



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะและ
สมบัติทางกลในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ซึ่งหล่อโดย
เทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อม
เสียดทานแบบกวน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.ประกาศ เมืองจันทร์บุรี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้
คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมต่อชนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal SSM) A356 ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding, FSW) โดยการศึกษาปัจจัยในการเชื่อมที่สามารถควบคุมได้ มี 2 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือ (Tool) มี 2 ระดับ 1,320 และ 1,750 rpm และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding Speed) มี 3 ระดับ 80, 120, 160 mm/min ความเร็วรอบ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมและความสมดุลของแรงกด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ให้ค่าความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน เนื่องจากการกวนมีผลต่อเนื้อโลหะและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม ผลจากการตรวจสอบด้วยเอกซเรย์ (X-Ray) การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและการทดสอบทางกลที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min ให้ความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมดีที่สุด ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 172.61 MPa และที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมทุกระดับ แรงกดและความร้อนจากการเสียดทานไม่เพียงพอทำให้เกิดช่องว่าง ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าต่ำ ส่วนค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Thermo-Mechanical Affected Zone TMAZ) และบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone, SZ) ทั้งทางด้าน Advancing Side และ Retreating Side มีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม (Base Metal, BM) เล็กน้อย ทุกปัจจัยและทุกระดับ

ABSTRACT

The butt joints of semi solid A356 were produced in as cast conditions by friction stir welding process (FSW). The effects of the rotation speed and the welding speed on the microstructure and mechanical properties were investigated. The variations of welding parameters, rotation speed of 1,320 and 1,750 rpm and welding speed of 80, 120 and 160 mm/min, produced various joints properties, X-Ray and microstructure analysis indicated defects at 1,320 rpm for every welding speed. It was found that the integrity of the joint contributed for the mechanical properties of the joint. The combination of 1,750 rpm and 160 mm/min revealed the best tensile strength at the average value of 172.61 MPa. In addition, at the rotation and welding speed, it indicated lower downforce during welding. The hardness value for all regions of Stir Zone, thermo-mechanical affected zone and base metal were similar.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากทุนรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2550

(ผศ. ดร. ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

หัวหน้าโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
รายการตาราง	VII
รายการภาพประกอบ	VIII
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	XI
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	7
1.5 แนวทางและแผนการดำเนินการวิจัย	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	8
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	9
2.1 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม	9
2.2 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง	12
2.3 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	15
2.4 แรงกดของเครื่องมือ	18
2.5 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray	19
2.6 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา	19
2.7 การทดสอบความแข็ง	20
2.8 การทดสอบแรงดึง	20
2.9 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย	36
3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	36
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การเตรียมชิ้นทดสอบ	38
3.4 แรงกดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	40
3.5 เครื่องมือ	40
3.6 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	41
3.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ	42
3.8 การทดสอบทางกล	44
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	48
4.1 แรงกดที่ใช้ในการทดลอง	48
4.2 โครงสร้างทางกายภาพและลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อม	49
4.3 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray	54
4.4 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356	57
4.5 อิทธิพลของความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมต่อค่าความแข็งของรอยเชื่อม	67
4.6 อิทธิพลของความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมต่อค่าความแข็งแรงงานเชื่อม FSW	73
4.7 การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางสถิติ	76
4.8 พื้นผิวผลตอบ	89
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	92
5.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของรอยเชื่อม	92
5.2 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray	92
5.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค	92
5.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	92
5.5 ผลการทดสอบความแข็ง	93
5.6 ผลการทดสอบความแข็งแรง	93
5.7 ตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม SSM A356	93
5.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	93
ข้อเสนอแนะ	94
บรรณานุกรม	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก ข้อกำหนดชิ้นทดสอบมาตรฐาน ASTM	98
ภาคผนวก ข ภาพชิ้นทดสอบงานเชื่อม FSW	99
ภาคผนวก ค ข้อมูลจากการทดลอง	107
ภาคผนวก ง Phase Diagram	119

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม	10
2.2	แสดงค่าความแข็งแรงในการทดลองเบื้องต้นของงานเชื่อม SSM A356	22
2.3	วิเคราะห์ความแปรปรวนของงานเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356	23
2.4	ค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม SSM A356	24
2.5	การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดลอง	24
2-6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปรแบบ Fixed Effects Model	28
2.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง	31
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม A356	36
4.1	ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1750 rpm และบริเวณแตกหัก	73
4.2	ค่าความแข็งแรงของเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356	77
4.3	ค่าความแข็งแรง Base Metal กำหนดด้วยแผนภูมิควบคุม X - Bar และ R - chart	78
4.4	ค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม SSM A356	80
4.5	ตาราง ANOVA	84
4.6	ตารางวิเคราะห์ความสมรูปตัวแบบถดถอย	88

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า	
1.1	ภาพแสดงหลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	4
1.2	ภาพแสดงลักษณะ Tool pin แบบต่างๆ	7
2.1	กราฟแสดงแผนภาพสมมูลสองธาตุ อะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์	11
2.2	ภาพโครงสร้างอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 356	11
2.3	โครงสร้างแบบเดนไดรต์	13
2.4	โครงสร้างแบบก้อนกลม	13
2.5	วิวัฒนาการและการเติบโตอนุภาคของแข็ง	13
2.6	ภาพแสดงการหล่อด้วยกรรมวิธี Rheocasting	14
2.7	หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	15
2.8	การหมุนของเครื่องมือบนชิ้นงาน ด้วยการเสียดทานแบบกวน	16
2.9	ทิศทางและการกวนของตัวกวน	17
2.10	การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)	17
2.11	ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อม FSW ในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม	19
3.1	ขั้นตอนการวิจัย	37
3.2	อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356	38
3.3	ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง A356 ผ่านการกัดด้วยเครื่องกัด	39
3.4	การปรับมุมเอียง 3° ของเครื่องมือ	39
3.5	การวัดค่าแรงกดในการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM A356 ด้วย Load Cell	40
3.6	ลักษณะของเครื่องมือและการจับยึด	41
3.7	กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	42
3.8	กล้องจุลทรรศน์ แบบลำแสง	44
3.9	แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยไมโครวิกเกอร์	45
3.10	บริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์	45
3.11	เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์	46
3.12	ลักษณะและขนาดชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง A356	46
3.13	การเตรียมชิ้นทดสอบรอยเชื่อม	47
3.14	ชิ้นทดสอบมาตรฐานงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน SSM A356	47

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 กราฟแสดงค่าแรงกดที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min	49
4.2 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 80 mm/min	50
4.3 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 120 mm/min	50
4.4 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min	51
4.5 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 80 mm/min	51
4.6 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 120 mm/min	52
4.7 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min	52
4.8 ลักษณะรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อมมากกว่า 160 mm/min	53
4.9 ภาพ X-Ray รอยเชื่อม ที่ 1,320 rpm และที่ (ก)80, (ข)120 และ (ค)160 mm/min	55
4.10 ภาพ X-Ray รอยเชื่อม ที่ 1,750 rpm และที่ (ก)80, (ข)120 และ (ค)160 Mm/min	56
4.11 โครงสร้างมหภาคและจุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm และ 80 mm/min	59
4.12 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm และ 120 mm/min	60
4.13 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm และ 160 Mm/min	61
4.14 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 80 mm/min	63
4.15 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 120 mm/min	64
4.16 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min	65
4.17 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm, 80 mm/min	68

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.18 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm, 120 mm/min	68
4.19 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm, 160 mm/min	69
4.20 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm, 80 mm/min	70
4.21 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm, 120 mm/min	70
4.22 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm, 160 mm/min	71
4.23 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงเฉลี่ยรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ 1,320 และ 1,750 rpm ที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min	72
4-24 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min	74
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่ 1,320, 1750 rpm ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min	75
4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ด้วย \bar{X} Chart	79
4.27 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ด้วย R-Chart	79
4.28 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง	81
4-29 กราฟแสดงลักษณะกระจายตัวแบบปกติ	82
4-30 กราฟแสดงลักษณะข้อมูล Residuals versus the fitted values	83
4-31 กราฟแสดงอันตรกิริยา ค่าความแข็งแรงกับความเร็วในการเชื่อม	84
4-32 กราฟแสดงอันตรกิริยา ค่าความแข็งแรงกับความเร็วยรอบของเครื่องมือ	85
4-33 กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องตัวแบบถดถอยเชิงเส้นตรง	87
4-34 กราฟแสดงการกระจายตัวแบบ Normal ของ Regression	88
4-35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อม ที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในระดับต่างๆ ของ Contour Plot	90
4-36 พื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อม	90

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

SSM	โลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal)
HAZ	บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (Heat Affected Zone)
TIG	การเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas)
FSW	การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding)
BM	โลหะฐาน (Base Metal)
SZ	บริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone)
TMAZ	บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Thermo-Mechanical Affected Zone)
Q	ปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ
μ	สัมประสิทธิ์ของการเสียดทานทางกล
P	แรงกด
N	ความเร็วรอบ
R	รัศมีของป่า
V	ความเร็วในการเชื่อม
Y_{ijk}	ผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ $i(i= 1, 2, \dots, a)$ และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ $j(j= 1, 2, \dots, b)$
τ_i	ผลที่เกิดจากระดับ i ของแถวปัจจัย
H_0	ตัวแบบถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล
H_1	ตัวแบบถดถอยมิได้มีความสมรูปกับข้อมูล
X_1	ระดับความเร็วรอบของเครื่องมือ
X_2	อัตราความเร็วรอบของเครื่องมือ
HV	ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm^2)
D	ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm)
ASTM	สมาคมเพื่อการทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา (American Society for Testing and Material)
BR	แตกหักบริเวณเนื้อโลหะด้าน Retreating Side
BA	แตกหักบริเวณเนื้อโลหะด้าน Advancing Side

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)
X-Ray	ผลการตรวจสอบด้วยรังสีเอ็กซ์
rpm	หน่วยวัดความเร็วรอบของการหมุนเหวี่ยงประเภทรอบต่อนาที (Revolutions Per Minute)
k	คำอุปสรรคใช้นำหน้าหน่วย ประเภท กิโล (10^3)
M	คำอุปสรรคใช้นำหน้าหน่วย ประเภท กิโล (10^6)
m	คำอุปสรรคใช้นำหน้าหน่วย ประเภท กิโล (10^{-3})
μ	คำอุปสรรคใช้นำหน้าหน่วย ประเภท กิโล (10^{-6})
Al-Si-Li	อลูมิเนียมผสมซิลิกอน-ลิเทียม
SS_{PE}	ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดโดยตรง
SS_{LOF}	ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Lack of Fit
F.C.C	ลูกบาศก์แบบเฟซเซนเตอร์ (Face Center Cubic)
$^{\circ}A$	อังสตรอม (angstrom) หน่วยวัดความยาว มีค่าเท่ากับ 10^{-10} m.
\bar{X}	ค่าเฉลี่ย
\bar{R}	ค่าพิสัย
$(\tau\beta)_{ij}$	ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j และ ϵ_{ij}

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

ปัจจุบันความต้องการชิ้นส่วนอะลูมิเนียมที่หล่อด้วยกระบวนการไดคาสติง (Die Casting) ในอุตสาหกรรมรถยนต์มีสูงมาก ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดน้ำหนักและการใช้พลังงาน รวมถึงอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่นอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ดังนั้น จึงมีการแข่งขันทางด้านเทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียม Die Casting กันอย่างกว้างขวาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพในการผลิตเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการหล่อ Die Casting ในปัจจุบัน คือกรรมวิธี Rheocasting เป็นการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal หรือ SSM) ปัจจุบัน มีการใช้เทคโนโลยี SSM กันทั่วโลก ประเทศไทยก็เริ่มมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี SSM เพื่อประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมในประเทศ

อย่างไรก็ตามในการนำอะลูมิเนียมที่ได้จากกรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งไปใช้งาน โดยเฉพาะการขึ้นรูป (Forming) และการซ่อม (Repairing) อะลูมิเนียมหล่อ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำการเชื่อมเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งการเชื่อมระหว่างอะลูมิเนียมหล่อ (Similar Joint) และอะลูมิเนียมหล่อกับโลหะชนิดอื่น (Dissimilar Joint) โดยทั่วไปการเชื่อมอะลูมิเนียม Die Casting โดยการหลอมละลาย (Fusion) ก่อให้เกิดข้อบกพร่องในเนื้อวัสดุหลังการเชื่อมเช่น รูพรุน (Porosity) การแตกของรอยเชื่อม (Weld crack) นอกจากนี้ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM คือการรักษาสมบัติทางกลของบริเวณรอยเชื่อม (Mechanical properties of Joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อเดิมมากที่สุดนอกจากนี้การเชื่อมโดยการหลอมละลาย ยังก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา (Metallurgical changes) ส่งผลทำให้แนวเชื่อม (welded region) มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล

ในปัจจุบันมีงานวิจัยค่อนข้างน้อยสำหรับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็ง การเชื่อมโดยการหลอมละลาย (Fusion Welding) ของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง โดยเฉพาะบริเวณที่มีการหลอมละลาย (Fusion Zone) และบางส่วนของบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนซึ่งบริเวณที่ติดกับความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) กลุ่มนักวิจัย [4] ได้ศึกษาสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยา

ของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็ง (Semi Solid Aluminum Alloy A356) โดยกรรมวิธีการเชื่อมแบบ นีโอดีเมียมแยกเลเซอร์ (Nd:YAG Laser Welding) การเชื่อมแบบเลเซอร์ทำให้บริเวณรอยเชื่อมแคบและเล็ก อย่างไรก็ตามโครงสร้างทางจุลภาคในบริเวณที่มีการหลอมละลายและบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนจะมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากเนื้อโลหะเดิม (Base Metal) บริเวณที่มีการหลอมละลาย โครงสร้างเป็นเดนไดรต์ที่ละเอียด (Fine Dendrite Structure) นอกจากนี้ค่าความแข็งของบริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม รายงานจาก [9] ซึ่งได้ทดลองทำการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ได้จากการหล่อกึ่งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบทิก (TIG) โครงสร้างบริเวณบ่อหลอมเป็นโครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendritic Structure) ในขณะที่โครงสร้างบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (HAZ) ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบกิ่งไม้ผสมกับโครงสร้างแบบก้อนกลม (Equiaxed Structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็ง บริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนจะไม่มีหลอมละลาย

จากข้อมูลและเหตุผลดังกล่าว เป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของเนื้อเชื่อม (Weld Metal) และบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความร้อน โดยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding Process, FSW) เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่เหมาะสมนำผลมาปรับปรุง เพื่อเลือกใช้กรรมวิธีการเชื่อมที่เหมาะสมต่อไป

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 โลหะที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งถูกคิดค้นที่ Massachusetts Institute of Technology (MIT) โดย Spencer และ Fleming เมื่อประมาณ 30 ปีที่แล้ว [1] การหล่อโลหะกึ่งของแข็ง คือ การขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในขณะที่โลหะอยู่ในสถานะกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว (Mushy State) มีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โดยโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) และจะได้ชิ้นงานหล่อสุดท้ายที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมซึ่งสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลได้

เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งกำลังเป็นที่สนใจของนักวิจัย ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting หลายวิธีเพื่อเป็นการลดต้นทุน เทคนิคแบบ

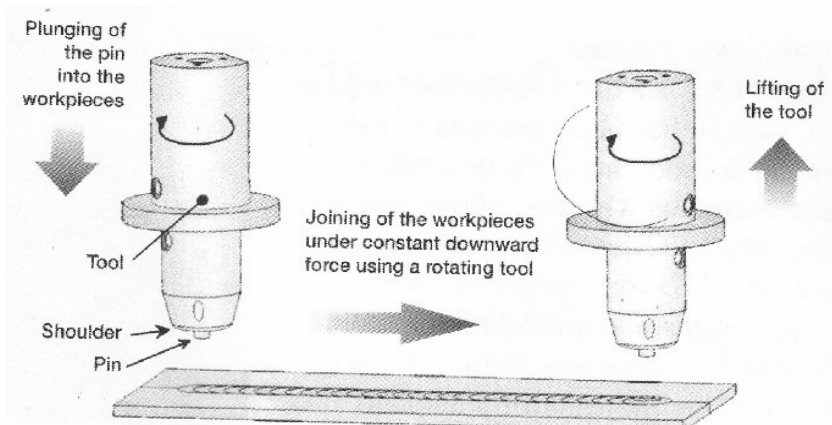
Rheocasting ก็คือ การผลิตน้ำโลหะให้เป็นโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างแบบกึ่งนกอกลมแล้วฉีดเข้าแม่พิมพ์

เทคโนโลยีการหล่อ SSM ได้มีการใช้อย่างแพร่หลายในการหล่อ Die Casting เพื่อเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ ลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle Time) การลดของเสีย (Reject) เพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และการลดต้นทุนในการอบชุบ เป็นต้น การปรับเปลี่ยนกระบวนการ เครื่องจักร และการออกแบบแม่พิมพ์อย่างถูกต้อง นอกจากนี้การพัฒนารวมวิธี Rheocasting ที่มีราคาถูกและใช้กับเครื่อง Die Casting ทั่วไป

เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ [2] ได้ทำการพัฒนารวมวิธี Rheocasting สำหรับหล่ออะลูมิเนียมผสมแบบใหม่โดยการปล่อยแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พอร์นเพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่โลหะแข็งตัว เพื่อให้ได้เกรนแบบกึ่งนกอกลม

1.2.2 การเชื่อมและโลหะวิทยาการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อแบบกึ่งของแข็ง

การเชื่อมโลหะในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ยึดโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสถานะของแข็งหรือบางครั้งอาจจะหลอมเหลวเพียงเล็กน้อย โลหะบางประเภทจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อกันที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เพราะว่าที่อุณหภูมิหลอมละลายเมื่อโลหะแข็งตัวก็จะมีเกิดการเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งอาจจะไม่เหมือนกับโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลข้างต้นจึงได้มีการคิดค้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding, FSW) ที่สถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The Welding Institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็งซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกัน โดยความร้อนจากแรงเสียดทานจากหัวเชื่อมที่หมุนตลอดเวลาพร้อมกับเคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยจะมีแรงกดด้วยในขณะที่เชื่อม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมดังนี้ คือ แรงกด (Downforce) ความเร็วรอบในการหมุนของหัวเชื่อม (rpm) ความเร็วของการเชื่อม (Welding Speed) และมุมเอียงของหัวเชื่อม (tilt angle) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [3]



ภาพประกอบ 1.1 แสดงหลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [3]

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมผสม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) เช่น สามารถหลีกเลี่ยงการแตกร้าวในระหว่างแข็งตัวของเหลวไปเป็นของแข็งและปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสติง เพราะว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) นอกจากนี้บางครั้งในการเชื่อมโลหะบางประเภทจะไม่สามารถเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ ดังนั้นการเชื่อมแบบนี้จึงเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความเค้นตกค้าง (Residual Stress) และการบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนเข้า (Heat Input) จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับอะลูมิเนียมผสมใน 1xxx 2xxx 5xxx 6xxx และ 7xxx รวมถึงการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม Al-Si-Li [4]

ในปัจจุบันมีงานวิจัยค่อนข้างน้อยสำหรับการเชื่อมโลหะอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็ง การเชื่อมโดยการหลอมละลาย (Fusion Welding) ของอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็ง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง โดยเฉพาะบริเวณที่มีการหลอมละลาย (Fusion Zone) และบางส่วนของบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนซึ่งอยู่ข้างแนวเชื่อม (Heat Affected Zone, HAZ) กลุ่มนักวิจัย [5] ได้ศึกษาสมบัติทางกลและทางโลหะวิทยาของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมที่ได้จากการหล่อกึ่งของแข็ง (Semi Solid Aluminum alloy A356) โดยกรรมวิธีการเชื่อมแบบ นีโอดีเมียมแย็กเลเซอร์ (Nd:YAG Laser Welding) พบว่าการเชื่อมแบบเลเซอร์ทำให้บริเวณรอยเชื่อมแคบและเล็ก อย่างไรก็ตามโครงสร้างทางจุลภาคในบริเวณที่มีการ

หลอมละลายและบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนจะมีโครงสร้างที่แตกต่างไปจากเนื้อโลหะเดิม (Base Metal) บริเวณที่มีการหลอมละลายโครงสร้างจะเป็นเดนไดรต์ละเอียด (Fine dendrite structure) นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงของบริเวณเนื้อเชื่อมจะมีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม รายงานจากนักวิจัย [6] ซึ่งได้ทดลองการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ได้จากการหล่อทิ้งของแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบทิก (TIG) โดยผลการวิจัยพบว่าโครงสร้างบริเวณบ่อหลอมจะเป็นแบบโครงสร้างกิ่งไม้ (Dendritic Structure) ในขณะที่โครงสร้างบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน (HAZ) ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบกิ่งไม้ (Dendritic Structure) ผสมกับโครงสร้างแบบก้อนกลม (Equiaxed Structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างเดิมของอะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อทิ้งของแข็ง ทั้งนี้เพราะบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนจะไม่มีหลอมละลาย

W.B. Lee, Y.M. Yeon และ S.B. Jung [7] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม A356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมและเขตอิทธิพลความร้อน HAZ จากการเสียดทานได้ถูกการวิเคราะห์อย่างละเอียด โครงสร้างเนื้อโลหะเดิมเป็น Hypoeutectic ประกอบด้วย Al+Si dendrite โครงสร้างของโลหะบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone) มีความแตกต่างจากบริเวณโลหะเดิม (Base metal) จุดหลอมละลายต่ำสุด (Eutectic) อนุภาคของ Si จะเข้าไปแทนที่เป็นเนื้อเดียวกันในขณะที่ Al เริ่มแข็งตัวบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความร้อนจากการเสียดทานทางกลนั้นเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญทำให้โครงสร้างผิดรูปไปจากเดิม

ลักษณะเฉพาะของโลหะ ด้วยอนุภาค Si กระจายเป็นเส้นยาวตามลักษณะทิศทางของการหมุนของเครื่องมือเชื่อม การเสียดทานแบบกวน บริเวณนั้นรูปร่างส่วนมากได้รับผลกระทบและบริเวณนอกเหนือจากนั้นไม่มีผล สมบัติเชิงกลบริเวณรอยเชื่อมที่สำคัญ คือ การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของโลหะเดิม ความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อม โดยการเปรียบเทียบค่าการແจกແจง สูงกว่าโลหะเดิม พบว่า มีบางส่วนลดลง และที่สำคัญทำให้ Si ที่เกิดจากปฏิกิริยา Eutectic ที่เป็นบริเวณที่นอกเหนือจากบริเวณที่ถูกกวน (SZ) ความเค้นแรงดึงของโลหะบริเวณที่ถูกกวน (SZ) สูงขึ้นและได้พิสูจน์ให้เห็นค่าที่มากกว่า 178 MPa, i.e. เกือบ 120% ของโลหะเดิม (BM) เพราะฉะนั้น การเชื่อมอะลูมิเนียม A356 ด้วยการเสียดทานแบบกวนมีข้อดีในการประยุกต์กับการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อผสม

รายงานจาก [8] ซึ่งได้ทำการวิจัยการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม ADC12 ซึ่งหล่อโดยกรรมวิธีไดคาสติงโดยใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างในบริเวณที่เชื่อมจะมีการสร้างผลึกใหม่ (Recrystallized) โดยจะไม่มีโครงสร้างหล่อ (Cast structure) นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมที่เชื่อมโดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่ามากกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายทั่วไปด้วย

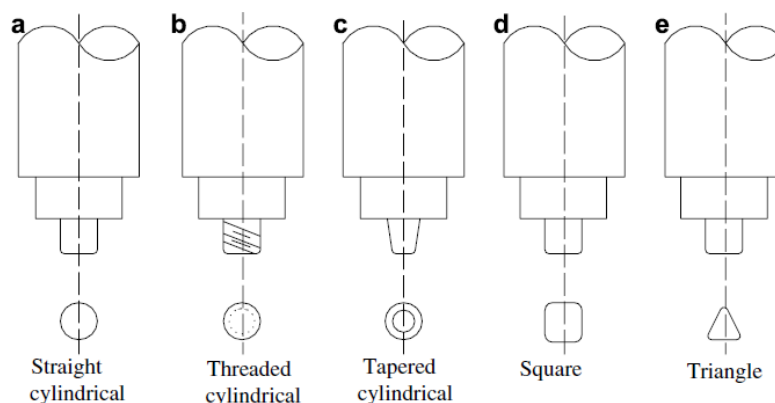
ในรายงานยังได้กล่าวถึงผลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างทางจุลภาคของอะลูมิเนียมผสม ADC12 ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม ได้แก่ แรงกด (Downforce) ความเร็วรอบการหมุนของหัวเชื่อม (rpm) ความเร็วของการเชื่อม (Welding Speed) และมุมเอียงของหัวเชื่อม (tilt angle) ได้ข้อสรุปว่า ตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมอย่างมาก

งานวิจัยจาก W.B. Lee et al. [9] ซึ่งเป็นการเชื่อมอะลูมิเนียมผสมต่างชนิดกัน (Dissimilar Joint) โดยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมหล่อ A356 กับอะลูมิเนียมรีด 6061 โดยใช้ความเร็วรอบในการเชื่อม 1600 rpm และความเร็วในการเชื่อมระหว่าง 87 – 267 mm/min. จากการศึกษาพบว่าค่าสมบัติทางกลของแนวเชื่อมจะขึ้นอยู่กับตัวอะลูมิเนียมผสมที่อยู่ด้าน retreating side เพราะว่าโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมประกอบไปด้วยส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างของอะลูมิเนียมผสมที่อยู่ด้าน retreating side

ในช่วงเริ่มแรกของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน รูปแบบของ tool ในส่วนที่เป็นหัวพิน (pin) จะเป็ฯแบบง่าย ๆ คือ เป็นแท่งยาว (cylinder) พินมีหน้าที่กวน (stir) ชิ้นงานในขณะที่กำลังเชื่อมและทำให้เกิดการไหลวนของเนื้อวัสดุ การออกแบบ pin ในช่วงแรกเกิดขึ้นที่สถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The Welding Institute, TWI) [10] การออกแบบ pin และความยาวของ pin มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะรูปร่างของ pin เส้นผ่านศูนย์กลางของ pin และความยาวของ pin เพราะจะส่งไปถึงรูปแบบของแนวเชื่อม (joint profile) โครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) และสมบัติทางกล (mechanical properties) ของเนื้อเชื่อมและบริเวณใกล้เคียง

การออกแบบหัวเชื่อม (tool pin) ทั้งในแง่วัสดุที่ใช้ทำละรูปแบบ (profile) จะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะของแนวเชื่อม (Joint profile) โครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกล [11] การออกแบบหัวเชื่อมยังเป็นข้อมูลที่เป็นความลับกันมาก จึงมีปริมาณงานวิจัยที่เผยแพร่ น้อย

K. Elangovan et al. [12] ได้ทำการวิจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม AA 6061 โดยได้ศึกษาผลของการออกแบบหัวพิน (pin profile) ที่แตกต่างกัน โดยทำการศึกษาหัวพินแบบต่างๆ ได้แก่แบบทรงกระบอก (Straight cylindrical) แบบเกลียว (Threaded cylindrical) แบบเอียง (Tapered cylindrical) แบบสี่เหลี่ยม (Square) และแบบสามเหลี่ยม (Triangular) และได้มีข้อสรุปว่า รูปแบบของหัวพินจะส่งผลไปถึงคุณภาพของรอยเชื่อม (Joint properties) นอกจากนี้ยังมีข้อสรุปเพิ่มเติมว่า หัวพินแบบสี่เหลี่ยม (Square) ให้ค่าสมบัติทางกลที่ดีที่สุดและในทางโลหะวิทยา ก็ให้เนื้อเชื่อมที่ไม่มีตำหนิ (Defect free weld metal)



ภาพประกอบ 1.2 แสดงลักษณะ tool pin แบบต่างๆ [12]

จากงานวิจัยต่างๆ จะเห็นว่าปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ อะลูมิเนียมเกรดต่างๆ และของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง ซึ่งได้แก่ ความเร็วในการเดินเชื่อม (Welding Speed) ความเร็วรอบของการหมุนหัว Tool และแรงกด (Downforce) ซึ่งได้นำมา วิเคราะห์พิจารณาเพื่อหาค่าของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal, SSM) A356 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding Process, FSW)

1.3.2 เพื่อศึกษาหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 ด้วยการเสียดทานแบบกวน

1.3.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อ กิ่งแข็ง A356

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษางานวิจัยประกอบด้วย การเชื่อม และการทดสอบ การเชื่อม ใช้กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) โดยใช้อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 ที่ผ่านการ Squeeze Casting กัดชิ้นงานให้มีขนาด $100 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$ วางชิ้นงานต่อชนท่าราบบนเครื่อง Milling Machine ยึดให้แน่นด้วยอุปกรณ์จับยึด ใช้ Tool หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750

rpm บนชิ้นงานให้เกิดการเสียดทาน ใช้ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min นำชิ้นงานที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ทดสอบสมบัติทางกลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมและสมบัติที่ได้ นำไปวางแผนในกระบวนการเชื่อมได้อย่างสอดคล้องและเหมาะสม

1.5 แนวทางและแผนการดำเนินการวิจัย

แนวทางและแผนการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

- 1.5.1 วางแผนการดำเนินการวิจัย
- 1.5.2 ศึกษาค้นคว้า และรวบรวมข้อมูล ในการดำเนินการวิจัย
- 1.5.3 เตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุ ในการศึกษาทดลองของการวิจัย
- 1.5.4 ออกแบบการทดลอง ปฏิบัติการทดลอง ศึกษาค้นคว้าวิจัย
- 1.5.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ผลจากการวิจัยในครั้งนี้คาดว่าจะมีประโยชน์ ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 1.6.1 สร้างองค์ความรู้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากระบวนการเชื่อม
- 1.6.2 ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้เบื้องต้นของความสามารถในการเชื่อมโลหะแบบกึ่งของแข็ง ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)
- 1.6.3 ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกล ทางโลหะวิทยาของการเชื่อมและสามารถเลือกใช้ได้อย่างสอดคล้องและเหมาะสม

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 สมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่สำคัญได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติที่เด่นหลายประการ

ประการที่ 1. มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา และมีกำลังวัสดุต่อน้ำหนักสูง จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ไม้สอยตลอดจนชิ้นส่วนบางอย่าง ในเครื่องบิน จรวด ซีปนาอูธและอุปกรณ์ในรถยนต์ เพื่อลดน้ำหนักของยานพาหนะให้น้อยลงทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ตลอดจนชิ้นส่วนอากาศยาน เป็นต้น

ประการที่ 2. มีความเหนียว สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก มีจุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าคิดเป็น 64.94% IACS (International Association of Classification Societies) ซึ่งไม่สูงนัก และเนื่องจากมีน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในกรณีที่คำนึงถึงเรื่องน้ำหนักเป็นสำคัญ

ประการที่ 3. เป็นโลหะที่ไม่มีพิษต่อร่างกาย และมีค่าการนำความร้อนสูง ใช้ทำภาชนะหุงต้มอาหารและห่อรองรับอาหาร

ประการที่ 4. ผิวหน้าของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ มีดัชนีการสะท้อนแสงสูงมาก จึงใช้ทำแผ่นสะท้อน ในแฟลชถ่ายรูป งานสะท้อนแสงในโคมไฟ และไฟหน้ารถยนต์ทนทานต่อการผุกร่อน ในบรรยากาศที่ใช้งานทั่วไปได้ดี แต่ไม่ทนทาน ต่อการกัดกร่อนของกรดเข้มข้น และด่างต่างๆไป ซึ่งหาได้ง่าย ในท้องตลาด และราคาไม่แพงนัก

ประการที่ 5. ใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์ ตลอดจนใช้เป็นอุปกรณ์ตกแต่งบ้าน

2.1.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียมเป็นค่าสมบัติเฉพาะเพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาสมบัติทางโลหะวิทยาหรือทางกลในการนำไปใช้งานของอะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ มีสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของอะลูมิเนียม

ลำดับ	สมบัติทางฟิสิกส์	ค่า	หน่วย
1.	หมายเลขอะตอม	13	
2.	น้ำหนักอะตอม	26.97	
3.	วาเลนซ์	3	
4.	โครงสร้างผลึก	F.C.C	
5.	มิติของแลตทิส	4.049	$^{\circ}\text{A}$
6.	ความหนาแน่นที่ 20°C	2.6989	g/mm^3
7.	จุดหลอมเหลว	660.2	$^{\circ}\text{C}$
8.	จุดเดือด	2450	$^{\circ}\text{C}$
9.	การหดรัดแข็งตัว	6.6	%
10.	ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	94.5	cal/g
11.	ความร้อนจำเพาะที่ 100°C	0.224	cal/g
12.	การนำความร้อนที่ 20°C	0.57	cal/g

2.1.2 สมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม

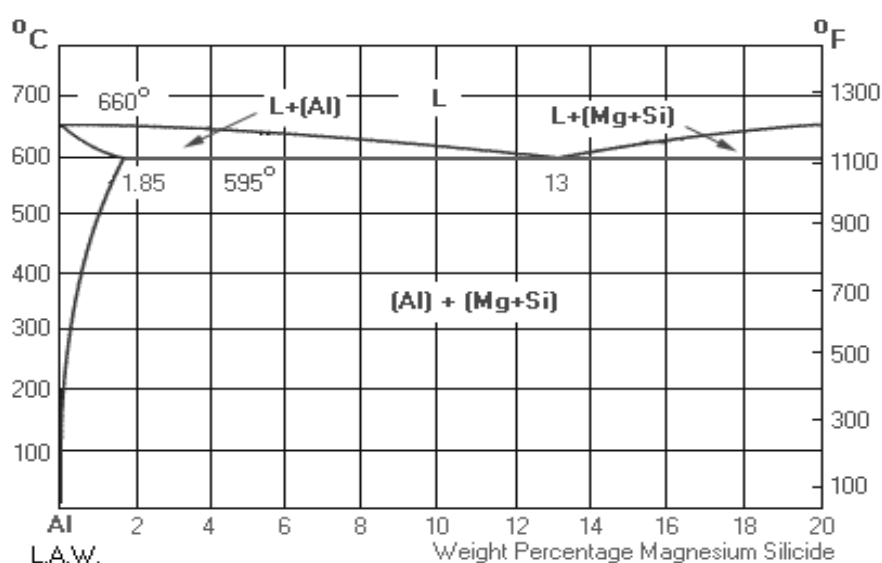
เป็นอะลูมิเนียมหล่อผสมที่ชุบแข็งได้ โดยผสมแมกนีเซียมในลักษณะแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) ใช้หล่อได้ ทั้งแบบหล่อทราย และแบบหล่อถาวร ที่เป็นเหล็กหรือ บรอนซ์ กิ่ง กัด ตัด เจาะ ได้ดีมาก และสามารถเชื่อมประสานได้ดี สมบัติทางกลดีมากโดยเฉพาะหากผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการอบชุบแบบ Solution Heat Treatment และเอจจิง (Aging) อะลูมิเนียม – ซิลิกอน – แมกนีเซียมหล่อผสม เนื้อแน่นทนแรงอัดได้ดี สามารถชุบ Anodized ได้สีเทาเข้มสวยงามมาก อะลูมิเนียมหล่อผสม กลุ่มนี้ใช้กับงาน ประเภทต้องการความแข็งแรงสูงเช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมยานอวกาศ และเหมาะสำหรับงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อน ประณีต และความแข็งแรงสูง

