

การประเมินตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง
เกรด 6063 จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ชัยยุทธ มิ่งาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



EVALUATION OF PARAMETERS AFFECTING THE WELD QUALITY OF
SEMI-SOLID METAL 6063 ALUMINUM ALLOY
USING FRICTION STIR WELDING

CHAIYOOT MEENGAM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
MAJOR IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2021
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติมา ศิลปะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง นอกจากนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้และให้โอกาสเข้ารับการศึกษ ณ สถาบันแห่งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สมบุญ โอตรวรรณ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่กรุณาอนุเคราะห์สนับสนุนโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์เอลิเมนต์และกรุณาให้คำแนะนำ ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ความรู้เชิงวิชาการและทักษะการปฏิบัติอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่า มาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กสิณ รังสิกรรพุม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเชาว์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี ที่กรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและหวังเป็นอย่างยิ่งว่า รายงานวิจัยฉบับนี้จะประโยชน์แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจทุกท่านในการนำข้อมูลต่าง ๆ ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในทางปฏิบัติและงานวิชาการต่อไป

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตลอดจนอาจารย์เพื่อนร่วมงานในมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และยังมีผู้เกี่ยวข้องทุกท่านซึ่งไม่อาจกล่าวนามของท่านในที่นี้ได้ ผู้วิจัยขอขอบคุณท่านทั้งหลายไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ชัยยุทธ มิ่งาม

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การประเมินตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6063 จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ผู้วิจัย : ชัยยุทธ มิ่งาม

ชื่อปริญญา : ปรัชญาคุณภิวัฒน์

สาขาวิชา : วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติมา ศิลปะ

คำสำคัญ : การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6063 การออกแบบการทดลอง, โครงสร้างก้อนกลม

งานวิจัยนี้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม ตัวแปรในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนเชื่อมที่ 1110, 1320, 1750 และ 2200 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงของเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก แบบทรงสามเหลี่ยม แบบทรงสี่เหลี่ยม แบบทรงห้าเหลี่ยม ตามลำดับ ชิ้นงานเชื่อมเตรียมรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ขนาด 75x150x6 ลูกบาศก์มิลลิเมตร จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีความสมบูรณ์ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามพบว่าชิ้นงานในทุกการทดลองมีการเชื่อมประสานเข้ากันได้ดี ผลการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดมีค่า 123.59 MPa ประสิทธิภาพรอยต่อ 82.95 เปอร์เซ็นต์ จากความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ในทางตรงกันข้ามความเร็วรอบในการหมุนกวน 1100 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที ของเครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยม ให้ค่าแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด มีค่าที่ 47.93 MPa ประสิทธิภาพรอยต่อ 32.17 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการประเมินความแข็งชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งสูงสุดที่ช่วง 42 ถึง 55 HV บริเวณอิทธิพลกระทันหันมีค่าความแข็งต่ำสุดช่วง 29 ถึง 34 HV ในขณะที่ผลจากการวิเคราะห์ความร้อนด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์พบว่าบริเวณรอยเชื่อม (ใต้ปากเครื่องมือกวน) เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 530 องศาเซลเซียส การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าอนุภาคของสารละลายของแข็งเดิมของ Al_5FeSi มีขนาด 79–114 ไมโครเมตร แต่เกิดการแตกหักจากความร้อนและแรงกระทำทางกล ทำให้ขนาดลดลงที่ 8–13 ไมโครเมตร มีลักษณะเกรนละเอียด สุดท้ายจากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินระดับความเชื่อมั่นในการทดลองของงานวิจัยนี้ พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 95.09 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

TITLE : EVALUATION OF PARAMETERS AFFECTING THE WELD QUALITY OF SEMI-SOLID METAL 6063 ALUMINUM ALLOY USING FRICTION STIR WELDING
AUTHOR : CHAIYOOT MEENGAM
DEGREE : DOCTOR OF PHILOSOPHY
MAJOR : INDUSTRIAL ENGINEERING
ADVISOR : ASST. PROF. KITTIMA SILLAPASA, Ph.D.
KEYWORDS : FRICTION STIR WELDING, SSM 6063 ALUMINUM ALLOY, EXPERIMENTAL DESIGN, GLOBULAR MICROSTRUCTURE

The research aims to study friction stir welding (FSW) of Semi-Solid Metal 6063 aluminum alloy that affects weld quality. The parameters in the experiment were rotation speed at 1110, 1320, 1750, and 2200 rpm; welding speed at 30, 60, 90, and 120 mm/min; and the pin tool geometry shape of the cylinder, triangle, square, and pentagon respectively. The welding rectangular samples of 75x150x6 mm³ were prepared. The results showed that the physical characteristics of the samples after FSW were different. However, the samples from all experiments were well bonded. The maximum of average tensile strength was 123.59 MPa, with 82.95 percent joint efficiency, 1320 rpm rotational speed, and 60 mm/min welding speed. On the other hand, the triangle tool had the minimum of average tensile strength of 47.93 MPa with 1100 rotational speed, 120 mm/min welding speed, and 32.17 percent joint efficiency. For evaluation of the hardness after FSW, the SZ had the maximum hardness at the range of 42 to 55 HV, and the TMAZ had the lowest hardness at the range of 29 to 34 HV. The results of the thermal analysis by finite element method showed that at the area of the SZ (Under the shoulder tool) was the maximum temperature change at about 530°C. The microstructural examination revealed that the base particles of the solid solution with the size of Al₅FeSi 79–114 μm were fractured by thermal and mechanical forces, reducing the size to 8–13 μm and becoming fine grain. Finally, the statical analysis of the tensile strength had the significance level (α) of 0.05 and the coefficient of determination (R^2) of 95.09 percent.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 กรอบแนวคิดของการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	5
1.6 แผนการดำเนินงาน	6
1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	46
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	47
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์	48
3.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน	52
3.5 การกำหนดตัวแปรและการออกแบบการทดลอง	59
3.6 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน	62
3.7 การทดสอบชิ้นงานหลังการเชื่อม	64
3.8 การวิเคราะห์ชิ้นงานเชื่อมด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานหลังการเชื่อม	71
4.2 ผลการทดสอบแรงดึง	78
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ	81
4.4 ผลการทดสอบแรงดัดโค้ง	90
4.5 ผลการทดสอบความแข็ง	92
4.6 ผลการทดสอบความล้า	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 ผลการประเมินด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์	97
4.8 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	108
5.2 ข้อเสนอแนะ	109
เอกสารอ้างอิง	110
ภาคผนวก	
ก ผลการทดสอบแรงดึง	121
ข ผลการทดสอบแรงดัดโค้ง	126
ประวัติผู้วิจัย	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานวิจัย 6
2.1	สัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียม 14
2.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง 30
2.3	ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม 38
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 47
3.2	การกำหนดค่าตัวแปรในการเชื่อม 61
3.3	การออกแบบการทดลองแบบสุ่มของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 61
4.1	ค่า ANOVA ของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวนจากการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน 85
4.2	การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสมของค่าแรงดึง 87
4.3	ผลการทดสอบการดัดโค้งชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 91
4.4	ผลค่าความเค้นกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน 96
4.5	ผลการจำลองอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 99

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	เบรกรถยนต์ที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปด้วยอะลูมิเนียม เกรด 6063	8
2.1	หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW)	8
2.2	การเชื่อมเสียดทานแบบกวน	9
2.3	ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม	10
2.4	เกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain)	11
2.5	ภาพการแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ ทำให้มีอนุภาคหรือเกรน เพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ	12
2.6	เส้นทางการเติบโต (Growth) และการ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง	12
2.7	กรรมวิธีผลิตโลหะกิ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ GISS	13
2.8	การเสียหายเนื่องจากการล้า	16
2.9	ตำแหน่งของทั้งการขยายตัวรอยแตกจากการล้าภายใต้ความเค้นตามแนวแกนทั้ง 3 ขั้นตอน	16
2.10	รอบความล้าแบบวัฏจักร	17
2.11	S-N Curves ของโลหะกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก	18
2.12	การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	18
2.13	ทดสอบการรับแรงของคานโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	19
2.14	การวิเคราะห์ใบพัดเรือโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	19
2.15	เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก	20
2.16	เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุ	21
2.17	แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์	23
2.18	ชิ้นงานทดสอบการดัดโค้ง	24
2.19	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการดัดโค้ง	25
2.20	วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบ Pressing bending	26
2.21	ชิ้นงานทดสอบการดัดโค้งแบบแผ่น	26
2.22	ลักษณะของหัวพินในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	31
2.23	ลักษณะของ Tool pin แบบต่าง ๆ	32
2.24.	การกระจายตัวของความร้อนบนชิ้นงานด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	36
3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	46
3.2	อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6063	47
3.3	เครื่องเลื่อยสายพาน	48
3.4	เครื่องกัดแนวตั้ง	48
3.5	เครื่องกลึง	49
3.6	เครื่องตัดไวคัท	49
3.7	เครื่องทดสอบแรงดึง	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.8	เครื่องทดสอบแรงดึง	50
3.9	เครื่องทดสอบความแข็ง	51
3.10	เครื่องขัดชิ้นงานทางโลหะวิทยา	51
3.11	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	52
3.12	กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	52
3.13	แท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063	53
3.14	แท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063 ใส่ในเป่าของเตาหลอมแบบไฟฟ้า	53
3.15	น้ำโลหะอยู่ในสถานะกึ่งของแข็ง	54
3.16	การกำจัดสิ่งปนเปื้อน	54
3.17	การหาอุณหภูมิ Slurry	55
3.18	การปล่อยฟองแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราฟไฟต์	55
3.19	การเทน้ำโลหะกึ่งของแข็งไปในแบบแม่พิมพ์	56
3.20	อัดด้วยความดันประมาณ 350 บาร์	56
3.21	การหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์	57
3.22	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน	57
3.23	ชิ้นงานสำหรับเชื่อมเสียดทานแบบกวน	58
3.24	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม	58
3.25	ลักษณะของเครื่องมือกวนที่ใช้ในการเชื่อม	59
3.26	การปรับมุมเอียงของเครื่องมือเชื่อม	62
3.27	ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	63
3.28	ลักษณะการตัดแบ่งชิ้นทดสอบตำแหน่งต่าง ๆ	64
3.29	ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8-04 mm	65
3.30	การทดสอบแรงดึง	65
3.31	ชิ้นงานทดสอบแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM E190-14	65
3.32	การทดสอบแรงดัดโค้ง	66
3.33	ตำแหน่งการกดทดสอบความแข็ง	66
3.34	การทดสอบความแข็งบริเวณรอยเชื่อม	67
3.35	ชิ้นงานทดสอบความล้าตามมาตรฐาน ASTM E466-15	67
3.36	การทดสอบความล้า	67
3.37	ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	68
3.38	การเลือกรูปแบบรอยต่อชนแนวเชื่อมจากโปรแกรม Hypermesh 2019	69
3.39	กำหนดข้อมูลชิ้นงานและเครื่องมือกวนในโปรแกรม Hypermesh 2019	69
3.40	แบบจำลองระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.1	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก	72
4.2	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม	74
4.3	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม	75
4.4	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม	77
4.5	กราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก	78
4.6	กราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม	79
4.7	กราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม	80
4.8	กราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม	81
4.9	การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง	84
4.10	การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนค่าแรงดึง	85
4.11	ความสัมพันธ์ของแรงดึงกับความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวน	88
4.12	อันตรกิริยาระหว่างค่าแรงดึงกับความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวน	90
4.13	ลักษณะชิ้นงานหลังการทดสอบการตัดโค้ง	91
4.14	กราฟค่าความแข็งแรงเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก	92
4.15	กราฟค่าความแข็งแรงเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม	93
4.16	กราฟค่าความแข็งแรงเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม	94
4.17	กราฟค่าความแข็งแรงเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม	95
4.18	กราฟแสดงผลความล้มเหลวแบบดึง-กด ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063	97
4.19	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์	98
4.20	แบบจำลองความร้อนที่ได้จากการประเมินด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์	100
4.21	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเครื่องมือกวนรูปทรงที่แตกต่างกัน	102
4.22	โครงสร้างจุลภาคของความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที และเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก	103
4.23	ประเภทของข้อบกพร่องอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 หลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสถานะที่แตกต่างกัน	104
4.24	โครงสร้างจุลภาคในบริเวณรอยเชื่อมโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.25	แบบจำลองปริมาณของธาตุบริเวณรอยเชื่อมด้วยเอ็กซเรย์สเป็คโตรมิเตอร์ของ ความเร็วรอบในการหมุนแกน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตร ต่อนาที จากเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลายปีที่ผ่านมาทั่วโลกมีปริมาณการใช้อะลูมิเนียมในงานเชิงวิศวกรรมที่สูงขึ้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบา (Light weight) มีความแข็งแรงที่ดี (Good mechanical properties) มีความสามารถทางด้านการต้านทานการกัดกร่อนสูง (Resistant corrosion) นำความร้อนที่ดีเยี่ยม (Excellent heat conductivity) และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย (Formability) [1] โดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์ที่นำอะลูมิเนียมมาผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ เพราะสัดส่วนน้ำหนักต่อความแข็งแรงที่ดี ส่งผลให้ชิ้นส่วนรถยนต์มีน้ำหนักที่เบา นำไปสู่การประหยัดพลังงาน [2] นอกจากนั้นอุตสาหกรรมการบิน อุตสาหกรรมการต่อเรือและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ ก็นำอะลูมิเนียมมาใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมเหล่านี้ยังมีสมบัติทางกลที่น้อยกว่าโลหะกลุ่มเหล็ก กระบวนการปรับปรุงสมบัติทางกลเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุจึงมีความจำเป็น กระบวนการหล่อโลหะในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid Metal) ก็เป็นอีกวิธีที่นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาวิจัย เช่น การหล่อกึ่งของแข็งแบบหมุนวน (Rheocasting) [3-4] การหล่อกึ่งของแข็งแบบอิโซโทรปิก (Thixocasting) [5-6] การหล่อกึ่งของแข็งแบบการสั่น (Vibration casting) [7] แต่เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน คือ กระบวนการหล่อกึ่งของแข็งโดยการพ่นฟองแก๊สในน้ำโลหะ (Gas Induced Semi-Solid; GISS) ที่ถูกพัฒนาด้วยกลุ่มนักวิจัยประเทศไทย [8] กระบวนการสร้างโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิคการพ่นฟองแก๊สในน้ำโลหะจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราไฟต์ ซึ่งแท่งกราไฟต์จะมีรูพรุนขนาดเล็ก ส่งผลให้แก๊สไนโตรเจนเคลื่อนที่ผ่านน้ำโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งของแข็ง ส่งผลให้โครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite structure) เกิดการแตกหักและเติบโตโครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Spheroidal grain) [9-10] การหล่อกึ่งของแข็งด้วยเทคนิคการปล่อยแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราไฟต์ นอกจากทำให้สมบัติของอะลูมิเนียมดี (Excellent mechanical performance) ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตของอุตสาหกรรมได้อีกด้วย (Reduce production costs) เพราะใช้อุณหภูมิในการหล่อที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุ ทำให้แม่พิมพ์ (Mold) มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น สามารถหล่อชิ้นงานที่รูปร่างซับซ้อนได้ดี (Excellent complex parts) และลดจุดบกพร่องหลังจากการหล่อได้ (Reduce defects) [11] อะลูมิเนียม เกรด 6063 ก็เป็นอะลูมิเนียมอีกเกรดที่ผ่านการหล่อกึ่งของแข็งด้วยเทคนิคการปล่อยแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราไฟต์ เพราะถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนประตูรถยนต์ (Door outer) และล้อแม็ก (Alloy Wheels) นอกจากนั้นยังผลิตชิ้นส่วนอื่น ๆ ได้แก่ ดรัมเบรก (Drum brake) ตัวเครื่องไอโฟน 5 (Body housing iPhone 5) ขาปั่นรถจักรยาน (Crank arm) เนื่องจากอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6063 มีสมบัติที่ดี เหมาะกับการผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ และยังสามารถทำแอนโอดซ์ได้ดี (Anodizing) อย่างไรก็ตามกระบวนการหล่อชิ้นงานถือได้ว่าเป็นกระบวนการต้นน้ำของอุตสาหกรรม การนำชิ้นงานไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ (Product) ก็มีความสำคัญอย่างยิ่ง การยึดติดชิ้นงานเข้าด้วยกันจะอาศัยการเชื่อม (Welding) เพราะการเชื่อมเป็น

การยึดติดชิ้นงานที่คงทนแข็งแรงสูง วิธีการเชื่อมที่มาประยุกต์ในการเชื่อมวัสดุที่ขึ้นรูปมาจากกระบวนการหล่อกิ่งของแข็งจึงมีความสำคัญยิ่งในการวิจัย เพื่อให้มีความเหมาะสมกับอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 นำไปสู่สมบัติที่ดีหลังการเชื่อม สำหรับการเชื่อมในสถานะของเหลว (Liquid State Welding) มีความเสี่ยงที่จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จากโครงสร้างแบบก้อนกลมไปเป็นโครงสร้างแบบเดนไดรต์ เพราะในขณะเชื่อมอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้บริเวณรอยเชื่อมมีสถานะเป็นของเหลว ทำให้โครงสร้างภายในของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 เกิดการเรียงตัวใหม่หลังจากการเย็นตัว ส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบเดนไดรต์ ซึ่งจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างจากโครงสร้างแบบก้อนกลมเดิม [12] นอกจากนี้การเชื่อมในสถานะของเหลวยังทำให้เสี่ยงต่อการเกิดจุดบกพร่อง (Defect) เช่น การเกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) การบิดงอของชิ้นงาน (Distortion) การแตกร้าวของรอยเชื่อมในขณะร้อน (Hot crack) การเกิดโพรงอากาศ (Porosity) การเกิดการฝังตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 Slag inclusion) เป็นต้น [13] ส่งผลให้สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหลังจากการเชื่อมลดลง



ภาพที่ 1.1 เบรกรถยนต์ที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปด้วยอะลูมิเนียม เกรด 6063 [15]

การเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) จึงมีความน่าสนใจสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 เพราะอุณหภูมิในขณะเชื่อมไม่สูงเกิดจุดหลอมเหลวของวัสดุ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในหลังจากการเชื่อม ปัจจุบันการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่ได้รับความนิยมในการเชื่อมในหลาย ๆ อุตสาหกรรม [16] การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกระบวนการเชื่อมที่ยึดโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่เชื่อม โลหะจะเชื่อมติดกันด้วยกลไกจากการกวนเนื้อวัสดุให้ไหลวนเข้าด้วยกันด้วยเครื่องมือกวน (Tool) ที่ประกอบด้วยบ่า (Shoulder) ของเครื่องมือกวนจะสร้างความร้อนจากการเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวของบ่า [17] จนเกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานของผิวสัมผัสถูกแผ่ไปยังชิ้นงานให้เกิดการอ่อนตัว ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นช่วง 50-80 เปอร์เซ็นต์ของจุดหลอมเหลววัสดุที่เชื่อม [18] ส่งผลให้ชิ้นงานอ่อนตัว (Softening) หัวพิน (Pin) ที่อยู่ส่วนปลายของเครื่องมือกวนจะทำหน้าที่ลากเนื้อชิ้นงานเข้าด้วยกัน [19] โดยพฤติกรรมของการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) จะเกิดขึ้นบริเวณรอยกวน

แรงกระทำทางกลจากการหมุนและความร้อนจากการสัมผัสของผิวชิ้นงาน ส่งผลให้โครงสร้างของรอยเชื่อมและบริเวณที่ได้รับผลกระทบร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง [20] ซึ่งจำเป็นต้องมีการออกแบบเครื่องมือกวนด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่าการวัสดุเชื่อม เพื่อไม่ให้เกิดการสึกหรอ (Wear) ของเครื่องมือในขณะเชื่อม [21] การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีตัวแปรในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation speed) ความเร็วเดินเชื่อม (Travel speed) มุมเอียง (Tilt angle) [22] แรงกด (Axial force) เวลาในการกดแช่ (Dwell time) [23] ระยะกดลึก (Plug of depth) ความเร็วในการกดลึก (Plug rate) รูปร่างของเครื่องมือกวน (Tool pin geometry) [24] ทิศทางของการหมุน (Rotation direction) ลักษณะรอยต่อชน (Type of joint) ความราบเรียบของผิวชิ้นงาน (Surface roughness) และความสะอาดของผิวชิ้นงาน (Surface cleaning) [25] ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลและสมบัติทางโลหะวิทยาหลังจากการเชื่อม ดังนั้นการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จึงมีความน่าสนใจยิ่ง ทั้งผลของสมบัติทางกลและสมบัติทางโลหะวิทยาที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ยังมีความน่าสนใจในกระบวนการเชื่อมเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ชิ้นงานหลังการเชื่อมบิดตัวน้อย (Low distortion of samples) ลดการแตกร้าว (Absence of cracking) ชิ้นงานจากการเชื่อมตกแต่งผิวสำเร็จน้อย (Finished weld is aesthetical) ไม่ต้องใช้ลวดเชื่อมเติม (Non filler rod) ใช้พลังงานเชื่อมน้อย (Low energy) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Friendly Environment) [26]

จากข้อมูลและเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยจะศึกษาตัวแปรของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 เป็นวัสดุสำหรับนำมาใช้ในการทดลองวิจัยนี้ ซึ่งขึ้นรูปด้วยการหล่อกิ่งของแข็งด้วยเทคนิคการปล่อยแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราฟไฟต์ การเชื่อมเสียดทานแบบกำหนดตัวแปรคงที่ (Constant parameter) คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที) ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที) มุมเอียง (องศา) แรงกด (นิวตัน) เวลาในการกดแช่ (วินาที) ระยะกดลึก (มิลลิเมตร) รูปร่างของเครื่องมือกวน และลักษณะรอยต่อชน ชิ้นงานหลังการเชื่อมนำไปทดสอบความต้านทานแรงดึง ความแข็ง การดัดโค้ง ความล้าตามลำดับ และบริเวณรอยเชื่อมหรือบริเวณที่ได้รับผลจากความร้อนในขณะเชื่อมจะนำไปตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) และกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) นอกจากนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาแบบจำลองความร้อนในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการทดสอบและผลการตรวจสอบที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง (Analysis) และประเมินผลการทดลอง (Evaluation) ด้วยความรู้ทางวิศวกรรม โดยจะให้ความสนใจตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม (Weld quality) ผลจากการประเมินจะสรุปและนำเสนอในรายงานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความต้านทานแรงดึง การทดสอบความแข็งแรง การทดสอบการดัดโค้งของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมความล้าของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.2.5 เพื่อศึกษาความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม จุดบกพร่องของรอยเชื่อม โครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม เกรด 6063 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อกิ่งของแข็ง โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1.3.1 ขอบเขตด้านวัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ผ่านการขึ้นรูปด้วยการปล่อยแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราฟไฟต์พูน ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 14 ลิตรต่อนาที (แรงดัน 5.6 บาร์) เป็นเวลา 10 วินาที ที่อุณหภูมิหล่อกิ่งของแข็ง 650 องศาเซลเซียส จากนั้นอัดขึ้นรูปขึ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 150x150x20 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (กว้างxยาวxสูง) ด้วยแรงดันกดอัดที่ 350 บาร์ ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะกิ่งของแข็ง

1.3.2 ขอบเขตด้านตัวแปร

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน กำหนดตัวแปรจากการทดลองเบื้องต้น (Preliminary experiment) เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมและประกอบกับการวิเคราะห์ความสามารถของเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับการตั้งค่าความเร็วรอบในการเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อมและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จนนำไปสู่การกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อม ได้แก่ ความเร็วหมุนเชื่อมช่วง 1110 ถึง 2220 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 30 ถึง 120 มิลลิเมตรต่อนาที มุมเอียง 5 องศา แรงกด 5 ถึง 20 นิวตัน เวลาในการกดแช่ 30 วินาที และระยะกดลึก 0.6 มิลลิเมตรจากปากกวน และรูปร่างของเครื่องมือกวน 4 แบบ ได้แก่ รูปทรงกระบอก รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงห้าเหลี่ยม ตามลำดับ การเชื่อมเสียดทานแบบกวนประยุกต์ใช้เครื่องกัดกิ่งอัตโนมัติเป็นเครื่องเชื่อมในการทดลอง ผลการทดลองที่ได้ถูกนำมาประเมินผลด้วยโปรแกรม Minitab R17 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorials เนื่องจากการทดลองนี้ต้องมีการวิเคราะห์หลายตัวแปร จึงได้ออกแบบการทดลองนี้ นำไปสู่วิเคราะห์ความเชื่อมั่นและพยากรณ์สมการถดถอยอย่างแม่นยำ นอกจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะเชื่อมจะถูกวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Hyper Mesh เพื่อประเมินอุณหภูมิและการกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะเชื่อม

1.3.3 ขอบเขตด้านการทดสอบสมบัติทางกลและโลหะวิทยา

หลังการเชื่อมจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) โครงสร้างจุลภาค (Microstructure) จุดบกพร่องหลังการเชื่อม (Defect) บริเวณรอยเชื่อม บริเวณได้รับอิทธิพลกระทบทางความร้อน และบริเวณเนื้อโลหะเดิม เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างก่อนกลึงของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขึ้นงานจากการทดลองบางส่วนนำไปทดสอบความต้านทานแรงดึง ความแข็ง การตัดโค้ง ความล้า ตามมาตรฐานการทดสอบงานเชื่อม ผลจากการทดลองที่ได้ถูกวิเคราะห์และประเมินผล จากนั้นนำไปจัดทำรูปเล่มรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ต่อไป

1.4 กรอบแนวคิดของการวิจัย

ศึกษาทดลองเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6063 แล้วทดสอบสมบัติทางกล ผลของตัวแปรกับสมบัติทางกลจะนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Minitab R17 ที่ส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมสำหรับเพื่อเป็นแนวทางในการพยากรณ์ความแข็งแรงของรอยเชื่อมให้กับอุตสาหกรรมยานยนต์ที่จะนำอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ รวมถึงการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Hyper Mesh เพื่อหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่เชื่อมเสียดทานแบบกวน ผลของความร้อนที่วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกแสดงเป็นสมการทางความร้อนต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ทราบถึงความเป็นไปได้และตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพรอยเชื่อมของการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 หลังจากกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.5.2 ทราบผลสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางความล้า สมบัติทางโลหะวิทยา ในระดับมหภาค (Macrostructure) และระดับจุลภาค (Microstructure) ของการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 หลังจากกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งผลสมบัติของวัสดุสามารถนำไปพยากรณ์ ก่อนนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้

1.5.3 องค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องบิน ที่ใช้งานวัสดุนี้ หรืออุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ใช้วัสดุกลุ่มอะลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักในการผลิตได้

1.5.4 องค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปเผยแพร่ด้วยการนำเสนอบทความวิชาการ หรือตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติได้

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2562		ปีการศึกษา 2563		ปีการศึกษา 2564	
	1/2562	2/2562	1/2563	2/2563	1/2564	2/2564
1. ทบทวนวรรณกรรมและศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องตลอดจน รวบรวมข้อมูลที่เป็น						
2. จัดเตรียมเครื่องมือ และ อุปกรณ์สำหรับการวิจัยและการ ออกแบบการทดลอง						
3. ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียม หล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 ด้วย กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบ กวน						
4. ทดสอบสมบัติทางกล สมบัติ ทางความร้อน สมบัติทางความล้า สมบัติทางโลหะวิทยา						
5. วิเคราะห์และประเมินผลการ ทดลอง ความเชื่อมั่นจากการ ทดลองและสรุปผลการทดลอง						
6. เขียนบทความวิชาการเพื่อ เผยแพร่ตีพิมพ์						
7. จัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์						

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.7.1 Friction Stir Welding หมายถึง การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นกระบวนการเชื่อมที่ยึดโลหะเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะที่เชื่อม โลหะจะเชื่อมติดกันด้วยกลไกจากการกวนเนื้อวัสดุให้ไหลวนเข้าด้วยกันด้วยเครื่องมือกวน

1.7.2 Finite Element หมายถึง วิธีการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ เขียนเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อใช้คำนวณ แก้ปัญหาทางวิศวกรรม เช่น คำนวณหาความแข็งแรง ของวัสดุหรือชิ้นส่วนเครื่องกล ศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน ในชิ้นส่วนเครื่องกล รูปแบบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นเสียง ฯลฯ

1.7.3 Fatigue หมายถึง ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการรับภาระแรงซ้ำ ๆ หรือแรงที่ไม่คงที่ โดยที่ภาระแรงนั้นยังไม่ได้ทำให้ชิ้นงานเสียหาย เมื่อรับเพียงครั้งเดียวอาการของความล้าก็คือลักษณะการแตกพังที่บริเวณใด ๆ ของชิ้นงาน การแตกพังดังกล่าวมักเป็นผลมาจากการรับความเค้นที่สูงมากจากการรับแรงหรืออาจจะเป็นจุดที่รับความเค้นมาก่อนหน้าที่จะรับแรงก็ได้

1.7.4 Scanning Electron Microscopy หมายถึง เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่องนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลึกด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้

1.7.5 Optical Microscopy หมายถึง เป็นกล้องจุลทรรศน์ใช้เลนส์หลายอันและมีกำลังขยายต่าง ๆ กัน ภาพวัตถุได้โดยมีการสะท้อนแสงจากวัตถุเข้าสู่เลนส์ 2 ชุด คือ เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) และเลนส์ใกล้ตา (Ocular lens หรือ Eyepiece) กำลังขยายของภาพ คือ ผลคูณของกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุกับกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพของกล้องจุลทรรศน์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเลนส์และแสงต้นกำเนิดการหากล้องจุลทรรศน์

1.7.6 Semi-Solid Metal หมายถึง วิธีการหล่อโลหะในสภาวะกึ่งของแข็ง โดยมีบางส่วนของวัสดุอยู่ในสถานะของเหลว บางส่วนอยู่ในสถานะของแข็ง ซึ่งการผลิตโลหะกึ่งของแข็งจะทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุเป็นก้อนกลม

1.7.7 Solid State Welding หมายถึง การเชื่อมชิ้นงานในสภาวะของแข็ง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมยังไม่เกินจุดหลอมเหลวของเนื้อวัสดุเชื่อม ส่งผลให้เนื้อวัสดุบางส่วนยังเป็นของแข็ง การยึดติดของชิ้นงานจากแรงภายนอกกระทำ

1.7.8 Liquid State Welding หมายถึง การเชื่อมชิ้นงานในสภาวะของเหลว เป็นการเชื่อมที่ชิ้นงานหลอมละลายติดกันที่อุณหภูมิในขณะเชื่อมสูงกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุ ทำให้เนื้อวัสดุเชื่อมประสานติดกันที่อุณหภูมิสูง

บทที่ 2

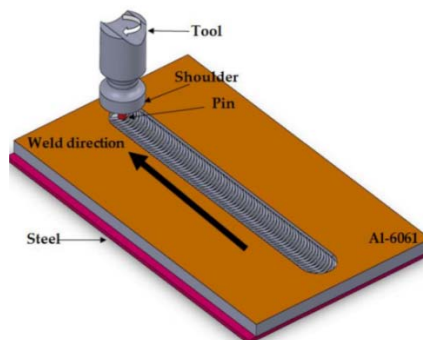
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จะศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ตัวแปรในการทดลองที่แตกต่างกันจะส่งผลที่แตกต่างกันของสมบัติทางกลและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding)

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมโลหะในสถานะของแข็ง โดยที่โลหะจะยึดติดกันที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะนั้น โดยที่โลหะยังอยู่ในสถานะกิ่งของแข็ง โลหะบางประเภทจะต้องมีการหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อที่อุณหภูมิของการหลอมละลาย เนื่องจากที่อุณหภูมิหลอมละลายเมื่อโลหะแข็งตัว จะเกิดโครงสร้างขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างเริ่มต้นของโลหะนั้น จากเหตุผลข้างต้นจึงได้มีการคิดค้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่สถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The welding institute) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจัดเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็งซึ่งโลหะจะเชื่อมติดกันโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน โดยที่ป้อนแผ่นงานและหมุนด้วยความเร็วรอบตามที่กำหนดพร้อมกับความเร็วในการเชื่อม และแรงกดในขณะที่เชื่อม การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมดังนี้ คือ ความเร็วรอบในการหมุนของหัวพิน (rpm) อัตราความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (Welding speed) แรงกด (Down force) มุมเอียงของหัวเชื่อม (Tilt angle) และนอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่น ๆ เช่น ขนาดและรูปแบบของหัวพิน ดังแสดงภาพที่ 2.1

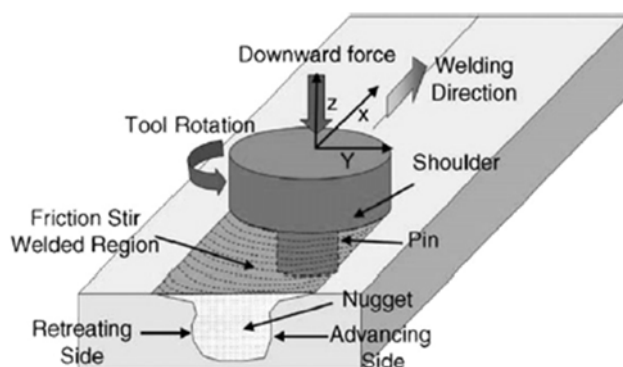


ภาพที่ 2.1 หลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) [27]

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนในอะลูมิเนียมผสมมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น สามารถหลีกเลี่ยงการแตกในระหว่างแข็งตัวของเหลวไปเป็นของแข็ง และลดปัญหาการเกิดโพรงอากาศ (Porosity) โดยเฉพาะกับอะลูมิเนียมผสมที่หล่อโดยวิธีไดคาสต์

เนื่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง นอกจากนี้โลหะบางประเภท จะไม่สามารถเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงเหมาะสมเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะมีความเค้นตกค้าง (Residual stress) และการบิดงอ (Distortion) น้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย ความเค้นตกค้างที่น้อยกว่าเป็นผลมาจากความร้อนเข้าจากการเสียดทานแบบกวนมีค่าน้อยกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย การเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม 1xxx 2xxx 5xxx 6xxx และ 7xxx ตามลำดับ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน Elangovan [28] กล่าวว่าเครื่องมือถูกออกแบบเป็นพิเศษ โดยบ่าของเครื่องมือหมุนสัมผัสแผ่นงานที่ทำการเชื่อม ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานทำให้ชิ้นงาน อยู่ในสภาวะกึ่งของแข็ง เป็นเทคนิคการเชื่อมที่ทำให้อนุภาคอะลูมิเนียมผสมที่ได้ ถูกกวนจนแตกหัก เป็นอนุภาคที่ละเอียดในบริเวณที่ถูกกวน โดยมีพารามิเตอร์ในการเชื่อมประกอบด้วยความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม แรงกดและมุมเอียงของเครื่องมือ ในการเชื่อมเครื่องมือหมุนในทิศทางตาม เข็มนาฬิกา ในการออกแบบเครื่องมือเส้นผ่าศูนย์กลางของบ่า $\varnothing$ 20 มิลลิเมตร ตัวกวนขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง $\varnothing$ 5 มิลลิเมตร ความยาว 3.2 มิลลิเมตร ความยาวของตัวกวน จะมีค่าน้อยกว่าความ หนาของแผ่นงาน ในการเชื่อมชิ้นงานจะถูกยึดด้วยอุปกรณ์จับยึด มุมของเครื่องมือเอียง 3 องศา จากแนวตั้งและหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทิศทางและการเคลื่อนที่ ของเครื่องมือ [29] เมื่อบ่าสัมผัสแผ่นงาน เกิดการเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนและเนื้อโลหะอยู่ใน สภาวะอ่อนตัว การไหลวนของโลหะกึ่งของแข็งรอบตัวกวน ขณะที่เครื่องมือหมุนด้วยความเร็วรอบ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการเชื่อม ทำให้เนื้อโลหะประสานติดกันด้วยการกวน ปัจจัย กระบวนการและผลของการเชื่อมด้วยการเสียดทานแบบกวน Santella [30] กล่าวว่า ปัจจัยนำเข้า ประกอบด้วยความเร็วรอบของ Tool และความเร็วในการเชื่อม กระบวนการ อุณหภูมิและแรงกดของ Tool แรงปัดและแรงในแนวแกน F_x และ F_y แรงกดใน F_z ในการเชื่อมแบบต่อเนื่องแรงกดใน F_z ลดลง ภายใต้กระบวนการเชื่อมที่ถูกควบคุมในทิศทางการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และจุดรวมของ แรงทั้งสามแกน ผลที่ได้ สมบัติทางกล คือความแข็งแรง ความแข็งของรอยเชื่อม บริเวณอิทธิพลความร้อน และเนื้อเชื่อม โครงสร้างทางโลหะวิทยาด้าน Advancing Side และ Retreating Side ดังแสดงภาพที่ 2.2



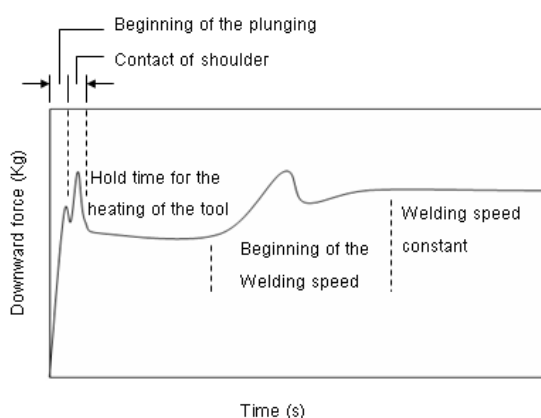
ภาพที่ 2.2 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน [31]

ความร้อนจากการเสียดทานทางกลและข้อบกพร่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจากความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อม และแรงกดก่อให้เกิดความร้อนและข้อบกพร่องในงานเชื่อม [29] ผลจากความร้อนที่มากเกินไปและจากความผิดปกติของการกวนที่ความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อมสูง เป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิบริเวณผิวด้านบนและส่วนที่ถูกกวน เพราะผลของข้อบกพร่อง ทำให้เกิดช่องว่างในรอยเชื่อม อย่างไรก็ตาม ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างความร้อนที่ไม่เพียงพอและความผิดปกติในการกวน ดังนั้น ความแตกต่างของข้อบกพร่อง ขึ้นอยู่กับสถานะของการเสียดทาน มวลของครีบทที่เกิดขึ้นมากเกิดจากความร้อนที่มากเกินไป ช่องว่างที่เกิดขึ้นความร้อนที่ไม่สมดุล จากการกวนที่ผิดปกติ ข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อย แรงกดของเครื่องมือสามารถทำให้ช่องว่างลดลงโดยการเพิ่มแรงกด สมการความร้อนที่เกิดขึ้นกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังนี้

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{\alpha \mu P N R^3}{V} \quad (2.1)$$

- Q คือ ปริมาณความร้อนที่ชิ้นงานได้รับ (J/mm)
 μ คือ สัมประสิทธิ์ของการเสียดทานทางกล
 α คือ ประสิทธิภาพของการส่งถ่ายความร้อน
 P คือ แรงกด (N)
 N คือ ความเร็วรอบ (rpm)
 R คือ รัศมีของบ่า (mm)
 V คือ ความเร็วในการเชื่อม (mm/min)

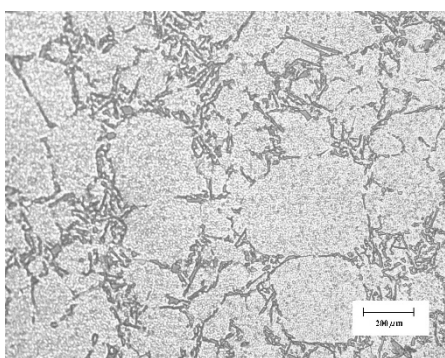
แรงกดที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมสามารถวัดค่าได้ด้วยโพลดเซลล์เพื่อให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน มีแรงเกิดขึ้นสามช่วง ช่วงแรกเป็นการเพิ่มแรงกดในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมจนบ่าสัมผัสแผ่นงาน ช่วงที่สองเป็นการเพิ่มแรงกดขณะทำการเชื่อมก่อนเดินแนวเชื่อม ช่วงที่สามแรงกดจากความเร็วในขณะเดินแนวเชื่อม ดังแสดงภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ค่าแรงกดที่เกิดจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในแต่ละช่วงขณะทำการเชื่อม [32]

2.1.2 การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)

การหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) จากในอดีตที่มีการค้นพบเป็นครั้งแรกในช่วงต้นปี ค.ศ. 1970 โดยที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology: MIT) [33] จนถึงปัจจุบันก็นับเป็นเวลาเกือบ 40 ปีแล้วที่ได้มีการวิจัยและพัฒนาจนมาตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา โดยการหล่อโลหะแบบกึ่งของแข็งนี้เป็นการขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในขณะที่โลหะอยู่ในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy State) ซึ่งโลหะจะมีการแข็งตัวเป็นบางส่วน โดยโลหะส่วนที่แข็งตัวแล้วจะมีโครงสร้างเกรนไม่เป็นเดนไดรต์ (Non-Dendritic Grain) หรือบางทีเรียกว่า เกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain) ดังแสดงภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 เกรนแบบก้อนกลม (Spheroidal หรือ Globular Grain)

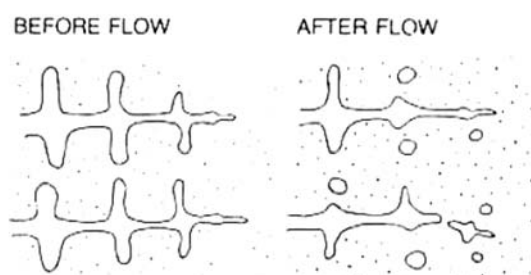
การแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ (Dendrite fragmentation) ทฤษฎีนี้ได้อธิบายว่าการเกิดขึ้นของโครงสร้างโลหะกึ่งของแข็ง เกิดจากการแตกตัวของกิ่งเดนไดรต์ทำให้อนุภาคที่แตกออกมามีปริมาณเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ (Grain multiplication) โดย Flemings and Johnson (2002) [33] ได้เสนอถึงความเป็นไปได้ของสาเหตุที่กิ่งของเดนไดรต์เกิดการแตกตัว โดยแบ่งออกเป็นสามสาเหตุหลัก คือ

