

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมต่อโลหะผสมโดยการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานในการทดลองการเชื่อมวัสดุผสมสามชนิดได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม และมีตัวแปรในการทดลองที่สำคัญได้แก่ แรงดัน และระยะเวลาในการกดแช่ การทดลองได้ประยุกต์ใช้เครื่องกลึงโดยการสร้างระบบต้นกำลังไฮดรอลิกส์ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานหลังจากการทดลองทำการตรวจสอบแนวเชื่อมระดับมาโคร และจุลภาคทดสอบแรงดึง และทดสอบความแข็ง ผลการทดลองพบว่าการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมสามารถยึดติดกันได้ดี ซึ่งสามารถต้านทานแรงดึงได้สูงที่สุดที่ 1,091 N และสามารถยึดติดกันได้ดีที่สุดที่ขนาดของแรงในการเชื่อมเท่ากับ 176 N/m^2 และที่แรง 206 N/m^2 เหมาะสมมากที่สุดกับการเชื่อมอลูมิเนียมกับวัสดุผสม และการทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมของวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลืองจะแข็งที่สุด เนื่องจากผิวทองเหลืองมีความแข็งมากที่สุด ประมาณ 122.7 HV ทองแดง 94.4 HV และอลูมิเนียม 56.1 HV แรงเพิ่มขึ้นทำให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นระยะเวลากดแช่ที่เหมาะสมการเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมประมาณ 6 วินาที การเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดงและอลูมิเนียมกับทองเหลืองประมาณ 4 วินาที

คำสำคัญ:อลูมิเนียม ทองแดง ทองเหลือง การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน การทดสอบแรงดึง

Abstract

This research aims to study the mechanical properties and microstructure of alloy steel joined by using friction welding in dissimilar metals welding: copper, brass and aluminum, together in an experiment. The major variables in the experiment are pressure and duration of weld holding. The experiment applies a lathe machine by creating a hydraulic power unit for friction welding. After the experiment, the weld joint is checked in both macro and micro structures. Tension and hardness are tested as well. Results of experiment show that the friction welding of aluminum and aluminum is good. The aluminum is well attached to each other with the maximum tensile strength of 1,091 N. They can be attached to each other best when the welding force is 176 N/m^2 . It also shows that the welding force of 206 N/m^2 is the most suitable for welding aluminium to other alloys. Based on the hardness test of welding joint, it is found that the welding joint between Aluminium and brass is the strongest, as the surface of brass is the strongest (122.7 HV), while the hardness of copper and aluminium are 94.4 HV and 56.1 HV, respectively. The increased force makes the welding joint becomes stronger. Optimum welding holding time in welding of aluminium and aluminum is approximately 6 seconds, while the optimum welding holding time in welding of aluminum and copper and aluminum and brass are approximately 4 seconds.

Keyword: Aluminum, Copper, Brass, Friction Welding, Tensile Test

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับใช้ในการทดสอบ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณประจำปี 2555 ในงานวิจัยฉบับนี้ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถจะนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับงานวิจัยฉบับนี้ต่อไป

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 กระบวนการเชื่อม	6
2.3 การเชื่อมแบบเสียดทาน	17
2.4 การแบ่งวิธีการเชื่อมแบบแรงเสียดทานตามหลักการส่งถ่ายพลังงาน	21
2.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเชื่อมต่อโลหะแบบแรงเสียดทาน	24
2.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและความหมาย	26
2.7 โลหะที่ใช้ในการทดสอบ	28
2.8 การตรวจสอบวัสดุทางโลหะวิทยา	34
2.9 ทฤษฎีการทดสอบแรงดึง	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	52
3.1 แผนการดำเนินโครงการ	52
3.2 การออกแบบ / เครื่องมือ	55
3.3 วิธีการทดสอบ / วิธีการวัดผล	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์	65
4.1 การทดสอบแรงดึง	65
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างแรงที่ใช้ในการเชื่อมกับความต้านทานแรงดึง	70
4.3 การศึกษาระยะเวลาในการกดแซ่	76
4.4 การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อม	80
4.5 การตรวจสอบโครงสร้างการเชื่อมติดกันของวัสดุผสมระหว่างทองแดง,ทองเหลือง และอลูมิเนียม	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	99
5.1 สรุปผลการทำโครงการ	99
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการ	101
5.3 ข้อเสนอแนะในการทดลอง	101
บรรณานุกรม	102
ภาคผนวก ก	103
มาตรฐานและคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุอลูมิเนียม	104
คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกลของวัสดุทองแดง	107
มาตรฐานและคุณสมบัติทางกลของวัสดุทองเหลือง	111
ภาคผนวก ข	112
ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบ	113
ภาคผนวก ค	119
ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงสูงสุดของการเชื่อม	120
ภาคผนวก ง	121
ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความแข็งของผิวแนวเชื่อมสูงสุดของการเชื่อมอลูมิเนียมกับโลหะผสม	122
ภาคผนวก จ	123
ผลการศึกษาเวลากดแซ่และค่าแรงดันสูงสุดของการเชื่อมอลูมิเนียมกับโลหะผสม	124