2.1.2.1 แผนภาพสมดุล (Phase Diagram) จากแผนภาพสมดุลสองธาตุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์ อธิบายได้ดังนี้

- 1) อะลูมิเนียมมีอุณหภูมิหลอมละลายที่ 660°C

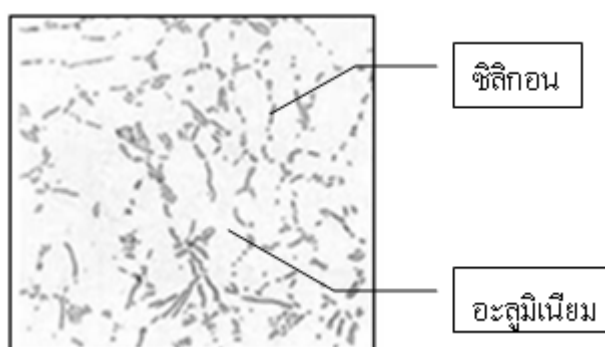
2) แมกนีเซียมซิลิไซด์ ละลายในอะลูมิเนียมได้สูงสุดที่ 1.85% ที่อุณหภูมิ 595°C

3) เกิดปฏิกิริยายุทเทคติกที่ 13% แมกนีเซียมซิลิไซด์ และที่อุณหภูมิ 595°C ดังนั้น ได้เส้นอุณหภูมิ 595°C หรือ อุณหภูมิยูเทคติก จะให้ของแข็งสองชนิด คือ อะลูมิเนียม (Al) ผสมกับแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si)



ภาพประกอบ 2.1 กราฟแสดงแผนภาพสมดุลสองธาตุ อะลูมิเนียม-แมกนีเซียมซิลิไซด์ [18]

2.1.2.2 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) สมบัติด้านความแข็งแรง อะลูมิเนียมหล่อผสมซิลิกอน สามารถพัฒนาโดยการเติมแมงกานีส จำนวนเล็กน้อย อะลูมิเนียมหล่อผสมหมายเลข 356 จะประกอบด้วยส่วนผสม 7% ซิลิกอน 0.35% แมกนีเซียม ดังภาพประกอบ 2.2



ภาพประกอบ 2.2 ภาพโครงสร้างอะลูมิเนียมผสมหมายเลข 356 [18]

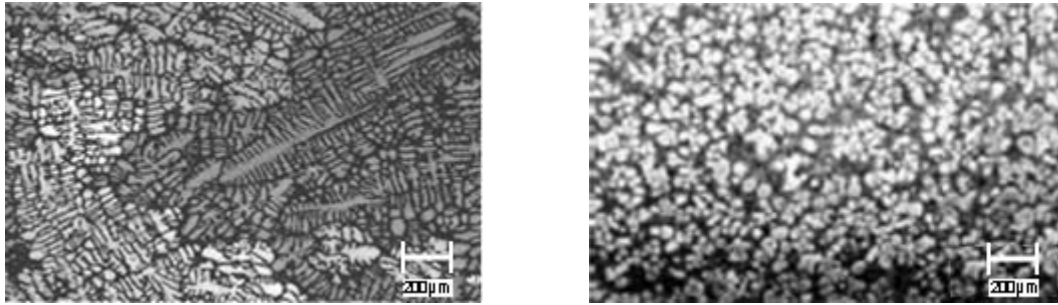
โดยซิลิกอนจะมีสมบัติทางด้านความสามารถในการหล่อและแมกนีเซียมจะทำให้สามารถปฏิบัติทางความร้อนได้ โครงสร้างจุลภาคของ อะลูมิเนียมหมายเลข 356 ในการหล่อหลายๆ แบบและหลายๆ สภาพ ในอัตราการแข็งตัวช้าๆ ของการหล่อ ทำให้เกิดอนุภาคของซิลิกอนในอินเตอร์เดนไดรต์ที่อะลูมิเนียม ซิลิกอนยูเทคติก การทำเองจึงเทียบในอะลูมิเนียมหมายเลขนี้ ในสภาพการหล่อจะไม่เปลี่ยน โครงสร้างจุลภาค แต่ทำให้การเกิดอนุภาค ของซิลิกอน มีการกระจายตัวอย่างละเอียด ซึ่งจะทำให้แข็งแรงขึ้น

2.1.2.3 การนำไปใช้งาน (Application) เนื่องจากสมบัติของอะลูมิเนียม ซิลิกอนแมกนีเซียมหล่อผสม มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานมากมาย เช่น สามารถเพิ่มความแข็งแรงและต้านทานต่อการกัดกร่อน ดังนั้น จึงนำไปใช้ทำพวกชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนเรือเดินสมุทร หรือ ชิ้นส่วนอากาศยาน เป็นต้น นอกจากนี้ การนำอะลูมิเนียม ซิลิกอน แมกนีเซียมหล่อผสมไปใช้งานในแต่ละกลุ่ม เช่นหมายเลข 356 ใช้แพร่หลาย เกรดที่ความบริสุทธิ์สูงกว่า คือ หมายเลข A356

2.2 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งคือการขึ้นรูปโลหะโดยการหล่อในขณะที่โลหะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นแบบเดนไดรต์ (Non-Dendritic Grain) หรือบางครั้งเรียกว่าเกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) โดยที่เกรนก้อนกลมที่ลอยอยู่ในน้ำโลหะทำให้อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง มีความเหนียวมากกว่าน้ำโลหะหลายเท่า และการที่โครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลมทำให้มีความเหนียวน้อยกว่าโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีโครงสร้างเกรนแบบเดนไดรต์ ดังภาพประกอบ 2.3 และ 2.4

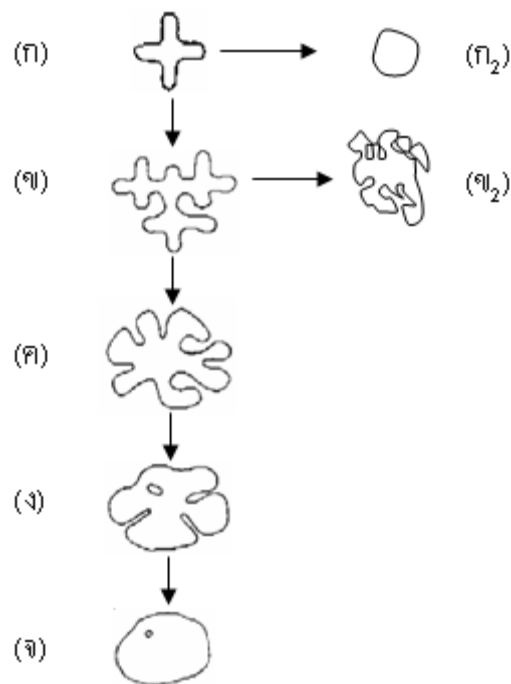
กระบวนการในการผลิตโลหะกึ่งแข็งมีหลายวิธี โดยทุกวิธีจะต้องมีการสร้าง Solid Particles ในปริมาณที่พอเหมาะขณะที่โลหะกำลังแข็งตัวส่วนใหญ่ทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ (Forced Convection) ในขณะที่โลหะกำลังแข็งตัว เพื่อให้มีการแตกตัวของเดนไดรต์ หรือมีการเกิด Nucleation มากขึ้น การทำให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะนั้น ทำได้หลายวิธี ตั้งแต่การใช้วัตถุแข็งรูปร่างเหมือนไม้พายกวนน้ำโลหะ การใช้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic หรือ EM) การเทน้ำโลหะเพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ ใช้การสั่นโดยแรงอัลตราซอนิก (Ultrasonic Vibration) เป็นต้นนอกจากการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะขณะที่โลหะกำลังแข็งตัวแล้ว การใส่สารที่เพิ่มการเกิด Nucleation การอบโลหะที่อุณหภูมิในช่วงกึ่งแข็งเป็นเวลานาน ก็ทำให้เกิดโลหะกึ่งของแข็งได้เช่นกัน [1]



ภาพประกอบ 2.3 โครงสร้างแบบเดนไดรต์ [1] ภาพประกอบ 2.4 โครงสร้างแบบก้อนกลม [1]

2.2.1 กลไกการผลิตโลหะแข็งด้วยกรรมวิธี Rheocasting

การเกิดของอนุภาคของแข็ง (Solid Particles) ส่วนเล็กๆ ที่มีรูปร่างแบบ Equiaxed มากมาย ซึ่งอาจจะเกิดจากกระบวนการ Nucleation and Growth หรือ กระบวนการแตกตัวของเดนไดรต์ (Dendrite Fragmentation) หรือเป็นผลจากทั้งสองกระบวนการผสมกันในขณะที่โลหะแข็งตัว จากนั้นอนุภาคของแข็งเหล่านี้ก็จะเติบโตด้วยการกระจายของอะตอม หรือ Coarsening ทำให้รูปร่างแบบ Equiaxed ของเกรนเหล่านี้กลายเป็นเกรนแบบก้อนกลม [2]



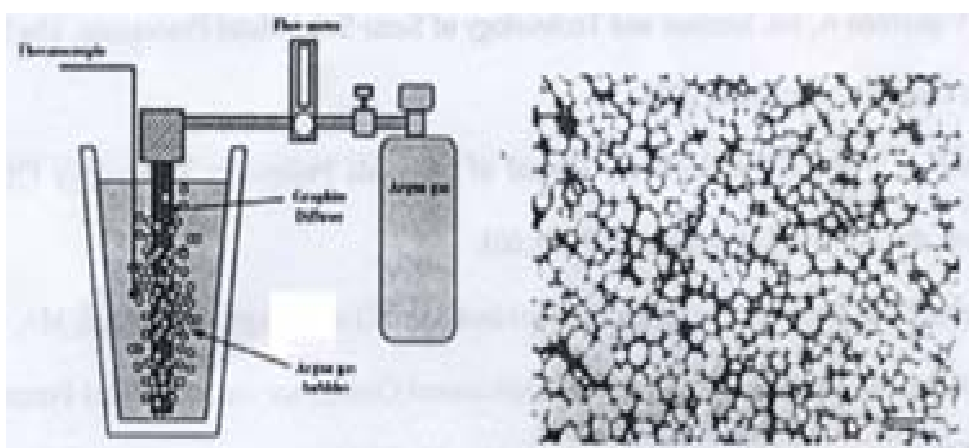
ภาพประกอบ 2.5. วิวัฒนาการและการเติบโตอนุภาคของแข็ง (Solid Particles) [1]

อนุภาคของแข็งที่เกิดเริ่มแรกนั้นมีขนาดเล็กมากและมีปริมาณมาก เกรนแบบก้อนกลมจะเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบ Equiaxed ตามกลไกวิวัฒนาการอนุภาคของแข็ง ดังภาพประกอบ 2.5 จาก (ก) ไป (ก₂) แต่หากขนาดอนุภาคใหญ่เกินไปการเกิดเกรนแบบก้อนกลมก็จะเป็นไปตามเส้นทางวิวัฒนาการ จาก (ก) ไป (จ) และหากสภาวะไม่ได้ตามที่จำเป็นก็จะไม่เกิดเกรนแบบก้อนกลม ดังแสดงในเส้นทางวิวัฒนาการ จาก (ข) ไป (ข₂)

2.2.2 เทคโนโลยีการหล่อกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting

เทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (SSM) ได้รับการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ก็ยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายทำให้มีข้อได้เปรียบและประโยชน์ของการหล่อกึ่งของแข็ง โดยการผลิตแบบ Rheocasting เป็นการใช้นโยบายการหล่อกึ่งของแข็งในการหล่อ Die Casting ที่เพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อจากปัจจัยต่างๆ เช่นการลดเวลาในการผลิตต่อชิ้น (Cycle Time) การลดของเสีย (Reject) การเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และไม่ต้องผ่านกระบวนการทางความร้อน ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิต

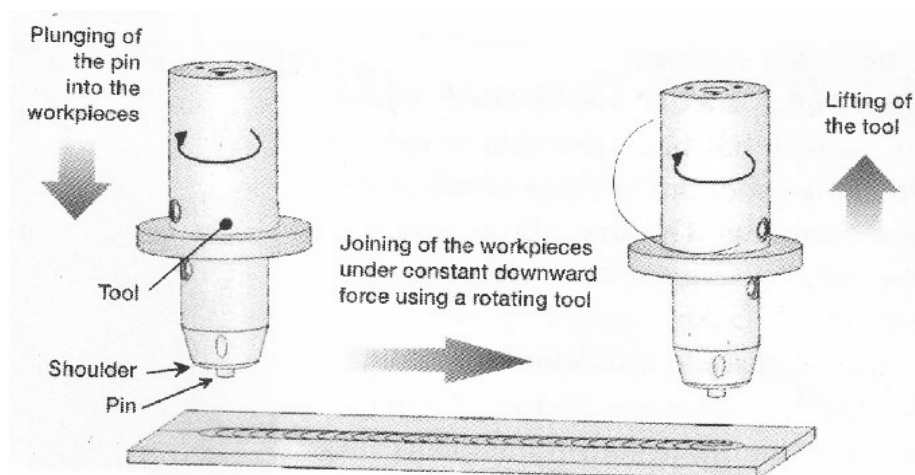
กรรมวิธี Rheocasting แบบใหม่โดยการปล่อยแก๊สเฉื่อย (แก๊สอาร์กอน หรือไนโตรเจน) ผ่านแท่งกราฟไฟต์ในปริมาณที่น้อยมาก เพื่อให้เกิดการไหลเคลื่อนที่ของน้ำโลหะในขณะที่แข็งตัว เพื่อให้ได้เกรนที่มีลักษณะก้อนกลม ดังภาพประกอบ 2.6 [1] จากการหล่ออะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง A356 เพื่อนำมาใช้ในงานวิจัยของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) ซึ่งทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งจะถูกนำไป Squeeze และกัดให้มีขนาด 100 x 100 x 4 มม.³



ภาพประกอบ 2.6 ภาพแสดงการหล่อด้วยกรรมวิธี Rheocasting [1]

2.3 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

เป็นการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็ง โดยโลหะยึดติดกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง โลหะบางประเภทจะหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อกันที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เนื่องจากที่อุณหภูมิหลอมละลายเมื่อโลหะแข็งตัว จะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลข้างต้น จึงได้มีการคิดค้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่สถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The Welding Institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็งซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยที่บ่าสัมผัสแผ่นงานและหมุนด้วยความเร็วรอบตามที่กำหนดพร้อมกับความเร็วในการเชื่อม และแรงกดในขณะที่เชื่อม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมคือ แรงกด (Downforce) ความเร็วรอบของ Tool ความเร็วในการเชื่อมและมุมเอียงของ Tool (Tilt Angle) ดังภาพประกอบ 2.7 [3]

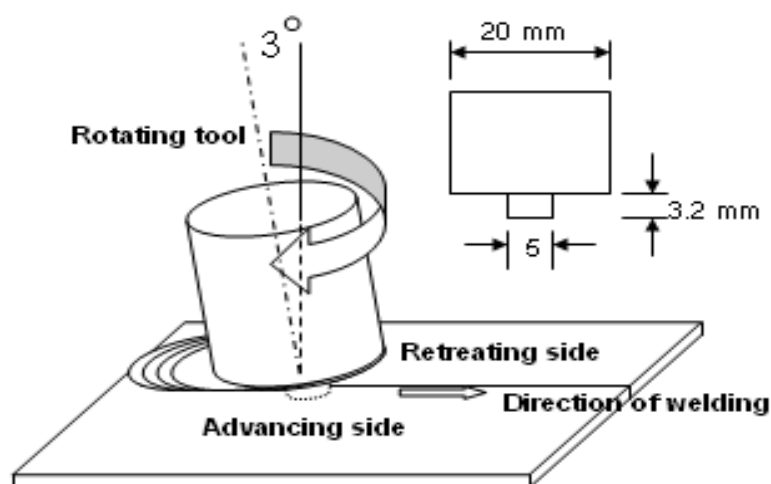


ภาพประกอบ 2.7 หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [3]

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น สามารถหลีกเลี่ยงการแตกในระหว่างแข็งตัวของเหลวไปเป็นของแข็งและปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสต์ได้ เนื่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง นอกจากนี้โลหะบางประเภทจะไม่สามารถเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จึงเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความ

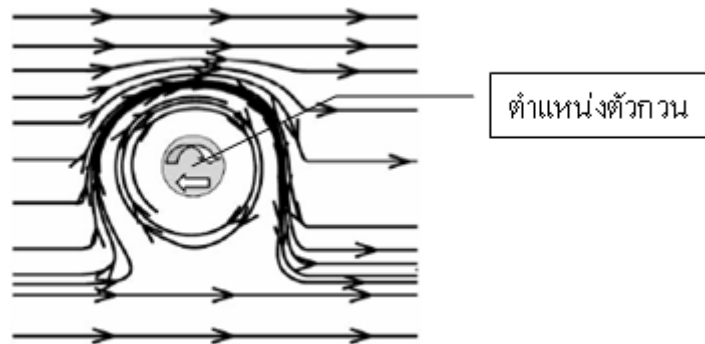
เค้นตกค้าง (Residual Stress) และการบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย ความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนเข้า จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 1xxx 2xxx 5xxx 6xxx และ 7xxx รวมถึงอะลูมิเนียมผสม Al-Si-Li [4]

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เครื่องมือถูกออกแบบเป็นพิเศษ โดยบ่าของเครื่องมือหมุนสัมผัสแผ่นงานที่ทำการเชื่อม ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้ชิ้นงานอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ทำให้อนุภาคอะลูมิเนียมผสมที่ได้ ถูกกวนจนแตกหักเป็นอนุภาคที่ละเอียดในบริเวณที่ถูกกวน โดยมีพารามิเตอร์ในการเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม แรงกดและมุมเอียงของเครื่องมือ ในการเชื่อมเครื่องมือหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา [9] ในการออกแบบเครื่องมือเส้นผ่าศูนย์กลางของบ่า $\varnothing 20$ มม. ตัวกวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\varnothing 5$ มม. ความยาว 3.2 มม. ความยาวของตัวกวน จะมีค่าน้อยกว่าความหนาของแผ่นงาน ในการเชื่อมชิ้นงานจะถูกยึดด้วยอุปกรณ์จับยึด มุมของเครื่องมือเอียง 3° องศา จากแนวตั้งและหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังภาพประกอบ 2.8



ภาพประกอบ 2.8 การหมุนของเครื่องมือบนชิ้นงาน ด้วยการเสียดทานแบบกวน [12]

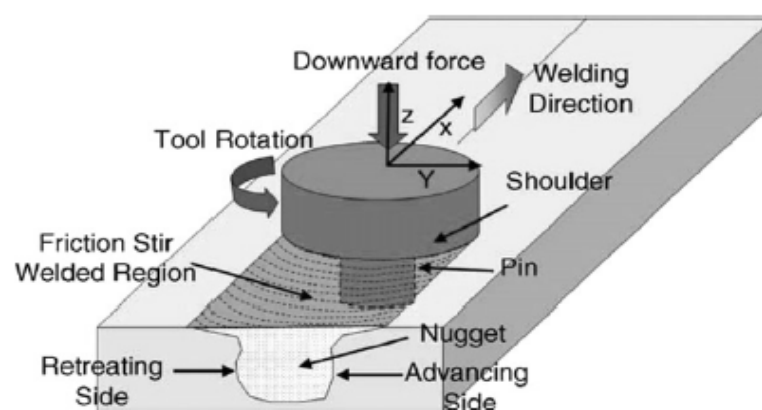
ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทิศทางและการเคลื่อนที่ของเครื่องมือ แสดงดังภาพประกอบ 2.9 จะเกิดการเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนและเนื้อโลหะอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง การไหลวนของโลหะกึ่งของแข็งรอบตัวกวน ขณะที่เครื่องมือหมุนด้วยความเร็วรอบ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการเชื่อม ทำให้เนื้อโลหะประสานติดกันด้วยการกวน [8]



ภาพประกอบ 2.9 ทิศทางและการกวนของตัวกวน [8]

2.3.1 องค์ประกอบในการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน

ปัจจัย กระบวนการ และผลของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ดังนี้ ปัจจัยนำเข้า ประกอบด้วยความเร็วรอบของ Tool และความเร็วในการเชื่อม กระบวนการ อุณหภูมิและแรงกดของ Tool แรงในแนวแกน F_x และ F_y แรงกด F_z สำหรับการเชื่อมแบบต่อเนื่องแรงกด F_z ลดลง ภายใต้กระบวนการเชื่อมที่ถูกควบคุมในทิศทางการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และจุดรวมของแรงทั้งสามแกน ดังภาพประกอบ 2.10 ผลที่ได้ คือความแข็งแรง ความแข็งของรอยเชื่อม บริเวณอิทธิพลความร้อนและเนื้อเชื่อม โครงสร้างทางโลหะวิทยาด้าน Advancing Side และ Retreating Side



ภาพประกอบ 2.10 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) [9]

2.3.2 ความร้อนจากการเสียดทานแบบกวน

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อมและแรงกด จะทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดทานทางกล และอาจจะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องในงานเชื่อม ผลจากความร้อนที่มากหรือน้อยเกินไป และจากความผิดปกติของการกวนที่ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมสูง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบนและส่วนที่ถูกกวน เพราะผลของข้อบกพร่อง อาจทำให้เกิดช่องว่างในรอยเชื่อม อย่างไรก็ตาม ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างความร้อนที่ไม่เพียงพอ และความผิดปกติในการกวน ดังนั้น ความแตกต่างของข้อบกพร่อง ขึ้นอยู่กับสถานะของการเสียดทาน มวลของครีปที่เกิดขึ้นมาก เกิดจากความร้อนที่มากเกินไป ช่องว่างที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความร้อนที่ไม่เพียงพอ [23]

สมการความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังนี้

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\mu PNR^2}{V} \quad (2.1)$$

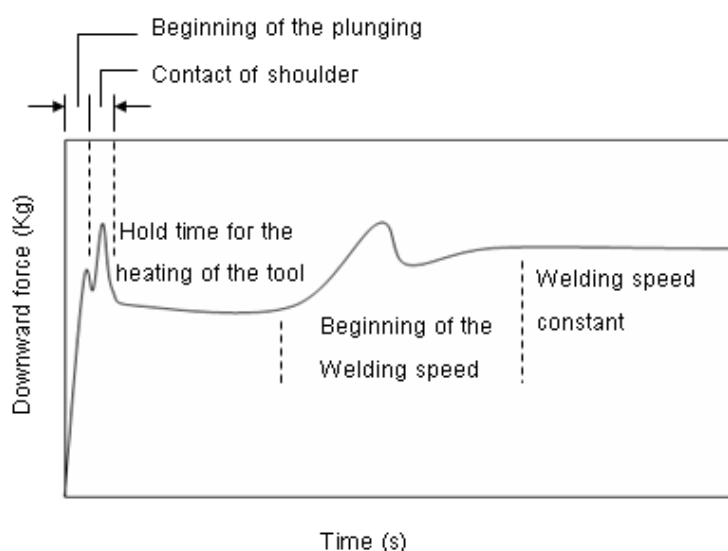
- Q คือ ปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ
- μ คือ สัมประสิทธิ์ของการเสียดทานทางกล
- P คือ แรงกด
- N คือ ความเร็วรอบ
- R คือ รัศมีของบ่า
- V คือ ความเร็วในการเชื่อม

ถ้าปริมาณความร้อนต่อหน่วยความยาว ปริมาณความร้อนคือการคาดว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของการเชื่อม ใช้สมการที่ (2.1)

2.4 แรงกดของเครื่องมือ

แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วย Load Cell เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีแรงเพิ่มขึ้นสามช่วง

ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมจนบ่าสัมผัสแผ่นงาน ช่วงที่สองเป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สามแรงกดจากความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ซึ่งเป็นแรงกดที่เกิดขึ้นนอกเหนือการควบคุม [14] ดังภาพประกอบ 2.11



ภาพประกอบ 2.11 ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อม FSW ในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม [14]

2.5 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray

H. Lambard et al., 2007 กล่าวว่า การปรับเปลี่ยนปัจจัยความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมไม่สมดุล อาจส่งผลให้เกิดช่องว่าง การตรวจสอบทางกายภาพจากลักษณะผิวภายนอกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมไม่สามารถมองเห็นข้อบกพร่องในรอยเชื่อมได้จึงต้องใช้การ X-Ray โดยใช้รังสีเอกซ์ทดสอบงานเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 ภาพรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 จะปรากฏผลของข้อบกพร่องบริเวณเนื้อเชื่อมที่ถูกกวน และส่วนต่างๆ ของงานเชื่อม [24]

2.6 การตรวจสอบทางโลหะวิทยา

เป็นการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ ลักษณะ และขนาดของเกรน ที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของรอยเชื่อม รวมทั้งบริเวณเขต อิทธิพลของความร้อน (TMAZ)

Retreating Side and Advancing Side ใช้ร่วมกับการตรวจสอบด้วยสายตา ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และจุลภาค โดยเตรียมงานทดสอบ (Macro and Micro Specimen) กัดผิวชิ้นทดสอบด้วยสารละลาย Keller's Reagent และนำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยามีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเนื้อโลหะ หลังจากผ่านกระบวนการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ดังนี้

- 2.6.1 ตรวจสอบความสมบูรณ์ของงานเชื่อม
- 2.6.2 การตรวจสอบการกระจายตัวและลักษณะของเกรน
- 2.6.3 ตรวจสอบโครงสร้างบริเวณที่ถูกกวน เขตอิทธิพลความร้อน และเนื้อโลหะเดิม

2.7 การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบความสามารถของโลหะในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นทดสอบ การทดสอบความแข็งที่นิยมใช้กับงานเชื่อมมี 3 วิธี คือ แบบบริเนลล์ ร็อกเวลล์ และวิกเกอร์ส สำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ส เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส จะเหมาะสำหรับการวัดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อม โดยในการวัดความแข็งจะใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา เป็นเวลาที่ใช้ในการกด 10 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก HV ประมาณ 5 kgf/mm² จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ ประมาณ 1,500 kgf/mm² โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะ

2.8 การทดสอบแรงดึง

เป็นการทดสอบสมบัติทางกล เพื่อหาค่าความแข็งแรงของงานเชื่อม (Strength of Weld) โดยการทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อม ใช้ชิ้นทดสอบแบบลดขนาด เพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่รอยต่อของโลหะชิ้นงาน ชิ้นทดสอบเตรียมจากแผ่นงานเชื่อมต่อชน นำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบแรงดึง โดยตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม นำไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s

2.9 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

เป็นการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล C. Montgomery: Sixth edition กล่าวว่า เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ บันทึกรผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าทดสอบ ของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย คือสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistic) เพื่อหาค่าความแปรปรวน และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การกำหนดขนาดตัวอย่าง

การกำหนดขนาดตัวอย่างว่าจะมีจำนวนเท่าไรที่สามารถเป็นตัวแทนประชากรได้เพียงพอและเหมาะสมที่จะทำให้การวิจัยมีประสิทธิภาพไม่สิ้นเปลืองงบประมาณ เวลา และกำลังคน โดยการกำหนดขนาดตัวอย่าง ดังนี้

โดยการกำหนดค่าดังนี้

2.9.1.1 Type I Error (α) = 0.05

2.9.1.2 Power ($1 - \beta$) = 0.95

2.9.1.3 Number of Center Point = 0

2.9.1.4 Estimate σ

2.9.1.5 Minimum Effect (D)

การประมาณค่า σ จากผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง ค่าที่มีการแนะนำให้ใช้ หรือการศึกษาเบื้องต้นของการทดลองนี้ ในกรณีนี้ไม่มีข้อมูลของการทดลองอื่น หรือข้อมูลอื่นๆ มาใช้ในการประมาณค่า ที่ต้องการจึงต้องมีการศึกษาเบื้องต้นเพื่อประมาณค่า σ โดยการออกแบบการทดลอง Factorial Design หาค่า σ จากสมการ (2.2)

$$\sigma = \sqrt{MS_{Error}} \quad (2.2)$$

กำหนดข้อมูลในการทดลองเบื้องต้นเป็นข้อมูลในการทดลองกำหนดปัจจัยดังนี้

ปัจจัยที่ 1. ความเร็วรอบของ Tool มี 2 ระดับ 1320 และ 1750 rpm

ปัจจัยที่ 2. ความเร็วในการเชื่อม มี 3 ระดับ 80, 120, และ 160 mm / min

กำหนดการทำซ้ำในการทดลองเบื้องต้นเท่ากับ 3 ซ้ำ เป็น $3 \times 6 = 18$ ครั้ง เพื่อหาขนาดตัวอย่างของการทดลอง (n) จากการทดลองตามลำดับที่กำหนดไว้ ดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 แสดงค่าความแข็งแรงในการทดลองเบื้องต้นของงานเชื่อม SSM A356

StdOder	RunOder	PtType	Blocks	Rotation Tool	Welding Speed	Ultimate Strength
10	1	1	1	1750	80	168.38
12	2	1	1	1750	160	174.34
13	3	1	1	1320	80	164.6
1	4	1	1	1320	80	162.38
7	5	1	1	1320	80	160.19
6	6	1	1	1750	160	171.56
18	7	1	1	1750	160	174.74
9	8	1	1	1320	160	167.34
15	9	1	1	1320	160	167.33
3	10	1	1	1320	160	165.38
17	11	1	1	1750	120	173.57
14	12	1	1	1320	120	163.79
11	13	1	1	1750	120	173.33
16	14	1	1	1750	80	172.63
8	15	1	1	1320	120	164.64
2	16	1	1	1320	120	163.6
5	17	1	1	1750	120	168.76
4	18	1	1	1750	80	172.46

จากข้อมูลในการทดลองเบื้องต้น โดยใช้ Program Minitab V14 วิเคราะห์ความแปรปรวนค่าความแข็งแรง งานเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ดังตาราง 2.3

หาค่า σ จากสูตร

$$\sigma = \sqrt{MS_{Error}}$$

$$MS_{Error} = 3.763$$

$$\sigma = \sqrt{3.763} = 1.94$$

ความแตกต่างค่าเฉลี่ยของแต่ละปัจจัยที่มีค่าน้อยที่สุด Minimum Effect (D) จากตาราง 2.4 ข้อมูลที่ได้ D = ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงสูงสุด – ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่ำสุด

$$D = 173.55 - 162.40 \text{ MPa}$$

$$D = 11.15 \text{ MPa}$$

ตาราง 2.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนของงานเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356

Multilevel Factorial Design

Factors: 2 Replicates: 3
 Base runs: 6 Total runs: 18
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 2, 3

General Linear Model: Stress,U versus Rotation RPM, Welding Speed

Factor	Type	Levels	Values
Rotation RPM	fixed	2	1320, 1750
Welding Speed	fixed	3	80, 120, 160

Analysis of Variance for Stress,U, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation RPM	1	276.282	276.282	276.282	73.42	0.000
Welding Speed	2	34.484	34.484	17.242	4.58	0.033
Rotation RPM*Welding Speed	2	2.721	2.721	1.360	0.36	0.704
Error	12	45.158	45.158	3.763		
Total	17	358.644				

S = 1.93989 R-Sq = 87.41% R-Sq(adj) = 82.16%

ตาราง 2.4 ค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม SSM A356

		Welding Speed (mm/ min)					
		80		120		160	
Rotation (RPM)	1,320	1.62.83	162.40	163.60	164.01	165.38	166.68
		160.19		164.64		167.34	
		164.60		163.79		167.33	
	1,750	172.64	171.22	168.76	171.89	171.56	173.55
		168.38		173.33		174.34	
		172.63		173.57		174.74	

ขนาดตัวอย่างจากข้อมูลที่กำหนด โดยใช้โปรแกรม Program Minitab V14 Sample Size and Power ได้ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (n) และ Power ดังตาราง 2.5

ตาราง 2.5 การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดลอง

Power and Sample Size

One-way ANOVA

Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 0.95 Number of Levels = 2

SS Means	Sample Size	Power	Maximum Difference
62.1613	2	0.99885	11.15
62.1613	3	1.00000	11.15

The sample size is for each level.

