุ่น EPS 3250A	80
ผค. 6	เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล	80
ผค. 7	Digital Multimeter “FLUKE” รุ่น 179 ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ – 40°C ถึง 400°C	81
ผค. 8	โพรบของเทอร์โมคับเปิ้ลประเภท K ขนาด 80BK1	81
ผค. 9	สายต่อชนิด TL75 Hard Point Test Lead Set CAT III 1000 V, CAT IV 600 V, 10A	82
ผค. 10	สายต่อชนิด Alligator Clips to Multi-Stacking Banana Plugs	82
ผค. 11	เครื่องทดสอบ HOUNSFIELD TEST EQUIPMENT Model H 100ks Serial No. 0068 พร้อมอุปกรณ์เตาเผาและคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล	83
ผค. 12	เทอร์โมคับเปิ้ล TC Shield = 6 M. TYPE CA (K) JB – 69455	84
ผง. 1	อุปกรณ์จับยึด Linear Variable Differential Transformer (LVDT)	86
ผง. 2	แสดงการประกอบอุปกรณ์สอบเทียบ LVDT	87
ผง. 3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Millimeter กับ Volt DC	89
ผจ. 1	Desktop คอมพิวเตอร์	91
ผจ. 2	Batch Hearders	92
ผจ. 3	Equipment Setup	92
ผจ. 4	Equipment Setup	93
ผจ. 5	Calculations	93
ผจ. 6	Calculations	94
ผจ. 7	Test setting	95
ผจ. 8	Desktop คอมพิวเตอร์	95
ผจ. 9	Desktop ของ VirtualBench-Logger	97
ผจ. 10	หน้าต่างของ Logger Setting	98
ผจ. 11	หน้าต่างของ File Configuration	99
ผจ. 12	หน้าต่างของ Time Configuration	100
ผจ. 13	หน้าต่างของ Transducer Ch0	101

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ผจ. 14 หน้าต่างของ Transducer Ch1 102

ผจ. 15 หน้าต่างของ VirtualBench-Logger 103