สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง	**4**
2.1 วัสดุ	4
2.2 การเชื่อมโลหะ	10
2.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุ	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	**31**
3.1 แผนการดำเนินงาน	31
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง	38
3.3 การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่สภาวะการเชื่อมต่างๆ	43
3.4 การทดสอบสมบัติทางกล	46
3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์	**50**
4.1 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	50
4.2 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	57
4.3 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	63
4.4 สมบัติของรอยต่อที่ความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	72

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง **81**

5.1 สรุปผลการทดลอง 81

5.2 ข้อเสนอแนะ 83

บรรณานุกรม 84

ภาคผนวก 88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์	4
2.2	การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม	5
2.3	สมบัติของอลูมิเนียมผสม	5
2.4	อักษรห้อยท้ายที่แสดงรายละเอียดของการผลิต	7
2.5	ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมเกรด 6063	9
2.6	สมบัติทางกลของอลูมิเนียมเกรด 6063	9
2.7	สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมเกรด 6063	9
2.8	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า SKH57	10
2.9	โมดูลัสการยืดหยุ่นของโลหะบางชนิด	24
2.10	ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด	25
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	31

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	หลักการพื้นฐานในการเชื่อมโลหะ	11
2.2	รูปแบบของกระบวนการเชื่อม	11
2.3	การเชื่อมด้วยการเสียดทาน	12
2.4	ขั้นตอนการเชื่อมแบบเสียดทานทั่วไป (ก) ชิ้นงานด้านซ้ายหมุนด้วยความเร็วรอบ (n) และชิ้นงานด้านขวาถูกเลื่อนเข้าด้วยแรงจากไฮดรอลิก ; (ข) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดด้วยแรง (F_i) จนชิ้นงานหลอมละลาย ; (ค) ชิ้นงานด้านขวาถูกอัดจนติดกันอย่างสมบูรณ์กับชิ้นงานด้านซ้าย ชิ้นงานเชื่อมจะหยุดหมุนทันที	13
2.5	การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน	14
2.6	กลไกการเกิดแนวเชื่อมแสดงภาคตัดในรูปที่ 2.5	15
2.7	เครื่องมือเชื่อม FSW	18
2.8	เครื่องมือเชื่อมที่ออกแบบสำหรับรอยต่อชนอลูมิเนียม 2014	18
2.9	โครงสร้างมหภาคโลหะเชื่อม	18
2.10	รูปแบบรอยต่อการเชื่อม FSW	19
2.11	(ก) โครงสร้างจุลภาคอลูมิเนียมแผ่นรีด 2024 และ (ข) โครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมของอลูมิเนียม 2024	20
2.12	ความแตกต่างของการสอดตัวกวนเข้าสู่รอยต่อชนของการเชื่อมวัสดุเดียวกันและต่างกัน	21
2.13	แผนภาพสมดุลเฟสอลูมิเนียม-ทองแดง ที่แสดงขั้นตอนการบ่มแข็งและรูปแบบโครงสร้างจุลภาค	23
2.14	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกวาดของโลหะผสม 85%Al-15%Ag ที่แสดงเฟส γ' และพื้นที่ GP กำลังขยาย 40,000 เท่า	24
2.15	ผลของอุณหภูมิต่อเวลาการบ่มแข็งและความแข็งแรงครากของโลหะผสม 96%Al-4%Cu	24
2.16	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมที่ผ่านการบ่มแข็งขณะทำการเชื่อมแบบหลอมละลาย: (a) โครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิสูงสุด และ (b) โครงสร้างจุลภาคในแนวเชื่อมหลังจากการเย็นตัวช้ามาที่อุณหภูมิห้อง	26
2.17	การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ	27
2.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้นกับความเครียด	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.19	การกระจายตัวของความเค้นเนื่องจาก (ก) รูวงกลม และ (ข) รูวงรี	30
3.1	ภาพการไหลโดยรวมขั้นตอนการดำเนินงาน	36
3.2	แผนภาพการไหลขั้นตอนการทดลอง	37
3.3	มิติแผ่นอลูมิเนียม (t = 6.3 มม., หน่วย: มม.)	38
3.4	แผนภาพเวลา อุณหภูมิ และขั้นตอนการอบอ่อน	39
3.5	อุปกรณ์จับยึด	40
3.6	ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน	41
3.7	การขันยึดแน่นชิ้นงานกับอุปกรณ์จับยึด	41
3.8	เครื่องมือนาฬิกาวัดระดับแนวขนาน (Dial Gauge)	42
3.9	เครื่องตัดแผ่นโลหะ	42
3.10	เครื่องกลึง (Machine lathe)	43
3.11	เครื่องกัดอัตโนมัติซีเอนซี (CNC Milling Machine)	43
3.12	เครื่องตัดชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค	44
3.13	เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง	44
3.14	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	42
3.15	ส่วนต่างๆ ของตัวกวน	47
3.16	การขึ้นรูปเครื่องมือเชื่อมด้วยการกลึง	47
3.17	การเตรียมผิวรอยต่อ	47
3.18	การเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนรอยต่อชนอลูมิเนียม	
3.19	การเคลื่อนที่ลงของรอยเชื่อม	48
3.20	การเดินแนวเชื่อมบนรอยต่ออลูมิเนียมผสม A6063	49