ขนาดตัวอย่าง (Sample Size) ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (n) ครั้งนี้ เท่ากับ 3 มีค่า Power เท่ากับ 1.00000 กำหนดทำซ้ำในการทดลองเท่ากับ 3 ซ้ำ เป็น $3 \times 6 = 18$ ครั้ง

2.9.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และ ปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดอยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลคือ ในแต่ละซ้ำของการทดลองประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $a \cdot b$ การทดลอง โดยปกติจะมีจำนวนทำซ้ำทั้งหมด n ครั้ง กำหนดให้ y_{ijk} คือผลตอบที่สังเกตได้เมื่อปัจจัย A อยู่ที่ระดับ i ($i = 1, 2, \dots, a$) และปัจจัย B อยู่ที่ระดับ j ($j = 1, 2, \dots, b$) สำหรับซ้ำที่ k ($k = 1, 2, \dots, n$) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เนื่องจากลำดับของการสังเกตทั้ง $a \cdot b \cdot n$ ครั้ง ถูกเลือกมาอย่างสุ่ม ซึ่งเป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design) แบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) สมการ (2.3)

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.3)$$

โดยที่ μ หมายถึง ผลเฉลี่ยทั้งหมด τ_i หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ i ของแถวของปัจจัย A; β_j หมายถึง ผลที่เกิดจากระดับที่ j ของคอลัมน์ ของปัจจัย B; $(\tau\beta)_{ij}$ หมายถึง ผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่าง τ_i และ β_j และ ε_{ij} หมายถึง องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่มสมมติว่าปัจจัยทั้งคู่มีค่าตายตัว (Fixed) และผลจากการทดลอง (Treatment Effect) หมายถึง ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด ดังนั้น $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัวและกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนทำซ้ำ n ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ $a \cdot b \cdot n$

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจากความเร็รรอบ (A) และ ความเร็วในการเชื่อม (B) มีความสำคัญเท่ากัน

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากความเร็รรอบ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \tau_i \neq 0 \quad \text{At Least One}$$

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากความเร็วในการเชื่อม

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \quad \text{At Least One}$$

ผลของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมมีนัยสำคัญหรือไม่

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{For All } i, j$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{At Least One}$$

การทดสอบสมมติฐานเหล่านี้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ปัจจัย

2.9.3 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับ Fixed Effects Model

กำหนดให้ $y_{i..}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ i ของปัจจัย A; $y_{.j.}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้ระดับที่ j ของปัจจัย B; $y_{ji.}$ เป็นค่าผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดภายใต้เซลล์ตำแหน่งที่ ij ; และ $y_{...}$ เป็นผลรวมของข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดที่ได้ กำหนดให้ $\bar{y}_{i..}, \bar{y}_{.j.}, \bar{y}_{ij.}$ และ $\bar{y}_{...}$ เป็นค่าเฉลี่ยของแถวคอลัมน์ เซลล์ และผลรวมทั้งหมดซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการ (2.4)

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (2.4)$$

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} \quad j = 1, 2, \dots, b \quad (2.5)$$

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} \quad i = 1, 2, \dots, a; \quad j = 1, 2, \dots, b \quad (2.6)$$

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn} \quad (2.7)$$

ค่าของผลรวมแก้ไขแล้วทั้งหมดของกำลังสองสามารถเขียนได้ ดังสมการ (2.8)

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n [(\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})]^2$$

$$\begin{aligned}
&= bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 + n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \\
&+ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2
\end{aligned} \tag{2.8}$$

สังเกตได้ว่าค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสองจะถูกแบ่งออกเป็นผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากแถว (ปัจจัย A) ผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากคอลัมน์ (ปัจจัย B) ผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่าง A และ B (SS_{AB}) และผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาด (SS_E) และจากด้านบนเห็นว่าพจน์สุดท้าย จะต้องมียังน้อย 2 เรพลิเคตเพื่อทำให้เราสามารถคำนวณค่าของผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการได้ใหม่ ดังสมการ (2.9)

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \tag{2.9}$$

เมื่อนำค่าของผลรวมของกำลังสองมาหารด้วยระดับขั้นความเสรีก็จะได้ค่ากำลังสองเฉลี่ย โดยที่ค่าคาดหมายของค่ากำลังสองเฉลี่ยคือ

$$E(MS_A) = E\left(\frac{SS_A}{a-1}\right) = \sigma^2 + \frac{bn \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \tag{2.10}$$

$$E(MS_B) = E\left(\frac{SS_B}{a-1}\right) = \sigma^2 + \frac{bn \sum_{j=1}^b \beta_j^2}{a-1} \tag{2.11}$$

$$E(MS_{AB}) = E\left(\frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}\right) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)} \tag{2.12}$$

$$E(MS_E) = E\left(\frac{SS_E}{ab(n-1)}\right) = \sigma^2 \tag{2.13}$$

สังเกตว่า ถ้าสมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ที่ว่า ไม่มีผลเนื่องจากปัจจัยของแถว คอลัมน์ และอันตรกิริยามีค่าเป็นจริง ดังนั้น MS_A , MS_B , MS_{AB} และ MS_E จะมีค่าประมาณเท่ากับ σ^2 อย่างไรก็ตาม ถ้ามีความแตกต่างเนื่องจากปัจจัยของแถว จะได้ว่า MS_A จะมีค่ามากกว่า MS_E เหตุการณ์ทำนองเดียวกันจะเกิดขึ้นกับ MS_B และ MS_{AB} เช่นกัน ดังนั้น ในการทดสอบความมี

นัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยาค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องด้วยค่า MS_E ถ้าอัตราส่วนมีค่ามาก หมายความว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่สนับสนุนสมมติฐานหลัก(ปฏิเสธสมมติฐานหลัก)

แบบจำลองตามสมการที่ 2.3 เป็นแบบจำลองที่เหมาะสม และพจน์ของความผิดพลาด ε_{ijk} มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ โดยมีค่าความแปรปรวนคงตัวเท่ากับ σ^2 ดังนั้น อัตราส่วนของค่ากำลังสองเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจาก MS_A/MS_E , MS_B/MS_E , และ MS_{AB}/MS_E จะมีการกระจายแบบ F ซึ่งมีระดับชั้นความเสรีของตัวตั้งเป็น a-1, b-1 และ (a-1)(b-1) และมีระดับชั้นความเสรีของตัวหารคือ ab(n-1) ค่าบริเวณวิกฤติ (Critical Region) คือปลายทางด้านบนของการกระจายแบบ F วิธีการทดสอบโดยอาศัยตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ตารางที่ 2.6

ตาราง 2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปรแบบ Fixed Effects Model

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	F_o
A Treatment	SS_A	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_o = \frac{MS_A}{MS_E}$
B Treatment	SS_B	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_o = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_o = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SS_T	abn - 1		

เพื่อให้คำนวณได้ง่าย เราสามารถหาค่าของ SS_T , SS_A , SS_B และ SS_E ได้ดังสมการต่อไปนี้
คำนวณค่าต่างๆ ได้จากสมการ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad \text{Total Sum of Square} \quad (2.14)$$

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i\cdot\cdot}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot\cdot}^2}{abn} \quad \text{Total Sum of Main Effects} \quad (2.15)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{\cdot j\cdot}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot\cdot}^2}{abn} \quad (2.16)$$

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\cdot}^2 - \frac{y_{\cdot\cdot\cdot}^2}{abn} \quad (2.17)$$

$$SS_{AB} = SS_{Subtotals} - SS_A - SS_B \quad (2.18)$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.19)$$

$$R^2 = \left(1 - \frac{SS_E}{SS_T} \right) \times 100 \quad (2.20)$$

2.9.3.1 ข้อกำหนดของการทดลอง เป็นการกำหนดค่าทดสอบในทางสถิติของปัจจัยที่ได้จากการทดลอง เพื่อตรวจสอบค่าทางสถิติ

- 1) Error Type I (Alpha: α) = 0.05
- 2) Error Type II (Beta: β) = 0.05
- 3) Factor A = ความเร็วรอบในการหมุนของเครื่องมือ
- 4) Factor B = ความเร็วในการเชื่อมต่อ (Welding Speed)

2.9.4 สมมติฐานในการทดลอง

เป็นการทดสอบตัวแปรที่ถูกกำหนดในการทดลองว่ามีอิทธิพลต่อการทดลองหรือไม่โดยตั้งสมมติฐานหลักและความสัมพันธ์ของตัวแปร ตรวจสอบผลด้วยค่าทางสถิติดังนี้

2.9.4.1 พิจารณา Main Effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วยรอบ

$H_0 : \tau_1 = \tau_2$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วยรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วยรอบแตกต่างกัน

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ สำหรับทุกระดับอิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมแตกต่างกัน

2.9.4.2 พิจารณา 2 Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วในการเชื่อม

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของ Interaction

($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$)

$H_1 : \text{at least one } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของ Interaction ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$)

2.9.5 แบบจำลองการถดถอย

การสร้างแบบจำลองการถดถอยกับตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ซึ่งจะสร้างแบบจำลองและหาความสัมพันธ์ของตัวแปร คือ ความเร็วรอบของเครื่องมือ ที่ระดับ 1,320 และ 1,750 rpm. ผลของงานเชื่อม SSM A356 ค่าความแข็งแรง มีความสัมพันธ์กับความเร็วในการเชื่อม ที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min จึงได้สร้างแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ของงานเชื่อม ๆ ด้วยความเร็วรอบของเครื่องมือ กับความเร็วในการเชื่อม และใช้แบบจำลองในการพยากรณ์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเครื่องมือกับความเร็วในการเชื่อมของงานเชื่อม SSM A356 แบบจำลองที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (2.21)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (2.21)$$

สมการทั่วไปของ Regression Factorial Design

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.22)$$

2.9.6 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ

เป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองในการตรวจสอบการใช้งานของแบบจำลอง โดยสมมติว่าค่าความผิดพลาดในแบบจำลอง ε_1 มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนย่อได้เป็น ε -NID ($0, \sigma^2$) ผล

ก็คือ ข้อมูลที่เก็บมาได้ y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ ความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยคือการทดสอบเพื่อตรวจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ y และเซตย่อยของตัวแปรถดถอย x_1, x_2, \dots, x_k หรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมคือ

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 = \beta_j \neq 0 \text{ for at Least One } j$$

การปฏิเสธ H_0 จากสมมติฐาน บอกให้ทราบว่า อย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย x_1, x_2, \dots, x_k หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง การทดสอบทำได้จากการแบ่งผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง (SS_T) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลรวมกำลังสองที่เกิดจากแบบจำลองหรือการถดถอย และผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากส่วนตกค้างหรือความผิดพลาด คำนวณได้จากสมการ (2.23)

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (2.23)$$

ถ้าสมมติฐานศูนย์ $H_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_k = 0$ เป็นจริงแล้ว SS_R / σ^2 จะมีการกระจายแบบ X^2_k โดยที่ระดับขั้นความเสรีของ X^2 เท่ากับจำนวนของตัวแปรการถดถอยในแบบจำลองในทำนองเดียวกันเราสามารถแสดงได้ว่า SS_R / σ^2 มีการกระจายแบบ X^2_{n-k-1} และ SS_E และ SS_R จะเป็นอิสระ วิธีการทดสอบ $H_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_k = 0$ คือการคำนวณจากสมการ (2.24)

$$F_0 = \frac{SS_R / K}{SS_E / (n - k - 1)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (2.24)$$

ปฏิเสธ H_0 ก็ต่อเมื่อ F_0 มีค่ามากกว่า $F_{\alpha, k, n-k-1}$ ในทางกลับกันอาจจะใช้วิธีการ P-value เพื่อทดสอบสมมติฐานและจะปฏิเสธ H_0 ต่อเมื่อ P-value สำหรับค่าสถิติ F_0 น้อยกว่า α ตารางทั่วไปในการวิเคราะห์ความแปรปรวนถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 2.7

ตาราง 2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอย

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
Regression	SS_R	K	MS_R	MS_R / MS_E
Error or Residual	SS_E	$n - k - 1$	MS_E	
Total	SS_T	$n - 1$		

สูตร SS_R อาจหาได้จากสูตรของ SS_E ในสมการ (2.25) กล่าวคือ

$$SS_E = y'y - \hat{\beta}'x'y \quad (2.25)$$

เนื่องจาก $SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 / n = y'y - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 / n$ ซึ่งอาจจะเขียนสมการนี้ใหม่ได้เป็นสมการ (2.26)

$$SS_E = y'y - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \left[\hat{\beta}'x'y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \right] \quad (2.26)$$

หรือเขียนเป็น

$$SS_E = SS_T - SS_R \quad (2.27)$$

ดังนั้น การถอดแยกแบบผลรวมของกำลังสอง ดังสมการ (2.28)

$$SS_R = \hat{\beta}'x'y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (2.28)$$

ผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง ดังสมการ (2.29) คือ

$$SS_T = y'y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (2.29)$$

การคำนวณทำได้ โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ แสดงให้เห็นส่วนหนึ่งของผลการวิเคราะห์จาก Statgraphics คือการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง การทดสอบความมีนัยสำคัญของการถอดแยกของการทดสอบสมมติฐานที่ว่า

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = 0$$

$$H_1 \neq 0 \text{ for at Least One } j$$

ค่า P-value สำหรับค่าสถิติ F (สมการ 3.13) จะสรุปได้ว่าอย่างน้อยที่สุดหนึ่งในสองของตัวแปรความเร็วรอบของ Tool และอัตราความเร็วในการเชื่อมจะมีสัมประสิทธิ์การถอดแยกไม่เป็นศูนย์

ค่า R^2 คำนวณได้จากสมการ (2.30)

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (2.30)$$

R^2 เป็นตัววัดของจำนวนที่ลดลงในความแปรผันของ Y เมื่อใช้ตัวถดถอย X_1, X_2, \dots, X_K ในแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ค่าที่ R^2 มีค่ามากไม่ได้แปลว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้ดี เนื่องจากการเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ R^2 เพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เดิมเข้าไปนั้นจะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้น อาจจะเป็นไปได้ว่าแบบจำลองที่มีค่า R^2 มาก อาจจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าผลตอบก็ได้

เนื่องจาก R^2 มีค่าเพิ่มขึ้นเสมอเมื่อเราเพิ่มพจน์ต่าง ๆ เข้าไปในแบบจำลอง ทำให้ค่าสถิติ R^2 แบบปรับแล้วมากกว่าเขียนเป็นสมการได้เป็นสมการ (2.31)

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E / (n - p)}{SS_E / (n - 1)} = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - p} \right) (1 - R^2) \quad (2.31)$$

ตามปกติสถิติ R^2 แบบปรับแล้วจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริง ถ้าเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงในแบบจำลอง ค่าของ R^2_{adj} จะมีค่าลดลงเสมอ เมื่อ R^2 และ R^2_{adj} แตกต่างกันมาก จะหมายความว่ามีโอกาสสูงที่จะพบว่าพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญ ได้ถูกเติมลงไปแบบจำลอง

2.9.7 การทดสอบ Lack of Fit

การเติมจุดศูนย์กลางเข้าไปยังการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k ที่ทำให้ผู้ทำการทดลองสามารถหาตัวประมาณของความผิดพลาดในการทดลองโดยตรง (Pure Experimental Error) ได้ และทำให้เราสามารถแบ่งผลรวมของกำลังสองตกค้าง SS_E ไปเป็นสองส่วนได้คือ

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (2.32)$$

โดยที่ SS_{PE} คือผลรวมของกำลังสองที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดโดยตรงและ SS_{LOF} คือผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจาก Lack of Fit อาจแสดงวิธีการหาส่วนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยได้สมมติว่า มีการทดลองอยู่ n_i ภายใต้อุปกรณ์ที่ระดับ i ของตัวถดถอย $X_i, i = 1, 2, \dots, m$ กำหนดให้ y_{ij} แทนข้อมูลครั้งที่ j

บนผลตอบที่ X_i , $i = 1, 2, \dots, m$ และ $j = 1, 2, \dots, n_i$ มีจำนวนของข้อมูลทั้งหมด $n = \sum_{i=1}^m n_i$ เราสามารถเขียนส่วนตกค้างที่ (ij)

ตัววัดของความผิดพลาดและ Lack of Fit ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดโดยตรงคือสมการ (2.33)

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.33)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับ Lack of Fit คือสมการ (2.34)

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.34)$$

คือค่าผลรวมของกำลังสองที่ถูกถ่วงน้ำหนักของส่วนต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบ \bar{y}_i ที่ระดับต่างๆ ของ X_i กับค่าฟิตที่เกี่ยวข้อง ถ้าค่าฟิต \hat{y}_i มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของผลตอบ \bar{y}_i แสดงว่าฟังก์ชันการถดถอยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ถ้า \hat{y}_i มีความแตกต่างจาก \bar{y}_i มาก แสดงว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นแบบเชิงเส้น จะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $m - p$ ที่เกี่ยวกับ SS_{LOF} เพราะว่ามีระดับ m ระดับของ X และระดับขั้นความเสรี p ค่าจะเสียไป เนื่องจากการประมาณพารามิเตอร์ p ตัวให้แก่แบบจำลอง ในการคำนวณจะหาค่า SS_{LOF} จากการลบ SS_{PE} จาก SS_F

สถิติที่ใช้ในการทดสอบ Lack of Fit ดังสมการ (2.35)

$$F_0 = \frac{SS_{LOF} / (m - p)}{SS_{PE} / (n - m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (2.35)$$

ค่าคาดหวังของ MS_{PE} คือ σ^2 และค่าคาดหวังของ MS_{LOF} ดังสมการ (2.36)

$$E(MS_{LOF}) = \sigma^2 + \frac{\sum_{i=1}^m n_i \left[E(y_i) - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right]^2}{m - 2} \quad (2.36)$$

ถ้าฟังก์ชันการถดถอยเป็นเส้นตรงจริง ดังนั้น $E(y_i) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ และพจน์ที่สองของสมการ (2.35) เท่ากับ 0 ทำให้ $E(MS_{LOF}) = \sigma^2$ อย่างไรก็ตาม ถ้าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้น $E(y_i) \neq \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ และ $E(MS_{LOF}) > \sigma^2$ ยิ่งกว่านั้นถ้าฟังก์ชันการถดถอยเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นสถิติ F_0 จะมีการกระจายแบบ $F_{\alpha, m-p, n-m}$ เพื่อเป็นการทดสอบ Lack of Fit

สามารถคำนวณตัวทดสอบสถิติ F_0 และสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นถ้า $F_0 > F_{\alpha, m-p, n-m}$ การทดสอบด้วยวิธีการเช่นนี้ง่ายที่จะประกอบเข้าเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ความแปรปรวนถ้าเราสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้น แบบจำลองที่กำลังพิจารณาอยู่ก็ไม่ควรจะถูกนำมาพิจารณาต่อไปและพยายามหาสมการที่เหมาะสมกว่าต่อไป ในทางตรงกันข้าม ถ้า F_0 มีค่าไม่เกินกว่า $F_{\alpha, m-p, n-m}$ จะสรุปได้ว่าไม่มีหลักฐานสำหรับ Lack of Fit และเราสามารถรวม MS_{PE} และ MS_{LOF} เข้าด้วยกันเพื่อประมาณค่า σ^2

ทดสอบความสมรูปของตัวแบบถดถอยกับข้อมูล (Lack of Fit Test)

สมมติฐานในการทดสอบความสมรูปของตัวแบบถดถอยกับข้อมูล

H_0 : ตัวแบบถดถอยมีความสมรูป (Fit) กับข้อมูล

H_1 : ตัวแบบถดถอยมิได้มีความสมรูปกับข้อมูล

2.9.8 พื้นผิวผลตอบ

พื้นผิวผลตอบ Response Surface Methodology. RSM มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ เช่น ระดับความเร็วรอบของเครื่องมือ (X_1) อัตราความเร็วในการเชื่อม (X_2) ที่ทำให้ค่าความแข็งแรงดีที่สุด ดังนั้นจึงต้องหาตัวประมาณค่าเป็นตัวแทนแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณค่าความสัมพันธ์ คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการ (2.37)

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.37)$$

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุประสงค์ในการดำเนินการวิจัยมุ่งศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปัจจัยที่ควบคุมทางด้าน ความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อมของการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่มีผลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและทางกล

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสำหรับการวิจัย การตรวจสอบเครื่องมือ อุปกรณ์และความพร้อม เพื่อให้แน่ใจว่าสิ่งที่ถูกออกแบบในการทดลองสามารถที่จะทำได้ตาม ปัจจัยของการทดลอง และวัสดุที่ใช้มีความเพียงพอ การเตรียมวัสดุให้อยู่ในช่วงเวลาและสถานะ เดียวกันเพื่อให้ค่าที่ได้มีความเชื่อมั่น ได้ว่ามีความเที่ยงตรงสูงเป็นที่น่าเชื่อถือ ในการทดลองครั้งนี้ ใช้เครื่องกัด โดยมีเครื่องมือซึ่งทำจากวัสดุที่ทนความร้อน (JIS SKH 57) ในการเชื่อมเสียดทานทาง กล และวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง A356 ดังนี้

3.1.1 อะลูมิเนียมผสม

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้จากงานวิจัย เกษญา วรณสินธุ์ และคณะ 2006 อะลูมิเนียมหล่อผสม 0.32% แมกนีเซียม 7.74% ซิลิคอนและธาตุอื่นๆ เกรด A356 ผ่านการหล่อ แบบ Rheocasting ที่อุณหภูมิประมาณ 700° C เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 620° C ใช้แก๊สอาร์กอนผ่านแท่งกราไฟต์ ในการทำ SSM A356 ด้วยการหล่อแบบอัด (Squeeze Casting) และกัด (Milling) ขึ้น ทดสอบ มีขนาด 100 x 50 x 4 มม.³ จำนวน 36 ชิ้น ส่วนผสมทางเคมีตามตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อผสม A356 (W.T.%)

วัสดุ	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Al
A356	7.74	0.57	0.05	0.06	0.32	0.01	0.05	0,02	0.01	Bal.

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ก่อนการดำเนินงานในการวิจัยจัดเตรียม ตรวจสอบเครื่องมือและอุปกรณ์ดังนี้

3.1.2.1 เครื่องกัด

3.1.2.2 เครื่องทดสอบความแข็ง

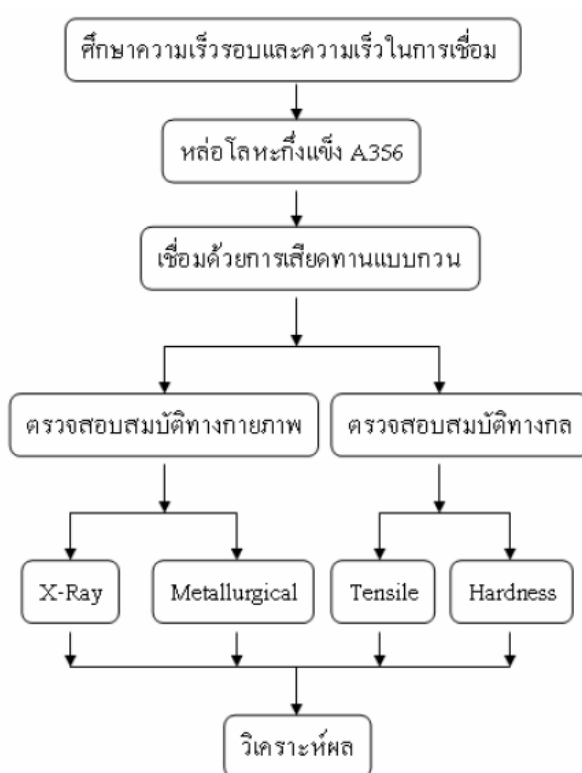
3.1.2.3 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.1.2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope , OM)

3.1.2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราดซึ่งมีระบบเอ็กซ์เรย์ด้วย (Scanning Electron Microscope , SEM และ Energy Dispersive X-ray analysis , EDX)

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ปัจจัยการทดลองแบบแฟคทอเรียล ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Factorial in Completely Randomized Design) โดยศึกษาปัจจัยของความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมที่ระดับต่างๆ ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังภาพประกอบ 3.1



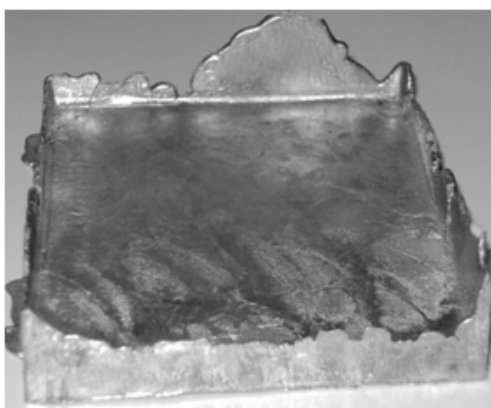
ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.3 การเตรียมชิ้นทดสอบ

เป็นการเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ ในการหล่ออะลูมิเนียมผสมกึ่งของแข็งเกรด A356 การกัดชิ้นทดสอบตามขนาดที่กำหนด และการขึ้นรูปของชิ้นทดสอบทางกลตามมาตรฐาน ASTM (E8) และการตรวจสอบทางโลหะวิทยาดังนี้

3.3.1 การหล่ออะลูมิเนียมผสมกึ่งของแข็ง A356

ชิ้นทดสอบจากงานวิจัย เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ 2006 เป็นอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด A356 ส่วนผสมทางเคมี 7.74% Si 0.32% Mg และธาตุอื่นๆ ให้ความร้อนอุณหภูมิหลอมเหลวที่ประมาณ 700°C ผ่านกระบวนการ Rheocasting โดยใช้แก๊สอาร์กอนผ่านแท่งการไฟต์จุ่มในน้ำโลหะอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 620°C เป็นเวลา 20 วินาที นำไปอัด (Squeeze) ที่แรงความดันไม่น้อยกว่า 2,000 psi ได้ชิ้นงาน (Sample) ที่มีขนาด $120 \times 120 \times 8$ มม.³ ดังภาพประกอบ 3.2

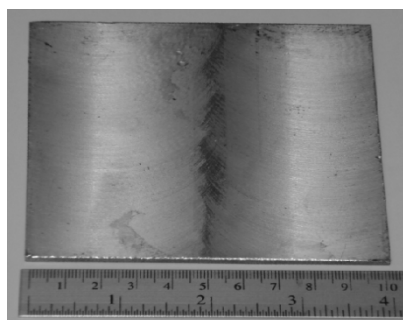


ภาพประกอบ 3.2 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356

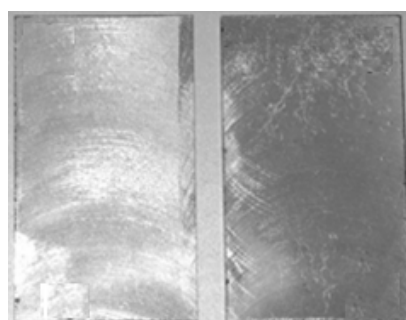
3.3.2 การกัดอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356

อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด A356 ที่ผ่านการหล่อแบบอัดนำไปกัดด้วยเครื่องกัดให้มีขนาด $100 \times 100 \times 4$ มม.³ ดังภาพประกอบ 3.3 (ก) และตัดให้มีขนาด $100 \times 50 \times 4$ มม.³ ดังภาพประกอบ 3.3 (ข) จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดลอง จากปัจจัยในการทดลองซึ่งมี 2

ปัจจัยคือความเร็วรอบ มี 2 ระดับ และความเร็วในการเชื่อมมี 3 ระดับ ในหนึ่งชั่วโมงมีการทดลอง 6 ครั้งๆ ละ 2 ชิ้นจากการตรวจสอบค่าทางสถิติในเบื้องต้นทำการทดลอง 3 ชั่วโมงที่มีความเพียงพอ ดังนั้นการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 18 ครั้ง ใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 36 ชิ้น และการทดสอบเนื้อโลหะเดิมซึ่งสุ่มมา 8 ชุดๆ ละ 3 ชิ้น รวมเป็น 24 ชิ้น ดังภาพประกอบ 3.3 (ก) และ (ข)



(ก) ชิ้นงาน SSM A356 100x100x4 มม.

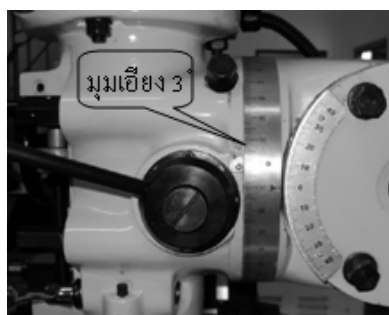


(ข) ชิ้นงาน SSM A356 100x50x4 มม.

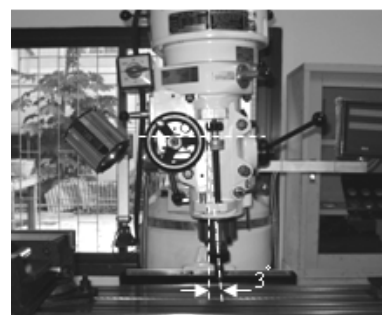
ภาพประกอบ 3.3 ชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 ผ่านการกัดด้วยเครื่องกัด

3.3.3 การปรับมุมเอียงของเครื่องมือ

การปรับมุมเอียงของเครื่องมือ โดยการปรับหัวของเครื่องกัด เอียงทำมุม 3° ดังภาพประกอบ 3.4 (ก) และปรับระดับอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบให้ได้ระดับคงที่ตลอดความยาวของชิ้นทดสอบ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจากแนวตั้งเอียงทำมุม 3° ดังภาพประกอบ 3.4 (ข)



(ก) ปรับหัวเครื่องกัด มุมเอียง 3°



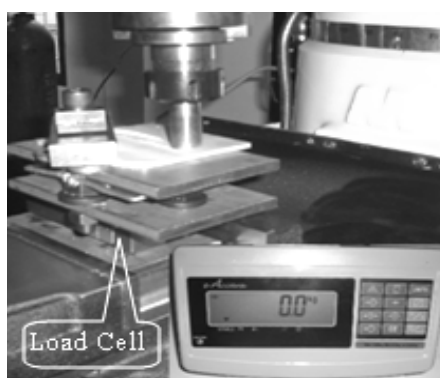
(ข) เครื่องมือเอียงทำมุม 3° กับแนวตั้ง

ภาพประกอบ 3.4 การปรับมุมเอียง 3° ของเครื่องมือ

3.4 แรงกดในการเชื่อมเสียดทานแบบบววน

แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วย Load Cell เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบบววนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อมที่ 80, 120 และ 160 mm/min แรงกดขณะทำการเชื่อมมีแรงที่เกิดขึ้นสามช่วง ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในขณะที่เริ่มต้นของการเชื่อมจนป่าสัมผัส

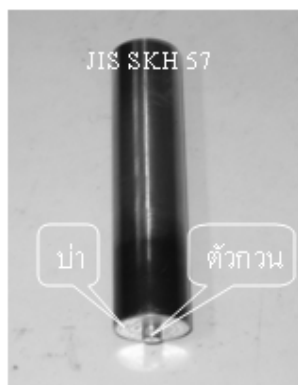
แผ่นงาน ช่วงที่สองเป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สามแรงกดเพิ่มขึ้นจากความเร็วในการเชื่อม ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นนอกเหนือการควบคุม ดังภาพประกอบ 3.5



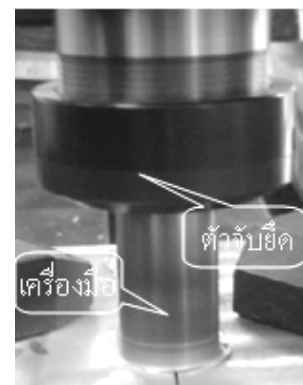
ภาพประกอบ 3.5 การวัดค่าแรงกดในการเชื่อมอะลูมิเนียม SSM A356 ด้วย Load Cell

3.5 เครื่องมือ

การออกแบบเครื่องมือมีลักษณะทรงกระบอกขนาด \varnothing 20 มม. ตัวกวนมีขนาด \varnothing 5 มม. ความยาว 3.2 มม. ทำจากวัสดุ JIS SKH 57 ดังภาพประกอบ 3.6 (ก) ความยาวของตัวกวนจะมีค่าน้อยกว่าความหนาของแผ่นงานในการเชื่อมเครื่องมือจะถูกจับยึดด้วยอุปกรณ์ของเครื่องกัด ดังภาพประกอบ 3.6 (ข)



(ก) เครื่องมือวัสดุ JIS SKH 37

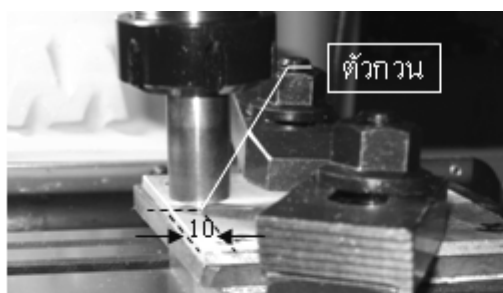


(ข) อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ

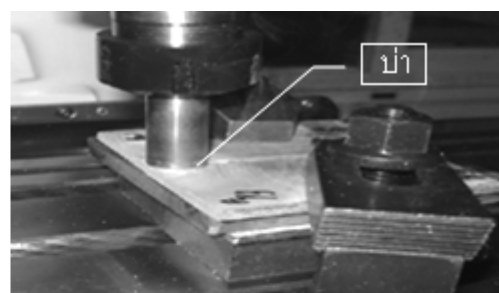
ภาพประกอบ 3.6 ลักษณะของเครื่องมือและการจับยึด

3.6 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

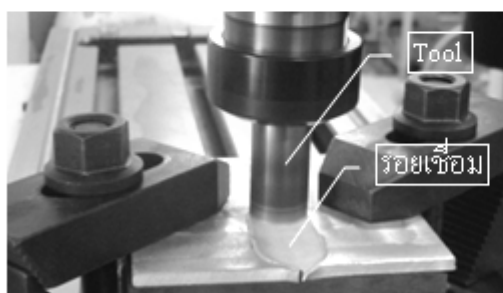
จากการปรับเครื่องกัดและตั้งค่าตัวแปรในการเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min จับยึดชิ้นทดสอบให้แน่น ตัวกวนห่างจากขอบชิ้นทดสอบ 10 มม. ดังภาพประกอบ 3.7 (ก) เพิ่มแรงกดด้วยอัตราป้อน 0.2 mm/min จนบ่าสัมผัสแผ่นงานจากนั้นให้เพิ่มแรงกดโดยการกดชิ้นทดสอบเพิ่มอีก 0.3 มม. วัสดุแรงกดได้ประมาณ 300 กิโลกรัมกำหนดให้การเสียดทานคงที่ ณ จุดเริ่มต้น 20 วินาที และเริ่มเดินแนวเชื่อมบนชิ้นทดสอบตามเงื่อนไขแต่ละตัวแปรในการทดลองโดยอัตโนมัติ ดังภาพประกอบ 3.7 (ข), (ค) และ (ง) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกตัวกวนออกจากรอยเชื่อม ให้การเสียดทานคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อม 10 วินาที



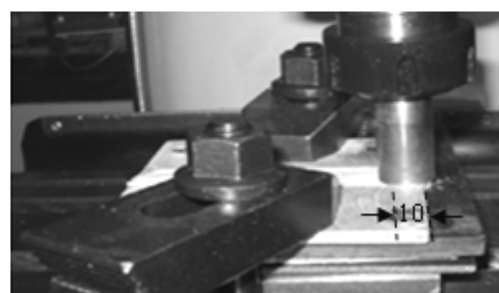
(ก) จุดเริ่มต้นการเชื่อม 10 มม. จากขอบงาน



(ง) แรงกด 300 กก.ก่อนเดินแนวเชื่อม 20 วินาที



(ค) เดินแนวเชื่อม โดยอัตโนมัติ



(จ) สิ้นสุดการเดินแนวเชื่อมด้วยการเสียดทาน

ภาพประกอบ 3.7 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ

การตรวจสอบทางกายภาพใช้ร่วมกับการตรวจสอบด้วยสายตา การเตรียมชิ้นทดสอบมหภาค กัดผิวชิ้นทดสอบด้วยสารละลาย Keller's Reagent และตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องกำลังขยายต่ำกว่า 10 เท่า ตรวจสอบทางกายภาพ เพื่อดูลักษณะรอยเชื่อม และตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50-2,500 เท่า

การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพมีจุดประสงค์ ดังนี้

- 1) ตรวจสอบความสมบูรณ์ของงานเชื่อม
- 2) การตรวจสอบการกระจายตัวของโลหะภายในรอยเชื่อม
- 3) ตรวจสอบลักษณะการกวนในรอยเชื่อม
- 4) ตรวจสอบโครงสร้างบริเวณที่ถูกกวน
- 5) ตรวจสอบโครงสร้างบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน
- 6) ตรวจสอบโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม

3.7.1 การตรวจสอบผิวด้านบนของรอยเชื่อมด้วยสายตา

การตรวจสอบผิวด้านบนของรอยเชื่อมจากภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล กำลังขยาย 5-10 เท่า ในแต่ละปัจจัยและทุกระดับ เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม เปรียบเทียบกับลักษณะและความแตกต่างของรอยเชื่อมในแต่ละปัจจัยของแต่ละระดับ

3.7.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

การเตรียมชิ้นทดสอบ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macro-Specimen) ของรอยเชื่อมภาคตัดขวางตั้งฉากกับแนวเชื่อม ด้วยกล้องกำลังขยาย 5-10 เท่า โดยการขัดชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทราย กัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารละลาย Keller's Reagent และนำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์และน้ำเกลือป้องกันออกไซด์ ตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้อง กำลังขยาย 5-10 เท่า เปรียบเทียบลักษณะความแตกต่างรอยเชื่อมของแต่ละปัจจัยในแต่ละระดับ

3.7.3 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray

เป็นการตรวจสอบหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม จากการปรับเปลี่ยนปัจจัยความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อม ที่ส่งผลให้รอยเชื่อมขาดความสมดุล เกิดข้อบกพร่องในงานเชื่อม การตรวจสอบทางกายภาพ จากลักษณะผิวภายนอกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมไม่สามารถมองเห็นข้อบกพร่องต่างๆ ในรอยเชื่อมได้ จึงต้องใช้ผลของการ X-Ray ภาพรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อแข็ง A356 จะปรากฏผลบริเวณเนื้อโลหะที่ถูกกวน วิเคราะห์ผลจากภาพ ร่วมกับข้อมูลในการเชื่อมและปัจจัยต่างๆ ในการเชื่อม สรุปผล โดยเครื่อง X-Ray ที่ใช้ เป็นของบริษัท คิวเว เทสติง แอนด์ อินสเปคชัน จำกัด

3.7.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ชิ้นทดสอบจะถูกตัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้แนวเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบ นำชิ้นทดสอบมาขัดตามขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างชิ้นทดสอบ นำมากัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายเจือจาง Keller's Reagent เพื่อตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณเนื้อโลหะเดิม เขตอิทธิพลของความร้อนด้าน Retreating Side กับ Advancing Side และ บริเวณที่ถูกกวนของงานเชื่อม

ตรวจสอบข้อบกพร่องและความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมแต่ละปัจจัยในแต่ละระดับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสงที่กำลังขยาย 50 ถึง 2,500 เท่า ดังภาพประกอบ 3.8



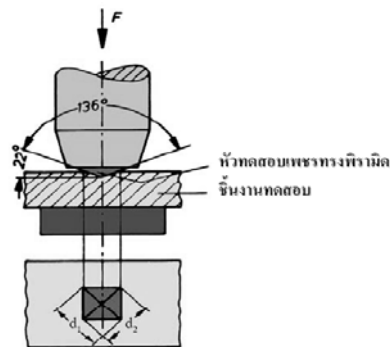
ภาพประกอบ 3.8 กล้องจุลทรรศน์ แบบลำแสง

3.8 การทดสอบทางกล

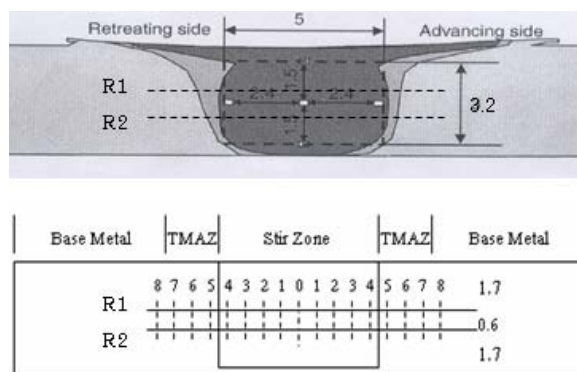
เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวรโดยการกดผิวหน้าของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องมือโครวิกเกอร์ เพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงกดเป็นค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ และการดึง เพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เป็นค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบ ดังนี้

3.8.1 การทดสอบความแข็ง

เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดกระทำลงบนชิ้นทดสอบ โดยใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างรอยกด $60 - 70 \mu m$. แรงกดที่ใช้ 100 กรัม กดเป็นเวลา 10 วินาที หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม ที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา ค่าความแข็งคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว ดังภาพประกอบ 3.9 สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมากประมาณ 5 kgf/mm^2 จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ ประมาณ $1,500 \text{ kgf/mm}^2$ โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ



ภาพประกอบ 3.9 แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยไมโครวิกเกอร์



ภาพประกอบ 3.10 บริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์

การวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์บริเวณภาคตัดขวางรอยเชื่อม ดังภาพประกอบ 3.10 และการคำนวณใช้สมการ 3.1

$$\text{สมการ HV} = \frac{1.854P}{d^2} \tag{3.1}$$

- โดยที่
- HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vickers (kgf/mm²)
 - P คือ แรงกด (kgf)
 - D คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d₁ และ d₂ เฉลี่ย (mm)

3.8.2 การทดสอบแรงดึง

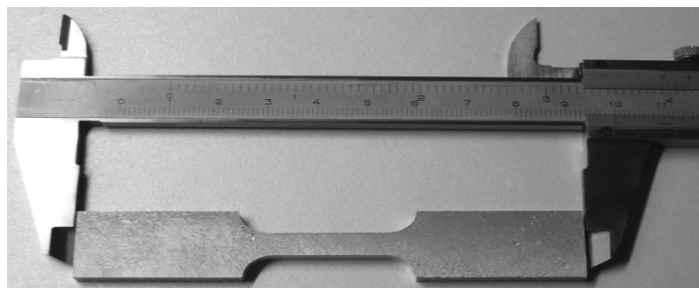
เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงของงานเชื่อม (Strength of Weld) โดยการทดสอบแรงดึงในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม นำไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s ดังภาพประกอบ 3.11



ภาพประกอบ 3.11 เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์

3.8.3 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงเนื้อโลหะเดิม A356

การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม A356 ที่ผ่านการหล่อด้วยกรรมวิธี Rheocasting โดยการอัด (Squeeze Casting) เพื่อหาค่าความแปรปรวนของเนื้อโลหะเดิมแต่ละชุด (Batch) มีความแข็งแรงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM (E8) ดังภาพประกอบ 3.12

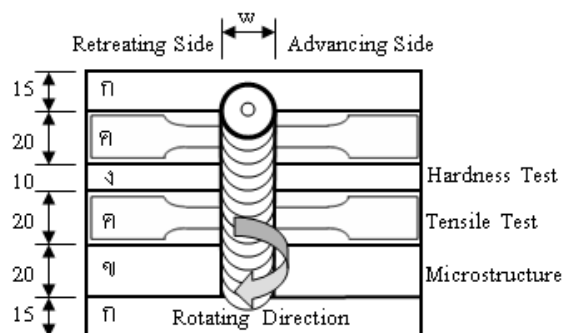


ภาพประกอบ 3.12 ลักษณะและขนาดชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง A356

การตรวจสอบเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 เป็นการตรวจสอบความเชื่อมั่นเพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นทดสอบ มีความแข็งแรงสม่ำเสมอ โดยการสุ่มชิ้นทดสอบ มา 8 ชุด (Batch) แต่ละชุดแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ บน กลาง ล่าง รวมทั้งหมด 24 ชิ้น ใช้ค่าสถิติ \bar{X} และ R-Chart เป็นตัวประเมินค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดลอง

3.8.4 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356

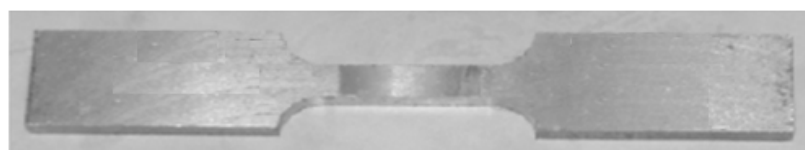
การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อม อะลูมิเนียมหล่อผสม SSM A356 เป็นการทดสอบสมบัติทางกล เพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Strength of Weld) จากแผ่นงานเชื่อมต่อชนด้วยการเสียดทานแบบกวน โดยตัดชิ้นทดสอบตั้งฉากกับแนวเชื่อม ดังภาพประกอบ 3.13



ภาพประกอบ 3.13 การเตรียมชิ้นทดสอบรอยเชื่อม

(ก) เป็นส่วนที่ถูกตัดออกไป (ข) ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ (ค) ทดสอบแรงดึง และ (ง) ทดสอบความแข็ง ดังภาพประกอบ 3.13

กัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบงานเชื่อมตามมาตรฐาน ASTM (E8) ชิ้นทดสอบเป็นงานแบน ซึ่งผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 ดังภาพประกอบ 3.14



ภาพประกอบ 3.14 ชิ้นทดสอบมาตรฐานงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน SSM A356

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

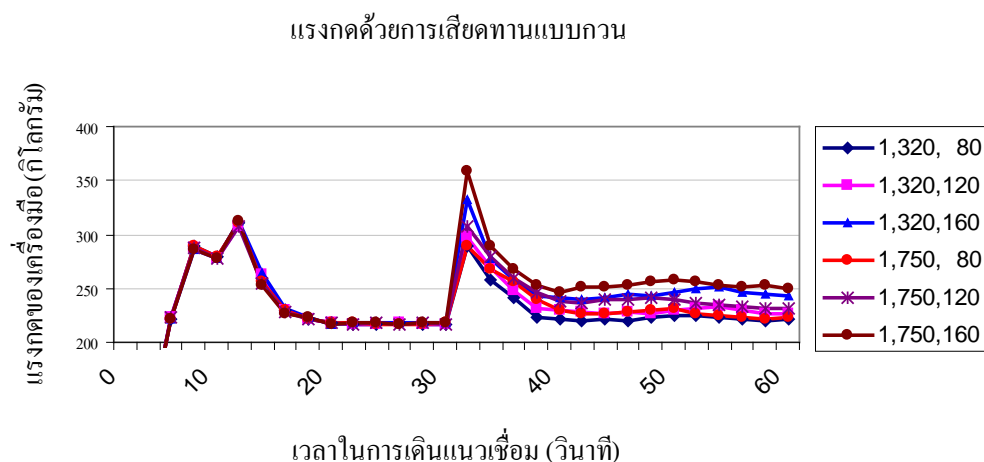
จากการศึกษาและทำการทดลองในเบื้องต้นด้วยเครื่องกัดแบบกึ่งอัตโนมัติโดยการปรับเปลี่ยน ความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อม ของการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็งเกรด A356 ด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในระดับต่างๆ ที่ความเร็วรอบต่ำกว่า 1,000 rpm ความเร็วในการเชื่อมต่ำกว่า 80 mm/min ที่แรงกดต่ำกว่า 300 กิโลกรัม และที่ความเร็วรอบมากกว่า 2,000 rpm ความเร็วในการเชื่อมมากกว่า 160 mm/min รอยเชื่อมที่ได้ไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกันทำให้เป็นข้อมูลในการกำหนดปัจจัยในการทดลองและเครื่องกัดที่ใช้ในการทดลองซึ่งเป็นระบบสายพานจึงกำหนดปัจจัยในการทดลองเป็น 2 ปัจจัย คือความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อม ความเร็วรอบมี 2 ระดับ คือ 1,320 และ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อม มี 3 ระดับ คือ 80, 120 และ 160 mm/min ในหนึ่งชั่วโมงมีการทดลอง 6 ครั้งทำการทดลองสามชั่วโมงทั้งหมด 18 ครั้ง ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าความร้อนจากการเสียดทาน ซึ่งมีผลต่อเนื้อโลหะบริเวณที่ถูกกวน และสมบัติทางกลของรอยเชื่อมผลจากการทดลองมีดังนี้

4.1 แรงกดที่ใช้ในการทดลอง

แรงกดในขณะที่เริ่มต้นเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดความร้อนจากการเสียดทานถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ แต่อย่างไรก็ตามแรงกดในช่วงของการเดินแนวเชื่อมโดยอัตโนมัติค่าของแรงกดที่ได้แตกต่างกัน เนื่องจากระดับของความเร็วในการเชื่อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยที่ถูกกำหนดในการทดลอง

4.1.1 แรงกดในขณะที่ทำการเชื่อม

จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min พบว่าแรงกดบนชิ้นทดสอบมีค่าเท่ากับ 289, 298 และ 332 กิโลกรัม ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min พบว่าแรงกดบนชิ้นทดสอบมีค่าสูงถึง 298, 308 และ 359 กิโลกรัม ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 4.1



ภาพประกอบ 4.1 กราฟแสดงค่าแรงกดที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm

ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม ในสถานะที่สมดุลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สำหรับอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 โดยกำหนดให้แรงกดคงที่ด้วยแรง 300 กิโลกรัม การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม พบว่าที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min แรงกดขณะเดินแนวเชื่อมโดยอัตโนมัติเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 2.11% และ 7.22% ตามลำดับ ดังนั้นที่ความเร็วในการเชื่อมสูง แรงกดเพิ่มสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าแรงกดที่ต่ำกว่า 300 กิโลกรัม ความร้อนที่ได้จากการเสียดทานส่งผ่านความร้อนไม่ถึงด้านล่างของบริเวณที่ถูกกวน ทำให้เกิดข้อบกพร่องในงานเชื่อมบริเวณมุมด้านล่าง Retreating Side

4.2 โครงสร้างทางกายภาพและลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อม

จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ลักษณะผิวรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min มีลักษณะดังนี้

4.2.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 80 mm/min

จากการทดลองพบว่า ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min ดังภาพประกอบ 4.2 ลักษณะโดยทั่วไปมีผิวเรียบ เกล็ดของรอยเชื่อมละเอียด การเกิดครีบด้าน Retreating side ปกติทำให้ผิวงานเชื่อมที่ได้ไม่ปรากฏผลของข้อบกพร่องใดๆ บนผิวหน้ารอยเชื่อม



ภาพประกอบ 4.2 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 80 mm/min

4.2.2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 120 mm/min

ผลจากการทดลองพบว่า ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมมีลักษณะผิวภายนอกไม่ปรากฏผลของความแตกต่างเมื่อเทียบกับที่ 1,320 rpm และ 80 m/min ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม รอยเชื่อมผิวหน้าด้านบนไม่พบความผิดปกติใดๆ ดังภาพประกอบ 4.3



ภาพประกอบ 4.3 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 120 mm/min

4.2.3 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min

จากการทดลองพบว่าเกิดครีปด้าน Retreating side เพิ่มมากขึ้น คาดว่าความร้อนที่เกิดจากการเสียดทาน เนื่องจากความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ค่าของแรงกดเพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อโลหะอ่อนตัวมากขึ้น ก่อให้เกิดครีปมากขึ้น ลักษณะผิวภายนอกด้านบนรอยเชื่อมทั่วไปไม่พบความผิดปกติ ดังภาพประกอบ 4.4



ภาพประกอบ 4.4 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min

4.2.4 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 80 mm/min

จากการทดลองการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ด้วยการเสียดทานทางกล ที่ 1,750 rpm และ 80 mm/min พบว่าเกิดครีปทางด้าน Retreating side มากกว่าเมื่อเทียบกับที่ 1,320 rpm การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบจาก 1,320 rpm เป็น 1,750 rpm ทำให้เนื้อโลหะอ่อนตัวมากกว่า เนื่องจากความเร็วรอบที่สูงขึ้น ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น การกวนและการไหลวนของโลหะกิ่งแข็งอยู่ในสภาวะปกติ [12] ผิวของรอยเชื่อมมีเกล็ดละเอียดดังภาพประกอบ 4.5



ภาพประกอบ 4.5 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 80 mm/min

4.2.5 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 120 mm/min

จากการทดลองพบว่าความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นปริมาณครีบทงด้าน Retreating Side ลดลงเมื่อเทียบกับที่ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min การปรับเปลี่ยนความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้น แรงกดที่เพิ่มขึ้น คาดว่าความร้อนจากการเสียดทานเพิ่มขึ้นและเนื้อโลหะอ่อนตัวการกวนและการไหลวนของโลหะกึ่งแข็ง มีผลทำให้ลักษณะเกล็ดที่ผิวรอยเชื่อมหยาบ แต่ครีบลดลง ดังภาพประกอบ 4.6



ภาพประกอบ 4.6 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 120 mm/min

4.2.6 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min

จากการทดลองพบว่าลักษณะผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมมีเกล็ดที่ละเอียดเกิดครีบเพียงเล็กน้อย จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงต้าน แรงกดอัดบนชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้น คาดว่าความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้ความร้อนที่ชิ้นทดสอบได้รับอยู่ในสภาวะปกติ เกิดครีบเพียงเล็กน้อย เกล็ดรอยเชื่อมมีความละเอียดและรอยเชื่อมที่ได้สมบูรณ์ที่สุด อย่างไรก็ตามลักษณะผิวภายนอกเป็นการบ่งบอกถึงผลที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อม รอยเชื่อมที่ได้จะส่งผลต่อสมบัติทางกล อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพประกอบ 4.7



ภาพประกอบ 4.7 ผิวหน้าด้านบนรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min

4.2.7 ลักษณะรอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และที่มากกว่า 160 mm/min

จากการทดลองพบว่าลักษณะของรอยเชื่อม เกิดช่องว่างที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม การกวนและการไหลวนของโลหะที่แข็งผิดปกติ เกิดจากความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป ทำให้เนื้อโลหะอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็งมากกว่าในสถานะอ่อนตัว ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมความร้อนจากการเสียดทาน จะถูกสะสมโดยการหยุดนิ่งก่อนการเดินแนวเชื่อม 20 วินาที เนื้อโลหะอยู่ในสถานะอ่อนตัวแต่เมื่อการเชื่อมเคลื่อนที่ไปได้ระยะประมาณ 35 ถึง 40 มม. จากจุดเริ่มต้น เนื้อโลหะอยู่ในสถานะของแข็งมากกว่าการอ่อนตัว ทำให้ช่องว่างในรอยเชื่อมเริ่มเกิดขึ้น และจะเห็นได้ชัดเจนที่ระยะประมาณ 60 มม. จนถึงสิ้นสุดแนวเชื่อม ดังภาพประกอบ 4.8 การเกิดลักษณะรอยต่อที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete joint) ของเนื้อโลหะที่ถูกกวนไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ผลจากความเร็วในการเชื่อมสูงเกินไปทำให้อุณหภูมิของชิ้นทดสอบเกิดสถานะไม่สมดุลเนื้อโลหะจึงไม่สามารถประสานเป็นเนื้อเดียวกัน [12] อย่างไรก็ตาม ลักษณะผิวภายนอกบ่งบอกถึงผลที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมและรอยเชื่อม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 4.8 ลักษณะรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อมมากกว่า 160 mm/min

4.2.8 วิเคราะห์ผลลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อที่แข็ง A356

จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบสูง ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำ เกิดครีปเป็นปริมาณมาก ที่ความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น ก่อให้เกิดการไหลวนของโลหะที่อ่อนตัว และการกวนปกติ ช่องว่างในรอยเชื่อมลดลงที่ 1,320 rpm ที่ 120 และ 160 mm/min และที่ 1,750 rpm ที่ 160 mm/min รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ที่สุดลักษณะผิวด้านบนไม่พบข้อบกพร่องใดๆ

ช่องว่างในรอยเชื่อม เกิดจากความร้อนที่ได้รับไม่เพียงพอ ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมเกิดสถานะที่ผิดปกติ เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดช่องว่างขึ้น จากการทดลอง

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมที่ไม่สมดุล ทำให้ความร้อนจากการเสียดทานต่ำ ไม่สามารถส่งผ่านความร้อนจากที่ผิวหน้าซึ่งป่าของเครื่องมือสัมผัสแผ่นงานไปยังด้านล่างของบริเวณที่ถูกกวนทำให้การกวนผิดปกติ เกิดช่องว่าง รอยเชื่อมไม่สมบูรณ์[12]

4.3 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray

เป็นการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray เพื่อหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื่อม จากการปรับเปลี่ยนปัจจัยความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลให้รอยเชื่อมขาดความสมดุล เกิดช่องว่าง การตรวจสอบทางกายภาพจากลักษณะผิวภายนอกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมไม่สามารถมองเห็นข้อบกพร่องในรอยเชื่อมได้ จึงต้องใช้ผลของการ X-Ray วิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลในการเชื่อมและผลทางโลหะวิทยาของปัจจัยที่กำหนดในการทดลองดังนี้

4.3.1 ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray ที่ 1,320 rpm และที่ 80, 120 และ 160 mm/min

จากการตรวจสอบรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ดังภาพประกอบ 4.9



(ก) ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min



(ข) ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 120 mm/min



(ค) ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 160 mm/min

ภาพประกอบ 4.9 ภาพ X-Ray รอยเชื่อม ที่ 1,320 rpm และที่ (ก)80, (ข)120 และ (ค)160 mm/min

จากภาพประกอบ 4.9 (ก) ข้อบกพร่องในรอยเชื่อมเป็นเส้นของการไม่ประสาน เป็นเนื้อเดียวกันตลอดความยาวของรอยเชื่อม (ข) ความยาวของเส้นไม่ประสานกันประมาณ 30 มม. (ค) ความยาวของเส้นเกิดขึ้นประมาณ 15 มม. ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อม อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อความร้อนจากการเสียดทานทางกล บริเวณผิวสัมผัสด้านบนจะส่งผ่านความร้อนไม่ถึงด้านล่างของบริเวณที่ถูกกวน ทำให้เกิดข้อบกพร่องในงานเชื่อมบริเวณมุมด้านล่าง Retreating side [12] ช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในรอยเชื่อม เป็นข้อบกพร่องที่ไม่สามารถมองเห็นได้จากภาพผิวด้านบนของรอยเชื่อม จากการตรวจสอบด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray จะเห็นช่องว่างได้อย่างชัดเจนในรอยเชื่อมของชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังภาพประกอบ 4.9 (ก), (ข) และ (ค)

4.3.2 ตรวจสอบด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray ที่ 1,750 rpm และที่ 80, 120 และ 160 mm/min

ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ผลการตรวจสอบ ไม่พบความผิดปกติใดๆ ในรอยเชื่อมตั้งแต่จุดเริ่มต้นตลอดความยาวของรอยเชื่อม ทุกความเร็วในการเชื่อม อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อมในปัจจุบันอยู่ในสภาวะที่สมดุล เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยในการเชื่อมแต่ละระดับไม่มีผล ทำให้การกวนปกติ ช่องว่างภายในรอยเชื่อมลดลง รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ดังภาพประกอบ 4.10 (ก), (ข) และ(ค)



(ก) ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min



(ข) ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min



(ค) ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min

ภาพประกอบ 4.10 ภาพ X-Ray รอยเชื่อม ที่ 1,750 rpm และที่ (ก)80, (ข)120 และ (ค)160 mm/min

4.3.3 วิเคราะห์ผลรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ด้วยการ X-Ray

การเสียดทานทางกล บริเวณผิวด้านบนที่ส่งผ่านความร้อนไปยังด้านล่างของบริเวณที่ถูกกวน บำบัดผิวแผ่นงานน้อยกว่า 50% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องมือ ทำให้ความร้อนจากการเสียดทานลดลง การกวนผิดปกติ เกิดข้อบกพร่องบริเวณมุมด้านล่าง Retreating side ในรอยเชื่อม ดังนั้นในการเชื่อมทุกครั้งจะต้องกดป่าของเครื่องมือ ที่มุม 3° ลงบนแผ่นงานไม่น้อยกว่า 50% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องมือ หรือประมาณ 300 กิโลกรัม ความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อม มีผลต่ออิทธิพลของความร้อนและสถานะสมดุลของการเชื่อมและรอยเชื่อม

ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min เกิดช่องว่างในรอยเชื่อมทุกระดับ ที่ 80 mm/min เกิดช่องว่างตลอดความยาวรอยเชื่อมที่ 120 mm/min เกิดช่องว่างยาวประมาณ 30 มม. และที่ 160 mm/min เกิดช่องว่างยาวประมาณ 15 มม. ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อมไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม แรงกดที่เพิ่มขึ้นเป็นแรงที่เกิดจากความเร็วในการเชื่อม ที่ความเร็วในการเชื่อมสูง แรงกดเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วในการเชื่อมต่ำ แรงกดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้ความร้อนจากการเสียดทานที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน มีผลต่อรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ

4.4 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 โดยการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อมและให้แนวเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบ ขัดตามขั้นตอนของการเตรียมชิ้นทดสอบ กัดกรด (Etching) ด้วยสารละลายเจือจาง Keller's Reagent เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม บริเวณจุดเริ่มต้นของการเชื่อม รอยเชื่อม และ เขตอิทธิพลความร้อนด้าน Retreating Side และ Advancing Side ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min ดังนี้

4.4.1 โครงสร้างมหภาคและจุลภาค SSM A356 ที่ 1,320 rpm และที่ 80 mm/min

จากการศึกษาและทดลอง ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min พบว่าที่จุดเริ่มต้นของรอยเชื่อม เกิดช่องว่างที่มุมด้านล่างของตัวกวนด้าน Retreating Side มีขนาดค่อนข้างโตกว่าส่วนอื่นๆ ของรอยเชื่อม มีความกว้างประมาณ 120 ถึง 130 μm และยาวประมาณ 250 ถึง 300 μm เมื่อตัด Section บริเวณส่วนอื่นๆ ของรอยเชื่อม ยังปรากฏผลของข้อบกพร่องดังกล่าว แต่มีขนาดเล็กลง และเกิดเป็นเส้นของการประสานไม่ติดกันตลอดความยาวของรอยเชื่อมขนาดประมาณ 30 ถึง 40 μm ดังภาพประกอบ 4.11(ก) และ (ข)

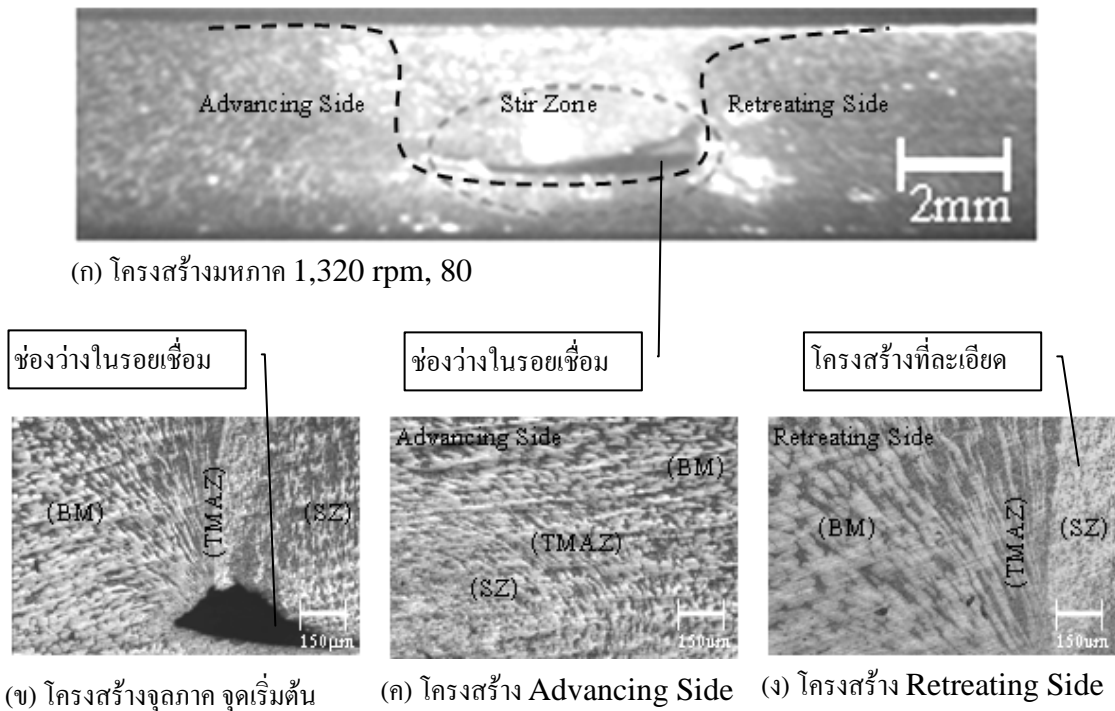
โครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นก้อนกลม ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อุณหภูมิที่

เกิดขึ้นต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตหรือเส้นปฏิกิริยา Eutectic ของอะลูมิเนียมหล่อแข็ง SSM A356 อุณหภูมิ 595°C ซึ่งทำให้โครงสร้างคงสภาพเดิมไว้ได้ ดังภาพประกอบ 4.11 (ค) และ (ง)

บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (TMAZ) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็น 2 ส่วนคือ Advancing Side และ Retreating Side จากการทดลองพบว่าโครงสร้างด้าน Advancing Side เกิดจากการกวานของตัวกวนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โลหะที่อ่อนตัวไหลวนลู่ไปตามทิศทางการหมุนรอบตัวกวนทำให้เกิดโครงสร้าง 3 ลักษณะ คือบริเวณที่ห่างจากตัวกวน 50 ถึง 60 μm แต่ได้รับอิทธิพลของความร้อนอยู่ในสถานะอ่อนตัว มีลักษณะมัน ที่ระยะ 30 ถึง 40 μm จากตัวกวน โครงสร้างมีลักษณะขาวรี และบริเวณที่ติดกับตัวกวนเป็น โครงสร้างที่ละเอียด ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ดังภาพประกอบ 4.11 (ค)

โครงสร้างแบบ Retreating Side เป็น โครงสร้างที่เกิดจากการหมุนของตัวกวน กับ ทิศทางการเดินแนวเชื่อมที่ตรงกันข้ามทำให้มีลักษณะ โครงสร้าง เป็นบริเวณแคบๆ มี 2 ลักษณะ คือ บริเวณใกล้กับตัวกวนมีลักษณะกลมมน และที่ติดกับตัวกวนเป็น โครงสร้างที่ละเอียด ดัง ภาพประกอบ 4.11 (ง) ส่งผลต่อสมบัติทางกลของงานเชื่อม

โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อม เป็นบริเวณที่ถูกกวานลักษณะ โครงสร้างด้าน Retreating Side เป็นโครงสร้างที่ละเอียด มีความกว้างประมาณ 120 ถึง 130 μm ยาว ประมาณ 450 μm และโครงสร้างจะค่อยๆ หยาบขึ้นไปจนถึงด้าน Advancing Side ดังภาพประกอบ 4.11(ค) และ (ง)อย่างไรก็ตามโครงสร้างด้าน Retreating Side มีโครงสร้างที่ละเอียดกว่าด้าน Advancing Side



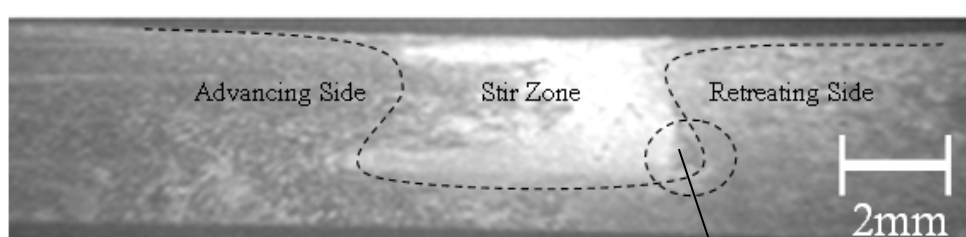
ภาพประกอบ 4.11 โครงสร้างมหภาคและจุดภาครอยเชื่อม SSM A356
ที่ 1,320 rpm และ 80 mm/min

4.4.2 โครงสร้างมหภาคและจุดภาค SSM A356 ที่ 1,320 rpm และที่ 120 mm/min

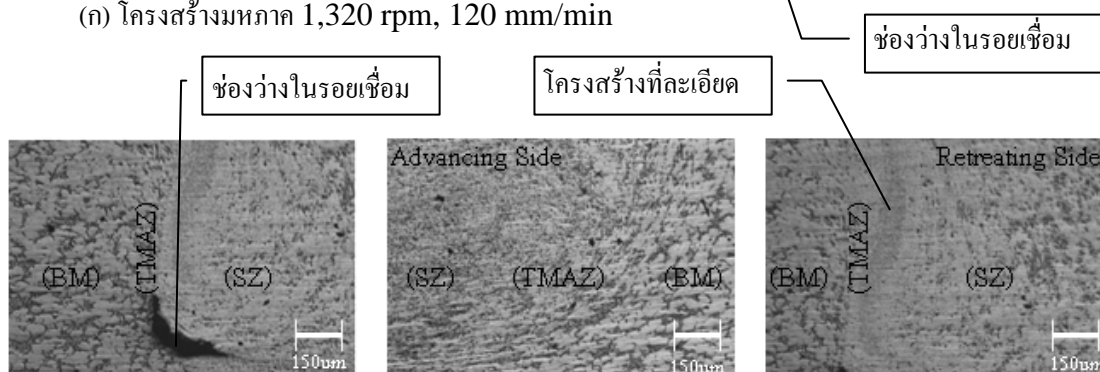
จากการทดลองพบว่า ที่จุดเริ่มต้นของรอยเชื่อม เกิดช่องว่างที่มุมด้านล่างของตัวกวนด้าน Retreating Side มีขนาดลดลงความกว้างประมาณ 50 ถึง 60 μm ยาวประมาณ 100 ถึง 120 μm และจะค่อยๆ เล็กลงเป็นเส้นของการไม่ประสานกันของเนื้อเชื่อมมีขนาดประมาณ 30 μm เมื่อตัดชิ้นทดสอบตามขวาง บริเวณส่วนต่างๆ ของรอยเชื่อม พบว่าที่ระยะมากกว่า 40 มม. จากจุดเริ่มต้นไม่ปรากฏผลของช่องว่างในรอยเชื่อม ดังภาพประกอบ 4.12 (ก) และ (ข) อย่างไรก็ตามความเร็วในการเชื่อมและแรงกด ซึ่งมีอิทธิพลต่อความร้อนจากการเสียดทาน การปรับเปลี่ยนปัจจัยในแต่ละระดับมีผลต่อรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ

โครงสร้างบริเวณอิทธิพลความร้อน เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเสียดทานแบบกวน การหมุนของเครื่องมือไปในทิศทางเดียวกับการเดินแนวเชื่อม โดยที่บ่าของเครื่องมือสัมผัสแผ่นงาน เพิ่มความเสียดทานทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื้อโลหะบริเวณ TMAZ เป็นบริเวณที่ไม่ถูกกวน แต่ได้รับอิทธิพลความร้อน จากการทดลองพบว่าโครงสร้างด้าน Retreating Side มีโครงสร้าง