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ฉ	125
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ	126

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของอลูมิเนียม	29
2.2	คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม	29
2.3	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทองแดง	32
2.4	คุณสมบัติทางกลของทองแดง	32
2.5	สมบัติทางกลของทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีในระดับต่างๆ	34
2.6	ขนาดขึ้นทดสอบโดยการดึงมีภาคตัดขวางกลม	41
2.7	ขนาดขึ้นทดสอบโดยการดึงมีภาคตัดขวางสี่เหลี่ยมมุมฉาก (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)	42
2.8	ค่าความเร็วความเค้นในการทดลองแรงดึง สำหรับเหล็กกล้าและโลหะไม่ใช่เหล็ก	45
3.1	จำนวนชิ้นงานทดสอบทั้งหมดของแรงดึง	55
3.2	จำนวนชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมทั้งหมด	55
3.3	จำนวนชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา	56
4.1	ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม	65
4.2	ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลือง	66
4.3	ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดง	67
4.4	ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมด้วยแรงเสียดทาน แรงที่ใช้ในการเชื่อม 176 N/m ²	76
4.5	ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดงด้วยแรงเสียดทาน แรงที่ใช้ในการเชื่อม 206 N/m ²	77
4.6	ค่าแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลืองด้วยแรงเสียดทาน แรงที่ใช้ในการเชื่อม 206 N/m ²	78
4.7	การทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม	80
4.8	การทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง	82
4.9	การทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับทองเหลือง	82

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.1	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของอลูมิเนียม	104
ก.2	คุณสมบัติทางอุณหภูมิ	104
ก.3	คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม	104
ก.4	ส่วนผสมทางเคมี	105
ก.5	มาตรฐานส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมเกรดต่างๆ	106
ก.6	คุณสมบัติของวัสดุทองแดง B 0720323	107
ก.7	คุณสมบัติของโลหะทองแดงที่ค่อนข้างบริสุทธิ์	108
ก.8	สมบัติของโลหะทองแดงค่อนข้างบริสุทธิ์เมื่อเกิดปฏิกิริยา	109
ก.9	เปรียบเทียบการนำไฟฟ้าและความร้อนของโลหะต่างๆที่ 20 °C	109
ก.10	ภาวะประสงค์สำหรับทองแดงขึ้นรูปแบบเย็น	110
ก.11	ข้อบ่งชี้ทองแดงที่มีขนาดเกรนต่างๆ	110
ก.12	ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทองเหลืองชนิดต่างๆ	111
ค.1	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม	120
ค.2	ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลือง	120
ง.1	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม	122
ง.2	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองเหลือง	122
ง.3	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของสูงสุดของการเชื่อมวัสดุอลูมิเนียมกับทองแดง	122
จ.1	เวลากดแช่และค่าแรงดันสูงสุดของการเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม	124
จ.2	เวลากดแช่และค่าแรงดันสูงสุดของการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองเหลือง	124
จ.3	เวลากดแช่และค่าแรงดันสูงสุดของการเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง	124