2.1.2.1 แขนของเดนไดรต์หักออกจากบริเวณโคน (Roots) เนื่องจากแรงเฉือน (Shear forces) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำโลหะ ซึ่งเป็นการยากที่จะประมาณค่าของแรงที่ทำให้แขนของเดนไดรต์เกิดการหักออก และด้วยข้อจำกัดหลายประการ กล่าวคือ เดนไดรต์เริ่มต้นจะต้องเป็นผลึกที่สมบูรณ์ปราศจากข้อบกพร่อง เช่น ช่องว่าง (Void) หรือดิสโลเคชัน (Dislocation) เป็นต้น ซึ่งหากเดนไดรต์เริ่มต้นมีข้อบกพร่องดังกล่าวจะทำให้ยากแก่การหักออกจึงทำให้ทฤษฎีนี้เกิดข้อโต้แย้งมากมายและไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควร

2.1.2.2 แขนของเดนไดรต์หลอมออกจากบริเวณโคนเนื่องจากกระบวนการ Ripening ทำให้ปริมาณตัวถูกละลาย (Solute) บริเวณโคนมีความเข้มข้นมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้จุดหลอมเหลวบริเวณนั้นลดต่ำลง จึงเป็นสาเหตุให้เกิดแขนของเดนไดรต์ถูกหลอมออกบริเวณโคน และหลุดออกมา

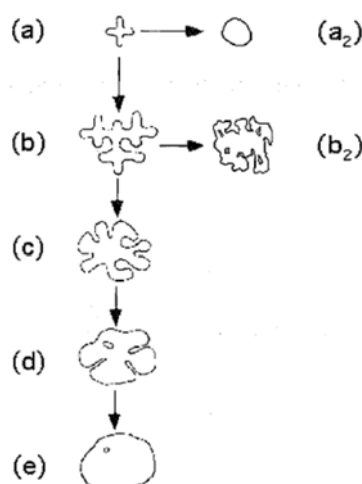
2.2.1.3 อีกกลไกที่น่าสนใจโดย Vogel, Doherty, and Carton (1979) [34] ซึ่งอธิบายเพิ่มเติมโดย Doherty, Lee and Feast (1984) [35] พวกเขาได้นำเสนอกลไกที่แตกต่างออกไป คือ พวกเขาเชื่อว่า แขนของเดนไดรต์จะเกิดการบิด (Bend) และมีการเสียรูปแบบพลาสติกด้วยแรงเค้น (Stress) ซึ่งความเครียดแบบพลาสติก (Plastic strain) ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่

ของดิสโลเคชัน โดยที่อุณหภูมิหลอมเหลว ดิสโลเคชันสามารถปีน (Climb) และรวมกันจนเกิดเป็นขอบเขตของเกรน โดยเมื่อมุมที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า 200 จะทำให้พลังงานตรงขอบของเกรนมีค่ามากกว่าพลังงานบริเวณอินเตอร์เฟซระหว่างของแข็งและของเหลว 2 เท่า ซึ่งจะทำให้ขอบของเกรนเกิดการเปียกด้วยน้ำโลหะ ทำให้แขนหรือกิ่งของเดนไดรต์หลุดออกมา ดังแสดงภาพที่ 2.5



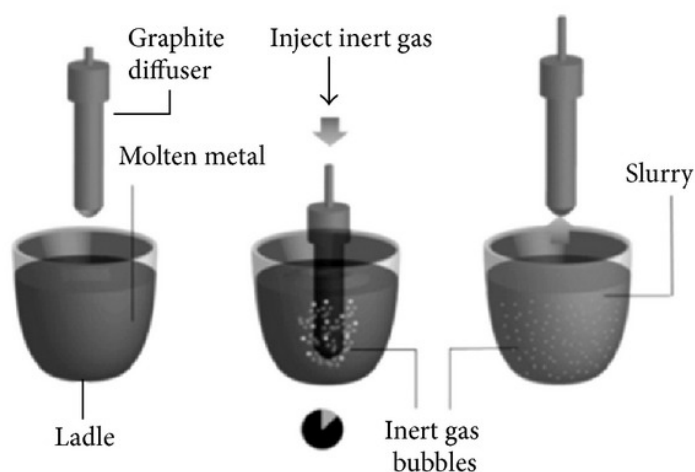
ภาพที่ 2.5 ภาพการแตกตัวของกิ่งหรือแขนของเดนไดรต์ ทำให้มีอนุภาคหรือเกรน เพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ [33]

แม้ว่าในขั้นตอนการเกิดอนุภาคกิ่งของแข็งยังไม่เป็นที่สรุปแน่นอน แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าการสร้างจำนวน “นิวเคลียส” เริ่มต้นที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมาก จะใช้ระยะเวลาในการเกิดเกรนแบบก้อนกลมที่สั้น เพราะการเกิดจะเกิดได้โดยตรงจากเกรนแบบ Equiaxed ซึ่งแสดงตามเส้นทาง (a)-(a₂) ในภาพที่ 2.6 ในทางตรงกันข้ามหากขนาด “นิวเคลียส” เริ่มต้นที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดจากอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่ช้า จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบก้อนกลมที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงตามเส้นทาง (a) ไปยัง (e) โดยเส้นทางนี้จะใช้เวลาในการเกิดที่ยาวนานกว่าและหากจำนวน “นิวเคลียส” ที่เกิดขึ้นมีจำนวนไม่เพียงพอโครงสร้างที่ได้ก็จะเป็นก้อนกลมแม้จะใช้เวลานานก็ตาม ดังแสดงตามเส้นทาง (a) ไปยัง (b₂)



ภาพที่ 2.6 เส้นทางเติบโต (Growth) และการ Coarsening ของอนุภาคของแข็ง [33]

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งด้วยเทคนิคการปล่อยฟองแก๊สผ่านแท่งกราไฟต์ในประเทศไทย โดย รศ.ดร.เจษฎา วรณสินธุ์ และทีมนักวิจัยอีกหลายท่าน กระบวนการนี้จะใช้การพ่นฟองแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน ผ่านแท่งกราไฟต์พ่นในปริมาณที่น้อยมากให้ไหลลงไปในน้ำโลหะเพื่อผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยใช้หลักการเคลื่อนย้ายของน้ำโลหะและการดูดความร้อนเฉพาะจุด ซึ่งวิธีการนี้ฟองแก๊สจะเป็นตัวกลางในการกวนและแท่งกราไฟต์พ่นจะเป็นตัวดูดระบายความร้อน (Wannasin, J. and et al) [8] ดังแสดงภาพที่ 2.7 โดยเรียกกรรมวิธีแบบใหม่นี้ว่ากระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือเรียกสั้น ๆ ว่า กระบวนการ GISS ซึ่งผลจากการวิจัยและพัฒนากระบวนการที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างเกรนแบบกึ่งกลมได้ คุณสมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในแม่พิมพ์และลดการเกิดโพรงหดตัว (Shrinkage) อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์



ภาพที่ 2.7 กรรมวิธีผลิตโลหะกึ่งของแข็งแบบใหม่ด้วยกระบวนการ GISS [8]

2.1.3 อะลูมิเนียม (Aluminium Alloy)

อะลูมิเนียมเป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อยและมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และซีปนาวุธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนักแต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก

สมาคมอะลูมิเนียมแห่งอเมริกา (The Aluminium Association of America) ได้กำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมขึ้น โดยสามารถแยกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ประเภทคือ (1) การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูป (Designation for Wrought Aluminium Alloys) การกำหนดสัญลักษณ์ อะลูมิเนียมผสมขึ้นรูป หรืออะลูมิเนียมผสมรีด โดยใช้ระบบตัวเลข 4 หลัก (2) การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อ (Designation for Cast Aluminium Alloys) ได้กำหนดสัญลักษณ์อะลูมิเนียมผสมหล่อ โดยใช้ระบบตัวเลข 2 หลักหรือ 3 หลัก

ตัวเลขตัวที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุหนึ่งเป็นหลัก เช่น 2XXX เป็นกลุ่มธาตุผสมของอะลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก ซึ่งมีอยู่ 8 กลุ่ม ตัวเลขตัวที่สอง เป็นสัญลักษณ์ใช้สำหรับกำกับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของโลหะ ให้แตกต่างไปจากโลหะผสมเดิม เช่น ตัวเลข 0 แสดงว่า เป็นโลหะผสมดั้งเดิม ส่วนตัวเลข 1-9 แสดงว่า เป็นโลหะที่ผสมเข้าไปเปลี่ยนแปลงจากเดิม ยกตัวอย่างเช่น หมายเลข 2024 ตัวเลขหลักที่สองคือ 0 (4.5%Cu, 1.5%Mg, 0.5%Si และ 0.1%Cr) เมื่อเทียบกับหมายเลข 2218 ตัวเลขหลักที่สองคือ 2 (4.0%Cu, 2.0%Ni, 1.5%Mg และ 0.2%Si) ซึ่งสังเกตได้ว่า หมายเลข 2218 มีนิกเกิล (Ni) ผสมเข้าไป ตัวเลขตัวที่สามและสี่ เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงชนิดย่อย ๆ ของโลหะที่ผสมในกลุ่มเดียวกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ มักจะเป็นส่วนผสมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น หมายเลข 2014 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 14(4.4%Cu, 0.8%Si, 0.8%Mn และ 0.4%Mg) และ หมายเลข 2017 ตัวเลขหลักที่สามและสี่คือ 17(4.0%Cu, 0.8%Si, 0.5%Mn, 0.5%Mg และ 0.1%Cr) ตามตารางที่ 2.1 เฉพาะอะลูมิเนียมในกลุ่ม 1XXX ตัวเลขหลักที่สาม และ หลักที่สี่จะแสดงปริมาณของ อะลูมิเนียมที่เป็นจุดทศนิยม 2 ตำแหน่งที่ปรากฏภายหลัง 99% เช่น หมายเลข 1060 และ หมายเลข 1080 หมายถึง อะลูมิเนียมขึ้นรูป ที่มีอะลูมิเนียม 99.60% และ 99.80% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียม

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.0%
2XXX	ทองแดง
3XXX	แมงกานีส
4XXX	ซิลิกอน
5XXX	แมกนีเซียม
6XXX	แมกนีเซียม กับ ซิลิกอน
7XXX	สังกะสี
8XXX	ธาตุอื่น ๆ
9XXX	ยังไม่มีที่ใช้

อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน (Aluminium - Silicon - Magnesium Alloys) โลหะผสมชนิดนี้เป็นโลหะผสมขึ้นรูปจะจัดอยู่ในกลุ่ม 6XXX และการรวมตัวของโลหะผสมชนิดนี้จะ

เกิดขึ้น โดยแมกนีเซียมและซิลิกอนรวมกันเป็นสารประกอบ เรียกว่า แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) แล้วมารวมตัวกับอะลูมิเนียมเป็นแบบยูเทคติกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส โลหะผสมชนิดนี้ จะสามารถทำการแยกตัวแข็งโดยการวิธีทางความร้อน (Artificial Aging) ได้ โดยแมกนีเซียมซิลิไซด์ จะแยกตัวออกมา ซึ่งมีผลทำให้โลหะนี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังมีความต้านทานกัดกร่อนดีอีกด้วย เหมาะแก่การนำไปใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เรือแคนู และใช้ในงานสถาปัตยกรรม เป็นต้น สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอนชนิดนี้จะมียูต์ด้วยกันหลายชนิด คือ โลหะผสม 6053, 6061 และ 6063 การผสมซิลิกอนด้วยจำนวนพอเหมาะนี้จะสามารถลดปริมาณแมกนีเซียมลงได้ เช่น โลหะผสม 6061 (0.6 Si, 1 Mg) โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม-ซิลิกอนชนิดหลักก็จะมียูต์ด้วยกันหลายชนิด เช่น โลหะผสม 355, 356 และ 360 ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีคุณสมบัติการหล่อตีมีความแข็งแรงสูงและมีความต้านทานการสึกหรอดี ในกรณีที่นำโลหะผสมนี้ไปทำการอบชุบ หรือผ่านกรรมวิธีทางความร้อน จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้นได้ใกล้เคียง กับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง เหมาะแก่การนำไปใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและเครื่องบิน

สำหรับโลหะอะลูมิเนียมผสมทองแดง ถ้าผสมทองแดงในปริมาณที่พอเหมาะจะทำให้เกิดการแยกตัวแข็งดี แต่ถ้าผสมในปริมาณมากก็จะทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลงไป เช่น โลหะผสม 2014, 2025 และ 7075 การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะเหล่านี้ ทำได้โดยใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ประกบเคลือบบนผิว แล้วรีดโดยกระบวนการทางความร้อนให้ติดกับเนื้อโลหะ กรรมวิธีดังกล่าวนี้ เรียกว่า เคลดดิ้ง และโลหะพวกนี้มีชื่อเรียกพิเศษ เรียกว่า แอลเคลด (Alclad) ซึ่งเป็นโลหะที่มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิวดี ส่วนแกนกลางจะเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูง

บริษัทอะลูมิเนียมแห่งอเมริกาเป็นผู้ผลิตโลหะแอลเคลดนี้ขึ้นมาใช้หลายชนิดด้วยกัน เช่น แอลเคลด 2024 เป็นโลหะแผ่นที่ใช้อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ประกบเคลือบผิวและสำหรับแอลเคลด 2014 กับแอลเคลด 7075 ซึ่งเป็นโลหะแผ่นเหมือนกัน แต่ประกบเคลือบผิวด้วยโลหะผสม 6053 (0.1 Cu, 0.6 Si, 0.35 Fe, 1.2 Mg, 0.1 Zn และ 0.25 Cr)

2.1.4 ความล้า (Fatigue)

เป็นรูปแบบการเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุมากที่สุด และน่าสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นรูปแบบการเสียหายที่มีแรงเค้นมากระทำกับวัสดุในค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้มาก โดยจากข้อมูลที่มีการสำรวจ พบว่าการเสียหายด้วยรูปแบบดังกล่าวคิดเป็นประมาณ 90% ของการแตกหักของวัสดุทั้งหมด การล้า (Fatigue) หมายถึง การที่ชิ้นงานรับแรงเข้าไปซ้ำมาหรือเป็นคาบ (Cyclic Load) ส่งผลให้เกิดรอยร้าวขึ้น รอยร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ภายในชิ้นงาน จนในที่สุดชิ้นงานจะเหลือพื้นที่ในการรับแรงเพียงเล็กน้อย และเกิดการแตกหักทันทีทันใดเมื่อได้รับความเค้นเพียงเล็กน้อย ความเสียหายเนื่องจากการล้าจึงเป็นอันตรายมาก ตัวอย่างชิ้นส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมที่เสียหายจากการล้าและ Liberty Ship ที่เสียหายด้วยกลไกการล้า ดังแสดงภาพที่ 2.8

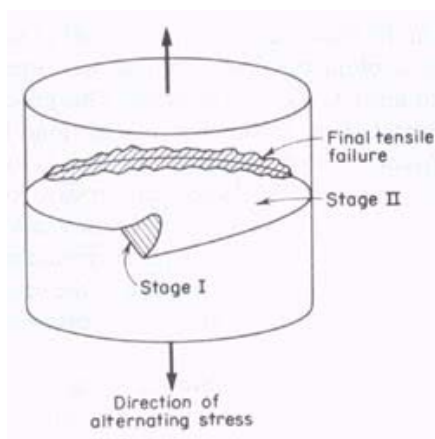
การเสียหายเนื่องจากการล้าเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเกิดการแตกหักออกเป็นสองชิ้นหรือมากกว่า หลังจากรับแรงเค้นแบบคาบ (Cyclic Stress) เป็นระยะเวลาที่ยาวนานต่อเนื่องกัน ค่าความเค้นสูงสุดสำหรับการเสียหายเนื่องจากการล้าจะต่ำกว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุ ถ้าสามารถควบคุมแรงเค้นที่กระทำให้มีค่าต่ำ และอยู่ในระดับที่คงที่ การเสียหาย

ด้วยรูปแบบดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ยากมาก แรงกระทำที่เป็นคาบทำให้เกิดจุดเริ่มและการขยายตัวของรอยแตก และถ้าวัสดุเกิดการแตกร้าวจนไม่สามารถที่จะรองรับแรงได้อีกก็เกิดการแตกหักในที่สุด



ภาพที่ 2.8 การเสียหายเนื่องจากการล้า [36]

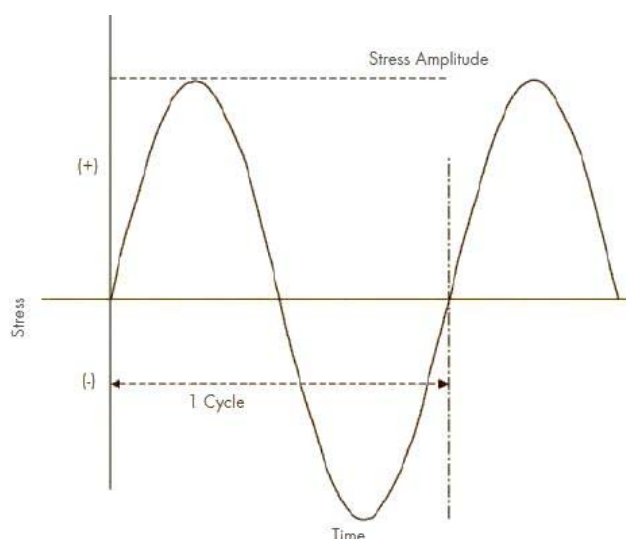
กลไกการเสียหายจากการล้าแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน (ดังแสดงในภาพที่ 2.9) คือ (1) การเริ่มต้นของรอยแตก (Crack Initiation) (2) การขยายตัวของรอยแตก (Crack Propagation) และ (3) การแตกหักของวัสดุ (Material Rupture)



ภาพที่ 2.9 ตำแหน่งของทั้งการขยายตัวรอยแตกจากการล้าภายใต้ความเค้นตามแนวแกนทั้ง 3 ขั้นตอน [36]

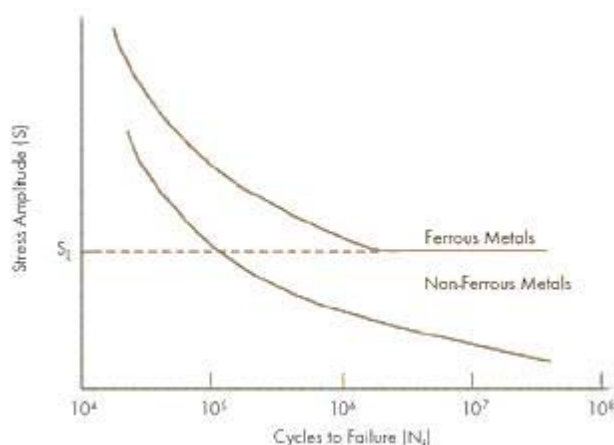
ลักษณะที่เกิดขึ้นคล้ายกับการแตกหักแบบเหนียวและการแตกหักแบบเปราะ คือ รอยแตกจากการล้า จะเริ่มบริเวณที่เป็นจุดบกพร่องของวัสดุ ได้แก่ ร่อง หลุม ความไม่ต่อเนื่องของผิวหน้า รอยบิ่น และจุดบกพร่องอื่น ๆ จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าวัสดุดังกล่าวจะแสดงตัวเป็นจุดรวมความเค้น เมื่อเกิดการสะสมของแรงเค้นจนเกินขีดจำกัดของค่าความแข็งแรง ณ จุดนั้นของวัสดุ และเกิดเป็นรอยร้าวตามมา วิธีที่ดีเพื่อป้องกันการเสียหายจากการล้าตัวคือ ต้องกำจัดจุดที่แสดงตัว

เป็นจุดรวมความเค้น คือพยายามกำจัดหรือลดจุดบกพร่องบนผิวหน้าวัสดุ และลดค่าความกว้างของแรงเค้น (Stress Amplitude) รอยแตกจากการล้าจะขยายตัวไปตามบริเวณที่เป็นจุดอ่อนในวัสดุ ดังนั้นการลดจำนวนจุดบกพร่องภายในเนื้อวัสดุ เช่น ช่องว่างและสารเจือปนจะเพิ่มระยะเวลาการขยายตัวของรอยแตก เมื่อรอยแตกที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุไม่สามารถรองรับแรงที่กระทำต่อไปได้ จึงเกิดการแตกหัก ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากแรงเฉือนและแรงดึงเป็นที่ทราบกันดีว่า การล้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับเวลาแต่จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของแรงที่กระทำ โดยรอบ (Cycle) ประกอบด้วยแรงเค้นที่กระทำจะเพิ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้น (ในบางกรณีมีค่าเป็นศูนย์หรือติดลบ) จนถึงค่าสูงสุดที่เป็นบวก และลดลงผ่านค่าเริ่มต้นจนถึงค่าต่ำสุด (ในบางกรณีจะเป็นค่าของแรงกระทำที่มีค่าติดลบมากที่สุด) และสุดท้ายก็จะกลับมายังค่าเริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 รอบความล้าแบบวัฏจักร [36]

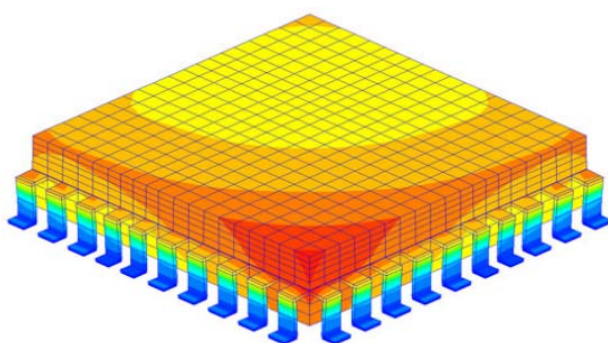
อย่างไรก็ตามแรงกระทำที่มีค่าเป็นลบจะไม่ใช้ค่าเป็นจุดเริ่มของการล้า แต่จะเกิดขึ้นกับค่าแรงเค้นมีค่าเป็นบวก มากไปกว่านั้นความเค้นแบบคาบไม่จำเป็นต้องมีลักษณะที่สมมาตร แต่สามารถเกิดขึ้นได้แบบสุ่ม โดยทั่วไปโลหะกลุ่มเหล็ก หรือโลหะเหล็กผสม เป็นวัสดุที่มีค่าความต้านทานต่อการล้าตัว (Endurance Limit: SL) ซึ่งเป็นค่าระดับความเค้นที่ไม่ทำให้เกิดการเสียหาย จนกว่าจะมีค่าเกินจำนวนรอบที่เหมาะสมกับวัสดุนั้นๆ ในขณะเดียวกัน การเพิ่มค่าความเค้นสูงสุด (Stress Amplitude) สามารถทำให้เกิดการเสียหายด้วยการล้าที่จำนวนรอบต่ำ ๆ ส่วนโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น อะลูมิเนียม และไทเทเนียม จะไม่มีค่าขีดจำกัดของการล้าตัว (Fatigue Limit) ดังแสดงในภาพที่ 2.11 โลหะและโพลิเมอร์จะมีความไวต่อการเสียหายจากการล้าตัว ในขณะที่เซรามิกมีความต้านทานที่ดี การเสียหายด้วยรูปแบบการล้ามีหลายชนิด ได้แก่ การล้าที่รอบสูง การล้าที่รอบต่ำ การล้าเนื่องจากความร้อน การล้าที่ผิว การล้าเนื่องจากการกระแทก การล้าร่วมกับการกัดกร่อน และการล้าเนื่องจากการถูครูด



ภาพที่ 2.11 S-N Curves ของโลหะกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก [36]

2.1.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element)

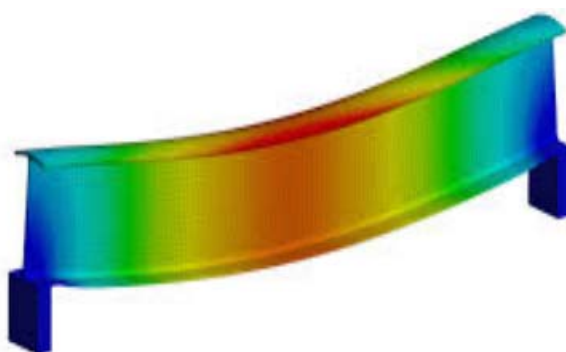
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) และความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักร (Stress - Strain) โครงสร้างเครื่องบิน โครงสร้างอาคาร สะพานและโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาวะยืดตัว (Plastic) นอกจากจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิติศาสตร์ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวล เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.12



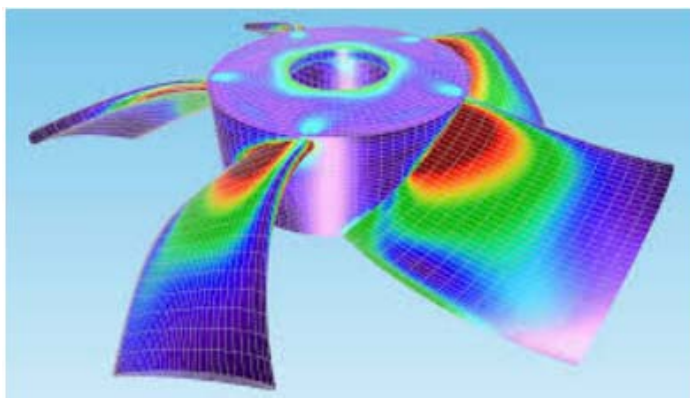
ภาพที่ 2.12 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [37]

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไปไม่ซับซ้อน เราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งของชิ้นส่วนได้ โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่า ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) แต่มีชิ้นส่วน

เครื่องจักรกล หรือโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้ง ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอและบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกันเหล่านี้ เป็นต้น จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็น ส่วนอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 2.13 และดังแสดงในภาพที่ 2.14 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.13 ทดสอบการรับแรงของคานโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [37]



ภาพที่ 2.14 การวิเคราะห์ใบพัดเรือโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ [37]

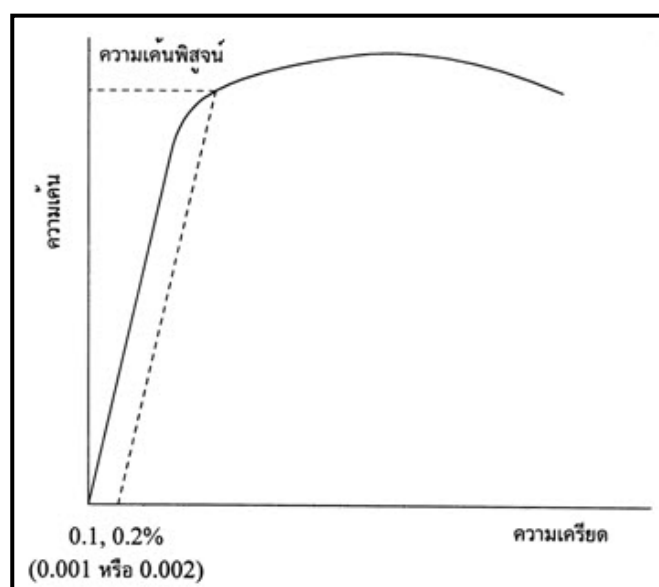
2.1.6 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทำการทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น แล้วนำมาพล็อตเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีความแตกต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ และมาตรฐานของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด พบว่า

เมื่อเราดึงขึ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ขึ้นทดสอบจะค่อย ๆ ยืดออกจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรงตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดเรียกว่าพิกัดสัดส่วน (Proportional limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ขึ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

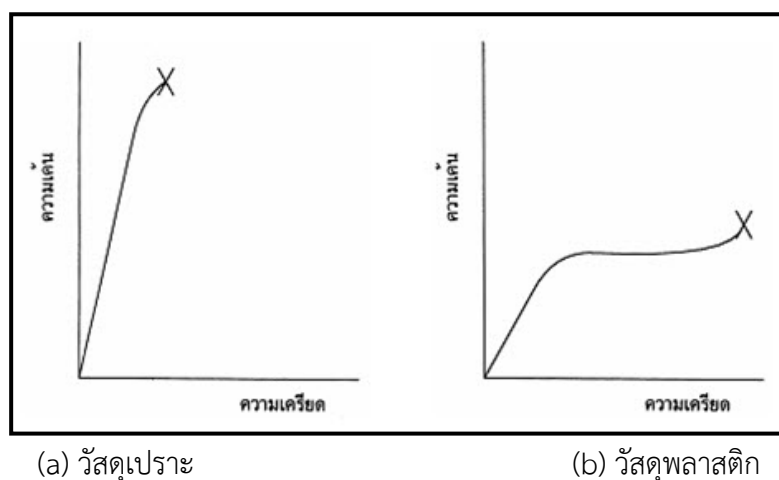
เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่งเรียกว่าพิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent deformation or offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้ จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกนี้เรียกว่าจุดคราก (Yield point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) หรือ Yield strength ค่า Yield strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

วัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนแต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10-0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original gage length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้ง เรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.15 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก [38]

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้อย่างใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วย คำว่า ความแข็งแรงของวัสดุ หรือกำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง ที่จุดสุดท้ายของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุดแตกหักไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังแสดงในภาพที่ 2.17(a) ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดการแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.17(b)



ภาพที่ 2.16 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุ [38]

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

2.1.6.1 ความเหนียว (Ductility) คือ ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัว (Percentage elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of area) โดยที่

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (\%E1)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \quad (2.2)$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด
 L_o = ความยาวของเกจเริ่มต้น

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (\%R.A.)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\% \quad (2.3)$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง
 A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %E1 มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือ ถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%E1 สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ เปราะ (Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยากหรือทำไม่ได้ เป็นต้น

2.1.6.2 Modulus of Elasticity or Stiffness ภายใต้พิภพสัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้ เรียกว่า Modulus of Elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L} \quad (2.4)$$

มีหน่วยเป็น ksi (1 ksi = 1000 psi) หรือ kgf/mm² หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น) ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Aa} \quad (2.5)$$

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถในการคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ

2.1.7 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test)

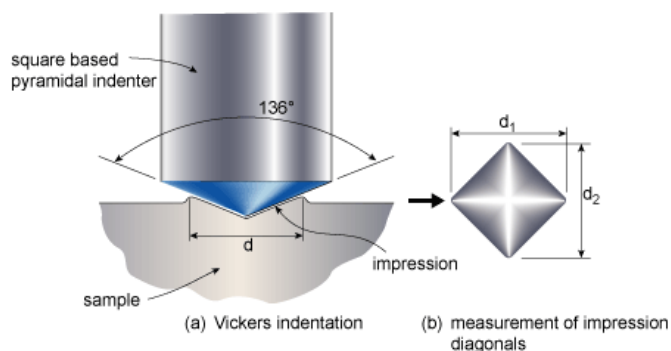
ความแข็งของวัสดุเกี่ยวกับการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกันกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น นั่นคือ พลาสติกและเซรามิกจะแข็งกว่าพวกโพลีเมอร์ การทดสอบความแข็งมีอยู่หลายวิธี แต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

2.1.7.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กิโลกรัม สำหรับวัสดุแข็งและ 500 กิโลกรัม สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา

30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) นำค่าที่ได้ไปคำนวณ จะได้ค่าความแข็งแบบบริเนล (Brinell hardness number) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะสมกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม

2.1.7.2 การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell hardness test) การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่าค่าของแรงที่ใช้และชนิดหรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบร็อคเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าของความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อย คือ 10 กิโลกรัม จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้จะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบร็อคเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากกว่าสามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่องและเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

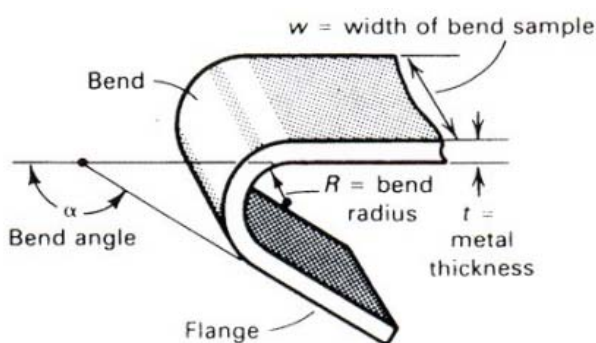
2.1.7.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test) การทดสอบแบบวิกเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่าค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกดแต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ วิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ เนื่องจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ จะเหมาะสำหรับการวัดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของแนวแกน โดยในการวัดความแข็งจะใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา ดังแสดงในภาพที่ 2.17 โดยเวลาที่ใช้ในการกด 10 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว สามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมากค่าความแข็งประมาณ 5 kgf/mm² จนถึงโลหะที่แข็งมาก ๆ ประมาณค่าความแข็งประมาณ 1,500 kgf/mm² โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีค่าระหว่าง 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะ



ภาพที่ 2.17 แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวด้วยเครื่องมือวิกเกอร์ [39]

2.1.8 การทดสอบการดัดโค้ง (Bending Test)

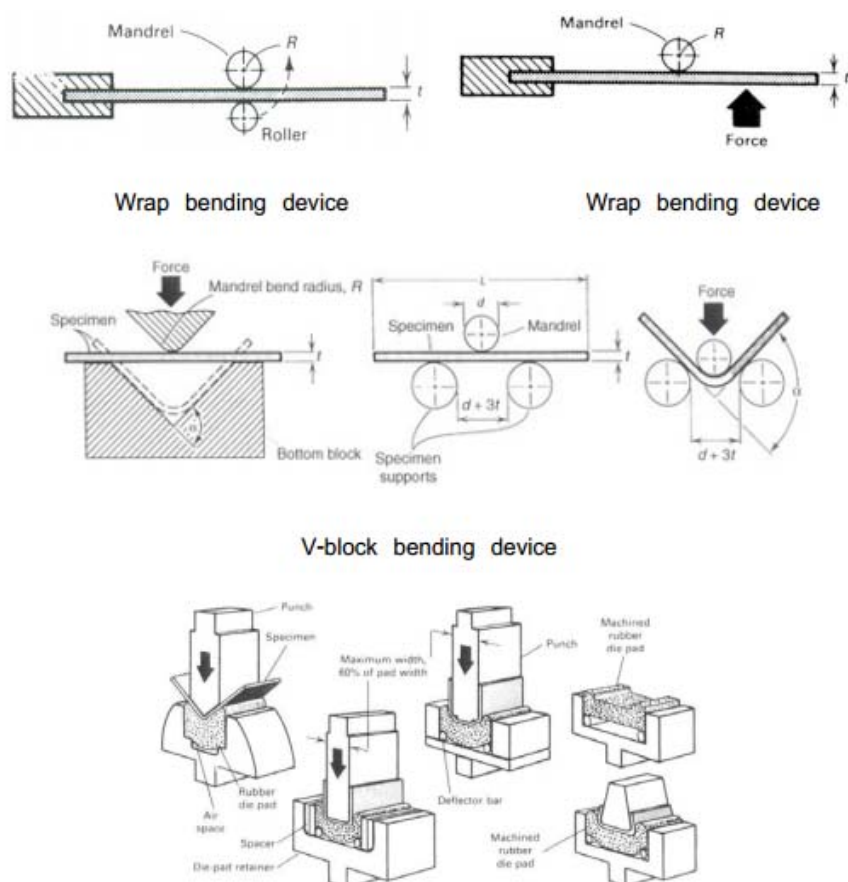
การทดสอบการดัดโค้งเป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการแปรรูปของวัสดุหลังจากทำการดัดโค้ง โดยพิจารณาว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำการดัดโค้งเกิดรอยแตกหรือฉีกขึ้นหรือไม่ หลังจากทำการดัดโค้งชิ้นงานด้วยรัศมีโค้งที่กำหนด จนได้มุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ หลักการในการทดสอบการดัดโค้ง คือ ใช้วิธีใดก็ได้ในการดัดขึ้นวัสดุทดสอบซึ่งอาจมีหน้าตัดเป็นวงกลม สี่เหลี่ยม หรือรูปทรงหลายเหลี่ยม ให้ได้รัศมีความโค้งตามที่กำหนดไว้หรือให้ได้มุมตามที่กำหนด โดยทิศทางของแรงที่ใช้ในการดัดโค้งต้องคงที่และการให้แรงในการดัดโค้งต้องเป็นไปอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นทดสอบในแนวข้าง หลังจากชิ้นทดสอบโค้งงอไปตามที่กำหนดแล้วทำการตรวจสอบดูว่าพื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ดัดโค้ง ซึ่งจะเป็นพื้นที่ที่ได้รับความเค้นแรงดึงในการดัดโค้งมีรอยแตกเกิดขึ้นหรือไม่ จะเห็นได้ว่าหลักการของการดัดโค้งแตกต่างจากการทดสอบสมบัติเชิงกลประเภทอื่น ๆ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ออกมาในเชิงปริมาณ คือ ได้ค่าสมบัติเชิงกลออกมาเป็นตัวเลข เช่น ค่าความแข็ง ค่าความเค้นจุดคราก ในขณะที่ผลจากการทดสอบการดัดโค้งจะเป็นผลเชิงคุณภาพ คือ พิจารณาแค่ชิ้นทดสอบนั้นผ่านเกณฑ์ทดสอบหรือไม่ คือ สามารถผ่านการดัดโค้งตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิวด้านนอกเนื่องจากความเค้นแรงดึงได้หรือไม่ การพิจารณาว่าชิ้นงานผ่านการทดสอบการดัดโค้งนั้นหรือไม่นั้นพิจารณาจากการตรวจสอบดูที่ด้านนอกของชิ้นทดสอบว่าไม่มีรอยแตก การตรวจสอบอาจทำได้โดยการตรวจสอบด้วยตาเปล่าหรืออาจใช้กล้องที่มีกำลังขยายไม่เกิน 20 เท่า (ปกติจะกำหนดให้ใช้ตาเปล่า) สำหรับชิ้นทดสอบที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความหนา มากกว่า 8 มิลลิเมตร ขึ้นไป ถ้าตรวจสอบพบรอยแตกที่ขอบ (Edge) ของชิ้นงานทดสอบทำให้การขัดขอบของชิ้นทดสอบที่แตกล้นเรียบ ให้ทำการทดสอบใหม่อีกครั้ง โดยลักษณะชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ชิ้นงานทดสอบการดัดโค้ง [40]

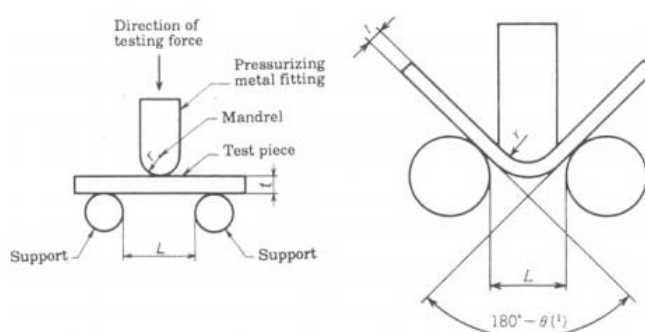
เมื่อทำการดัดโค้งด้วยมุม (Bending angle) ที่เท่ากัน วัสดุที่มีความสามารถในการดัดโค้งที่ดีกว่าจะสามารถทำการดัดโค้งโดยใช้รัศมีการดัดโค้ง (Bending radius) ที่เล็กกว่าได้โดยไม่เกิดรอยแตกขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการดัดโค้งด้วยรัศมีการดัดโค้งที่คงที่ วัสดุที่มีความสามารถในการดัดโค้งที่ดีกว่าจะสามารถทำการดัดโค้งได้ด้วยมุมที่มากกว่าจึงจะเกิดรอยแตกขึ้น รัศมีการดัดโค้งที่ต่ำที่สุด (Minimum bend radius) คือ รัศมีการดัดโค้งน้อยที่สุดที่จะสามารถใช้ในการทำการดัดโค้งได้โดยไม่เกิดการแตกหักที่ผิวของวัสดุ โดยปกติแล้วรัศมีการดัดโค้งที่ต่ำที่สุดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความ

หนาของชิ้นงาน ดังนั้นโดยมากมักจะรายงานค่ารัศมีดัดโค้งที่ต่ำที่สุดโดยการบอกเป็นจำนวนเท่าของความหนาของวัสดุ (t) เช่น วัสดุที่มีค่ารัศมีดัดโค้งที่ต่ำที่สุด $= 3t$ ก็คือวัสดุที่สามารถทำการดัดโค้งด้วยรัศมีการดัดโค้งที่มีค่า 3 เท่าของความหนาได้โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว ค่ารัศมีดัดโค้งที่ต่ำที่สุดไม่ใช่สมบัติที่เป็นค่าคงที่ของวัสดุ เนื่องจากความสามารถของผู้ตรวจสอบบรอยแตกใน การตรวจพบรอยแตกที่เริ่มเกิดขึ้นไม่เท่ากันและการใช้รัศมีในการดัดโค้งที่ไม่ต่อเนื่องและเหมือนกัน เนื่องจากจำกัดอยู่ที่รัศมีของ Mandrel ที่ใช้ในการทดสอบในการเปรียบเทียบความสามารถในดัดโค้งของวัสดุ ข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบกันได้นั้นจะต้องมาจากการทดสอบที่ใช้วิธีการทดสอบแบบเดียวกัน ผู้ตรวจสอบบรอยแตกคนเดียว และใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดเท่ากัน ตลอดจนใช้รัศมีการดัดโค้งและมุมดัดโค้งที่เท่ากันด้วย ข้อมูลจึงสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำการทดสอบการดัดโค้งนั้นไม่ได้มีข้อกำหนดที่ตายตัว เนื่องจากการทดสอบไม่ซับซ้อนยุ่งยากและไม่ต้องการความละเอียดของเครื่องมือมากนัก ขอแค่สามารถทำการดัดโค้งชิ้นงานตามรัศมีต่าง ๆ ที่ตั้งไว้หรือดัดโค้งด้วยมุมที่ต้องการ เมื่อกำหนดรัศมีการดัดโค้งที่คงที่ได้ก็เพียงพอแล้ว โดยทั่วไปอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบการดัดโค้ง เช่น Pin, Roller และ Mandrel นั้นควรจะมีควมยาว ยาวกว่าความกว้างของชิ้นงานทดสอบและจะต้องมีความแข็งแรง แข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อการเปลี่ยนแปลงและเสีรูปจากการสึกหรอในการดัดโค้งได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.19