ที่ละเอียดเป็นพื้นที่แคบๆด้าน Advancing Side โครงสร้างมีลักษณะ มน, ยาวรี และละเอียด ดังภาพประกอบ 4.12 (ค) และ (ง) โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อม มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่ละเอียด เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ถูกควมมีความกว้างประมาณ 30 ถึง 40 μm และมีความยาวประมาณ 300 μm โดยการหมุนของเครื่องมือ และความเร็วในการเชื่อม เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเร็วในการเชื่อม ตามปัจจัยที่กำหนดในแต่ละระดับ ทำให้ลักษณะโครงสร้างที่ได้เปลี่ยนไป โครงสร้างด้าน Retreating Side มีโครงสร้างที่ละเอียดกว่าด้าน Advancing Side ดังภาพประกอบ 4.12 (ค) และ (ง)



(ก) โครงสร้างมหภาค 1,320 rpm, 120 mm/min



(ข) โครงสร้างจุลภาค จุดเริ่มต้น

(ค) โครงสร้าง Advancing Side

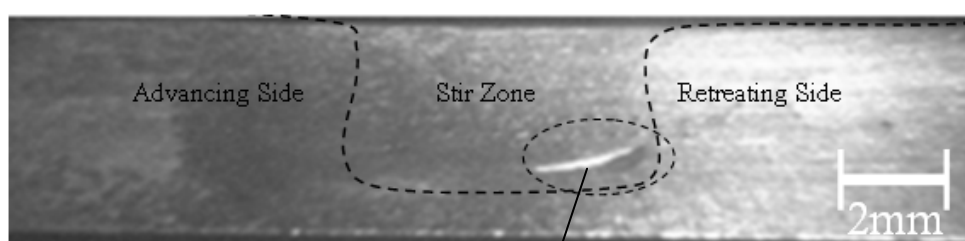
(ง) โครงสร้าง Retreating Side

ภาพประกอบ 4.12 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm และ 120 mm/min

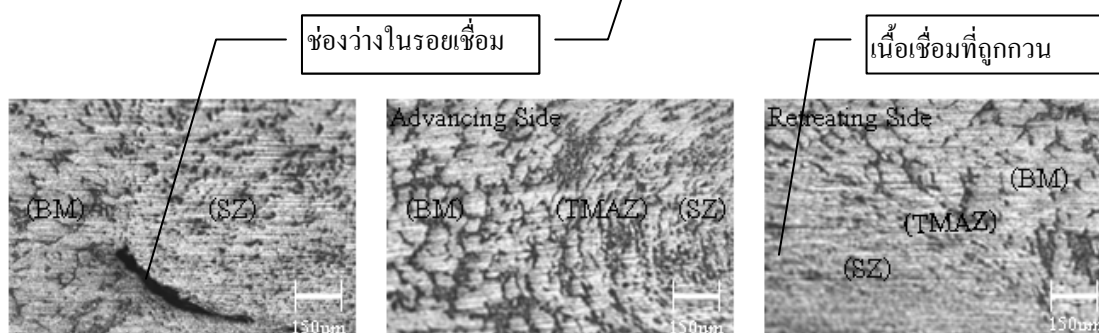
4.4.3 โครงสร้างมหภาคและจุลภาค SSM A356 ที่ 1,320 rpm และที่ 160 mm/min

ผลการตรวจสอบโครงสร้างพบว่า ที่จุดเริ่มต้นของรอยเชื่อม เกิดช่องว่าง กว้างประมาณ 40 ถึง 50 μm ยาวประมาณ 190 ถึง 200 μm เมื่อตัดรอยเชื่อมบริเวณอื่นๆ ที่ระยะมากกว่า 15 มม. จากจุดเริ่มต้นรอยเชื่อม ไม่พบข้อบกพร่องดังกล่าวในรอยเชื่อม อย่างไรก็ตามความเร็วในการเชื่อมที่สูงขึ้น ทำให้แรงกดเพิ่มขึ้น ช่องว่างมีขนาดลดลง ดังภาพประกอบ 4.13 (ก) และ (ข)

โครงสร้างบริเวณอิทธิพลความร้อน เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเสียดทานแบบ กวนโดยที่บ่าของเครื่องมือสัมผัสแผ่นงาน เพิ่มความเสียดทานทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เป็นบริเวณ ที่เนื้อโลหะไม่ถูกกวน แต่ได้รับอิทธิพลของความร้อน จากการทดลองพบว่าโครงสร้างด้าน Retreating Side เป็นบริเวณแคบๆ มีความกว้างประมาณ 15 ถึง 20 μm ส่วนสัมผัสกับตัวกวนมี โครงสร้างที่ละเอียด และด้าน Advancing Side เป็นบริเวณที่มีความกว้างกว่า ประมาณ 70-80 μm ส่วนที่ห่างจากตัวกวนประมาณ 70 ถึง 80 μm มีลักษณะโครงสร้าง กลมมน บริเวณที่ห่างจากตัว กวน 50 ถึง 70 μm มีลักษณะยาวรี ไล่ไปตามทิศทางการหมุนของตัวกวน และบริเวณที่ติดกับตัวกวน 1 ถึง 50 μm มีลักษณะ โครงสร้างที่ละเอียด ดังภาพประกอบ 4.13 (ก) และ (ง)



(ก) โครงสร้างมหภาค 1,320 rpm, 160 mm/min



(ข) โครงสร้างจุลภาค จุดเริ่มต้น

(ค) โครงสร้าง Advancing Side

(ง) โครงสร้าง Retreating

ภาพประกอบ 4.13 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min

โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อม จากการตรวจสอบพบว่า อะลูมิเนียมและซิลิกอนรวมทั้งธาตุ ผสมอื่นๆ ถูกกวนจนแตกหักเป็น โครงสร้างที่ละเอียด เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยในแต่ละระดับทำ ให้โครงสร้างที่ได้มีความละเอียดที่แตกต่างกัน ด้าน Retreating Side โครงสร้างละเอียดกว่าด้าน Advancing Side มีความกว้างประมาณ 30 ถึง 40 μm ดังภาพประกอบ 4.13 (ค) และ (ง)

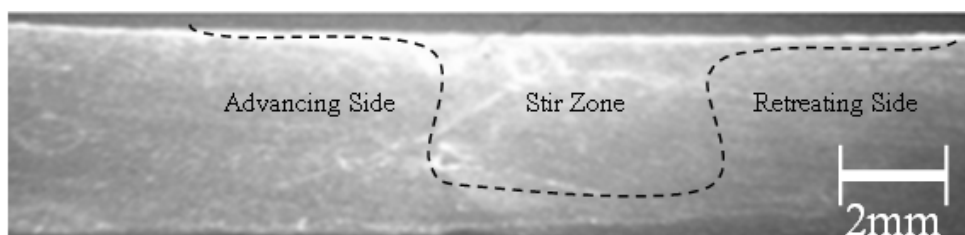
4.4.4 โครงสร้างมหภาคและจุลภาค SSM A356 ที่ 1,750 rpm และที่ 80 mm/min

จากการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min พบว่าที่จุดเริ่มต้นของรอยเชื่อมเกิดช่องว่างเป็นจุดเล็กๆ ดังภาพประกอบ 4.14 (ก) และ (ข) เมื่อตัดรอยเชื่อมไปตรวจสอบในส่วนอื่นๆ ไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม

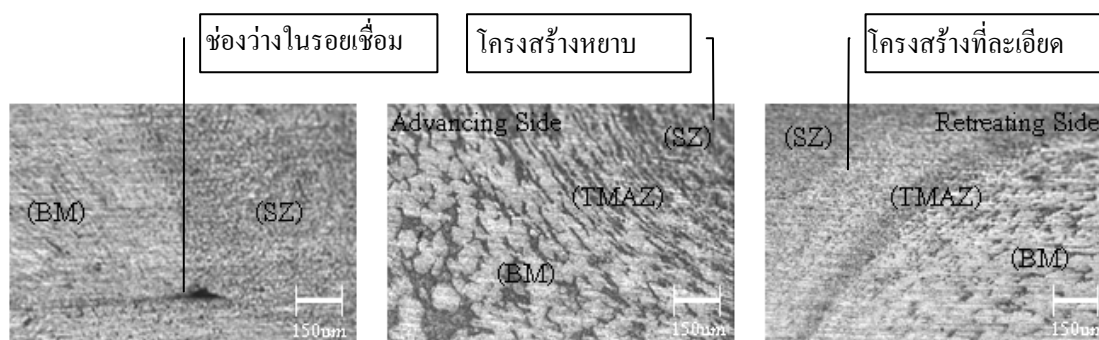
บริเวณอิทธิพลความร้อนโครงสร้างด้าน Advancing Side เป็นโครงสร้างที่ละเอียด บริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต โครงสร้างมีลักษณะเป็นก้อนกลมมน บริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความร้อน และห่างจากตัวกวนประมาณ 50 ถึง 70 μm โครงสร้างมีลักษณะยาวรี และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความร้อนประมาณ 1 ถึง 50 μm ที่ติดกับตัวกวน โครงสร้างที่ได้มีความละเอียด และ Retreating Side เป็นโครงสร้างในพื้นที่แคบๆ ดังภาพประกอบ 4.14 (ค) และ (ง)

จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm และที่ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ปัจจัยดังกล่าวรอยเชื่อมเมื่อตรวจสอบโครงสร้างทั้งมหภาคและจุลภาคไม่พบช่องว่างหรือข้อบกพร่องใดๆ ในบริเวณเนื้อเชื่อม โครงสร้างที่ได้มีความละเอียด ผลึกอะลูมิเนียม ซิลิกอนรวมทั้งธาตุผสมอื่นๆ มีการกระจายสม่ำเสมอ ทั้งด้าน Advancing และ Retreating Side เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยในแต่ละระดับ ทำให้ลักษณะโครงสร้างที่ได้เปลี่ยนไป ดังนั้น ที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 80 mm/min ทำให้ช่องว่างในรอยเชื่อมลดลง ดังภาพประกอบ 4.14 (ข)

อย่างไรก็ตามการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบที่สูงขึ้น ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานคาดว่าจะสูงขึ้น โลหะกึ่งแข็งของอะลูมิเนียมหล่อผสม A356 อ่อนตัวไหลวนรอบตัวกวนในสถานะสมดุลการกวนปกติส่งผลให้รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ มีผลต่อสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ



(ก) โครงสร้างมหภาค 1,750 rpm, 80 mm/min



(ข) โครงสร้างจุดภาค จุดเริ่มต้น

(ค) โครงสร้าง Advancing Side

(ง) โครงสร้าง Retreating

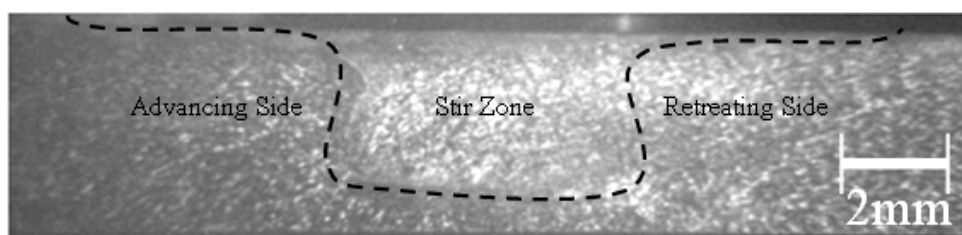
ภาพประกอบ 4.14 โครงสร้างมหภาค จุดภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 80 mm/min

4.4.5 โครงสร้างมหภาคและจุดภาค SSM A356 ที่ 1,750 rpm และที่ 120 mm/min

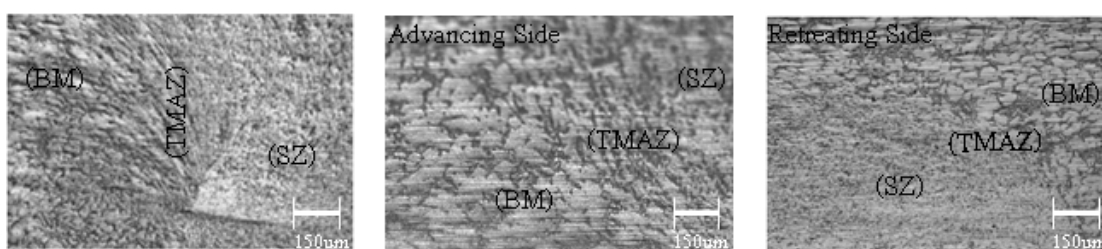
จากการทดลองพบว่า ที่จุดเริ่มต้นและส่วนต่างๆ ของรอยเชื่อม ในการตัด Section ของรอยเชื่อม ไม่พบข้อบกพร่องใดๆ รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ตลอดความยาวของแนวเชื่อม อย่างไรก็ตาม การปรับเปลี่ยนปัจจัยและระดับความเร็วในการเชื่อม ส่งผลให้ช่องว่างในรอยเชื่อมลดลง รอยเชื่อมที่ได้ประสานเป็นเนื้อเดียวกันตลอดความยาวรอยเชื่อม ดังภาพประกอบ 4.15 (ก)

โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมมีลักษณะโครงสร้างที่ละเอียด ดังภาพประกอบ 4.15 (ข) และบริเวณอิทธิพลความร้อน เป็นบริเวณที่ไม่ถูกกวน โครงสร้างที่ได้เกิดจากความร้อนจากการเสียดทาน ความเร็วในการเชื่อมที่สูงขึ้น คาดว่าอุณหภูมิสูงขึ้น เนื้อโลหะบริเวณอิทธิพลความร้อนอ่อนตัวโครงสร้างที่ได้มี 3 ลักษณะ ก้อนกลม ขาวรี และละเอียด ดังภาพประกอบ 4.15 (ค) และ (ง)

บริเวณอิทธิพลความร้อน โครงสร้างไม่แตกต่าง แต่ความกว้างของบริเวณอิทธิพลความร้อนเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่นๆ มีความกว้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คาดว่าความร้อนจากการเสียดทานเพิ่มขึ้นทำให้ความกว้างเพิ่มขึ้น ด้าน Retreating Side ยังคงมีระยะที่แคบๆ คงเดิม



(ก) โครงสร้างมหภาค 1,750 rpm, 120 mm/min



(ข) โครงสร้างจุลภาค จุดเริ่มต้น

(ค) โครงสร้าง Advancing Side

(ง) โครงสร้าง Retreating

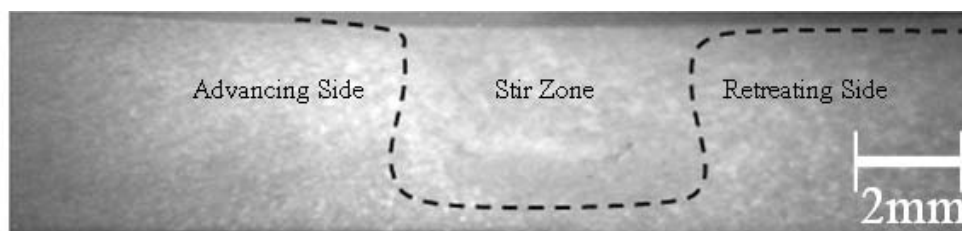
ภาพประกอบ 4.15 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 120 mm/min

4.4.6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาค SSM A356 ที่ 1,750 rpm และที่ 160 mm/min

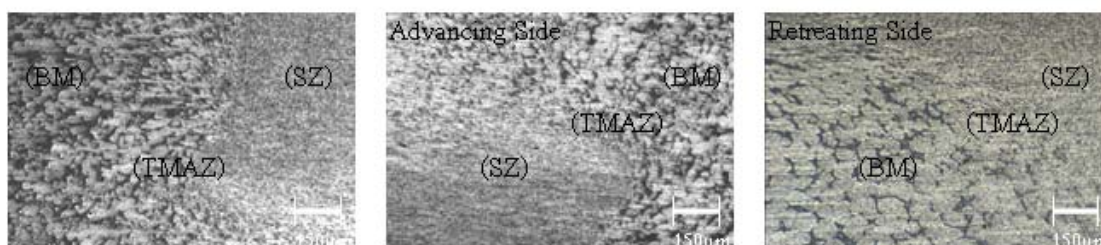
โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อทิ้งแข็ง A356 ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 160 mm/min พบว่าที่จุดเริ่มต้นและส่วนต่างๆ ของรอยเชื่อม ไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม เมื่อตรวจสอบด้วยการ X-Ray ไม่ปรากฏข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม ทำให้สรุปผลได้ว่ารอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ตลอดความยาวของแนวเชื่อม อย่างไรก็ตาม การปรับเปลี่ยนปัจจัยทั้งสอง และระดับของการเชื่อม ส่งผลต่อความสมบูรณ์รอยเชื่อม และสมบัติทางกล อย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพประกอบ 4.16 (ก), (ข), (ค) และ (ง)

โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกกวน จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นเป็น 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้นเป็น 160 mm/min มีผลทำให้เนื้อเชื่อมมีความละเอียดสม่ำเสมอทั้งด้าน Advancing และ Retreating Side ไม่แตกต่าง และไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม ดังนั้นความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเชื่อมเพิ่มขึ้นช่องว่างในรอยเชื่อมลดลง รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ตลอดแนวเชื่อม ดังภาพประกอบ 4.16 (ข), (ค) และ (ง) อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการเชื่อมที่สูงเกินไปอาจทำให้การประสานของเนื้อโลหะเกิดข้อบกพร่องได้ บริเวณอิทธิพลความร้อนโครงสร้างไม่แตกต่างจากความเร็วรอบ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อม 80 และ 120 mm/min แต่ความกว้างของบริเวณอิทธิพลความร้อนเมื่อเทียบกับตัวแปร

อื่นๆ มีความกว้างเพิ่มขึ้น คาดว่าความร้อนจากการเสียดทานเพิ่มขึ้นทำให้ความกว้างเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะด้าน Advancing Side ส่วนด้าน Retreating Side ยังคงมีระยะที่แคบๆ คงเดิม อย่างไรก็ตาม ตามความเร็วในการเชื่อมที่สูงเกินไปอาจทำให้บริเวณอิทธิพลความร้อนลดลง



(ก) โครงสร้างมหภาค 1,750 rpm, 160 mm/min



(ข) โครงสร้างจุลภาค จุดเริ่มต้น

(ค) โครงสร้าง Advancing Side

(ง) โครงสร้าง Retreating Side

ภาพประกอบ 4.16 โครงสร้างมหภาค จุลภาครอยเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min

4.4.7 วิเคราะห์ผลโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม SSM A356

จากการทดลองพบว่าบริเวณที่ถูกกวน ความร้อนจะสะสมบนแผ่นงาน โลหะอ่อนตัวไหลวนรอบๆ ตัวกวน มีลักษณะคล้ายหัวหอม เป็นชั้นๆ ครีบของการเชื่อมจะเกิดขึ้นด้าน Retreating side โดยการหมุนของเครื่องมือทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของชิ้นทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min รอยเชื่อมเกิดข้อบกพร่องตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนตลอดความยาวรอยเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 120 mm/min ช่องว่างมีขนาดเล็ก ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 160 mm/min จะปรากฏช่องว่างเล็กๆ ในช่วงเริ่มต้นที่ระยะมากกว่า 15 มม. จากจุดเริ่มต้นของการเชื่อมไม่พบข้อบกพร่องใดๆ และที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min พบว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะจุดเริ่มต้นของการเชื่อมเพียงเล็กน้อย ที่ระยะมากกว่า 7 มม. ไม่ปรากฏผลของช่องว่างตลอดความยาวของรอยเชื่อม ส่วนที่ความเร็วในการเชื่อม 120 และ 160 mm/min ไม่พบ

ข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม และแรงกดของเครื่องมือที่ไม่สมดุล ยังส่งผลต่อความร้อนจากการเสียดทาน หากขาดความสมดุล การไหลวนและการกวนของตัวกวนผิดปกติทำให้รอยเชื่อม ณ ตำแหน่งดังกล่าวเกิดช่องว่างได้ ปัญหาของการเกิดช่องว่างในปัจจุบันนี้น้อยมาก ทำให้รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ตลอดความยาว ในกรณีที่ขึ้นทดสอบได้รับความร้อนไม่เพียงพอ จากความเร็วรอบต่ำและความเร็วในการเชื่อมสูง เกิดสถานะที่ไม่สมดุลการกวนผิดปกติเกิดช่องว่าง

จากการทดลองพบว่าการเกิดช่องว่างเกิดจากบ่าของเครื่องมือที่สัมผัสผิวหน้าแผ่นงานไม่สมบูรณ์ การกดเครื่องมือให้บ่าสัมผัสลงบนแผ่นงานเพิ่มขึ้น หรือเพิ่มแรงกดประมาณ 7 - 8 กิโลกรัม หรือกดลงเครื่องมือบนแผ่นงาน 0.3 มม. สามารถลดขนาดของช่องว่างลงได้ อย่างไรก็ตามในการเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min ช่องว่างยังคงมีตลอดความยาวของแนวเชื่อม จึงไม่แนะนำในการเชื่อมที่ปัจจุบันนี้

โครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อแข็ง A356 ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนกลม อิทธิพลของความร้อนจากการเสียดทานไม่ส่งผลต่อโครงสร้าง เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ทำให้โครงสร้างที่ได้ยังคงสภาพเดิม โครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกกวน อะลูมิเนียมและซิลิกอนรวมทั้งธาตุผสมอื่นๆ ถูกกวนจนแตกหักเป็นโครงสร้างที่ละเอียด เมื่อมีการปรับเปลี่ยนปัจจัยในแต่ละระดับ ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความละเอียดที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าโครงสร้างบริเวณเนื้อเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อมโครงสร้างด้าน Retreating Side ละเอียดกว่าด้าน Advancing Side และที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อม โครงสร้างที่ได้มีความสม่ำเสมอทั้งสองด้านไม่แตกต่างกัน และละเอียดกว่าที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อม อย่างไรก็ตามความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อลักษณะของโครงสร้างและความละเอียดของเนื้อเชื่อม ส่งผลต่อสมบัติทางกล อย่างมีนัยสำคัญ

บริเวณอิทธิพลของความร้อนมีลักษณะโครงสร้างที่ต่างจากบริเวณเนื้อโลหะเดิมและเนื้อเชื่อม ประกอบด้วยโครงสร้างด้าน Advancing และ Retreating Side โครงสร้างแบบ Advancing Side เป็นบริเวณที่ไม่ถูกกวน แต่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนของการเสียดทาน เนื้อโลหะอยู่ในสถานะอ่อนตัว จากการทดลองพบว่า โครงสร้างมี 3 ลักษณะคือบริเวณที่ได้รับอิทธิพลของความร้อนอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตโครงสร้างมีลักษณะเป็นก้อนกลม บริเวณที่ได้รับ

อิทธิพลของความร้อน และใกล้ตัวกวนเนื้อ โลหะอยู่ในสภาวะอ่อนตัว โครงสร้างมีลักษณะ ขาวรี ไหลวนรอบตัวกวน และบริเวณที่อยู่ติดกับพื้นที่ ที่ถูกกวน โครงสร้างที่ได้มีความละเอียด อย่างไรก็ตาม ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อการเสียคทานส่งผลต่อความร้อนและอุณหภูมิ บริเวณที่ถูกกวน อิทธิพลความร้อน อย่างมีนัยสำคัญ

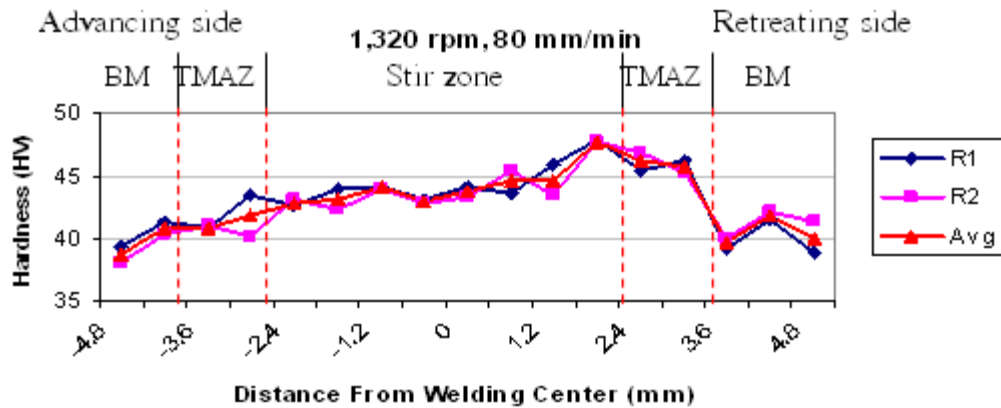
โครงสร้างด้าน Retreating Side มีลักษณะ โครงสร้างต่างจาก Advancing Side จากการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min มีลักษณะ โครงสร้างเป็นก้อนกลม และละเอียด เป็นบริเวณแคบๆ อย่างไรก็ตาม ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม ทำให้เกิดความแตกต่างของโครงสร้างทั้งสองด้าน

4.5 อิทธิพลความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมต่อค่าความแข็งของรอยเชื่อม

การทดสอบความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์ โดยการกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อม ซึ่งถูกตัดขวางตั้งฉากกับแนวเชื่อม ขัดให้เรียบ ใช้แรงกด 100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที ของรอยเชื่อมบริเวณเนื้อเชื่อม เขตอิทธิพลความร้อนและเนื้อโลหะเดิม รอยกดมีระยะห่างกันประมาณ 60 ถึง 70 μm หรือประมาณ 0.6 มม. ที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ดังนี้

4.5.1 ทดสอบความแข็งงานเชื่อม FSW ที่ 1,320 rpm และ 80 mm/min

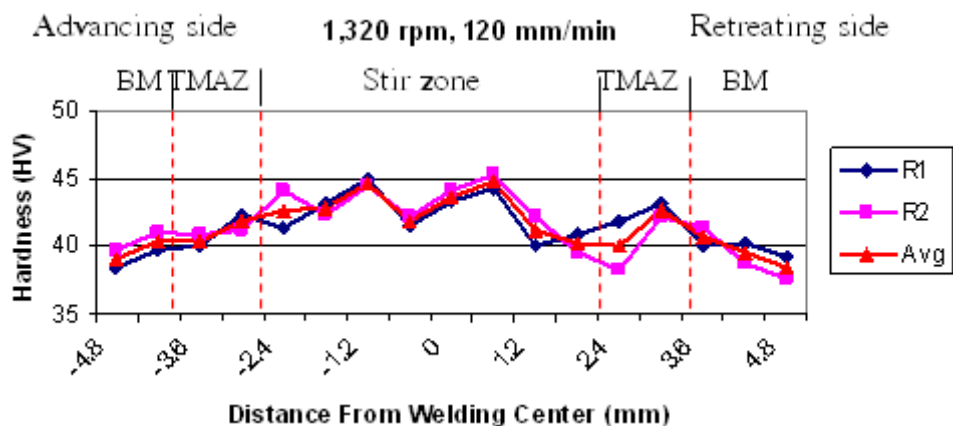
จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งเนื้อโลหะเดิมด้าน Advancing Side มีความแปรปรวนไม่แตกต่างจากด้าน Retreating Side เฉลี่ย 39.97 HV แต่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเข้าสู่บริเวณเขตอิทธิพลความร้อนเฉลี่ย 42.58 HV และบริเวณเนื้อเชื่อมเฉลี่ย 44.02 HV ส่วนบริเวณด้าน Retreating Side ค่าความแข็งมีความแปรปรวนมากกว่าด้าน Advancing Side ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น เฉลี่ย 46.55 HV และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่พื้นที่เนื้อโลหะเดิม ค่าความแข็งเฉลี่ยเนื้อโลหะเดิม 40.37 HV บริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 9.6 % และ ค่าความแข็งบริเวณอิทธิพลความร้อนมีค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 15.31 % ส่วนบริเวณรอยเชื่อมกับเขตอิทธิพลความร้อนเฉลี่ย 44.32 HV สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 9.8 % ดังนั้น บริเวณที่มีความแปรปรวนสูง ค่าความแข็งก็จะสูง แดกหักได้ง่าย ดังภาพประกอบ 4.17



ภาพประกอบ 4.17 กราฟแสดงค่าความแข็งงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm และ 80 mm/min

4.5.2 ทดสอบความแข็งงานเชื่อม FSW ที่ 1,320 rpm และ 120 mm/min

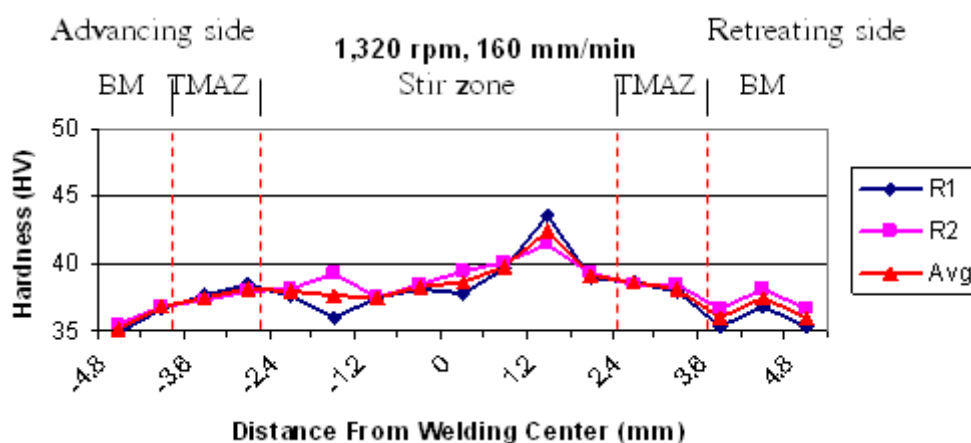
จากการทดสอบความแข็งงานเชื่อมพบว่าค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิมด้าน Advancing Side มีความแปรปรวนเล็กน้อยเฉลี่ย 39.53 HV แต่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น บริเวณเขตอิทธิพลความร้อนเฉลี่ย 41.7 HV และบริเวณเนื้อเชื่อมเฉลี่ย 43.36 HV ส่วนบริเวณอิทธิพลความร้อนด้าน Retreating Side ค่าความแข็งมีความแปรปรวนมากขึ้น ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ย 42.42 HV และบริเวณเนื้อโลหะเดิมค่าความแข็งเฉลี่ย 39.77 HV อย่างไรก็ตาม บริเวณเนื้อเชื่อมและเขตอิทธิพลความร้อนค่าความแข็งเฉลี่ย 42.4 สูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 6.61 % ความแปรปรวนลดลงค่าความแข็งลดลง ดังภาพประกอบ 4.18



ภาพประกอบ 4.18 กราฟแสดงค่าความแข็งงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm และ 120 mm/min

4.5.3 ทดสอบความแข็งแรงงานเชื่อม FSW ที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min

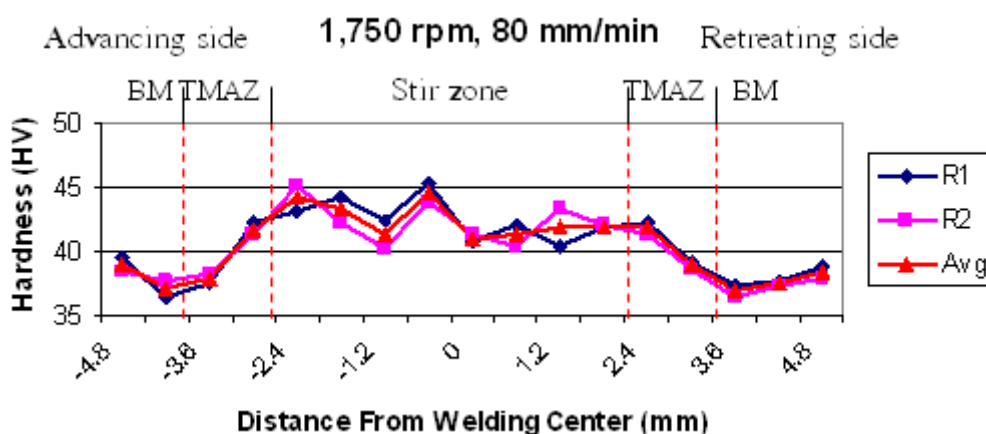
จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วในการเดินแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นค่าความแข็งที่ได้ทั้งทางด้าน Advancing Side และ Retreating Side ไม่แตกต่างกัน แต่บริเวณเนื้อเชื่อมค่าความแข็งสูงขึ้น เมื่อเทียบกับบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณเขตอิทธิพลของความร้อน ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ค่าความแข็งบริเวณเนื้อโลหะเดิมเฉลี่ย 36.5 HV บริเวณรอยเชื่อมเฉลี่ย 39.35 HV และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน ประกอบด้วยด้าน Retreating Side และ Advancing Side ค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 38.25 HV อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อม และเขตอิทธิพลความร้อนทั้งทางด้าน Advancing Side และ Retreating Side เฉลี่ย 38.74 HV สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 6.14 % ดังภาพประกอบ 4.19



ภาพประกอบ 4.19 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,320 rpm และ 160 mm/min

4.5.4 ทดสอบความแข็งแรงงานเชื่อม FSW ที่ 1,750 rpm และ 80 mm/min

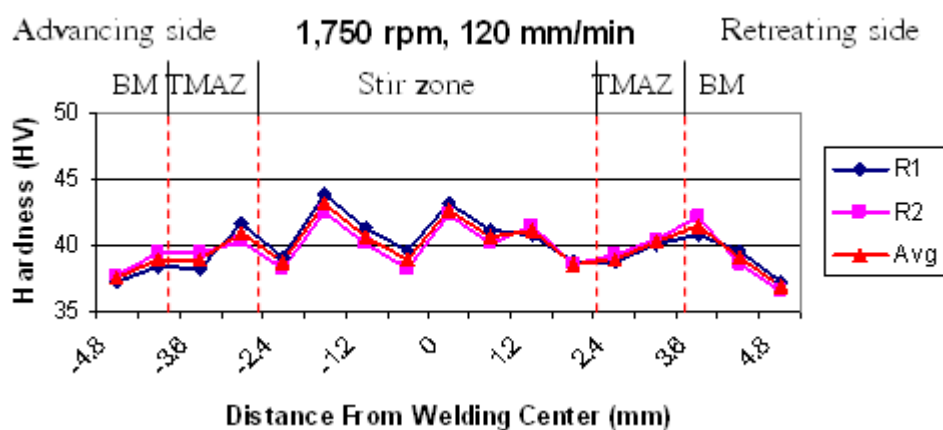
จากการทดสอบพบว่า เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบเพิ่มสูงขึ้น ค่าความแข็งที่ได้ของเนื้อโลหะเดิมเฉลี่ย 37.8 HV บริเวณเนื้อเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นจากเนื้อโลหะเดิมเฉลี่ย 39.35 HV ผลการทดสอบค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมเฉลี่ย 42.23 HV บริเวณอิทธิพลความร้อน ด้าน Retreating Side และ Advancing Side ค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 41.08 HV อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อม และเขตอิทธิพลความร้อนเฉลี่ย 42 HV มีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะเดิมคิดเป็น 11.11 % ดังภาพประกอบ 4.20



ภาพประกอบ 4.20 กราฟแสดงค่าความแข็งงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 80 mm/min