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบหลอมละลาย	6
2.2	กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์	7
2.3	กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดแกนฟลักซ์	8
2.4	กระบวนการเชื่อมพลาสมา	8
2.5	กระบวนการเชื่อมแบบอาร์คโลหะก๊าซคลุม	9
2.6	กระบวนการเชื่อมแบบTIG	10
2.7	กระบวนการเชื่อมแบบ MIG	11
2.8	กระบวนการเชื่อมด้วยการตี	12
2.9	ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยการตี	12
2.10	กระบวนการเชื่อมในสถานะเย็น	13
2.11	กระบวนการเชื่อมด้วย Roll Welding	13
2.12	กระบวนการเชื่อมดิฟฟิวชัน	14
2.13	กระบวนการเชื่อมอุลตราโซนิก	14
2.14	กระบวนการเชื่อมจุด	15
2.15	กระบวนการเชื่อมตะเข็บ	16
2.16	กระบวนการเชื่อมฟีกชั้น	16
2.17	ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมแบบแรงเสียดทาน	17
2.18	ขั้นตอนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบจับตรงหรือต่อเนื่อง	21
2.19	ขั้นตอนการเชื่อมแรงเสียดทานแบบอาศัยแรงเฉื่อย	22
2.20	ขั้นตอนการเชื่อมแรงเสียดทานแบบผสม	23
2.21	โครงสร้างเฟอร์ไรต์	25
2.22	โครงสร้างซีเมนไทต์	26
2.23	โครงสร้างเพิร์ลไลต์	26
2.24	โครงสร้างออสเทนไนต์	27
2.25	โครงสร้างมาร์เทนไซต์	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.26	การเทเรซินหุ้มชิ้นทดสอบ	35
2.27	การจัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายสองเบอร์สุดท้าย	36
2.28	กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบสเตอริโอ	38
2.29	ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดขวางกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก	39
2.30	ลักษณะชิ้นทดสอบภาคตัดขวางกลมหลังจากขาด	40
2.31	ข้อผิดพลาดสำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบแบน	43
2.32	ลักษณะปลายยึดชิ้นทดสอบโดยการดึง	44
2.33	ลักษณะลิ่มยึดที่ใช้ยึดชิ้นทดสอบโดยการดึง	44
2.34	แผนภาพความเค้น-ความเครียดของเหล็ก	46
2.35	ความยืดในแต่ละช่วงบนความยาวพิักด	47
2.36	ชนิดของเครื่องวัดการยืด	48
2.37	ลักษณะรอยแตกขาดของชิ้นทดสอบแบบต่างๆ	48
2.38	การเปลี่ยนแปลงความแข็งและความเหนียวเมื่อเปลี่ยนรูปร่างชิ้นทดสอบ	49
2.39	ผลกระทบของการให้แรงดึงเบื้องต้นต่อความเครียด	51
3.1	การออกแบบการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน	52
3.2	ชุดควบคุมไฮดรอลิกส์	53
3.3	กระบอกไฮดรอลิกส์	53
3.4	ตัวกันสะท้อน	54
3.5	เครื่องกลึงแนวนอน	54
3.6	ชิ้นทดสอบ ทองแดง ทองเหลือง และอลูมิเนียม	55
3.7	การติดตั้งชุดให้แรงดันให้ได้ระยะที่เหมาะสม	56
3.8	นำชิ้นงานอลูมิเนียมที่ใช้ทดสอบมาจับยึดกับหัวจับเครื่องกลึง	57
3.9	แสดงการจับยึดทองแดงโดย Collect Milling	57
3.10	แสดงการปรับตั้งความเร็วรอบ	58
3.11	แสดงการปรับตั้งขนาดของแรงดัน	58
3.12	แสดงการเคลื่อนที่ชิ้นงานเข้ามาชนกัน	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	แสดงการเชื่อมติดกันของ อลูมิเนียมกับทองแดง
3.14	ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมด้วยความเร็วรอบ และแรงที่เหมาะสม
3.15	แสดงชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมในความเร็วรอบ แรง และเวลาทดแซ่ที่ไม่เหมาะสม
3.16	เลื่อยมือ
3.17	ชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง
3.18	ชิ้นงานที่ผ่าแล้ว
3.19	ชิ้นงานที่นำไปหล่อเรซิน
3.20	เครื่องขัด 63
3.21	ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยการผ่าแล้วนำไปส่องกล้อง Microscope
3.22	เครื่องทดสอบแรงดึง
3.23	แสดงการตรวจสอบความแข็งของผิวรอยเชื่อม
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Al
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Br
4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Cu
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงสูงสุดของวัสดุผสมกับแรงดัน
4.5	Normplot of Residuals for 147 N/m ² , 176 N/m ² , 206 N/m ² , 235 N/m ²
4.6	Residual Histogram for 147 N/m ² , 176 N/m ² , 206 N/m ² , 235 N/m ²
4.7	Normplot of Residuals for 147 N/m ² , 176 N/m ² , 206 N/m ² , 235 N/m ²
4.8	Residual Histogram for 147 N/m ² , 176 N/m ² , 206 N/m ² , 235 N/m ²
4.9	Normplot of Residuals for 147 N/m ² , 176 N/m ² , 206 N/m ² , 235 N/m ²
4.10	Residual Histogram for 147 N/m ² , 176 N/m ² , 206 N/m ² , 235 N/m ²
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Al
4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Cu
4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดของ Al+Br
4.14	แสดงความสัมพันธ์การต้านทานแรงดึงสูงสุดระหว่างของวัสดุผสมกับเวลาทดแซ่
4.15	ชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมสูงสุดของAl+Al	81
4.17	ชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง	82
4.18	แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมสูงสุดของAl+Cu	83
4.19	ชิ้นงานการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมอลูมิเนียมกับทองแดง	83
4.20	แสดงค่าความแข็งของแนวเชื่อมสูงสุดของAl+Br	84
4.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงสุดของวัสดุผสมกับแรงดัน	85
4.22	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 147N/m ²	86
4.23	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 147 N/m ² (ขยาย 100X)	86
4.24	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 176N/m ²	87
4.25	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 176 N/m ² (ขยาย 100X)	87
4.26	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 206N/m ²	88
4.27	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 206N/m ² (ขยาย 100X)	88
4.28	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 235N/m ²	89
4.29	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียมที่แรงดัน 235N/m ² (ขยาย 100X)	89
4.30	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 147N/m ²	90
4.31	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงดัน147N/m ² (ขยาย 100X)	90
4.32	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 176N/m ²	91
4.33	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงดัน 176N/m ² (ขยาย 100X)	91
4.34	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 206N/m ²	92