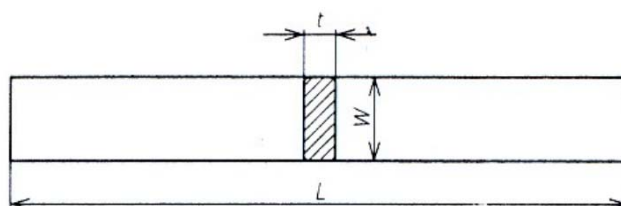
ภาพที่ 2.19 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการดัดโค้ง [40]

เราสามารถเลือกวิธีการทดสอบการดัดโค้งหลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะแตกต่างกันในรายละเอียด แต่จะมีหลักการในการทดสอบที่เหมือนกัน วิธีทดสอบการดัดโค้งที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป มี 3 วิธี ด้วยกัน แต่คณะผู้วิจัยได้ใช้วิธีการดัดโค้งแบบ Pressing bend ในการทดสอบ โดยจะดัดโค้งชิ้นงานเป็นรูปตัวยู (U Bend) วิธีการดัดโค้งแบบ Pressing bend ทำโดยนำชิ้นทดสอบมาวางอยู่บนตัวฐานรอง ซึ่งควรจะเป็นทรงกระบอกที่มีรัศมีความโค้งไม่ต่ำกว่า 10 มิลลิเมตร แล้วค่อย ๆ เพิ่มแรงในการกดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบ เพื่อทำการดัดโค้งชิ้นงานระหว่างการทดสอบ เท่ากับ $2r + 3t$ โดยที่ r คือ รัศมีการดัดโค้ง และ t คือ ความหนาหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ ส่วนปลายของ Mandrel จะต้องเป็นทรงกระบอก ที่มีรัศมีโค้งเท่ากับรัศมีดัดโค้งที่เท่ากับรัศมีทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 วิธีการทดสอบการดัดโค้งแบบ Pressing bending [40]

มาตรฐาน JIS Z 2204 ได้แบ่งชิ้นงานทดสอบสำหรับการดัดโค้ง ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ชิ้นงานทดสอบแบบแผ่น (Sheet specimen) ชิ้นงานทดสอบแบบแท่ง (Rod specimen) และ ชิ้นงานทดสอบแบบหน้าตัดแบน (Plate or strip specimen) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะเตรียมชิ้นงานทดสอบการดัดโค้งแบบแผ่นที่มีความหนา (t) ตั้งแต่ 3 มิลลิเมตร ขึ้นไป โดยความกว้าง (w) ของชิ้นทดสอบที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 20-50 มิลลิเมตร ถ้าวัสดุมีความกว้างไม่ถึงก็ให้ใช้ความกว้างสูงสุดของวัสดุที่สามารถเตรียมได้ ส่วนความยาวของวัสดุจะขึ้นอยู่กับความหนาและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ถ้าวัสดุมีความหนามากกว่า 25 มิลลิเมตร สามารถที่จะสามารถที่จะกลึง ไสผิวชิ้นงานอีกด้านให้ลดลงได้ตามแต่ความเหมาะสมกับอุปกรณ์การทดสอบ แต่ต้องมีความหนามากกว่า 25 มิลลิเมตร และในการทดสอบ ให้ใช้ชิ้นงานที่ไม่ต้องกลึงหรือไสผิวมาเป็นด้านนอกที่รับแรงดึงในระหว่างทำการดัดโค้ง ซึ่งลักษณะชิ้นงานทดสอบการดัดโค้งแบบแผ่นตามมาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 ชิ้นงานทดสอบการดัดโค้งแบบแผ่น [40]

2.1.9 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Static Analysis)

เป็นการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล Montgomery D.C. (2000) [41] กล่าวว่า เพื่อให้ผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ข้อสรุปที่ได้มีเหตุผลและความน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบ บันทึกผลการทดลอง สถิติที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์ ค่าทดสอบของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย คือสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistic) เพื่อหาค่าความแปรปรวน และอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

การกำหนดขนาดตัวอย่างว่าจะมีจำนวนเท่าไรที่สามารถเป็นตัวแทนประชากรได้เพียงพอ และเหมาะสมที่จะทำให้การวิจัยมีประสิทธิภาพไม่สิ้นเปลืองงบประมาณ เวลา และกำลังคน โดยการกำหนดขนาดตัวอย่าง โดยการกำหนดค่าดังนี้

- (1) Type I Error (α) = 0.05
- (2) Power ($1 - \beta$) = 0.95
- (3) Number of Center Point = 0
- (4) Estimate σ
- (5) Minimum Effect (D)

การประมาณค่า σ จากผลการทดลองที่เกี่ยวข้อง ค่าที่มีการแนะนำให้ใช้ หรือการศึกษาเบื้องต้นของการทดลองนี้ ในกรณีนี้ไม่มีข้อมูลของการทดลองอื่น หรือข้อมูลอื่น ๆ มาใช้ในการประมาณค่า ที่ต้องการจึงต้องมีการศึกษาเบื้องต้นเพื่อประมาณค่า σ โดยการออกแบบการทดลอง Factorial Design หาค่า σ จากสมการที่ 2.6

$$\sigma = \sqrt{MS_{Error}} \quad (2.6)$$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย คือ A และ B ปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดอยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล คือ ในแต่ละซ้ำของการทดลองประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด $a \times b$ การทดลอง โดยปกติจะมีจำนวนซ้ำทั้งหมด 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 $a \times b \times n$ ครั้ง เลือกมาอย่างสุ่ม เป็นการออกแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely randomized design) แบบจำลองสถิติเชิงเส้น (Linear statistical model) ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.7)$$

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 ส่วนที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดดังนั้น $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ และ $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$ ในทำนองเดียวกันสมมติว่าผลที่เกิดจากอันตรกิริยามีค่าตายตัวและกำหนดว่า $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$ เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้มีจำนวนซ้ำ n ครั้ง ดังนั้น จำนวนข้อมูลที่ได้จากการสังเกตทั้งหมดเท่ากับ $a * b * n$

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ทั้งปัจจัยที่เกิดจากความเร็รรอบ (A) และความเร็วในการเชื่อม (B) มีความสำคัญเท่ากัน

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากความเร็รรอบ

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

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

ความเท่ากันของผลที่เกิดจากความเร็วในการเชื่อม

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

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

ผลของอันตรกิริยาที่เกิดระหว่างความเร็รรอบและความเร็วในการเชื่อมมีนัยสำคัญหรือไม่

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

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

การทดสอบสมมติฐานเหล่านี้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ปัจจัยเป็นการทดสอบตัวแปรที่ถูกกำหนดในการทดลองว่ามีอิทธิพลต่อการทดลองหรือไม่โดยตั้งสมมติฐานหลักและความสัมพันธ์ของตัวแปร ตรวจสอบผลด้วยค่าทางสถิติดังนี้

(1) พิจารณา Main effect

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็รรอบ

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 \quad \text{สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็รรอบไม่แตกต่างกัน}$$

$$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2 \quad \text{สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็รรอบแตกต่างกัน}$$

ทดสอบสมมติฐาน อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อม

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 \quad \text{สำหรับทุกระดับอิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมไม่แตกต่างกัน}$$

$$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \quad \text{สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเชื่อมแตกต่างกัน}$$

(2) พิจารณา 2 Factor interaction effect

ทดสอบอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างความเร็รรอบกับความเร็วในการเชื่อม

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

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

การสร้างแบบจำลองการถดถอยกับตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ซึ่งจะสร้างแบบจำลองและหาความสัมพันธ์ของตัวแปร คือ ความเร็วรอบของเครื่องมือกับความเร็วในการเชื่อม จึงได้สร้างแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ของงานเชื่อมด้วยความเร็วรอบของเครื่องมือกับความเร็วในการเชื่อม และใช้แบบจำลองในการพยากรณ์ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วในการเชื่อม แบบจำลองที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (2.8)$$

สมการทั่วไปของ Regression Factorial Design

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.9)$$

เป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองในการตรวจสอบการใช้งานของแบบจำลอง โดยสมมติว่าค่าความผิดพลาดในแบบจำลอง ε_1 มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนย่อได้เป็น $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ผลก็คือข้อมูลที่เก็บมาได้ y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ ความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอยคือการทดสอบเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบแทน y และเซตย่อยของตัวแปรถดถอย $x_1, x_2, \dots, x_k$ หรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมคือ

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

$$H_1 = \beta_1 \neq 0 \text{ for at Least One } j$$

การปฏิเสธ H_0 จากสมมติฐาน บอกให้ทราบว่า อย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย $x_1, x_2, \dots, x_k$ หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง การทดสอบทำได้จากการแบ่งผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง (SS_T) ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลรวมกำลังสองที่เกิดจากแบบจำลองและผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากส่วนตกค้างหรือความผิดพลาด คำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (2.10)$$

ถ้าสมมติฐานศูนย์ $H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ เป็นจริงแล้ว SS_R / σ^2 จะมีการกระจายแบบ χ^2_k โดยที่ระดับขึ้นความเสรีของ χ^2 เท่ากับจำนวนของตัวแปรการถดถอยในแบบจำลอง

ในการทำงานเดียวกันเราสามารถแสดงได้ว่า SS_R / σ^2 มีการกระจายแบบ X^2_{n-k-1} และ SS_E และ SS_R จะเป็นอิสระ วิธีการทดสอบ $H_0 = \beta_1 = \beta_2 \dots = \beta_K = 0$ จากสมการที่ 2.11

$$F_0 = \frac{SS_R / K}{SS_E / (n - k - 1)} = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (2.11)$$

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 2.2

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลอง [41]

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F _o
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		

การคำนวณทำได้ โดยใช้ซอฟต์แวร์ทางสถิติ แสดงให้เห็นส่วนหนึ่งของผลการวิเคราะห์จาก Stat graphics คือการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง การทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอยของการทดสอบสมมติฐานที่ว่า

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

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

ค่า P-value สำหรับค่าสถิติ F จะสรุปได้ว่าอย่างน้อยสุดหนึ่งในสองของตัวแปรความเร็วรอบของ Tool และอัตราความเร็วในการเชื่อมจะมีสัมประสิทธิ์การถดถอยไม่เป็นศูนย์

ค่า R^2 คำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (2.12)$$

R^2 เป็นตัววัดของจำนวนที่ลดลงในความแปรผันของ Y เมื่อใช้ตัวถดถอย $X_1, X_2, \dots, X_K$ ในแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ค่าที่ R^2 มีค่ามากไม่ได้แปลว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมานี้ดี เนื่องจากการเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองจะทำให้ R^2 เพิ่มขึ้นไม่ว่าตัวแปรที่เติมเข้าไบนั้น

จะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ ดังนั้น อาจจะเป็นไปได้ว่าแบบจำลองที่มีค่า R^2 มาก อาจจะเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีในการพยากรณ์ค่าผลตอบก็ได้

เนื่องจาก R^2 มีค่าเพิ่มขึ้นเสมอเมื่อเราเพิ่มพจน์ต่าง ๆ เข้าไปในแบบจำลอง ทำให้ค่าสถิติ R^2 แบบปรับแล้วมากกว่า เขียนเป็นสมการได้เป็นสมการที่ 2.13

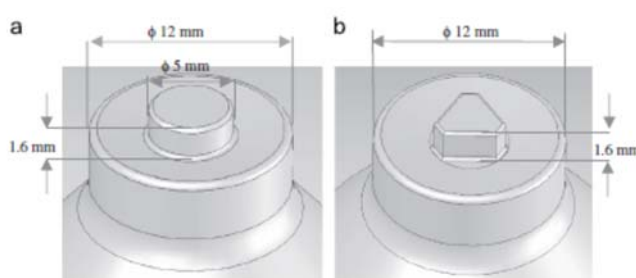
$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E / (n - p)}{SS_E / (n - 1)} = 1 - \left(\frac{n - 1}{n - p} \right) (1 - R^2) \quad (2.13)$$

ตามปกติสถิติ R^2 แบบปรับแล้วจะไม่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของตัวแปรเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง แต่ในความเป็นจริง ถ้าเพิ่มตัวแปรที่ไม่จำเป็นลงในแบบจำลอง ค่าของ R^2_{adj} จะมีค่าลดลงเสมอ เมื่อ R^2 และ R^2_{adj} แตกต่างกันมาก จะหมายความว่ามีโอกาสสูงที่จะพบว่าพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญได้ถูกเติมลงไปในแบบจำลอง [41]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

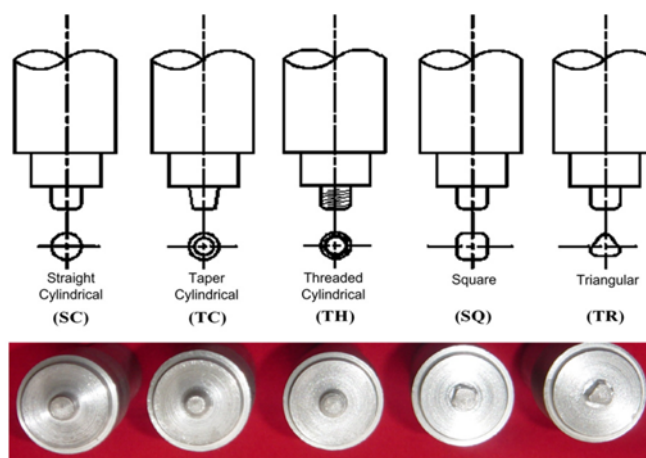
Badarinarayan, Yang and Zhu (2009) [42] และคณะทำการศึกษาารูปแบบของหัวพินที่มีผลต่อการเชื่อมแบบจุดในอะลูมิเนียมผสม 5083 ลักษณะของหัวพินที่ใช้มีสองแบบ คือ แบบทรงกระบอกและแบบสามเหลี่ยม ดังภาพที่ 2.22 จากการตรวจสอบโครงสร้างจากการเชื่อมแบบจุดของหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะหยากกว่าโครงสร้างของหัวพินแบบสามเหลี่ยมและมีการเชื่อมต่อไม่สมบูรณ์เท่ากับหัวพินแบบสามเหลี่ยม อันเนื่องมาจากหัวพินแบบทรงกระบอกมีเฉพาะการเฉือนเกิดขึ้นเท่านั้น แต่หัวพินแบบสามเหลี่ยมมีการพาของเนื้อวัสดุเกิดการไหลวนดีกว่า ค่าความแข็งแรงแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่ถูกกวนมีความแข็งแรงมากกว่าเนื้อโลหะเดิมและการทดสอบความแข็งแรงดึงชิ้นงานหัวพินแบบทรงกระบอกจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าหัวพินแบบสามเหลี่ยม อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่ละเอียดกว่าและการเชื่อมต่อที่สมบูรณ์



ภาพที่ 2.22 ลักษณะของหัวพินในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

Elangovan and Balasubramanian (2008) [28] ได้ศึกษาการประมาณค่าความแข็งแรงดึงด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม AA2219 โดยวิธีการคำนวณของหัวพินแบบต่าง ๆ มี 5 ลักษณะคือ ทรงกระบอก รูปกรวย เกลียวทรงกระบอก สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม

ดังภาพที่ 2.23 พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่สมบูรณ์ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงและทนต่อการกัดกร่อนที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือแกนต่ำและสูงมากเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำและในขณะเดียวกันที่ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือแกนปานกลางจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งเหตุที่เป็นเช่นนี้รูปร่างของหัวพินไม่ได้มีผลเลย แต่มาจากความเร็วในการหมุนของเครื่องมือแกนปานกลางไม่มีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในรอยเชื่อม ที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมสูงความร้อนตัวของเนื้อวัสดุจะน้อยกว่าที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำเนื่องจากความร้อนสะสมมากกว่า แต่ในขณะเดียวกันที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไปจะมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำและที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมปานกลางจะมีค่าความแข็งแรงดึงสูง อันเนื่องมาจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม รวมไปถึงแรงที่ใช้กดขณะทำการเชื่อมต่ำและสูงมากเกินไป ค่าความแข็งแรงดึงก็จะต่ำและที่แรงกดขณะทำการเชื่อมปานกลางจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงมาก อันเนื่องมาจากแรงกดที่สูงจะทำให้การซึมลึกในรอยเชื่อมสมบูรณ์มากขึ้น ความเร็วในการหมุนของเครื่องมือแกนและรูปแบบของหัวพินเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกเกิดการไหลวนหรือเกิดการเคลื่อนที่รอบตัวแกน ซึ่งจากการศึกษาหัวพินแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยมให้ค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าหัวพินอื่น ๆ อันเนื่องมาจากหัวพินมีผลทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบตัวแกนมากกว่าหัวพินแบบอื่น ๆ



ภาพที่ 2.23 ลักษณะของ Tool pin แบบต่าง ๆ

วรพงศ์ บุญช่วยแทน และคณะ (2559) [43] ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบแกนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 ที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกล วัสดุที่ใช้ทดลองมีความหนา 4 มิลลิเมตร ความเร็วหมุนเชื่อม 710, 1000 และ 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 80, 112 และ 160 มิลลิเมตรต่อนาที ผลจากการทดลองพบว่าพารามิเตอร์การเชื่อมส่งผลกระทบบให้เกิดความร้อนจากการเสียดทานและการไหลวนของวัสดุในแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนในแต่ละบริเวณของแนวเชื่อมและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม โดยการหมุนของเครื่องมือเชื่อมที่สูงขึ้น ทำให้เกิดความร้อนที่มากขึ้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนและการแตกหักของอนุภาค Al_2Cu ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากที่สุดในช่วงบริเวณ TMAZ - SZ ที่ 145.10 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที ความเร็วเดิน

เชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที และค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของการทดลองจากความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ 208.08 MPa โดยค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมทุกสภาวะการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อเดิมวัสดุ โดยมีค่าประสิทธิภาพแนวเชื่อมทุกสภาวะการเชื่อมไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์

สุรสิทธิ์ ระวังศ์ และคณะ (2558) [44] ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติทางกล (ความแข็งแรงดึง) ของแนวเชื่อมต่อชนที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 356 กับ 7075 การวางตำแหน่งการเชื่อมให้เกรด 356 อยู่ด้านรีทเทรตติ้งไซด์ และ เกรด 7075 อยู่ด้านแอดวานซ์ซิงไซด์ โดยใช้ตัวกวนทรงกระบอก ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัวแปร คือ ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวนที่ 710 1,000 และ 1,400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 112 และ 160 มม./นาที ความเร็วหมุนเชื่อมของตัวกวนและความเร็วเดินเชื่อมมีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมจากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง คือความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วหมุนเชื่อมกับความเร็วเดินเชื่อม โดยมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงมีผล ทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตร/นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 213 MPa โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมประกอบด้วยเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดที่ละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม

วรพงศ์ บุญช่วยแทน และคณะ [45] ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางมหภาค จุลภาค และสมบัติทางกลของแนวเชื่อมต่อชนที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061 โดยใช้หัวกวนทรงกระบอก ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 2 ปัจจัย คือความเร็วหมุนเชื่อมของหัวกวนที่ระดับ 710, 1000 และ 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80, 112 และ 160 มิลลิเมตร/นาที กระบวนการทางความร้อน T6 คือ การอบละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 530 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วชุบน้ำและตามด้วยการบ่มเทียมที่ 185 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งความเร็วหมุนเชื่อมของหัวกวน ความเร็วเดินเชื่อม และอิทธิพลทางความร้อนหลังการเชื่อมมีผลโดยตรงต่อโครงสร้าง และสมบัติทางกลของแนวเชื่อม จากการทดลองพบว่าโครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณแนวเชื่อมมีความละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม ทั้งด้านแอดวานซ์ซิงไซด์ และด้านรีทเทรตติ้งไซด์ ซึ่งเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนไม่เป็นรูปร่างเนื่องจากการหมุนของหัวกวน และเกิดรอยแตกบริเวณแนวเชื่อมเนื่องจากกระบวนการทางความร้อนหลังการเชื่อม นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ 177.53 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 มิลลิเมตร/นาที และค่าความแข็งแรง สูงสุดเฉลี่ย 117.63 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 มิลลิเมตร/นาที

Zhao and et al. (2005)[46] ศึกษาลักษณะของหัวพินที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สี่ชนิด คือ หัวพินแบบทรงกระบอกไม่มีเกลียว หัวพินแบบทรงกระบอกมีเกลียวรอบหัวพินแบบเทเปอร์ไม่มีเกลียวและหัวพินแบบเทเปอร์มีเกลียวรอบในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 2014 พบว่าผิวหน้ารอยเชื่อมสะอาด ไม่มีความบกพร่องเกิดขึ้น จากโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมด้วยหัวพินแบบทรงกระบอกมีเกลียวและหัวพินแบบเทเปอร์มีเกลียวไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม แต่จะ

พบว่าหัวพินแบบทรงกระบอกไม่มีเกลียวและหัวพินแบบเทเปอร์ไม่มีเกลียวในรอยเชื่อมเกิดช่องว่าง อันเนื่องมาจากหัวพินทั้งสองไม่มีเกลียวทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุไม่สมบูรณ์ระหว่างการเชื่อม เพราะว่าเกลียวจะช่วยให้เกิดความร้อนและเนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกมากกว่าแบบไม่มีเกลียว โครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นว่ารอยเชื่อมเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนมากที่สุดที่ทำให้เนื้อวัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกจากการเชื่อม จึงทำให้โครงสร้างมีลักษณะที่ละเอียดมากกว่าบริเวณอื่น ๆ โดยเฉพาะโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบเทเปอร์มีเกลียวมีโครงสร้างที่ละเอียดและเล็กกว่าจากการเชื่อมด้วยหัวพินแบบอื่น ๆ และจากการทดสอบค่าความแข็งแรงและค่าแรงตัด ค่าของหัวพินแบบเทเปอร์มีเกลียวจะให้ค่าที่สูงกว่าหัวพินแบบอื่น ๆ อันเนื่องมาจากภายในรอยเชื่อมไม่มีข้อบกพร่องและโครงสร้างทางจุลภาคมีลักษณะที่ละเอียดมากกว่าหัวพินแบบอื่น ๆ

Nandan และคณะ [47] และคณะได้ทำการศึกษาความร้อนจากขนาดของเครื่องมือกลวน (Tool) และการเคลื่อนตัวของเนื้อวัสดุระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1018 จากการทดลองพบว่าความร้อนจะเกิดขึ้นบริเวณบ่าและขึ้นอยู่กับรูปแบบของหัวพินที่แตกต่างกัน ความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อเครื่องมือกลวนสัมผัสกับชิ้นงานและจะมีความสัมพันธ์กับทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและระยะของแนวแกน ความร้อนจะเพิ่มขึ้นจากบริเวณที่สัมผัสกับบ่าและหัวพินและจะลดลงตามระยะห่างของบ่าและหัวพินเช่นกัน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับเป็นมุม อันเนื่องมาจากความร้อนที่ทำให้เนื้อโลหะอยู่ในสภาวะพลาสติกจะเกิดขึ้นใกล้กับหัวพินได้เร็วมาก อีกทั้งความร้อนและความเร็วในการหมุนของเครื่องมือกลวน ทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบตัวกวนทิศทางการกวนและความร้อนจากการเสียดทาน

กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และคณะ (2550) [48] ศึกษาการเชื่อมรอยต่อเกยอะลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยต่อเกยของอะลูมิเนียมผสม เกรด AA 5083 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด SS 400 ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม เช่น ความเร็วรอบ ความเร็วในการเชื่อมและความลึกของตัวกวนที่กดสัมผัสผิวชิ้นงานเชื่อม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการเชื่อม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเตอร์เฟซของรอยต่อและส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล การเพิ่มความเร็วยรอบของตัวกวน ทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะระหว่างเหล็กกับอะลูมิเนียมชนิด $FeAl_3$ ที่อินเตอร์เฟซของรอยต่อ การเพิ่มความเร็วในการเชื่อมสามารถเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อเนื่องจากสารประกอบกึ่งโลหะที่มีความเปราะที่ก่อตัวบริเวณอินเตอร์เฟซมีปริมาณลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วในการเชื่อมมากเกินไป ทำให้เกิดจุดบกพร่องที่อินเตอร์เฟซของรอยต่อ จากความลึกของตัวกวนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของสารประกอบกึ่งโลหะและขนาดของจุดบกพร่องเพิ่มขึ้น

Lambard and et al. (2007) [49] ศึกษาปัจจัยในกระบวนการเชื่อมเพื่อนำไปสู่การลดปัญหาข้อบกพร่องและความยุ่งยากในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม เกรด 5083-H321 อย่างเป็นระบบ ปัจจัยในกระบวนการเชื่อมเสียดทาน ความเร็วรอบของเครื่องมือกลวนและความเร็วในการเดินแนวเชื่อม แรงกดที่ใช้ในการเสียดทาน การเสียดทานส่งผลถึงความแตกต่างของความแข็งแรงและความยุ่งยากในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม 5083-H321 เกิดข้อบกพร่องในสภาพวัสดุไม่สามารถคืนตัวได้ (Plastic Deformation) ในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของการเชื่อม (TMAZ) อย่างไรก็ตาม

ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับพฤติกรรมการรักษาสมบัติทางกล จากการเชื่อมเสียดทานแบบ กวนข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมกึ่งแข็งและความแข็งที่ทำให้เกิดการแตกร้าวใน กระบวนการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมผสม 5083-H321 ความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมตรวจสอบด้วย การเอ็กซเรย์ (X-Ray) สามารถควบคุมด้วยความร้อนเข้า (Heat Input) ของการเชื่อม ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าสูงสุดของความเค้นที่ตกค้างและการปฏิบัติที่ซับซ้อน แรงกดและอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ ควบคุมด้วยเครื่องมือกวนจากการหมุนด้วยความเร็วรอบและความเร็วในการเชื่อม

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความล้า

Sillapasa, K. and et al. (2017) [50] ศึกษาสมบัติทางด้านความล้าแบบดึง-กด (Stress Amplitude) และความแข็งของอะลูมิเนียม เกรด 6N01 และ 7N01 จากการเชื่อมเสียดทาน แบบกวน ตัวแปรในการทดลอง ได้แก่ อัตราส่วนความเค้นที่ 0.1 ความถี่ทดสอบที่ 20 Hz ตามลำดับ จากการศึกษพบว่าบริเวณของการขาดของชิ้นงานทดสอบ เกิดขึ้นในบริเวณที่รับสมบัติทางด้านความ ล้าได้ต่ำที่สุด ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก ในขณะที่เดียวกันพบว่าบริเวณที่มีความแข็งต่ำสุดก็นำสู่ การแตกหักหลังการทดสอบความล้า โดยมีค่า σ_a ($R = -1$) = 1.68 HV ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นผล การทดลองที่ดี อย่างไรก็ตามสมบัติทางด้านความล้าหลังการทดลอง ยังมีค่าที่ต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิม

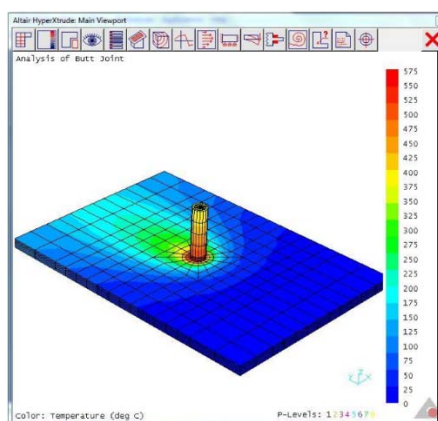
Uematsu and et al. (2020) [51] ศึกษารอยแตกร้าวที่เกิดจากการทดสอบความล้า ของชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่างวัสดุระหว่างอะลูมิเนียมผสม เกรด A6061-T6 กับเหล็กกล้าไร้ สนิม เกรด 304 โดยกำหนดให้ตัวแปรในการทดสอบความล้าที่ความถี่ 10 Hz อัตรากำลังแรงที่ 0.05 (Load ratio, $R = 0.05$) หลังการทดสอบจะศึกษาการเติบโตของรอยแตกและลักษณะความเครียดที่ เกิดขึ้นจากการเสียหาย พบว่าค่าความเค้นตกค้างเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ (Interface) มีค่าเฉลี่ยที่ -27.6 MPa นอกจากนั้นยังพบว่ารอยการเสียหาย (Crack) ส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างที่สูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมส่งผลต่อค่า ΔK_{eff} (ค่าความเข้มความเครียดที่มี ประสิทธิภาพ) เนื่องจากอุณหภูมิจากการเชื่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคหลังการ เชื่อมวัสดุต่างชนิดกัน

Vysotskiy and et al. (2019) [52] ศึกษาพฤติกรรมความล้าที่ผิดปกติของโลหะผสม Al-Mg-Si จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นอะลูมิเนียม เกรด AA6061-T6 ตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ได้แก่ ความเร็วในการหมุนเชื่อม 1100 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 760 มิลลิเมตรต่อนาที มุมเอียงเชื่อม 2.5 องศา และใช้เครื่องมือกวนขนาด M5 ความยาว 1.9 มิลลิเมตร ความโตของปากกวน 12.5 มิลลิเมตร จากนั้นทดสอบความล้าที่อัตราส่วน ความเค้นที่ 0.5 ความถี่ทดสอบที่ 50 Hz และอัตรากำลังแรงที่ 0.1 (Load ratio, $R = 0.1$) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางด้านความล้าแสดงให้เห็นว่าตัวแปรในการทดลอง บางการทดลองส่งผลที่ดี ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าเนื้อโลหะเดิม อย่างไรก็ตามพบว่าการทดสอบความล้าที่ความ เค้นทดสอบต่ำทำให้ค่าให้ความแข็งแรงหลังการทดสอบที่สูงกว่า 210 MPa ในทางตรงกันข้ามความเค้น ทดสอบที่สูง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงหลังการทดสอบที่ต่ำ มีค่าน้อยกว่า 70 MPa และสังเกตได้ว่า บริเวณกระทบทางความร้อน (Heat-affected zone) จะเป็นบริเวณเริ่มเกิดการแตกร้าว เนื่องจากมี โครงสร้างจุลภาคที่หยาบและความเค้นตกค้างที่สูง ส่งผลต่อการแตกหักได้ง่ายดาย

Sillapasa, K. and et al. (2014) [53] ศึกษาสมบัติทางด้านแรงดึงและพฤติกรรมทางด้านความล้าบริเวณรอยเชื่อม อิทธิพลกระทบบร้อน เนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมแผ่นรีด เกรด 6N01 จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งได้กำหนดตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน คือ ความเร็วในการหมุนเชื่อมที่ 500 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 400 มิลลิเมตร/นาที และใช้เครื่องมือกวนทำจากเหล็กเครื่องมือ เกรด SKD61 ความโตของปากกวน 20 มิลลิเมตร ขนาดพินโต 12 มิลลิเมตร สำหรับตัวแปรของการทดสอบความล้า ได้แก่ อัตราส่วนความเค้นทดสอบที่ 0.1 ความถี่ทดสอบที่ 20 Hz ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านแอดวานซ์ซิง (Advancing side) มีความเค้นตกค้างมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ในทำนองเดียวกันพบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงให้เห็นว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีค่าแข็งแรงกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนมีค่าความแข็งแรงต่ำสุด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความร้อนในขณะเชื่อม อย่างไรก็ตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคก็ส่งผลต่อความสัมพันธ์ของพฤติกรรมความล้า โดยพบว่าบริเวณรอยเชื่อมที่มีการตกผลึกใหม่ของโครงสร้างจุลภาคแบบเกรนละเอียดและบริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค ส่งผลที่ดีต่อพฤติกรรมความล้า ในทางตรงกันข้ามบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคแบบเกรนหยาบส่งผลที่ไม่ดีต่อพฤติกรรมความล้าและสมบัติทางด้านอื่น ๆ หลังการทดลอง

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความล้าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Rajasekar and Prabhu (2015) [54] ศึกษาแบบจำลองความร้อนและแรงที่กระทำต่อชิ้นงานเชื่อมของอะลูมิเนียม 2024 และ 6063 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบต่างวัสดุ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษานี้ใช้โปรแกรมไฮเปอร์เมช (Hypermesh Software) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ ความโตพินที่ 7.87 มิลลิเมตร ความลึกกดที่ 5.97 มิลลิเมตร มุมเอียง 3 องศา ความเร็วหมุนเชื่อม 600 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 4.23 มิลลิเมตรต่อนาที ความโตปากที่ 19 มิลลิเมตร และความสูงของปาก 70.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการสร้างแบบจำลองพบว่าบริเวณรอยเชื่อม (Nugget Zone) เกิดความร้อนสูงถึง 550 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 2.24 และพบว่าแรงกดที่กระทำจากการเสียดทานอยู่ที่ 150 MPa



ภาพที่ 2.24 การกระจายตัวของความร้อนบนชิ้นงานด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Meyghani, Awang and Wu (2020) [55] ศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (FSW) บนแผ่นโค้งซับซ้อน เพื่อลดน้ำหนักของโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม สำหรับการสร้างแบบจำลองหลายองค์ประกอบ มีข้อจำกัดที่ความยากลำบากที่เกิดขึ้นในการกำหนดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากของเครื่องมือบนพื้นผิวโค้ง เนื่องจากหลักการพื้นฐานของซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่แบบจุดเดียว ดังนั้นจึงควรแก้ไขซอฟต์แวร์เพื่อจำลองการแสดงการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากอย่างถูกต้อง โดยในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Altair Hyperworks[®] และ ABAQUS[®] เพื่อจำลองกระบวนการบนแผ่นโค้งด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ แก้ปัญหาการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉาก (การเคลื่อนที่ในทิศทาง X ทิศทาง Y และการเคลื่อนที่เชิงมุม) ซอฟต์แวร์จะวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนบนพื้นผิวโค้ง ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสำหรับการสร้างความร้อนส่งผลให้การขยายตัวของผิวชิ้นงาน ซึ่งนำไปสู่อุณหภูมิสูงสุดเกือบ 300 ° C หลังจากเวลาที่ 3 วินาที ในระหว่างช่วงเวลา ($t = 3$ วินาที ถึง $t = 5$ วินาที) ความร้อนที่เกิดขึ้นจะคงที่และไหลจะเคลื่อนย้ายวัสดุขึ้นเนื่องจากความเร็วหมุนเชื่อมของวัสดุที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายอุณหภูมิแบบไม่สมมาตรที่หน้าตัด เมื่อสิ้นสุดการเชื่อม ($t = 12.8$ วินาที) ในขณะที่เวลารวมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอยู่ที่ $t = 19.6$ วินาที ตามลำดับ

Kiral, Tabanoğlu and Serindağ (2013) [56] การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของโลหะผสมอะลูมิเนียม โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์องค์ประกอบที่จำกัดทางความร้อน ด้วยการสร้างแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิในแผ่นอะลูมิเนียมเกรด AA 6061-T6 ระหว่างการเชื่อม โดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ANSYS และ HyperXtrude APDL (ANSYS Parametric) ได้รับการพัฒนาเพื่อสร้างแบบจำลองแหล่งความร้อนที่เคลื่อนที่และเปลี่ยนขอบเขตเงื่อนไข จากการทดลองพบว่าการจำลองความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างปากของเครื่องมือกวนและชิ้นงานใช้การถ่ายเทความร้อน เป็นที่สังเกตว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดใกล้รอยเชื่อม ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามเวลาในหมุนของเครื่องมือกวนและความเร็วในการหมุนที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะลดลงเมื่อความเร็วตามขวางของเครื่องมือเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สรุปได้ว่าการใช้เทคนิคแหล่งความร้อนเคลื่อนที่ที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเชื่อถือได้ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการจำลองการประมวลผลจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ตารางที่ 2.3 ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม

ลำดับ	ผู้แต่ง (ปี)	วัสดุที่ใช้	ตัวแปรในการทดลอง	ข้อสังเกตและการค้นพบ	สรุปข้อแตกต่างงานวิจัย
1	Uyime Donatus (2019) [16]	AA2198-T851	Traverse speed of 150 mm/min, Rotation rate of 800 rpm, tool shoulder 6 mm, pin was 2 mm and depth 1.9 mm	การตรวจสอบด้วยวิธี SECM พบว่ากระแสที่สูงขึ้นส่งผลให้ลดออกซิเจนใน HAZ/TMAZ และ SZ เมื่อเทียบกับวัสดุเดิม เนื่องจากทำหน้าที่เป็นแคโทดที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ค่ากระแสการสร้างไฮโดรเจนยังสูงกว่าในเนื้อวัสดุเดิม (เมื่อเทียบกับโซนอื่น ๆ)	การวิจัยนี้มีการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวแปรที่ใกล้เคียงกันและสามารถนำไปต่อยอดงานวิจัยในส่วนงานกัดกร่อนได้
2	Pankul Goel (2018) [17]	Al 6063-T6	Welding speed of 50 mm/min, Rotation rate of 900 rpm, steel (H13), tool tilt of 1.5°, tool shoulder 20 mm, pin 7.3 mm	เครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกเกลียวให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 162 MPa และค่าแรงกระแทก 26 จูล และรอยต่อแบบต่อชน (butt joints) ให้ค่าความแข็งแรงมากกว่ารอยต่อแบบเฉียง (scarf joints)	การวิจัยนี้มีการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยตัวแปรที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะการศึกษาความแตกต่างของพินกวนที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยเชื่อม
3	Ahsok Kumar (2014) [18]	AA6061		แบบจำลองการถดถอยได้รับการพัฒนาด้วยโปรแกรม SYSTAT 12 จากวิธี AlN_p เพื่อทำนายความต้านทานแรงดึงสูงสุดและการยึดตัวของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนแสดงให้เห็นว่าตัวแปรในการทดลองส่งผลต่อค่าการทดลองที่เหมาะสม	การวิจัยนี้พบว่าแบบจำลองการถดถอยวิธี AlN_p ทำนายความต้านทานแรงดึงสูงสุดได้
4	Moustafa Boukraa (2018) [19]	AA2195-T8	CFD ANSYS 14.0 program, MATLAB	การลดเวลาในการเชื่อมส่งผลต่อบริเวณอิทธิพลทางความร้อน และสามารถลดพลังงานในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้ นอกจากนี้พบว่าการมีเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมจะส่งผลต่ออุณหภูมิในการเชื่อมที่เหมาะสม ส่งผลให้ชิ้นงานมีคุณภาพการเชื่อมที่ดี	การวิจัยนี้ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมทองแดงที่มีความไวต่อการแผ่ความร้อน จึงสามารถนำเทคนิคมาต่อยอดประยุกต์ผลการวิเคราะห์ความร้อนได้

ตารางที่ 2.3 ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง (ปี)	วัสดุที่ใช้	ตัวแปรในการทดลอง	ข้อสังเกตและการค้นพบ	สรุปข้อแตกต่างงานวิจัย
5	G.H. Li (2020) [21]	Mg-Zn-Zr alloy, ZK60-T5	tool steel AISI H-13, welding speeds 200 to 600 mm/min, rotational speed 600 rpm, Stir pin: Cylindrical pin with 3 flats; Tapered pin with 3 flats (taper angle: 4°); Tapered pin with 3 flats (taper angle: 10°); Tapered threaded pin with 3 flats (taper angle: 10°)	เทคนิคการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานของเครื่องมือกระสวย (BTFSW) พบว่าคุณภาพการเชื่อมมีผลมาจากรูปทรงของเครื่องมือกระสวยและพารามิเตอร์ในการทดลอง การปรับปรุงความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ด้วยเทคนิคแบบ BTFSW ส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวลงอย่างมากในบริเวณรอยเชื่อมกวน เนื่องจากการละลายของ β_2 precipitates และสมบัติแรงดึงของรอยต่อมีค่าน้อยกว่าของโลหะฐาน เนื่องจากตกผลึกในทิศทางไอโซโทรปีในบริเวณรอยเชื่อมกวน	การวิจัยนี้ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนของแมกนีเซียมผสม ซึ่งการใช้เครื่องมือเชื่อมแบบกระสวยจะช่วยลดแรงดัดตัวของแผ่นงานเชื่อมบาง ๆ หรือการเชื่อมวัสดุที่ง่ายต่อการอ่อนตัว สามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมในงานวิจัยนี้ได้
6	Narges Dialami (2019) [22]	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	มุมมองในการเชื่อมที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน $\alpha=2.5^\circ$ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ดี และการไหลของวัสดุสำหรับกรณีของเครื่องมือที่มีมุมเอียงจาก 0° และ 2.5° สรุปได้ว่าเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นวัสดุที่อ่อนนุ่ม	การวิจัยนี้ทดลองหาสภาวะมุมเอียงในการเชื่อมที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยที่ได้ศึกษาได้อ้างอิงมุมเชื่อมที่เหมาะสมจากงานวิจัยนี้
7	Morteza Shamanian (2020) [23]	AISI 316L/Incoloy 825	welding tool WC-Re composite, Rotational Speed 400, 500, 700 rpm, ω/v at 22.2, 16.6, 27.7 20.8, 29.1, 17.5 rotation/mm, Travel Speed 18, 24, 40 mm/min	เงื่อนไขในการเชื่อมเสียดทานที่เหมาะสม คือ $\omega = 500$ rpm และ $v = 24$ mm/min โดยการวางตำแหน่งสแตนเลสที่ด้านแอดวานซ์ ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทิศทางระนาบของการเชื่อมด้วยอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์พบว่าทิศทางการเชื่อม {111} และเฟสเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นในโลหะฐาน AISI 316L ของบริเวณรอยกวน ในขณะที่พบเฟสออสเทนไนต์ในบริเวณรอยกวนของ Incoloy 825 ค่าความแรงดึงมีการแตกหักแบบเหนียว ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน ω/v ในการทดสอบ	การวิจัยนี้ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อม ด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางโลหะวิทยาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษานำไปสู่การเปรียบเทียบเชิงผลการทดลองได้