4.5.5 ทดสอบความแข็งงานเชื่อม FSW ที่ 1,750 rpm และ 120 mm/min

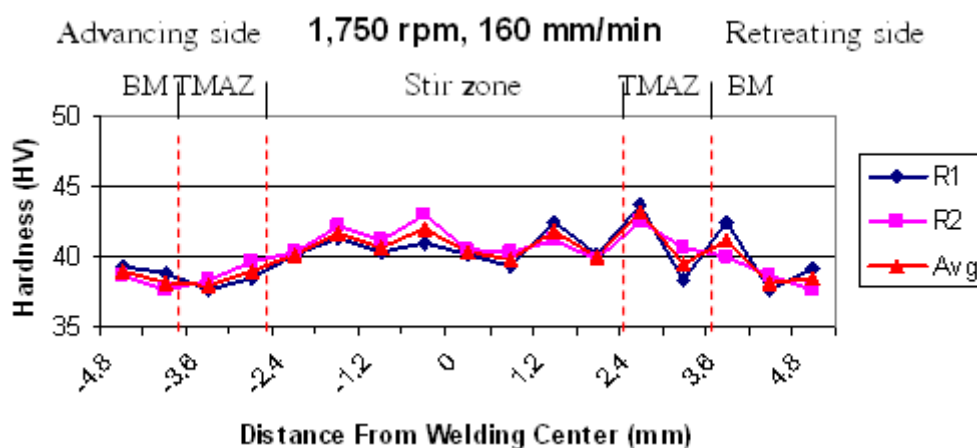
ผลการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ค่าความแข็งเนื้อโลหะเดิมเฉลี่ย 39 HV บริเวณรอยเชื่อมเฉลี่ย 40.8 HV มีความแปรปรวนทั้งทางด้าน Retreating Side และ Advancing Side โดยเฉพาะบริเวณอิทธิพลความร้อนค่าความแข็งที่ได้เฉลี่ย 40.10 HV ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 4.62% ดังนั้น ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm เส้นกราฟมีความแปรปรวนไม่มากนัก ค่าความแข็งที่ได้มีความแตกต่างไม่สูงนัก อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งบริเวณเนื้อเชื่อมยังสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม ดังภาพประกอบ 4.21



ภาพประกอบ 4.21 กราฟแสดงค่าความแข็งงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 120 mm/min

4.5.6 ทดสอบความแข็งแรงงานเชื่อม FSW ที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min

ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงพบว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยบริเวณเนื้อโลหะเดิม 39 HV บริเวณอิทธิพลความร้อนด้าน Retreating Side และ Advancing Side ค่าความแข็งแรงที่ได้เฉลี่ย 40.62 HV เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับเนื้อโลหะเดิม อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงบริเวณเนื้อเชื่อมของชิ้นทดสอบที่ได้เฉลี่ย 41 HV มีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 5.12% จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ค่าความแข็งแรงทุกพื้นที่และทุกระดับมีความแปรปรวนต่ำ และค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะเดิมเล็กน้อย ดังภาพประกอบ 4.22

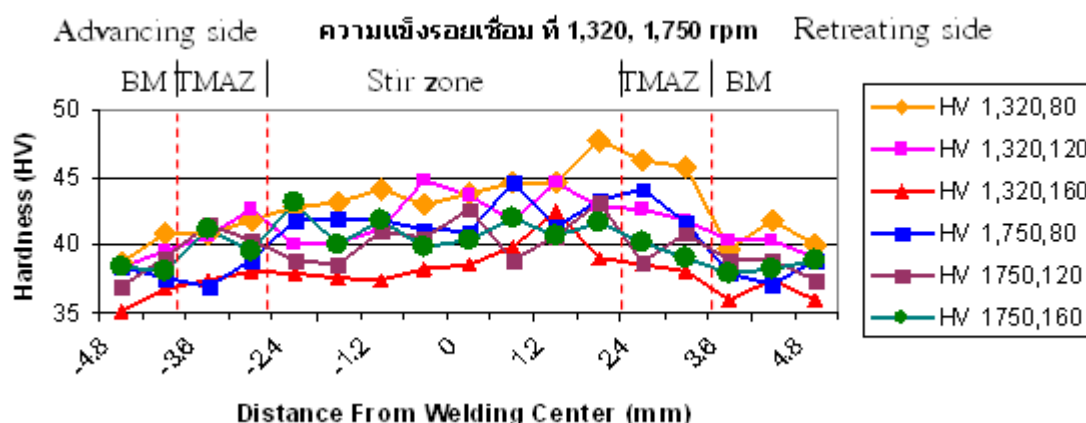


ภาพประกอบ 4.22 กราฟแสดงความแข็งแรงงานเชื่อม SSM A356 ที่ 1,750 rpm และ 160 mm/min

4.5.7 ทดสอบความแข็งแรง ที่ 1,320 และ 1,750 rpm และที่ 80, 120 และ 160 mm/min

จากการทดสอบความแข็งแรงด้วยไมโครวิกเกอร์ ค่าความแข็งแรงของงานเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min และที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 120 และ 160 mm/m พบว่าความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อม และบริเวณอิทธิพลความร้อน มีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมโดยเฉพาะด้าน Retreating Side ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min และที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120, และ 160 mm/min ทั้งสองความเร็วรอบและทุกระดับของความเร็วในการเชื่อม ค่าความแข็งแรงแตกต่างกันไม่มากนัก ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ค่าความแข็งแรงมีความแปรปรวนน้อยกว่าที่ความเร็ว

รอบ 1,320 rpm ความร้อนจากการเสียดทานที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm คาดว่ามีอุณหภูมิสูงกว่า ทำให้เนื้อโลหะอ่อนตัวมากกว่าเมื่อรอยเชื่อมบริเวณที่ถูกควนแข็งตัวทำให้มีค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อโลหะเดิมดังภาพประกอบ 4.23



ภาพประกอบ 4.23 กราฟแสดงค่าความแข็งเฉลี่ยรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ 1,320 และ 1,750 rpm ที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min

4.5.8 วิเคราะห์ผลอิทธิพลความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมต่อค่าความแข็งของงานเชื่อม FSW

จากการทดสอบค่าความแข็งรอยเชื่อมที่ 1,320 rpm และที่ 80 mm/min ค่าความแข็งสูงสุดบริเวณอิทธิพลความร้อนเฉลี่ย 46.55 HV สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 16 % บริเวณรอยเชื่อมสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม คิดเป็น 9.6 % และค่าความแข็งต่ำสุดที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 120 mm/min ค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณรอยเชื่อม 40.8 HV สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม 4.62 %

จากการทดสอบความแข็ง ที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min พบว่าค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณเขตอิทธิพลของความร้อนมีค่าสูงกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมทุกปัจจัยและทุกระดับ ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมและอิทธิพลของความร้อนมีค่าสูงกว่าที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm บริเวณที่ค่าความแข็งมีความแปรปรวนสูง ค่าความแข็งที่ได้มีค่าสูงเช่นบริเวณอิทธิพลความร้อนด้าน Retreating Side เป็นต้น ค่าความแข็งที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงมากขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยึดตัวลดลงและมักจะแตกหักบริเวณ ดังกล่าว

4.6 อิทธิพลความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมต่อค่าความแข็งแรงงานเชื่อม FSW

จากการทดสอบแรงดึงหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะถูกตัดในลักษณะตั้งฉากกับรอยเชื่อม โดยให้รอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นทดสอบนำไปกัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM (E8) และทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s ผลของการทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนและบริเวณแตกหักของชิ้นทดสอบ (BM) แตกหักบริเวณเนื้อโลหะเดิมห่างจากรอยเชื่อม (BR) แตกหักบริเวณเนื้อโลหะเดิมเป็นบริเวณที่ติดกับด้าน Retreating Side และ (BA) แตกหักบริเวณเนื้อโลหะเดิมบริเวณที่ติดกับด้าน Advancing Side ดังตาราง 4.1

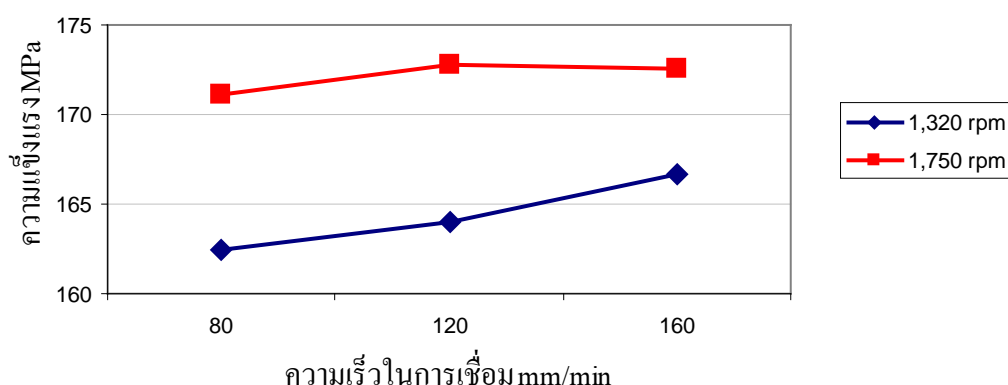
ตาราง 4.1 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1750 rpm และบริเวณแตกหัก

StdOder	RunOder	PtType	Blocks	Rotation Tool	Welding Speed	Ultimate Strength	Blacking Point
10	1	1	1	1750	80	168.38	BM
12	2	1	1	1750	160	174.34	BM
13	3	1	1	1320	80	164.6	BR
1	4	1	1	1320	80	162.38	BR
7	5	1	1	1320	80	160.19	BR
6	6	1	1	1750	160	171.56	BM
18	7	1	1	1750	160	174.74	BA
9	8	1	1	1320	160	167.34	BR
15	9	1	1	1320	160	167.33	BR
3	10	1	1	1320	160	165.38	BR
17	11	1	1	1750	120	173.57	BM
14	12	1	1	1320	120	163.79	BR
11	13	1	1	1750	120	173.33	BM
16	14	1	1	1750	80	172.63	BM
8	15	1	1	1320	120	164.64	BR
2	16	1	1	1320	120	163.6	BR
5	17	1	1	1750	120	168.76	BA
4	18	1	1	1750	80	172.46	BM

4.6.1 เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงงานเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min

จากการทดลองพบว่าความเร็วรอบทั้งสองปัจจัยเป็นอิสระไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm มีค่าสูงกว่าที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm แต่มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกระดับ เมื่อความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm และความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ค่าที่ได้อยู่ในช่วง 162.38 ถึง 167.34 MPa บริเวณที่แตกหักมากที่สุดคือบริเวณเนื้อโลหะเดิมด้าน Retreating Side แตกตามขอบรอยต่อระหว่างเนื้อโลหะเดิมกับเนื้อเชื่อมที่ถูกกวาน ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min ค่าที่ได้อยู่ในช่วง 168.76 ถึง 174.74 MPa บริเวณที่แตกหักเป็นเนื้อโลหะเดิมทั้งด้าน Advancing Side และ Retreating Side ค่าความแข็งแรงมีค่าสูงกว่าทุกระดับ ดังภาพประกอบ 4.24

ความแข็งแรงของงานเชื่อม FSW ที่ 1,320 และ 1,750 rpm

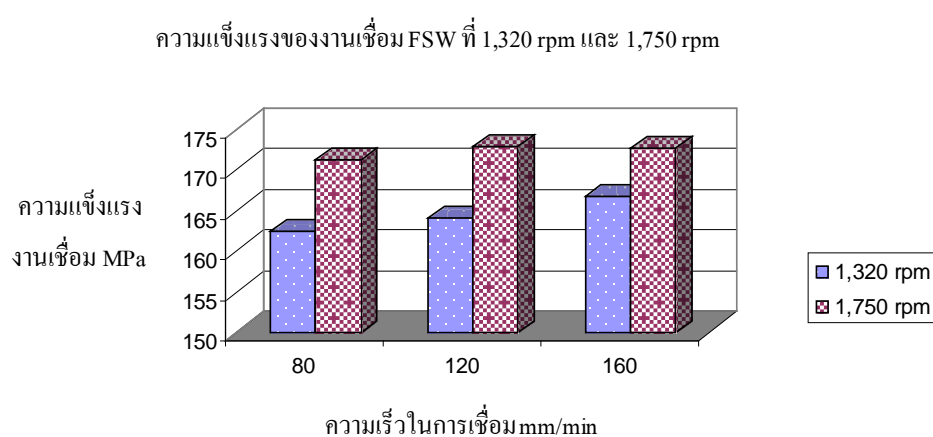


ภาพประกอบ 4.24 กราฟเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm และ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min

4.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมกับค่าความแข็งแรงรอยเชื่อม

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ 1,320 และ 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min กับค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมในแต่ละปัจจัยและแต่ละระดับ

ดังภาพประกอบ 4.25 ผลจากการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าต่ำสุด เมื่อเทียบกับระดับต่างๆ ที่ความเร็วในการเชื่อมสูงกว่า ดังภาพประกอบ 4.25 จากการตรวจสอบโครงสร้างภาคตัดของแนวเชื่อม โดยตัดชิ้นทดสอบทุกๆ ระยะ 10 มม. จะปรากฏผลของการเกิดช่องว่างตลอดความยาวแนวเชื่อมและที่จุดเริ่มต้นมีขนาดของช่องว่างที่โตกว่าส่วนอื่นๆ ที่ระยะประมาณ 8-10 มม. มีขนาดที่เล็กลงและสม่ำเสมอตลอดความยาวรอยเชื่อม ความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ได้มีค่าต่ำ ดังกราฟแสดงในภาพประกอบ 4.25 เมื่อนำไปทดสอบจึงส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าต่ำ อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 80, 120 และ 160 mm/min

4.6.3 วิเคราะห์ผลความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมต่อค่าความแข็งแรงรอยเชื่อม

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบทั้งสองปัจจัยไม่มีอันตรกิริยาต่อกันแต่ความเร็วรอบกับความเร็วในการเชื่อมมีความสัมพันธ์และมีผลต่อรอยเชื่อมที่ความเร็วในการเชื่อมต่ำเกิดช่องว่างค่าความแข็งแรงที่ได้ต่ำ และที่ความเร็วในการเชื่อมสูง รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ค่าความแข็งแรงที่ได้สูง ดังนั้น ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมที่มีความสอดคล้องและสัมพันธ์กันจะส่งผลถึงลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยา แต่หากมีการออกแบบวางแผนที่ดี ตรวจสอบทุกขั้นตอน ก็จะทำให้ได้เนื้อเชื่อมมีความสมบูรณ์ ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสามารถรับแรงกระทำได้ดี จากการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อมที่ระดับ 80 mm/min เกิดช่องว่างด้าน Retreating Side บริเวณมุมด้านล่างตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนตลอดความยาวของแนวเชื่อมทำให้ความแข็งแรงของงานเชื่อมต่ำสุด เมื่อเทียบกับความเร็วในการเชื่อมที่

ระดับสูงกว่าเนื่องจากมีขนาดของช่องว่างที่โตกว่าบริเวณแตกหักเป็นเนื้อโลหะเดิมด้าน Retreating Side จากการทดลองที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 80, 120 และ 160 mm/min รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ตลอดความยาวแนวเชื่อม ค่าความแข็งแรงสูงกว่าที่ระดับ 1,320 rpm บริเวณแตกหักมักจะเป็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม ค่าความแข็งแรงบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนและบริเวณที่ถูกลูกปืนมีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะเดิมเล็กน้อย

4.7 การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในการทดสอบค่าความแข็งแรงของเนื้อโลหะเดิมและชิ้นทดสอบงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำการคำนวณค่าต่างๆ โดยใช้ \bar{X} และ R-Chart ตรวจสอบความแปรปรวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 และใช้โปรแกรม Minitab V14 ตรวจสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

4.7.1 การตรวจสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356

เป็นการทดสอบหาค่าความแปรปรวนของชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ก่อนทำการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน เนื่องจากชิ้นทดสอบที่ได้จากการหล่อแบบกิ่งแข็งไม่ใช่ชุด (Batch) เดียวกัน เพื่อให้มั่นใจได้ว่าชิ้นทดสอบทุกชิ้นมีค่าความแปรปรวนสม่ำเสมอไม่แตกต่างกันโดยการสุ่มตัวอย่างในการทดลองของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 (Base Metal, SSM A356) ของชิ้นงานที่ผ่านการ Squeeze Casting ที่แรงดันมากกว่า 200 Psi อัตราความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s จำนวน 8 ชุด แต่ละชุด แบ่งเป็น 3 ส่วน (ด้านข้าง 2 ชิ้น กลาง 1 ชิ้น) รวมทั้งหมด 24 ชิ้น ชิ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM [E8] ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ดังตาราง 4.2 ค่าความแข็งแรงของเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 เฉลี่ย = 170 MPa [3] จากการตรวจสอบค่าความแข็งแรงของเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 เฉลี่ยเท่ากับ 170.07 MPa

ตาราง 4.2 ค่าความแข็งแรงของเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356

N0.	Random No.	Ultimate Strength	N0.	Random No.	Ultimate Strength
1	2	167.74	13	15	169.54
2	5	170.07	14	21	171.84
3	11	169.55	15	17	171.09
4	18	170.05	16	23	169.45
5	8	168.72	17	13	168.54
6	7	171.06	18	14	171.17
7	20	169.64	19	12	169.73
8	10	167.98	20	24	171.06
9	3	169.73	21	19	168.86
10	16	172.04	22	1	171.68
11	6	170.93	23	22	170.57
12	9	172.03	24	4	168.81

4.7.2 ทดสอบความแปรปรวนเนื้อโลหะเดิม SSM A356 ด้วยแผนภูมิ \bar{X} และ R- chart

เป็นการตรวจสอบค่าความแข็งแรงที่ได้ว่าอยู่ในช่วงของเส้นควบคุมระหว่าง UCL - LCL หรือไม่ เพื่อให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ของแต่ละชุด ไม่มีความแตกต่างกันทำให้เชื่อมั่นได้ว่าชิ้นงานมีความแปรปรวนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นทุกชิ้น โดยการตรวจสอบด้วยแผนภูมิควบคุม \bar{X} และ R-Chart ดังตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ค่าความแข็งแรง Base Metal จำนวนด้วยแผนภูมิควบคุม X - Bar และ R - chart

Batch	บน	กลาง	ล่าง	ค่าเฉลี่ย	UCL- \bar{x}	X-Dbar	LCL- \bar{x}	\bar{R}	UCL-R	R-bar	LCL-R
1	167.74	169.73	168.57	168.680	171.584	170.080	168.566	1.990	3.810	1.480	0.000
2	170.07	172.04	171.17	171.093	171.584	170.080	168.566	1.970	3.810	1.480	0.000
3	169.55	170.93	169.73	170.070	171.584	170.080	168.566	1.380	3.810	1.480	0.000
4	170.05	172.03	171.06	171.047	171.584	170.080	168.566	1.980	3.810	1.480	0.000
5	168.72	169.54	168.86	169.040	171.584	170.080	168.566	0.820	3.810	1.480	0.000
6	171.06	171.84	171.68	171.527	171.584	170.080	168.566	0.780	3.810	1.480	0.000
7	169.64	171.09	170.57	170.433	171.584	170.080	168.566	1.450	3.810	1.480	0.000
8	167.98	169.45	168.81	168.747	171.584	170.080	168.566	1.470	3.810	1.480	0.000

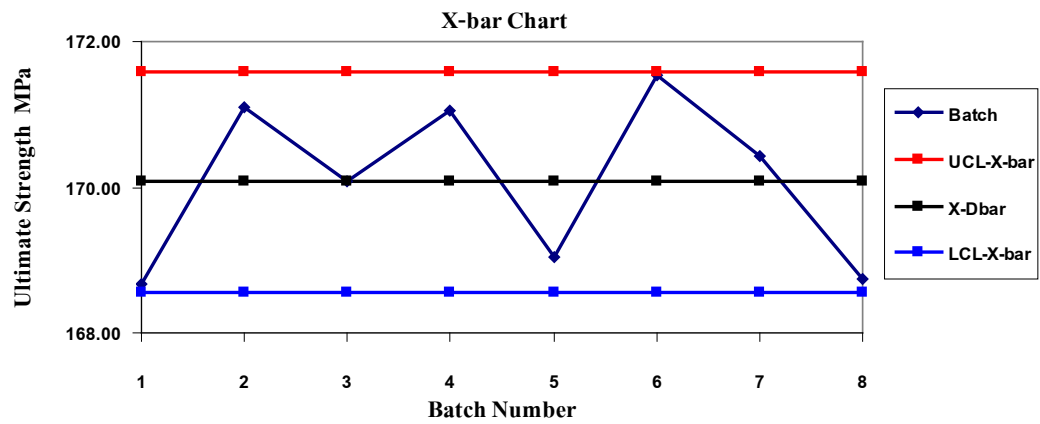
เส้นกลางเป็น \bar{X} และ \bar{R} เป็นแผนภูมิที่ใช้สูตรพื้นฐานการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ย โดยการเปลี่ยนแปลงการกระจายค่าความแข็งแรงของเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 (\bar{R}) และปัจจัย (A_2) ของการเปลี่ยนแปลงทั้งสามชิกมา ($A_2 \bar{R} = 3\sigma_{\bar{X}}$)⁴ ใช้สูตรแผนภูมิเฉลี่ย \bar{X} แผนภูมิพิสัย R , ค่าพิสัย \bar{R} เป็นการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงการกระจายค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 (σ_R)⁵ เพราะฉะนั้น แผนภูมิแสดงให้เห็นถึงจุดผิดปกติของการเปลี่ยนแปลงการกระจายข้อมูลจำนวนค่า UCL และ LCL ดังสมการที่ (4-1), (4-2)

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{X} + A_2 \bar{R} \qquad UCL_R = D_4 \bar{R} \qquad (4.1)$$

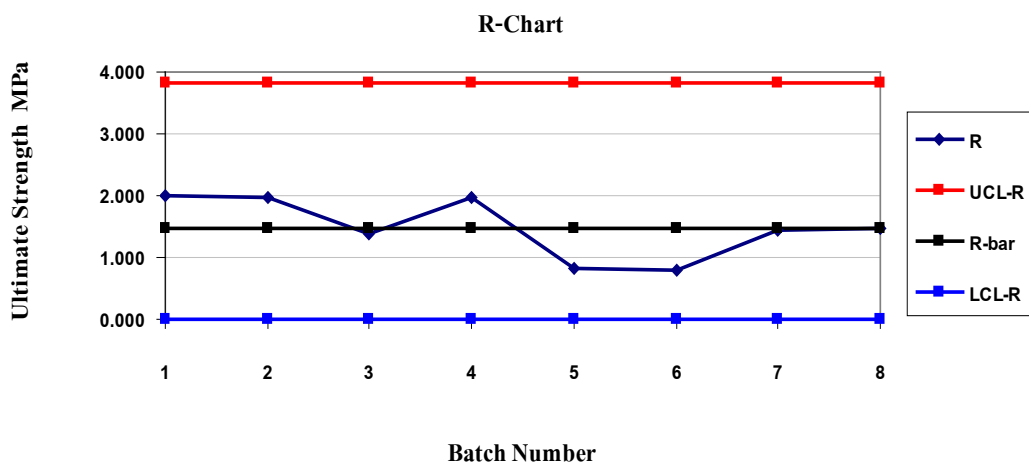
$$LCL_{\bar{X}} = \bar{X} - A_2 \bar{R} \qquad LCL_R = D_3 \bar{R} \qquad (4.2)$$

พิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุมอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่ จากลักษณะของจุดที่ปรากฏในกราฟ ไม่ควรมีเหตุการณ์ดังนี้

- ประการที่ 1 มี 6 จุดติดต่อกันที่อยู่ด้านใดด้านหนึ่งของเส้นกึ่งกลาง
- ประการที่ 2. มี 7 จุดติดต่อกันที่แสดงแนวโน้มขึ้นหรือลงตลอด
- ประการที่ 3. มีจุดที่เปลี่ยนระดับอย่างรวดเร็ว
- ประการที่ 4. มีจุดที่แสดงรูปแบบเป็นวัฏจักร



ภาพประกอบ 4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ด้วย \bar{X} Chart



ภาพประกอบ 4.27 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ด้วย R-Chart

จากกราฟ \bar{X} และ R-Chart ไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลอยู่ภายใต้การควบคุม ผลจากการคำนวณค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบเนื้อโลหะเดิม ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ของการทดลองที่ผ่านการ Squeeze โดยใช้ \bar{X} และ R-Chart ค่าที่ได้ อยู่ในช่วงของเส้นควบคุมระหว่าง UCL - LCL ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าเนื้อโลหะเดิม SSM A356 ของแต่ละชุด ไม่มีความแตกต่างกันทำให้เชื่อมั่นได้ว่าชิ้นงานมีความแปรปรวนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นทุกชิ้น โดยการตรวจสอบด้วยแผนภูมิควบคุม \bar{X} และ R-Chart ดังภาพประกอบ 4.26 และ 4.27

4.7.3 การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมด้วยวิธีการทางสถิติ

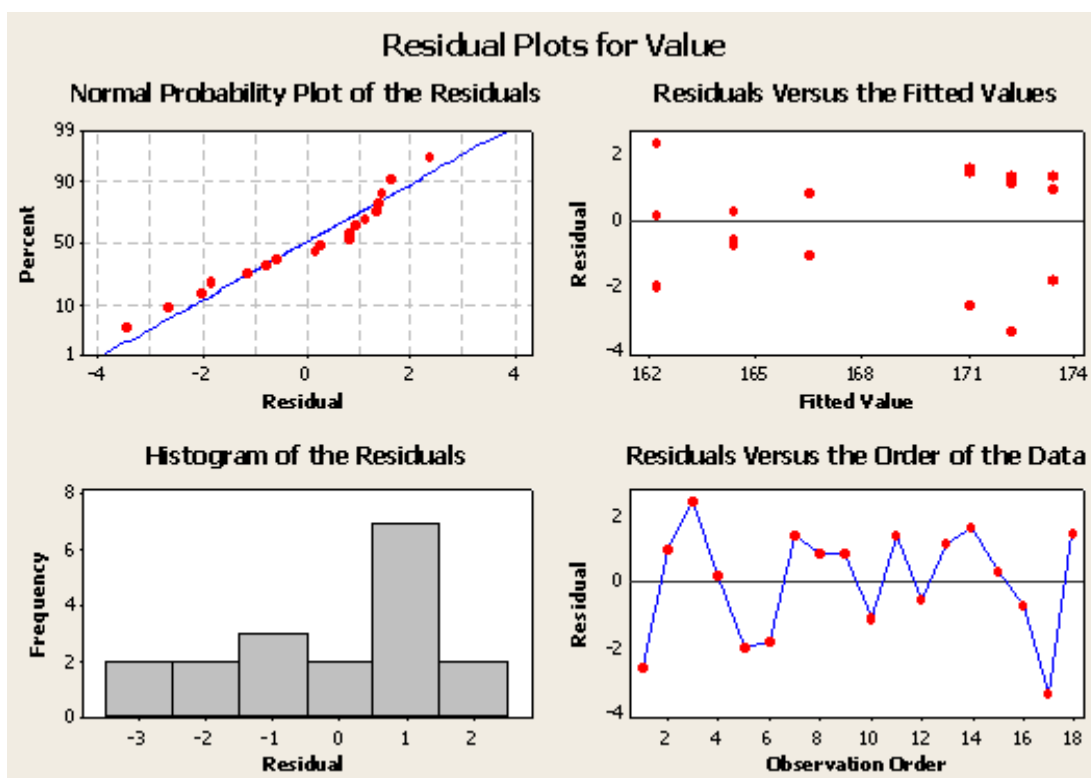
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในการทดสอบค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำการคำนวณค่าต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Minitab V14 ได้ผลการคำนวณต่างๆ ดังนี้

ตาราง 4.4 ค่าความแข็งแรงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม SSM A356

		Welding Speed (mm/ min)					
		80		120		160	
Rotation (rpm)	1,320	162.83	162.40	163.60	164.01	165.38	166.68
		160.19		164.64		167.34	
		164.60		163.79		167.33	
	1,750	172.64	171.22	168.76	171.89	171.56	173.55
		168.38		173.33		174.34	
		172.63		173.57		174.74	

4.7.4 กราฟแสดง Residual Plot for Yield

กราฟแสดง Residual Plot for Yield เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking)



ภาพประกอบ 4.28 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

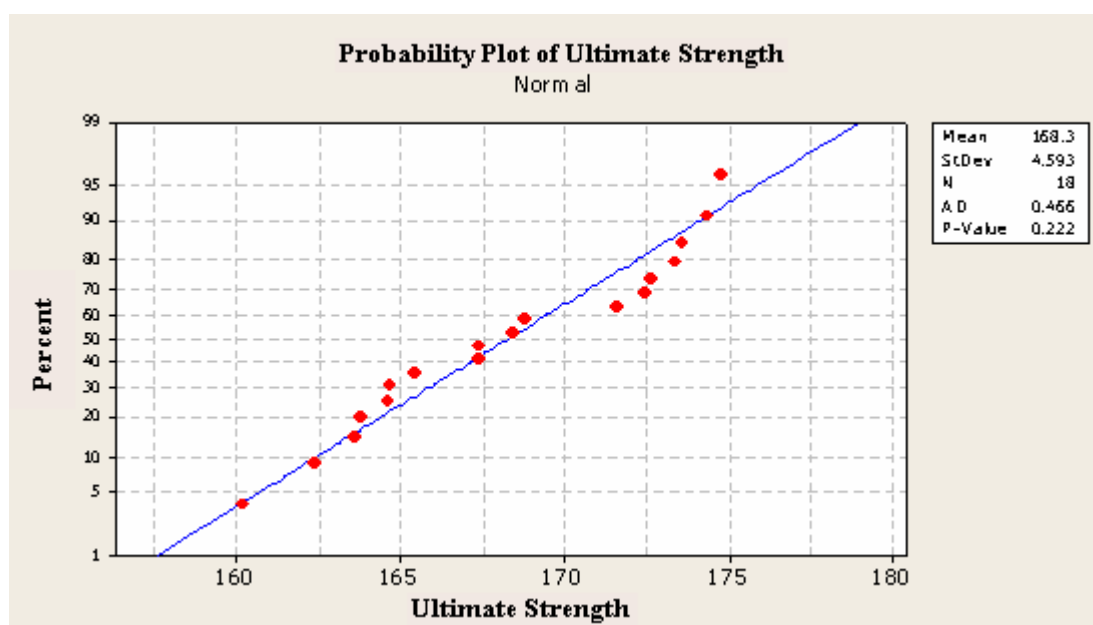
4.7.4.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม เป็นเส้นตรง และการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ในลักษณะใด เพื่อให้มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลองอยู่ภายใต้สภาวะการควบคุมโดยพิจารณา ดังนี้

1) พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล โดยดูจากกราฟ Residual Versus the Order of the Data จากภาพประกอบ 4.28 (Model Adequacy Checking) เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลมีลักษณะสุ่มอยู่ภายใต้พิสัยควบคุมหรือไม่จากลักษณะ

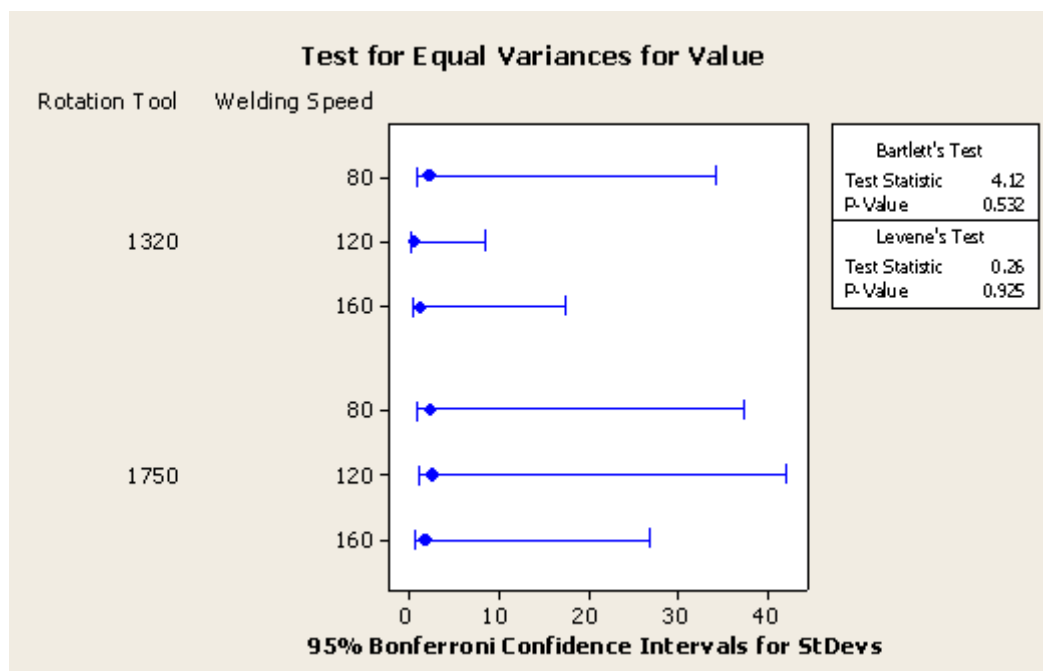
ของจุดที่ควรให้ความสำคัญจากภาพประกอบ 4.28 ดังกล่าวไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม

2) พิจารณากระจายตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรง เนื่องจากข้อมูลมีน้อยกว่า 30 ตัว จึงพิจารณาจาก Normal Probability Plot of the Residuals ดังภาพประกอบ 4.28 จาก Model Adequacy Checking จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่มีบางจุดกระจายตัวออกนอกเส้นทำให้ไม่มั่นใจในการกระจายตัวของข้อมูล จึงได้มีการทดสอบ Normal Probability ดังภาพประกอบ 4.29 จากข้อกำหนด Alpha $\alpha = 0.05$ จากกราฟได้ค่า P-Value = 0.222 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\alpha = 0.05$



ภาพประกอบ 4.29 กราฟแสดงลักษณะกระจายตัวแบบปกติ

3) พิจารณาข้อมูลรอบค่าศูนย์ ลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน มีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์จาก (Model Adequacy Checking) ดังภาพประกอบ 4.28 กราฟแสดงลักษณะข้อมูล Residuals versus the fitted values ที่ได้มีบางค่าที่กระจายตัวออกห่างจากจุดศูนย์กลางไม่สม่ำเสมอทำให้ไม่มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลอง มีการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรม Minitab V14, Test for Equal Variances for Value ผลการคำนวณ ดังภาพประกอบ 4.30



ภาพประกอบ 4.30 กราฟแสดงลักษณะข้อมูล Residuals versus the fitted values

จากภาพประกอบ 4.40 แสดงว่าช่วงความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากปัจจัยต่างๆ เหลื่อมกัน แสดงว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการ ทดลองทั้ง 6 ครั้ง มีความแตกต่างกัน การทดลองที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm และความเร็วในการ เชื่อม 120 mm/min มีความแปรปรวนสูงกว่าการทดลองอื่นๆ ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm และ ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/ min มีความแปรปรวนน้อยที่สุด