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.35	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงดัน 206N/m ² (ขยาย 100X)	92
4.36	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 235N/m ²	93
4.37	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองเหลืองที่แรงดัน 235N/m ² (ขยาย 100X)	93
4.38	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 147N/m ²	94
4.39	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงดัน 147N/m ² (ขยาย 100X)	94
4.40	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 176N/m ²	95
4.41	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงดัน 176N/m ² (ขยาย 100X)	95
4.42	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 206N/m ²	96
4.43	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงดัน 206N/m ² (ขยาย 100X)	96
4.44	ชิ้นงานที่นำไปตรวจสอบโครงสร้างในการเชื่อมติดกันของแนวเชื่อมที่แรงดัน 235N/m ²	97
4.45	แสดงการเชื่อมติดกันของอลูมิเนียมกับทองแดงที่แรงดัน 235N/m ² (ขยาย 100X)	97
5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ในการต้านทานแรงดึง	99
5.2	แสดงความสัมพันธ์การต้านทานแรงดึงสูงสุดระหว่างของวัสดุผสมกับเวลาทดแช่	100
5.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของแนวเชื่อมสูงสุดของวัสดุผสมกับแรงดัน	100
ข.1	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม ที่เชื่อมด้วยแรง 147 N/m ²	113
ข.2	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม ที่เชื่อมด้วยแรง 176 N/m ²	113
ข.3	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม ที่เชื่อมด้วยแรง 206 N/m ²	114

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.4	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับอลูมิเนียม ที่เชื่อมด้วยแรง 235 N/m ²	114
ข.5	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับทองแดง ที่เชื่อมด้วยแรง 147 N/m ²	115
ข.6	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับทองแดง ที่เชื่อมด้วยแรง 176 N/m ²	115
ข.7	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับทองแดง ที่เชื่อมด้วยแรง 206 N/m ²	116
ข.8	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับทองแดง ที่เชื่อมด้วยแรง 235 N/m ²	116
ข.9	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับทองเหลือง ที่เชื่อมด้วยแรง 147 N/m ²	117
ข.10	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับทองเหลือง ที่เชื่อมด้วยแรง 176 N/m ²	117
ข.11	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับทองเหลือง ที่เชื่อมด้วยแรง 206 N/m ²	118
ข.12	ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงของอลูมิเนียมกับทองเหลือง ที่เชื่อมด้วยแรง 235 N/m ²	118

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

E	ลวดเชื่อมไฟฟ้า
P	แรงกด
M	โมเมนต์แรงบิด
R	รัศมีนอก
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
Al	อลูมิเนียม
Br	ทองเหลือง
Cu	ทองแดง
σ	ความเค้นดึง
ε	ส่วนที่ออก
L	ความยาวที่ยื่นออก