3.21	แผนภาพเวลา อุณหภูมิ และขั้นตอนการอบคืนไฟ T4	50
3.22	แผนภาพเวลา อุณหภูมิ และขั้นตอนการอบคืนไฟ T5	50
3.23	แผนภาพเวลา อุณหภูมิ และขั้นตอนการอบคืนไฟ T6	50
3.24	ใบเครื่องมือตัด	51
3.25	ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (หน่วย: มม.)	51
3.26	การตัดอลูมิเนียม	52
3.27	ชิ้นงานที่หล่อเสร็จแล้ว	52
3.28	การขัดกระดาษทราย	52
3.29	น้ำยาที่ใช้ในการกัดกรด	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	ผิวหน้าแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม 6063 สภาพจำหน่าย	54
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง การยืดตัว และความเร็วเดินแนวเชื่อมของโลหะเชื่อมเสียดทานแบบกวน อลูมิเนียม 6063 สภาพจำหน่าย ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm	56
4.3	ลักษณะรูปแบบรอยฉีกขาดของชิ้นทดสอบแรงดึงที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm: (ก) 50 mm/min (ข) 75 mm/min (ค) 100 mm/min และ (ง) 200 mm/min	57
4.4	โครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm	58
4.5	กลไกการเกิดแนวเชื่อม	59
4.6	ผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยตัวกวนทรงเกลียวนขวาที่ความเร็วเดิน 125 mm/min	61
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนไฟทันที	61
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืดตัว และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนไฟหลังบ่มแข็งธรรมชาติ 1 สัปดาห์	63
4.9	ตำแหน่งการเกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบแรงดึงที่ผ่านการทำ Solution แบบต่างๆ	64
4.10	โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียม 6063	65
4.11	โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมที่ทำการอบอ่อน	68
4.12	โครงสร้างแนวเชื่อมแบบเกลียวขวาความเร็วรอบ 2000 rpm ความเร็วเดินแนวเชื่อม 125mm/min สภาวะที่ไม่ได้ผ่านการอบคืนไฟ: (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างอลูมิเนียมหลัก (ค) บริเวณพื้นที่อิทธิพลความร้อน-กลและพื้นที่การกวน (ง) พื้นที่การกวนรุนแรง (จ) พื้นที่ใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม	68
4.13	โครงสร้างแนวเชื่อมแบบเกลียวขวาผ่านการทำ Solution แบบT4 Heatหลังเชื่อม: (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างอลูมิเนียมหลัก (ค) บริเวณพื้นที่อิทธิพลความร้อน-กลและพื้นที่การกวน (ง) พื้นที่การกวนรุนแรง (จ) พื้นที่ใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม	69
4.14	โครงสร้างแนวเชื่อมแบบเกลียวขวาบ่มแข็งธรรมชาติ 1 สัปดาห์ทำ Solution แบบT4 : (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างอลูมิเนียมหลัก (ค) บริเวณพื้นที่อิทธิพลความร้อน-กลและพื้นที่การกวน (ง) พื้นที่การกวนรุนแรน (จ) พื้นที่ใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	โครงสร้างแนวเชื่อมแบบเกลียวขวาผ่านการทำ Solution แบบT6 Heat หลังเชื่อม: (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างอลูมิเนียมหลัก (ค) บริเวณพื้นที่อิทธิพลความร้อน-กลและพื้นที่การกวน (ง) พื้นที่การกวนรุนแรง (จ) พื้นที่ใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม	72
4.16	โครงสร้างแนวเชื่อมแบบเกลียวขวาบ่มแข็งธรรมชาติ 1 สัปดาห์ทำ Solution แบบT6 : (ก) โครงสร้างมหภาค (ข) โครงสร้างอลูมิเนียมหลัก (ค) บริเวณพื้นที่อิทธิพลความร้อน-กลและพื้นที่การกวน (ง) พื้นที่การกวนรุนแรง (จ) พื้นที่ใต้บ่าเครื่องมือเชื่อม	73
4.17	โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min	61
4.18	ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	64
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของรอยต่อและความเร็วเดินแนวต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 1500 rpm	65
4.20	ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	67
4.21	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	68
4.22	โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 1500 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min	70
4.23	ผิวหน้าแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	73
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของรอยต่อและความเร็วเดินแนวต่างๆ ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm	74
4.25	ตำแหน่งการพังทลายของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	75
4.26	โครงสร้างมหภาคของรอยต่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนว 50-200 mm/min	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.27	โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมอลูมิเนียมแผ่นรีดและแผ่นหล่อที่เชื่อมด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm และความเร็วเดินแนวเชื่อม 100 mm/min	78