ทดสอบความแตกต่างกันของความแปรปรวน จากสมมติฐาน

$$H_0 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2 \text{ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 6 เท่ากัน}$$

$$H_1 = \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \sigma_4^2 \neq \sigma_5^2 \neq \sigma_6^2 \text{ ความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 6 ไม่เท่ากัน}$$

ที่ระดับ Error Type I (Alpha: α) = 0.05

จาก Bartlett's Test ผลการคำนวณที่ได้ดังภาพประกอบ 4.40 ค่า P-Value = 0.532 มีค่ามากกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าสัดส่วนของความแปรปรวนในรูป F มีค่าน้อย ความแปรปรวนของ การทดลองทั้ง 6 ครั้ง มีค่าไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ $\alpha = 0.05$

ตาราง 4.5 ตาราง ANOVA

Multilevel Factorial Design

Factors: 2 Replicates: 3
 Base runs: 6 Total runs: 18
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 2, 3

General Linear Model: Stress,U versus Rotation RPM, Welding Speed

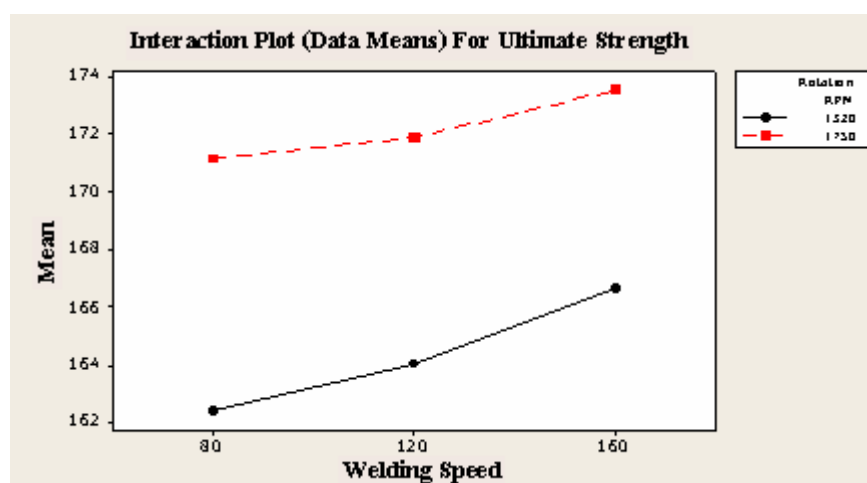
Factor	Type	Levels	Values
Rotation RPM	fixed	2	1320, 1750
Welding Speed	fixed	3	80, 120, 160

Analysis of Variance for Stress,U, using Adjusted SS for Tests

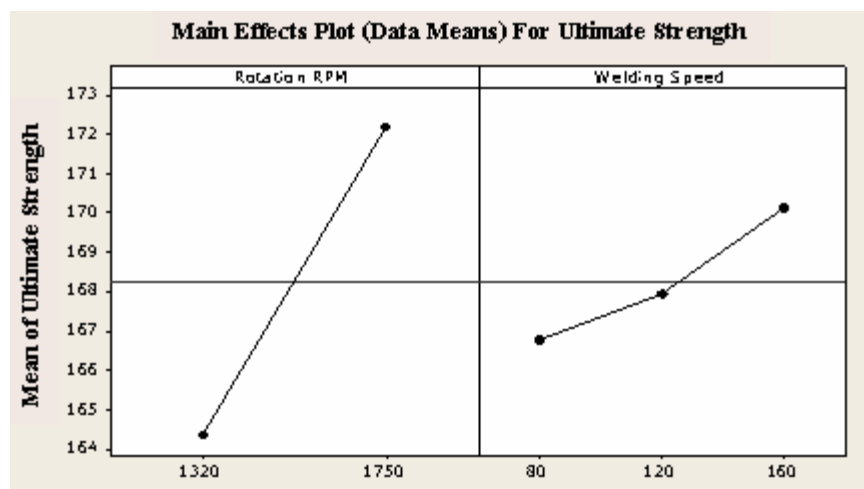
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Rotation RPM	1	276.282	276.282	276.282	73.42	0.000
Welding Speed	2	34.484	34.484	17.242	4.58	0.033
Rotation RPM*Welding Speed	2	2.721	2.721	1.360	0.36	0.704
Error	12	45.158	45.158	3.763		
Total	17	358.644				

S = 1.93989 R-Sq = 87.41% R-Sq(adj) = 82.16%

ในการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Minitab V14 จากภาพประกอบ 4.31 และ 4.32 จากกราฟอันตรกิริยาแสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน



ภาพประกอบ 4.31 กราฟแสดงอันตรกิริยา ค่าความแข็งแรงกับความเร็วในการเชื่อม



ภาพประกอบ 4.32 กราฟแสดงอันตรกิริยา ค่าความแข็งแรงกับความเร็วรอบของเครื่องมือ

จากตาราง 4.5 ตาราง ANOVA ที่ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 87.41 % แสดงว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองมาจากการเปลี่ยนความเร็วรอบเป็นปัจจัย A และความเร็วในการเชื่อม ปัจจัย B และ อันตรกิริยา AB ในการทดลอง 87.41 ส่วน และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable) 12.59 ส่วน

4.7.5 ทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

อิทธิพลของความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อมและอันตรกิริยา มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญดังนี้

4.8.5.1 Main Effect

ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบของเครื่องมือ

$H_0 : \tau_1 = \tau_2$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตาราง 4.5 ตาราง ANOVA ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพล

ของปัจจัยความเร็วรอบ มีผลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% $\alpha = 0.05$

ทดสอบสมมุติฐานอิทธิพลของปัจจัยความเร็วในการเชื่อม

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตาราง 4.5 ตาราง ANOVA ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.033 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยความเร็วในการเชื่อมมีผลต่อความแข็งแรงของงานเชื่อม อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% $\alpha = 0.05$

4.8.5.2 2 Factor Interaction Effect

ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ for all i, j ทุกระดับ i, j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ($i = 1,2; j = 1,2,3$)

$H_1 : at least one (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ มีบาง i, j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ($i = 1,2; j = 1,2,3$)

จากข้อมูลในตาราง 4.5 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาด้วย ANOVA ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.704 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วในการเชื่อม ต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% $\alpha = 0.05$

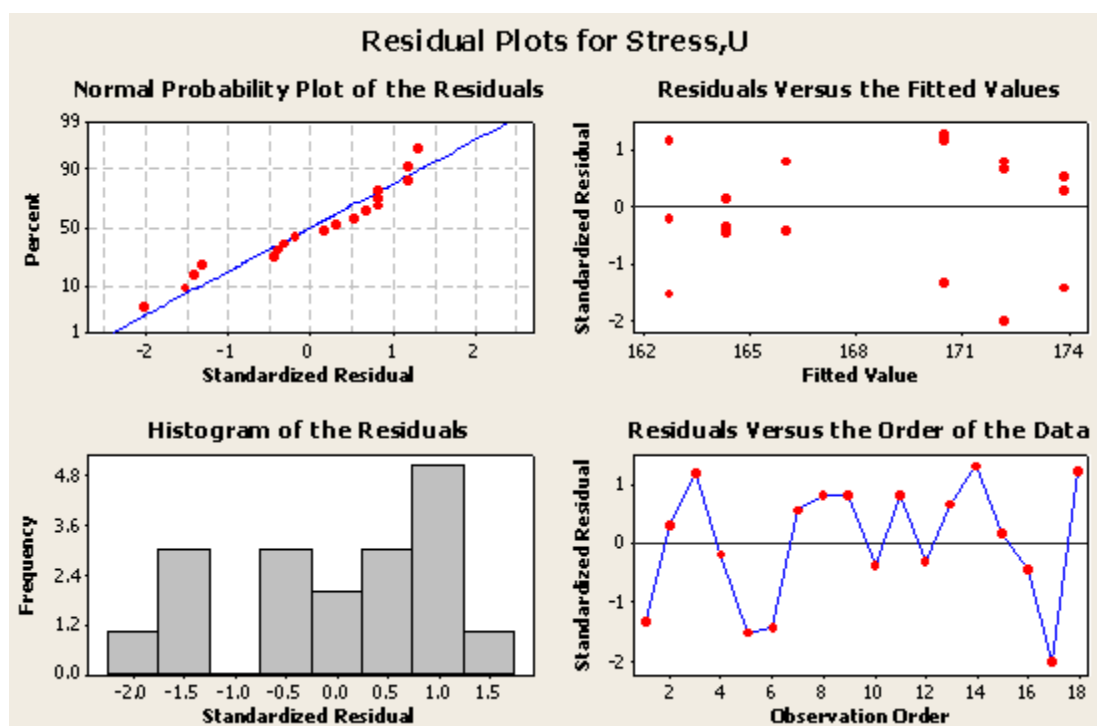
4.7.6 ตรวจสอบความถูกต้องของสมการถดถอย

เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ ความเป็นปกติ และความมีเสถียรของความแปรปรวนของข้อมูล ลักษณะการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอยเชิงเส้นตรงดังนี้

4.7.6.1 ทดสอบความถูกต้องของตัวแบบถดถอยในการทดสอบความถูกต้องของตัวแบบถดถอยเชิงเส้นตรงจะขึ้นอยู่กับข้อสมมติที่สำคัญคือ

1) ความเป็นอิสระโดยดูกราฟ Residuals Versus the Order of the Data เพื่อดูความผิดปกติของเส้นกราฟ จากภาพประกอบ 4.33 ไม่พบความผิดปกติใดๆ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีลักษณะแบบสุ่ม

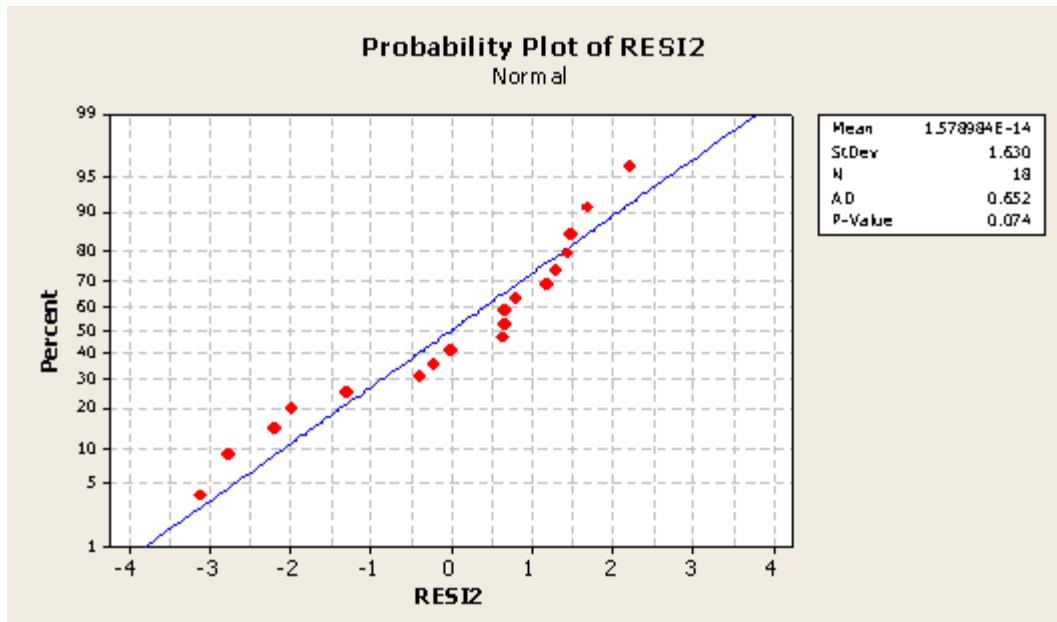
2) ความเป็นปกติ เนื่องจากข้อมูลที่ใช้มีน้อยกว่า 30 ข้อมูล จึงพิจารณาจากภาพประกอบ 4.43 Normal Probability Plot of the Residuals จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่มีบางจุดกระจายตัวออกนอกเส้น ทำให้ไม่มั่นใจในการกระจายตัวของข้อมูล จึงได้มีการทดสอบ Normal Probability ดังภาพประกอบ 4.33



ภาพประกอบ 4.33 กราฟแสดงการทดสอบความถูกต้องตัวแบบถดถอยเชิงเส้นตรง

3) ความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนพิจารณาจากภาพประกอบ 4.34 กราฟ Residuals Versus the fitted values ข้อมูลมีลักษณะกระจายตัวใกล้เคียงกันทำให้มีความความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์ จากข้อกำหนด Alpha $\alpha = 0.05$ จากกราฟได้ค่า P-Value =

0.074 มีค่ามาก ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบ Normal อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ค้นแปรสมำเสมอรอบค่าศูนย์



ภาพประกอบ 4.34 กราฟแสดงการกระจายตัวแบบ Normal ของ Regression

ตาราง 4.6 ตารางวิเคราะห์ความสมรูปตัวแบบถดถอย

Regression Analysis: Stress,U versus Rotation RPM, Welding Speed

The regression equation is

$$\text{Stress,U} = 135 + 0.0182 \text{ Rotation RPM} + 0.0418 \text{ Welding Speed}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	135.295	3.442	39.30	0.000
Rotation RPM	0.018222	0.001979	9.21	0.000
Welding Speed	0.04177	0.01303	3.21	0.006

S = 1.80485 R-Sq = 86.4% R-Sq(adj) = 84.6%

PRESS = 70.9013 R-Sq(pred) = 80.23%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	309.78	154.89	47.55	0.000
Residual Error	15	48.86	3.26		
Lack of Fit	3	3.70	1.23	0.33	0.805
Pure Error	12	45.16	3.76		
Total	17	358.64			

จากสมมติฐานดังกล่าวทำให้สามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยที่ได้มีความถูกต้อง โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Determination; R^2) จากตาราง 4.5 ANOVA ที่ได้ ค่า R^2 เท่ากับ 87.41% แสดงว่าความผันแปรที่เกิดขึ้น 100 หน่วย เป็นความผันแปรที่มีการปรับค่า ความเร็วรอบและ ความเร็วในการเชื่อมและเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุม 12.59 หน่วย พิจารณาค่า R^2_{Adj} เท่ากับ 82.16%. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าจำนวนข้อมูล 18 ชุด ที่นำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์มีค่าเพียงพอ

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Minitab V14 เมื่อกำหนดปัจจัย A คือความเร็วรอบ และปัจจัย B ความเร็วในการเชื่อม ที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของงานเชื่อม ดังนั้นทำการวิเคราะห์ สมการถดถอย จะได้สมการ ดังนี้

$$UltimateStrength = 135 + 0.0182 \text{ Rotation}(rpm) + 0.0418 \text{ WeldingSpeed}(mm / \text{min})$$

4.7.6.2 ทดสอบความสมรูปของตัวแบบถดถอยกับข้อมูล (Lack of Fit Test)

สมมติฐานในการทดสอบความสมรูปของตัวแบบถดถอยกับข้อมูล

H_0 : ตัวแบบถดถอยมีความสมรูป (Fit) กับข้อมูล

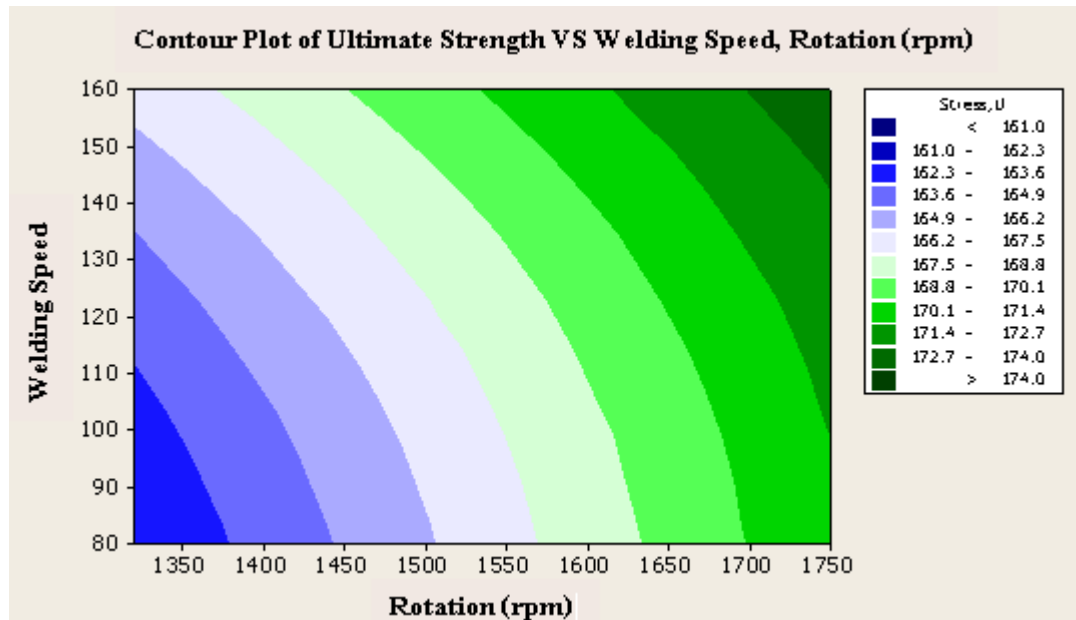
H_1 : ตัวแบบถดถอยมิได้มีความสมรูปกับข้อมูล

จากข้อมูลในตาราง 4.6 ผลการวิเคราะห์ความสมรูปตัวแบบถดถอย ยอมรับ H_0 เนื่องจากค่า P-Value = 0.805 ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่า Alpha $\alpha = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าตัวแบบถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ที่ $\alpha = 0.05$

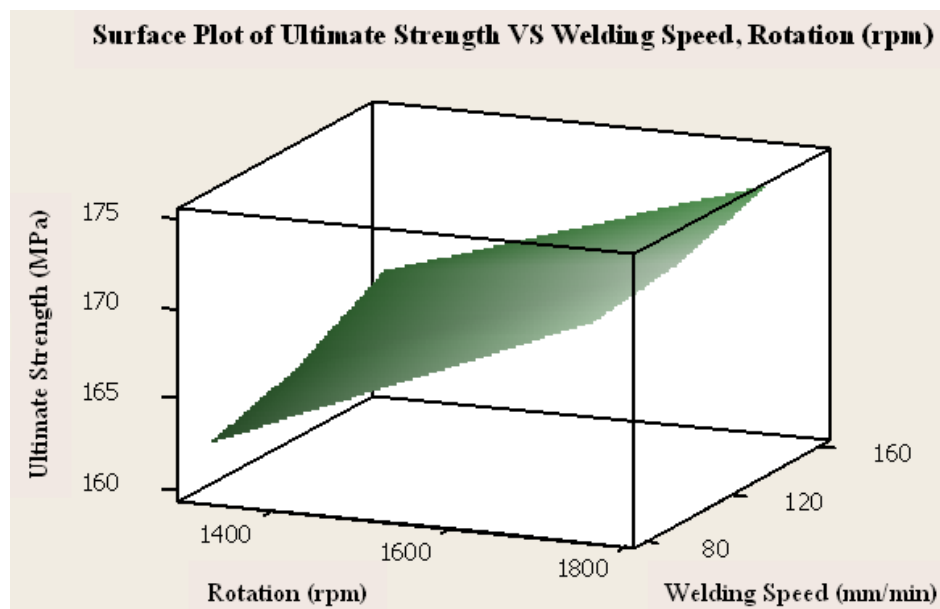
4.8 พื้นผิวผลตอบ

จากข้อมูลการทดลองจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Minitab V14 เมื่อกำหนด ปัจจัยความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อม ที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของงานเชื่อม Contour Plot ดังภาพประกอบ 4.35 ความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อมสูงขึ้นความแข็งแรงของรอย

เชื่อมเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 160 mm/min ความแข็งแรง 174 MPa
 ดังภาพประกอบ 4.36



ภาพประกอบ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อมที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงในระดับต่างๆ ของ Contour Plot



ภาพประกอบ 4.36 พื้นผิวผลตอบของค่าความแข็งแรงที่ได้รับอิทธิพลจากความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อม

4.8.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบพบว่า ข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ ความแปรปรวนของความแข็งแรงของรอยเชื่อมจากปัจจัยต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่การทดลองที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 120 mm/min มีความแปรปรวนสูง ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ความเร็วในการเชื่อม 120 mm/min มีความแปรปรวนน้อยที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 87.41% อธิบายได้ว่าผลจากการเปลี่ยนความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม มีความแข็งแรง 87.41 ส่วน

การวิเคราะห์ตาราง ANOVA เมื่อกำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 0.05 พิจารณาอันตรกิริยา AB ค่า P-Value เท่ากับ 0.704 ทำให้สรุปได้ว่าอันตรกิริยา ไม่มีอิทธิพลต่อผลการทดลอง ในส่วนของปัจจัยหลักคือ ความเร็วรอบ ค่า P-Value น้อยกว่า 0.000 และความเร็วในการเชื่อม ค่า P-Value เท่ากับ 0.033 ทำให้สรุปได้ว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% α เท่ากับ 0.05

จากผลการทดลองสามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังนี้

$$UltimateStrength = 135 + 0.0182 \text{ Rotation}(rpm) + 0.0418 \text{ WeldingSpeed}(mm / min)$$

การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบสรุปได้ว่าสมการถดถอยที่ได้มีความถูกต้อง มีค่า R^2 เท่ากับ 87.41% และการทดสอบความสมรูปของตัวแบบถดถอยกับข้อมูลมีความสมรูปกับข้อมูลจึงสามารถนำสมการที่ได้ไปใช้ทำนายค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมในช่วงของการออกแบบได้ ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ถึง 1,750 rpm และความเร็วในการเชื่อม 80 mm/min ถึง 160 mm/min

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและทางกลในการเชื่อม อะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ด้วยการเสียดทานแบบกวน ผลการศึกษาทดลองสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของรอยเชื่อม

ลักษณะทางกายภาพของรอยเชื่อมที่ 1,320 และ 1,750 rpm ผิวด้านบนเกล็ดรอยเชื่อมมีความละเอียดสม่ำเสมอไม่พบความผิดปกติใดๆ แต่ที่ 1,750 rpm ที่ 80 และ 120 mm/min ปริมาณครีปด้าน Retreating Side มาก

5.2 ผลการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ X – Ray

ตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสีเอกซ์ (X-Ray) ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อม เกิดช่องว่างด้านล่างของรอยเชื่อมด้าน Retreating Side และที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm รอยเชื่อมสมบูรณ์ ไม่พบข้อบกพร่องใดๆ ในรอยเชื่อม

5.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อม เกิดช่องว่างเป็นเส้นไม่ประสานเป็นเนื้อเดียวกันด้านล่างรอยเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ไม่พบข้อบกพร่องใดๆ

5.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณที่ถูกกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อมด้าน Retreating Side มีโครงสร้างที่ละเอียดกว่า Advancing Side และที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm โครงสร้างบริเวณที่ถูกกวนละเอียดแต่ไม่แตกต่างกัน

5.5 ผลการทดสอบความแข็งแรงงานเชื่อม FSW

ค่าความแข็งแรงของงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm มีค่าสูงกว่า ที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อมเฉลี่ย 2.5% และค่าความแข็งแรงบริเวณที่ถูกกวนและเขตอิทธิพลความร้อนมีค่าสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม 6.25%

5.6 ผลการทดสอบความแข็งแรงงานเชื่อม FSW

ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของเนื้อโลหะเดิมเท่ากับ 170.07 MPa ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อม ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 172.22 MPa มีค่าสูงกว่าที่ 1,320 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อมเฉลี่ย 164.36 MPa คิดเป็น 4.6% ตำแหน่งที่แตกหักของชิ้นทดสอบเป็นบริเวณเนื้อโลหะเดิม

5.7 ค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม SSM A356

ค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356 ด้วยการเสียดทานแบบกวน ตัวแปรที่ดีที่สุด คือที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ความเร็วในการเชื่อม 160 และ 120 mm/min ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 172.61 และ 172 MPa

5.8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

5.8.1 ข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม มีการกระจายตัวแบบปกติ ความแปรปรวนของรอยเชื่อมที่ 1,750 rpm, 120 mm/min มีความแปรปรวนสูงสุดและ ที่ 1,320 rpm, 120 mm/min มีความแปรปรวนน้อยที่สุด

5.8.2 Factor A และ Factor B ไม่มีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกัน ไม่มีอิทธิพลต่อผลการทดลอง

5.8.3 Main Effect ความเร็วรอบ และความเร็วในการเชื่อมมีอิทธิพลต่อผลการทดลอง

5.8.4 ความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอยที่ได้มีความถูกต้อง R^2 เท่ากับ 87.41%

5.8.5 ความสมบูรณ์ของตัวแบบถดถอยกับข้อมูลมีความสมบูรณ์กับข้อมูล

ข้อเสนอแนะ

1. การเกิดช่องว่างในรอยเชื่อมเกิดจากบ่า (Shoulder Diameter) ของเครื่องมือที่สัมผัสผิวหน้าแผ่นงานการเสียดทานที่ไม่สมบูรณ์ การเพิ่มแรงกดเพียงเล็กน้อยสามารถลดข้อบกพร่องในงานเชื่อมลงได้
2. การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสถานะที่สมดุล เนื้อเชื่อมบริเวณที่ถูกกวนมีความสมบูรณ์ที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm ทุกความเร็วในการเชื่อม ค่าความแข็งสูงกว่าเนื้อโลหะเดิม
3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อมและแรงกดมีผลต่อความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมและค่าความแข็งแรง จึงต้องมีการกำหนดให้สอดคล้องและเหมาะสมโลหะงานที่ทำการเชื่อม ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
4. จากการศึกษาข้อมูลจากเอกสารและการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อแข็ง A356 ครั้งนี้ การศึกษาสมบัติหลังการเชื่อมด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยการทำ T6 และศึกษาแรงกดที่ระดับต่างๆ เพื่อหาค่าที่ดีและสมบูรณ์ที่สุดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพด้วย SEM ดูการกระจายของธาตุต่างๆ ที่ผสมและสมบัติทางกล

บรรณานุกรม

- [1] เจษฎา วรรณสินธุ์ และคณะ 2006 เทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมไดแคสตีงแบบกึ่งของแข็ง ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ การประชุมวิชาการงานหล่อไทย ครั้งที่ 3
- [2] J. Wannasin, R.A. Martinez, M.C. Flemings, Grain Refinement of an Aluminium Alloy by Introducing Gas Bubbles during Solidification, accepted to published in Scripta Materialia, May 2006
- [3] M.F. Zah and D. Eireiner, Welding and Cutting 3 (2004) No.4 pp.223
- [4] T.J. Linert et al., Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Journal, Vol. 83, 2003, pp. 1S – 9S
- [5] R. Akhter, L. Ivanchev, H.P. Burger, Materials Science and Engineering A 447 (2007), pp. 192 - 196
- [6] ปรึกษา เมืองจันทร์บุรี, Internal Report ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, May 2007
- [7] W.B. Lee, Y.M. Yeon, S.B. Jung, The improvement of mechanical properties of friction stir welded A356 (2003) pp. 154 - 159
- [8] Y.G. Kim et al., Materials Letter 60 (2006) 3830 - 3837
- [9] W.B. Lee, Y.M. Yeon, S.B. Jung, Scripta Materialia 49 (2003) 423 - 428
- [10] E.D. Nicholas, Advanced Materials and Processing, June 1999 pp. 69 - 71
- [11] T. Khaled, “ An Outsider Looks At Friction Stir Welding “ Report #: ANM-112N-05-06, July 2005
- [12] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Materials and Design, 2007
- [13] M.L. Santella . *et al.*, 2005 “Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356” Scripta Material 53 (2005) 201-206
- [14] P.Kapranosl. *et al.*, 2004 “Friction Stir Welding (FSW) of Thixofrmed and Rheocast Plates” PP 535-8585
- [15] Dr.-Ing.Munich. *et al.*, 2006 “Downforce of friction stir” PP. 223
- [16] E.J. Zoqui. *et al.*, 2001 “Macro and Microstructure Analysis of SSM A356 Produced by Electromagnetic Stirring PP 368

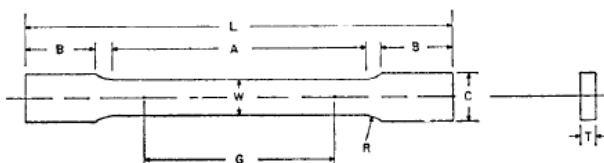
- [17] Z. Yong. *et al.*, 2004 “Evolution of the rheocasting Structure of A356 alloy investigated by large-scale crystal orientation observation” PP 258
- [18] The Webpage Assisted Instruction for Aluminum 2000 “อะลูมิเนียม-ซิลิกอนแมกนีเซียมหล่อผสม (Aluminium-Silicon-magnesium casting)” ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี pp. 1- 5
- [19] S. Wei. *et al.*, 2006 “Study of friction stir welding of 01420 aluminum-lithium alloy” Material Science and Engineering A452-453 PP. 170-177
- [20] L.Korlsson. *et al.*, 2007 ASAB AB, Sweden
- [21] Quality control Sixth edition Dale H.Besterfield.Ph.D.;P.E professor Emeritus College of Engineering Southern Illinois University Principal ,Besterfield & Associates
- [22] Design and Analysis of Experiments Sixth edition Douglas C. Montgomery Arizona State University.
- [23] Y.G. Kim *et al.*, “ Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy” Material Science and Engineering A 415 (2006) 250 - 254
- [24] H. Lambard *et al.*, 2007 “ Optimising FSW process parameters to minimize defects and Maximize fatiguelife in 5083-h321 aluminium alloy” Engineering Fracture Mechanics. pp 1-14

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อกำหนดขึ้นทดสอบมาตรฐาน ASTM

E 8



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 1½-in. Wide	Sheet-Type, ½-in. Wide	¼-in. Wide
	in.	in.	in.
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	8.00 ± 0.01	2.000 ± 0.005	1.000 ± 0.003
W—Width (Note 3 and Note 4)	1½ + ¼, - ¼	0.500 ± 0.010	0.250 ± 0.005
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	1	½	¼
L—Over-all length, min (Note 2 and Note 7)	18	8	4
A—Length of reduced section, min	9	2¼	1¼
B—Length of grip section, min (Note 8)	3	2	1¼
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	2	¾	¾

NOTE 1—For the 1½-in. wide specimen, punch marks for measuring elongation after fracture shall be made on the flat or on the edge of the specimen and within the reduced section. Either a set of nine or more punch marks 1 in. apart, or one or more pairs of punch marks 8 in. apart may be used.

NOTE 2—When elongation measurements of 1½-in. wide specimens are not required, a minimum length of reduced section (*A*) of 2¼ in. may be used with all other dimensions similar to those of the plate-type specimen.

NOTE 3—For the three sizes of specimens, the ends of the reduced section shall not differ in width by more than 0.004, 0.002 or 0.001 in., respectively. Also, there may be a gradual decrease in width from the ends to the center, but the width at each end shall not be more than 0.015, 0.005, or 0.003 in., respectively, larger than the width at the center.

NOTE 4—For each of the three sizes of specimens, narrower widths (*W* and *C*) may be used when necessary. In such cases the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits; however, unless stated specifically, the requirements for elongation in a product specification shall not apply when these narrower specimens are used.

NOTE 5—The dimension *T* is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications. Minimum thickness of 1½-in. wide specimens shall be ¾ in. Maximum thickness of ½-in. and ¼-in. wide specimens shall be ¾ in. and ¼ in., respectively.

NOTE 6—For the 1½-in. wide specimen, a ½-in. minimum radius at the ends of the reduced section is permitted for steel specimens under 100 000 psi in tensile strength when a profile cutter is used to machine the reduced section.

NOTE 7—To aid in obtaining axial force application during testing of ¼-in. wide specimens, the over-all length should be as large as the material will permit, up to 8.00 in.

NOTE 8—It is desirable, if possible, to make the length of the grip section large enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips. If the thickness of ½-in. wide specimens is over ¾ in., longer grips and correspondingly longer grip sections of the specimen may be necessary to prevent failure in the grip section.

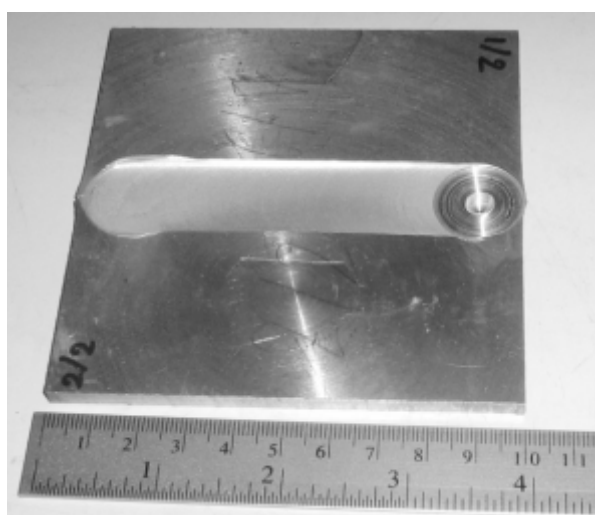
NOTE 9—For the three sizes of specimens, the ends of the specimen shall be symmetrical in width with the center line of the reduced section within 0.10, 0.05 and 0.005 in., respectively. However, for referee testing and when required by product specifications, the ends of the ½-in. wide specimen shall be symmetrical within 0.01 in.

NOTE 10—For each specimen type, the radii of all fillets shall be equal to each other within a tolerance of 0.05 in., and the centers of curvature of the two fillets at a particular end shall be located across from each other (on a line perpendicular to the centerline) within a tolerance of 0.10 in.

NOTE 11—Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used. If the fracture occurs at a distance of less than 2*W* from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. In acceptance testing, if the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

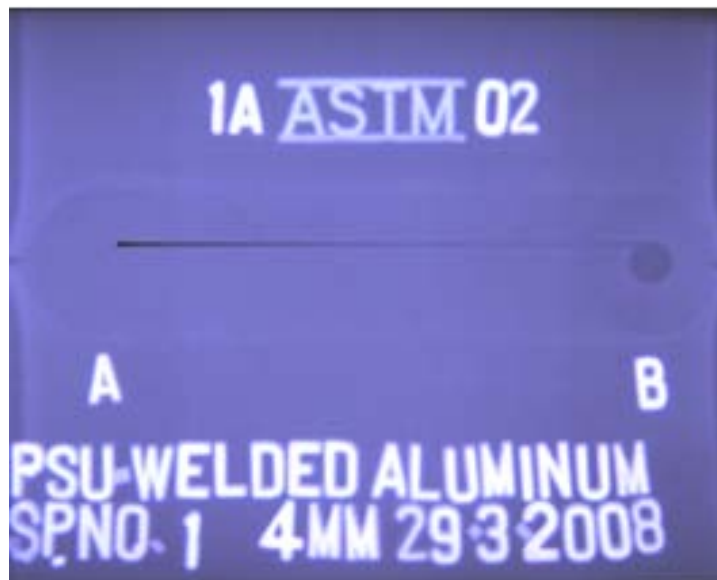
ภาคผนวก ข

ภาพขั้นตอนทดสอบงานเชื่อม FSW

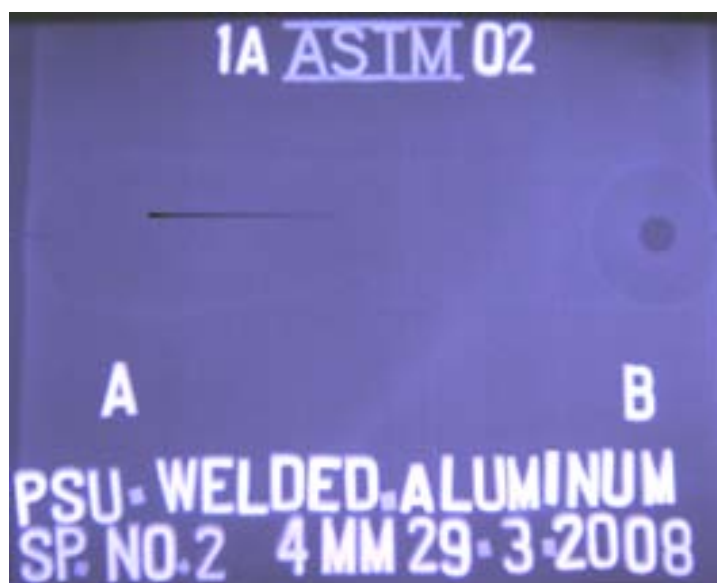


ภาคผนวก ข 1 ภาพผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356
ที่ความเร็วรอบ 1,320, 1,750 rpm ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80, 120, 160 mm/min

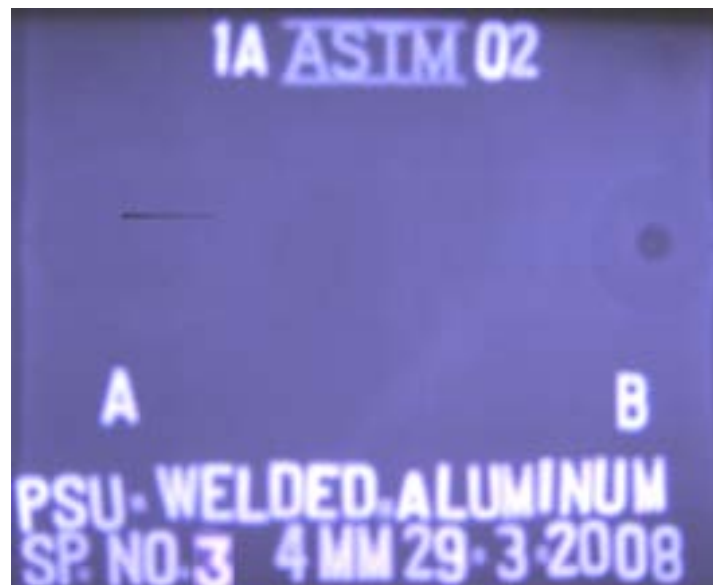
ภาพขั้นตอนทดสอบงานเชื่อม FSWFH ด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray



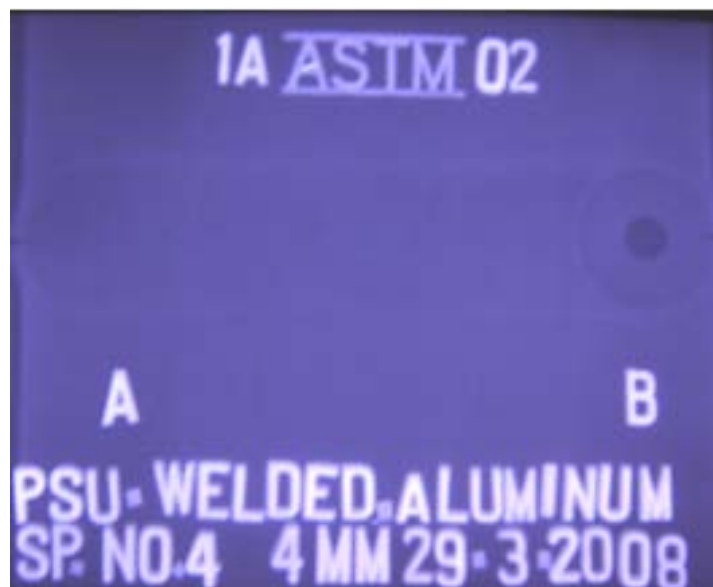
ภาคผนวก ข 2 ภาพถ่าย X-Ray ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min



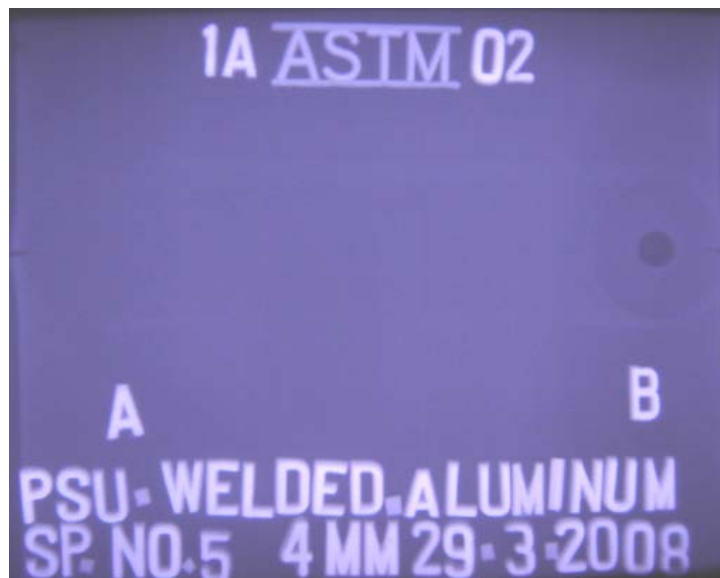
ภาคผนวก ข 3 ภาพถ่าย X-Ray ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min



ภาคผนวก ข 4 ภาพถ่าย X-Ray ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min



ภาคผนวก ข 5 ภาพถ่าย X-Ray ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min



ภาคผนวก ข 6 ภาพถ่าย X-Ray ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min



ภาคผนวก ข 7 ภาพถ่าย X-Ray ของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min

ภาพชิ้นทดสอบ Base Metal ด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray

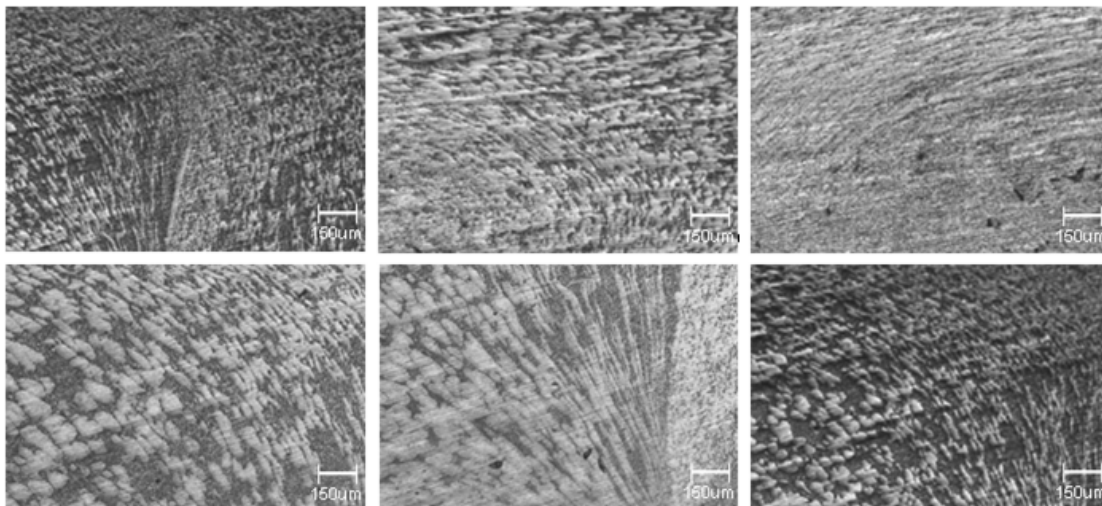


ภาคผนวก ข 8 ภาพถ่าย X-Ray การตรวจสอบข้อบกพร่องชิ้นทดสอบ Base metal Semi Solid
A356

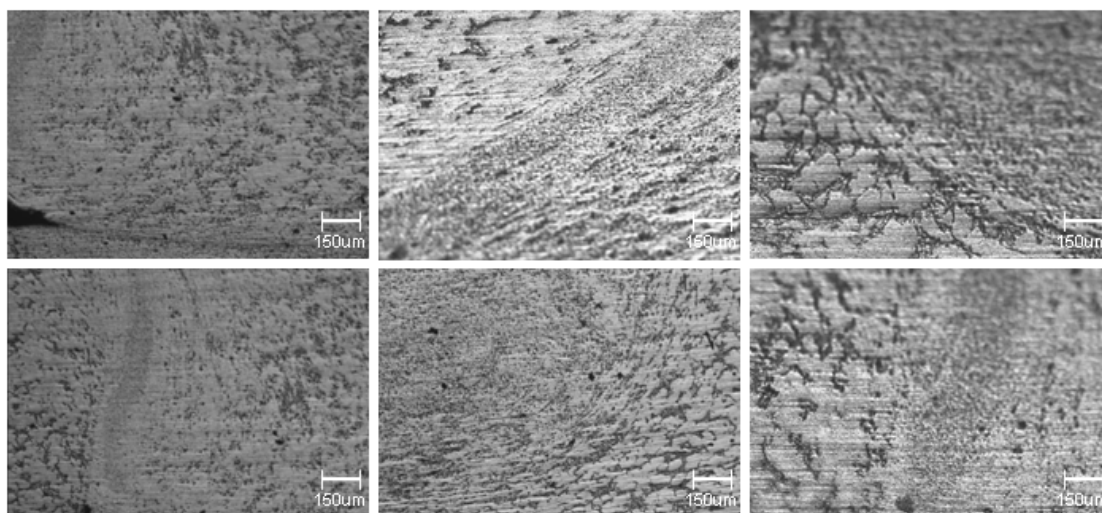


ภาคผนวก ข 9 ภาพถ่าย X-Ray การตรวจสอบข้อบกพร่องชิ้นทดสอบ Base metal Semi Solid
A356

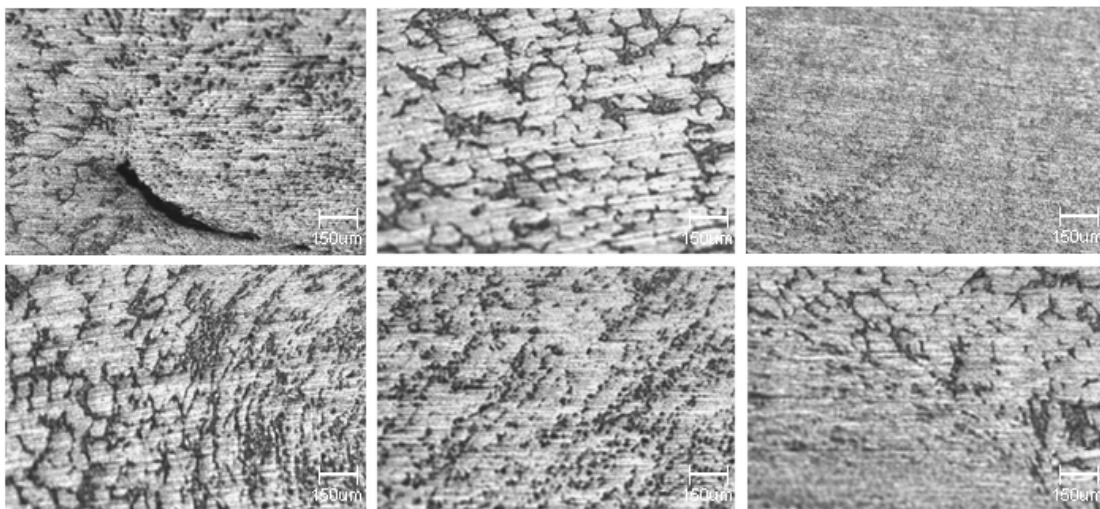
ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบงานเชื่อม FSW



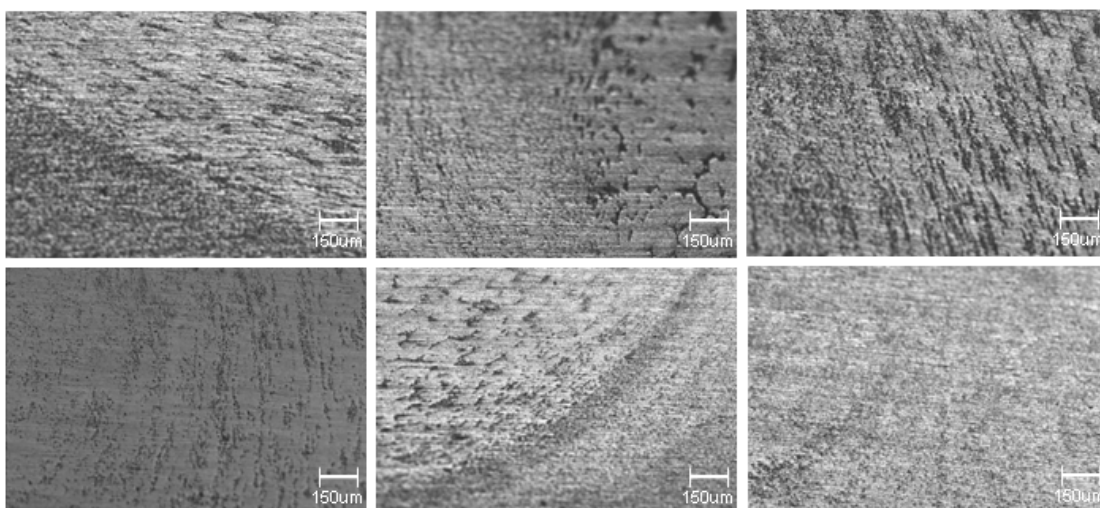
ภาคผนวก ข10 ภาพ โครงสร้างงานเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min



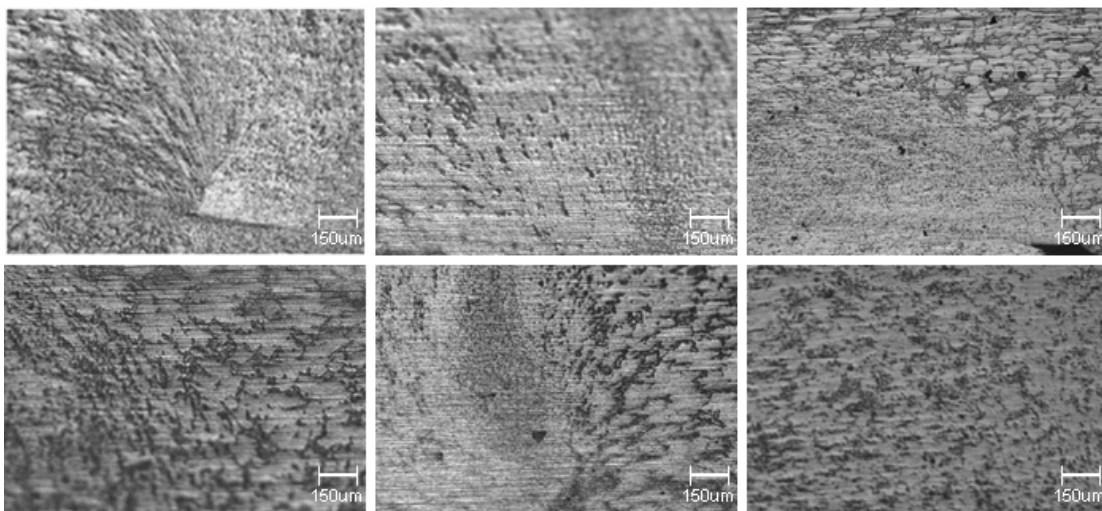
ภาคผนวก ข 11 ภาพ โครงสร้างงานเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min



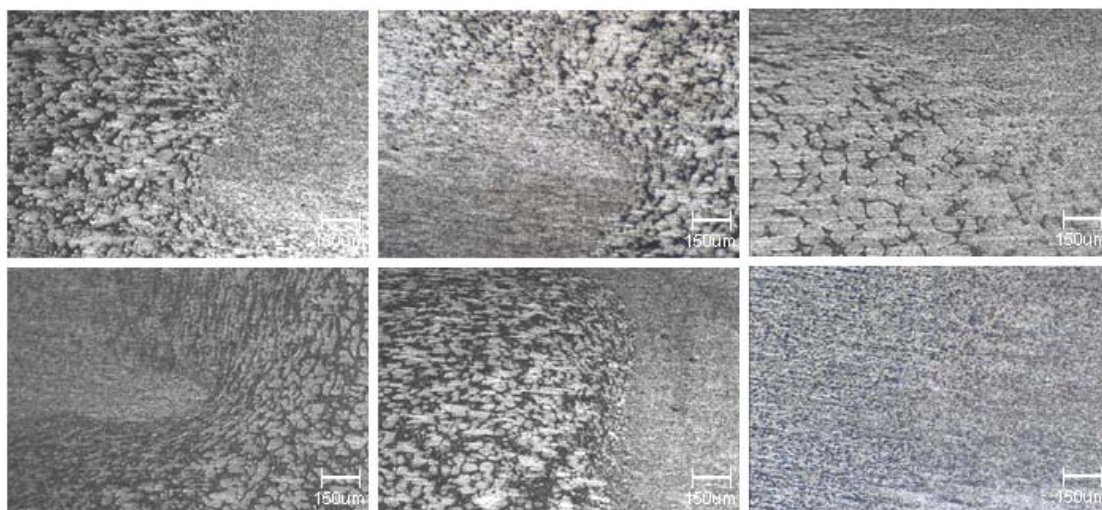
ภาคผนวก ข 13 ภาพโครงสร้างงานเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,320 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min



ภาคผนวก ข 14 ภาพโครงสร้างงานเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 80 mm/min



ภาคผนวก ข 15 ภาพโครงสร้างงานเชื่อมด้วยการเลี้ยวแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 120 mm/min



ภาคผนวก ข 16 ภาพโครงสร้างงานเชื่อมด้วยการเลี้ยวแบบกวนที่ความเร็วรอบ 1,750 rpm
ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 160 mm/min

ภาคผนวก ค

ข้อมูลจากการทดลอง

ตารางภาคผนวก ค 1 ค่าความแข็งแรงของ Base metal อะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356

Batch	Strength Ua	Strength Ub	Strength Uc	Average Ud
1	167.74	169.73	168.57	168.68
2	170.07	172.04	171.17	171.09
3	169.55	170.93	169.73	170.07
4	170.05	172.03	171.06	171.05
5	168.72	169.54	168.86	169.04
6	171.06	171.84	171.68	172.09
7	169.64	171.09	170.57	170.43
8	167.98	169.45	168.81	168.75

หมายเหตุ

1. อะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ส่วนผสม 0.32% แมกนีเซียม 7.74% ซิลิกอน เกรด A356 ผ่านการหล่อแบบ Rheocasting Forcing ที่ Pressure ≥ 2000 psi
2. ขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (E8)
3. อัตราความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s หรือ 1.002 mm/ min จำนวน 24 ชิ้น

ตารางภาคผนวก ค 2 ค่าความแข็งแรงของชั้นทดสอบอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356

		Welding Speed (mm/ min)					
		80		120		160	
Rotation (RPM)	1,320	162.83	162.40	163.60	164.01	165.38	166.68
		160.19		164.64		167.34	
		164.60		163.79		167.33	
	1,750	172.64	171.22	168.76	171.89	171.56	173.55
		168.38		173.33		174.34	
		172.63		173.57		174.74	

หมายเหตุ

4. อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ส่วนผสม 0.32% แมกนีเซียม 7.74% ซิลิกอน เกรด A356 ผ่านการหล่อแบบ Rheocasting Forcing ที่ Pressure ≥ 2000 psi
5. ชั้นทดสอบงานเชื่อม FSW ตามมาตรฐาน ASTM (E8)
6. อัตราความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s หรือ 1.002 mm/ min จำนวน 18 ชั้น

ตารางภาคผนวก ค 3 ค่าความแข็งแรงของ Base metal อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ด้วย
X-bar และ R-chart

Batch	บน	กลาง	ล่าง	ค่าเฉลี่ย	UCL- \bar{x} - \bar{r}	X- \bar{D} bar	LCL- \bar{x} - \bar{r}	\bar{R}	UCL- \bar{x} - \bar{r}	R-bar	LCL- \bar{x} - \bar{r}
1	167.74	169.73	168.57	168.680	171.594	170.080	168.566	1.990	3.810	1.480	0.000
2	170.07	172.04	171.17	171.093	171.594	170.080	168.566	1.970	3.810	1.480	0.000
3	169.55	170.93	169.73	170.070	171.594	170.080	168.566	1.380	3.810	1.480	0.000
4	170.05	172.03	171.06	171.047	171.594	170.080	168.566	1.980	3.810	1.480	0.000
5	168.72	169.54	168.86	169.040	171.594	170.080	168.566	0.820	3.810	1.480	0.000
6	171.06	171.84	171.68	171.527	171.594	170.080	168.566	0.780	3.810	1.480	0.000
7	169.64	171.09	170.57	170.433	171.594	170.080	168.566	1.450	3.810	1.480	0.000
8	167.98	169.45	168.81	168.747	171.594	170.080	168.566	1.470	3.810	1.480	0.000

หมายเหตุ

7. อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ส่วนผสม 0.32% แมกนีเซียม 7.74% ซิลิคอน เกรด A356 ผ่านการหล่อแบบ Rheocasting Forcing ที่ Pressure ≥ 2000 psi
8. ขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (E8)
9. อัตราความเร็วในการดึง 1.67×10^{-2} mm/s หรือ 1.002 mm/ min จำนวน 24 ชิ้น

ตารางภาคผนวก ค 4 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ด้วยไมโครวิกเกอร์

ระยะ	ค่าความแข็ง(HV)	ค่าความแข็ง(HV)	Average
-4.8	39.4	38.1	38.75
-4.2	41.4	40.3	40.85
-3.6	40.8	41	40.90
-3	43.4	40.2	41.80
-2.4	42.6	43.1	42.85
-1.8	43.9	42.3	43.10
-1.2	44.2	44	44.10
-0.6	43.2	42.8	43.00
0	44.2	43.3	43.75
0.6	43.6	45.5	44.55
1.2	45.9	43.5	44.70
1.8	47.8	47.7	47.57
2.4	45.5	46.9	46.20
3	46.2	45.2	45.70
3.6	39.3	40.1	39.70
4.2	41.6	42.2	41.90
4.8	38.9	41.3	40.10

หมายเหตุ

1. การวัด hardness HV, 100 kgf, 10 s
2. parameter 1,320 rpm, 80 mm/min

ตารางภาคผนวก ค 5 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ด้วยไมโครวิกเกอร์

ระยะ	ค่าความแข็ง(HV)	ค่าความแข็ง(HV)	Average
-4.8	39.2	37.6	38.40
-4.2	40.2	38.8	39.50
-3.6	40.1	41.3	40.70
-3	43.2	42.1	42.65
-2.4	41.9	38.3	40.10
-1.8	40.8	39.5	40.15
-1.2	40.1	42.2	41.51
-0.6	44.3	45.3	44.80
0	43.3	44.1	43.70
0.6	41.6	42.2	41.90
1.2	45.0	44.4	44.70
1.8	43.1	42.4	42.75
2.4	41.3	44.1	42.70
3	42.4	41.2	41.80
3.6	40.1	40.8	40.45
4.2	39.8	41.1	40.45
4.8	38.4	39.8	39.10

หมายเหตุ

1. การวัด hardness HV, 100 kgf, 10 s
2. parameter 1,320 rpm, 120 mm/min

ตารางภาคผนวก ค 6 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ด้วยไมโครวิกเกอร์

ระยะ	ค่าความแข็ง(HV)	ค่าความแข็ง(HV)	Average
-4.8	34.9	35.5	35.20
-4.2	36.7	36.8	36.75
-3.6	37.7	37.3	37.50
-3	38.4	37.9	38.15
-2.4	37.6	38.2	37.90
-1.8	36	39.3	37.65
-1.2	37.4	37.5	37.45
-0.6	38.2	38.4	38.30
0	37.8	39.5	38.65
0.6	39.6	40.1	39.85
1.2	43.6	41.4	42.50
1.8	38.9	39.3	39.10
2.4	38.7	38.5	38.60
3	37.9	38.4	38.15
3.6	35.3	36.7	36.00
4.2	36.8	38.2	37.50
4.8	35.4	36.7	36.05

หมายเหตุ

1. การวัด hardness HV, 100 kgf, 10 s
2. parameter 1,320 rpm, 160 mm/min

ตารางภาคผนวก ค 7 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ด้วยไมโครวิกเกอร์

ระยะ	ค่าความแข็ง(HV)	ค่าความแข็ง(HV)	Average
-4.8	39.5	38.4	38.95
-4.2	36.5	37.8	37.15
-3.6	37.6	38.2	37.90
-3	42.2	41.3	41.75
-2.4	43.2	45.1	44.15
-1.8	44.3	42.3	43.30
-1.2	42.5	40.2	41.35
-0.6	45.3	43.8	44.55
0	40.7	41.4	41.05
0.6	42.1	40.4	41.25
1.2	40.5	43.3	41.90
1.8	41.8	42.1	41.95
2.4	42.3	41.3	41.80
3	39.2	38.6	38.90
3.6	37.4	36.5	36.95
4.2	37.7	37.4	37.55
4.8	38.8	37.9	38.35

หมายเหตุ

1. การวัด hardness HV, 100 kgf, 10 s
2. parameter 1,750 rpm, 80 mm/min

ตารางภาคผนวก ค 8 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ด้วยไมโครวิกเกอร์

ระยะ	ค่าความแข็ง(HV)	ค่าความแข็ง(HV)	Average
-4.8	37.2	37.8	37.50
-4.2	38.4	39.5	38.95
-3.6	38.3	39.4	38.85
-3	41.6	40.2	40.90
-2.4	39.1	38.3	38.70
-1.8	43.8	42.5	43.15
-1.2	41.3	40.1	40.70
-0.6	39.6	38.2	38.90
0	43.1	42.3	42.70
0.6	41.1	40.1	40.60
1.2	40.8	41.4	41.10
1.8	38.7	38.5	38.60
2.4	38.7	39.2	38.95
3	40.1	40.5	40.30
3.6	40.8	42.2	41.50
4.2	39.6	38.5	39.05
4.8	37.3	36.6	36.95

หมายเหตุ

1. การวัด hardness HV, 100 kgf, 10 s
2. parameter 1,750 rpm, 120 mm/min

ตารางภาคผนวก ก 9 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง A356 ด้วยไมโครวิกเกอร์

ระยะ	ค่าความแข็ง(HV)	ค่าความแข็ง(HV)	Average
-4.8	39.3	38.6	38.95
-4.2	38.8	37.7	38.25
-3.6	37.6	38.3	37.95
-3	38.5	39.6	39.05
-2.4	40.1	40.4	40.25
-1.8	41.4	42.1	41.75
-1.2	40.3	41.2	40.75
-0.6	41	43	42.00
0	40.1	40.5	40.30
0.6	39.4	40.3	39.85
1.2	42.5	41.2	41.85
1.8	40.2	39.9	40.05
2.4	43.7	42.5	43.10
3	38.4	40.6	39.50
3.6	42.5	40	41.25
4.2	37.6	38.6	38.10
4.8	39.2	37.7	38.45

หมายเหตุ

1. การวัด hardness HV, 100 kgf, 10 s
2. parameter 1,750 rpm, 160 mm/min

ตารางภาคผนวก ค 10 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ด้วยไมโครวิกเกอร์

ระยะ	Hardness (HV)	Hardness (HV)	Hardness (HV)	Hardness (HV)	Hardness (HV)	Hardness (HV)
-4.8	38.75	38.40	35.20	35.20	38.95	38.95
-4.2	40.85	39.50	36.75	36.75	37.15	38.25
-3.6	40.90	40.70	37.50	37.50	37.90	37.95
-3	41.80	42.65	38.15	38.15	41.75	39.05
-2.4	42.85	40.10	37.90	37.90	44.15	40.25
-1.8	43.10	40.15	37.65	37.65	43.30	41.75
-1.2	44.10	41.51	37.45	37.45	41.35	40.75
-0.6	43.00	44.80	38.30	38.30	44.55	42.00
0	43.75	43.70	38.65	38.65	41.05	40.30
0.6	44.55	41.90	39.85	39.85	41.25	39.85
1.2	44.70	44.70	42.50	42.50	41.90	41.85
1.8	47.57	42.75	39.10	39.10	41.95	40.05
2.4	46.20	42.70	38.60	38.60	41.80	43.10
3	45.70	41.80	38.15	38.15	38.90	39.50
3.6	39.70	40.45	36.00	36.00	36.95	41.25
4.2	41.90	40.45	37.50	37.50	37.55	38.10
4.8	40.10	39.10	36.05	36.05	38.35	38.45

หมายเหตุ

1. การวัด hardness HV, 100 kgf, 10 s
2. Rotation 1,320, 1750 rpm, Welding Speed 80, 120, 160 mm/min

ตารางภาคผนวก ค 11 ค่าแรงกดของเครื่องมือ (Tool) อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356

วินาที	1,320, 80	1,320,120	1,320,160	1,750, 80	1,750,120	1,750,160
0	0	0	0	0	0	0
	118	116	117	118	116	117
	221	223	221	221	223	221
	289	288	286	289	288	286
10	279	277	278	279	277	278
	310	308	312	310	308	312
	260	262	264	257	255	253
	229	230	232	229	228	227
	221	222	223	221	222	223
20	219	218	217	219	218	217
	217	217	219	218	217	218
	216	216	218	217	219	219
	218	218	219	216	217	217
	217	217	218	217	218	218
30	216	216	219	218	217	219
	289	298	332	289	308	359
	258	269	278	267	279	289
	241	248	258	257	259	268
	223	232	243	240	247	253
40	221	229	241	229	238	247
	220	228	240	227	237	252
	221	227	242	226	239	251
	220	228	244	228	240	253
	223	227	243	229	241	256
50	224	229	247	231	239	258
	225	232	249	227	237	257
	223	233	251	225	235	253
	221	229	247	223	233	252
	220	227	245	222	232	253
60	221	226	243	223	231	250

หมายเหตุ

3. การวัดแรงกดของเครื่องมือ Kg.
4. Rotation 1,320, 1750 rpm, Welding Speed 80, 120, 160 mm/min

ตารางภาคผนวก ค 12 ค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง A356

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Rotation RPM	Welding Speed	Stress,U	FITS1	RES11
10	1	1	1	1750	80	168.38	171.157	-2.77667
12	2	1	1	1750	160	174.34	173.547	0.79333
13	3	1	1	1320	80	164.60	162.390	2.21000
1	4	1	1	1320	80	162.38	162.390	-0.01000
7	5	1	1	1320	80	160.19	162.390	-2.20000
6	6	1	1	1750	160	171.56	173.547	-1.98667
18	7	1	1	1750	160	174.74	173.547	1.19333
9	8	1	1	1320	160	167.34	166.683	0.65667
15	9	1	1	1320	160	167.33	166.683	0.64667
3	10	1	1	1320	160	165.38	166.683	-1.30333
17	11	1	1	1750	120	173.57	171.887	1.68333
14	12	1	1	1320	120	163.79	164.010	-0.22000
11	13	1	1	1750	120	173.33	171.887	1.44333
16	14	1	1	1750	80	172.63	171.157	1.47333
8	15	1	1	1320	120	164.64	164.010	0.63000
2	16	1	1	1320	120	163.60	164.010	-0.41000
5	17	1	1	1750	120	168.76	171.887	-3.12667
4	18	1	1	1750	80	172.46	171.157	1.30333

หมายเหตุ

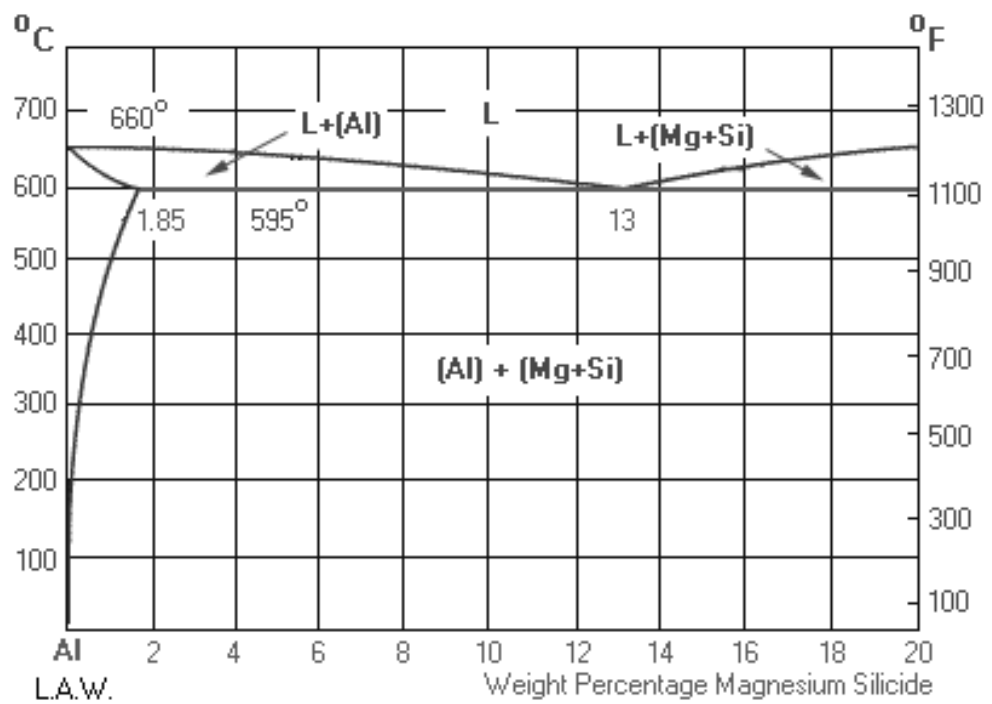
1. ค่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง A356 ผ่านการเชื่อมด้วยการเสียดทาน
2. Rotation 1,320, 1750 rpm, Welding Speed 80, 120, 160 mm/min

ภาคผนวก ง

Phase Diagram

Phase Diagram ง 1 อะลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียมหล่อผสม (Aluminium - Silicon Magnesium Casting Alloys)

แผนภาพสมดุล (Phase Diagram)



แผนภาพสมดุลของธาตุอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิไซด์

(Aluminum - Magnesium - Silicide Phase Diagram)