ตารางที่ 2.3 ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง (ปี)	วัสดุที่ใช้	ตัวแปรในการทดลอง	ข้อสังเกตและการค้นพบ	สรุปข้อแตกต่างงานวิจัย
8	Banglong Fu (2015) [24]	6061-T6, AZ31B	Diameter and the length of the pin were 3.2 and 2.8 mm, tilted by 3°, rotation rate and traverse speed were fixed at 800 r/min and 50 mm/min	โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อมมีการก่อตัวเป็นสารประกอบ $Al_{12}Mg_{17}$ และ Al_3Mg_2 โดยอัตราการหมุนของเครื่องมือกวนช่วง 600–800 รอบต่อนาที และความเร็วในการหมุน 30–60 มม./นาที่ โดย Mg อยู่ทางด้านแอดวานซ์ เครื่องมือชดเชยด้าน Mg ที่ 0.3 มม. และความต้านทานแรงดึงของรอยต่อสูงถึง 70% ของโลหะฐาน	การวิจัยนี้ทดลองสามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบความร้อนของวัสดุเชื่อมที่แตกต่างกัน โดยใช้เทคนิคการชดเชยเครื่องมือมาประกอบเพื่อลดความร้อนที่เกิดจากการเชื่อม ส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมลดการเกิดจุดบกพร่องที่เกิดจากความร้อนสูงเกินไป
9	Y.G. Kim (2006) [29]	ADC12	Rotation speed 750-1750 rpm, welding speed 250-1000 mm/min, Tool Tilt 3° and Downforce 14.2 kN	ผลของความเร็วในการเดินเชื่อมและความเร็วในการหมุนเชื่อมส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคในรอยกวน พบว่าการกระจายของอนุภาคซิลิกอนในโลหะผสม ADC12 โลหะผสมตกผลึกอย่างละเอียด โดยไม่มีโครงสร้างเดนไดรติกและยูเทคติกกระจายอย่างสม่ำเสมอในบริเวณที่ถูกกวน ขนาดของอนุภาคซิลิกอนจะลดลงตามความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากความเร็วในการหมุนเชื่อม	การวิจัยนี้พบว่าขนาดของอนุภาคซิลิกอนแตกหักจากแรงทางกลและมี การเปลี่ยนขนาดตามความเร็วในการเชื่อมที่เพิ่มขึ้น
10	Anumat Sittiho (2018) [57]	APMT™ steel	Rotational rate of 600 RPM, traverse speed of 25.4 mm/min, and forging force of 21 kN shoulder diameter of 25.0 mm, pin height of 5.0 mm, pin diameter of 7.6 mm	ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ความเร็วเดิน 25.4 มิลลิเมตรต่อนาที เป็นตัวแปรที่เหมาะสมต่อการเชื่อมวัสดุฐานนี้ โดยบริเวณรอยเชื่อมมีเกรนที่หยาบ โดยมีขนาดเกรยเฉลี่ยที่ 13.7 μm และที่น่าสนใจคือโปรไฟล์ความแข็งระดับไมโครของวิกเกอร์ในโซนที่ผ่านการประมวลผลพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ	การวิจัยนี้พบว่าความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ความเร็วเดิน 25.4 มิลลิเมตรต่อนาที เหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุชนิดนี้

ตารางที่ 2.3 ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง (ปี)	วัสดุที่ใช้	ตัวแปรในการทดลอง	ข้อสังเกตและการค้นพบ	สรุปข้อแตกต่างงานวิจัย
11	Elangovan (2008) [28]	AA2219	Rotational 1400-1800 rpm, welding speed 0.25-1.25 mm/sec	ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไปจะมีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำ เนื่องจากที่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม	การวิจัยนี้พบว่าการเลือกและควบคุมพารามิเตอร์สำคัญมากสำหรับการเพิ่มความต้านทานแรงดิ่งและคุณภาพของการเชื่อม
12	Badarinarayan (2009) [42]	AA5083	Rotation Speed 200-1000 rpm, Welding Speed at 40-120 mm/min.	หัวพินแบบทรงกระบอกจะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าหัวพินแบบสามเหลี่ยม อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่ละเอียดกว่าและการเชื่อมต่อที่สมบูรณ์ และหัวพินแบบทรงกระบอกมีเฉพาะการเฉือนเกิดขึ้นเท่านั้น แต่หัวพินแบบสามเหลี่ยมมีการพาของเนื้อวัสดุเกิดการไหลวนดีกว่า	การวิจัยนี้พบว่ารอยแตกตรงข้อต่อเรียกว่า ตะเข็บ (Hook) ส่งผลต่อแรงดิ่ง
13	วรพงศ์ บุญช่วยแทน (2559) [43]	อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024	Rotation Speed at 710, 1000, 1400, Welding Speed at 80, 112, 160 mm/min, Pin diameter 5 mm, Pin Length 3 mm, Shoulder diameter 20 mm, Pin Angle 3°	ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุดของการทดลองที่ 208.08 MPa จากความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที การแตกหักของอนุภาค Al ₂ Cu ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมมากที่สุดในช่วงบริเวณ TMAZ - SZ ที่ 145.10 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที	การวิจัยนี้ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งซึ่งเป็นวัสดุกลุ่มเดียวกับที่ได้ศึกษาวิจัย ดังนั้นจึงสามารถนำงานวิจัยนี้มาเปรียบเทียบกับตัวแปรและผลการทดลองได้
14	สุรสิทธิ์ ระวังค์ (2558) [44]	อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 356 กับ 7075	Rotation Speed 710 1,000 1,400 rpm, Welding Speed 80 112 160 mm/min, Tool Tilt Angle 3 degree, Down Force 4.5 kN	ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มม./นาที ให้ค่าความแข็งแรงดิ่งเฉลี่ยสูงสุด 213 MPa โครงสร้างทางโลหะวิทยาบริเวณ แนวเชื่อมประกอบด้วยเนื้อวัสดุของอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดที่ละเอียดกว่าเนื้อโลหะเดิม	การวิจัยนี้ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างเกรด สามารถนำงานวิจัยนี้มาเปรียบเทียบกับตัวแปรและผลการทดลองได้

ตารางที่ 2.3 ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง (ปี)	วัสดุที่ใช้	ตัวแปรในการทดลอง	ข้อสังเกตและการค้นพบ	สรุปข้อแตกต่างงานวิจัย
15	วรพงศ์ บุญช่วย แทน (2558) [45]	อะลูมิเนียม หล่อทิ้ง ของแข็ง 6061	Rotation Speed at 710, 1000, 1400, Welding Speed at 80, 112, 160 mm/min	ความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุดที่ 177.53 MPa ที่ความเร็ว หมุนเชื่อม 1400 rpm และความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 mm/min หลังการเชื่อมผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ด้วยการอบละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 530 °C เป็น เวลา 1 ชั่วโมง แล้วชุบในน้ำและตามด้วยการบ่มเทียมนที่ 185 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง	การวิจัยนี้ทดลองให้กระบวนการทาง ความร้อนหลังการเชื่อมเสียดทานแบบ กวนของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งซึ่ง ดังนั้นจึงสามารถนำผลวิจัยนี้มา เปรียบเทียบกับตัวลักษณะ การเกิด จุดบกพร่องได้
16	Yan-hua (2005) [46]	AA2014	Shoulder tool of 24 mm, pin was 7.6 mm, tilt degree 2°, rotated at 400 rpm, welding speed at 100 mm/min	หัวพินแบบทรงกระบอกมีเกลียวและหัวพินแบบเทเปอร์ มีเกลียวไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม ในขณะที่หัวพิน แบบทรงกระบอกไม่มีเกลียวและหัวพินแบบเทเปอร์ไม่มี เกลียวในรอยเชื่อมเกิดช่องว่าง อันเนื่องมาจากหัวพินทั้ง สองไม่มีเกลียวทำให้การไหลวนของเนื้อวัสดุไม่สมบูรณ์	การวิจัยนี้ทดลองการเชื่อมเสียดทาน ด้วยทูลพินหลายรูปแบบ ซึ่งสอดคล้อง กับงานวิจัยที่ได้ศึกษา ดังนั้นงานวิจัยนี้ นำมาประเมินผลการทดลองได้ เพื่อ เปรียบเทียบผลการทดลองที่เกิดขึ้น
17	R. Nandan (2007) [47]	AISI 1018	Rotational 450 rpm, welding speed 0.42 mm/sec	ความร้อนจะเกิดขึ้นบริเวณบ่าและขึ้นอยู่กับรูปแบบของ หัวพินที่แตกต่างกัน ความร้อนที่ทำให้เนื้อโลหะอยู่ใน สภาวะพลาสติกและความร้อนและความเร็วในการหมุน ของเครื่องมือกวน ทำให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่ไหลวน รอบตัวกวนทิศทางการกวน	การวิจัยนี้พบว่าการเคลื่อนที่ไหลวนเนื้อ วัสดุที่สุดอยู่บริเวณรอบตัวกวนตาม ทิศทางการกวน
18	กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ (2550) [48]	AA5083, SS400	ความเร็วรอบคงที่ 500 รอบ/ นาที ความเร็วเดินแนวเชื่อม 175 มม./นาทีความลึกตัว กวนลงไปในเหล็กกล้าไร้สนิม 0.2 มม.ความเอียงของตัวกวน ที่ 2 องศา	การเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการเชื่อม ทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคบริเวณอินเตอร์เฟซ ของรอยต่อและส่งผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทาง กล เกิดการก่อตัวของสารประกอบกึ่งโลหะระหว่างเหล็ก กับอะลูมิเนียมชนิด $FeAl_3$ ที่อินเตอร์เฟซของรอยต่อ	การวิจัยนี้ทดลองการเชื่อมเสียดทานต่าง วัสดุของเหล็กกับอะลูมิเนียม โดยหลัง การเชื่อมพบว่ามีควมยากในการเชื่อม ทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยที่ได้ศึกษาจะได้นำ งานวิจัยนี้ไปประยุกต์ศึกษาต่อไป

ตารางที่ 2.3 ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง (ปี)	วัสดุที่ใช้	ตัวแปรในการทดลอง	ข้อสังเกตและการค้นพบ	สรุปข้อแตกต่างงานวิจัย
พฤติกรรมความล้า					
20	Kittima Sillapasa (2017) [50]	อะลูมิเนียมเกรด 6N01 และ 7N01	Rotational speed 160 rpm and welding speed of 80 mm/min and fatigue stress ratio of 0.1 at a frequency of 20 Hz	บริเวณที่รับสมบัติทางด้านความล้าได้ต่ำที่สุด ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก ความแข็งต่ำสุดก็นำสู่การแตกหักหลังการทดสอบความล้า โดยมีค่า σ_a ($R = -1$) = 1.68 HV และสมบัติทางด้านความล้าหลังการทดลองยังมีค่าที่ต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิม	การวิจัยนี้ศึกษาความล้าของชิ้นงานเชื่อมเสียดทาน ซึ่งสามารถนำรูปแบบการทดลองมาและรูปแบบการวิเคราะห์ความล้า ความเค้นตกค้าง ซึ่งสำคัญต่อการทดสอบความล้าเป็นแนวทางในการเขียนงานวิจัยต่อไปได้
21	Yoshihiko Uematsu (2020) [51]	A6061-T6 เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304	Rotational speed 3000 rpm, Plunge speed 10 mm/sec.	ความเค้นตกค้างเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อมีค่าเฉลี่ยที่ -27.6 MPa รอยการเสียหายส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างที่สูงและความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมส่งผลต่อค่า ΔK_{eff}	การวิจัยนี้พบว่าความเค้นของการล้าที่ตกค้างมาจากความเร็วในการเชื่อมที่สูง
22	Igor Vysotskiy (2019) [52]	AA6061-T6	Frequency of 50 Hz, m load ratio of $R = 0.1$.	การทดสอบความล้าที่ความเค้นทดสอบต่ำให้ค่าให้ความแข็งแรงหลังการทดสอบสูงที่ 210 MPa ในทางตรงกันข้ามความเค้นทดสอบที่สูง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงหลังการทดสอบที่ต่ำ มีค่าน้อยกว่า 70 MPa	การวิจัยนี้พบว่าความล้าเปลี่ยนแปลงไปตามวัฏจักรการทดสอบ
23	Kittima Sillapasa (2014) [53]	อะลูมิเนียมเกรด 6N01	Shoulder tool 20 mm, pin 12 mm, rotated at 500 rpm, welding speed at 400 mm/min, stress ratio 0.1, frequency 20 Hz	บริเวณอิทธิพลกระแทกร้อนด้านแอดวานซ์ (Advancing side) มีความเค้นตกค้างมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ในทำนองเดียวกันพบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงให้เห็นว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีค่าแข็งแรงกว่าบริเวณอื่น ๆ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคแบบเกรนหยาบส่งผลที่ไม่ดีต่อพฤติกรรมความล้าและสมบัติทางด้านอื่น ๆ หลังการทดลอง	การวิจัยนี้ศึกษาความล้าของชิ้นงานเชื่อมเสียดทาน ซึ่งสามารถนำรูปแบบการทดลองมาเป็นแนวทางในการเขียนงานวิจัยต่อไปได้

ตารางที่ 2.3 ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง (ปี)	วัสดุที่ใช้	ตัวแปรในการทดลอง	ข้อสังเกตและการค้นพบ	สรุปข้อแตกต่างงานวิจัย
ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์					
24	Mir Mehrdad Hosseini (2016) [20]	Al5052	Welding speeds 10, 20, and 40 mm/min and rotational speed of 710 rpm	การสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ของความร้อนพบว่าอัตราการเย็นตัวและการลดลงของแรงกระทำที่เหมาะสมหลังการเชื่อมส่งผลที่ดีต่อสมบัติทางกลและลักษณะโครงสร้างจุลภาคหลังการเชื่อม จากการคำนวณตาม Johnson-Cook แสดงให้เห็นว่าความเร็วหมุนเชื่อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบความร้อนที่เกิดขึ้น	การวิจัยนี้ค้นพบว่าการเย็นตัวที่เร็วส่งผลต่อการแทรกตัวของอากาศ ทำให้เป็นสาเหตุของข้อบกพร่อง
25	A.Rajasekar (2015) [54]	อะลูมิเนียม 2024 และ 6063	HyperXtrude program	แบบจำลองจากโปรแกรมไฮเปอร์เมส พบว่าบริเวณรอยเชื่อม (Nugget Zone) เกิดความร้อนสูงถึง 550 องศาเซลเซียส และแรงกดที่กระทำจากการเสียดทานอยู่ที่ 150 MPa	การวิจัยนี้ศึกษากระบวนการเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมเสียดทาน ซึ่งสามารถนำรูปแบบการวิเคราะห์มาเป็นแนวทางในการเขียนงานวิจัยต่อไปได้
26	Bahman Meyghani (2020) [55]	AA6061-T6	Finite volume methods software, computational solid mechanic software.	การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของความร้อนส่งผลให้เกิดการขยายตัวของผิวชิ้นงาน ซึ่งนำไปสู่อุณหภูมิสูงสุดเกือบ 300°C หลังจากเวลาเชื่อมที่ 3 วินาที ความร้อนที่เกิดขึ้นจะคงที่และเพิ่มขึ้นที่เวลามากขึ้นเนื่องจากความเร็วหมุนเชื่อมของวัสดุที่สูง นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการกระจายอุณหภูมิแบบไม่สมมาตรที่หน้าตัด เมื่อสิ้นสุดการเชื่อม (t = 12.8 วินาที) ในขณะที่เวลารวมในการเชื่อมที่ t = 19.6 วินาที	ผลการทดลองพบว่าการเปรียบเทียบแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานที่ดัดแปลงนั้นประสบความสำเร็จในการจำลองในสภาพการเคลื่อนที่เนื่องจากได้รูปแบบความเค้นที่สม่ำเสมอด้วยค่าสูงสุด 150 MPa

ตารางที่ 2.3 ข้อสังเกตและการค้นพบจากการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม (ต่อ)

ลำดับ	ผู้แต่ง (ปี)	วัสดุที่ใช้	ตัวแปรในการทดลอง	ข้อสังเกตและการค้นพบ	สรุปข้อแตกต่างงานวิจัย
27	Binnur Gören Kiral (2013) [56]	AA 6061-T6	ANSYS and HyperXtrude software	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากการจำลองการประมวลผลจาก การเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่าความร้อนที่เกิดจาก แรงเสียดทานระหว่างπάของเครื่องมือกวนและชิ้นงาน ใช้การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามเวลาใน หมุนของเครื่องมือกวนและความเร็วในการหมุนที่ เพิ่มขึ้น	การวิจัยนี้ศึกษาสามารถนำผลที่ได้ เชิงสมการทางความร้อนมา เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ศึกษาและ ยังสามารถนำวิธีการวิเคราะห์มาเป็น แนวทางได้

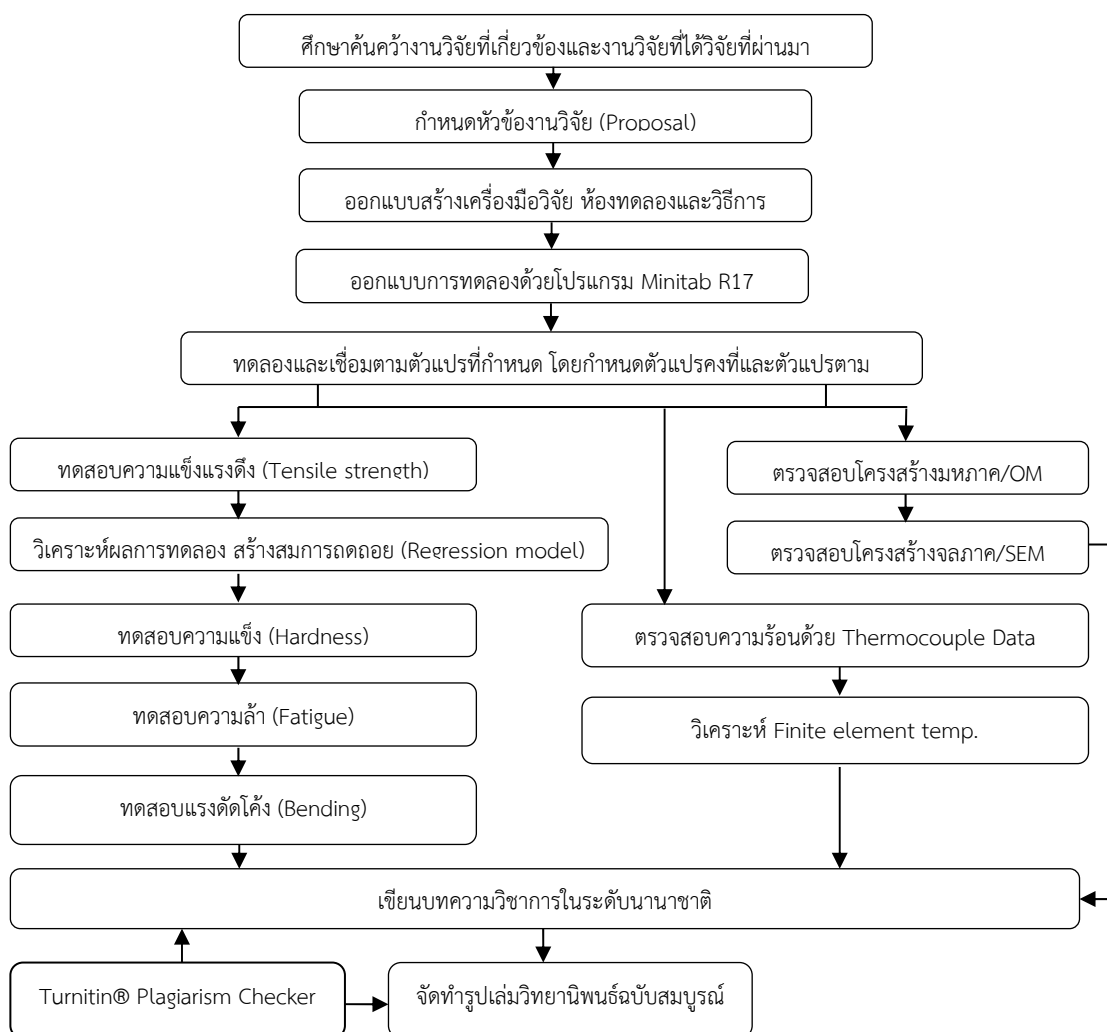
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้อะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6063 เป็นชิ้นงานทดลองเชื่อม กำหนดตัวแปรในการเชื่อมที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นวิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวิธีและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยสำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งของ SSM 6063 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเชื่อมเป็นอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งเกรด SSM 6063 ที่ได้พัฒนาจากการหล่อขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อแบบกึ่งของแข็งด้วยวิธีการ GISS เป็นการใส่แก๊สเฉื่อยผ่านแท่งกราไฟต์พูนในน้ำโลหะที่มีสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ผลิตเพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมขึ้นส่วนประตुरถยนต์ ล้อแม็ก เบรกรถยนต์ สามารถเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมหล่อ คือ อะลูมิเนียมหล่อเกรด A516 โดยใช้อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็งเกรด SSM 6063 มีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6063 ผ่านการหล่อขึ้นรูปในสถานะแบบกึ่งของแข็งที่อุณหภูมิถึง 650 องศาเซลเซียส จะใช้แก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราไฟต์พูน อัตราการไหล 14 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที ก่อนเทน้ำโลหะลงในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส แล้วอัดด้วยความดันประมาณ 350 บาร์ (Squeeze casting) ค้างไว้จนโลหะแข็งตัว ได้เป็นชิ้นงานแบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนา 20 มิลลิเมตร ความกว้าง 150 มิลลิเมตร และความยาว 150 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2 สำหรับสมบัติทางกลมีค่าความแข็งแรงดึงที่ 149 MPa และมีค่าความแข็งที่ 42 ถึง 55 HV ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 6063

เกรด	ส่วนผสมทางเคมี (weight %)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
6063	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20	0.25	0.15	0.35	Bal.
SSM 6063	0.62	0.36	0.26	0.39	0.66	0.38	0.18	0.77	Bal.



ภาพที่ 3.2 อะลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง SSM 6063

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.3.1 เครื่องเลื่อยสายพาน (Band Saw)

เครื่องเลื่อยสายพาน ยี่ห้อ TAIWAN รุ่น UE-712A ใช้ในการตัดแบ่งเพื่อเตรียมอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 และเตรียมชิ้นงานเชื่อมสำหรับการทดสอบแรงดึง โดยเครื่องเลื่อยสายพานมีระบบน้ำหล่อเย็นในการระบายความร้อนในขณะตัด เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเมื่อได้รับความร้อนจากการเลื่อย ใช้ในการตัด ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องเลื่อยสายพาน

3.3.2 เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine)

เครื่องกัดแนวตั้ง ยี่ห้อ T-TECH รุ่น M4 ใช้สำหรับการกัดปาดหน้าผิวอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 เพื่อเตรียมชิ้นงานเชื่อม นอกจากนี้เครื่องกัดแนวตั้งถูกประยุกต์ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องกัดแนวตั้ง

3.3.3 เครื่องกลึง (Lathe Machine)

เครื่องกลึง ยี่ห้อ JET รุ่น GHB-1340A ใช้สำหรับการกลึงอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องกลึง

3.3.4 เครื่องตัดไวคัท (Wire Cut Machine)

เครื่องตัดไวคัท ยี่ห้อ SODICK รุ่น VL400Q เป็นเครื่องตัดที่ใช้สำหรับตัดอะลูมิเนียมหล่อ กิ่งแข็ง เกรด 6063 เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบความล้า ซึ่งการตัดจะมีความละเอียดสูง ส่งผลให้ผิวรอยตัดมีความราบเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องตัดไวคัท

3.3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine)

เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Lloyd รุ่น EZ50 ใช้สำหรับทดสอบสมบัติทางกล เช่น แรงดึง แรงดัดโค้งของชิ้นงานหลังการเชื่อม เป็นเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) โดยการนำชิ้นทดสอบที่เตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8-04 ทดสอบการดึงและเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E190-14 เพื่อทดสอบการดัดโค้ง ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.3.6 เครื่องทดสอบความล้า (Fatigue Testing Machine)

เครื่องทดสอบความล้า ยี่ห้อ NARIN รุ่น NIR-FAT500-2 ใช้สำหรับการทดสอบชิ้นงานความล้าแบบดึง-กด ตามมาตรฐาน ASTM E466-15 ซึ่งจะใช้การสั่นขึ้นงานขึ้นลงจนชิ้นงานเกิดความล้าและขาดจากกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.3.7 เครื่องทดสอบความแข็ง (Microhardness Machine)

เครื่องทดสอบความแข็ง ยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MMT-X และยี่ห้อ Digicon รุ่น TH-320 ใช้สำหรับการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งจะใช้หัวกดเพชรที่มีมุมประมาณ 136 องศา กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบเพื่อให้เกิดรอย โดยแรงที่ใช้ในการกดอยู่ที่ 10 กิโลกรัม แล้ววัดค่าความแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.3.8 เครื่องขัดชิ้นงานทางโลหะวิทยา (Grinding-Polishing Machine)

เครื่องขัดชิ้นงานทางโลหะวิทยา ยี่ห้อ ROCKY รุ่น MP-2B ใช้สำหรับขัดชิ้นงานทางโลหะวิทยา ด้วยกระดาษทรายหรือผ้าสักหลาด ใช้สำหรับการขัดเตรียมผิวหน้าชิ้นงานก่อนการนำชิ้นงานไปดูภาพโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค ตัวเครื่องจะมีระบบน้ำทำความสะอาดชิ้นงานในระหว่างที่กำลังขัดชิ้นงาน ซึ่งเครื่องสามารถปรับรอบได้ด้วยระบบอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เครื่องขัดชิ้นงานทางโลหะวิทยา

3.3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy)

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยี่ห้อ Optika รุ่น B-382PHi-ALC ซึ่งมีกำลังขยายที่สูง โดยมีกำลังขยายอยู่ที่ช่วงระหว่าง 50-500 เท่า ใช้ในการดูภาพโครงสร้างจุลภาค เพื่อตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและใช้สำหรับตรวจหาจุดบกพร่องบริเวณรอยเชื่อม โดยตัวกล้องจะต่อกับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อส่งถ่ายข้อมูลจากการถ่ายภาพ ทำให้สามารถเก็บภาพได้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.3.10 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ FEI-Quanta รุ่น 400 เป็นกล้องที่มีกำลังขยายที่สูง โดยมีกำลังขยายอยู่ที่ช่วงระหว่าง 10-50000 เท่า ใช้สำหรับการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคขนาดเล็ก จุดบกพร่องและลักษณะการกระจายตัวของอะตอม นอกจากนั้นใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณธาตุของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.4.1 ขั้นตอนการผลิตอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง SSM 6063

การเตรียมแท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063 (AA 6063 Billet) เริ่มจากการเตรียมแท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063 ให้มีขนาด 60x50x30 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งจะมีน้ำหนักเฉลี่ยต่อก้อน 2.5 กิโลกรัม แท่งอะลูมิเนียมจะถูกเตรียมไว้สำหรับการหล่อขึ้นรูปเป็นวัสดุกิ่งของแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 แท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063

จากนั้นนำแท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063 ที่เตรียมเรียบร้อยแล้วใส่ในเตาหลอมแบบไฟฟ้า (Induction furnace) ปรับตั้งอุณหภูมิให้อะลูมิเนียมหลอมละลาย โดยใช้ระยะเวลาในการหลอมโดยประมาณ 40 นาที การหลอมแต่ละครั้งใช้แท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063 น้ำหนัก 20 กิโลกรัม ดังแสดงในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 แท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063 ใส่ในเตาหลอมแบบไฟฟ้า

เมื่อแท่งอะลูมิเนียม เกรด 6063 หลอมละลายจนอยู่ในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิหลอม 670 องศาเซลเซียส ในขณะหลอมอะลูมิเนียม เกรด 6063 ต้องตรวจสอบสิ่งปนเปื้อนในน้ำโลหะ เพื่อป้องกันการฝังตัวในเนื้อวัสดุ ซึ่งอาจทำให้วัสดุมีความแข็งแรงที่ต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 น้ำโลหะอยู่ในสถานะกึ่งของแข็ง

การทำความสะอาดน้ำโลหะก่อนการหล่อกึ่งของแข็งมีความสำคัญมาก เพราะต้องการให้วัสดุไม่มีสิ่งปนเปื้อนเข้าไปในเนื้อวัสดุ อย่างไรก็ตาม การใช้ฟลักซ์ช่วยดึงสิ่งปนเปื้อนในน้ำโลหะ ซึ่งต้องมีการอุ่นไล่ความชื้นของฟลักซ์ก่อน ดังแสดงในภาพที่ 3.16(ก) เนื่องจากถ้ามีความชื้นอาจส่งผลให้ระเบิดได้ ฟลักซ์ที่เติมลงไปจะทำให้หน้าที่ดูดอากาศขึ้น สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำโลหะให้ลอยขึ้นมาผิวหน้าโลหะ แล้วจึงตักคราบสกปรกหรือสิ่งปนเปื้อนออกจากผิวหน้าโลหะ ดังแสดงในภาพที่ 3.16(ข)



(ก) การเติมฟลักซ์

(ข) การตักสิ่งปนเปื้อนออกจากผิวหน้าโลหะ

ภาพที่ 3.16 การกำจัดสิ่งปนเปื้อน

น้ำโลหะที่หลอมละลายในสถานะของเหลวถูกตักขึ้นมาหาอุณหภูมิของแข็ง (อุณหภูมิ Slurry) โดยใช้เครื่องรุ่น GISS Ver. 1 ซึ่งอุณหภูมิที่น้ำโลหะอะลูมิเนียมเกรด 6063 เป็น Slurry จะอยู่ที่อุณหภูมิหลอม 650 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อปล่อยฟองแก๊สไหลผ่านจะส่งผลให้อะลูมิเนียมเกรด 6063 มีเนื้อโลหะในสถานะกึ่งของแข็งที่ทรงตัวได้ โดยเนื้อวัสดุจะละเอียดมีลักษณะคล้ายเค้กหรือเนื้อไอศกรีม ดังแสดงในภาพที่ 3.17(ก และ ข) ตามลำดับ



(ก) อุณหภูมิของแข็ง

(ข) เนื้อวัสดุจะละเอียดมีลักษณะคล้ายเค้ก

ภาพที่ 3.17 การหาอุณหภูมิ Slurry

สำหรับการหล่อกิ่งของแข็งจะเริ่มจากการตักน้ำโลหะในสภาวะกิ่งของแข็ง (ตามปริมาณที่ต้องการ) จากนั้นให้นำปล่อยฟองแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราฟไฟต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ด้วยอัตราการไหลของแก๊สที่ 14 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที (แรงดันแก๊ส 5.6 บาร์) ฟองแก๊สไนโตรเจนจะทำให้ น้ำโลหะเกิดการสั่น ส่งผลให้เฟสเดนไดรต์ (บางส่วนของแข็งตัว) เกิดการแตกหักและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบก้อนกลม ดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 การปล่อยฟองแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งกราฟไฟต์

เมื่อเวลาในการปล่อยฟองแก๊สไนโตรเจนครบตามกำหนด ให้นำน้ำโลหะกิ่งของแข็งไปเทในแบบแม่พิมพ์เพื่อหล่ออัดชิ้นงานให้มีความหนาแน่นแข็งแรง ดังแสดงในภาพที่ 3.19 ซึ่งแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จากนั้นอัดด้วยความดันประมาณ 350 บาร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.20 ค้างไว้จนโลหะแข็งตัวทั้งชิ้นงาน



ภาพที่ 3.19 การเทน้ำโลหะกึ่งของแข็งไปในแบบแม่พิมพ์



ภาพที่ 3.20 อัดด้วยความดันประมาณ 350 บาร์

เมื่อชิ้นงานแข็งตัวหลังการกดอัดเรียบร้อยแล้ว หยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์พักไว้เพื่อเตรียมชิ้นงานหล่อกึ่งของแข็งไปทดลอง ซึ่งขั้นตอนในการหล่ออะลูมิเนียมกึ่งของแข็ง เกรด 6063 เสร็จอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 การหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

3.4.2 ขั้นตอนเตรียมชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน

สำหรับการเตรียมชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน เริ่มจากการเตรียมแผ่นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 จากนั้นตัดแบ่งอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ให้ได้เป็น 4 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 3.22(ก) แล้วนำชิ้นงานแต่ละชั้นที่ตัดไว้ไปปรับขนาดผิวด้วยเครื่องกัดแนวตั้ง ดังแสดงในภาพที่ 3.22(ข) ตามลำดับ



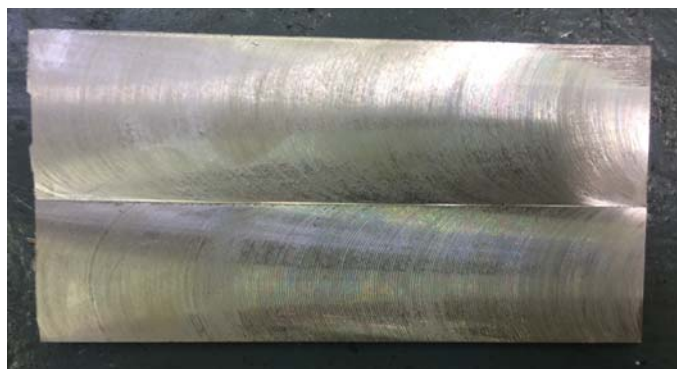
(ก) การตัดแผ่นอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง
เกรด 6063



(ข) การปรับขนาดผิวอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง
เกรด 6063

ภาพที่ 3.22 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การปรับผิวชิ้นงานสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะปรับชิ้นงานให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ขนาด 75x150x6 ลูกบาศก์กิโลเมตร (กว้างxยาวxสูง) และเมื่อได้ขนาดตามที่ต้องการแล้ว จะต้องนำชิ้นงานตะไบลบครีบริบบริเวณขอบชิ้นงานที่เกิดมาจากการกัดออก เพื่อให้สามารถวางต่อชิ้นชิ้นงานในการนำไปเชื่อมเสียดทานแบบกวนได้แนบสนิท ดังแสดงในภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 ชิ้นงานสำหรับเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.4.3 ขั้นตอนการออกแบบเครื่องมือเชื่อม

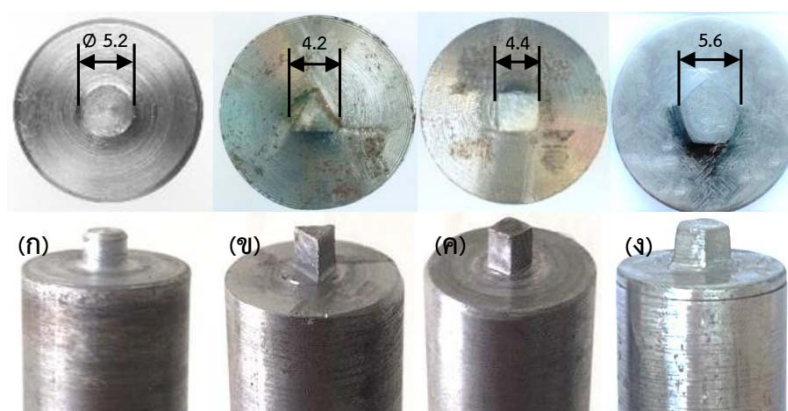
สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์ช่วยในการเชื่อม 2 ชนิด ได้แก่ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม (Fixture Welding) และเครื่องมือกวน (Tool Welding) ซึ่งทั้ง 2 ชนิดมีการออกแบบดังนี้

อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ เนื่องจากชิ้นงานจำเป็นต้องถูกจับยึดให้แน่น เพื่อป้องกันการหลุดออกจากเครื่องมือจับยึดในขณะที่เชื่อม จากแรงเสียดทานที่กระทำสูง หลักการออกแบบเครื่องมือจับยึดชิ้นงาน ประกอบด้วย ฐานเครื่องมือจับยึดชิ้นงาน แผ่นรองชิ้นงาน แผ่นป้องกันความร้อนและชุดจับยึด ฐานเครื่องมือจับยึดชิ้นงานมีการทำร่องบากด้านล่างของฐาน เพื่อให้สามารถประยุกต์ในการใช้งานร่วมกับเครื่องกัดแนวตั้งได้ แผ่นรองชิ้นงานทำร่องบากด้านข้างทั้งสองของแผ่นรอง เพื่อป้องกันชิ้นงานเกิดการสะบัด หลุดออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมในขณะที่เชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อมต้องมีความแข็งแรงแน่นหนา เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการเคลื่อนที่ได้ อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 ดังแสดงในภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเชื่อม

เครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนผลิตจากเหล็กเครื่องมือ เกรด H13 ซึ่งมีสมบัติที่ทนต่อการสึกหรอ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ลักษณะของเครื่องมือกวน (Pin) ที่ทำการทดลอง ได้แก่ แบบทรงกระบอก แบบทรงสามเหลี่ยม แบบทรงสี่เหลี่ยมและแบบทรงห้าเหลี่ยม โดยหัวกวน ขนาดที่เท่ากันทุกแบบ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตร ความยาวหัวกวน 4.8 มิลลิเมตร โดยค่าความยาวของเครื่องมือกวนจะคำนวณมาจากค่า 80 เปอร์เซนต์ของความหนาชิ้นงานเชื่อม สำหรับป่าของเครื่องมือกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และเครื่องมือกวนมีความยาว 100 มิลลิเมตร ซึ่งรูปทรงของเครื่องมือกวนแต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 3.25 (ก-ง)



ภาพที่ 3.25 ลักษณะของเครื่องมือกวนที่ใช้ในการเชื่อม

3.5 การกำหนดตัวแปรและการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะใช้โปรแกรม Minitab R17 เป็นเครื่องมือสำหรับออกแบบการทดลอง เพื่อประเมินตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อแข็ง เกรด 6063 นั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน สามารถแบ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ประกอบด้วย รูปแบบของเครื่องมือกวน ความเร็วรอบในการหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม แรงกด มุมเอียงและชนิดของวัสดุที่นำมาเชื่อม ในงานวิจัยครั้งนี้จะศึกษาปัจจัยที่ควบคุมได้สามปัจจัย คือ ความเร็วรอบในการหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อมและรูปแบบของเครื่องมือกวนที่แตกต่างกัน ซึ่งทั้งสามปัจจัยถูกออกแบบให้เป็นตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนได้ ผลการศึกษาจะวิเคราะห์ตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของรอยเชื่อมและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตาม ปัจจัยอื่นๆ ก็ถูกกำหนดในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ด้วย โดยกำหนดให้เป็นปัจจัยคงที่ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ได้แก่ ความหนาของวัสดุ มุมเอียง เวลาในการกดแช่ก่อนและหลังการเชื่อม ระยะกดลึก อัตราเร็วในการกด และลักษณะการต่อชิ้นงานแบบต่อชน เป็นต้น สำหรับปัจจัยที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ถูกกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลอง ทั้งความเร็วรอบในการเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อมและรูปแบบของเครื่องมือกวน ดังต่อไปนี้

3.5.1 ปัจจัยหลักในการทดลอง

3.5.1.1 ปัจจัยหลักที่ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้มีสามปัจจัย แต่ละปัจจัยมีระดับการทดลองดังนี้

- 1) ความเร็วรอบในการหมุนเชื่อมมี 4 ระดับ คือ 1110, 1320, 1750 และ 2200 รอบต่อนาที
- 2) ความเร็วเดินเชื่อมมี 4 ระดับ คือ 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที
- 3) รูปทรงของเครื่องมือกวนมี 4 ระดับ คือ แบบทรงกระบอก แบบทรงสามเหลี่ยม แบบทรงสี่เหลี่ยม และแบบทรงห้าเหลี่ยม ตามลำดับ

สำหรับความเร็วรอบในการหมุนเชื่อมและและความเร็วเดินเชื่อมมาจากการทดลองเบื้องต้น มีค่าในช่วง 1000 ถึง 2220 รอบต่อนาที และมีค่าช่วง 30-120 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นค่าที่ถูกกำหนดในเครื่องกัด สำหรับรูปทรงของเครื่องมือกวน 4 ระดับ มาจากการศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้

3.5.1.2 ปัจจัยที่กำหนดให้คงที่ในการทดลอง แต่ละปัจจัยกำหนดดังนี้

- 1) ขนาดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 มีขนาด 75x150x6 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
- 2) ชนิดของวัสดุเครื่องมือกวนผลิตจากเหล็กเครื่องมือ เกรด H13
- 3) มุมเอียง 3 องศา
- 4) เวลาในการกัดแช่ก่อนและหลังการเชื่อม 60 วินาที
- 5) ระยะกดลึกที่ 0.6 มิลลิเมตร
- 6) อัตราเร็วในการกัดที่ 2.7 มิลลิเมตรต่อนาที
- 7) ชิ้นงานแบบต่อชน

3.5.2 การกำหนดขนาดตัวอย่าง

การกำหนดขนาดตัวอย่าง (n) ที่ใช้สำหรับทดลอง เพื่อที่จะได้ขนาดของตัวอย่างที่สามารถเป็นตัวแทนของประชากรได้ ซึ่งในการกำหนดขนาดตัวอย่าง ถ้าสามารถกำหนดได้พอเหมาะก็จะทำให้การวิจัยนั้นมีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ ลดการทดลองที่สิ้นเปลืองได้ ดังนั้นในการกำหนดขนาดตัวอย่างจึงมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

Type I Error (Alpha: α) = 0.05

Power (1- β) = 0.95

Number of Center Point = 0

Estimate

Minimum Effect (D)

การทดลองนี้ใช้ข้อมูลค่า Estimate และ Minimum Effect (D) ที่ได้จากการหาค่าจากการทดลองเบื้องต้น เพื่อหาค่าดังกล่าว โดยทำการทดลองเชื่อมชิ้นงานและกำหนดค่าตัวแปรในการเชื่อมด้วยวิธีการวางแผนการทดลองแบบสุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ในการเชื่อมเบื้องต้นเพื่อประเมินแนวโน้มของความเป็นไปได้ในการเชื่อม ทำการทดลองที่ 3 ตัวแปร ระดับการทดลองที่ 4 ระดับต่อหนึ่งปัจจัยในการทดลอง เป็นจำนวน 64 ชิ้นงานเชื่อม หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปเตรียม

เป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M เก็บข้อมูลค่าแรงดึงต่ำสุดและค่าแรงดึงสูงสุด เพื่อหาค่าความแตกต่างของข้อมูลและใช้สำหรับกำหนดเป็นค่า Minimum Effect หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab R17 เพื่อประมวลผลทางสถิติ เพื่อหาค่า Estimate และขนาดของตัวอย่าง (n) ที่จะใช้ถูกกำหนดใช้ในการทดลอง โดยการออกแบบการทดลองแบบสุ่มของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าตัวแปรในการเชื่อม

ลำดับ	ตัวแปร	ตัวย่อ	หน่วย	ระดับ			
				-1	-2	-3	-4
1	ความเร็วรอบ	<i>R</i>	rpm	1100	1320	1750	2220
2	ความเร็วเดินเชื่อม	<i>W</i>	mm/min	30	60	90	120
3	รูปแบบเครื่องมือ	<i>T</i>	---	ทรงกระบอก	สามเหลี่ยม	สี่เหลี่ยม	ห้าเหลี่ยม

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองแบบสุ่มของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063

ลำดับที่	การออกแบบ			ลำดับที่	การออกแบบ			ลำดับที่	การออกแบบ		
	<i>R</i>	<i>W</i>	<i>T</i>		<i>R</i>	<i>W</i>	<i>T</i>		<i>R</i>	<i>W</i>	<i>T</i>
1	-4	-4	-1	23	-4	-2	-1	45	-4	-3	-1
2	-3	-2	-4	24	-3	-2	-1	46	-1	-1	-2
3	-2	-4	-4	25	-2	-2	-3	47	-2	-3	-1
4	-4	-4	-3	26	-2	-3	-4	48	-1	-3	-4
5	-4	-2	-3	27	-1	-4	-2	49	-1	-2	-1
6	-1	-4	-3	28	-2	-1	-1	50	-3	-2	-3
7	-3	-4	-4	29	-2	-2	-1	51	-2	-3	-3
8	-3	-2	-2	30	-2	-2	-4	52	-1	-4	-1
9	-1	-2	-3	31	-3	-4	-1	53	-4	-1	-4
10	-2	-1	-2	32	-1	-1	-1	54	-4	-1	-2
11	-2	-1	-4	33	-4	-3	-4	55	-2	-2	-2
12	-1	-3	-2	34	-2	-3	-2	56	-2	-4	-2
13	-1	-1	-3	35	-4	-1	-3	57	-3	-4	-2
14	-1	-2	-2	36	-2	-4	-1	58	-3	-3	-4
15	-4	-1	-1	37	-3	-4	-3	59	-2	-4	-3
16	-3	-3	-2	38	-3	-1	-1	60	-3	-1	-3
17	-1	-1	-4	39	-3	-1	-2	61	-1	-3	-3
18	-1	-2	-4	40	-3	-3	-1	62	-4	-2	-4
19	-4	-3	-3	41	-4	-4	-4	63	-3	-3	-3

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองแบบสุ่มของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 (ต่อ)

ลำดับที่	การออกแบบ			ลำดับที่	การออกแบบ			ลำดับที่	การออกแบบ		
	R	W	T		R	W	T		R	W	T
20	-1	-3	-1	42	-2	-1	-3	64	-4	-3	-2
21	-1	-4	-4	43	-4	-2	-2				
22	-3	-1	-4	44	-4	-4	-2				

3.6 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่อาศัยหลักการให้ความร้อนจากการเชื่อมด้วยการเสียดทาน คือ ความร้อนจากการเสียดทานทำให้ชิ้นงานเชื่อมติดกัน จากการสัมผัสกันของผิวชิ้นงานกับปากของหัวกวน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นระหว่างผิวสัมผัสจนชิ้นงานอ่อนตัวและทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะอยู่ในสภาพเสียรูปถาวร ทั้งนี้ความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในขณะที่เชื่อมจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของวัสดุเชื่อม ความหนาของชิ้นงาน ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม รูปร่างของเครื่องมือกวนและการกำหนดขั้นตอนต่าง ๆ ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังนี้

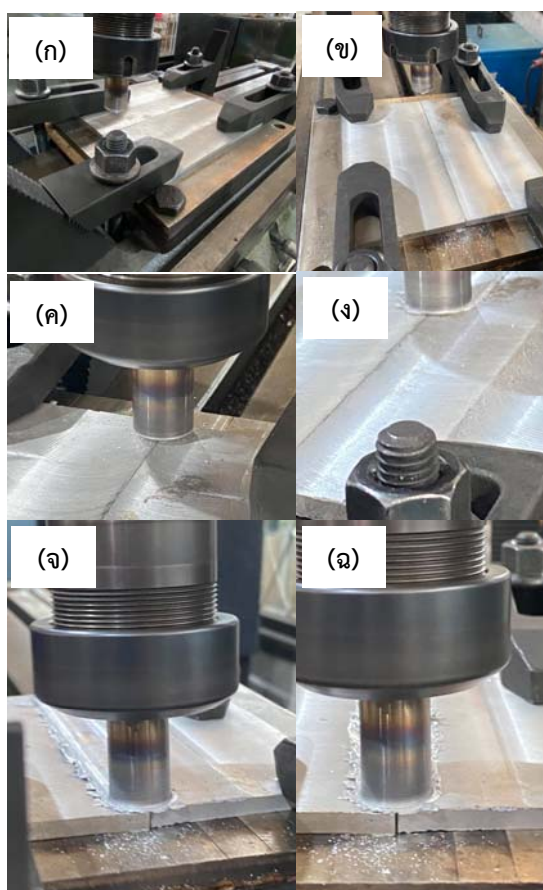
3.6.1 การติดตั้งเครื่องมืออุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จะทำการจับยึดชิ้นงานติดกับแผ่นรองของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน โดยสิ่งสำคัญต้องจับยึดอย่างแน่นหนา ในขณะที่ตัวจับยึดชิ้นงานจำเป็นต้องยึดติดกับโต๊ะของเครื่องกัด เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการเชื่อม และหัวกวนยึดติดกับเพลากลั่นหมุน โดยการทดลองจะกำหนดหัวกวนหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

3.6.2 การปรับมุมเอียงของเครื่องมือเชื่อมโดยประยุกต์เอาเครื่องกัดแนวตั้งมาเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวนซึ่งจำเป็นต้องปรับหัวเครื่องกัดให้เอียงทำมุม 3 องศา กับหน้าขึ้นทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 การปรับมุมเอียงของเครื่องมือเชื่อม

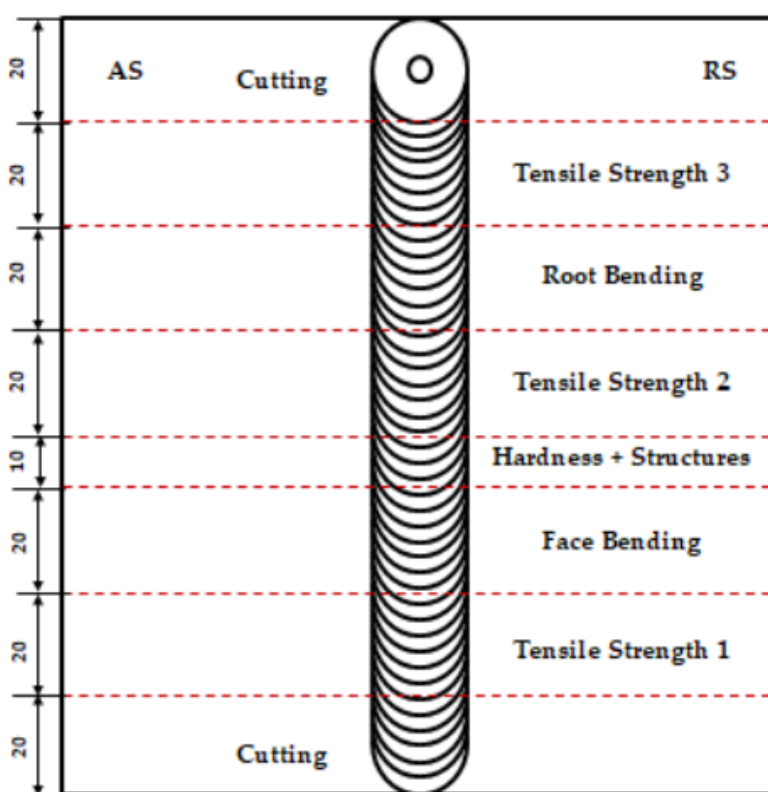
3.6.3 จากนั้นจับยึดชิ้นงานแบบต่อชนและจัดยึดชิ้นงานให้แน่น โดยการจับยึดทั้งสี่มุมของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 3.27(ก) ปรับตำแหน่งของเครื่องมือกลวนให้เคลื่อนที่เข้าไปยังขอบชิ้นงานเชื่อม ซึ่งห่างจากขอบชิ้นงานบริเวณจุดเริ่มต้น ประมาณ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.27(ข) จากนั้นเครื่องมือกลวนให้บริเวณปลายเครื่องมือกลวนสอดเข้าไปในเนื้อโลหะ จนกระทั่งบ่าเครื่องมือกลวนสัมผัสกับผิวด้านชิ้นงานเชื่อมในบริเวณรอยต่อ ช่วงนี้จะเกิดการเสียดทานจนเกิดความร้อนสะสมขึ้น ส่งผลให้เนื้อโลหะเกิดการอ่อนตัว ดังแสดงในภาพที่ 3.27(ค) ในขณะที่เกิดการเสียดทานจะคงเวลาในการกดแซ่ไว้ที่เวลา 60 วินาที เพื่อให้ความร้อนเกิดการกระจายของความร้อนและแผ่ไปยังชิ้นงานเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 3.27(ง) จากนั้นเริ่มควบคุมตัวแปรในการเชื่อมแบบอัตโนมัติ ตามตัวแปรที่กำหนด คือ ความเร็วรอบ 1110, 1320, 1750 และ 2220 รอบต่อนาที ความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในภาพที่ 3.27(จ) สุดท้ายเมื่อเครื่องมือกลวนเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของการเชื่อม จนเมื่อสิ้นสุดการเชื่อม จะรักษาเวลาในการกดแซ่ไว้ 60 วินาที เพื่อให้การไหลวนที่ดีของเนื้อวัสดุบริเวณปลายชิ้นงานเชื่อม นำไปสู่ชิ้นงานเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.27(ฉ) ตามลำดับ



ภาพที่ 3.27 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.7 การทดสอบชิ้นงานหลังการเชื่อม

ชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนถูกเตรียมเพื่อนำไปทดสอบแรงดึง แรงดัดโค้ง ความแข็ง และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคตามตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.28 สำหรับการทดสอบสมบัติทางกลด้วยการทดสอบแรงดึง เพื่อให้สามารถทราบถึงความแข็งแรงของรอยต่อชิ้นงานที่ได้จากการเชื่อมตามปัจจัยต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ จะเตรียมชิ้นงาน จำนวน 3 ชิ้น จากตำแหน่งการตัดแบ่งที่แตกต่างกัน ซึ่งจะตัดแบ่งขนาด 20x150x6 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามขวางกับแนวเชื่อม ในขณะที่การเตรียมชิ้นงานทดสอบการดัดโค้งจะตัดตามขนาดและรูปร่างของชิ้นงานในลักษณะเดียวกับการทดสอบแรงดึง แต่จะตัดชิ้นงานที่จำนวน 2 ชิ้น ต่อการทดลอง สุดท้ายการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะตัดชิ้นงานแต่ละปัจจัย ๆ ละ 1 ชิ้น ที่ขนาด 10x150x6 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับจุดเริ่มต้นของการเชื่อมและจุดสุดท้ายของการเชื่อมจะถูกตัดแบ่งออกจากการทดสอบ เนื่องจากต้องการบริเวณที่มีความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมไปทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ซึ่งบริเวณดังกล่าวมักจะมีจุดบกพร่องและมีรูที่เกิดจากปลายเครื่องมือกวน

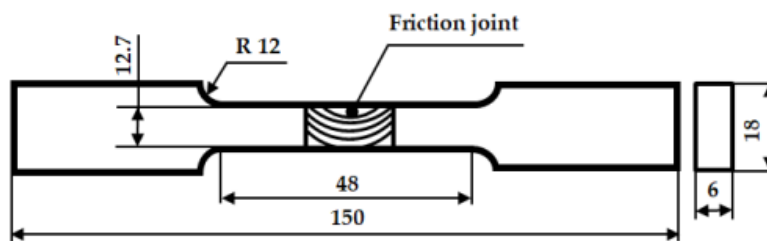


ภาพที่ 3.28 ลักษณะการตัดแบ่งชิ้นทดสอบตำแหน่งต่าง ๆ

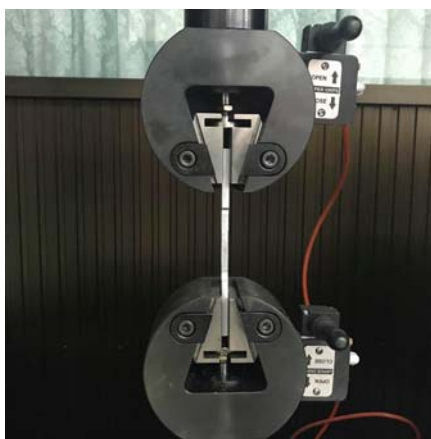
3.7.1 การทดสอบแรงดึง

ชิ้นงานทดสอบแรงดึงจะถูกเตรียมด้วยเครื่องกัด เพื่อกำหนดรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8-04 mm ดังแสดงในภาพที่ 3.29 โดยการเตรียมจะตัดตามขวางกับรอยเชื่อม ชิ้นงานหลังเตรียมเสร็จจะนำไปทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง ด้วยความเร็วในการดึง

1.27×10^{-2} มิลลิเมตรต่อวินาที ผลที่ได้จากการดึงจะศึกษาความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวชิ้นงาน หลังจากการดึง ดังแสดงในภาพที่ 3.30



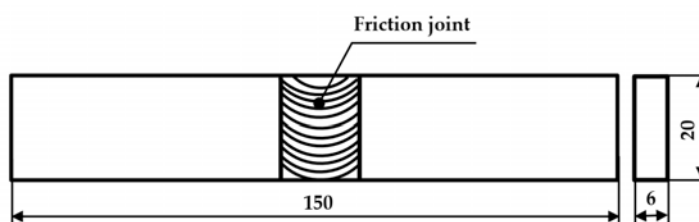
ภาพที่ 3.29 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8-04 mm



ภาพที่ 3.30 การทดสอบแรงดึง

3.7.2 การทดสอบแรงดัดโค้ง

การทดสอบแรงดัดโค้งเพื่อพิจารณาความเหนียวของชิ้นงานเชื่อม จะเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E190-14 ดังแสดงในภาพที่ 3.31 ชิ้นงานถูกเตรียมในสภาวะการทดลองเชื่อมละ 2 ชิ้น จากนั้นดัดโค้งชิ้นงานทั้งด้านหน้า (Face) และด้านหลังแนวเชื่อม (Root) ผลที่ได้จะประเมินการเกิดรอยแตกหักหลังการทดสอบและนำมาวิเคราะห์ค่าความเหนียวของชิ้นงานเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 3.32



ภาพที่ 3.31 ชิ้นงานทดสอบแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM E190-14



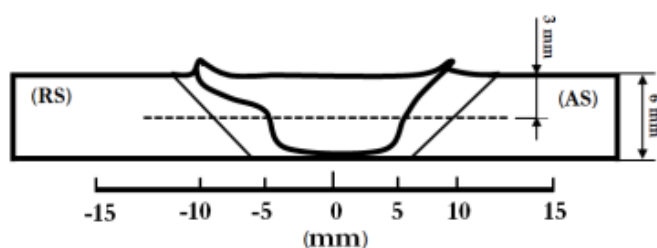
ภาพที่ 3.32 การทดสอบแรงดัดโค้ง

3.7.3 การทดสอบความแข็ง

สำหรับชิ้นงานทดสอบความแข็งจะเป็นการทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Tested) เป็นหาค่าความแข็งของรอยเชื่อม ซึ่งลักษณะชิ้นงานทดสอบความแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 3.33 หัวกดทำจากเพชรเป็นรูปทรงพีระมิด ขนาดมุม 136 องศา กดทดสอบความแข็งบริเวณพื้นที่ตามยาวหน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1.5 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 10 กิโลกรัมแรง และกดแช่ที่เวลา 10 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 3.34 แล้วคำนวณหาค่าความแข็งจากสมการที่ 3.2

$$\text{สมการ HV} = \frac{1.854P}{d^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vickers (kgf/mm^2)
 P คือ แรงกด (kgf)
 D คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย



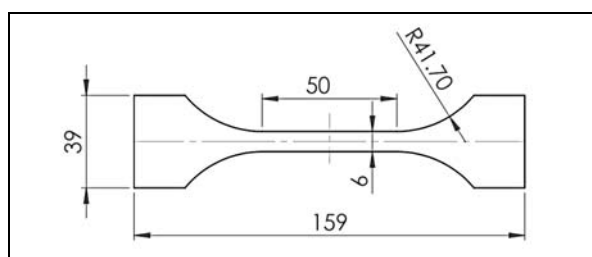
ภาพที่ 3.33 ตำแหน่งการกดทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 3.34 การทดสอบความแข็งแรงบริเวณรอยเชื่อม

3.7.4 การทดสอบความล้า

การเตรียมชิ้นงานทดสอบความล้าจะเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E466-15 (ภาพที่ 3.35) อย่างไรก็ตามชิ้นงานทดสอบความล้าที่นำมาทดสอบ มาจากตัวแปรที่ได้วิเคราะห์ความเหมาะสมในการเชื่อมด้วยการประเมินผลการทดสอบแรงดึงที่มีค่ามากที่สุดมาประกอบการทดสอบความล้า ผลที่ได้จะเปรียบเทียบกับเนื้อวัสดุเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 เพื่อให้สามารถทราบถึงสมบัติด้านความล้า ดังแสดงในภาพที่ 3.36



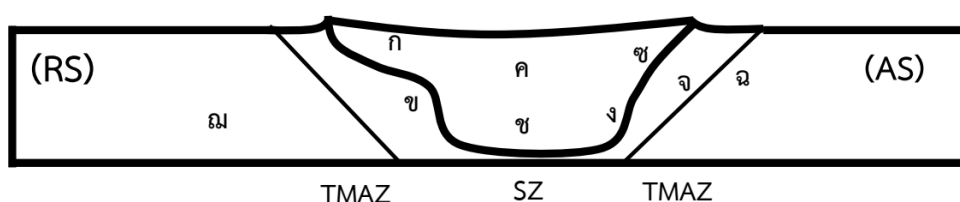
ภาพที่ 3.35 ชิ้นงานทดสอบความล้าตามมาตรฐาน ASTM E466-15



ภาพที่ 3.36 การทดสอบความล้า

3.7.5 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ชิ้นงานหลังจากทำการเชื่อมในแต่ละตัวแปรแล้ว จะนำชิ้นงานบางส่วนมาศึกษาคุณสมบัติทางโลหะวิทยา เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างในระดับมหภาค (Macrostructure) และโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของแต่ละตัวแปรของการเชื่อมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและจะนำชิ้นงานที่เหมาะสมที่สุดไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์ธาตุด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 3.37

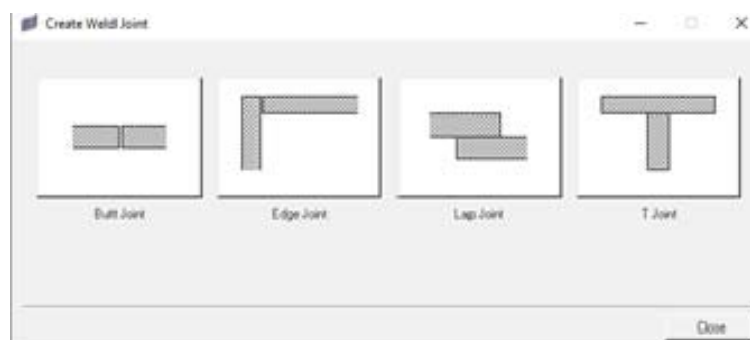


ภาพที่ 3.37 ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

เริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทราย เบอร์ 220, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นผิวงานที่ผ่านการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ จะถูกขัดละเอียดจนงานหยาบที่หุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยใช้ผงขัดอะลูมินา ที่มีขนาดอนุภาค 5.0, 1.0 และ 0.3 ไมโครเมตร เป็นวัสดุขัดผิวหน้าชิ้นงาน เพื่อช่วยขัดผิวของชิ้นงานทดสอบให้เรียบและก่อนนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ชิ้นงานถูกกัดกรดบริเวณผิวหน้ารอยขีดด้วยสารละลายเคลเลอร์ (Keller's Reagent) สารละลายเคลเลอร์ ประกอบด้วย น้ำ ไฮโดรคลอริก ไนตริก และไฮโดรฟลูออริก ผสมในสัดส่วน 190 : 3 : 5 : 2 ส่วน ตามลำดับ การกัดผิวหน้ารอยเชื่อมใช้เวลา 5-10 วินาที และทำให้โลหะเป่าให้ผิวหน้าชิ้นงานจนแห้ง สุดท้ายก็นำไปตรวจดูโครงสร้างจุลภาคในตำแหน่งที่สนใจต่อไป

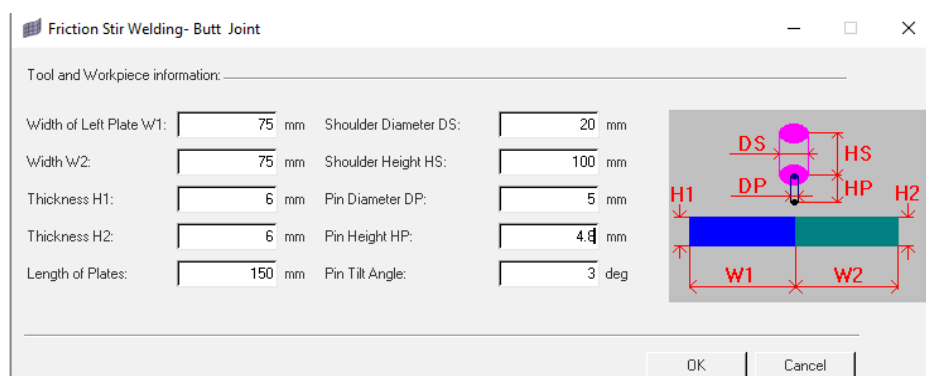
3.8 การวิเคราะห์ชิ้นงานเชื่อมด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะเชื่อม จะใช้โปรแกรม Hypermesh 2019 เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณต่าง ๆ ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ซึ่งโปรแกรม Hypermesh 2019 จะมีโหมดการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่สามารถเลือกวัสดุของชิ้นงาน ตัวแปรการเชื่อม เครื่องมือส่วนประกอบของการเชื่อมที่กำหนด ทำให้มีความสามารถในการวิเคราะห์ผลได้อย่างแม่นยำ สำหรับการกำหนดปัจจัยในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 การจำลองการเชื่อมด้วยโปรแกรม Hypermesh 2019 ใช้ตัวแปรที่เหมาะสมจากการทดลองมาวิเคราะห์ผลของความร้อน โดยความเร็วรอบในการเชื่อมอยู่ที่ 1320 รอบต่อนาที และความเร็วในการเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดหลังจากการทดสอบ เริ่มจากจำลองการเชื่อม เข้าไปที่โปรแกรม Hypermesh 2019 จากนั้นไปที่ชุดคำสั่ง Hyperweid ซึ่งจะมีชุดคำสั่งย่อยในโหมด Friction stir welding เมื่อเพิ่มชุดคำสั่งแล้วให้ดำเนินการต่อไปที่ชุดคำสั่ง Create weld joint จากนั้นเลือกรูปแบบการต่อชนของชิ้นงานในชุดคำสั่ง Butt joint ซึ่งเป็นการเชื่อมแบบรอยต่อชน ดังแสดงในภาพที่ 3.38



ภาพที่ 3.38 การเลือกรูปแบบรอยต่อชนแนวเชื่อมจากโปรแกรม Hypermesh 2019

ต่อมากำหนดขนาดของชิ้นงานของอะลูมิเนียม (ความกว้าง X ความยาว X ความสูง) ตามแบบงานทดลอง และกำหนดขนาดของเครื่องมือกลึง มุมองศาของการเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 3.39

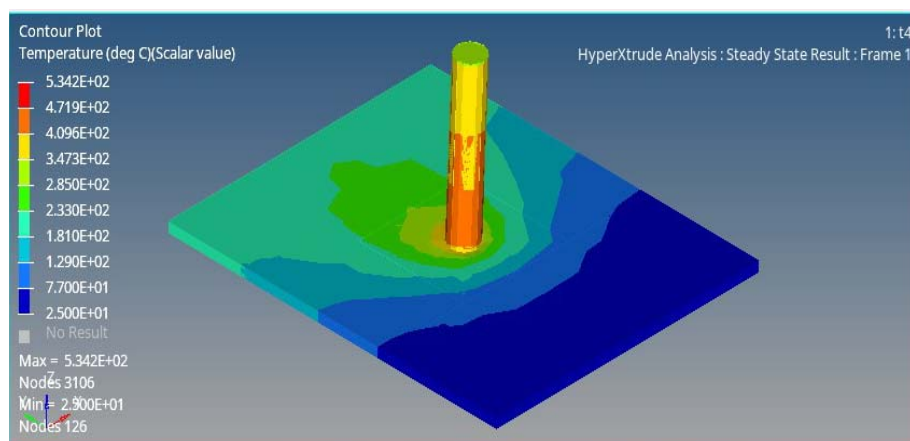


ภาพที่ 3.39 กำหนดข้อมูลชิ้นงานและเครื่องมือกลึงในโปรแกรม Hypermesh 2019

จากนั้นกำหนดปัจจัยในการเชื่อมโดยความเร็วรอบในการเชื่อม 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินในการเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อกำหนดค่าตัวแปรในการเชื่อมได้แล้ว ให้กำหนดชนิดของเครื่องมือกลึง โดยไปที่ชุดคำสั่ง Tool material แล้วเลือกวัสดุของเครื่องมือกลึงเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด H 13 จากนั้นเป็นขั้นตอนการเลือกวัสดุของชิ้นงานในการเชื่อมเสียดทานแบบกลึง โดยกดไปที่ชุดคำสั่ง Work piece จากนั้น กดเลือกอะลูมิเนียม เกรด 6063 เมื่อได้ตามข้อกำหนดของโปรแกรม Hypermesh 2019 ให้ทำการกดบันทึก (Save) ไฟล์งาน เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการจำลองต่อไป

การวิเคราะห์แบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Hypermesh 2019 จะต้องกดชุดคำสั่ง Solve เพื่อแปลงข้อมูลทั้งหมดไปสู่โปรแกรม Hyperview 2019 ด้วยการเปิดไฟล์ที่ได้ทำการบันทึกไว้แล้ว เมื่อชิ้นงานปรากฏขึ้นมาให้ไปที่ชุดคำสั่ง Contour plot และปรับไปที่การวิเคราะห์อุณหภูมิ (Temperature) และกดชุดคำสั่ง Apply เพื่อให้โปรแกรมวิเคราะห์ผลการจำลองความร้อน ในช่วงนี้โปรแกรมก็จะทำการจำลอง (Simulation) ค่าความร้อนรวมออกมา พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งจุดตัดบริเวณชิ้นงาน (Nodes) โดยในแต่ละจุดตัดจะแสดงค่าความร้อนและสมการทางความร้อนในแต่ละ

ละพื้นที่ (Element) ค่าความร้อนที่ได้ในแต่ละบริเวณสามารถเลือกดูได้และแสดงเป็นแบบจำลองการกระจายของความร้อนในขณะเชื่อมเสียดทานได้เช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.40



ภาพที่ 3.40 แบบจำลองระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

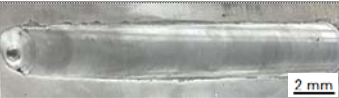
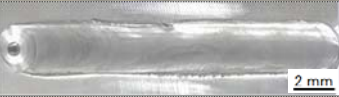
การศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อม จากการกำหนดตัวแปร ได้แก่ ความเร็วรอบการหมุนเชื่อม ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกวน รูปทรงเครื่องมือกวนที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองสามารถอธิบายสรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์ต่าง ๆ ดังนี้

4.1 ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานหลังการเชื่อม

รูปแบบของเครื่องมือกวนที่แตกต่างกันของการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนส่งผลต่อลักษณะลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังการเชื่อมที่แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะทางกายภาพชิ้นงานหลังการเชื่อมจากเครื่องมือกวนรูปทรงต่าง ๆ สามารถอธิบายดังนี้

4.1.1 เครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีความสามารถในการประสานติดกันของเนื้อวัสดุขณะเดียวกันบริเวณแนวเชื่อมจะเกิดเป็นครีบและเกิดช่องว่างที่แตกต่างกัน ตามแต่ละตัวแปรในการทดลอง ซึ่งผลของลักษณะทางกายภาพบนผิวหน้าของแนวเชื่อมก็มีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1110, 1320 และ 1750 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์ รอยเชื่อมประสานติดกัน ไม่พบข้อบกพร่อง (Defects) อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนเพิ่มขึ้นเป็น 2220 รอบต่อนาที ในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมเท่าเดิมที่ 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมก่อเกิดครีบที่เพิ่มขึ้น (Flash) การเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมจาก 30 ไปยัง 60 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมของชิ้นงานจะเริ่มไม่มีความสม่ำเสมอในการเดินเชื่อม เนื่องจากความเร็วเดินเชื่อมที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการกระจายตัวของความร้อนในขณะเชื่อม [57] สังเกตได้จากความเร็วรอบในการหมุนกวน 1110 รอบต่อนาที พบว่าลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมมีทิศทางการเดินแนวที่ไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามแนวเชื่อมยังมีความสมบูรณ์ ประสานติดกัน โดยที่ไม่พบข้อบกพร่องหลังจากการเชื่อม ในทำนองเดียวกันที่ความเร็วเดินเชื่อม 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที ลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมจะมีการก่อตัวของครีบอย่างชัดเจน เพราะความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลมาจากการเสียดทานระหว่างรูปทรงของเครื่องมือกวน ความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วรอบในการหมุนกวน [58] ซึ่งผลของลักษณะทางกายภาพชิ้นงานหลังการเชื่อมเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก ดังแสดงในภาพที่ 4.1

ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ลักษณะของผิวบนรอยต่อ จากการทดลองเชื่อม	ลักษณะการประสาน แนวเชื่อม
30	1110		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	2220		แนวเชื่อมมีครีบริบสูง
60	1110		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	2220		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
90	1110		แนวเชื่อมมีครีบริบสูง
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	2220		แนวเชื่อมเกิดช่องว่าง
120	1110		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	2220		แนวเชื่อมสมบูรณ์

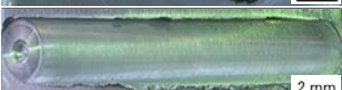
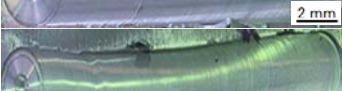
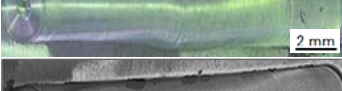
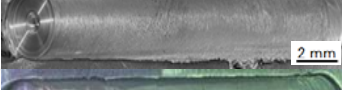
ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกลแบบทรงกระบอก

4.1.2 เครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม

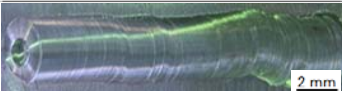
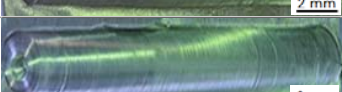
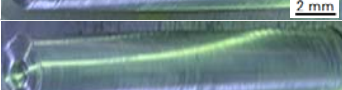
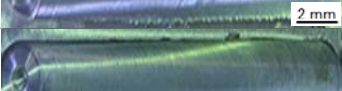
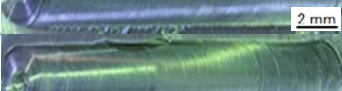
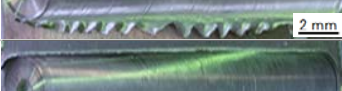
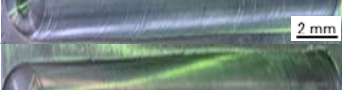
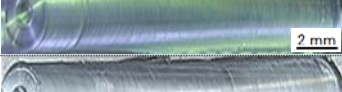
เครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยมส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ผลการประเมินลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าของแนวเชื่อมแสดงให้เห็นว่าเนื้อวัสดุมีความสามารถในการประสานติดกันที่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก เนื่องจากลักษณะของทรงสามเหลี่ยมจะมีพฤติกรรมการลากเนื้อวัสดุที่อ่อนตัว ในขณะที่เชื่อมได้น้อยกว่ารูปทรงทรงกระบอก พิจารณาได้จากความเร็วเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมเกิดครีบก้นที่สูงและผิวรอยกวนเกิดคลื่นจากการกวนขนาดกะทัดรัด การกวน ส่งผลให้ลักษณะรอยเชื่อมมีความราบเรียบที่น้อย ลักษณะการเกิดครีบก้นที่สูงส่งผลต่อการลากดึงเนื้อโลหะเข้าสู่บริเวณรอยเชื่อมที่น้อย นำไปสู่สมบัติทางกลที่น้อยเช่นกัน อย่างไรก็ตามพบว่ารอยต่อเชื่อมมีความสมบูรณ์ การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบในการหมุนกวนจาก 1110 ไปยัง 2220 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 60 ไปยัง 120 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมมีแนวโน้มของการก่อตัวของครีบก้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องและมีทิศทางไปในทิศทางเดียวกันกับเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก

4.1.3 เครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม

อย่างไรก็ตามเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยมของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าเกิดการประสานของเนื้อวัสดุที่เข้ากันได้ดีในทุกการทดลอง ขณะเดียวกันสังเกตได้ว่าบริเวณแนวเชื่อมจะเกิดเป็นครีบก้น ความไม่สม่ำเสมอของแนวเชื่อมและเกิดช่องว่างในบริเวณจุดสุดท้ายของการเชื่อม ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 1110, 1320, 1750 และ 2220 รอบต่อนาที มีลักษณะของผิวหน้าของแนวเชื่อมที่ราบเรียบที่ดีกว่าเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม แต่จากการประเมินยังมีความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมที่น้อยกว่าเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก เมื่อวิเคราะห์ความเร็วเดินเชื่อมที่ 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที จะเห็นได้ว่าลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมในบางตัวแปรจากการทดลองมีการเกิดครีบก้นสูง ความร้อนจากการเชื่อมเกิดจากสัมประสิทธิ์การเสียดทานจากปากของเครื่องมือกวน [59] ในขณะที่ลักษณะการลากกวน ส่งผลมาจากรูปทรงของเครื่องมือกวน ซึ่งเป็นสาเหตุของลักษณะของผิวหน้าแนวเชื่อมที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของผิวชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน ส่งผลมาจากอุปกรณ์เครื่องมือจี้ยึดต้องมีความแข็งแรง สัมประสิทธิ์ทางด้านความร้อนที่ต่ำ จะนำไปสู่การเกิดความร้อนสะสมที่ดีบริเวณรอยกวนและทำให้ลักษณะทางกายภาพของผิวชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนดีขึ้นเช่นกัน ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานหลังการเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 4.3

ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ลักษณะของผิวบนรอยต่อ จากการทดลองเชื่อม	ลักษณะการประสาน แนวเชื่อม
30	1110		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1320		แนวเชื่อมเกิดครีบก้นสูง
	1750		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	2220		แนวเชื่อมเกิดครีบก้นสูง
60	1110		แนวเชื่อมเกิดครีบก้นสูง
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมเกิดครีบก้นสูง
	2220		แนวเชื่อมเกิดครีบก้นสูง
90	1110		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1320		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1750		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	2220		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
120	1110		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1320		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1750		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	2220		แนวเชื่อมเกิดครีบก้นสูง

ภาพที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม

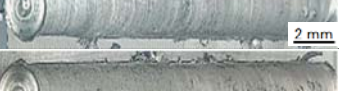
ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ลักษณะของผิวบนรอยต่อ จากการทดลองเชื่อม	ลักษณะการประสาน แนวเชื่อม
30	1110		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	2220		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
60	1110		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	2220		แนวเชื่อมเกิดครีบก้นสูง
90	1110		แนวเชื่อมเกิดช่องว่าง
	1320		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1750		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	2220		แนวเชื่อมเกิดช่องว่าง
120	1110		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	2220		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ

ภาพที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม

4.1.4 เครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม

สำหรับเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยมพบว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในบางตัวแปรของการทดลองมีรอยแยกบริเวณใกล้จุดสุดท้ายของรอยเชื่อม โดยเฉพาะความเร็วเดินเชื่อม 90 มิลลิเมตรต่อนาที ของความเร็วรอบในการหมุนกวน 1110, 1320 และ 1750 รอบต่อนาที แสดงให้เห็นถึงรอยแตกอย่างชัดเจน เนื่องจากเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยมต้องอาศัยการเกิดความร้อนที่สูง เพื่อให้เนื้อวัสดุอ่อนนุ่มในขณะเชื่อม ทำให้เพิ่มความสามารถในการลากเนื้อวัสดุ แต่เครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยมกลับมีความสามารถในการสร้างความร้อนที่ไม่ดีมากพอ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก ส่งผลให้เกิดช่องว่างบริเวณรอยเชื่อม อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ที่ความเร็วในการหมุนกวนที่ 2220 รอบต่อนาที แสดงให้เห็นว่าเกิดการประสานติดกันของเนื้อวัสดุที่ดีขึ้น เพราะความเร็วในการหมุนกวนที่ 2220 รอบต่อนาทีเป็นความเร็วที่สูงในขณะเชื่อม ทำให้เกิดการสร้างความร้อนที่ดีในระหว่างการเชื่อม นอกจากนั้นมุมเอียงในการเชื่อมก็เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อนในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยพบว่ามุมเอียงในการเชื่อมที่น้อย ส่งผลที่ดีต่อการเกิดความร้อนเข้าไปในขณะเชื่อม ในทางตรงกันข้ามมุมเอียงในการเชื่อมที่มากเกินไป ส่งผลให้เกิดความร้อนที่น้อยและส่งผลต่อสมบัติแรงเสียดทานที่สูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการทบทวนงานวิจัยแสดงให้เห็นว่ามุมเอียงในการเชื่อมที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 องศา [60] ซึ่งผลดังกล่าวก็นำมาใช้ในการวิจัยนี้ด้วย สำหรับลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยมมีผลการทดลองที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยลักษณะของแนวรอยเชื่อมไม่สม่ำเสมอและเกิดคลื่นบริเวณผิวของรอยเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 4.4

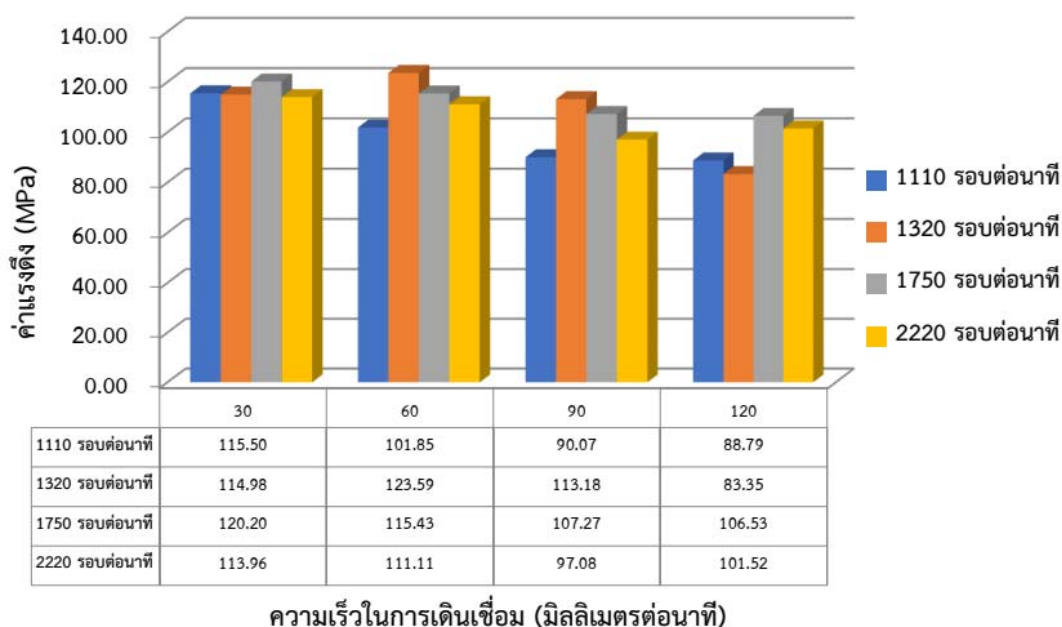
จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าแนวเชื่อมของเครื่องมือกวนทั้ง 4 แบบ ได้แก่ เครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก เครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม เครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยมและเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานในทุกตัวแปรของการทดลองมีความสามารถในการยึดติดที่ดี แต่อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าแนวเชื่อมมีความสมบูรณ์และข้อบกพร่องที่แตกต่างกัน ซึ่งมาจากการที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วเดินเชื่อมที่แตกต่างกันและตัวแปรอื่น ๆ ในการทดลอง อย่างไรก็ตามเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอกแสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าแนวเชื่อมที่ราบเรียบ สม่ำเสมอและเกิดข้อบกพร่องหลังจากการทดลองน้อยที่สุด ในทางตรงกันข้ามเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยมมีแนวโน้มที่ทำให้ลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าแนวเชื่อมมีความขรุขระ ไม่ราบเรียบและแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอมากกว่ารูปทรงของเครื่องมือกวนอื่น ๆ

ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ลักษณะของผิวบนรอยต่อ จากการทดลองเชื่อม	ลักษณะการประสาน แนวเชื่อม
30	1110		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1320		แนวเชื่อมสมบูรณ์
	1750		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	2220		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
60	1110		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1320		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1750		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	2220		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
90	1110		แนวเชื่อมเกิดช่องว่าง
	1320		แนวเชื่อมเกิดช่องว่าง
	1750		แนวเชื่อมเกิดช่องว่าง
	2220		แนวเชื่อมสมบูรณ์
120	1110		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1320		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	1750		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ
	2220		แนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอ

ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม

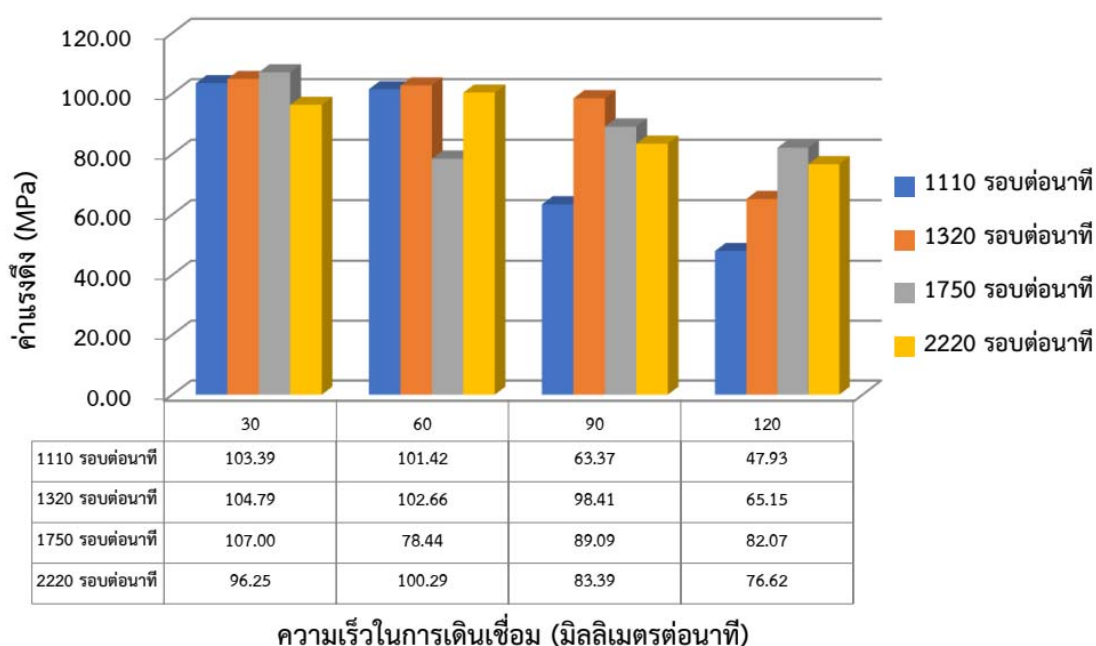
4.2 ผลการทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 4 ระดับ คือ 1110, 1320, 1750 และ 2220 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 4 ระดับ คือ 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที และนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-04 เมื่อการวิเคราะห์กราฟค่าแรงดึงของแต่ละสภาวะการเชื่อมพบว่าเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอกมีค่าแรงดึงของชิ้นงานหลังการทดสอบมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยที่ 123.59 MPa มาจากความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อคำนวณประสิทธิภาพรอยมีค่า 82.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิมจากการทดสอบ (Base metal) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 149 MPa ในทางตรงกันข้ามความเร็วในการเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที มีค่าแรงดึงของชิ้นงานหลังการทดสอบน้อยที่สุดสำหรับเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก มีค่าเฉลี่ยที่ 97.08 MPa ตัวแปรในการเชื่อมที่แตกต่างกันส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการเสียรูปแบบการของเนื้อวัสดุที่แตกต่างกัน (Plastic Deformation Behavior) ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามพบว่าข้อบกพร่องที่แตกต่างกันทั้งปริมาณและขนาดจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานที่แตกต่างกันด้วย [61] พิจารณาค่าแรงดึงแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบในการหมุนกวน 1110 รอบต่อนาที มีแนวโน้มที่น้อยลงเมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการเดินเชื่อม ส่งผลให้เกิดความร้อนได้ยากและเป็นสาเหตุของการก่อเกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อมหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [62] สำหรับค่าแรงดึงของตัวแปรอื่น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.5 กราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก

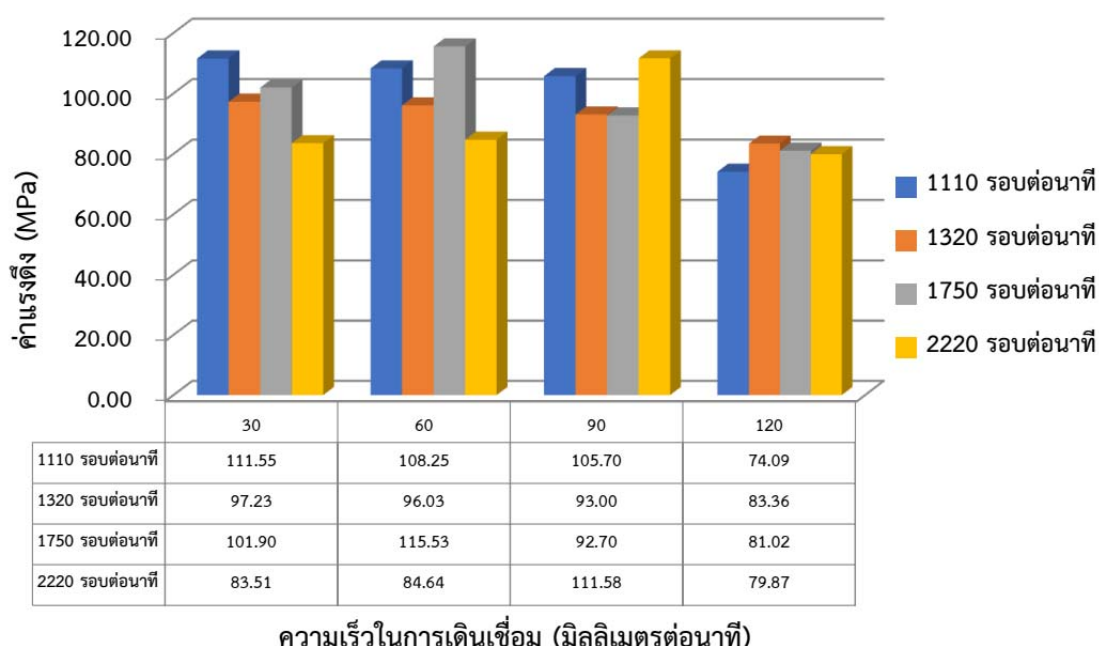
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนและความเร็วในการเดินเชื่อมที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ในแต่ละตัวแปรของการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ผลการแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานหลังการเชื่อมทุก ๆ การทดลองมีค่าแรงดึงที่ดี โดยชิ้นงานยึดติดกัน ในทุกตัวแปรของการทดลอง โดยความเร็วรอบในการหมุน 1750 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 30 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุดที่ 107.00 MPa ในทางตรงกันข้ามค่าแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุน 1110 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตร มีค่าแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 47.93 MPa (เป็นค่าต่ำสุดในทุกตัวแปรการทดลอง) ซึ่งมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อม นอกจากนั้นลักษณะโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมเช่นกัน อีกสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อค่าแรงดึงที่ได้นั้นมาจากกว้างของรอยเชื่อม โดยรอยเชื่อมที่กว้าง ราบเรียบและมีความสม่ำเสมอจากการเกิดความร้อนสะสมในระหว่างการเชื่อมที่เหมาะสมและมีผลต่อสมบัติทางด้านแรงดึงของชิ้นงานหลังการเชื่อมอย่างชัดเจน [63] สำหรับค่าแรงดึงของตัวแปรอื่น ๆ ดังแสดงในกราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม



ภาพที่ 4.6 กราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม

ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟแรงดึงจากเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยมของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบในการหมุนและความเร็วในการเดินเชื่อมเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อค่าแรงดึง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองที่รูปทรงของเครื่องมือกวนอื่น ๆ พบว่าที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตร ของทุก ๆ ความเร็วรอบในการหมุนมีแนวโน้มที่ให้ค่าแรงดึงต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วในการเดินเชื่อม 30, 60 และ 90 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากการเคลื่อนที่ในการเดินเชื่อมที่เร็วไปส่งผลต่อ

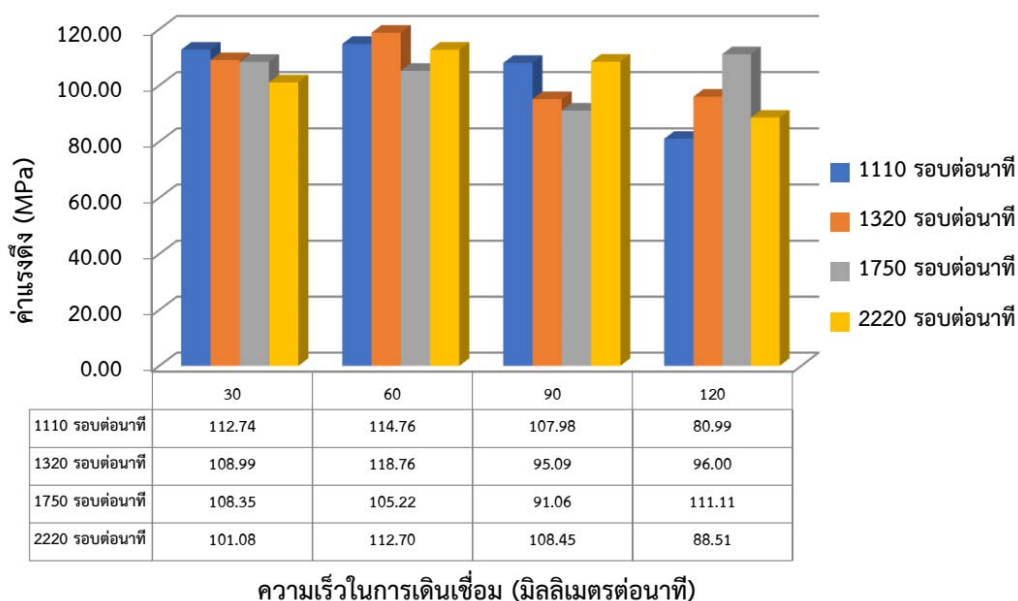
ความสัมพันธ์ของความร้อนต่อพื้นที่สัมผัสของการเสียดทาน โดยที่ความเร็วรอบในการหมุน 1110 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตร มีค่าแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 74.09 MPa ผลของค่าแรงดึงสอดคล้องกับเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม ในทางตรงกันข้ามค่าแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุดที่ 115.53 MPa มาจากความเร็วรอบในการหมุน 1750 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก สำหรับค่าแรงดึงของตัวแปรอื่น ๆ ในการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.7



ความเร็วในการเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)

ภาพที่ 4.7 กราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม

สำหรับค่าแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ด้วยเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบในการหมุน 1320 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุดที่ 118.76 MPa และค่าแรงดึงเฉลี่ยน้อยสุดมีค่า 80.99 MPa จากความเร็วในการเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที ความเร็วรอบในการหมุน 1110 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งความเร็วรอบในการหมุนต่ำและความเร็วในการเดินเชื่อมสูง มีแนวโน้มที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงน้อยลง ในขณะที่ค่าแรงดึงของตัวแปรอื่น ๆ มีความใกล้เคียงสอดคล้องกัน



ภาพที่ 4.8 กราฟแรงดึงเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม

เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดึงจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ด้วยเครื่องมือกวนทั้ง 4 แบบ ได้แก่ เครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก เครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม เครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยมและเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบในการหมุนกวนช่วง 1320 ถึง 1750 รอบต่อนาที มีแนวโน้มที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉลี่ยที่สูง ในขณะที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1110 รอบต่อนาที จะให้ค่าแรงดึงต่ำกว่าความเร็วรอบในการหมุนกวนอื่น ๆ ในทำนองเดียวกันความเร็วในการเดินเชื่อมช่วง 30 ถึง 60 มิลลิเมตรต่อนาที มีแนวโน้มที่ส่งผลให้ค่าแรงดึงเฉลี่ยที่สูงเช่นกัน โดยที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตร ให้ค่าแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด เครื่องมือกวนแบบทรงกระบอกมีความสามารถในการสร้างความร้อนและลากกวนเนื้อวัสดุให้ไหลวนในบริเวณเชื่อมมากกว่าเครื่องมือรูปทรงอื่น ๆ [64] ส่งผลให้ค่าแรงดึงสูงกว่าเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม เครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยมและเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม รูปทรงของเครื่องมือกวนทั้ง 4 แบบ ส่งผลต่อพื้นที่สัมผัสรอบ ๆ ส่วนปลายของเครื่องมือกวนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ลักษณะการไหลวนของเนื้อวัสดุถูกลากกวนด้วยแรงที่ต่างกันด้วยนำไปสู่ลักษณะการยึดติดของชิ้นงานที่แตกต่างกัน โดยเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอกมีความสามารถในการลากกวนเนื้อวัสดุดีกว่าเครื่องมือกวนรูปทรงอื่น ๆ เนื่องจากพื้นที่สัมผัสรอบ ๆ ส่วนปลายของเครื่องมือกวนมีพื้นที่มากกว่าเครื่องมือกวนรูปทรงอื่น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของรอยต่อที่ดีเช่นกัน

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าแรงดึงด้วยวิธีการทางสถิติ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ได้นำค่าแรงดึงที่ได้จากการออกแบบการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป เวอร์ชัน 19 (Minitab 19 Software) จากนั้นตั้งสมมติฐานการทดลอง เพื่อพิจารณาที่ผลกระทบหลัก (Main Effects) และอันตรกิริยา

(Consistency) ตัวแปรที่ 3 ปัจจัย เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงต่อไปนี้

4.3.1 การสมมติฐาน

4.3.1.1 การพิจารณาผลกระทบหลัก

- 1) ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวน

$\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวนของการเชื่อมเสียดทาน

แบบกวน

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบในการหมุนกวนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3 \neq \tau_4 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบในการหมุนกวนแตกต่างกัน

- 2) ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วในการเดินเชื่อม

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ คือ ความเร็วในการเดินเชื่อมของการเชื่อมเสียดทาน

แบบกวน

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเดินเชื่อมกวนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเดินเชื่อมกวนแตกต่างกัน

- 3) ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยรูปทรงเครื่องมือกวน

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ คือ รูปทรงเครื่องมือกวน

$H_0 : \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของรูปทรงเครื่องมือกวนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq \lambda_4 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของรูปทรงเครื่องมือกวนแตกต่างกัน

4.3.1.2 การพิจารณาทั้ง 2 ตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน

- 1) ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0$ ทุกระดับ i และ j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ $(i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ มีบาง i และ j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ $(i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$

- 2) ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวนและรูปทรงเครื่องมือกวน

$H_0 : (\tau\lambda)_{ij} = 0$ ทุกระดับ i และ j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ
($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$)

$H_0 : (\tau\lambda)_{ij} \neq 0$ มีบาง i และ j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ
($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$)

3) ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือทวน

$H_0 : (\beta\lambda)_{ij} = 0$ ทุกระดับ i และ j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ
($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$)

$H_1 : (\beta\lambda)_{ij} \neq 0$ มีบาง i และ j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ
($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$)

4.3.1.3 การพิจารณาทั้ง 3 ตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน

ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบในการหมุนทวน ความเร็วรอบในการ
หมุนทวนและความเร็วในการเดินเชื่อม

$H_0 : (\tau\beta\lambda)_{ij} = 0$ ทุกระดับ i และ j ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ
($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$)

$H_1 : (\tau\beta\lambda)_{ij} \neq 0$ มีบาง i และ j มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ
($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$)

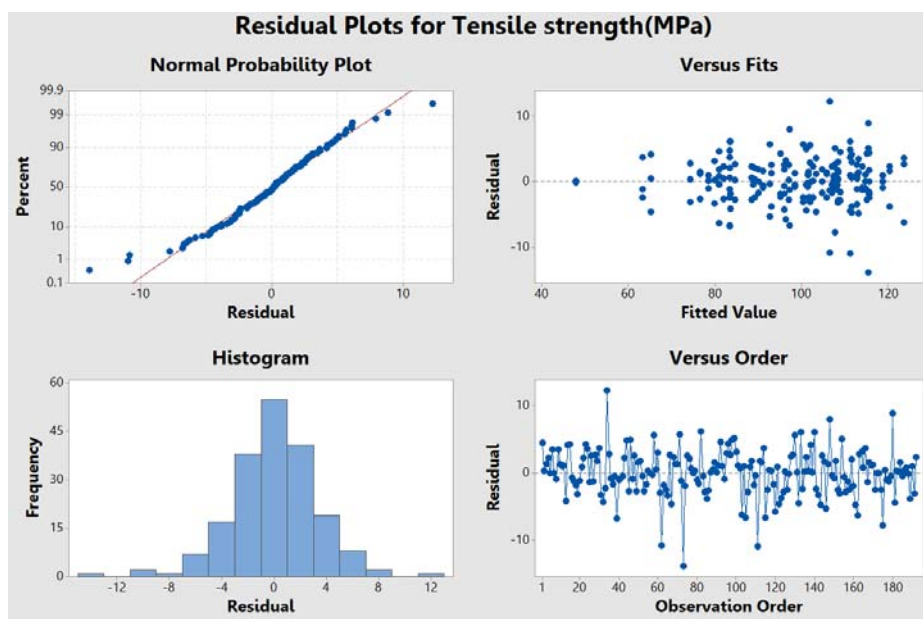
4.3.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ

เพื่อเป็นการวิเคราะห์หาข้อมูลมีลักษณะเป็นตัวแบบสุ่ม เป็นเส้นตรงและการกระจายตัว
รอบค่าศูนย์ในลักษณะใด ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจในความแปรปรวนของเงื่อนไขในการทดลองอยู่ภายใต้
สภาวะการควบคุม สามารถพิจารณาดังนี้

4.3.2.1 พิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูล โดยดูความเป็นอิสระของข้อมูลจากกราฟ
แสดงค่า Residual Versus the Order of the Data เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมี
ลักษณะสุ่ม และอยู่ภายใต้พิสัยที่ควบคุมหรือไม่ การพิจารณาจากภาพที่ 4.9 พบว่าลักษณะของจุดที่
ควรให้ความสำคัญดังกล่าวไม่พบความผิดปกติของเส้นกราฟ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
มีลักษณะเป็นแบบสุ่มและมีความเป็นอิสระของข้อมูลต่อกัน

4.3.2.2 พิจารณาการกระจายตัว โดยพิจารณาว่าข้อมูลเป็นแบบการกระจายตัวแบบปกติ
หรือไม่ เนื่องจากข้อมูลมีมากถึง 64 การทดลอง จึงพิจารณาจากแผนภาพ Histogram of the
Residuals ดังแสดงในภาพที่ 4.9 จะเห็นว่าข้อมูลมีลักษณะใกล้เคียงการกระจายตัวแบบปกติ
(Normal Distribution) จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลจากการทดลองนี้มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ
ของข้อมูล

4.3.2.3 พิจารณาข้อมูลรอบค่าศูนย์พบว่าลักษณะการกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกัน
ข้อมูลมีความผันแปรสม่ำเสมอรอบค่าศูนย์จากแผนภาพ Model Adequacy Checking (ภาพที่ 4.9)
ลักษณะข้อมูลจากกราฟ Residuals Versus the Fitted Values ที่ได้มีบางค่าที่กระจายตัวออกห่าง
จากจุดศูนย์กลางแบบไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่สามารถมั่นใจได้ว่าความแปรปรวนของเงื่อนไขในการ
ทดลองมีการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของข้อมูล



ภาพที่ 4.9 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

จากการวิเคราะห์ภาพที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงช่วงของความเชื่อมั่น ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงดึงแนวเชื่อมจากปัจจัยต่าง ๆ มีความเหลื่อมกัน จึงได้ทดลองเพื่อทวนสอบความเชื่อมั่นความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงดึงเชื่อม จำนวน 12 ครั้ง อย่างไรก็ตามเมื่อทวนสอบความเชื่อมั่นความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงดึงเชื่อมแล้ว แสดงให้เห็นว่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดลองทั้ง 12 ครั้ง ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งมีวิธีการทดสอบได้ดังนี้

- (1) ทดสอบความแตกต่างกันของความแปรปรวน จากสมมติฐานดังนี้

$\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2, \sigma_5^2, \sigma_6^2, \sigma_7^2, \sigma_8^2, \sigma_9^2, \sigma_{10}^2, \sigma_{11}^2, \sigma_{12}^2$ คือ ค่าความแปรปรวนของแต่ละการทดลองเชื่อม

ความแปรปรวนของการทดลองเชื่อมทั้ง 12 ครั้ง เท่ากัน

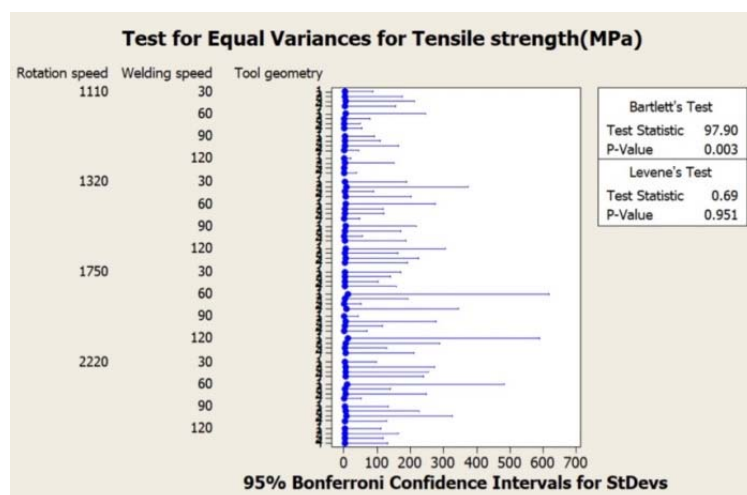
$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2 = \sigma_6^2 = \sigma_7^2 = \sigma_8^2 = \sigma_9^2 = \sigma_{10}^2 = \sigma_{11}^2 = \sigma_{12}^2$$

ความแปรปรวนของการทดลองเชื่อมทั้ง 12 ครั้ง ไม่เท่ากัน

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \sigma_4^2 \neq \sigma_5^2 \neq \sigma_6^2 \neq \sigma_7^2 \neq \sigma_8^2 \neq \sigma_9^2 \neq \sigma_{10}^2 \neq \sigma_{11}^2 \neq \sigma_{12}^2$$

- (2) ทดสอบสมมติฐาน ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

จากการวิเคราะห์ Levene's Test ผลการคำนวณที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่ายอมรับระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เนื่องจากค่า P-Value = 0.951 ซึ่งมีผลต่างของค่าที่มากกว่าค่า $\alpha = 0.05$ เมื่อเทียบกับค่าต่อนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความแปรปรวนของการทดลองทั้ง 64 ครั้ง นั้นมีค่าที่เท่ากันหรือมีค่าที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญในการทดลอง



ภาพที่ 4.10 การทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนค่าแรงดึง

ตารางที่ 4.1 ค่า ANOVA ของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบในการหมุน กวนและความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวนจากการเชื่อมอะลูมิเนียม หล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value	
Regression Model	63	43840.4	695.88	39.33	0.000	Significant
Linear	9	27307.9	3034.21	171.50	0.000	
R	3	890.3	296.76	16.77	0.000	
W	3	15497.5	5165.82	291.99	0.000	
T	3	10920.2	3640.05	205.75	0.000	
2-Way Interactions	27	9341.8	345.99	19.56	0.000	
R × W	9	4264.1	373.79	26.78	0.000	
R × T	9	2320.7	257.89	14.57	0.000	
W × T	9	2757.0	306.33	17.31	0.000	
3-Way Interactions	27	7190.7	266.32	15.05		
R × W × T	27	7190.7	266.32	15.05		
Pure Error	128	2264.6	17.69			
Total	191	46105.0				
S = 4.20619	$R^2 = 95.09\%$		Adjusted $R^2 = 92.67\%$			

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าแรงดึงของปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากการวิเคราะห์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับ 95.09 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ ความผันแปรต่าง ๆ ของการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็ง เกรด 6063 เป็นปัจจัยที่สามารถ

ควบคุมได้ (Controllable) เช่น ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง เครื่องมือเชื่อม อุปกรณ์เชื่อมหรือปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ในขณะที่ส่วนที่เหลือ 4.91 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง (Uncontrollable) เช่น สภาพการเปลี่ยนแปลงของอากาศในขณะทดลอง อุณหภูมิแวดล้อม ความชื้นในขณะเชื่อม หรือผู้ปฏิบัติงานเชื่อม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการทดลองนี้ [65] อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่ระดับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 95.09 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 นี้

4.3.3 การวิเคราะห์สมการถดถอย

เมื่อวิเคราะห์ถึงสมการถดถอย (Regression Equations) เพื่อนำไปสู่การพยากรณ์ความสามารถของค่าแรงดึงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน สามารถวิเคราะห์สมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Tensile strength} = & 124.80 + 0.0382 R - 0.157 W - 35.450 T - 0.000016 R^2 - \\ & 0.003336 W^2 + 7.006 T^2 + 0.000252 RW - 0.00071 RT + 0.008 WT \quad (\text{MPa}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

เมื่อ R คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน (รอบต่อนาที)

W คือ ความเร็วในการเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)

T คือ รูปทรงเครื่องมือกวน

เพื่อยืนยันผลลัพธ์จากสมการถดถอยที่ได้กำหนดขึ้น ซึ่งสมการถดถอยจะถูกใช้เพื่อทำนายค่าแรงดึงของการเชื่อมและดำเนินการประเมินตัวแปรที่เหมาะสมในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 จึงได้ทำการทดลองซ้ำ (Repeated Experiments) เพื่อทดสอบความถูกต้องของสมการถดถอยนี้ โดยการจำลองแบบการทดลองทั้งหมด 12 ครั้ง การทดลองภายใต้เงื่อนไขของความเร็วยรอบในการหมุนกวนที่ 1320 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้เครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก จากการทบทวนสมการถดถอยได้ทดสอบแรงดึงทั้ง 12 การทดลอง เพื่อยืนยันผลการทดสอบแรงดึง ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงมีค่าต่อไปนี้ 120.17, 119.85, 117.21, 118.99, 121.01, 125.32, 122.45, 119.38, 121.71, 123.23, 118.84, และ 120.44 MPa ตามลำดับ ค่าแรงดึงเฉลี่ยอยู่ที่ 120.7 MPa ดังนั้นทั้ง 12 ค่าของค่าแรงดึงเฉลี่ยอยู่ในช่วงการพยากรณ์ตามพื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสม มีค่าอยู่ในช่วง 86.17 ถึง 138.41 MPa (95% PI) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติโดยสมการถดถอยนี้สามารถใช้เพื่อทำนายค่าแรงดึงกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ได้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสมของค่าแรงดึง

Prediction for Tensile Strength				
Multiple response prediction				
Variables	Setting			
Rotation speed (rpm)	1320			
Welding speed (mm/min)	60			
Tool geometry	1			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Tensile strength	112.29	2.43	107.49, 117.09	86.17, 138.41

4.3.5 การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐานของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 6063 จะพิจารณาที่ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของตัวแปรในการทดลอง ที่ระดับปัจจัยทั้ง 3 ดังต่อไปนี้

4.3.5.1 การพิจารณาผลกระทบหลัก

1) ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวน

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบในการหมุนกวนไม่แตกต่างกัน

$H_1: \tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3 \neq \tau_4 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบในการหมุนกวนแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ของ ANOVA ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวนจะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 เนื่องจากค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของ α เมื่อเทียบกับค่า α ที่ระดับ 0.05 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวนมีผลต่อค่าแรงดึงของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2) ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของความเร็วในการเดินเชื่อม

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเดินเชื่อมไม่แตกต่างกัน

$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วในการเดินเชื่อมแตกต่างกัน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ของ ANOVA ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเดินเชื่อมจะปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของ α เมื่อเทียบกับค่า α ที่ระดับ 0.05 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของ

ปัจจัยความเร็วในการเดินเชื่อมมีผลต่อค่าแรงดึงของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

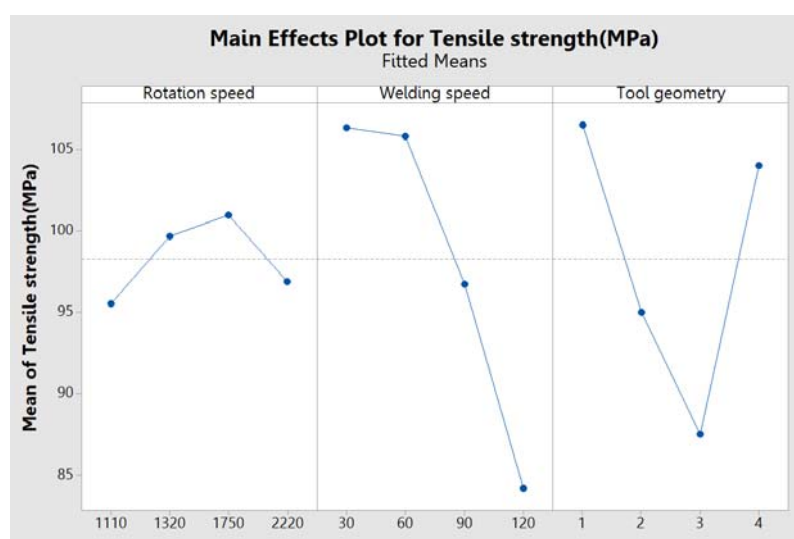
3) ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของรูปทรงเครื่องมือกวน

$H_0 : \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของรูปทรงเครื่องมือกวนไม่แตกต่างกัน

$H_1 : \lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq \lambda_4 \neq 0$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของรูปทรงเครื่องมือกวนแตกต่างกัน

เช่นกันจากข้อมูลในตารางที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ของ ANOVA ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงเครื่องมือกวนจะปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของ α เมื่อเทียบกับค่า α ที่ระดับ 0.05 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่า อิทธิพลของปัจจัยรูปทรงเครื่องมือกวนมีผลต่อค่าแรงดึงของชิ้นงานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองวิเคราะห์ได้ว่าความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงดึง โดยพิจารณาได้จากการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนกวนจาก 1320 รอบต่อนาที ไปสู่ 1750 รอบต่อนาที ทำให้มีค่าแรงดึงเฉลี่ยมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ค่าแรงดึงเฉลี่ยลดลงที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนจาก 2220 รอบต่อนาที เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนกวนที่สูงไป ส่งผลต่อการเกิดครีบกาก เนื้อวัสดุเหล่านั้นไม่สามารถเต็มลงไปในการเชื่อมได้ สำหรับความเร็วในการเดินเชื่อมพบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการเดินเชื่อมทำให้ค่าแรงดึงเฉลี่ยน้อยลง เนื่องจากวัสดุไม่สามารถสะสมความร้อนเข้าในขณะเชื่อมได้ ในขณะที่รูปทรงเครื่องมือกวนแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกให้ค่าแรงดึงเฉลี่ยมีแนวโน้มที่ดีกว่าเครื่องมือกวนรูปทรงอื่น ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของแรงดึงกับความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงเครื่องมือกวน

4.3.5.2 การพิจารณาทั้ง 2 ตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน

1) ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม

$$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \text{ทุกระดับ } i \text{ และ } j \text{ ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ} \\ (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$$

$$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{มีบาง } i \text{ และ } j \text{ มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ} \\ (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$$

2) ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวนและรูปทรงเครื่องมือกวน

$$H_0 : (\tau\lambda)_{ij} = 0 \quad \text{ทุกระดับ } i \text{ และ } j \text{ ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ} \\ (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$$

$$H_1 : (\tau\lambda)_{ij} \neq 0 \quad \text{มีบาง } i \text{ และ } j \text{ มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ} \\ (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$$

3) ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวน

$$H_0 : (\beta\lambda)_{ij} = 0 \quad \text{ทุกระดับ } i \text{ และ } j \text{ ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ} \\ (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$$

$$H_1 : (\beta\lambda)_{ij} \neq 0 \quad \text{มีบาง } i \text{ และ } j \text{ มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ} \\ (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$$

4.3.5.3 การพิจารณาทั้ง 3 ตัวแปรที่มีอันตรกิริยาต่อกัน

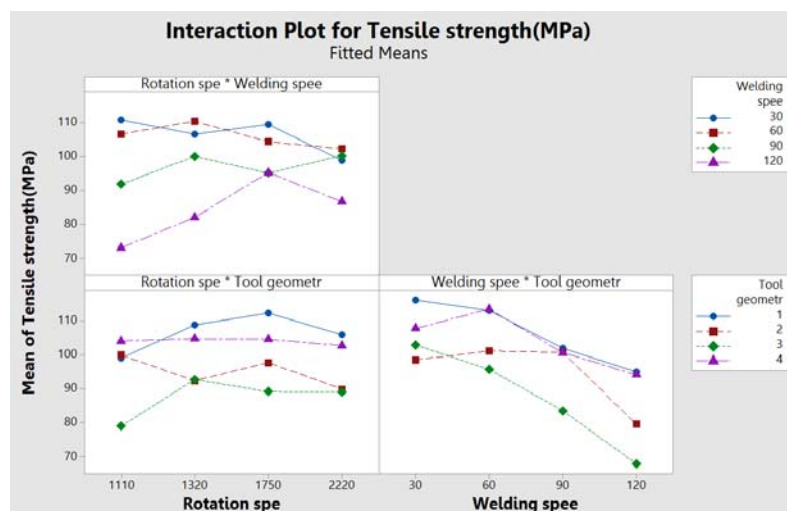
ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วรอบในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม

$$H_0 : (\tau\beta\lambda)_{ij} = 0 \quad \text{ทุกระดับ } i \text{ และ } j \text{ ไม่มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ} \\ (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$$

$$H_1 : (\tau\beta\lambda)_{ij} \neq 0 \quad \text{มีบาง } i \text{ และ } j \text{ มีอิทธิพลของอันตรกิริยา เมื่อ} \\ (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$$

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาด้วย ANOVA พบว่าปฏิเสธ H_0 ของปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวน เนื่องจากค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของ α เมื่อเทียบกับค่า α ที่ระดับ 0.05 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่ามีอิทธิพลของอันตรกิริยาทั้ง 3 ปัจจัย ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวนมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแรงดึงที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 6063 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน กราฟแสดงการอันตรกิริยาระหว่างอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวน [66] อธิบายได้ว่าที่ปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวนสูงและความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำมีแนวโน้มของค่าแรงดึงเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วรอบใน

การหมุนกวนสูงจะมีอันตรกิริยาที่ดีกับเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก อย่างไรก็ตามปัจจัยความเร็วในการเดินเชื่อมมีการแปรผันตามรูปทรงเครื่องมือกวน ดังแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 อันตรกิริยาระหว่างค่าแรงดึงกับความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อมและรูปทรงเครื่องมือกวน

4.4 ผลการทดสอบแรงดัดโค้ง

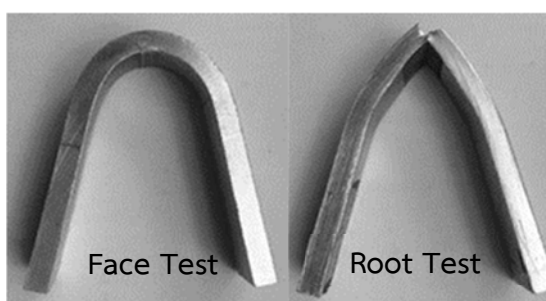
ผลการทดสอบการดัดโค้งของวัสดุอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E19-04 ตัวแปรในการทดลองที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1110, 1320, 1750 และ 2220 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที และเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก เครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยม เครื่องมือกวนรูปทรงสี่เหลี่ยม เครื่องมือกวนรูปทรงห้าเหลี่ยม ตามลำดับ ผลการทดสอบการดัดโค้งแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเสียหาย (Failure) หลังการทดสอบที่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก ความเร็วรอบในการหมุนกวนสูงและความเร็วเดินเชื่อมที่น้อยมีแนวโน้มที่จะให้ผลการยอมรับ (Accept) ทั้งด้านหน้าแนวเชื่อม (Face Test) และด้านหลังแนวเชื่อม (Root Test) ของชิ้นงานหลังการดัดโค้ง เนื่องจากชิ้นงานมีความสมบูรณ์ ไม่เกิดข้อบกพร่องจากการเชื่อม ส่งผลให้ชิ้นงานหลังการดัดเกิดการโค้งงอที่สมบูรณ์ ไม่แตกหัก (Broken) [67] ในทางตรงกันข้ามพบว่าเครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยมที่ความเร็วเดินเชื่อมสูงและความเร็วรอบในการหมุนกวนต่ำ ส่งผลต่อการเสียหายที่รุนแรงของชิ้นงานหลังการทดสอบแรงดัด ทั้งด้านหน้าแนวเชื่อม และด้านหลังแนวเชื่อม เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานหรือข้อบกพร่องในรอยเชื่อม จะเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกร้าวในขณะรับแรงกดดัดชิ้นงาน (Initial Crack) [68] ดังนั้นการทดสอบการดัดโค้งในสภาวะนี้จึงถูกปฏิเสธ (Reject) ชิ้นงานหลังการทดสอบ สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบการดัดโค้งชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 ในทุก ๆ การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และลักษณะการเสียหายของชิ้นงานหลังการดัดโค้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.13

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการดัดโค้งชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง
เกรด 6063

รูปแบบเครื่องมือกวน	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที)							
		30		60		90		120	
	ด้านทดสอบ	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง	หน้า	หลัง
ทรงกระบอก	1110	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗
	1320	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
	1750	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
	2220	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
ทรงสามเหลี่ยม	1110	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	1320	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	1750	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	2220	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
ทรงสี่เหลี่ยม	1110	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	1320	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	1750	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗
	2220	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗
ทรงห้าเหลี่ยม	1110	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	1320	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
	1750	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗
	2220	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗

หมายเหตุ : ✓ คือ ยอมรับ (Accept)

✗ คือ ปฏิเสธ (Reject)

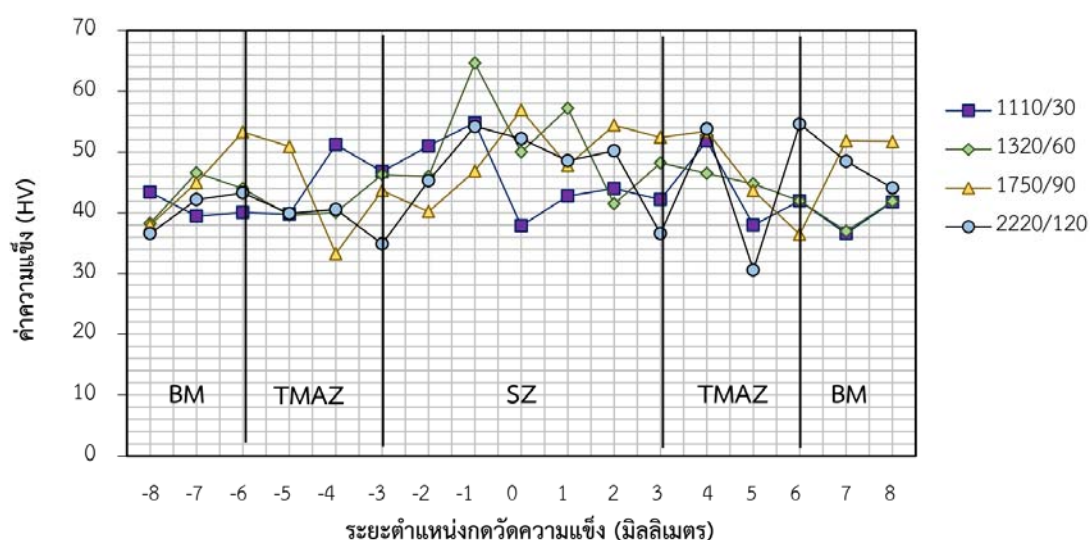


ภาพที่ 4.13 ลักษณะชิ้นงานหลังการทดสอบการดัดโค้ง

4.5 ผลการทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งจะทดสอบด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test: HV) ใช้หัวกดเพชรรูปทรงพีระมิดกดบริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อมตามแนวขวางของรอยต่อ ด้วยแรงกด 100 กรัม ต่อแรง เวลาในการกดค้างไว้ 10 วินาที ทดสอบบริเวณรอยเชื่อม บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน และเนื้อโลหะเดิม ตามลำดับ ตำแหน่งรอยกดวัดความแข็งแต่ละจุดมีระยะห่างกันประมาณ 500 μm หรือ 0.5 มิลลิเมตร ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานแสดงดังนี้

กราฟแสดงค่าความแข็งรอยเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอกที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ผลทดลองพบว่าค่าความแข็งบริเวณรอยเชื่อมมีแนวโน้มที่มีค่าที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนและบริเวณเนื้อโลหะเดิมของวัสดุ เนื่องจากบริเวณรอยเชื่อมมีการสะสมความร้อนในการเชื่อมได้ดี[69] ในขณะที่เชื่อมและอีกสาเหตุเกิดจากบริเวณรอยเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคจากก้อนกลม (Globular Structure) ไปเป็นโครงสร้างเกรนที่ละเอียด (Fine Structure) โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยช่วง 42 ถึง 55 HV อย่างไรก็ตามบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนจะมีความแข็งที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความร้อนระหว่างบริเวณรอยเชื่อมกับเนื้อโลหะเดิมของวัสดุ ส่งผลให้โครงสร้างมีเกรนที่หยาบ (Coarse Structure) ซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยช่วง 29 ถึง 34 HV ในขณะที่เนื้อโลหะเดิมมีค่าความแข็งเฉลี่ยที่ 65 ถึง 67 HV ดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 กราฟค่าความแข็งรอยเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก

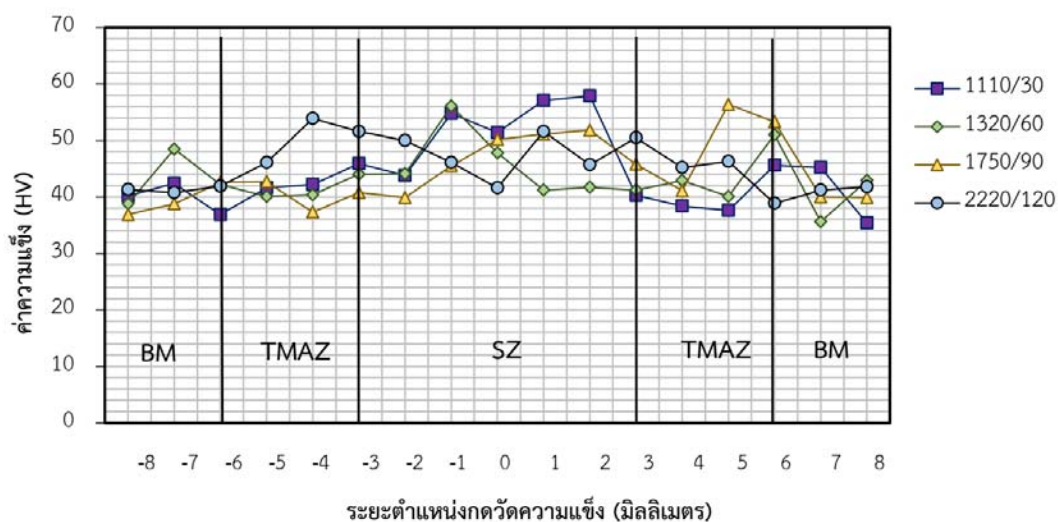
ในทำนองเดียวกันค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ของเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยมที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที จะเห็นได้ว่าที่บริเวณรอยเชื่อม (Stir Zone: SZ) ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยช่วง 35 ถึง 46 HV เนื่องจากพฤติกรรมการเกิดความร้อนไม่เหมาะสม ในขณะที่บริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนค่าความแข็งเฉลี่ยช่วง 31 ถึง 37 HV

(ภาพที่ 4.15) ความร้อนที่เกิดขึ้นสำคัญอย่างมากต่อการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยบ่าและรูปทรงเครื่องมือกวนมีผลต่อการเกิดขึ้นของความร้อน โดยความร้อนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อบ่าและรูปทรงเครื่องมือกวน นอกจากนั้นตัวแปรของความเร็วในการเดินเชื่อมและความเร็วรอบในการหมุนกวนก็ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดความร้อนในขณะเชื่อม สามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = \frac{\pi \omega \mu F (R^2_{\text{shoulder}} + R_{\text{shoulder}} R_{\text{pin}} + R^2_{\text{pin}})}{45 (R_{\text{shoulder}} + R_{\text{pin}})} \quad (4.2)$$

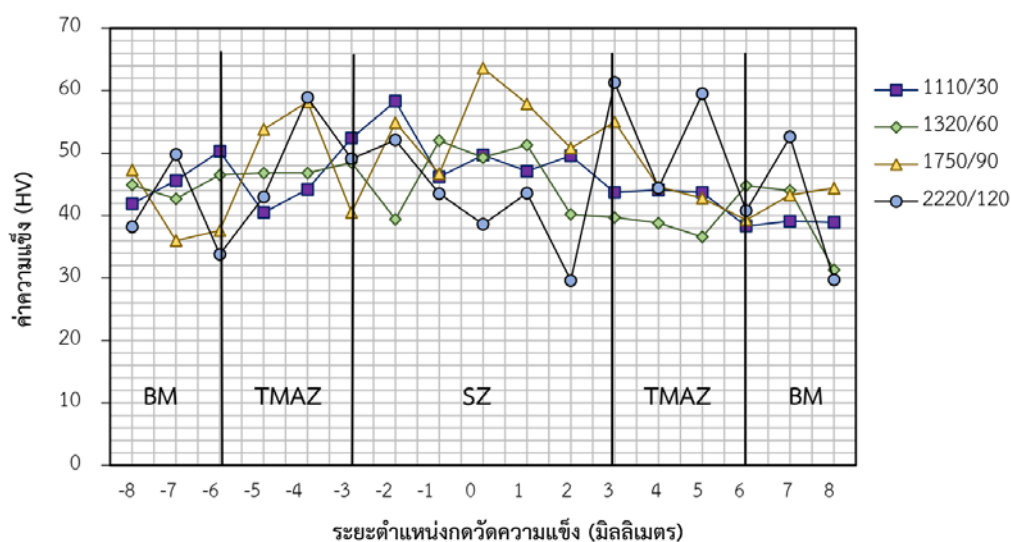
เมื่อ π	คือ	ค่าคงที่
ω	คือ	การเคลื่อนที่ในแนวเส้นรอบวง (ความเร็วหมุนเชื่อม)
μ	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
F	คือ	แรงกระทำภายนอก
R_{shoulder}	คือ	รัศมีบ่าของเครื่องมือกวน
R_{pin}	คือ	รัศมีของหัวกวน

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าความร้อน (Q) เกิดขึ้นมากตามความเร็วรอบในการหมุนกวน (ω) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) แรงกระทำภายนอก (F) และรัศมีบ่าของเครื่องมือกวน (R_{shoulder}) กับรัศมีของหัวกวน (R_{pin}) นั่นคือตัวแปรที่จะทำให้อุณหภูมิความร้อนมีผลลัพธ์ที่สูง ที่เป็นสาเหตุให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวในสภาวะพลาสติกได้ง่าย [70] กลไกการสร้างความร้อนที่เหมาะสมในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวนชิ้นงานจึงเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากความร้อนเกิดจากแรงกระทำทางกล (Mechanical Force) อย่างไรก็ตามหากวัสดุเกิดความร้อนมากเกินไปในขณะเชื่อมก็อาจนำไปสู่ผลต่อการเกิดครีบก้นมากเกินไปเช่นกัน



ภาพที่ 4.15 กราฟค่าความแข็งรอยเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม

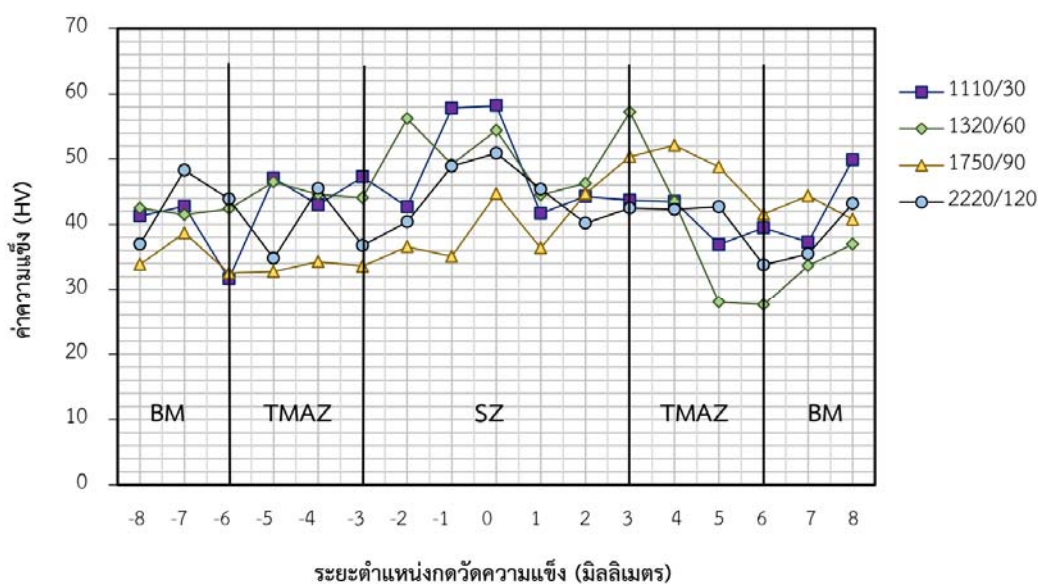
ภาพที่ 4.16 แสดงค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ของเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม จากตัวแปรความเร็วในการเดินเชื่อม 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอกและเครื่องมือกวนแบบทรงสามเหลี่ยม มีค่าความแข็งเฉลี่ยช่วง 41 ถึง 51 HV และบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนค่าความแข็งเฉลี่ยช่วง 36 ถึง 46 HV สำหรับพฤติกรรมของความร้อนในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวนยังส่งผลมาจากสัมประสิทธิ์การแผ่ของความร้อนของวัสดุด้วย ซึ่งอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีสัมประสิทธิ์การแผ่ของความร้อนที่ $210 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่ของความร้อนที่ดีของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 จะส่งผลให้ความร้อนจะเกิดการสะสมในรูปแบบพลังความร้อนภายในเนื้อวัสดุและพลังความร้อนกระตุ้นให้เนื้อวัสดุเกิดการอ่อนตัวในขณะเชื่อม [71]



ภาพที่ 4.16 กราฟค่าความแข็งรอยเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยม

สำหรับค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยเครื่องมือกวนแบบทรงสี่เหลี่ยมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 30, 60, 90 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในภาพที่ 4.17 พบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งมากกว่าบริเวณอื่น ๆ เช่นกัน ค่าความแข็งเฉลี่ยช่วง 41 ถึง 53 HV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องมือกวนแบบทรงกระบอก ในขณะที่บริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนค่าความแข็งเฉลี่ยช่วง 28 ถึง 37 HV แต่สังเกตได้ว่าบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านแอดวานซ์ (Advancing Side) มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านรีทรีตติ้ง (Retreating Side) เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านแอดวานซ์จะเป็นลักษณะถูกลากตามยาวตามรอยทิศทางการกวน ในขณะที่บริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านรีทรีตติ้งพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะถูกอัดให้เล็กลง ส่งผลให้มีค่าความแข็งที่สูงกว่าบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านแอดวานซ์ อย่างไรก็ตามนอกจาก

การเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันของบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนทั้งสองด้าน อีกสาเหตุของความแข็งที่มีค่าแตกต่างกันมาจากกลไกการเกิดความเครียดตกค้าง (Residual Stress) ของวัสดุที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและความร้อนสะสม โดยบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านรีตริงพบว่าความเครียดตกค้างสูงกว่าบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านแอดวานซ์ ซึ่งนำไปสู่ค่าความแข็งที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกัน [72]



ภาพที่ 4.17 กราฟค่าความแข็งรอยเชื่อมของเครื่องมือกวนแบบทรงห้าเหลี่ยม

4.6 ผลการทดสอบความล้า

การทดสอบความล้าแบบดึง-กดของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ที่ผ่านกระบวนการเชื่อม เสียขาดแบบกวนจะทดสอบที่ค่าความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ (Frequency; Hz) ค่าระยะดึง-กด (Stroke) จะทดสอบในช่วง 0.35 ถึง 0.80 มิลลิเมตร โดยมีค่าอัตราส่วนความเค้นที่ R^{-1} (Fully Reversed Stress) จากการทดสอบความล้าพบว่าเนื้อโลหะเดิมของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 มีความสมบัติทางความล้าที่ดีกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียขาดแบบกวน จากข้อมูลของผลการทดสอบความล้า ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และนำเสนอด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับรอบต่อการเสียหาย (S-N Curve) จากการวิเคราะห์กราฟค่าของการทดสอบความล้าแสดงให้เห็นว่า ที่ภาระ 42.46 MPa ชิ้นทดสอบซึ่งเตรียมจากเนื้อโลหะเดิมทดสอบสูงเกิน 2,000,000 รอบ ชิ้นทดสอบไม่ขาด จึงหยุดการทดสอบ ส่วนชิ้นทดสอบที่เตรียมจากชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียขาดแบบกวนที่ตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ภาระ 46.72 MPa มีอายุ 1,440,470 รอบ ในทางตรงกันข้าม ที่ภาระสูงในช่วง 90 ถึง 102 MPa พบว่าจำนวนรอบอายุที่เกิดความเสียหายมีค่า 1,747 รอบ ของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียขาดแบบกวน และอายุความเสียหายมีค่า 2,360 รอบ เนื่องจากระยะดึง-กด หรือภาระทดสอบที่สูงจะส่งผลให้ชิ้นงานทดสอบเกิดความเค้นทดสอบที่สูง โดยความเค้นทดสอบมักจะส่งผลให้เกิดการฉีกขาดของ

ข้อบกพร่องในรอยเชื่อมและนำไปสู่การวิบัติของชิ้นงานได้ง่าย ในขณะที่ระยะดึง-กด หรือภาระทดสอบที่ต่ำมีแนวโน้มที่ทำให้ชิ้นงานเข้าสู่การวิบัติที่ยาวนานขึ้น [73]

ตารางที่ 4.4 ผลค่าความเค้นกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ลำดับ	ระยะดึง-กด (มิลลิเมตร)	ความเค้นทดสอบ (MPa)	รอบความเสียหาย (จำนวนรอยต่อความเสียหาย)
เนื้อโลหะเดิม			
1	0.80	101.72	1,747
2	0.70	95.66	25,465
3	0.60	65.81	31,835
4	0.50	62.24	55,560
5	0.45	45.79	1,655,334
6	0.40	42.46	2,000,000*
7	0.35	38.92	2,000,000*
ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที			
8	0.80	94.52	2,360
9	0.70	75.10	6,104
10	0.60	68.31	20,780
11	0.50	55.52	457,134
12	0.45	46.72	1,440,470
13	0.40	33.12	2,000,000*
14	0.35	29.47	2,000,000*

สำหรับการความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นของชิ้นงานทดสอบความล้าของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เมื่อวิเคราะห์อายุการล้าจะใช้สมการของ Basquin ซึ่งจะแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้น [74] สามารถพิจารณาจากได้ด้วยสมการดังนี้

$$\sigma_R = AN_R^B \quad (4.3)$$

ซึ่งคือสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟล็อก-ล็อกการล้า ช่วงที่ 2 ของการเติบโตและเมื่อนำมาแปรรูปสมการเพื่อพยากรณ์ทำนายอายุการล้า [75] สามารถประเมินได้จากสมการดังนี้

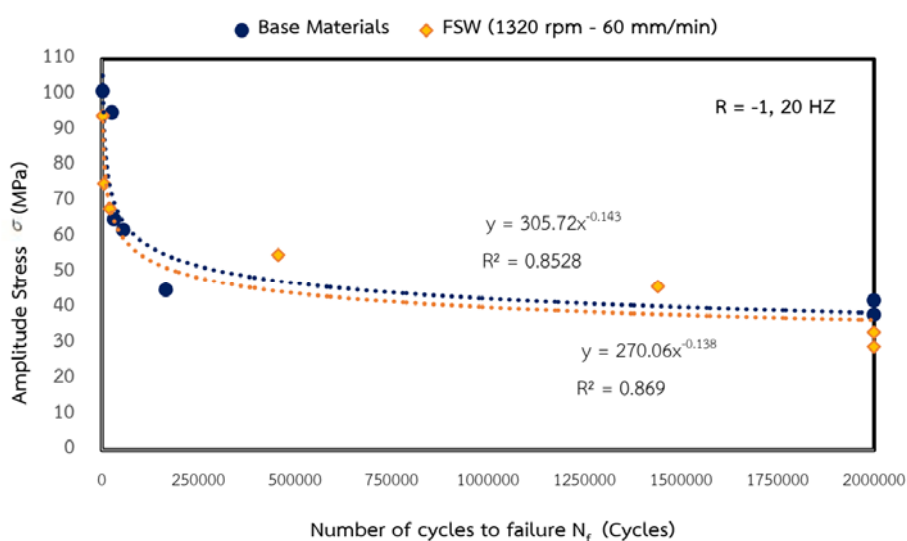
$$N = 10^{\left(\frac{1}{b}\right)(\log \sigma - \log a)} \quad (4.4)$$

เมื่อนำความเค้นกับจำนวนรอบที่เกิดความเสียหายจากการทดสอบความล้ามาสร้างสมการเพื่อประเมินอายุการล้าของเนื้อโลหะเดิม แสดงในสมการที่ 4.5 ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วในการเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาทีสามารถประเมินอายุการล้าแสดงในสมการที่ 4.6 ตามลำดับ

$$N = 10^{\left(\frac{1}{-0.143}\right)(\log \sigma - \log 305.72)} \quad (4.5)$$

$$N = 10^{\left(\frac{1}{-0.138}\right)(\log \sigma - \log 270.06)} \quad (4.6)$$

อย่างไรก็ตามการวิบัติของชิ้นงานนอกจากสาเหตุมาจากข้อบกพร่องแล้ว โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยบริเวณที่มีสารละลายของแข็ง β -Al₅FeSi รูปร่างเล็กและกระจายสม่ำเสมอเป็นโครงสร้างทำให้เกิดความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Toughness) ที่ดี ซึ่งขนาดเกรนที่ละเอียดส่งผลให้เกิดการต้านทานรอยแตกที่ดี ช่วยลดโอกาสการเกิดแนวรอยแตก (Cleavage) หรือขัดขวางการพัฒนารอยแตกที่ดีด้วย [76] กราฟเปรียบเทียบความเค้นกับอายุการใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 4.18

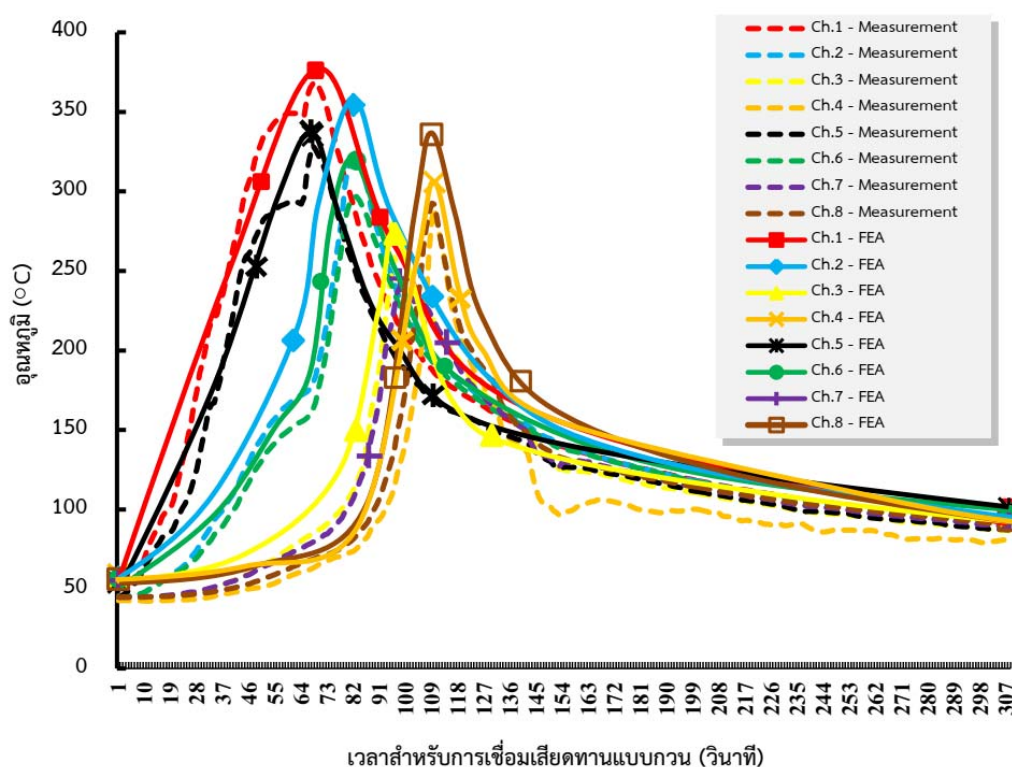


ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงผลความล้าแบบดึง-กด ของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063

4.7 ผลการประเมินด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์

การวิเคราะห์ความร้อนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จะใช้การตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และใช้โปรแกรมค่าย Altair HyperWorks เพื่อเปรียบเทียบกัน สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์เลือกโปรแกรม HyperMesh และ HyperXtrude ซึ่งเป็นชุดโปรแกรมค่าย Altair HyperWorks ซึ่งความร้อนจากแรง

เสียดทานในระหว่างการเชื่อมถือว่าเป็นแหล่งความร้อนในสภาวะคงตัว เมื่อวิเคราะห์พบว่าป็นลักษณะการเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบชั่วคราว เพื่อคำนวณการกระจายความร้อนในช่วงเวลาขณะเชื่อมที่สัมพันธ์กับพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไป แบบจำลองระเบียบวิธีวิจยไฟไนต์อีลิเมนต์ประกอบด้วย องค์ประกอบฐาน (Mash) แบบแปดเหลี่ยมจำนวน 39,196 โหนด (8-node) และองค์ประกอบฐานแบบหกเหลี่ยม (Hexahedral) จำนวน 60,161 โหนด อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $130 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ค่าการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่น $247 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, 901 J/(kgK) และ 2.7 g/cm^3 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัพเปิ้ลกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีวิจยไฟไนต์อีลิเมนต์

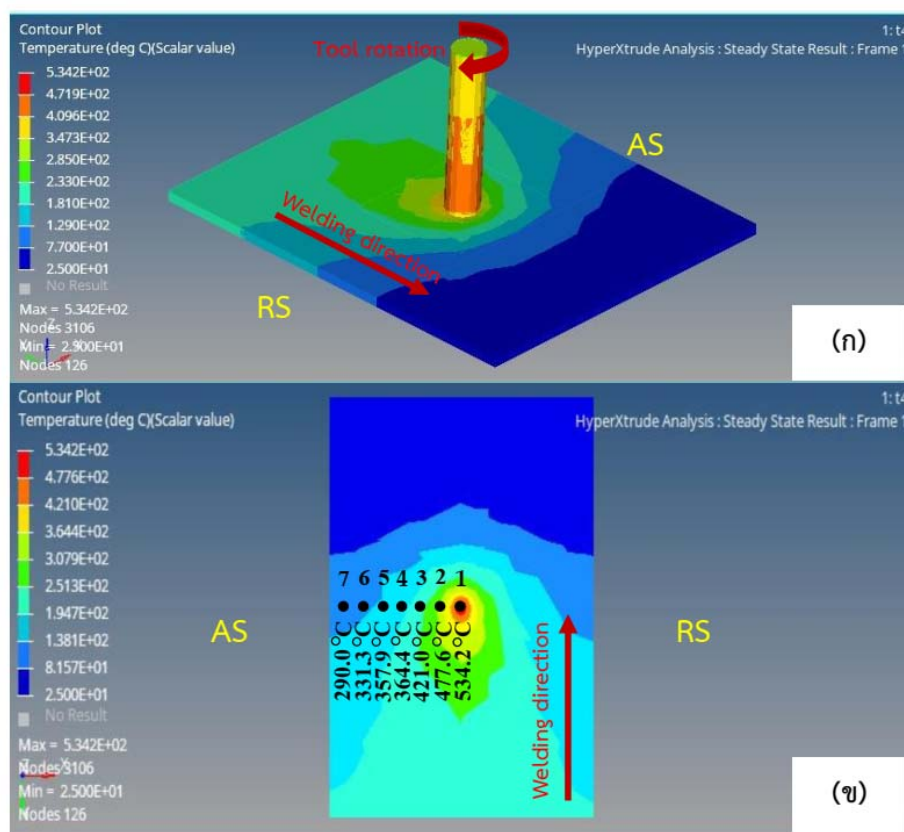
แบบจำลองอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัพเปิ้ลถูกเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีวิจยไฟไนต์อีลิเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าลักษณะของกราฟอุณหภูมิที่ได้จากการประเมินทั้งสองวิธีนั้นสอดคล้องกันดี ซึ่งความร้อนจะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาที่การกดแท่งของเครื่องมือกววน (Holding Time) ทำให้เกิดการสะสมความร้อนในบริเวณนั้นและเป็นการสร้างการกระจายของอุณหภูมิ หลังจากนั้นอุณหภูมิในบริเวณอิทธิพลกระทบร้อน ไกล่รอยเชื่อมจะลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการระบายของความร้อนในชิ้นงาน [77] เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิในตำแหน่งของการวัดที่ 1 ถึง 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านแอดวานซ์กับอุณหภูมิในตำแหน่งของการวัดที่ 5 ถึง 8 ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านรีทรีสดี้งพบว่าอุณหภูมิในด้านแอดวานซ์จะสูงกว่าค่าทางด้านรีทรีสดี้ง โดยค่าอุณหภูมิสูงสุดบริเวณอิทธิพล

กระทะร้อนด้านแอดวานซึ่งอยู่ในช่วง 375 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดบริเวณอิทธิพลกระทะร้อนด้านรีทริสตั้งอยู่ในช่วง 347 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์จะมีค่าความร้อนที่สูงกว่าตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัพเบิลเล็กน้อย เนื่องจากไม่เกิดปัจจัยแทรกซ้อนในขณะวิเคราะห์ผลของความร้อน

การวิเคราะห์ความร้อนระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถทำนายการกระจายของอุณหภูมิบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัพเบิล ที่ไม่สามารถวางเทอร์โมคัพเบิลสำหรับการวัดได้ ตารางที่ 4.5 แสดงว่าอุณหภูมิสูงสุดจากระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์ 534.2 องศาเซลเซียส มาจากพื้นผิวชิ้นงานสัมผัสกับปากของเครื่องมือกลึง ซึ่งอุณหภูมิจะลดลงในตำแหน่งที่อยู่ห่างจากบริเวณรอยเชื่อมเนื่องจากการแผ่ของความร้อนที่ทำได้ยาก โดยความร้อนจะเกิดขึ้นสูงสุดในบริเวณรอบ ๆ เครื่องมือกลึง ดังแสดงในภาพที่ 4.20 (ก) และอุณหภูมิในตำแหน่งอื่น ๆ ที่ห่างออกไปจากบริเวณรอยเชื่อมสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 4.20 (ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063

ตำแหน่ง	จำลองอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์ (°C)
1 (กึ่งกลางรอยเชื่อม)	534.2
2	477.6
3	421.0
4	364.4
5	357.9
6	331.3
7	290.0



ภาพที่ 4.20 แบบจำลองความร้อนที่ได้จากการประเมินด้วยระเบียบวิธีจลไฟไนต์อีลิเมนต์

สำหรับผลการจำลองความร้อนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 ด้วยระเบียบวิธีจลไฟไนต์อีลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าความร้อนสะสมอยู่บริเวณรอยเชื่อมที่กึ่งกลางของบริเวณที่ถูกกวน เนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะเกิดการสร้างความร้อนจากบ่าเครื่องมือกวนและผิวรอบ ๆ รูปทรงของเครื่องมือกวน ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิที่สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ นอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของความร้อนแบบการนำความร้อน (Heat Conduction) ซึ่งเกิดการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และอุณหภูมิจะลดลงไปตามบรรยากาศและเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป [78]

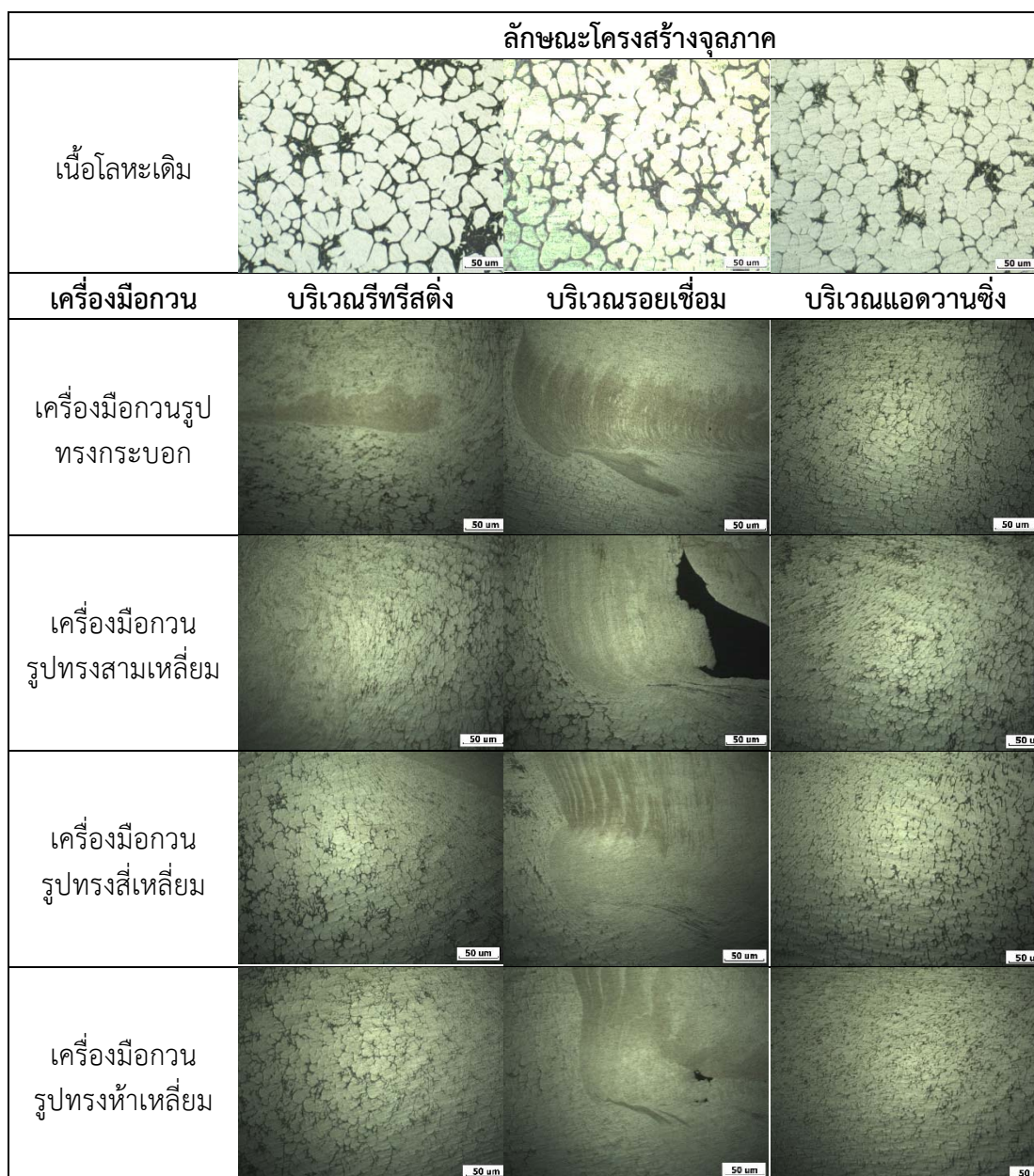
4.8 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscopy) พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยเฟสแอลฟา (α) ซึ่งมีลักษณะแบบก้อนกลมและมีเฟสยูเทกติก (Eutectic) รวมตัวในรูปแบบสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi แทรกตัวอยู่ระหว่างขอบเกรน โดยโครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิมมีลักษณะก้อนกลมขนาด 32–45 ไมโครเมตร ในขณะที่สารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi มีรูปร่างแบบเข็ม (Plate-Like) อย่างไรก็ตามหลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง เกรด 6063 พบว่าโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและรูปร่างในบริเวณรอยเชื่อมและบริเวณอิทธิพลกระทันร้อน (Thermal Mechanical Affect

Zone; TMAZ) รูปทรงหัวทรงแทงกระบอกที่ความเร็วรอบ ในการหมุนแกน 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าโครงสร้างบริเวณที่ถูกกวนมีการผสมรวมตัวกันของเนื้อวัสดุอย่างละเอียด (Sound Bond) เนื่องจากการเสียดทานระหว่างเครื่องมือกวนกับเนื้อวัสดุ อะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 จนเกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนก่อนกลม สำหรับบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนมีลักษณะเกรนที่หยาบ ในขณะที่เครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยมของตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนแกน 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที จะเกิดช่องว่างขนาดใหญ่บริเวณรอยเชื่อม (Voids) ซึ่งจะไปสู่สมบัติทางด้านแรงดึงที่ต่ำลง [79] ในทำนองเดียวกันเครื่องมือกวนรูปทรงสี่เหลี่ยมและเครื่องมือกวนรูปทรงห้าเหลี่ยมที่ความเร็วรอบในการหมุนแกน 1320 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าโครงสร้างเกรนก่อนกลมก็มีการตกตะกอนใหม่ (Recrystallization) ในบริเวณรอยเชื่อม แต่รอยเชื่อมก็มีการประสานเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีของเนื้ออะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 ของทั้งสองเครื่องมือกวน สังเกตได้ว่าพบช่องว่างขนาดเล็กสำหรับเครื่องมือกวนรูปทรงห้าเหลี่ยม เพราะความร้อนในขณะเชื่อมไม่เหมาะสม ทำให้ความร้อนเข้าถึงได้ยากในบริเวณปลายของเครื่องมือกวน ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดช่องว่างหลังจากการเชื่อม โดยกลไกการสร้างความร้อนมาจากปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง เช่น ขนาดความโตของบ่า ขนาดความโตของของเครื่องมือกวน ความเร็วรอบในการหมุนแกนและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ดังอธิบายจากสมการ [80]

$$q_0 = 4/3\pi^2\mu P\omega R^3 \quad (4.7)$$

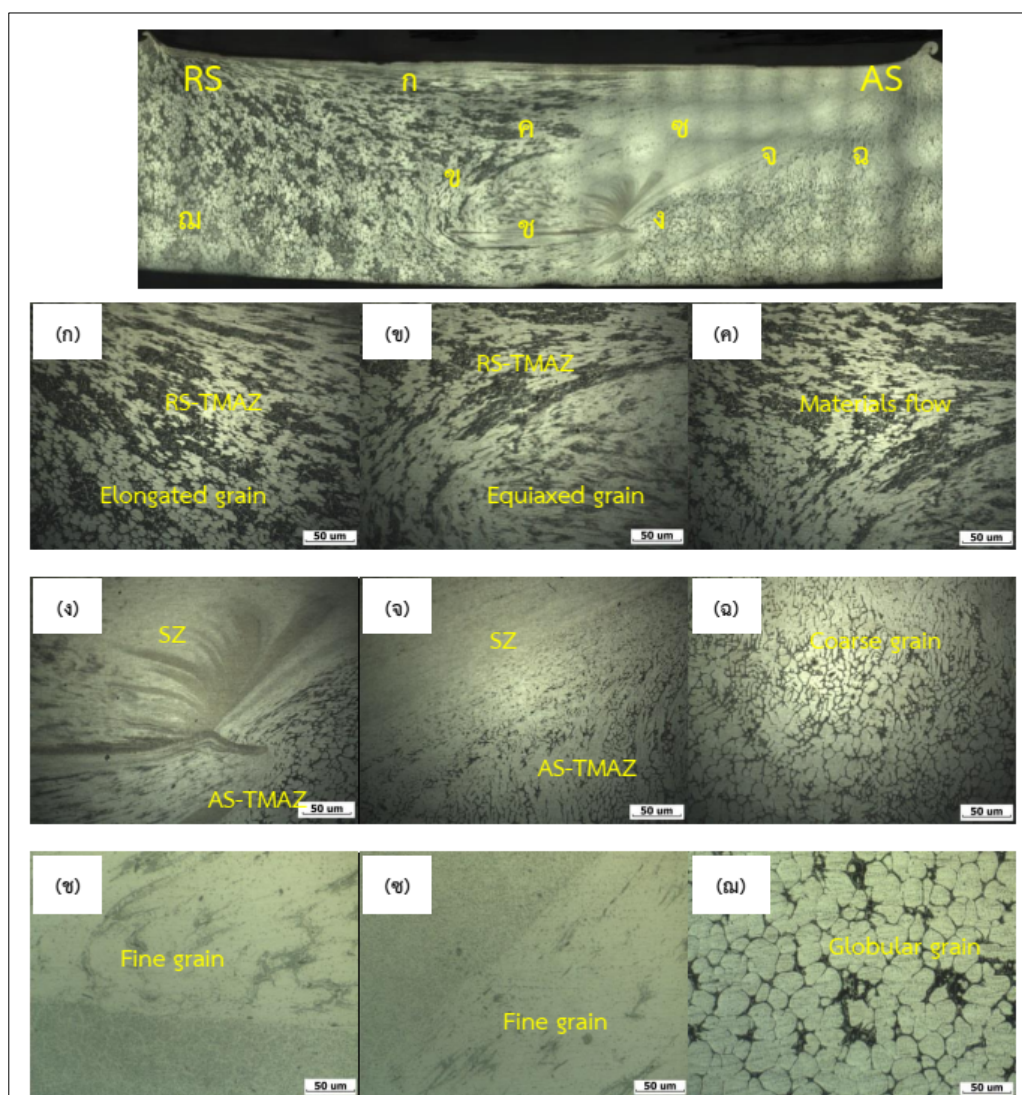
เมื่อค่า μ เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่า P คือ ค่าแรงภายนอกที่กระทำในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน ค่า ω คือ การเคลื่อนที่ของเส้นรอบวงกลมหรือความเร็วรอบในการหมุนแกน ค่า R คือ รัศมีของบ่าของหัวทวน และค่า π เป็นค่าคงที่ในการทดลอง ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อการเกิดความร้อนในระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวน นำไปสู่การยึดติดกันของชิ้นงาน ข้อบกพร่องจากการเชื่อมและนำไปสู่สมบัติทางกลที่ดีของชิ้นงานหลังการเชื่อมได้ สำหรับลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเครื่องมือกวนทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเครื่องมือกวานรูปทรงที่แตกต่างกัน

สำหรับโครงสร้างจุลภาคในแต่ละบริเวณของรอยเชื่อมขอยกตัวอย่างตัวแปรความเร็วรอบในการหมุนกวาน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที และเครื่องมือกวานรูปทรงกระบอก ซึ่งมีสมบัติทางด้านแรงดึงที่ดีที่สุดในการอธิบายในงานวิจัยนี้ จากการตรวจสอบไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในบริเวณรอยเชื่อม ซึ่งโครงสร้างในแต่ละบริเวณจะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงที่กระทำ โดยพบว่าบริเวณรอยเชื่อมโครงสร้างมีเกรนละเอียด ขนาดเล็ก โดยสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi ผสานสลับในเนื้อวัสดุที่ถูกกวาน ดังแสดงในภาพที่ 4.22 (ข และ ช) ในขณะที่บริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านแอตวานซิ่งมีลักษณะเกรนแบบหยาบ ดังแสดงในภาพที่ 4.22 (ง จ และ ฉ) สำหรับบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนด้านรีทรีตติ้งมีลักษณะเกรนแบบยืดยาวคล้ายตัวหนอน ดังแสดงในภาพที่ 4.22 (ก

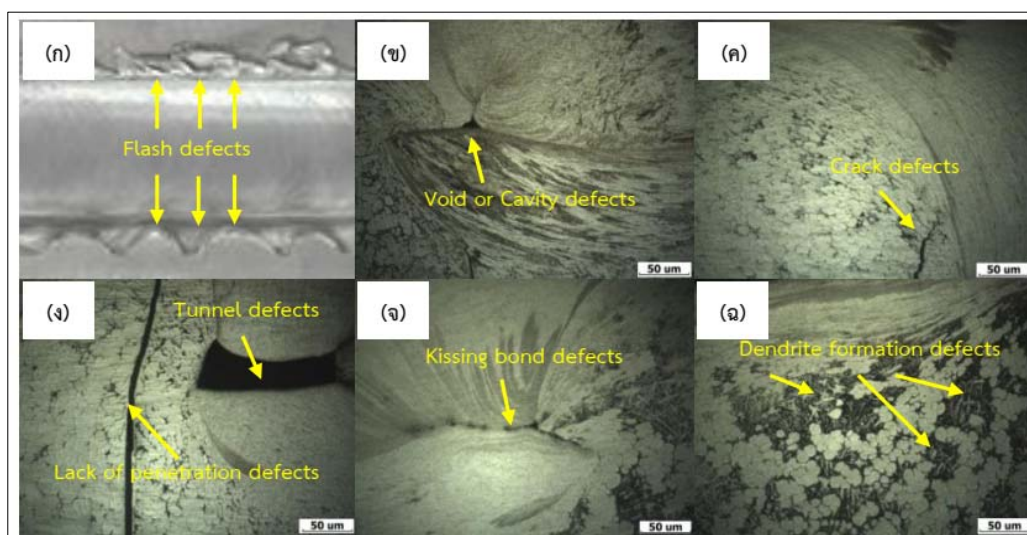
ข และ ค) แต่สำหรับบริเวณที่ความร้อนไม่สามารถแพร่เข้าได้ถึงจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค [81] ดังแสดงในภาพที่ 4.22 (ณ)



ภาพที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของความเร็วยรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที และเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก

อย่างไรก็ตามเมื่อประเมินโครงสร้างจุลภาคในบริเวณรอยเชื่อมพบข้อบกพร่อง 6 ประเภท จากงานวิจัยนี้ โดยเกิดจากตัวแปรในการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม นำไปสู่การเกิดข้อบกพร่องที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อบกพร่องประเภทแรก คือ การเกิดครีบมากเกินไป (Flash Defects) เกิดจากความเร็วในการเดินเชื่อมที่ต่ำและความเร็วในการหมุนกวนที่สูงเกินไป จนเกิดความร้อนส่วนเกิน [82] มักเกิดในเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกและรูปทรงห้าเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 4.23 (ก) ในทำนองเดียวกันเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอกและรูปทรงห้าเหลี่ยมก็สามารถทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรง (Void or Cavity Defects) ซึ่งเกิดจากความเร็วในการเชื่อมที่สูงเกินไป การกดลึงที่ไม่เหมาะสมและมุมเอียงของเครื่องมือที่ไม่

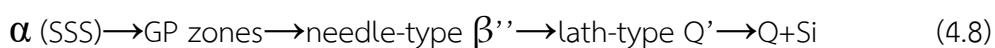
เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 4.23 (ข) ข้อบกพร่องประเภทที่ 3 มาจากเครื่องมือเครื่องมือกวนรูปสามเหลี่ยมที่มีการสะสมของของแข็ง การไหลของเนื้อวัสดุไม่ดี ความร้อนเข้าที่ต่ำและการหดตัวของเนื้อวัสดุ จนนำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าว (Crack Defects) [83] ดังแสดงในภาพที่ 4.23 (ค) ในเวลาเดียวกัน การซึมลึกที่ไม่ดีและรูพรุนขนาดใหญ่ (Lack of Penetration and tunnel defects) (ภาพที่ 4.23 (ง)) เกิดจากความเร็วในการเดินเชื่อมที่สูงขึ้น ความเร็วในการหมุนกวนที่ต่ำ ความลึกของการกดต่ำและความหนาของชิ้นงานไม่สัมพันธ์กับเครื่องมือกวน ทำให้เกิดความร้อนต่ำขณะเชื่อม [84] สาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดข้อบกพร่องที่อธิบายไว้ สำหรับข้อบกพร่องแบบแนวตะเข็บ (Kissing Bond Defects) เป็นข้อบกพร่องประเภทที่ 5 ซึ่งมาจากความเร็วในการเดินเชื่อมสูงเกินไป หรือเกิดจากชิ้นออกไซด์จากพื้นผิวถูกลากกวนเข้าไปในเนื้อวัสดุ [85] ดังแสดงในภาพที่ 4.23 (จ) สุดท้าย เมื่อความเร็วในการหมุนกวนสูงและความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำมาก ๆ จะทำให้ความร้อนเข้าสู่สูงมาก จึงพบข้อบกพร่องของการก่อตัวของเดนไดรต์ (Dendrite Formation Defects) โดยโครงสร้างเดนไดรต์ใหม่ถูกสร้างขึ้นเป็นเกรนเรียงเป็นแนวเล็ก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.23 (ฉ)



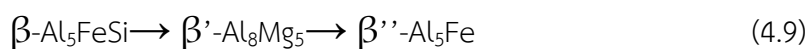
ภาพที่ 4.23 ประเภทของข้อบกพร่องอะลูมิเนียมหล่อกิ่งแข็ง เกรด 6063 หลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในสถานะที่แตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อประเมินการกระจายตัวและรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi โดยในบริเวณเนื้อโลหะเดิมพบว่าสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi มีลักษณะพื้นระการยึดติดแบบร่างแห (Plate-Like Shapes) มีขนาดประมาณ 79–114 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.24 (ก) อย่างไรก็ตามสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi ได้รับแรงเฉือนในขณะที่เชื่อม ส่งผลให้เกิดการตกตะกอนใหม่ของสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi ในสถานะที่ไม่สมบูรณ์ (ไม่เสถียร) ดังแสดงในภาพที่ 4.24 (ข) ในทำนองเดียวกัน พฤติกรรมแตกของสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi ที่บริเวณรอยเชื่อมพบว่ามีขนาดของอนุภาคที่เล็กลง โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8–13 ไมโครเมตร การตกผลึกใหม่ของโครงสร้างจุลภาคนี้นี้

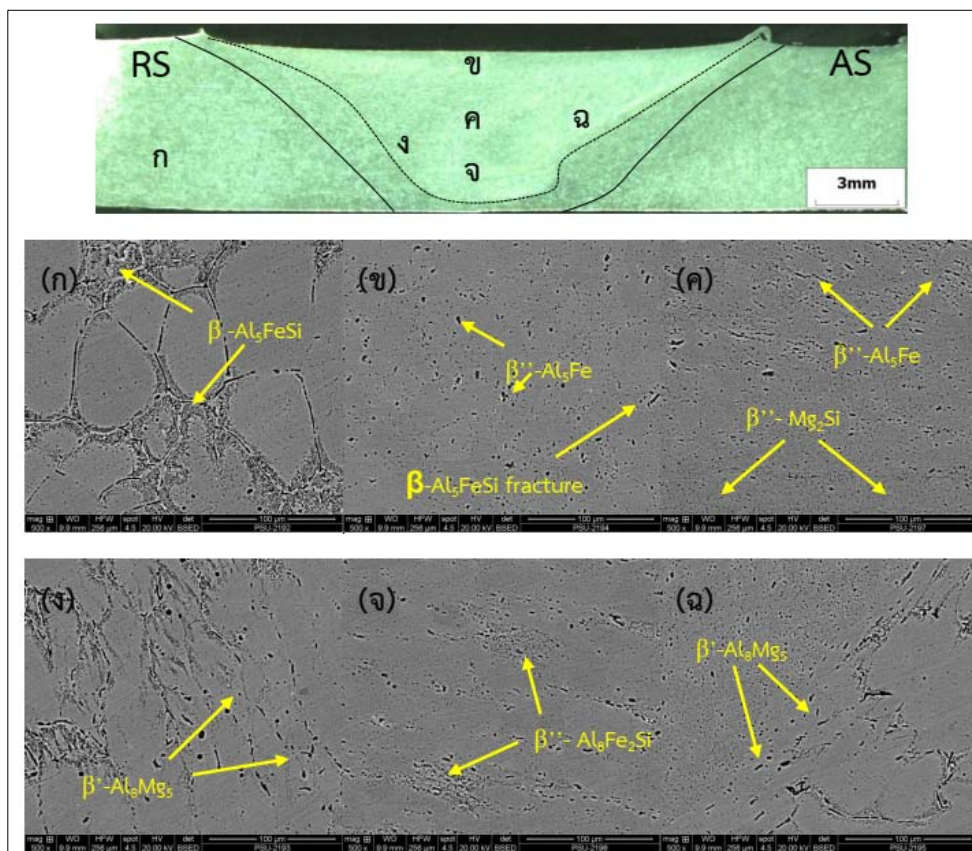
นำไปสู่คุณสมบัติความแข็งแรงที่ดี ดังแสดงในภาพที่ 4.24 (ค) และในตำแหน่งด้านล่างของรอยเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณปลายของเครื่องมือกลึง แสดงในภาพที่ 4.24 (จ) พบว่าขนาดของสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi มีขนาดที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณรอยเชื่อมด้านบนและกึ่งกลางรอยเชื่อม เนื่องจากในบริเวณนี้ความร้อนและความเค้นเฉือนจะเข้าถึงได้ยาก ซึ่งขนาดอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 17–24 ไมโครเมตร กลไกการแตกหักแบบถาวรและการเสียรูปของเฟสยูเทคติกได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจากตัวแปรในการเชื่อม [86] ซึ่งการกระจายตัวของสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi ที่สม่ำเสมอและขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันทำให้คุณสมบัติความล้าและความแข็งแรงที่ดีเช่นกัน โดยความร้อน ความเค้นเฉือนและอัตราการเย็นตัวเป็นอีกองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการตกตะกอนโดยสมบูรณ์ของสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi ซึ่งลำดับกลไกของการตกตะกอนอะลูมิเนียมอัลลอยด์เกรด 6XXX สามารถสังเกตได้ดังนี้



อัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัวจะสนับสนุนให้เกิดการก่อตัวของโซน GP ซึ่งนำไปสู่ความแข็งแรงสูงสุด [87] สำหรับกลไกการตกตะกอนของอะลูมิเนียมผสม Al-Mg-Si-Fe ในภาวะสมดุลสามารถสังเกตได้ในด้วยการเปลี่ยนแปลงของสารละลายของแข็ง β - Al_5FeSi โดยมีการเปลี่ยนดังนี้



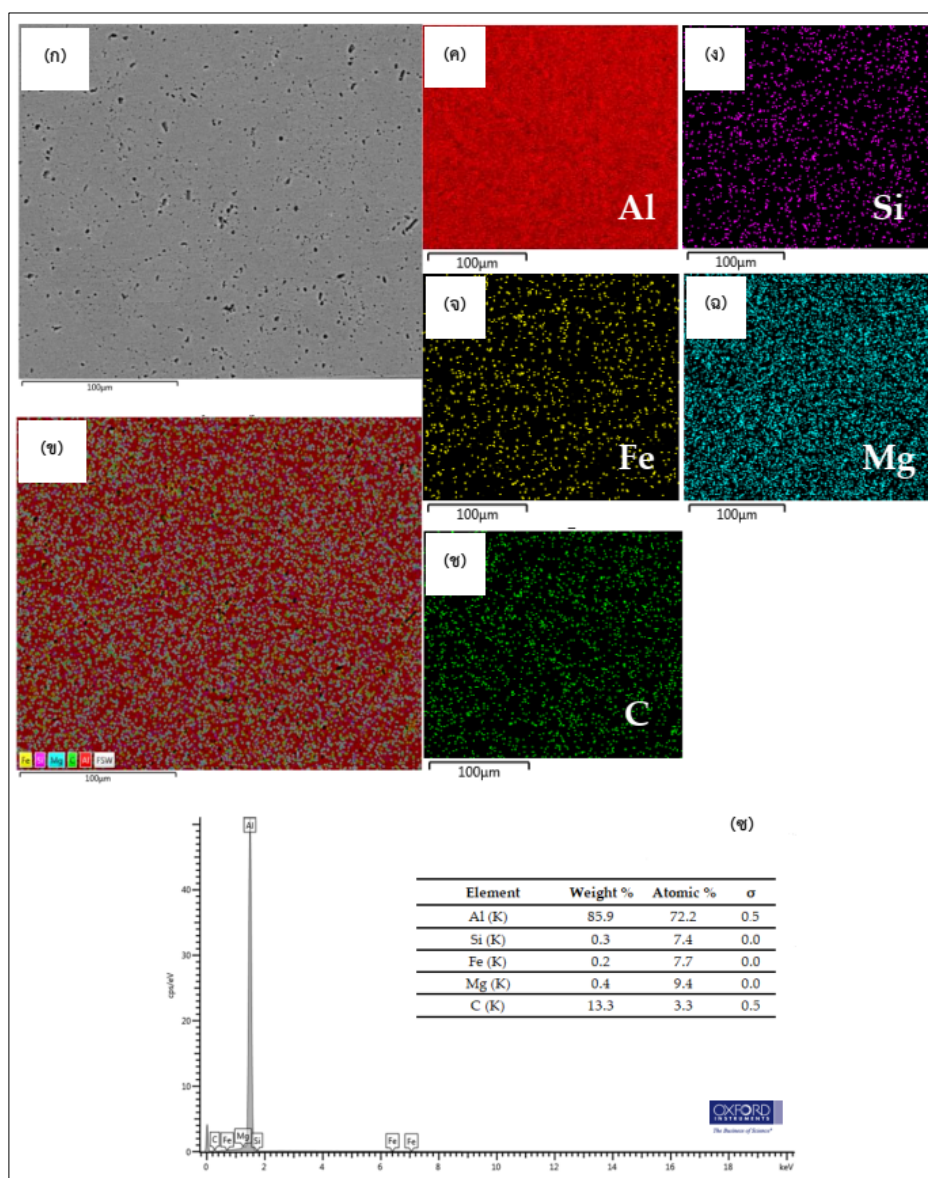
อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น มีกลไกการเกิดความร้อนช่วงสั้น ๆ จึงนำไปสู่การตกผลึกยากในโซน GP แต่สารละลายของแข็ง Mg_2Si , $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ก็ถูกสังเกตพบเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.24 (ง และ ฉ)



ภาพที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคในบริเวณรอยเชื่อมโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากเครื่องมือการรูปทรงกระบอกที่ความเร็วรอบในการหมุน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที

ภาพที่ 4.25 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุด้วยเอ็กซ์เรย์สเปกโตรมิเตอร์ (EDX-Ray) เพื่อประเมินความเข้มข้นของธาตุผสมที่เกิดขึ้นหลังจากการเชื่อม โดยพบว่าผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเชื่อมมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการแพร่ของอะตอมในบริเวณรอยเชื่อม สามารถพิจารณาได้จากอะตอมของซิลิกอน (Si) และอะตอมของแมกนีเซียม (Mg) มีความสามารถในการแพร่ที่ดี โดยมีความเข้มข้นของธาตุประมาณ 7.4 และ 9.4 เปอร์เซ็นต์ (%Atomic) เนื่องจากมีขนาดอะตอมของซิลิกอนและอะตอมของแมกนีเซียมมีขนาดเล็กและมีความเข้มข้นของอะตอมสูง ทำให้เกิดการแพร่การกระจายตัวได้ดีในบริเวณรอยเชื่อม ดังแสดงในภาพที่ 4.25 (ง และ ฉ) ในทำนองเดียวกันอะตอมของเหล็ก (Fe) แพร่กระจายได้ยาก เนื่องจากต้องการความร้อนกระตุ้นเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอม [88] เพราะเหล็กมีจุดหลอมเหลวสูง (Melting Point) ส่งผลให้อะตอมของเหล็กยากต่อการแพร่กระจาย ดังแสดงในภาพที่ 4.25 (จ) อย่างไรก็ตามพบอะตอมคาร์บอน (C) ในบริเวณรอยเชื่อม เนื่องจากเครื่องมือผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนสูงเกรด H 13 ซึ่งในขณะที่เชื่อมสียึดทานแบบกวนผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง เกรด H 13 เกิดความร้อนจากการเสียดทาน จึงทำให้อะตอมคาร์บอนสามารถแพร่มาอยู่ในรอยเชื่อมได้ แต่มีปริมาณการแพร่ที่น้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.25 (ข) ซึ่งกลไกการแพร่ของอะตอมบริเวณรอยเชื่อมพบว่าจะแพร่

จากธาตุผสมที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นของธาตุผสมต่ำ และอีกสาเหตุมาจากสัมประสิทธิ์การแพร่ของวัสดุเช่นกัน [89]



ภาพที่ 4.25 แบบจำลองปริมาณของธาตุบริเวณรอยเชื่อมด้วยเอ็กซ์เรย์สเปกโตรมิเตอร์ของความเร็วรอบในการหมุน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที จากเครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อแข็ง เกรด 6063 ส่งผลต่อคุณภาพรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัย ดังนี้

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพชิ้นงานหลังการเชื่อมมีลักษณะการเกิดครีบก้นและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ความเร็วรอบการหมุนเชื่อมที่สูง ความเร็วในการเดินของเครื่องมือกวนต่ำ ส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมเกิดครีบก้นและมีรอยเชื่อมที่กว้างกว่าความเร็วรอบการหมุนเชื่อมที่ต่ำและความเร็วในการเดินของเครื่องมือกวนที่สูง

5.1.2 จากผลการทดสอบความแรงดึงพบว่าความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที เครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก ได้ค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดมีค่าเท่ากับ 123.59 MPa ในทางตรงกันข้ามความเร็วรอบในการหมุนกวน 1100 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 120 มิลลิเมตรต่อนาที จากเครื่องมือกวนรูปทรงสามเหลี่ยม ให้ค่าแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 47.92 MPa ตามลำดับ

5.1.3 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 2017 ที่ความเชื่อมั่น (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 95.09 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ และส่วนที่เหลือประมาณ 4.91 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ สมการถดถอยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรจากพื้นผิวตอบสนองของแรงดึงที่เหมาะสมช่วง 86.17 ถึง 138.41 MPa จากเครื่องมือเชื่อมรูปทรงกระบอก ที่ความเร็วหมุนเชื่อมช่วง 1300 ถึง 2100 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 75 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทวนสอบแรงดึงมีค่า 120.7 MPa ซึ่งมีความถูกต้องและแม่นยำของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีสมการถดถอยดังนี้

$$\text{Tensile strength} = 124.80 + 0.0382 R - 0.157 W - 35.450 T - 0.000016 R^2 - 0.003336 W^2 + 7.006 T^2 + 0.000252 RW - 0.00071 RT + 0.008 WT \quad (\text{MPa})$$

5.1.4 การทดสอบความแข็งชิ้นงานหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่าบริเวณรอยเชื่อมมีค่าความแข็งช่วง 42 ถึง 55 HV ในขณะที่บริเวณอิทธิพลกระแทกร้อนมีค่าความแข็งช่วง 29 ถึง 34 HV จากตัวแปรของความเร็วรอบในการหมุนกวน 1320 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที เครื่องมือกวนรูปทรงกระบอก อย่างไรก็ตามความแข็งชิ้นงานหลังการเชื่อมยังมีค่าต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิมของวัสดุ

5.1.5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะเชื่อมจากการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีวิจัยไฟไนต์อีลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน โดยบริเวณอิทธิพลกระแทกร้อนมีอุณหภูมิช่วง 290 ถึง 360 องศาเซลเซียส ในขณะที่บริเวณกึ่งกลางรอยเชื่อม เมื่อวิเคราะห์ด้วยระเบียบ

วิธีวิจัยไฟไนต์อิลีเมนต์พบว่า มีอุณหภูมิช่วง 530 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบ Mg_2Si และ Al_5FeSi ตามลำดับ

5.1.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการเชื่อมพบว่า สารละลายของแข็ง Mg_2Si และ Al_5FeSi เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่าง ขนาดอนุภาคของสารละลายของแข็ง Al_5FeSi มีขนาด 79–114 ไมโครเมตร เมื่อได้รับแรงกระทำและความร้อนทำให้ขนาดลดลงที่ 8–13 ไมโครเมตร นอกจากนั้นสารละลายของแข็ง Al_5FeSi มีการตกผลึกใหม่เป็นสารละลายของแข็ง Al_6Fe_2Si และมีลักษณะเกรนละเอียด สำหรับบริเวณอิทธิพลกระทบบร้อนมีลักษณะเกรนที่หยาบและเกรนที่ขยายตัวขึ้น

5.1.7 จุดบกพร่องที่เกิดหลังการเชื่อมพบได้ 6 ประเภท ได้แก่ การเกิดครีปที่มากเกินไป การเกิดช่องว่าง การเกิดรอยแตก การไม่ยึดติดบริเวณรอยต่อ การเกิดเส้นรอยต่อ การเกิดโพรง การเกิดรอยแตกร้าวบริเวณขอบรอยต่อและการเกิดโครงสร้างเดรนไดรต์ขนาดเล็กตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง ซึ่งการเกิดความร้อนในขณะเชื่อมเป็นเรื่องที่ยาก ดังนั้นควรมีการประยุกต์การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนดังนี้

5.2.1 การเชื่อมการเชื่อมเสียดทานแบบกวนกับการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น การเชื่อมมิกแม็ก การเชื่อมทิก ซึ่งเป็นการใช้สองเทคนิครวมกัน (Hybrids Welding)

5.2.2 การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุกลุ่มที่มีค่าความแข็งแรงสูง เช่น เซรามิก วัสดุผสม เพราะวัสดุกลุ่มเหล่านี้เชื่อมได้ยาก หรือการเชื่อมต่างวัสดุ

5.2.3 การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุชีวการแพทย์ เช่น การเชื่อมรากฟันเทียม กระดูกเทียม วัสดุทางการแพทย์ เช่น อวัยวะโพรทธีส์ ชิ้นส่วนเรือ และวัสดุสำหรับชิ้นส่วนอวกาศ เช่น ถังน้ำมัน เชื้อเพลิง เป็นต้น เพราะผลิตภัณฑ์เหล่านี้ล้วนมีการเชื่อมต่อในการประกอบขึ้นรูปชิ้นงาน

5.2.4 การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของวัสดุกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า เช่น โครงสร้างรถยนต์ไฟฟ้า ฐานเก็บแบตเตอรี่ไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Singh, V. P. and et al. “Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review”, **Journal of Materials Research and technology**. 9(3); 6217-6256; May, 2020.
- [2] Gullino, A., Matteis, P. and D’Aiuto, F. “Review of Aluminum-to-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications”, **Metals**. 9(315): 1-28; March, 2019.
- [3] Curle, U. A. “Semi-solid near-net shape rheocasting of heat treatable wrought aluminum alloys”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 20(9): 1719-1724; June, 2010.
- [4] Canyook, R. and et al. “Evolution of microstructure in semi-solid slurries of rheocast aluminum alloy”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 20(9): 649-1655; September, 2010.
- [5] Shailesh, K. S. and et al. “Experimental and numerical studies on friction welding of thixocast A356 aluminum alloy”, **Acta Materialia**. 73: 177-185; July, 2014.
- [6] Amira, S. and et al. “Microstructure of die cast and thixocast ZAEX10430 (Mg–10Zn–4Al–3Ce–0.3Ca) alloy”, **Materials Characterization**. 76: 48-54; February, 2013.
- [7] Limmaneevichitr, C., Pongananpanya, S. and Kajornchaiyakul, J. “Metallurgical structure of A356 aluminum alloy solidified under mechanical vibration: An investigation of alternative semi-solid casting routes”, **J Materials & Design**. 30(9): 3925-3930; October, 2009.
- [8] Wannasin, J. and et al. “Research and development of gas induced semi-solid process for industrial applications”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 20(3): s1010-s1015; September, 2010.
- [9] Chucheep, T. and et al. “Semi-solid gravity sand casting using gas induced semi-solid process”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 20(3): s981-s987; September, 2010.
- [10] Burapa, R. and et al. “Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 20(3): s857-s861; September, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Thanabumrungskul, S. and et al. “Industrial development of gas induced semi-solid process”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 20(3): s1016-s1021; June, 2010.
- [12] Theron, M. and et al. “Effect of heat treatment on the properties of laser-beam welded rheo-cast F357 aluminum”, **Journal of Materials Processing Technology**. 212(2): 465-470; February, 2012.
- [13] Theron, M. and et al. “Property and quality optimization of laser welded rheo-cast F357 aluminum alloy”, **Solid State Phenomena**. 2010(192-193): 167-172; October, 2010.
- [14] Aluminium extrusion profile for automotive. (2019). “Aluminum Sheet”, **6063 Aluminum Plate**. [www.http://automotive-aluminum-sheet.com/aluminium-extrusion-profile-for-automotive/6063-aluminum-extrusion-for-window-trim-6063.html](http://automotive-aluminum-sheet.com/aluminium-extrusion-profile-for-automotive/6063-aluminum-extrusion-for-window-trim-6063.html). 22 June, 2020.
- [15] Süslü, Y. B. and et al. “Semi-Solid Processing of EN AW 6063 Aluminum Alloy for Thin-Wall Applications”, In **9th International Aluminium Symposium**. pp. 165-169. Istanbul: Istanbul Technical University, 2019.
- [16] Donatus, U. and et al. “Macro and microgalvanic interactions in friction stir weldment of AA2198-T851 alloy”, **Journal of Materials Research and Technology**. 8(6): 6209–6222; November, 2019.
- [17] Goel, P. and et al. “Investigation on the Effect of Tool Pin Profiles on Mechanical and Microstructural Properties of Friction Stir Butt and Scarf Welded Aluminium Alloy 6063”, **Metals**. 8(7): 2-15; January, 2018.
- [18] Kumar, A. and Murukan, N. “Optimization of Friction Stir Welding Process Parameters to Maximize Tensile Strength of Stir Cast AA6061-T6/AlNp Composite”, **Materials and Design**. 57: 383-393; May, 2014.
- [19] Boukraa, M. and et al. “Friction stir welding process improvement through coupling an optimization procedure and three-dimensional transient heat transfer numerical analysis”, **Journal of Manufacturing Processes**. 34: 566-578; August, 2018.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [20] Hassan, M., Tabrizi, B. and Jalili, N. “Thermal Optimization Friction Stir Welding with Simultaneous Cooling Using Inverse Approach”, **Applied Thermal Engineering**. 108: 751-763; July, 2016.
- [21] Li, G. H. and et al. “Quality Improvement of Bobbin Tool Friction Stir Welds in Mg-Zn-Zr Alloy by Adjusting tool geometry”, **Journal of Materials Processing Technology**. 282: 1-14; August, 2020.
- [22] Dialami, N., Cervera, M. and Chiumenti, M. “Effect of the Tool Tilt Angle on the Heat Generation and the Material Flow in Friction Stir Welding”, **Metals**. 9(28): 6-22; December, 2018.
- [23] Shamanian, M. and et al. “Characterization and mechanical behavior of AISI316L/Incoloy825 dissimilar welds processed by friction stir welding”, **Journal of Manufacturing Processes**. 55: 66–77; July, 2020.
- [24] Anand, R. and Sridhar, V. G. “Studies on process parameters and tool geometry selecting aspects of friction stir welding”, **Materials Today: proceedings**. 27(1): 576-583; June, 2020.
- [25] Fu. B. and et al. “Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6 aluminium alloy to AZ31B magnesium alloy”, **Journal of Materials Processing Technology**. 218: 38–47; April, 2015.
- [26] Rhodes, C. G. and et al. “Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum”, **Scripta Materialia**. 36(1): 69-75; January, 1997 .
- [27] Boumerzoug, Z. and Helal, Y. “Friction Stir Welding of Dissimilar Materials Aluminum AL 6061-T 6 to Ultra Low Carbon Steel”, **Metals**. 7(42): 1-9; January, 2017.
- [28] Elangovan, K. and Balasubramanian, V. “Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy”, **Journal of Materials Processing Technology**. 200: 163-175; May, 2008.
- [29] Kim, Y. G. and et al. “Effect of welding parameters on microstructure in the stir zone of FSW joints of aluminum die casting alloy”, **Materials Letters**. 60(29-30): 3830-3837; December, 2006.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] Santella M. L. and et al. “Effects of friction stir processing on mechanical properties of the cast aluminum alloys A319 and A356”, **Scripta Materialia**. 53(2): 201-206; July, 2005.
- [31] Mishra, R. S. and Ma, Z. Y. “Friction stir welding and processing”, **Materials Science and Engineering R**. 50: 1-78; August, 2005.
- [32] Merton, C. F. “MIT studies on dendritic solidification from 1950 to 1970”, **Journal of Crystal Growth**. 530: 125-246; January, 2020.
- [33] Flemings M. C. and Johnson W. L. “High viscosity liquid and semi-solid metal casting: Processes and products”, In **Plenary lecture world foundry conference 2002**. pp. 20-24. KyongJu, Korea: Korea Foundry Society, 2002.
- [34] Vogel, A., Doherty, R. D. and Carton, B. **Solidification and casting metal**. London: The metal Society, 1979.
- [35] Doherty, R. D., Lee, H. I. and Feest, E. A. “Microstructure of stir-cast metals”, **Materials Science and Engineering**. 65(1): 181-189; July, 1984.
- [36] สยาม แก้วคำไสย์. “การล้า (Fatigue)”, **รูปแบบการเสียหายของวัสดุ**.
[www.http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/06/fatigue.html](http://www.siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/06/fatigue.html). 22 พฤศจิกายน, 2563.
- [37] ปิยะนุช มีธรรม. “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”, **การวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**. http://www.research-system.siam.edu/images/Mechanical_Engineering/Piyanut_2559/07_ch2.pdf. 22 พฤศจิกายน 2563.
- [38] อุตมวิทย์ กาญจนวงศ์. “การทดสอบวัสดุ (แบบทำลาย)”, **การทดสอบแรงดึง**.
http://www.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=1952&Itemid=3. 23 พฤศจิกายน, 2563.
- [39] อภิชาติ พานิชกุล และอุษณีย์ กิตกำธร. “การวัดความแข็ง”, **การทดสอบแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test)**.
 (Online):http://personal.sut.ac.th/heattreatment/context/Measurement_Of_Hardness.html. 23 พฤศจิกายน, 2563.
- [40] จินตมัย สุวรรณประทีป. “การทดสอบแรงดัดงอ (Bending test)”, **การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด**. <https://www.tmaxtech.co.th>. 23 พฤศจิกายน 2563.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [41] Montgomery, D. C. **Designing and analysis of experiments**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [42] Badarinarayan, H., Yang, Q. and Zhu, S. “Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy”, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. 49(2): 142-148; February, 2009.
- [43] วรพงศ์ บุญช่วยแทน และคณะ. “อิทธิพลของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 รอยเชื่อมแบบต่อชน”, **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. 24(3): 112-126; พฤศจิกายน, 2559.
- [44] สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ และคณะ. “อิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง SSM 356 กับ 7075”, **วารสารวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร**. 10(1): 21-30; มกราคม-มิถุนายน, 2558.
- [45] วรพงศ์ บุญช่วยแทน, จักรนรินทร์ ฉัตรทอง และชาตรี หอมเขียว. “กระบวนการทางความร้อน T6 หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061”, **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม**. 15(1): 23-38; มกราคม-มิถุนายน, 2557.
- [46] Zhao, Y. and et al. “The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy”, **Materials Letters**. 59(23): 2948-2952; October, 2005.
- [47] Nandan, R. and et al. “Three-Dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel”, **Acta Materialia**. 55(3): 883-895; February, 2007.
- [48] กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ และคณะ. “การเชื่อมรอยต่อเกยอลูมิเนียมผสมและเหล็กกล้าด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน”, ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 5, 10-11 พฤษภาคม 2550**. น. 539-544. ภูเก็ต: โรงแรมรอยัลภูเก็ตซิตี, 2550.
- [49] Lambard, H. and et al. “Optimising FSW process parameters to minimize defects and maximize fatigue life in 5083-h321 aluminium alloy”, **Engineering Fracture Mechanics**. 75(3-4): 341-354; February, 2007.
- [50] Sillapasa, K. and et al. “Fatigue Strength Estimation Based on Local Mechanical Properties for Aluminum Alloy FSW Joints”, **Materials**. 10(186): 1-13; February, 2017.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [51] Uematsu, Y. and et al. “Fatigue crack propagation near the interface between Al and steel in dissimilar Al/steel friction stir welds”, **International Journal of Fatigue**. 138: 105706; September, 2020.
- [52] Vysotskiy, I. and et al. “Unusual fatigue behavior of friction-stir welded Al–Mg–Si alloy”, **Materials Science & Engineering A**. 760: 277-286; July, 2019.
- [53] Sillapasa, K. and et al. “Tensile and Fatigue behavior of SZ, HAZ and BM in Friction Stir Welded joint of Rolled 6N01 Aluminum Alloy Plate”, **International Journal of Fatigue**. 63: 162-170; June, 2014.
- [54] Rajasekar, A. and Prabhu, T. “Finite Element Analysis of Friction Stir Welding of Al2024 and 6063 aluminium Alloy”, **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**. 4(13): 304-309; December, 2015.
- [55] Meyghani, B., Awang, M. and Wu, C. S. “Finite element modeling of friction stir welding (FSW) on a complex curved plate”, **Journal of Advanced Joining Processes**. 1: 100007; March, 2020.
- [56] Kırıl, B. G., Tabanoğlu, M. and Serindağ, H. T. “Finite Element Modeling of Friction Stir Welding In Aluminum Alloys Joint”, **Mathematical and Computational Applications**. 8(2): 122-131; August, 2013.
- [57] Mouhri, S. E. and et al. “Relationship between Microstructure, Residual Stress and Thermal Aspect in Friction Stir Welding of Aluminum AA1050”, **Procedia Manufacturing**. 32: 889-894; April, 2019.
- [58] Ma, Z. Y. and et al. “Recent advance in friction stir welding/processing in aluminum alloys: Microstructure evaluation and mechanical properties”, **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**. 43(10): 269-333; September, 2018.
- [59] Nagasankar, P. and et al. “Optimization of process parameters on engine exhaust valves using Taguchi method in friction welding process”, **Materials Today: Proceedings**. 33(7): 3212-3217; May, 2020.
- [60] Derazkola, H. A., Kordani, N. and Derazkola, H. A. “Effects of friction stir welding tool tilt angle on properties of Al-Mg-Si alloy T-joint”, **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. 33: 264-276; May, 2021.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [61] Hamade, R. F. and Baydoun, A. M. R. “Nondestructive detection of defects in friction stir welded lap joints using computed tomography”, **Materials & Design**. 162: 10-23; January, 2019.
- [62] Franke, D. and et al. “Understanding process force transients with application towards defect detection during friction stir welding of aluminum alloys”, **Journal of Manufacturing Processes**. 54: 251-261; June, 2020.
- [63] Zhao, H. and et al. “Effect of the processing parameters of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy”, **Materials Science and Engineering: A**. 751: 70-79; March, 2019.
- [64] Ji, H. and et al. “The mechanism of rotational and non-rotational shoulder affecting the microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy friction stir welded joint”, **Materials & Design**. 192: 108729; July, 2020.
- [65] Meengam, C. and Sillapasa, K. “Evaluation of Optimization Parameters of Semi-Solid Metal 6063 Aluminum Alloy from Friction Stir Welding Process Using Factorial Design Analysis”, **Journal of Manufacturing and Materials Processing**. 4(123): 103390; December, 2020.
- [66] Naumov, A. and et al. “Microstructural evolution and mechanical performance of Al-Cu-Li alloy joined by friction stir welding”, **Journal of Materials Research and Technology**. 9(6): 14454-14466; November, 2020.
- [67] Das, U. and Toppo, V. “Bending Strength Evaluation of Friction Stir Welded AA6101-T6 And AA6351-T6 Aluminum Alloys Butt Joint”, **Materials Today: Proceedings**. 5(5): 11556-11562; June, 2018.
- [68] Sashank, J. S. and et al. “Effects of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of 6063 aluminium alloy”, **Materials Today: Proceedings**. 5(2): 8348-8353; January, 2018.
- [69] Richmire, S., Hall, K. and Haghshenas, M. “Design of experiment study on hardness variations in friction stir welding of AM60 Mg alloy”, **Journal of Magnesium and Alloys**. 6(3): 215-228; September, 2018.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [70] Thoppul, S. D. and Gibson, R. F. “Mechanical characterization of spot friction stir welded joints in aluminum alloys by combined experimental/numerical approaches Part I: Micromechanical studies”, **Materials Characterization**. 60: 1342–1351; June, 2009.
- [71] Meengam, C. and et al. “Effects of Heat Dissipation from Friction Stir Welding to Microstructures of Semi-Solid Cast 6063 Al Alloy”, **Key Engineering Materials**. 904: 70-75; November, 2020.
- [72] Guo, Y. and et al. “Study on residual stress distribution of 2024-T3 and 7075-T6 aluminum dissimilar friction stir welded joints”, **Engineering Failure Analysis**. 118: 104911; December, 2020.
- [73] Ranjan, R. “Fatigue analysis of friction stir welded butt joints under bending and tension load”, **Engineering Fracture Mechanics**. 206: 34-45; February, 2019.
- [74] Basquin, O. H. “The exponential law of endurance tests: American Society of Testing Materials”, **American Society for Testing and Materials**. 10: 625-630; November, 1910.
- [75] Das, B. and et al. “Low Cycle Fatigue Performance Evaluation of TMT rebar”, **Materials Today: Proceedings**. 4(2): 2554-2563; April, 2017.
- [76] Zhao, Z and et al. “Characterization of Microstructures and Fatigue Properties for Dual-Phase Pipeline Steels by Gleeble Simulation of Heat-Affected Zone”, **Materials**. 12(12): 1-13; January, 2019.
- [77] Seetharaman, R. and et al. “A statistical evaluation of the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024 aluminum alloy”, **Materials Today: Proceedings**. 22: 673–680; October, 2020.
- [78] Mir, M. H., Hassan, B. T. and Nima, J. “Thermal optimization of friction stir welding with simultaneous cooling using inverse approach”, **Applied Thermal Engineering**. 108: 751–763; July, 2016.
- [79] Anumat, S. and et al. “Microstructure, mechanical properties and strengthening mechanisms of friction stir welded Kanthal APMT™ steel”, **Journal of Nuclear Materials**. 509: 435–444; October, 2019.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [80] Chen, Y. C., Gholinia, A. and Prangnell, P. B. “Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet”, **Materials Chemistry and Physics**. 134: 459–463; May, 2012.
- [81] Parikh, V. K., Badgujar, A. D. and Ghetiya, N. D. “Joining of metal matrix composites using friction stir welding: A review”, **Materials and Manufacturing Processes**. 34: 123–146; November, 2018.
- [82] Hi, H. and et al. “Intermetallic compounds in the banded structure and their effect on mechanical properties of Al/Mg dissimilar friction stir welding joints”, **Journal of Materials Science & Technology**. 33: 359–366; April, 2017.
- [83] Ji, S. and et al. “Eliminating the tearing defect in Ti-6Al-4V alloy joint by back heating assisted friction stir welding”, **Materials Letters**. 188: 21-24; November, 2017.
- [84] Tang, W. and et al. “Zigzag line defect in friction stir butt-weld of ferritic stainless steel”, **Materials Letters**. 228: 129361; April, 2021.
- [85] Kadlec, M., Ruzek, R. and Nováková, L. “Mechanical behaviour of AA 7475 friction stir welds with the kissing bond defect”, **International Journal of Fatigue**. 74: 7-19; May, 2015.
- [86] Sharma, N., Khan, Z. A. and Siddiquee, A. N. “Friction stir welding of aluminum to copper-an overview”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. 27: 2113–2136; October, 2017.
- [87] Bozkurt, Y. and et al. “Experimental investigation and prediction of mechanical properties of friction stir welded aluminum metal matrix composite plates”, **Materials Science-Medziagotyra**. 18: 336–340; December, 2012.
- [88] Firouzdor, V. and Kou, S. “Formation of liquid and intermetallic in Al-to-Mg friction stir welding”, **Metallurgical and Materials Transactions A**. 20: s619–s623; December, 2010.
- [89] Javadi, M. and Tajdari, M. “Experimental investigation of the friction coefficient between aluminum and steel”, **Materials Science-Poland**. 24: 305–310; January, 2006.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบแรงดึง

Material Engineering Testing Laboratory.
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.
University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand.

TENSILE TESTING REPORT

Test Date : 2 August 2020
 Client : Songkhla Rajabhat University
 Testing Machine : Universal Testing Machine
 Model : NRI-TS501 -300 S.No. TS-6072
 Specimen : SSM 6063
 Standards : ASTM E8mm

Cylindrical Tool

Rotation Speed	Welding Speed	Tensile Strength (MPa)		
		1	2	3
1110	30	115.44	117.24	113.83
	60	99.36	98.76	107.43
	90	88.28	91.87	90.05
	120	89.08	88.97	88.31
1320	30	119.22	112.17	113.56
	60	117.33	126.25	127.20
	90	108.36	116.65	114.53
	120	76.55	85.39	88.11
1750	30	122.47	121.79	116.35
	60	101.52	124.29	120.49
	90	107.31	106.41	108.08
	120	95.66	105.13	118.79
2220	30	113.02	112.67	116.20
	60	100.12	115.99	117.21
	90	97.33	94.32	99.58
	120	103.05	99.03	102.49

Triangular Tool

Rotation Speed	Welding Speed	Tensile Strength (MPa)		
		1	2	3
1110	30	98.75	104.53	106.90
	60	102.49	100.64	101.12
	90	67.01	62.22	60.87
	120	47.93	47.82	48.03
1320	30	104.78	106.56	103.02
	60	100.25	102.77	104.96
	90	99.68	97.64	97.92
	120	60.53	69.33	65.60
1750	30	109.24	106.50	105.26
	60	79.38	78.57	77.38
	90	91.21	86.69	89.38
	120	79.35	82.49	84.36
2220	30	99.41	98.90	90.43
	60	105.96	97.12	97.80
	90	84.01	89.51	76.66
	120	77.77	78.15	73.94

Square Tool

Rotation Speed	Welding Speed	Tensile Strength (MPa)		
		1	2	3
1110	30	114.55	112.34	107.76
	60	109.96	107.00	107.80
	90	106.83	107.05	103.23
	120	71.13	74.56.58	77.04
1320	30	90.55	95.97	105.18
	60	95.33	98.61	94.15
	90	95.56	94.27	89.17
	120	87.00	82.22	80.87
1750	30	99.17	101.81	104.73
	60	113.06	113.61	119.93
	90	98.33	87.41	92.35
	120	74.63	85.58	82.84
2220	30	89.58	81.61	79.33
	60	84.80	87.32	81.80
	90	106.84	115.73	112.16
	120	82.98	80.10	76.54

Pentagon Tool

Rotation Speed	Welding Speed	Tensile Strength (MPa)		
		1	2	3
1110	30	113.71	115.22	109.28
	60	113.70	114.76	115.82
	90	106.98	108.66	108.30
	120	80.64	81.84	80.50
1320	30	106.09	113.52	107.36
	60	119.70	118.76	117.82
	90	92.76	99.32	93.20
	120	98.53	97.77	91.69
1750	30	108.67	105.09	111.30
	60	99.98	110.45	112.86
	90	90.13	90.44	92.61
	120	114.74	106.56	112.02
2220	30	96.63	106.03	100.57
	60	113.44	111.54	113.13
	90	105.51	110.03	109.82
	120	90.79	89.07	85.68

Base Materials

Factor	Tensile Strength (MPa)		
	1	2	3
Base	149.80	151.52	146.99

Remark : This certificate reflects our findings at time and place of inspection only.

Test By :

(Mr.Yongyuth Donyakul)

Professional Engineer Category No.10948

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบแรงดัดโค้ง

Material Engineering Testing Laboratory.
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.
University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand.

BENDING TESTING REPORT

Test Date : 19 August 2020
 Client : Songkhla Rajabhat University
 Testing Machine : Universal Testing Machine
 Mode l: NRI-TS501 -300 S.No. TS-6072
 Specimen : SSM 6063
 Standards : ASTM E190-14

Cylindrical Tool

Rotation Speed	Welding Speed	Bending Test	
		Face Test	Root Test
1110	30	Accept	Accept
	60	Accept	Reject
	90	Accept	Reject
	120	Accept	Reject
1320	30	Accept	Accept
	60	Accept	Accept
	90	Accept	Accept
	120	Reject	Reject
1750	30	Accept	Accept
	60	Accept	Accept
	90	Accept	Reject
	120	Accept	Reject
2220	30	Accept	Accept
	60	Accept	Accept
	90	Reject	Reject
	120	Accept	Reject

Triangular Tool

Rotation Speed	Welding Speed	Bending Test	
		Face Test	Root Test
1110	30	Accept	Reject
	60	Reject	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Reject	Reject
1320	30	Accept	Reject
	60	Accept	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Reject	Reject
1750	30	Accept	Reject
	60	Accept	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Reject	Reject
2220	30	Accept	Reject
	60	Reject	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Reject	Reject

Square Tool

Rotation Speed	Welding Speed	Bending Test	
		Face Test	Root Test
1110	30	Accept	Reject
	60	Accept	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Reject	Reject
1320	30	Accept	Reject
	60	Accept	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Reject	Reject
1750	30	Accept	Accept
	60	Accept	Reject
	90	Accept	Reject
	120	Accept	Reject
2220	30	Accept	Reject
	60	Accept	Reject
	90	Accept	Reject
	120	Accept	Reject

Pentagon Tool

Rotation Speed	Welding Speed	Bending Test	
		Face Test	Root Test
1110	30	Accept	Reject
	60	Accept	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Reject	Reject
1320	30	Accept	Accept
	60	Accept	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Reject	Reject
1750	30	Accept	Accept
	60	Accept	Reject
	90	Reject	Reject
	120	Accept	Reject
2220	30	Accept	Reject
	60	Accept	Reject
	90	Accept	Reject
	120	Accept	Reject

Base Materials

Factor	Bending Test		
	1	2	3
Base	Accept	Accept	Accept

Remark : This certificate reflects our findings at time and place of inspection only.

Test By :

(Mr.Yongyuth Dunyakul)

Professional Engineer Category No.10948

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ สกุล	นายชัยยุทธ มีงาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 - 2552 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ พ.ศ. 2552 – 2555 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
ประวัติการวิจัย	ได้รับทุนการพัฒนาคณาจารย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2555 – ปัจจุบัน ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการและระบบการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ตำแหน่งงาน	พนักงานมหาวิทยาลัย (วิชาการ)
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา