

อิทธิพลของปัจจัยในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและปรับปรุงสมบัติเชิงกล
ของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**INFLUENCE OF FRICTION STIR WELDING PARAMETERS
AND IMPROVEMENTS OF MECHANICAL
PROPERTIES FOR SEMI-SOLID
CAST 2024 ALUMINIUM ALLOY**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Engineering in Manufacturing Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

อิทธิพลของปัจจัยในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและปรับปรุงสมบัติเชิงกล
ของอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปริญญาโท

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.อภิวัฒน์ มุศตตามระ)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

(ผศ. ดร.วรรณวิษ บุ่งสุด)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ

(อ. ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน)

กรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักศึกษาศาสตร์

อังคาร คำเรือน : อิทธิพลของปัจจัยในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและปรับปรุงสมบัติ
เชิงกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 2024 (INFLUENCE OF FRICTION
STIR WELDING PARAMETERS AND IMPROVEMENTS OF MECHANICAL
PROPERTIES FOR SEMI-SOLID CAST 2024 ALUMINIUM ALLOY)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์, 146 หน้า

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมแบบไม่หลอมละลาย ซึ่งให้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดี โดยเฉพาะสำหรับวัสดุที่เชื่อมได้ยากด้วยวิธีหลอมละลาย อย่างไรก็ตามในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นจำเป็นต้องตั้งพารามิเตอร์การเชื่อมให้เหมาะสมเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่ดี ประกอบกับการศึกษาเรื่องการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งยังมีจำนวนน้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของแนวเชื่อมต่อชนวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง 2024 ด้วยเทคนิคออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน โดยกำหนดปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงของหัวกวน แบบทรงกรวย ทรงกระบอกเรียบ และทรงกระบอกเกลียว ผลการทดลองพบว่า ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดคือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน และรูปทรงของหัวกวน ตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 95% ในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของงานวิจัยนี้พบว่า พารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ดีและเหมาะสมในการนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกล คือ การเชื่อมด้วยหัวกวนรูปทรงแบบทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที โดยปรับขนาดสัดส่วนรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ โดยมีขนาดหัวกวนต่อบ่ากวนเท่ากับ 3 เท่า ได้ความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับวัสดุพื้น นอกจากนี้ การทำกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อม โดยการนำชิ้นงานไปอบละลายก่อนเชื่อมและบ่มแข็งเทียมหลังเชื่อมได้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นเป็น 245 MPa มีประสิทธิภาพ 109% ของความแข็งแรงวัสดุพื้น

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา



ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



ANGKARN KAMRUAN : INFLUENCE OF FRICTION STIR WELDING
PARAMETERS AND IMPROVEMENTS OF MECHANICAL PROPERTIES
FOR SEMI-SOLID CAST 2024 ALUMINIUM ALLOY. THESIS ADVISOR :
SOMSAK SIWADAMRONGPONG, Ph.D., 146 PP.

FRICTION STIR WELDING/MECHANICAL PROPERTIES/SEMI-SOLID CAST/
ALUMINIUM ALLOY 2024

Friction stir welding is one of solid state welding techniques which provide good weld joint compared with fusion welding techniques, especially for difficult-to-fusion welded materials. However, appropriate welding parameters were necessary to achieve good weld joint with friction stir welding. Moreover, there are a few reports on welding of semi-solid aluminium. Therefore, aims of this study was to investigate influence of friction stir welding parameters on mechanical properties of butt joints between Semi-Solid cast aluminium alloy 2024. Full factorial design technique was employed with 3 parameters which composed of rotational speed (530 and 790 rpm), welding speed (22 and 36 mm/min) and shape of stir head (cone, cylindrical and thread). Based on statistical results, it was found that rotational speed and shape of stir head revealed an influence on tensile strength of welded joint while welding speed was not significant parameter with 95% significant level. The stir head D-d ratio of 3 was carried out for mechanical property improvement with cylindrical stir head, 790 rpm and 22 mm/min. The same level of strength as based material was found for such condition. Thus, heat treatment before and after welding was brought to treat the specimen. Specimen was solution treated before welding and artificial aged after

welding. The highest tensile strength of 245 MPa which was 109% of based material was achieved.



School of Manufacturing Engineering

Academic year 2019

Student's Signature ปิ่น

Advisor's Signature ว.น.น.

Co-Advisor's Signature ว.น.น.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้ให้กำเนิดที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาตลอดมา พร้อมทั้งได้อบรมสั่งสอน แนวความคิดและการปฏิบัติตนจนผู้วิจัยได้ประสบผลสำเร็จในวันนี้ได้ รวมถึงหลาย ๆ กำลังใจ จากญาติพี่น้อง เพื่อนร่วมงาน ครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจอย่างยิ่ง อีกทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ทุก ๆ ท่านที่มิได้เอ่ยนาม ที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้ แนะนำ และให้คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและให้ กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ผศ.ดร.ประภาส เมืองจันทบุรี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม รวมถึงให้คำปรึกษาช่วยเหลือในการทำงานวิจัย แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการ คณาจารย์ และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ สำหรับการดำเนินการศึกษาและวิจัย

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีจิระขุระ ที่ให้โอกาสผู้วิจัยเป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยน ณ ประเทศญี่ปุ่น เพื่อศึกษาและใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย เป็นระยะเวลา 3 เดือน

ขอขอบคุณ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นสถาบัน การศึกษา ทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสเข้ามาศึกษา รวมถึงบุคลากร ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ซึ่งเป็นสถาบันการศึกษาต้นสังกัดของผู้วิจัย ที่อนุญาตให้ลาศึกษาต่อระดับปริญญาเอกพร้อมทุนการศึกษา รวมถึงคณาจารย์และบุคลากร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อังคาร คำเรือน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	5
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	5
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 โลหะอะลูมิเนียม.....	7
2.1.1 อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 2XXX.....	11
2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง.....	14
2.3 กระบวนการเชื่อมโลหะ.....	16
2.3.1 การเชื่อมแบบหลอมละลาย.....	16
2.3.2 การเชื่อมในสภาวะของแข็ง.....	19
2.4 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1	รูปแบบการเชื่อมต่อ.....	21
2.4.2	พารามิเตอร์การเชื่อม.....	22
2.4.2.1	ความเร็วรอบในการหมุนกวน.....	23
2.4.2.2	ความเร็วในการเดินเชื่อม.....	24
2.4.2.3	มุมเอียงเครื่องมือกวน.....	26
2.4.2.4	ระยะกดลิกของเครื่องมือเชื่อม.....	27
2.4.2.5	เวลากดเสียดทาน.....	29
2.4.2.6	อัตราส่วนความโตะบ่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน.....	30
2.4.3	รูปทรงเครื่องมือกวน.....	31
2.4.3.1	บ่าเครื่องมือกวน.....	32
2.4.3.2	หัวกวน.....	32
2.4.4	โครงสร้างจุดภาคในพื้นที่เชื่อม.....	35
2.4.4.1	บริเวณพื้นที่กวน.....	36
2.4.4.2	พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล.....	39
2.4.4.3	พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน.....	40
2.4.4.4	การตกผลึกใหม่.....	42
2.4.4.5	ขนาดเกรน.....	42
2.5	การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE).....	44
2.5.1	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design).....	47
2.5.2	การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment).....	48
2.5.3	การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล (Experimental Performing).....	50
2.5.4	การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2).....	51
2.5.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA).....	51
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.1	วัสดุ.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	54
3.2.1	เครื่องกัก.....	54
3.2.2	เครื่องมือเชื่อม.....	54
3.2.3	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture).....	55
3.2.4	กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera: IR).....	55
3.2.5	เครื่องตัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน.....	56
3.2.6	เครื่องมือวัดค่าความแข็งผิวงาน.....	56
3.2.7	เครื่องทดสอบแรงดึง.....	57
3.2.8	เครื่องมือวิเคราะห์และประมวลภาพถ่าย (Optical Microscope).....	58
3.2.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	58
3.3	การติดตั้งอุปกรณ์การวัดแรงกดและความร้อนขณะเชื่อมเสียดทาน แบบกวน.....	59
3.4	การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง.....	61
3.5	การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล.....	63
3.6	การดำเนินการทดลอง.....	63
3.7	การวัดแรงกดและค่าทางความร้อน.....	64
3.7.1	ค่าแรงกดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....	64
3.7.2	ค่าของความร้อนในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....	65
3.8	การตรวจสอบทางโครงสร้างทางกายภาพ.....	67
3.8.1	การตรวจสอบผิวด้านบนของรอยเชื่อมด้วยสายตา.....	67
3.8.2	การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค.....	67
3.8.3	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	68
3.9	การทดสอบทางกล.....	69
3.9.1	การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง.....	69
3.9.2	การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง.....	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.10	แผนภาพการดำเนินงานวิจัย.....	71
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	72
4.1	ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ และพิกัดด้านบนของรอยเชื่อม.....	72
4.1.1	ลักษณะพิกัดด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว.....	72
4.1.2	ลักษณะพิกัดด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว.....	73
4.1.3	ลักษณะพิกัดด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว.....	74
4.1.4	ลักษณะพิกัดด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว.....	75
4.2	ผลการทดลองและการวิเคราะห์แรงกด.....	76
4.2.1	แรงกดของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย.....	77
4.2.2	แรงกดของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ.....	79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3	แรงกดของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว.....	80
4.3	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ความร้อน.....	81
4.3.1	ความร้อนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย.....	82
4.3.2	ความร้อนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ.....	83
4.3.3	ความร้อนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว.....	84
4.4	สมบัติความแข็งแรงดึง.....	85
4.5	สมบัติความแข็ง.....	86
4.6	ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล.....	87
4.6.1	การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองความแข็งแรงดึง.....	89
4.6.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง.....	90
4.7	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม.....	94
4.7.1	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที.....	94
4.7.2	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที.....	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.8	การปรับปรุงสมบัติเชิงกลชิ้นงานหลังเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024.....	103
4.8.1	การเชื่อมเสียดทานของอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือ	
	กวนต่อหัวกวน (D/d) เท่ากับ 3 เท่า.....	104
4.8.1.1	โครงสร้างทางกายภาพและลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อม.....	104
4.8.1.2	ผลการทดลองและการวิเคราะห์แรงกด.....	105
4.8.1.3	ความร้อนขณะเชื่อม.....	106
4.8.1.4	สมบัติความแข็งแรงดึง.....	107
4.8.1.5	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม.....	108
4.8.2	การทำกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังเชื่อม.....	112
4.8.2.1	สมบัติความแข็งแรงดึง.....	112
4.8.2.2	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม.....	113
4.8	การปรับปรุงสมบัติเชิงกลชิ้นงานหลังเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024.....	103
4.9	การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีระบบเอ็ดกรี (EDX) ของผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024.....	115
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	119
5.1	พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงดึง.....	119
5.2	การปรับปรุงสมบัติเชิงกลจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....	120
5.3	ข้อเสนอแนะ.....	120
	รายการอ้างอิง.....	121
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	131
	ประวัติผู้เขียน.....	146

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อผสม8
2.2	สัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering)10
2.3	ส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญ (% โดยน้ำหนัก)11
2.4	วิเคราะห์ความแปรปรวนกรณี 3 ปัจจัย.....49
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 202453
3.2	ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองเชิงแฟคทอเรียล62
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K , α , ω^2/v ต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น66
4.1	ปัจจัยและระดับของปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน88
4.2	ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบที่มีจำนวนตัวอย่างการทดลอง 2 จำนวนของค่าความแข็งแรงดึง88
4.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของความแข็งแรงดึง90

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ประเภทอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard.....9
2.2	แผนภาพสมมูลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง 11
2.2	ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมผสมทองแดงเมื่อมีปริมาณธาตุผสมทองแดง ที่แตกต่างกันและผ่านกระบวนการในการบ่มแข็งเทียม 12
2.3	(ก) แผนภาพการเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมผสมทองแดง (ข) แผนภาพการเกิดเฟสของอะลูมิเนียมผสมทองแดงและแมกนีเซียม 13
2.4	โครงสร้างจุลภาคของโลหะกึ่งของแข็ง (ก) เปรียบเทียบกับการหล่อทั่วไป (ข)..... 14
2.5	สมบัติของแท่งอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ตัดด้วยมือ โดยใช้แรงเพียงเล็กน้อยก็ขึ้น รูปได้ 15
2.6	กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยวิธี Gas Induced Semi-Solid (GISS)..... 15
2.7	คำนิยามและจุดบกพร่องในการเชื่อม Gas metal arc welding (ก) รอยแตกหลังการเชื่อมแบบ (ข) รูพรุนภายในโครงสร้าง (ค) ชิ้นงานบิดงอจากการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ 17
2.8	พื้นที่ที่เกิดจากการเชื่อมแบบหลอมละลาย เหล็กกล้าผสม INCONEL 740H 17
2.9	โครงสร้างพื้นที่หลอมละลาย (ก) เหล็กกล้า INCONEL 718 (ข) อะลูมิเนียม 6082 18
2.10	โครงสร้างพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 19
2.11	กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน 21
2.12	รูปแบบการเชื่อมต่อในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (ก) แบบต่อชน (ข) แบบต่อชนขอ (ค) แบบต่อชนตัวที่ (ง) แบบต่อเกย (จ) แบบต่อเกยแบบหลายชั้น (ฉ) แบบต่อเกยตัวที่ (ช) แบบต่อมุมฉาก 22
2.13	พารามิเตอร์การเชื่อมและผลที่ได้สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน 23
2.14	แรงกดจากเครื่องมือเชื่อมที่ส่งผลไม่เกิดรอยบกพร่องของรอยเชื่อม 29
2.15	ลักษณะเครื่องมือกวนที่ประกอบด้วยส่วนปากกวนและหัวกวน 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16	ลักษณะของป่าเครื่องมือกวนแบบต่าง32
2.17	รูปทรงหัวกวนแบบพื้นฐานและแบบขั้นสูง33
2.18	พื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค35
2.19	ลักษณะ โครงสร้างภายในพื้นที่กวน (ก) แบบวงแหวน (ข) แบบแถบ36
2.20	รูปร่างพื้นที่กวน (ก) แบบอ่าง (ข) แบบวงรี37
2.21	ลักษณะ โครงสร้างเกรนในพื้นที่กวนกับพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล อะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 707539
2.22	การเกิดการตกตะกอนในบริเวณพื้นที่เชื่อม (ก) วัสดุพื้น (ข) HAZ (ค) บริเวณ HAZ ใกล้กับ TMAZ (ง) บริเวณ TMAZ ใกล้กับ SZ41
2.23	ขนาดเกรนที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งในพื้นที่กวนของ AA 707543
3.1	โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A202453
3.2	วัสดุชิ้นงานอะลูมิเนียม A2024 สำหรับการทดลอง53
3.3	เครื่องกัด HAVEN รุ่น XLW6332HIV54
3.4	หัวเชื่อมกวน 3 รูปแบบ55
3.5	อุปกรณ์จับยึดและวัดแรงกดในเชื่อมเสียดทานแบบกวน55
3.6	กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E5056
3.7	เครื่องตัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน56
3.8	เครื่องวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ57
3.9	เครื่องทดสอบแรงดึง57
3.10	กล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized58
3.11	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM JSM รุ่น 7100F59
3.12	การติดตั้งชุดจับยึด (Fixture) ที่ติดตั้งโหลดเซลล์วัดแรงกด59
3.13	การติดตั้งชุดคอนโทรลบอร์ด MATLAB Simulink เพื่อบันทึกค่าแรงกด60
3.14	การติดตั้งอุปกรณ์กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน60
3.15	ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน	62
3.17 ตำแหน่งเริ่มต้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	64
3.18 การวัดแรงกดด้วยโปรแกรม MATLAB.....	65
3.19 การวัดค่าความร้อนด้วยกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน	65
3.20 กล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง	68
3.21 กล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง	68
3.22 บริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์.....	69
3.23 การเตรียมชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม	70
3.24 แผนการดำเนินงานวิจัย	71
4.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อหน้าที่ ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อหน้าที่	73
4.2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อหน้าที่ ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อหน้าที่	74
4.3 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อหน้าที่ ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อหน้าที่	75
4.4 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อหน้าที่ ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อหน้าที่	76
4.5 กราฟแสดงแรงกดที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดเทียบกับแรงกดเครื่อง UTM.....	77
4.6 กราฟแสดงค่าแรงกดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อหน้าที่ ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อหน้าที่ รูปทรงหัวกวน แบบทรงกรวย	79
4.7 กราฟแสดงค่าแรงกดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อหน้าที่ ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อหน้าที่ รูปทรงหัวกวน แบบทรงกระบอกเรียบ	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงค่าแรงกดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวน แบบทรงกระบอกเกลียว.....	81
4.9 กราฟแสดงค่าความร้อนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย	83
4.10 กราฟแสดงค่าความร้อนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ	84
4.11 กราฟแสดงค่าความร้อนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว.....	85
4.12 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงในสภาวะต่างของรูปทรงหัวกวนทั้ง 3 รูปแบบ	86
4.13 ผลการทดสอบความแข็งที่ความเร็วรอบ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดิน เชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงรอยเชื่อมทั้ง 3 รูปแบบ	87
4.14 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองความแข็งแรงดึง	90
4.15 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป ของความแข็งแรงดึง.....	92
4.16 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป ของความแข็งแรงดึง.....	92
4.17 การประมาณอิทธิพลร่วมของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป ของความแข็งแรงดึง.....	94
4.18 โครงสร้างมหภาครูปร่างรอยเชื่อมของรูปทรงหัวกวน 3 รูปแบบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที	95

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของของรอยเชื่อม โครงสร้างบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวน ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ	96
4.20 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของของรอยเชื่อม โครงสร้างบริเวณ และบริเวณ พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ	97
4.21 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกลของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ	98
4.22 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของของรอยเชื่อม โครงสร้างบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวน ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ	98
4.23 โครงสร้างมหภาครูปร่างรอยเชื่อมของรูปทรงหัวกวน 3 รูปแบบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที	100
4.24 โครงสร้างมหภาค ของหัวกวนทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที	101
4.25 โครงสร้างมหภาคระหว่างพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนกับบริเวณพื้นที่ เนื้อเดิมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดิน เชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ	101
4.26 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกลของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ.....	102
4.27 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อหน้าที่ ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที	105
4.29 กราฟแสดงค่าแรงกดเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือ กวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบเท่ากับ 3 เท่า	106
4.30 กราฟแสดงค่าความร้อนกราฟแสดงค่าแรงกดเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วน ความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบ ทรงกระบอกเรียบเท่ากับ 3 เท่า	107
4.31 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของอัตราส่วนของขนาดป่ากวนกับหัวกวน	108
4.32 โครงสร้างมหภาคบริเวณพื้นที่รอยเชื่อม	109
4.33 โครงสร้างมหภาคระหว่างพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน และบริเวณ เนื้อโลหะเดิม	109
4.34 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล	110
4.35 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ถูกกวนด้วยเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วนความโตป่า เครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) เท่ากับ 3 เท่า ป่ากวนขนาด 15 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 5 มิลลิเมตร ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที	111
4.36 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของอัตราส่วนของขนาดป่ากวนกับหัวกวน	113
4.37 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 0, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง	114
4.38 บริเวณจุดแตกหักจากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง	115
4.39 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของรอยแตกหัก	116
4.40 การกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ จาก EDX บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ จากความร้อน	117
4.41 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ จากความร้อนจากความร้อน	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันกระบวนการขึ้นรูปโลหะมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการขึ้นรูปโลหะที่เป็นกลุ่มอะลูมิเนียมผสม เช่น การขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีการหล่อแบบกึ่งของแข็ง การเชื่อมประกอบด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นต้น ซึ่งอะลูมิเนียมอัลลอยเข้ามามีบทบาทที่สำคัญ และมีปริมาณการใช้งานเพิ่มมากขึ้นใน อุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และชิ้นส่วนประกอบเครื่องจักรกล เป็นต้น เนื่องจากว่าเป็นวัสดุที่หล่อขึ้นรูปได้ง่าย ง่ายต่อการแปรรูป มีความแข็งและความแข็งแรงสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ไม่เป็นสนิม สามารถทำการเชื่อมได้ สามารถเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการอบชุบ ทำการกัดแต่งได้ง่าย และขึ้นรูปได้ดี และที่สำคัญอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเพียง 1 ใน 3 ของเหล็กกล้า ซึ่งเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักแล้วอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กมาก (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2556) อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ด้านทนต่อการกัดกร่อนและมีการนำความร้อนที่ดี รวมถึงมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงกว่าเหล็กกล้า สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีราคาถูกหาได้ง่ายตามท้องตลาด จึงนิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในภาคอุตสาหกรรมและการพาณิชย์ โดยในประเทศไทยมีปริมาณการนำเข้าอะลูมิเนียมมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมคิดเป็นมูลค่าสูงถึง 99,777.68 ล้านบาท และมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 1.28 ในปี พ.ศ. 2558 อีกทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมรถไฟความเร็วสูง อุตสาหกรรมการต่อเรือเดินสมุทรและอากาศยาน จากการคาดการณ์ปริมาณการใช้อะลูมิเนียมถึงปี พ.ศ. 2563 โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมรถยนต์ อะลูมิเนียมอัลลอยจะถูกนำมาใช้ทดแทนเหล็กกล้าเพิ่มมากขึ้นเฉลี่ยในอัตราร้อยละ 11-12 ต่อปี จากการที่ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตรถยนต์ที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก (โครงการพัฒนาศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเหล็กและโลหะกรรม, 2560) อะลูมิเนียมผสมหล่อส่วนมากจะมีซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลักซึ่งทำให้หลอมได้ง่าย ไหลตัวได้ดี และมีความสามารถในการหล่อลอมที่ดีมาก อะลูมิเนียมผสมหล่อมีกรรมวิธีการผลิตหรือการขึ้นรูปที่หลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของผลิตภัณฑ์และปัจจัยอื่นร่วมด้วย โดยส่วนใหญ่เป็นการขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (Liquid Casting Process) ซึ่งการขึ้นรูปลักษณะดังกล่าวจะเกิดกรนแบบกึ่งไม้

(Dendrite) ในโครงสร้างจุลภาค ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัว (Shrinkage) เนื่องจากมีรูพรุนของอากาศแทรกอยู่ในโครงสร้างจุลภาคซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ด้อยลง ต่อมา มีการศึกษาเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) ของนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรมทั่วโลก ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบต่าง ๆ และหนึ่งในนั้นก็มีกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งของนักวิจัยชาวไทยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และวัสดุโลหะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยใช้เทคนิค GISS (Gas Induced Semi-Solid) โดยการพ่นแก๊สไนโตรเจนลงไปใต้น้ำโลหะที่หลอมเหลวจะทำให้เกิดโครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Globular Grain) โครงสร้างภายในรวมตัวกันแน่นขึ้นและมีโพรงอากาศน้อยลง ส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นรวมถึงการตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ต่อมา ในปี ค.ศ. 2011 ได้มีผู้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งของวัสดุ 2024 ซึ่งเป็นเกรดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนประกอบยานพาหนะกันอย่างแพร่หลาย เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ และชิ้นส่วนทางอากาศยานทางการบิน โดยผู้วิจัยใช้เทคนิค GISS และกระบวนการทางความร้อนที่ใช้คือ T6 พบว่า กระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 77.7 HRB มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 395 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าเท่ากับ 5.8% ถือว่าเป็นเพิ่มทางเลือกให้กับผู้ผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี (ศิริวรรณ พรรณราย, 2555) อะลูมิเนียมอัลลอยโดยเฉพาะกลุ่ม 2XXX ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในยานยนต์ และกลุ่มอากาศยานอย่างกว้างขวาง การเชื่อมประกอบชิ้นส่วนเหล่านี้ ส่วนมากใช้วิธีการเชื่อมแบบหลอมละลาย ซึ่งการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยด้วยวิธีการนี้มีข้อจำกัดและเกิดปัญหาหลังการเชื่อม โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดที่มีความยุ่งยากของการเลือกวัสดุเชื่อม เกิดการบิดงอแตกร้าว ความเค้นตกค้างสูง เกิดจุดบกพร่องหรือตำหนิในแนวเชื่อม โครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เนื่องจากจากอุณหภูมิของบ่อหลอมที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมสูงมากเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนภายในโครงสร้าง รวมถึงเกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาทางเคมีในระหว่างการเชื่อม ผลกระทบจากประเภทของฟลักซ์และการหดตัวของแนวเชื่อม (Huang, 2010; Ruan, Qiu, Gong, Sun, & Li, 2012; Kumar, Dilthey, Dwivedi, & Ghosh, 2009; P.M.G.P. Moreira, de Figueiredo, & de Castro, 2007; ธรรมโชติ, 2556) จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานเชื่อมลดลง โดยเฉพาะความแข็ง และความแข็งแรงดึง (Mishra และ Ma, 2005; Salih, Ou, Sun, และ McCartney, 2015) วิธีการเชื่อมโลหะในสภาวะของแข็งด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir Welding, FSW) โดย Wayne Thomas ในปี ค.ศ. 1991 จากสถาบันการเชื่อมของอังกฤษ (The Welding Institute, 2016) ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ จากการเชื่อมแบบหลอมละลาย โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมของการเชื่อมในสภาวะของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากโลหะพื้นก่อนข้างน้อย

อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมละลายของวัสดุ นั้น ๆ จึงทำให้เกิดการปฏิกิริยาทางเคมีภายในโครงสร้างน้อย และมีความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ ที่นำมาเชื่อม อย่างไรก็ตาม ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนี้ยังประสบปัญหาด้านพารามิเตอร์ การเชื่อมไม่สัมพันธ์กัน รวมถึงขนาดและรูปร่างเครื่องมือกวนในการเชื่อมไม่เหมาะสม ส่งผลต่อ ความร้อนจากการเสียดทานที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม ทำให้การเสีรูปร่างแบบพลาสติกและการ ผสมผสานของเนื้อวัสดุไม่เพียงพอหรือมากเกินไปภายในโครงสร้างแนวเชื่อม (Cui, Yang, Xie, Hou, และ Song, 2013; Blignault, Niekerk, James, และ DG, 2008; Blignault, Hattingh, และ James, 2012) ทำให้ประสิทธิภาพทางกลของรอยเชื่อมที่ได้ค่อนข้างต่ำกว่าตัวโลหะเนื้อพื้นทั้งการเชื่อม แบบวัสดุชนิดเดียวกันและแบบวัสดุต่างชนิด จึงมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของแนวเชื่อมด้วยการ หาค่าดัชนีความร้อน (Heat index, HI) จากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ระหว่างความเร็วรอบ ในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อมเพื่อช่วยให้เนื้อวัสดุเกิดการเสีรูปร่างแบบพลาสติกได้ดี ขึ้นเกิดการไหลตัวผสมกันอย่างสม่ำเสมอและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ค่าดัชนีความร้อนที่ช่วง 1.5-3.5 ไม่เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม ทำให้ลดหรือขจัดตำหนิและจุดบกพร่อง (Defect Free Weld) ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อม (M. Imam, 2014) การปรับปรุงสมบัติโครงสร้างหลังการเชื่อมด้วย วิธีการทำกระบวนการทางความร้อน โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุเป็นสารละลายเนื้อเดียวและการ บ่มแข็งหลังการเชื่อม ซึ่งทำให้เฟสที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากโลหะพื้นลดลงและมีเกรนตก ผลึกใหม่และขอบเกรนที่เพิ่มขึ้น รวมถึงเฟสที่สองที่เกิดจากการตกตะกอนของสารละลายภายใน โครงสร้างเฟส ซึ่งสิ่งเหล่านี้ช่วยขัดขวางการเคลื่อนไหลของเกรนภายใน โครงสร้าง (Han, Zhang, Liu, He, และ Zhang, 2011; Wang, Wang, Xiao, และ Ma, 2014; Feng, Xiao, และ Ma, 2008) ทำให้ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ด้านความแข็ง ความแข็งแรงดึง ความเหนียวเพิ่มสูงขึ้น (Vijaya Kumar, Madhusudhan Reddy, & Srinivasa Rao, 2015) อย่างไรก็ตาม พบว่าผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้สำหรับการปรับปรุงความแข็งแรงของแนวเชื่อมมีความแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ ซึ่งมีผลต่อการทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว และปริมาณและการกระจายตัวของเฟสที่สองที่ เกิดขึ้น รวมถึงขนาดของเฟสที่สองและขนาดเกรนที่โตเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้ความแข็งแรงที่ได้ จากปรับปรุงประสิทธิภาพแนวเชื่อมยังคงมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าโลหะพื้น (Sivaraj, Kanagarajan, & Balasubramanian, 2014; Chen, et al., 2015)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า มีการศึกษาอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลหลังการเชื่อม ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหลายชนิด แต่สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบ กิ่งของแข็ง SSM 2024 เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลมได้จากกรรมวิธีการหล่อโลหะ กิ่งของแข็ง (GISS) การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกิ่งของแข็งยังเป็นเรื่องที่มีการค้นคว้าวิจัย อยู่ในวงจำกัด ถึงแม้มีการเริ่มนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ทั้งในประเทศ

และต่างประเทศแล้วก็ตาม ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ความสมดุลของแรงกด และรูปแบบของหัวกวน เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการประสานของเนื้อโลหะ ความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งความร้อนจากแรงเสียดทาน เนื่องจากการกวนมีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม จุดมุ่งหมายในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม คือ รักษาสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical Properties of Joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อวัสดุเดิมมากที่สุด และลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ซึ่งส่งผลทำให้แนวเชื่อม (Welded Region) รวมถึงบริเวณรอบ ๆ แนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทำให้สมบัติทางกลมีความแข็งแรงลดลงจากผลกระทบทางด้านความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) ดังนั้น พารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมส่งผลให้ได้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดี มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงขึ้น ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ในการเลือกใช้สภาวะงานเชื่อมที่เหมาะสม เพื่อลดต้นทุนในการผลิตชิ้นส่วนและลดเวลาการผลิต และเพิ่มคุณภาพการผลิตมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของปัจจัยร่วมที่มีต่อคุณลักษณะรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024
2. ศึกษาสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรงดึง และลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 จากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
3. เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และการปรับปรุงสมบัติเชิงกลหลังกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

1.3 ขอบเขตการวิจัย

องค์ประกอบและโครงสร้างของวิทยานิพนธ์นี้ได้ถูกวางแผนดังต่อไปนี้
งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่มีขอบเขตของพารามิเตอร์อยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

1. ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที
2. ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที

3. ความลึกในการเชื่อม 3.8 มิลลิเมตร
4. มุมเอียงในการเชื่อม 3 องศา
5. ชิ้นงานทดลองวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1. สืบค้นวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
3. วางแผนออกแบบชุดทดลองและกำหนดขอบเขตการทดลอง
4. การเตรียมอุปกรณ์ วัสดุ และติดตั้ง
5. ออกแบบแผนการทดลอง
6. ดำเนินการทดลองและการตรวจวัด
 - ทดสอบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานและวัดแรงกดขณะเชื่อม
 - ทดลองตามแบบการทดลองเฟคทอเรียล
 - ตรวจวัดความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมทางกายภาพ
 - ตรวจวัดทางกลของรอยเชื่อม
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง
8. วิจัยและสรุปผลการวิจัย
9. เผยแพร่งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1. อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 6 (F6) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องมือสำหรับการทดลอง
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบอะลูมิเนียมหล่อแบบกิ่งของแข็ง 2024 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS โดยขึ้นรูปให้ได้ขนาด ความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ความหนา 4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการเชื่อมแบบต่อชน

- เครื่องมือที่ใช้ทำหัวเชื่อม คือ เหล็กเครื่องมือ DC53 มีขนาดปากววน 20 มิลลิเมตร หัวพินมีขนาด 5 มิลลิเมตร และมีความยาวของหัวพินเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร

ทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้เครื่องกัด โลหะ (Vertical Milling Machining) ยี่ห้อ HAVEN รุ่น XLW6332HIV

2. เครื่องมือสำหรับสนับสนุนวิเคราะห์ผล

- เครื่องวัดแรงกดในแนวตั้ง
- กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน
- เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง
- กล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024
2. เข้าใจถึงผลกระทบของการประยุกต์ใช้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ด้วยเครื่องกัด
3. เข้าใจถึงคุณภาพของรอยเชื่อมจากการกำหนดพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นน้อย และมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และขีปนาวุธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรดและด่างหาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก

อะลูมิเนียมที่ใช้ในปัจจุบันสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์และอะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ คือ โลหะที่มีปริมาณอะลูมิเนียมไม่น้อยกว่า 99% โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือจะประกอบด้วย ทองแดง ซิลิกอน แมกนีเซียม เป็นต้น อะลูมิเนียมประเภทนี้จะมีกำลังวัสดุไม่สูง แต่มีค่าความเหนียวสูง เพราะว่ามีระบบผลึกเป็นแบบ FCC (Face Center Cubic)

อะลูมิเนียมผสม คือ อะลูมิเนียมที่สามารถผสมกับโลหะชนิดอื่นได้ เช่น ทองแดง แมกนีเซียม ซิลิกอน และแมงกานีส โดยโลหะที่ผสมเข้าไปนั้นจะทำให้สมบัติทางกลเปลี่ยนไปตามต้องการจึงทำให้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น ซึ่งอะลูมิเนียมผสมแบ่งได้ 2 ประเภท

1. อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูป (Wrought Aluminum Alloy) เป็นโลหะผสมที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการรีด การอัดขึ้นรูปออกมาเป็นแผ่นหรือแท่ง ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

2. อะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อ (Cast Aluminum Alloy) เป็นโลหะผสมที่มีสมบัติพิเศษมีความสามารถในการไหลตัวที่ดี ส่วนใหญ่ของโลหะประเภทนี้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้

อะลูมิเนียมหล่อผสมตามมาตรฐานของ ASM (American Society of Metals)

ตัวเลขตัวที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุหนึ่งเป็นหลัก ดังตารางที่ 2.1 เช่น 2XX.X เป็นกลุ่มธาตุผสมของอะลูมิเนียม ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

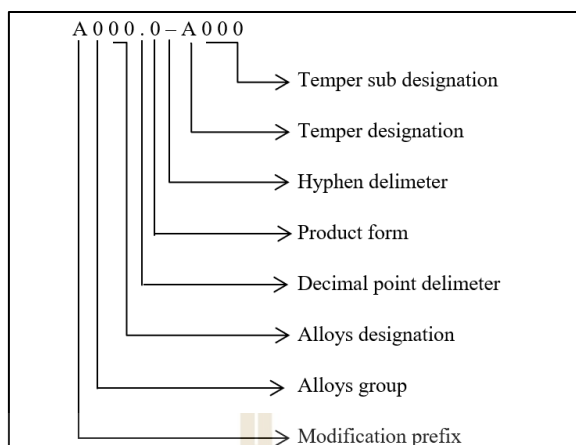
ตัวเลขตัวที่สองและสาม เป็นสัญลักษณ์แสดงอะลูมิเนียมผสม ที่มีธาตุผสมชนิดอื่นผสมเข้าไปหรือแสดงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ตัวเลขตัวที่สี่ เป็นสัญลักษณ์ซึ่งเป็นการแบ่งตามการผลิตอย่างอื่น โดยจะใช้จุดทศนิยมแสดงการผลิต เป็นต้น เช่น การหล่อหรือจากแท่งอินกอท การปรับปรุงจากธาตุผสมเดิมหรือจำนวนสิ่งที่ปนเข้าไป แสดงโดยตัวอักษรก่อนตัวเลข ตัวอักษร “X” ใหญ่ ใช้สำหรับธาตุผสมที่ทดลองอยู่อะลูมิเนียมหล่อผสมทั่วไปจะใช้ตัวเลข 3 หลัก

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อผสม

1XX.X	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XX.X	ทองแดง (Copper, Cu)
3XX.X	ซิลิกอน (Silicon, Si) – ทองแดง (Copper, Cu) – แมกนีเซียม (Mg) ซิลิกอน (Silicon, Si) – แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) ซิลิกอน (Silicon, Si) – ทองแดง (Copper, Cu)
4XX.X	ซิลิกอน (Silicon, Si)
5XX.X	แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
7XX.X	สังกะสี (Zinc, Zn)
8XX.X	ดีบุก (Tin, Sn)
9XX.X	ธาตุอื่น ๆ (Other Element)
6XX.X	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

American Aluminum Association Casting Alloys ได้กำหนดมาตรฐานและแยกประเภทอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม (American National Standard Institute, ANSI Standard) ได้ ดังนี้



รูปที่ 2.1 ประเภทอะลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard

- A : อักษรตัวแรก หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum Alloy) แม้ว่าส่วนผสมจะแตกต่างกัน
- O : Alloy group จะเป็นตัวเลขตัวเดียวจาก 1 ถึง 9 ใช้เป็นตัวกำหนด ธาตุหลักของ Alloys หรือ Major Alloying
- OO : Alloys designation เป็นตัวเลข 2 หลัก กำหนดความแตกต่างของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลขที่กำหนดเหมือนกับ Major Alloy ในบางครั้งตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณ % ไม่น้อยกว่าของ Al ที่มีผสมอยู่ เช่น 190.X เท่ากับ Al ผสมอยู่ 99.90%
- .O : ตัวเลขหลังจุดทศนิยม หมายถึง รูปแบบการผลิตหรือ Product form เป็นตัวเลขหลักเดียว คือ .O : เป็น Casting Specification
.1 : เป็น Ingot Specification
.2 : เป็น Ingot Specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า .1 Ingot Specification
- A : Temper designation เป็นตัวกำหนดแทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการ Heat Treatment ที่ใช้กับ Heat Treatable Alloys ดังนี้
- F : As Cast Condition หมายถึง งานจากสภาพหล่อโดยไม่ต้องใช้กรรมวิธีใด ๆ ควบคุมภายหลังกการหล่อขึ้นรูป
- H : Strain Hardened หมายถึง สภาพของงานแข็งตัวเอง เนื่องจากความเครียดจากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่าง ๆ

O : Anneal หมายถึง การอบอ่อนใช้กับงานหล่อที่ต้องนำไปอบ เพื่อปรับปรุงขนาดรูปร่างให้คงที่ (Stability) ขณะใช้งานหรือเพื่อทำให้เพิ่มความเหนียว (Ductility)

W : Solution Heat Treat เป็นการอบเพื่อเปลี่ยน โครงสร้างให้เป็นสารละลายของแข็งเฟสเดียวใช้กับ Alloys ที่สามารถชุบแข็งด้วยตนเองได้ในบรรยากาศปกติ

T : เป็นการอบด้วยความร้อน โดยกำหนดกรรมวิธี Temper ที่แน่นอนดีกว่า F หรือ O การกำหนดกรรมวิธี “F” , “O” และ “T” ทุกกระบวนการสามารถหล่อด้วยแบบทรายและแบบเหล็ก

OO: Temper Sub – designation เป็นตัวเลขระบุกรรมวิธีทำ Temper ที่ชัดเจน โดยระบุอุณหภูมิ

O : ช่วงเวลาปฏิบัติการที่แยกละเอียดได้อีก 10 วิธีการจาก T1 ถึง T10 ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering)

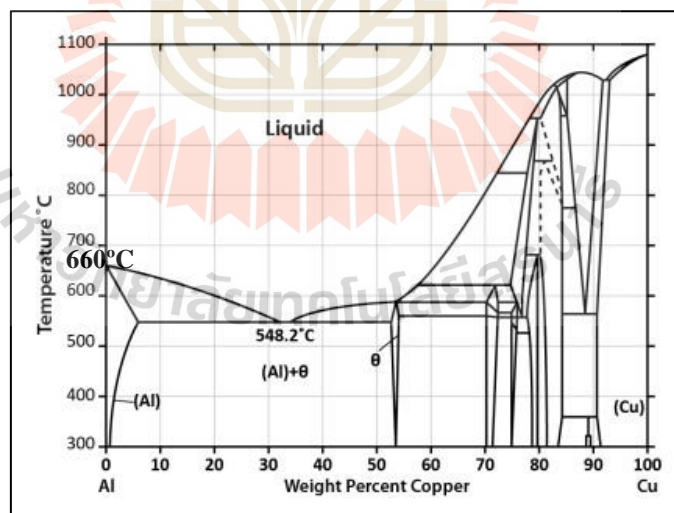
T1	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงตามปกติในบรรยากาศปกติ และบ่มแข็งด้วยตนเอง (Naturally Aged) โดยธรรมชาติและสภาพงานไม่เปลี่ยนแปลง
T2	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งจะเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิปกติ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ ความแข็งเพิ่มขึ้นขณะใช้งาน
T3	นำงานไปทำการอบละลาย (Solution Heat Treated) แล้วปล่อยให้งานเย็นตัวลง แล้วทำ Naturally Aged โดยทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศจะเกิดความแข็งเอง Strain Hardening
T4	ทำ Solution Heat Treated และ Naturally Aged เพื่อให้ความแข็งคงตัว
T5	ปล่อยให้งานค่อย ๆ เย็นตัวลงในสภาพเดิม แล้วนำไปทำการบ่มแข็งเทียม (Artificially Aged)
T6	เป็นการทำ Solution Heat Treated, Quenching แล้วทำ Artificially Aged
T7	เป็นการทำ Solution Heat Treatment และ Stabilized
T8	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged
T9	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Artificially Aged แล้วนำมาทำ Cold Worked
T10	เป็นการให้งานเย็นตัวตามปกติ แล้วนำไปขึ้นรูป Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged

2.1.2 อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม 2XXX

อะลูมิเนียมเกรด 2024 เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีทองแดง แมงกานีส และแมกนีเซียมเป็นส่วนผสมสำคัญที่ได้ถูกพัฒนาจากอะลูมิเนียมผสม 2017 โดยการเพิ่มปริมาณของแมกนีเซียมให้มากขึ้นจึงทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยมีส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานที่ใช้ในการผลิตแผ่นโลหะกึ่งของแข็งได้ใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่มีค่าวิเคราะห์ผลทางเคมีอยู่ในช่วงมาตรฐานแสดงดังตารางที่ 2.3 สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม 2024 สามารถนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนจะทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น อะลูมิเนียมเกรดนี้เหมาะกับการงานแม่พิมพ์พลาสติกและงานอื่น ๆ ได้อย่างกว้างขวางที่สามารถทนต่อการกัดกร่อน และมีสมบัติที่ง่ายต่องานเชื่อม กระบวนการทางความร้อนที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ชนิด T6 คือการนำชิ้นงานไปอบละลายแล้วนำไปชุบน้ำจางนั้นจึงนำไปทำการบ่มแข็งเทียม

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญ (% โดยน้ำหนัก)

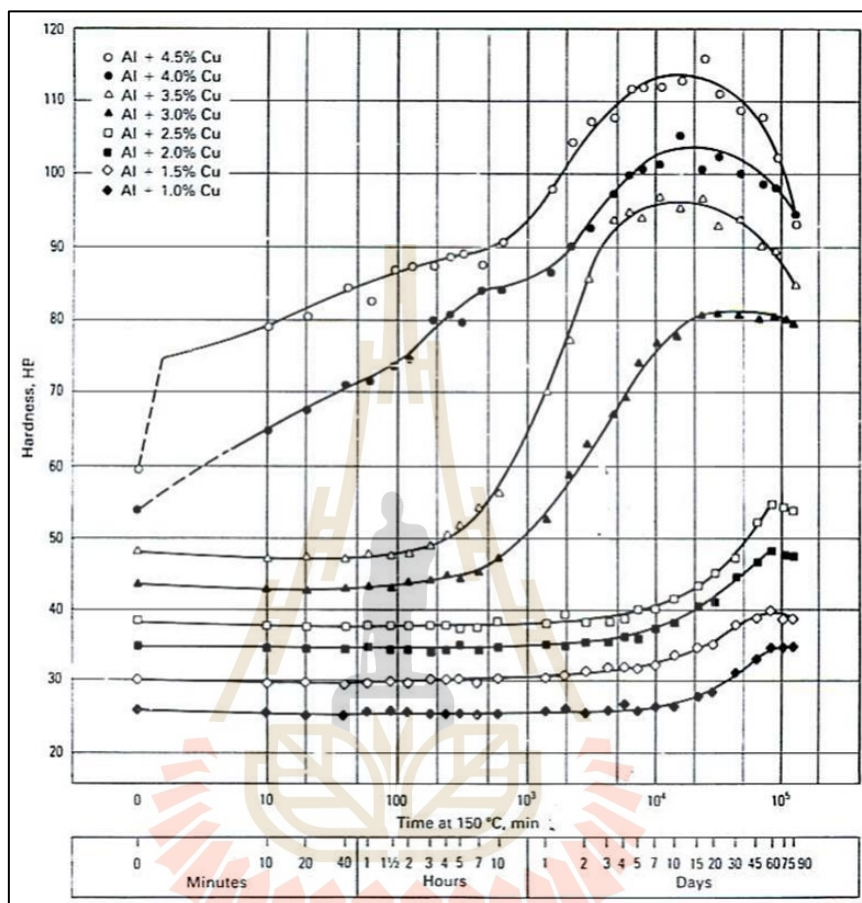
Al	Cu	Cr	Zn	Mn	Mg	Si
Base	3.80 - 4.90	Max.0.10	Max.0.25	0.30 - 0.90	1.20 - 1.80	Max.0.15



รูปที่ 2.2 แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง

จากรูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลภาคของอะลูมิเนียม-ทองแดง จะเห็นได้ว่าปริมาณทองแดงมากที่สุดที่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับอะลูมิเนียมในสภาวะสารละลายของแข็งนั้นมี

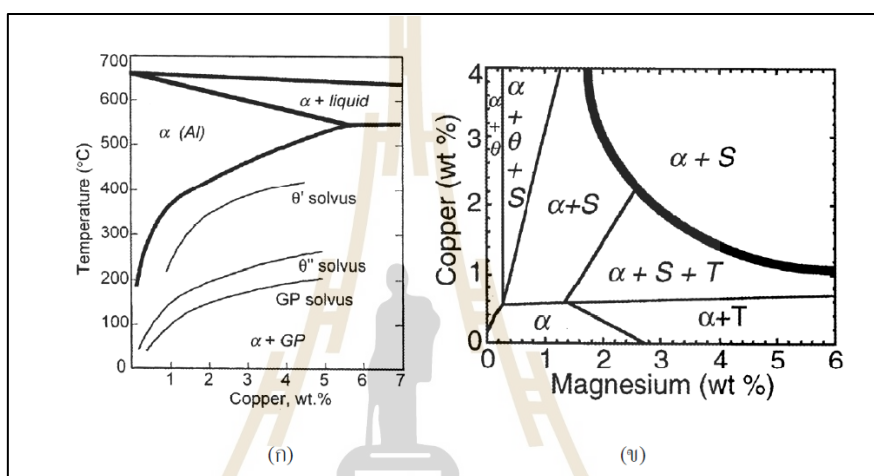
ปริมาณ 5.65% และที่อัตราส่วนผสมของทองแดง 54% ตำแหน่งเหนืออุณหภูมิ 548 °C เล็กน้อย ทองแดงจะจับตัวกับอลูมิเนียมกลายเป็นสารประกอบ



รูปที่ 2.2 ค่าความแข็งของอลูมิเนียมผสมทองแดงเมื่อมีปริมาณธาตุผสมทองแดงที่แตกต่างกันและผ่านกระบวนการในการบ่มแข็งเทียม (Ameran Foundrymen's Society, Inc.1996)

โลหะ Al_2Cu เรียกว่า “ θ - phase” ในกรณีที่ปริมาณทองแดงน้อยกว่า 0.5% ทองแดงทั้งหมดจะละลายเป็นเนื้อเดียวกับอลูมิเนียมกลายเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า “ α - phase” เมื่อปริมาณทองแดงมากกว่า 0.5% และอยู่ระหว่าง 0.5 - 54% เนื้อโลหะที่อุณหภูมิห้องจะประกอบด้วย $\alpha + \theta$ - phase ดังนั้น ถ้าโลหะผสมมีปริมาณทองแดงในระหว่าง 0.5 - 5.65% ถูกอบให้ร้อนจนมีอุณหภูมิ 500 - 548 °C จะมีผลทำให้อนุภาค Al_2Cu ไม่สามารถแยกออกจากสภาวะการละลายเป็นเนื้อเดียวกับ α - phase ได้ทัน ทำให้ Al_2Cu ทั้งหมดยังคงอยู่ในสภาพสารละลายของแข็งแม้ว่าจะมี

อุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิห้องก็ตาม เรียกสารละลายของแข็งชนิดนี้ว่า “สารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated solid solution)” ซึ่งสารละลายชนิดนี้จะขาดความเสถียรที่อุณหภูมิห้องและจะต้องเกิดการแยกตัวของ Al_2Cu ในเวลาต่อไปหรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาในการบ่มแข็งเทียมอลูมิเนียมผสมทองแดงที่อุณหภูมิการบ่มแข็งเทียม 150°C พบว่า ที่เวลาในการบ่มแข็งเทียมมากขึ้นและปริมาณทองแดงมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.3 (ก) แผนภาพการเปลี่ยนเฟสของอลูมิเนียมผสมทองแดง

(ข) แผนภาพการเกิดเฟสของอลูมิเนียมผสมทองแดงและแมกนีเซียม

(Dieter, G.E, 1998)

จากรูปที่ 2.3 (ก) และรูปที่ 2.3 (ข) พบว่า ปริมาณสัดส่วนทองแดงทำให้อลูมิเนียมมีความแข็งสูง ซึ่งพบในชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งเทียมและ โลหะผสมอลูมิเนียมเกรด 2024 จะมีลักษณะของการพรีซิพิเทตอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาณของทองแดงกับแมกนีเซียม ถ้าสัดส่วนของทองแดงต่อแมกนีเซียมมากกว่า 8 ลักษณะของพรีซิพิเทตจะมีรูปร่างเป็นแผ่น (Plate shape) ซึ่งมีลำดับการตกตะกอนของเฟส Al_2Cu เป็นดังนี้

Supersaturated solid solution (SSS) \rightarrow GPZ (discs) θ'' (discs) \rightarrow θ' (plates) \rightarrow θ (Al_2Cu)

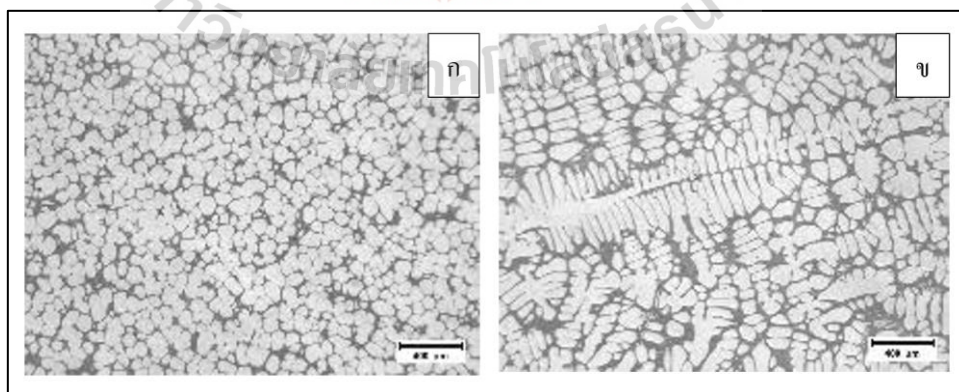
ถ้าสัดส่วนของทองแดงต่อแมกนีเซียมต่ำไม่เกิน 4 พรีซิพิเทตหลัก ๆ จะมีรูปร่างเป็นระแนง (Lath shape) หรือเฟส S ซึ่งมีการลำดับการตกตะกอนของเฟสของแข็ง Al_2CuMg ดังนี้

Supersaturated solid solution (SSS) \rightarrow GPZ(rods) \rightarrow S' (laths) \rightarrow S (Al₂CuMg)(laths)

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เมื่อส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันหรือเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อลักษณะการตกตะกอนที่ต่างกันและพรีซิพิตจะมีลักษณะที่ต่างกัน

2.2 กระบวนการหล่อโลหะกิ่งของแข็ง

กระบวนการหล่อโลหะกิ่งของแข็งถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1970 ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (MIT) หลังจากนั้นก็ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้คิดค้นพัฒนากระบวนการหล่อโลหะแบบกิ่งของแข็งขึ้นมา เช่น NRC, SSR, RDC, H-NCM, CRP, SEED และ SLC (Thanabumrungkul, 2010) รวมถึงกระบวนการผลิตโลหะแบบกิ่งของแข็งแบบ GISS ที่คิดค้นโดยนักวิจัยชาว ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปทำได้ด้วยการหล่อโลหะกิ่งของแข็งที่มีโครงสร้างแบบก้อนกลม ดังรูปที่ 2.4 (ก) ลงในแม่พิมพ์แทนการหล่อด้วยน้ำโลหะ โครงสร้างเมื่อแข็งตัวแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) สมบัติของโลหะกิ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์ มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเค้นขณะไหลต่ำกว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว ทำให้ไม่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมาก ดังแสดงได้จากการตัดแท่งอะลูมิเนียมด้วยมือได้ในสภาวะที่เป็นโลหะกิ่งของแข็ง ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการทั้งเรื่องการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ลดการเกิดฟองอากาศและลดการเกิดโพรงหดตัว รวมไปถึงการลดค่าใช้จ่ายในการผลิต เช่น การลดระยะเวลาในการผลิต, ลดพลังงาน, การลดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้า และช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์



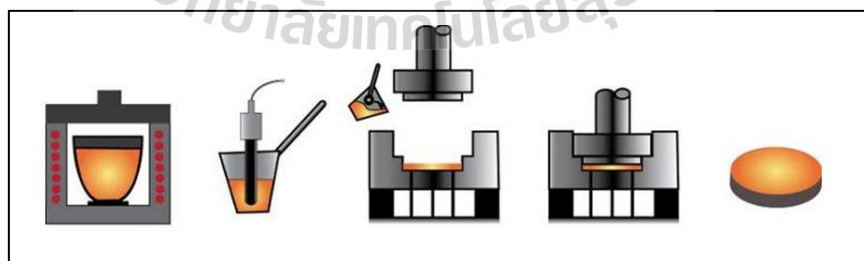
รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะกิ่งของแข็ง (ก) เปรียบเทียบกับการหล่อทั่วไป (ข)

(เจษฎา วรรณสินธุ์, 2552)



รูปที่ 2.5 สมบัติของแท่งอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ตัดด้วยมือ โดยใช้แรงเพียงเล็กน้อยก็ขึ้นรูปได้
(เจษฎา วรรณสินธุ์, 2552)

จากปัญหาดังกล่าว ทีมวิจัย Innovative Metal Technology หรือ IMT ได้คิดค้นกระบวนการใหม่มีชื่อเรียกว่า “กระบวนการ Gas Induced Semi-Solid” หรือ “GISS” ที่ใช้เทคนิคใหม่ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการปล่อยฟองแก๊สที่ละเอียดมากผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนในน้ำโลหะขณะที่มีการแข็งตัวบางส่วน ดังรูปที่ 2.6 ทำให้กระบวนการใหม่นี้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ง่าย และผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีคุณภาพสูงได้ดี ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องต้นแบบของกรรมวิธี GISS ที่สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพในราคาที่ถูกลงกว่าเครื่องจักรที่นำเข้าจากต่างประเทศหลายสิบเท่า



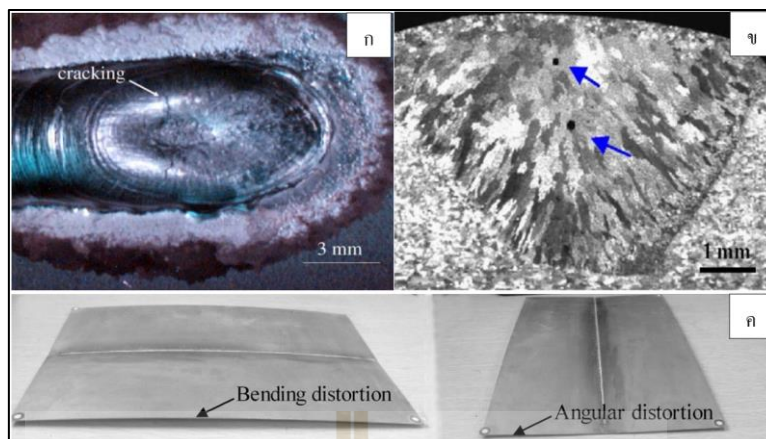
รูปที่ 2.6 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยวิธี Gas Induced Semi - Solid (GISS)
(Burapa, 2010)

2.3 กระบวนการเชื่อมโลหะ

กระบวนการเชื่อมโลหะ (Metal welding) เป็นการต่อวัสดุ 2 ชิ้น หรือมากกว่า มาเชื่อมให้ติดกันซึ่งเกิดจากการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อวัสดุที่นำมาเชื่อมต่อ โดยทั่วไปทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อวัสดุด้วยความร้อนในตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมต่อ เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการประสานติดกันในบริเวณดังกล่าว ซึ่งเรียกว่า “แนวเชื่อม” ในกระบวนการเชื่อมสามารถใช้การเติมเนื้อวัสดุเข้าไปยังจุดที่เกิดการหลอมละลายหรือบ่อหลอมละลาย เพื่อให้แนวเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น กระบวนการเชื่อมสามารถแยกได้ 2 ประเภท คือ การเชื่อมแบบหลอมละลาย (fusion welding) และการเชื่อมสถานะของแข็ง (Solid State Welding)

2.3.1 การเชื่อมแบบหลอมละลาย

การเชื่อมแบบหลอมละลายเป็นการให้ความร้อนจากแหล่งจ่ายความร้อนไปยังเนื้อวัสดุในบริเวณจุดเชื่อมต่อจนเกิดเป็นบ่อหลอมและหลอมละลายเนื้อวัสดุให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันและประสานยึดติดกันเมื่อเย็นตัวลงเป็นแนวสม่ำเสมอไปตามตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการเชื่อมติดทำให้เกิดเป็นแนวเชื่อมประสาน โดยในการเชื่อมแบบหลอมละลายมีหลายชนิดด้วยกัน ทั้งแบบใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อวัสดุเข้าไปในแนวเชื่อมและแบบไม่ใช้ลวดเชื่อมเติมเนื้อวัสดุ ซึ่งประกอบด้วย การเชื่อมแก๊ส (Gas welding) การเชื่อมไฟฟ้า (Arc welding) การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal-Arc welding, MAG) การเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged arc welding) การเชื่อมปกคลุมด้วยแก๊ส (Metal Inert Gas Welding: MIG) การเชื่อมปกคลุมด้วยแก๊สทังสเตน (Tungsten Inert Gas Welding, TIG) การเชื่อมด้วยพลาสมา (Plasma arc welding) การเชื่อมอาร์คโลหะด้วยแก๊สปกคลุม (Gas metal arc welding, GMAW) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเชื่อมเหล่านี้จะมีความร้อนที่เกิดขึ้นสูง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโลหะวิทยา เกิดจุดบกพร่องตำหนิและรอยแตกได้ง่าย รวมถึงการบิดงอของชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.7 ทำให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมลดลงไปจากโลหะพื้น (Kah, Rajan, Martikainen, & Suoranta, 2015; Mendes da Silva & Scotti, 2006; Guo, Hu, & Tsai, 2009; GUERLER, 1998; Fang & Zhang, 2014) รวมถึงมีข้อจำกัดในด้านความสามารถในการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิด ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Mishra และ Ma, 2005; Baffari, Buffa, Campanella, Fratini, และ Micari, 2014)



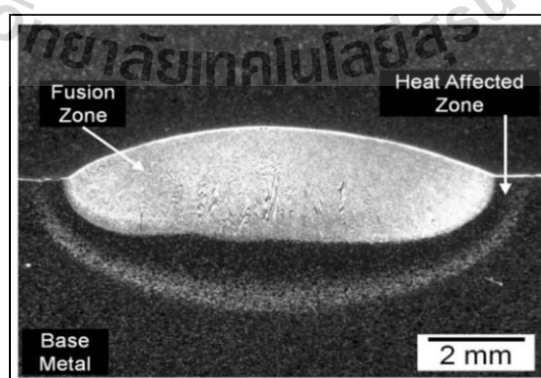
รูปที่ 2.7 ตำหนิและจุดบกพร่องในการเชื่อม Gas metal arc welding

(ก) รอยแตกหลังจากการเชื่อมแบบ (Guo, Hu, และ Tsai, 2009)

(ข) รูปพรุนภายในโครงสร้าง (Mendes da Silva & Scotti, 2006)

(ค) ชิ้นงานบิดงอจากการเชื่อมด้วยลำแสงเลเซอร์ (Fang & Zhang, 2014)

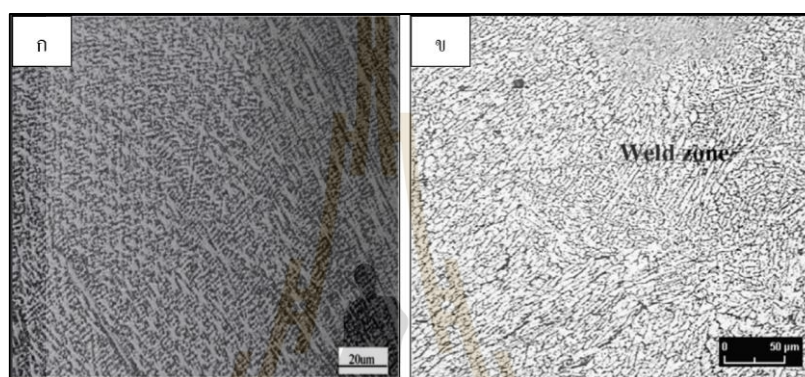
การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคในพื้นที่การเชื่อมแบบหลอมละลายนั้น เกิดจากผลของความร้อนที่ได้รับจากแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนเพื่อให้เกิดการหลอมละลายเนื้อ โลหะที่นำมาเชื่อมต่อกันซึ่งจะเกิดพื้นที่สำคัญ 2 พื้นที่ด้วยกัน ได้แก่ พื้นที่หลอมละลาย (Fusion Zone) และพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone) ดังรูปที่ 2.8 โดยโครงสร้างทั้ง 2 พื้นที่นี้ มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 2.8 พื้นที่ที่เกิดจากการเชื่อมแบบหลอมละลาย เหล็กกล้าผสม INCONEL 740H

(Bechetti, Dupont, J.J. Debar Badillo, & Baker, 2014)

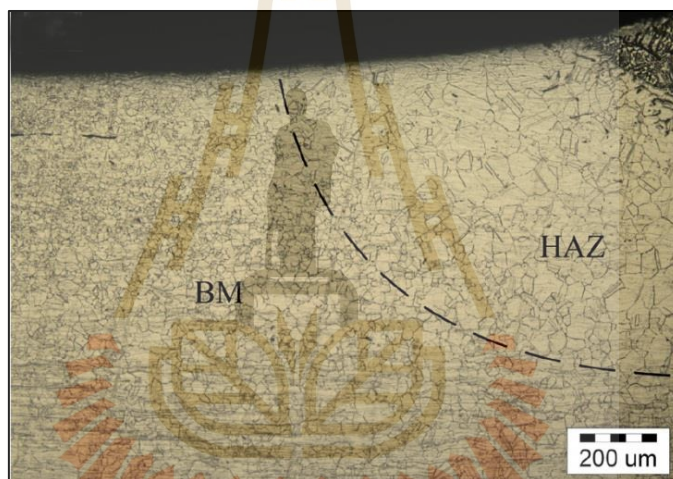
โดยพื้นที่หลอมละลายเป็นพื้นที่ที่เกิดขึ้นจากความร้อนในการหลอมละลายโลหะของวัสดุอะลูมิเนียมให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้น ทำให้เกิดเป็นบ่อหลอมละลายขึ้นบนพื้นผิวหน้าของโลหะจากการเชื่อมและโครงสร้างจุลภาคในพื้นที่หลอมละลายเมื่อเกิดการเย็นตัวแล้ว เกรนมีขนาดเล็กละเอียดมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเกรนเดนไดร์ (Bechetti, Dupont, J.J. Debar Badillo, & Baker, 2014; Mei et al., 2016; Adalarasan and Santhanakumar, 2015) และเกรนแบบ Columnar (Kumar, Dilthey, Dwivedi, & Ghosh, 2009; Chennaiah, Kumar, & Rao, 2015) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นที่หลอมละลาย (ก) เหล็กกล้า INCONEL 718 (ข) อะลูมิเนียม 6082 (Mei, et al., 2016; Kumaret al., 2009)

อีกทั้งยังพบการเกิดเฟสใหม่หลังการเชื่อม โดยเฉพาะเฟสสารประกอบในการเชื่อมวัสดุต่างชนิด (Chen, et al., 2016; Zhang, Li, Guo, Wang, & Wei, 2016; Ma, Qin, Bai, Wang, & Liang, 2016) สำหรับโลหะที่สามารถปรับปรุงด้วยความร้อนได้นั้นจะเกิดการตกตะกอนของสารละลายแทรกภายในโครงสร้างเกรน ซึ่งโครงสร้างในพื้นที่หลอมละลายนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากโลหะพื้น เป็นผลจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของแนวเชื่อมจึงทำให้พื้นที่หลอมละลายนี้มีความแข็ง และเปราะ อีกทั้งพื้นที่การหลอมละลายนี้มักการเกิดรูพรุนที่เป็นตำหนิหรือรอยแตก ซึ่งเป็นจุดบกพร่องจากการเกิดฟองอากาศของธาตุไฮโดรเจนในบ่อหลอมและรอยแตกจากอุณหภูมิหลอมละลายที่สูงแล้วเย็นตัวอย่างรวดเร็วของโลหะ (Katayama, Kawahitoa, & Mizutania, 2010; Matsunawa, Seto, Kimft, Mizutani, & Katayama, 2001; Kah, Rajan, Martikainen, & Suoranta, 2015) จึงส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของพื้นที่หลอมละลายมีความแตกต่างไปจากพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนและโลหะพื้น

ส่วนพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนเป็นพื้นที่ที่เกิดขึ้นจากผลของการแผ่ความร้อนออกไปยังพื้นที่รอบ ๆ ข้างของพื้นที่หลอมละลาย โดยมีอุณหภูมิสูงมากแต่พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนนี้จะไม่เกิดการหลอมละลาย ผลกระทบจากความร้อนที่ได้รับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคไปจากโลหะพื้น ทำให้โครงสร้างจุลภาคในพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนนี้เกิดการตัวเติบโตของเกรนและการรวมตัวของเกรน (Sundaresan, Janaki Ram, และ Madhusudhan Reddy, 1999) จึงทำให้มีขนาดเกรนที่โตกว่าเกรนของพื้นที่หลอมละลายและเกรนของโลหะพื้น (Ma, Fang, Yang, Liu, และ Fang, 2014) ดังรูปที่ 2.10 อีกทั้งยังพบโครงสร้างเดนไดรต์ที่แพร่จากพื้นที่หลอมละลายเกิดขึ้นในพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนด้วย (Adalarasan & Santhanakumar, 2015) ซึ่งโครงสร้างในพื้นที่นี้มีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าโลหะพื้น



รูปที่ 2.10 โครงสร้างพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (Ma, Fang, Yang, Liu, & Fang, 2014)

2.3.2 การเชื่อมในสถานะของแข็ง

การเชื่อมในสถานะของแข็งเป็นหนึ่งในกระบวนการเชื่อมที่สามารถเชื่อมต่อได้ดีภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของโลหะพื้น โดยกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็งประกอบด้วย การเชื่อมเย็น (Cold Welding) การเชื่อมอัด (Forge Welding) การเชื่อมอัลตราโซนิก (Ultrasonic Welding) การเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding) การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) การเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance Welding) การเชื่อมแพร่ (Diffusion Welding) และการเชื่อมอัดระเบิด (Explosion Welding) โดยใช้หลักการทำให้เกิดการเสียดทานแบบพลาสติก

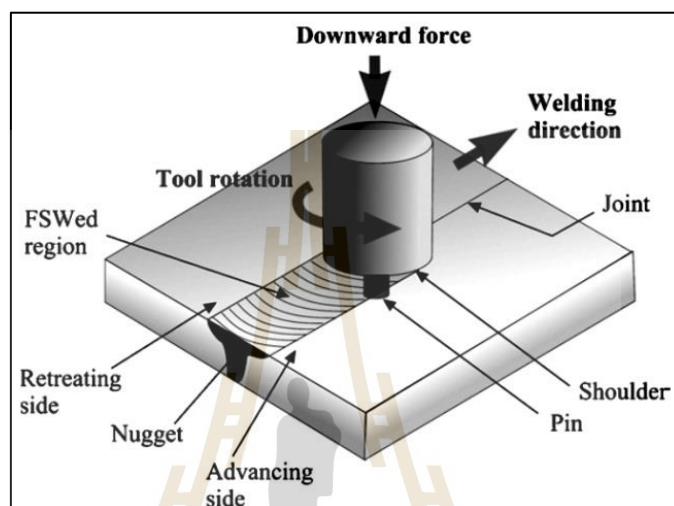
และแพร่กระจายไปทั่วบริเวณแนวเชื่อมเกิดการยึดเกาะกันภายใต้อุณหภูมิและแรงกดดัน โดยใช้แรงทางกล กระแสไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อน ซึ่งกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งนี้แก้ปัญหาการเกิดตำหนิขึ้นภายใน โครงสร้างดังเช่นการเกิดรูพรุนจากแก๊ส รอยแตกจากความร้อน และการแยกส่วนของเนื้อวัสดุที่ไม่ใช่โลหะในกระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย อีกทั้งไม่จำเป็นต้องใช้ฟลักซ์หรือแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม ซึ่งให้คุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมที่ดี เช่นเดียวกับโลหะพื้น เนื่องจากปราศจากตำหนิและมีพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนที่น้อยกว่า การเชื่อมแบบหลอมละลาย รวมถึงสามารถเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดได้ดีลดปัญหาด้านการเข้ากันได้ขององค์ประกอบทางเคมี การขยายตัวทางความร้อน และการนำความร้อนของวัสดุที่ต่างกัน และเป็นปัญหาที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแนวเชื่อม (Guo J', 2015) อย่างไรก็ตาม กระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่ใช้ในการเชื่อมต่อ ส่วนใหญ่มาอาศัยแรงทางกลเป็นหลักเพื่อให้เกิดการยึดติดกัน โดยเฉพาะการเสียดทานของพื้นผิววัสดุที่นำมาเชื่อมต่อกัน การเชื่อมเสียดทานการเชื่อมที่อาศัยการเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานความร้อนจากพื้นผิวสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานเชื่อมจนเกิดการอ่อนตัวแล้วใช้แรงกดอัดเข้าไว้จนชิ้นงานยึดติดกัน การเชื่อมและการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมที่อาศัยการเสียดทานของชิ้นงานกับเครื่องมือกวนสำหรับการสร้างความร้อนและพันธะยึดเกาะทางกลระหว่างชิ้นงานเชื่อม สามารถเชื่อมวัสดุที่มีความยากในการเชื่อมแบบหลอมละลายได้ดี อีกทั้งยังสามารถเชื่อมชิ้นงานอย่างต่อเนื่องไปตามแนวเชื่อมตามที่กำหนดได้ดี จึงถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมค่อนข้างมาก มีความยืดหยุ่นในรูปทรงชิ้นงานได้ดีกว่าการเชื่อมสภาวะของแข็งอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมใช้สำหรับการเชื่อมชิ้นส่วนประกอบ โดยเฉพาะการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยใน อากาศยาน รถไฟความเร็วสูง รถยนต์ และเรือเดินสมุทร เป็นต้น

ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงถูกนำมาศึกษาวิจัยค่อนข้างมาก โดยเฉพาะขั้นตอนและการควบคุมพารามิเตอร์การเชื่อมให้มีความเหมาะสมสัมพันธ์กัน โครงสร้างทางโลหะวิทยาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคน้อยที่สุดและรอยเชื่อมปราศจากจุดบกพร่องหรือตำหนิภายใน โครงสร้างและด้านประสิทธิภาพทางกล

2.4 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding, FSW) เป็นเทคนิคการเชื่อมชิ้นงานในสภาวะของแข็งถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ 1991 โดยสมาคมการเชื่อมของประเทศอังกฤษ ซึ่งหลักการพื้นฐานจะอาศัยการหมุนเพื่อให้เกิดการเสียดทานขึ้นกับพื้นผิวสัมผัสระหว่างเครื่องมือกวนกับชิ้นงานเพื่อให้เกิดความร้อนบริเวณรอยต่อจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วเกิดการอ่อนตัวเสียรูปของวัสดุ

ในสภาวะพลาสติก (Plastic Deformation) ซึ่งต่ำกว่าจุดหลอมละลายจากนั้นสอดแทรกเครื่องมือ กวนเข้าไปในเนื้อวัสดุชิ้นงาน เพื่อให้เกิดการกวนเนื้อวัสดุและเกิดการไหลตัวเข้ามาผสมเป็น เนื้อเดียวกันของชิ้นงานที่นำมาเชื่อมต่อกัน โดยควบคุมอัตราการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวนไปตาม แนวเชื่อม แสดงดังรูปที่ 2.11



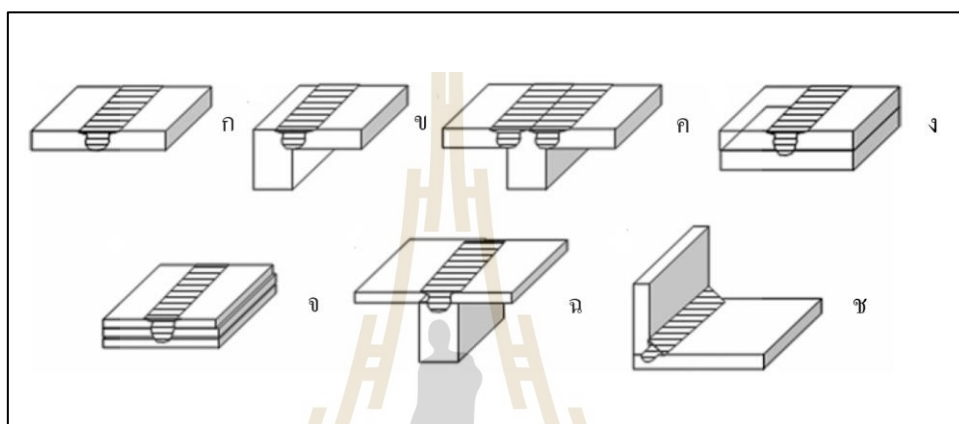
รูปที่ 2.11 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Elatharasan & Senthil Kumar, 2013)

จากรูปที่ 2.11 การหมุนของเครื่องมือกวนมีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกาและมีทิศทาง การเคลื่อนที่ไปด้านหน้าชิ้นงานที่อยู่ฝั่งซ้ายเรียกว่า “Retreating Side (RS)” และชิ้นงานฝั่งขวา เรียกว่า “Advancing Side (AS)” ทัวไปแล้วชิ้นงานฝั่งด้าน RS จะถูกนำเนื้อวัสดุที่อ่อนตัวเสียรูปแบบ พลาสติกไหลออกไปเติมให้กับฝั่งด้าน AS แล้วหมุนกวนเนื้อวัสดุให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และประสานยึดติดกันหลังจากเครื่องมือกวนเคลื่อนที่ผ่านไปตามแนวเชื่อม ในการเชื่อมเสียดทาน แบบกวนมีองค์ประกอบการเชื่อมที่สำคัญ ได้แก่ รูปแบบของการเชื่อมต่อ พารามิเตอร์การเชื่อม และรูปลักษณะเครื่องมือกวน ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 3 นี้มีอิทธิพลต่อคุณภาพของรอยเชื่อม

2.4.1 รูปแบบการเชื่อมต่อ

รูปแบบของการเชื่อมต้อมีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบพื้นฐาน 3 แบบด้วยกัน ประกอบด้วย แบบต่อชน (Butt-joint) แบบต่อเกย (Lap-joint) และแบบต่อตัวที (T-joint) และ แบบประยุกต์รูปแบบการต่อจากแบบพื้นฐาน ดังรูปที่ 2.12 โดยแต่ละรูปแบบการเชื่อมต่อนั้นจะมี อิทธิพลต่อแรงที่ใช้ในจับยึดชิ้นงานให้แนบชิดสำหรับการเชื่อมเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวออกจาก ตำแหน่งที่กำหนดในระหว่างการเชื่อมกวน ซึ่งต้องให้การจับยึดให้แน่นขจัดกาเคลื่อนที่ของ

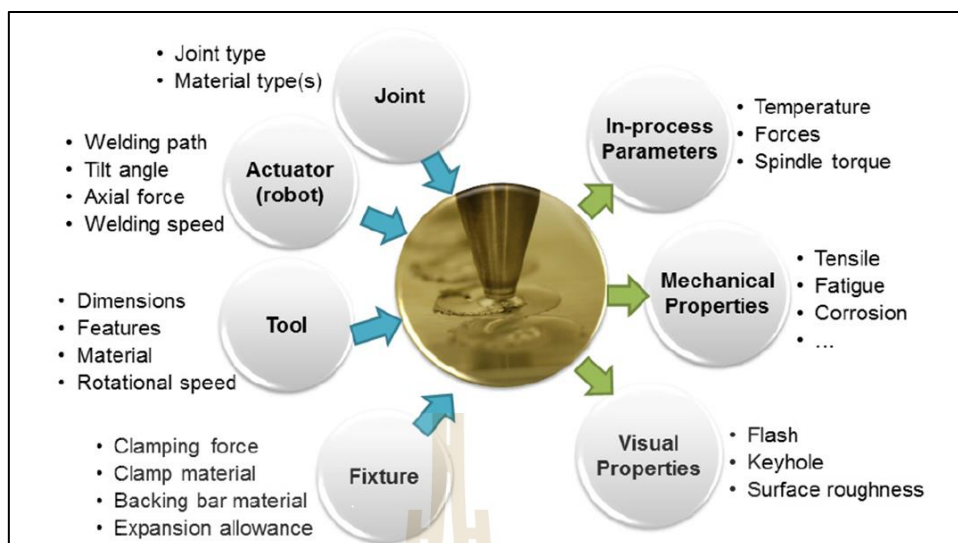
ชิ้นงานในทิศทางที่ทำให้เกิดผลกระทบกับรอยเชื่อมออก รวมถึงรูปแบบการไหลตัวของเนื้อวัสดุ เข้าไปผสมกันซึ่งมีความแตกต่างกันในรอยต่อ ซึ่งการเลือกใช้พารามิเตอร์การเชื่อมและรูปลักษณะของเครื่องมือกวนให้เหมาะสมกับรูปแบบของการเชื่อมต่อเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยลดจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีคุณภาพ (Mishra, Sarathi De, และ Kumar, 2014; Li และ Shen, 2012)



รูปที่ 2.12 รูปแบบการเชื่อมต่อในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (ก) แบบต่อชน (ข) แบบต่อชนขอ (ค) แบบต่อชนตัวที่ (ง) แบบต่อเกย (จ) แบบต่อเกยแบบหลายชั้น (ฉ) แบบต่อเกยตัวที่ (ช) แบบต่อมุมฉาก (Mishra & Ma, 2005)

2.4.2 พารามิเตอร์การเชื่อม

พารามิเตอร์การเชื่อมสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งประกอบไปด้วยค่าต่าง ๆ ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วรอบในการเดินเชื่อม มุมเอียงของในการเชื่อม แรงกดขณะเชื่อม เหล่านี้เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล และคุณภาพรอยเชื่อมแตกต่างกัน



รูปที่ 2.13 พารามิเตอร์การเชื่อมและผลที่ได้สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
(De Backer, 2014)

2.4.2.1 ความเร็วรอบในการหมุนกวน

ความเร็วรอบในการหมุนกวน (Rotation Speed) เป็นความเร็วที่เครื่องมือหมุนไปรอบ ๆ ตัวเองต่อหน่วยเวลาซึ่งมีหน่วยวัดเป็น “รอบต่อนาที” หรือเรียกว่า “อัตราความเร็วรอบในการหมุนกวน” โดยในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนความร้อนในการเชื่อมเกิดจากการเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับเครื่องมือหมุน ซึ่งหมุนด้วยอัตราความเร็วรอบตามกำหนดความเร็วรอบในการหมุนกวนเป็นพารามิเตอร์หลักในการเกิดความร้อนและการไหลของเนื้อวัสดุ ในขณะที่กวน ทำให้บริเวณแนวเชื่อมมีความร้อนที่เพียงพอสำหรับการอ่อนตัวและเสียรูปแบบพลาสติกของวัสดุ เช่น ความเร็วรอบในการหมุนกวนสูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนมากและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกได้ดีขึ้น ในทางกลับกันความเร็วรอบในการหมุนกวนต่ำทำให้ความร้อนเกิดขึ้นได้น้อย การเสียรูปแบบพลาสติกของวัสดุได้ไม่ดีพอเช่นกันมีผลต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุและการเกิดตำหนิภายในรอยเชื่อม (Bisadi, Tavakoli, Sangsaraki, และ Sangsaraki, 2013) อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบในการหมุนกวนทำให้พื้นที่การกวนเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างจุลภาคเกิดเฟสใหม่ในพื้นที่ NZ รวมถึงทำให้เกรนตกผลึกใหม่มีขนาดใหญ่ขึ้นในพื้นที่ TMAZ และ HAZ อีกทั้งอาจเกิดตำหนิภายในรอยเชื่อม ส่งผลให้สมบัติทางกลแนวเชื่อมลดลง (YOON, และคณะ, 2012; Saeid, Abdollah-zadeh, และ Sazgari, 2010; Tan, jiang, Li, Chen, และ Chen, 2013) ดังรายงานของ R. Kadaganchi และคณะ

กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนกวนในการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 2014-T6 เมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนต่ำกว่า 600 รอบต่อนาที ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอ การเสีรูปร่างแบบพลาสติกเกิดขึ้นน้อยทำให้การพาเนื้อวัสดุให้ไหลออกไปผสมกันได้ไม่ดีจึงทำให้เกิดตำหนิขึ้นด้าน RS เมื่อปรับความเร็วรอบในการหมุนกวนให้สูงเกินกว่า 1,400 รอบต่อนาที ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นมากเกินไปทำให้เกิดการอ่อนตัวเสีรูปร่างแบบพลาสติกและเกิดการบ่นป่วนมากขึ้นของเนื้อวัสดุรอบ ๆ หัวกวน นำไปสู่การก่อตัวของเม็ดผงอะลูมิเนียมในโครงสร้างรอยเชื่อม (R. Kadganchi, Gankidi, และ Gokhale, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ H. Liu และคณะ ในการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 2219-T6 เมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนสูงขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยทำให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุเกิดการบ่นป่วนส่งผลให้เกิดความเครียดมากและความไม่ต่อเนื่อง จากการยื่นตัวของโครงสร้างจุลภาคนำไปสู่การเกิดตำหนิในโครงสร้างแนวเชื่อม (Liu, Zhang, Pan, และ Yu, 2012) ดังนั้นการเลือกใช้ความเร็วรอบในการหมุนกวนให้เหมาะสมกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นเป็นสิ่งสำคัญต่อคุณภาพแนวเชื่อมที่ได้ อย่างไรก็ตาม ยังมีพารามิเตอร์หลักด้านความเร็วเดินเชื่อมที่สำคัญและส่งผลต่อคุณภาพแนวเชื่อมเช่นกัน ซึ่งจำเป็นต้องใช้ควบคู่กับความเร็วรอบเครื่องมือกวนซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาให้สัมพันธ์กันอีกด้วย

2.4.2.2 ความเร็วในการเดินเชื่อม

ความเร็วในการเดินเชื่อม (Welding Speed) เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องมือกวนไปด้านหน้ามีระยะทางต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น “มิลลิเมตรต่อนาที” หรือเรียกว่า “อัตราความเร็วเดินเชื่อม” ทำให้เกิดการกวนเชื่อมติดของเนื้อวัสดุเข้าเป็นเนื้อเดียวกันไปตามแนวเชื่อม โดยความเร็วเดินเชื่อมของเครื่องมือกวนเป็นพารามิเตอร์หลักที่มีอิทธิพลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนในระหว่างการเชื่อม เมื่ออุณหภูมิสูงที่เกิดขึ้นจากการหมุนเครื่องมือกวนสามารถทำให้ลดต่ำลงได้ด้วยการปรับเพิ่มความเร็วเดินเชื่อม ทำให้ความร้อนในการเชื่อมมีความสม่ำเสมอ (Sidhu & Chatha, December 2012; Guo J. , 2015; Mishra, Sarathi De , & Kumar, 2014; Amir & Salman , 2014) การปรับเปลี่ยนความเร็วเดินเชื่อมนอกจากจะควบคุมปริมาณความร้อนที่เกิดในระหว่างการเชื่อมแล้วยังส่งผลต่อรูปแบบการไหลของเนื้อวัสดุเข้าไปผสมกัน โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อมอีกด้วย (Vivekanandan, Arunachalam, Prakash, และ Savadamuthu, 2012; M. Nourani, Milani, และ Yannacopoulos, 2015; Ouyang และ Kovacevic, 2002) ดังรายงานที่ผ่านมาในการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยเมื่อความเร็วรอบเครื่องมือกวนคงที่ โดยปรับเปลี่ยนความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มของความแข็งแรงดึงและความแข็งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และพบว่าที่ความเร็วเดินเชื่อมในระดับต่ำสุดจะทำให้เกิดความร้อนสูงเป็นผลให้อุณหภูมิการเชื่อมสูงกว่าความเร็วเดินเชื่อมในระดับที่สูงขึ้น จึงทำให้อัตราการยื่นตัวซ้ำโครงสร้าง

เกรนมีการเติบโตได้มาก เกิดคำหนิภายในรอยเชื่อม และเกิดการเกาะกลุ่มของเฟสตกตะกอนเกิดขึ้นในพื้นที่ที่กวนมีผลให้สมบัติทางกลของแนวเชื่อมลดลง (Amir และ Salman , 2014) ความร้อนที่เกิดขึ้นสูงมากเกินไปทำให้โครงสร้างทางโลหะวิทยาเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสไปจากโลหะพื้น เมื่อความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วเดินเชื่อมมากเกินไปจะส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมไม่เพียงพอสำหรับการไหลตัวของวัสดุ ทำให้ความแข็งแรงดึงแนวเชื่อมลดลง (Shanmuga Sundaram และ Murugan, 2010) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ N.K. Kim และคณะ ได้กล่าวถึงการปรับเปลี่ยนความเร็วเดินเชื่อมให้สูงขึ้นทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ที่ความเร็วเดินเชื่อมสูงสุด 400 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้เกิดคำหนิในแนวเชื่อม เนื่องมาจากความร้อนเกิดขึ้นไม่เพียงพอสำหรับการไหลตัวของเนื้อวัสดุจากด้าน RS ไปด้าน AS สำหรับการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด 5052 กับเกรด 5J32 จึงทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมต่ำลง (Kim, Kim, An, Jung, Song, และ Kang, 2009) รวมถึงรายงานของ R. Kadaganchi และคณะ ที่พบว่า เมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนคงที่และที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำกว่า 200 มิลลิเมตรต่อนาที จะเกิดความร้อนสูงมากเกินไปทำให้การไหลของเนื้อวัสดุเป็นแบบปั่นป่วนและ เมื่อความเร็วเดินเชื่อมสูงกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อนาที จะเกิดรูคำหนิขึ้นภายในโครงสร้างรอยเชื่อมด้าน RS เนื่องจากความร้อนไม่เพียงพอต่อการไหลตัวของวัสดุรอบ ๆ หัวกวนเช่นกัน (R. Kadagachi, Gankidi, และ Gokhale, 2015) กล่าวได้ว่า พารามิเตอร์ด้านความเร็วเดินเชื่อมมีความสำคัญต่อการควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในการเชื่อม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบในการหมุนกวนที่เป็นพารามิเตอร์ทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดทาน โดยความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งคู่นี้มีผลอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม ซึ่งต้องควบคุมให้สัมพันธ์กัน ซึ่งควรให้มีอัตราส่วนความเร็วรอบเร็วรอบเครื่องมือกวนต่อความเร็วเดินเชื่อมระหว่าง 5-50 ซึ่งจะให้ความร้อนที่เกิดขึ้นเพียงพอระหว่างเชื่อมเกิดการไหลตัวของเนื้อวัสดุได้อย่างเพียงพอและส่งผลให้การเชื่อมต่อได้ดี (Kumar, Singh, & Pandey, 2012; Roshan, Jooibari, Teimouri, Asgharzadeh-Ahmadi, Falahati-Naghibi, & Sohrabpoor, 2013; Aval, Serajzadeh, & Kokabi, 2012; Karam, Mahmoud, Zakaria, & Khalifa, 2014; Lin, Liu, & Chen, 2013; Lakshimainarayanan, Malarvizth, & Balasubramanian, 2011; Yoo, Yoon, Min, & Lee, 2015; Radisavljevic, Zivkovic, Radovic, & Grabulov, 2013) อย่างไรก็ตาม การใช้อัตราส่วนความเร็วรอบเร็วรอบเครื่องมือกวนต่อความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำมีโอกาสเกิดคำหนิขึ้นในโครงสร้างได้ง่ายขณะเดียวกันการใช้อัตราส่วนความเร็วรอบเครื่องมือกวนต่อความเร็วเดินเชื่อมที่สูง ทำให้อัตราการเย็นตัวช้าส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและเกิดคำหนิขึ้นได้ภายในแนวเชื่อม ซึ่งทั้งสองกรณีส่งผลต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม

2.4.2.3 มุมเอียงเครื่องมือกวน

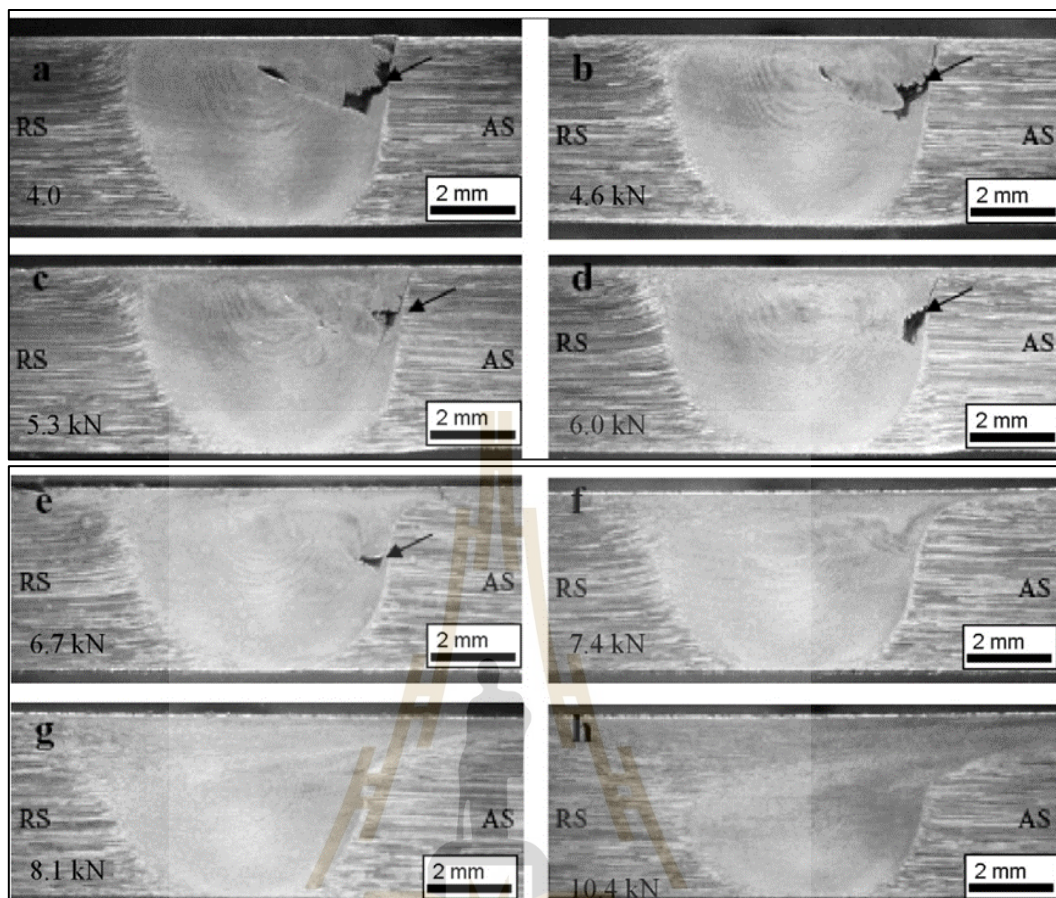
มุมเอียงเครื่องมือกวน (Tilt Angle) เป็นมุมระหว่างแกนเครื่องมือกวนกับระนาบของชิ้นงานในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยมีหน่วยเป็น “องศา” ซึ่งมุมเอียงเครื่องมือกวนมีผลต่อประสิทธิภาพการกวนเมื่อปรับมุมให้เหมาะสมจะช่วยให้การกวนและการไหลของเนื้อวัสดุจากด้านหน้าไปด้านหลังของหัวกวนและผสมเข้ากันได้ดีมากขึ้น โดยทั่วไปนิยมใช้มุมเอียงเครื่องมือกวนในช่วง $0-3^{\circ}$ (Mishra, Sarathi De, & Kumar, 2014; Guo J., 2015) อย่างไรก็ตามมีการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ด้านมุมเอียงเครื่องมือกวน ซึ่งมีการใช้มุมเอียงที่มากกว่า 3° เช่นกัน ดังรายงานการศึกษาผลกระทบของการเอียงมุมเครื่องมือกวนในการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 2014-T6 ที่มุมเอียงเครื่องมือกวนต่ำกว่า 1.5° เกิดตำหนิแบบ Tunnel และรอยแตกภายในโครงสร้างบริเวณส่วนกลางแนวเชื่อม เนื่องจากเนื้อวัสดุเกิดการผสมเข้ากันได้ไม่ดีพอ รวมถึงการเอียงมุมเครื่องมือกวนน้อยส่งผลให้เกิดแรงกดเข้าเนื้อวัสดุไม่เพียงพอทำให้การไหลของเนื้อวัสดุไม่ดีพอ แต่เมื่อปรับมุมเอียงเครื่องมือกวนมากเกินกว่า 3.5° จะทำให้ป่าเครื่องมือกวนกดลงไป ในเนื้อวัสดุมากเกิดไปเกิดครีบบริเวณพื้นผิวหน้าอย่างมากและความหนาแนวเชื่อมที่ได้จะบางลงไป การใช้มุมเอียงเครื่องมือกวนในช่วง $1.5-3.5^{\circ}$ ทำให้ความร้อนจากการเสียดทานเกิดขึ้นได้ดีมากขึ้น และเกิดการเสียรูปแบบพลาสติกภายใต้ป่าเครื่องมือกวนได้ดีเพิ่มขึ้นสามารถจัดตำหนิต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างได้ดีโดยเฉพาะที่ 3.5° ให้ความแข็งแรงแนวเชื่อมสูงสุด อย่างไรก็ตามการเอียงมุมเครื่องมือกวนทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือกวนลดลงเมื่อเทียบกับมุม 0° (R. Kadaganchi, Gankidi, และ Gokhale, 2015) สอดคล้องกับรายงานของ M.Sharifitabar และคณะ เมื่อใช้มุมเอียงเครื่องมือกวนต่ำจะทำให้เกิดรูตำหนิขึ้นในโครงสร้างแต่เมื่อใช้มุมเอียงปรับระดับมุมเอียงให้สูงขึ้นจะทำให้ตำหนิที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างหายไป (Sharifitabar, Sarani, Khorshahian, และ Shafiee Afarani, 2011) นอกจากนี้การเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061-T6 พบว่า การปรับมุมเอียงเครื่องมือกวนในช่วง $1-5^{\circ}$ นี้ เมื่อปรับเพิ่มมุมเอียงเครื่องมือกวนให้มากขึ้นจาก 1° ทำให้สมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่มุมเอียงเครื่องมือกวนที่ 3° เมื่อปรับมุมเอียงเครื่องมือกวนมากกว่า 3° แล้วคุณสมบัติทางกลของแนวเชื่อมลดลง (Safeen, Hussain, Wasim, & Jahanzaib, 2016) และในการปรับมุมเอียงเครื่องมือกวนสำหรับการเชื่อมวัสดุไททานเนียมบริสุทธิ์ พบว่าที่มุมเอียงเครื่องมือกวนที่ 1° เกิดรอยแตกบางส่วนบริเวณส่วนบนของโครงสร้างแนวเชื่อมเนื่องจากเกิดการสึกหรอและการกดลงผิวชิ้นงานของเครื่องมือกวน แต่เมื่อปรับเปลี่ยนมุมเอียงเครื่องมือกวนเป็น 3° เกิดตำหนิขึ้นที่บริเวณพื้นผิวหน้าของแนวเชื่อมอย่างมากเช่นกัน ซึ่งรอยตำหนิเหล่านี้ลดลงได้ด้วยการปรับมุมเอียงเครื่องมือกวนต่ำกว่า 3° และใช้อากาศหล่อเย็นและก๊าซอาทอนปกคลุมในการเชื่อมทำให้แนวเชื่อมที่ได้มีความแข็งแรงสูงมากขึ้น (Reshad Seighalani, Besharati Givi, Nasiri,

& Bahemmat, 2010) การใช้มุมเอียงของเครื่องมือกลสำหรับการเชื่อมต่อวัสดุต่างชนิดระหว่าง อะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 5052 กับเหล็กกล้า HSLA ซึ่งใช้มุมเอียงเครื่องมือกลในช่วง $0.5-2.5^{\circ}$ โดยอิทธิพลของมุมเอียงเครื่องมือกลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม ที่ช่วงมุมเอียง $1-1.5^{\circ}$ ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และเมื่อใช้มุมเอียงเครื่องมือกลต่ำกว่า 1° ทำให้ความแข็งแรงดึงลดลงไป 3% และมุมเอียงเครื่องมือกลที่มากกว่า 1.5° ความแข็งแรงดึงลดลงไปมากถึง 12% ของความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ramachandran, Murugan, & Shashi Kumar, 2016) ดังนั้นการใช้พารามิเตอร์ด้านมุมเอียงเครื่องมือกลช่วยในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถช่วยลดการเกิดตำหนิและการเสียรูปแบบพลาสติกของวัสดุได้ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาเชื่อมต่อกันด้วย

2.4.2.4 ระยะกดลึกของเครื่องมือเชื่อม

ระยะกดลึกของเครื่องมือเชื่อม (Plunge Depth) เป็นระยะจากการกด สอดแทรกเครื่องมือกลลงไปในเนื้อวัสดุจนบ่าเครื่องมือกลสัมผัสกับพื้นผิวหน้าซึ่งงานสึกลงไป ตามระยะกำหนดมีหน่วยเป็น “มิลลิเมตร” ซึ่งเป็นตำแหน่งในการเกิดการเสียดทานระหว่างพื้นผิว ของบ่าเครื่องมือกลกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ระยะกดลึกเสียดทานเพิ่มมากขึ้นมีผลต่อปริมาณความร้อนที่เกิดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเกิดครีบด้านข้างแนวเชื่อมมากขึ้น และมีผลกระทบให้ชิ้นงานบางลง ส่วนระยะกดลึกเสียดทานน้อยทำให้ปริมาณความร้อนเกิดขึ้น น้อยในการเชื่อม ความร้อนที่ไม่เพียงพอส่งผลให้เกิดรูตำหนิขึ้นภายในโครงสร้างหรือเกิดร่องขึ้น บนพื้นผิวหน้าจากการไม่ผสมกันของเนื้อวัสดุด้านบน โดยการไหลของวัสดุที่เคลื่อนที่จากการกวน จากด้านหน้าไปยังด้านหลังจะทำให้เกิดการเติมเนื้อไม่เพียงพอ ขาดความต่อเนื่องก่อให้เกิดโพรง หรือช่องว่างขนาดเล็กในรอยเชื่อม (K. Kumar & Kailas, 2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของความลึกของ เครื่องมือที่มีต่อคุณภาพของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะก ดลึกกับแรงกดที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง พบว่า จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อระยะกดลึกและแรง กดเพิ่มมากขึ้นที่แรงกดในการเชื่อมมากกว่า 7.4 kN สามารถจัดรอยตำหนิหรือโพรงในรอยเชื่อม เนื่องจากการไหลของวัสดุจากเครื่องมือมีความเหมาะสมและเพียงพอ ดังรูปที่ 2.14 การศึกษานี้ แสดงให้เห็นความสำคัญของระยะกดลึกและแรงกดในแนวตั้งที่เหมาะสม (Guo J', 2015; Jain, และ คณะ, 2015) โดยในการศึกษาอิทธิพลของขนาดความโตบ่าเครื่องมือกลและระยะกดลึกเสียดทาน ในการขึ้นรูปหลังจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061-T6 พบว่า การปรับ เพิ่มขึ้นของขนาดความ โตบ่าเครื่องมือกลและระยะกดลึกมีผลกับการเพิ่มขึ้นของกลไก ความแข็งแรงจากความเครียดช่วยให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งลดความหนาแน่นของ Dislocation ดังนั้นจึงช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลและขีดจำกัดของการกด

ขึ้นรูป (Ramulu, R. Ganesh Narayanan, & Kailas, 2013) และจากระยะกดลึกลึกเสียดทานที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดปริมาณความร้อนสูงขึ้นจากการเสียดทานของพื้นผิวปาเครื่องมือกวนกับเนื้อวัสดุและเสียดรูปแบบพลาสติกมากขึ้นซึ่งการกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นรอบๆ หัวกวนเกิดขึ้นที่ฝั่งด้าน AS มากกว่าด้าน RS เล็กน้อย (Bisadi, Rasae, & Farahmand, 2014) อีกทั้งการไหลตัวของวัสดุที่ไม่เพียงพอหรือไหลตัวอย่างสม่ำเสมอหรือไหลตัวมากเกินไปนั้น เป็นผลจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์อัตราความเร็วเครื่องมือกวน ความเร็วเดินเชื่อม และระยะกดลึกลึกเสียดทาน เมื่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุมีความสม่ำเสมอเพียงพอจะทำให้ปราศจากตำหนิภายในแนวเชื่อม (Zhang, Xiao, และ Ma, 2012) ดังนั้นระยะกดลึกลึกเสียดทานจึงเป็นอีกพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่ต้องให้สัมพันธ์กับความเร็วรอบเครื่องมือกวนและความเร็วเดินเชื่อมด้วย ดังรายงานของ M. Ahmadnia และคณะ ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมต่างชนิดเกรด 6061 กับ 5010 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ด้วยรูปทรงหัวกวนที่แตกต่างกัน โดยศึกษาพารามิเตอร์ด้านความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วเดินเชื่อม และระยะกดลึกลึกเสียดทาน บนตัวแปรตอบสนองด้านความแข็งแรงดึง ความแข็งและเปอร์เซ็นต์การยึดตัว พบว่ารูปทรงหัวกวนแบบสี่เหลี่ยมช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลได้ดีกว่าหัวกวนรูปทรงแบบทรงกรวย ที่พารามิเตอร์ความเร็วรอบเครื่องมือกวน 800 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 60 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะกดลึกลึกเสียดทาน 0.2 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงดึงและความแข็งสูงสุด ส่วนเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีค่าอยู่ในระดับสูง แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วการเพิ่มระยะกดลึกลึกเสียดทานเป็น 0.25 มิลลิเมตร จะให้ค่าตัวแปรตอบสนองเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย ทำให้โครงสร้างมีขนาดเกรนเล็กละเอียดเฉลี่ย 20-30 μm และไม่เกิดตำหนิขึ้นภายใน แต่เกิดเฟสสารประกอบ AlCuMg ขึ้นในโครงสร้างแนวเชื่อมซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลทำให้มีความแข็งแรงดึง ความแข็ง และเปอร์เซ็นต์การยึดตัวสูงถึง 67, 130 และ 78% ตามลำดับ ของอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 5010 (Ahmadnia, Shahraki, & Kamarposhti, 2016) ปริมาณความร้อนและการไหลตัวของเนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเกิดจากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ด้านความเร็วรอบเครื่องมือกวน ความเร็วเดินเชื่อม และระยะกดลึกลึกเสียดทาน การปรับค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้เหมาะสมจะทำให้ปราศจากตำหนิและปรับปรุงสมบัติทางกลของแนวเชื่อมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 2.14 แรงกดจากเครื่องมือเชื่อมที่ส่งผลไม่เกิดรอยแตกพร่องของรอยเชื่อม

(K. Kumar & Kailas, 2008)

2.4.2.5 เวลาทดสอบ

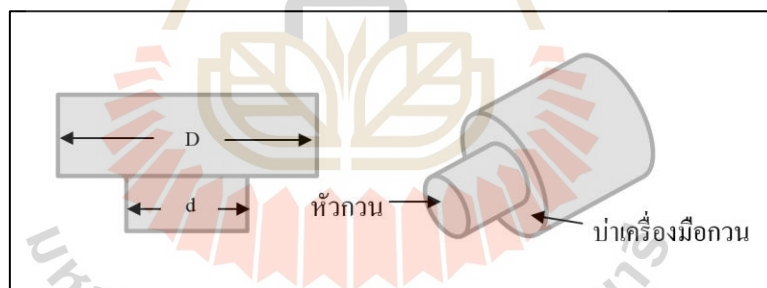
เวลาทดสอบ (Dwell time) เป็นช่วงเวลาในการกดแช่เครื่องมือกวนบนพื้นผิวสัมผัสของบ่าเครื่องมือกวนกับชิ้นงานซึ่งสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ด้านระยะกดลึกเสียดทาน มีหน่วยเป็น “วินาที (Second)” เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างเพียงพอขณะเริ่มต้นก่อนการเดินเชื่อมและความร้อนแพร่กระจายอย่างทั่วถึงในพื้นที่การเชื่อม โดยความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการกดเสียดทานและระยะกดลึกเสียดทานมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงกดในแนวแกนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการเดินเชื่อมที่มีผลต่อการเสียรูปแบบพลาสติก การไหลตัวของเนื้อวัสดุ การตกผลึกใหม่ของเกรนในพื้นที่กวน (Contuzzi, Campanelli, Casalino, และ Ludovico, 2016) โดยในช่วงระยะเวลาทดสอบ 5-40 วินาที จะเกิดอุณหภูมิสูงประมาณ 80% ของอุณหภูมิการหลอมละลาย ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยลดแรงที่เกิดขึ้นในการเชื่อม อย่างไรก็ตาม

เมื่อระยะเวลาการกัดเสียดทานมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสลดลงเป็นผลจากการอ่อนตัวเสียรูปแบบพลาสติกของวัสดุเพิ่มมากขึ้น (Hussein, Md Tahir, & Izamshah, 2015) ซึ่งในการเพิ่มระยะเวลาในการกัดเสียดทานทำให้แรงกดในแนวแกนลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งแรงกดในแนวแกนสม่ำเสมอจากความร้อนที่เกิดขึ้นสูงและการอ่อนตัวเสียรูปของวัสดุ แล้วยังมีพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิและแรงกดในแนวแกน ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบเครื่องมือกวนต่อความเร็วเดินเชื่อมด้วยเช่นกัน อีกทั้งยังส่งผลต่อประสิทธิภาพความแข็งแรงแนวเชื่อมอีกด้วย (Forcellese, Martarelli, & Simoncini, 2015) อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาในการกัดเสียดทานมีผลต่อความร้อนและแรงกดแนวแกนในช่วงแรกก่อนการเดินเชื่อมจากนั้นความร้อนและแรงกดแนวแกนจะเข้าสู่สภาวะคงที่สม่ำเสมอ จึงทำให้ระยะเวลาในการกัดเสียดทานไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิและแรงกดแนวแกนในช่วงการเดินเชื่อม

2.4.2.6 อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน

อัตราส่วนป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) เป็นสัดส่วนระหว่างขนาดความโตป่าเครื่องมือกวนกับขนาดความโตหัวกวน ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งอัตราส่วน D/d ที่สัมพันธ์กันมีอิทธิพลต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุทั้งในแนวตั้งและแนวนอนให้มีความสม่ำเสมอของการไหลตัวจากด้านบนลงด้านล่างและจากด้านหน้าไปด้านหลังทำให้เกิดการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อวัสดุได้ดีขึ้นภายใต้ป่าเครื่องมือกวนและหัวกวน (Mishra, Sarathi De , และ Kumar, 2014; Jain, และคณะ, 2015) ช่วยให้ง่ายขึ้นในโครงสร้างลดลงและเพิ่มประสิทธิภาพทางกลให้กับแนวเชื่อม ดังรายงานของ N.Z. Khan และคณะ ได้เชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6063 เพื่อหาผลกระทบของอัตราส่วน D/d บนความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม โดยใช้หัวกวนรูปทรงกระบอกที่อัตราส่วน D/d แตกต่างกัน 4 ระดับ ที่อัตราส่วน D/d เท่ากับ 2.6 นั้น ให้ความแข็งแรงดึงสูงสุด 145.35 MPa เปอร์เซ็นต์การยืดตัว 20.85 เนื่องจากหัวกวนมีขนาดใหญ่กว่าอัตราส่วน D/d อื่น ๆ จึงทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นได้มากที่สุดและไหลตัวเข้ามาผสมกันของเนื้อวัสดุได้ดีกว่า อีกทั้งโครงสร้างเกรนเล็กละเอียดส่งผลให้มีความแข็งแรงสูงสุด (Khan, Khan, & Siddiquee, 2015) แต่เมื่อใช้วิธีการทางสถิติช่วยหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วพบว่า อัตราส่วน D/d เท่ากับ 3 ให้ค่าประสิทธิภาพของแนวเชื่อมสูงสุด (Boulaheem, Salem, & Bessrou, 2015) อีกทั้งพบว่าอัตราส่วน D/d มีบทบาทในการเชื่อมมากถึง 60% ที่ส่งผลให้เนื้อวัสดุไหลตัวแบบปั่นป่วนและผสมเข้ากันได้ดีขึ้นและทำให้ได้ประสิทธิภาพของแนวเชื่อมสูงถึง 90% อีกด้วย (Koiltraj , Sundareswaran, Vijayan, และ Koteswara Rao, 2012) สอดคล้องกับรายงานของ S.kasman ในการเชื่อมเสียดทานอะลูมิเนียมต่างชนิดเกรด AA6082-T6/AA5754-H111 กล่าวถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุด

ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงดึงและอัตราความเครียดประกอบด้วยอัตราส่วน D/d ความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วรอบเครื่องมือกลึง คิดเป็น 50.30%, 37.68% และ 11.89% ตามลำดับ (Kasman S', 2013) และในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมคอมโพสิต LM25AA-5% SiC ได้หาผลกระทบของอัตราส่วน D/d ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ บนความแข็งแรงดึงและความเหนียว ซึ่งอัตราส่วน D/d เท่ากับ 3 เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงสร้างภายในไม่เกิดตำหนิและเกรนมีขนาดเล็กละเอียดมากของโลหะพื้น อนุภาคเสริมแรง SiC แดกเล็กละเอียดมากขึ้นและกระจายตัวสม่ำเสมอในเมทริกซ์ เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ความร้อนที่เกิดขึ้นสูงขึ้นทำให้การไหลตัวมีความปั่นป่วนเพียงพอเข้าไปผสมกัน ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงและการยึดตัวสูงสุดของแนวเชื่อม (Vijayavel, Balasubramanian, และ Sundaram, 2014) ดังนั้น จากผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากระบุถึงการใช้อัตราส่วน D/d อยู่ที่ช่วงเท่ากับ 3 และ 4 เท่า ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนทำให้ความร้อนในกระบวนการเชื่อมเพิ่มขึ้นในระดับที่เหมาะสม การไหลตัวและการผสมกันของเนื้อวัสดุ ทำให้ลดตำหนิที่เกิดในโครงสร้างและเพิ่มความแข็งแรงแนวเชื่อม (Elangovan และ Balasubramanian, 2008; Vijayavel, Balasubramanian, และ Sundaram, 2014; Ugender, Kumar, และ Reddy, 2014)



รูปที่ 2.15 ลักษณะเครื่องมือกลึงที่ประกอบด้วยส่วนบ่ากวนและหัวกวน

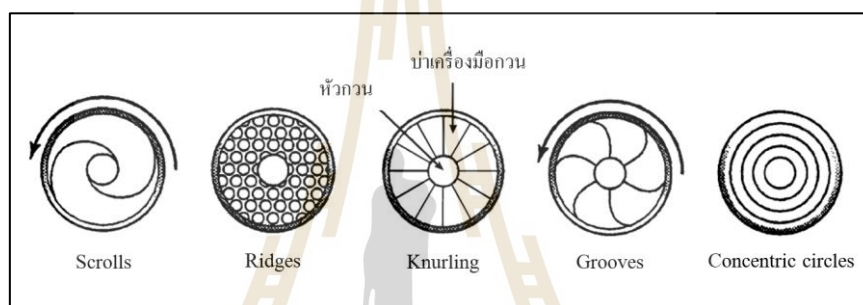
2.4.3 รูปทรงเครื่องมือกลึง

เครื่องมือกลึงมีส่วนสำคัญอย่างมากในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นแล้วยังเป็นตัวช่วยกวนเนื้อวัสดุให้เกิดการไหลทำให้เกิดการประสานติดกันของเนื้อวัสดุหลังจากการเชื่อมและส่งผลต่อคุณภาพแนวเชื่อม (Meilinger & Török, 2013) พื้นฐานรูปลักษณะของเครื่องมือกลึงสำหรับกวนเนื้อวัสดุในการออกแบบและสร้างเครื่องมือกลึงจะพิจารณาตัวแปรอื่น ๆ ร่วมด้วย ได้แก่ ความหนาชิ้นงานในการเชื่อม ชนิดวัสดุของชิ้นงาน ชนิดของวัสดุทำเครื่องมือกลึง และขนาดของเครื่องมือกลึงเพื่อให้เกิดความร้อน

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องมือกวนประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ บ่าเครื่องมือกวนและหัวกวน ซึ่งในปัจจุบันนักวิจัยยังให้ความสนใจกับลักษณะรูปร่างของบ่าเครื่องมือกวน และหัวกวน โดยยังมีวิจัยที่ทำการศึกษากันอย่างต่อเนื่อง

2.4.3.1 บ่าเครื่องมือกวน

บ่าเครื่องมือกวน (Shoulder) เป็นส่วนที่ใช้สร้างความเสียดทานบนพื้นผิวหน้าของชิ้นงานเพื่อให้เกิดความร้อนทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัว อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลตัวของเนื้อวัสดุ รูปลักษณะของบ่าเครื่องมือกวนมีแบบ ผิวหน้าแบนเรียบ ผิวหน้าเรียบโค้งเว้า และผิวหน้าเรียบโค้งนูน นอกจากนี้ยังมีลักษณะผิวหน้าแบบอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.16

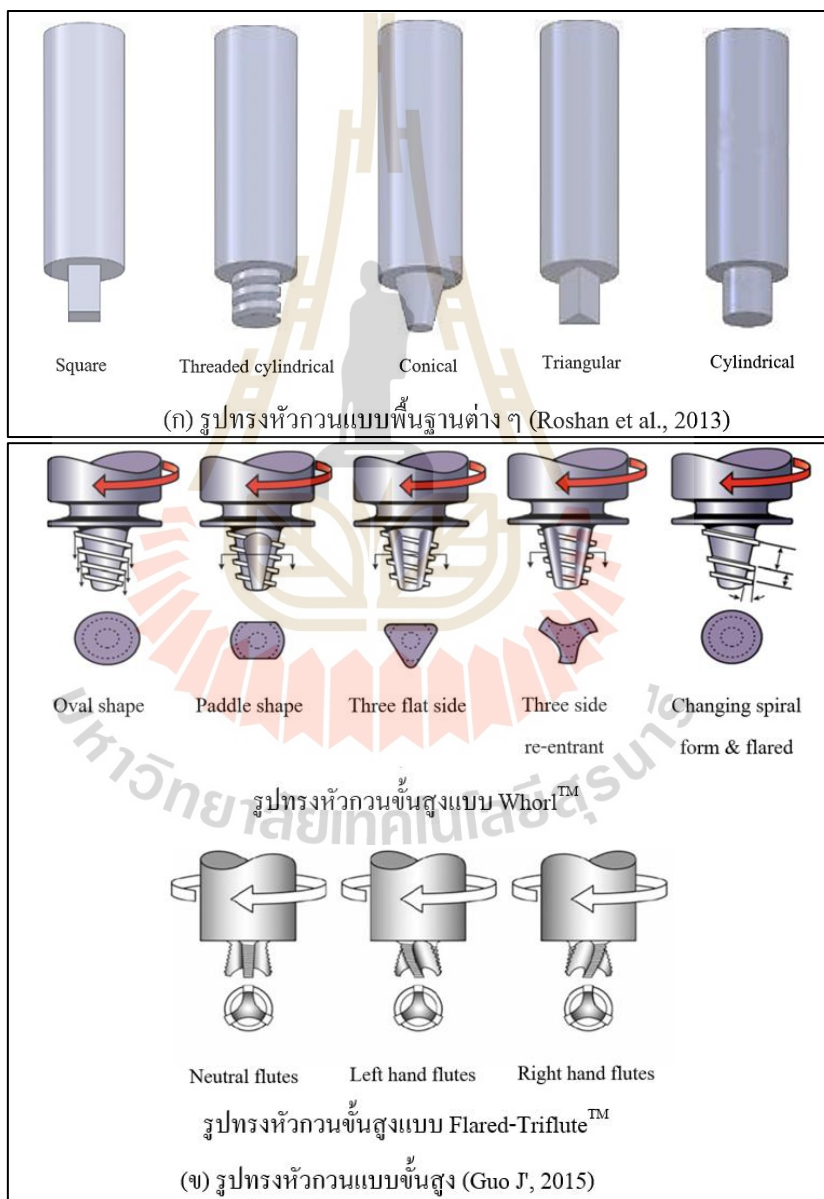


รูปที่ 2.16 ลักษณะของบ่าเครื่องมือกวนแบบต่าง ๆ (Zhang, Cao, Larose, & Wanjara, 2012)

2.4.3.2 หัวกวน

หัวกวน (Pin) เป็นส่วนที่ใช้สอดแทรกเข้าไปให้เนื้อวัสดุและการหมุนของหัวกวนจะเกิดการเคลื่อนที่และไหลตัวของเนื้อวัสดุ โดยการกวนของหัวกวนมีอิทธิพลต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุในแนวนอนจากด้านหน้าไปด้านหลังและในแนวตั้งจากด้านบนลงด้านล่าง จึงทำให้เกิดการผสมผสานเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีภายในโครงสร้างรอยเชื่อม โดยทั่วไปแล้วลักษณะพื้นฐานหัวกวนที่นิยมใช้เป็นแบบ หัวกวนทรงกระบอก และหัวกวนทรงกรวย นอกจากนี้แล้ว ยังได้ออกแบบให้มีการสร้างเกลียวหรือร่องเกลียวในพื้นที่ผิวหัวกวนเพิ่มเติมเพื่อให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการลดแรงกระทำที่เกิดขึ้นในกระบวนการอีกด้วย (Guo J., 2015; Mishra, Sarathi De , & Kumar, 2014) โดยหัวกวนที่ใช้กันโดยทั่วไปมีลักษณะรูปทรงพื้นฐานและรูปทรงแบบขั้นสูง ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งรูปทรงแบบขั้นสูงแบบ Whorl™ นี้ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า 6 มิลลิเมตร และสามารถใช้ความเร็วรอบเครื่องมือกวนสูงกว่าหัวกวนแบบพื้นฐาน ซึ่งจะช่วยลดแรงในการกวนและเพิ่มปริมาณการไหลของ

เนื้อวัสดุภายในรอยเชื่อม ส่วนรูปทรงแบบขั้นสูงแบบ Flared-Triflute™ ออกแบบมาสำหรับการเชื่อมแบบต่อเกลียว ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความกว้างขอบเขตการยึดเกาะของเนื้อวัสดุได้ดีมากขึ้น (Guo J', 2015) นอกจากนี้ อัตราส่วนบ่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดความร้อนเพียงพอสำหรับการไหลตัวของเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นสิ่งที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและการเกิดจุดบกพร่องภายในรอยเชื่อมเช่นเดียวกัน (Genevois, Girard, Huneau, Sauvage, และ Racineux, 2011)



รูปที่ 2.17 รูปทรงหัวกวนแบบพื้นฐานและแบบขั้นสูง

โดยปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงานเกิดขึ้น 2 ช่วง โดยสามารถหาปริมาณของแต่ละช่วงได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 เป็นความร้อนที่เกิดจากการกดของหัวกวนลงบนพื้นผิวชิ้นงานและแทรกตัวลงไปในเนื้อวัสดุและปากกวนกดสัมผัสกับผิวชิ้นงานหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 2.1

$$Q_1 = \frac{2}{3} \pi \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} \omega \left[(R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3)(1 + \tan \alpha) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^2 H_{pin} \right] \quad (2.1)$$

ช่วงที่ 2 เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวดินเชื่อมของเครื่องมืออย่างต่อเนื่องไปตามแนวเชื่อม โดยความร้อนจะเกิดขึ้นต่อเนื่องมาจากช่วงแรกหาปริมาณความร้อนได้ดังสมการที่ 2.2

$$Q_2 = \frac{2}{3} \pi \mu p \omega \left[(R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3)(1 + \tan \alpha) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^2 H_{pin} \right] \quad (2.2)$$

โดยปริมาณความร้อนรวมทั้ง 2 ช่วง ที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.3

$$Q_{Total} = \frac{2}{3} \pi \left(\delta \frac{\sigma_{yield}}{\sqrt{3}} + (1 - \delta) \mu p \right) \omega \left[(R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3)(1 + \tan \alpha) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^2 H_{pin} \right] \quad (2.3)$$

โดยที่ Q	คือ ปริมาณความร้อนรวมที่เกิดขึ้น (W)
μ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับเครื่องมือกวน
σ_{yield}	คือ ความแข็งแรงจุดคราก (Pa)
ω	คือ ความเร็วเชิงมุมเครื่องมือกวน (rad/s)
$R_{shoulder}$	คือ รัศมีของปากกวน (m)
R_{pin}	คือ รัศมีของหัวกวน (m)
α	คือ มุมเว้าของปากกวน ($^{\circ}$)
H_{pin}	คือ ความสูงของหัวกวน (m)

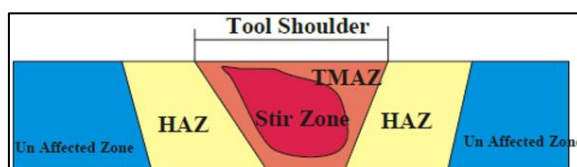
- p คือ แรงกดสัมผัสกับผิวชิ้นงาน (Pa)
 δ คือ ค่าแปรเปลี่ยนของผิวสัมผัสในช่วง $0 \leq \delta \leq 1$

ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้มีอิทธิพลต่อการเกิดความร้อนระหว่างการเชื่อม (Mishra และ Ma, 2005; Chen, Yan, Lin, Chen, Jiang, และ Zhao, 2006)

โดยบ่ากวนมีหน้าที่กำเนิดความร้อนในกระบวนการเชื่อมซึ่งปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียดทานนี้ประมาณ 95% ของความร้อนทั้งหมดเกิดขึ้นที่ชิ้นงานเชื่อม ส่วนอีก 5% เกิดที่เครื่องมือกวน โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 400-500°C และมีอัตราส่วนความร้อนที่เกิดการเสียดทานแบบพลาสติกนี้สูงถึง 80% ของจุดหลอมละลาย (Xiaocong, Fengshou, & Andrew, 2014; M. Sivashanmugam, Ravikumar, Kumar, Seshagiri Rao, & Muruganandam, 2010) ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดภายใต้กระบวนการเชื่อมนี้จะต่ำกว่าจุดหลอมละลายของชิ้นงานและการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงสุดทำได้โดยการเพิ่มความเร็วยรอบในการหมุนกวนที่อัตราการเดินเชื่อมคงที่ และจะมีอุณหภูมิลดลงเมื่อเพิ่มอัตราความเร็วเดินเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนคงที่เช่นกัน ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นสูงสุดที่บริเวณพื้นผิวหน้าของแนวเชื่อม (Mishra และ Ma, 2005; Mishra, Sarathi De, และ Kumar, 2014)

2.4.4 โครงสร้างจุลภาคในพื้นที่เชื่อม

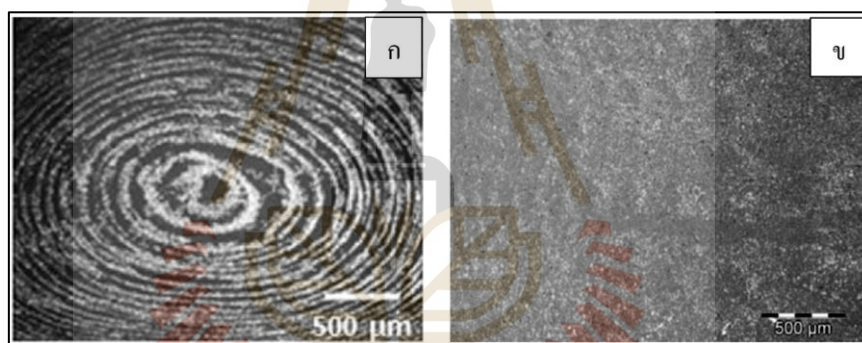
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีผลทำให้บริเวณพื้นที่ที่ผ่านการเชื่อมมีโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปจากโลหะพื้น ซึ่งมิลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามอิทธิพลของปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นและการกวน ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ สารละลายตกตะกอน และขนาดเกรนที่แตกต่างกันในแนวเชื่อม ซึ่งพื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคแบ่งออกเป็นพื้นที่กวน (Nugget zone, NZ) พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo mechanical affect zone, TMAZ) และพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affect zone, HAZ) ดังรูปที่ 2.18 พื้นที่เหล่านี้มีผลกระทบสมบัติทางกลของแนวเชื่อม



รูปที่ 2.18 พื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Sattari, 2012)

2.4.4.1 บริเวณพื้นที่กวน

บริเวณพื้นที่กวน (Nugget Zone, NZ) เป็นพื้นที่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติกอย่างรุนแรงและความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานในระหว่างการเชื่อมส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคที่เสีรูปร่างพลาสติกเกิดการตกผลึกใหม่ของเกรนและมีขนาดเล็กละเอียดภายใต้พื้นที่การกวนหรือพื้นที่การตกผลึกใหม่แบบพลวัต (Dynamically Recrystallized Zone, DXZ) และในการตกผลึกใหม่ของเกรนมีขนาดเล็กจะทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นของขอบเกรน (Grain Boundaries) เกรนย่อย (Sub grain) และ Dislocation ในส่วนบริเวณระหว่างรอยต่อพื้นที่กวนในด้าน RS และด้าน AS โดยพื้นที่ผิวส่วนบนของแนวเชื่อมด้าน AS จะมีรูปร่างที่มีลักษณะปลายแหลมและภายใต้เงื่อนไขการเชื่อมบางเงื่อนไขจะทำให้เกิดลักษณะของโครงสร้างภายในพื้นที่กวนของแนวเชื่อมเป็น โครงสร้างแบบวงแหวน (Onion Ring) และแบบแถบคลื่น (Banded Structure) ดังรูปที่ 2.19

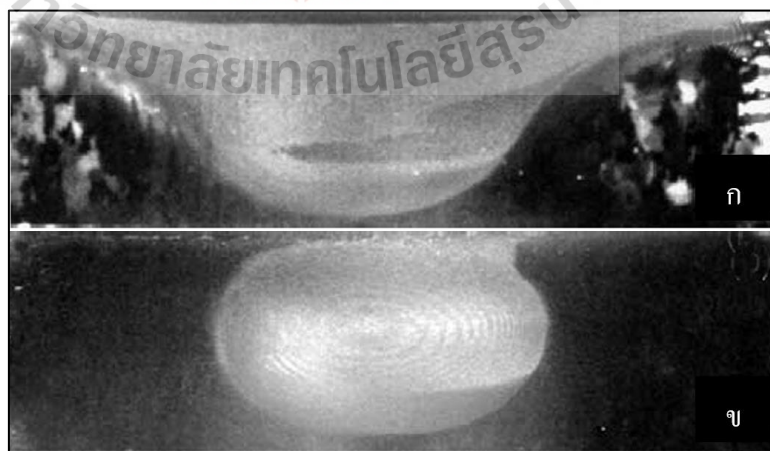


รูปที่ 2.19 ลักษณะ โครงสร้างภายในพื้นที่กวน (ก) แบบวงแหวน (ข) แบบแถบ

(Ilangovan, et al., 2015; Giraud, et al., 2016)

ซึ่งเกิดจากอิทธิพลด้านการหมุนเครื่องมือกวนเมื่อมีความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความร้อนและรูปแบบการไหลตัวของเนื้อวัสดุมากขึ้นจากด้าน RS ไปสู่ด้าน AS ได้ดีมากขึ้นตามไปด้วย (Kah, Rajan, Martikainen, และ Suoranta, 2015) ดังรายงานวิจัยการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 5083 และเกรด 6061 เมื่อความเร็วรอบเครื่องมือกวนและความเร็วเดินเชื่อมสัมพันธ์กันความร้อนเกิดขึ้นสูงสุดในระหว่างการเชื่อมทำให้เกิดการไหลของเนื้อวัสดุรอบ ๆ หัวกวนจากด้าน RS ไปด้าน AS เมื่อความเร็วรอบการหมุนลดลงจะมีส่งผลต่อความร้อนจากการเสียดทานที่เกิดขึ้นลดลงด้วย ทำให้ปริมาตรของเนื้อวัสดุที่ไหลตัวลดลงไม่เกิดโครงสร้างแบบวงแหวนอีกทั้งยังทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นภายในพื้นที่กวน (Peel M. , Steuwer, Preuss, & Withers,

2003; Ke, Xing, & Indacochea, 2004) โดยทั่วไปแล้วลักษณะรูปร่างของพื้นที่กวนขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์กระบวนการ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ รูปทรงเครื่องมือกวน อุณหภูมิของชิ้นงาน เป็นปัจจัยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพื้นที่กวน และเกิด 2 แบบ ได้แก่ รูปร่างอ่าง (Basin-Shape Nugget) ซึ่งจะกว้างใกล้บริเวณพื้นผิวหน้าและแบนรูปร่างวงรี จะอยู่บริเวณกลางแนวเชื่อม (Elliptical Nugget) ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งรูปทรงของเครื่องมือกวนและการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์กระบวนการเป็นสิ่งหลักที่ส่งผลต่อการเกิดรูปร่างของพื้นที่กวน โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนกวนมีผลต่อการเกิดรูปร่างพื้นที่กวน รวมถึงอิทธิพลของการไหลตัวของเนื้อวัสดุทำให้โครงสร้างในพื้นที่กวนเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเสียรูปแบบพลาสติก ซึ่งการหมุนของเครื่องมือกวนเนื้อวัสดุเกิดการไหลตัวจากด้านหน้าไปรอบหัวกวนทำให้เกิดการผสมของเนื้อวัสดุด้าน RS และ AS ซึ่งสามารถเกิดรูปร่างของพื้นที่กวนได้ทั้ง 2 แบบ (Mishra, Sarathi De , และ Kumar, 2014; Mishra และ Ma, 2005) ดังรายงานของ Z.Y. Ma และคณะ ได้เชื่อมต่ออะลูมิเนียมหล่อเกรด 356 โดยใช้ความเร็วรอบเครื่องมือกวนแตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบต่ำกว่า 500 รอบต่อนาที เกิดโครงสร้างแบบเนื้อรวมเป็นกลุ่มเกิดรูปร่างพื้นที่กวนแบบอ่าง เมื่อปรับความเร็วรอบให้สูงขึ้นมากกว่า 700 รอบต่อนาที เกิดโครงสร้างแบบวงแหวน พื้นที่กวนมีรูปร่างแบบวงรี (Ma, Sharma, & Mishra, 2006) และ Y. Huang และคณะ ในการเชื่อมต่อวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6082-T6 ด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้ความเร็วรอบเครื่องมือกวน 800-1200 รอบต่อนาที ซึ่งการไหลของเนื้อวัสดุเกิดจากปากกวนผลักดันเนื้อวัสดุไหลตัวจากด้าน RS ไปยังด้าน AS และการหมุนของหัวกวนเป็นตัวพาเนื้อวัสดุให้ไหลตัวออกจากด้าน RS ไปปะทะกับเนื้อวัสดุที่ด้าน AS ทำให้โครงสร้างภายในเกิดเป็นชั้นวงแหวน มีรูปร่างพื้นที่กวน

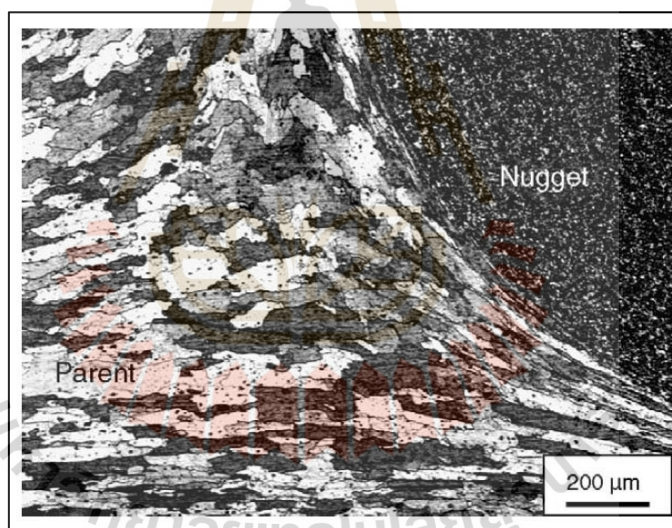


รูปที่ 2.20 รูปร่างพื้นที่กวน (ก) แบบอ่าง (ข) แบบวงรี (Mishra & Ma, 2005)

แบบวงรี ซึ่งเป็นรูปแบบการไหลของเนื้อวัสดุจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยรูปแบบการไหลนี้เป็นผลมาจากอิทธิพลของมุมเอียงเครื่องมือกวน พารามิเตอร์การเชื่อม และรูปทรงเครื่องมือกวน (Huang, และคณะ, 2016) และในการเชื่อมต่ออะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061-T651 ที่ความเร็วรอบเครื่องมือกวนช่วง 900-1400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 200-600 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดความโตปากกวน 16-24 มิลลิเมตร ซึ่งความเร็วเดินเชื่อมและขนาดความโตปากกวนที่แตกต่างกันนั้นส่งผลให้เกิดรูปแบบโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป รวมถึงความแตกต่างในการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของการเกิดรูปแบบโครงสร้างนั้น ๆ ด้วย อย่างไรก็ตาม การปรับลดความเร็วเดินเชื่อมลงจะปรากฏรูปแบบโครงสร้างแบบวงแหวนอย่างชัดเจนและมีโครงสร้างเกรนเล็กละเอียดและเกิดเกรนอิกวิแอคซ์ (Equiaxed Grain, เกรนที่ขนาดเท่ากันในทุกทิศทาง) เนื่องจากการตกผลึกใหม่จากการเสียดทานพลาสติกในพื้นที่กวน (Liu และ Ma, 2008) ในการเชื่อมอะลูมิเนียมต่างชนิดนั้น อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงและเสียดทานพลาสติกทำให้โครงสร้างเกรนมีขนาดเล็กละเอียดและเกรนอิกวิแอคซ์และมีขนาดเล็กกว่า 3 μm ในพื้นที่กวนจากการตกผลึกใหม่ของเกรนรวมถึงการเพิ่มสัดส่วนของขอบเกรนมุมต่ำในพื้นที่กวนให้มากขึ้นเมื่อใช้พารามิเตอร์การเชื่อมที่สัมพันธ์กันอย่างเหมาะสม แต่การเกิดเกรนอิกวิแอคซ์จะเกิดมากกับวัสดุที่ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า (Cavaliere, Nobile, Panella, และ Squillace, 2006; Peel, Steuwer, และ Withers, 2006) โดยลักษณะการไหลตัวเข้าไปผสมกันของวัสดุในพื้นที่กวนนั้นเนื้อวัสดุที่อยู่ด้าน AS การไหลตัวอยู่บริเวณด้านบนพื้นผิวหน้าของแนวเชื่อมและเนื้อวัสดุด้าน RS จะไหลตัวอยู่ด้านล่างของแนวเชื่อมทำให้เกิดเป็นลักษณะโครงสร้างแบบชั้นในพื้นที่กวน (Ghaffarpour, Kolahgar, Mollaei Dariani, และ Dehghani, 2013; Shigematsu, Kwon, Suzuki, Imai, และ Saito, 2003; Ilangovan, Rajendra Boopathy, และ Balasubramanian, 2015) นอกจากจะเกิดโครงสร้างแบบวงแหวนและแบบแถบแล้วยังสามารถเกิดโครงสร้างเป็นแบบชั้น (Lamella Structure) ดังรายงานของ R. Palanivel และคณะ ในการเชื่อมต่ออะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด 5083-H111 กับเกรด 6351-T6 การกวน ทำให้การไหลของเนื้อวัสดุที่เสียดทานพลาสติกมีรูปแบบการไหลเข้ามาผสมกันเป็นชั้น ๆ ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ในพื้นที่กวน เนื่องจากอิทธิพลของรูปทรงเครื่องมือกวนรวมถึงความเร็วรอบเครื่องมือกวนที่ทำให้การผสมเนื้อวัสดุทั้ง 2 ด้าน ไม่ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบเครื่องมือกวนเป็น 600 รอบต่อนาที ทำให้การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีมากขึ้นลดการเกิดโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ได้ (Palanivel, Koshy Mathews, Murugan, และ Dinaharan, 2012) และการเกิดโครงสร้างเป็นชั้น ๆ นั้นเกิดจากอิทธิพลมาจากเกลียวของเครื่องมือกวนทำให้เกิดการยึดตัวและไหลออกเป็นทางของเนื้อวัสดุที่ไหลตัวเข้าไปผสมกันไปตามทิศทางในการเชื่อม (Rodriguez, Jordon, Allison, Rushing, & Garcia, 2015)

2.4.4.2 พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล

พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone, TMAZ) เป็นพื้นที่รับผลกระทบจากการหมุนของหัวกลึงจากพื้นที่กลึง ซึ่งผลของความร้อนและแรงจากการหมุนของหัวกลึงทำให้เกิดการเสีรูปร่างและไหลตัวของเนื้อวัสดุเข้าไปผสมกันในพื้นที่กลึงนั้น ทำให้เกิดพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนและแรงทางกลจากการหมุนจะอยู่ระหว่างพื้นที่กลึงกับพื้นที่โลหะพื้น เรียกว่า “พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล” ซึ่งเกิดขึ้นทั้งในฝั่ง RS และ AS จากผลของอุณหภูมิและการเสีรูปร่างของเนื้อโลหะพื้น โครงสร้างเกรนพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกลเมื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้างเกรนในพื้นที่กลึงแล้วนั้น มีลักษณะโครงสร้างเกรนของทั้ง 2 พื้นที่ แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดซึ่งทำให้เกิดขอบเขตของพื้นที่ทั้ง 2 อย่างชัดเจน ระหว่างพื้นที่กลึงที่เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรนกับพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกลที่เกิดการเสีรูปร่าง ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ลักษณะโครงสร้างเกรนในพื้นที่กลึงกับพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล อะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 7075 (Mishra & Ma, 2005)

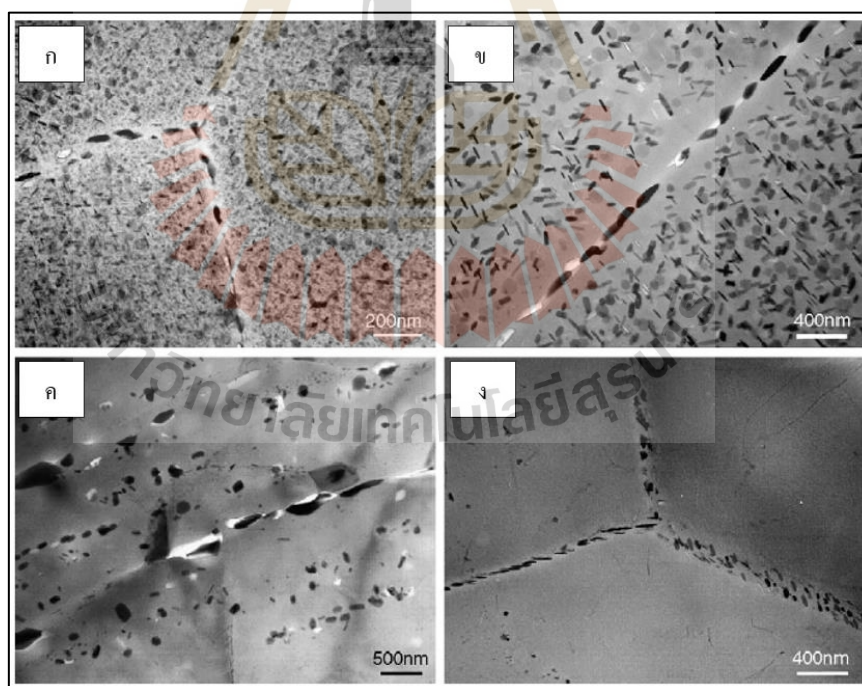
โดยพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกลเกรนเกิดการเสีรูปร่างมากและมีขนาดที่ใหญ่ ยึดยาวบิดเบี้ยวมีทิศทางไปตามรูปแบบการไหลตัวของเนื้อวัสดุจากการกลึงถึงแม้ว่าพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกลจะเกิดการเสีรูปร่างแบบพลาสติก แต่ไม่เกิดการตกผลึกใหม่เนื่องจากความเครียดจากการเสีรูปร่างไม่เพียงพอ รวมถึงความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอ (Liu และ Ma,

2008) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ A. Hakan และคณะ และ H.L Amir และ N. Salman พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล เกิดความร้อนมากแต่ต่ำกว่าพื้นที่กวน อีกทั้งเกิดความเค้นสูงและความเครียดมากผสมรวมกัน จึงทำให้เกิดการเสียรูปของโครงสร้างเกรน (Hakan, Mumin, Ali, & Tayfun, 2012; Amir & Salman, 2014) รวมถึงมีอัตราการฟื้นตัวแบบพลวัตมากจึงไม่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน ในพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล เกิด Dislocation จากการเสียรูปทำให้เกิดมุมของขอบเกรนต่ำและมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นในช่วงอัตราการฟื้นตัวแบบพลวัตมากของเกรน (Devinder และ Ranjit, 2012) ถึงแม้ว่าความร้อนที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอสำหรับการตกผลึกใหม่ในพื้นที่นี้ แต่สำหรับอะลูมิเนียมอัลลอยที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนได้สามารถทำให้เกิดการรวมตัวสารละลายตกตะกอนทำให้มีขนาดใหญ่และหายากขึ้น แต่อัตราการเย็นตัวสูงช่วยเร่งให้การตกตะกอนใหม่ที่เล็กลงเกิดขึ้นบางส่วนซึ่งสารละลายตกตะกอนเหล่านี้เป็นเฟสเพิ่มความแข็งแรงในพื้นที่นี้ (Amir และ Salman, 2014) อย่างไรก็ตาม ขอบเขตของการละลายของสารละลายนั้นขึ้นกับวงจรความร้อนที่เกิดระหว่างการเชื่อม โดยเกรนในพื้นที่นี้มีความหนาแน่นสูงของขอบเกรน (Mishra, Sarathi De, และ Kumar, 2014) จากรายงานการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด 2024-T6 กับ เกรด 5083-H321 ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมนำไปสู่การไหลตัวของเนื้อวัสดุในพื้นที่กวนและพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล อีกทั้งทำให้เกิดการตกตะกอนของสารละลายในพื้นที่กวน พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนโดยเฉพาะในฝั่งอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 2024-T6 (Shanmuga Sundaram & Murugan, 2010)

2.4.4.3 พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน

พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone) เป็นพื้นที่อยู่ถัดไปจากพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล ซึ่งได้รับผลกระทบจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมกวนทำให้ขนาดเกรนเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่ทำให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกลักษณะโครงสร้างเกรนจะยังเหมือนกับโลหะพื้น โดยส่วนมากพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนนี้ขนาดเกรนจะใหญ่กว่าพื้นที่อื่น ๆ เนื่องมาจากความร้อนในกระบวนการเชื่อมส่งผลกระทบมาและมีปริมาณความร้อนที่เพียงพอสำหรับการเติบโตของเกรน จึงทำให้เกรนในพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนเกิดการเติบโต อีกทั้งยังมีอัตราการเย็นตัวที่ช้าจึงทำให้เกรนมีขนาดใหญ่และหายากมากขึ้น จึงส่งผลให้พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนมีความแข็งแรงน้อยกว่าพื้นที่อื่น ๆ ในแนวเชื่อม (Lakshminarayanan, Ma Larvizhi, และ Balasubramnian, 2011; Xu, Liu, Chen, Luan, และ Yao, 2012) จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา โครงสร้างจุลภาคในพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนรับผลกระทบจากความร้อนแต่ไม่เกิดการเสียรูปซึ่งยังมีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับโลหะพื้นแต่ขนาดเกรนมีการ

เดิบโตใหญ่ขึ้นกว่าโลหะพื้น (Hakan, Mumin, Ali, Ali, และ Tayfun, 2012) สำหรับอะลูมิเนียมอัลลอยที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนได้จะเกิดพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 250 °C แต่ยังมีโครงสร้างเกรนที่เหมือนกับโลหะพื้น รวมถึงมีผลกระทบค่อนข้างน้อยต่อขนาดเกรนในพื้นที่นี้ อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่สูงเกิน 250 °C มีผลกระทบทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้นภายในโครงสร้างและมีตะกอนหยาบขนาดใหญ่ขึ้นในพื้นที่นี้ (Mishra & Ma, 2005; Ren, Ma, & Chen, 2007) สอดคล้องกับรายงาน J.F. Guo และคณะ ในการเชื่อมต่ออะลูมิเนียมอัลลอยต่างชนิดเกรด 6061 กับเกรด 7075 ความร้อนในกระบวนการเชื่อมที่ระยะห่างจากศูนย์กลางแนวเชื่อม 8 มิลลิเมตร เกิดความร้อนขึ้นสูงถึง 365 °C ส่งผลให้จำนวนของสารละลายตกตะกอนขนาดเล็กลดลงเกิดการเดิบโตของสารละลายตกตะกอนทำให้มีขนาดใหญ่และหยาบมากขึ้นในพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (Guo, Chen, Sun, Bi, Sun, และ Wei, 2014) จึงทำให้พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนเป็นพื้นที่อ่อนแอกว่าพื้นที่อื่น ๆ อันเนื่องมาจากผลกระทบของความร้อนที่ทำให้กลไกความแข็งแรงในการตกตะกอนของสารละลายลดลง โดยการตกตะกอนในเกรนในบริเวณพื้นที่ต่างกันก็จะขนาดและลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การเกิดการตกตะกอนในบริเวณพื้นที่เชื่อม (ก) วัสดุพื้น (ข) HAZ (ค) บริเวณ HAZ ใกล้กับ TMAZ (ง) บริเวณ TMAZ ใกล้กับ SZ (Mishra & Ma, 2005)

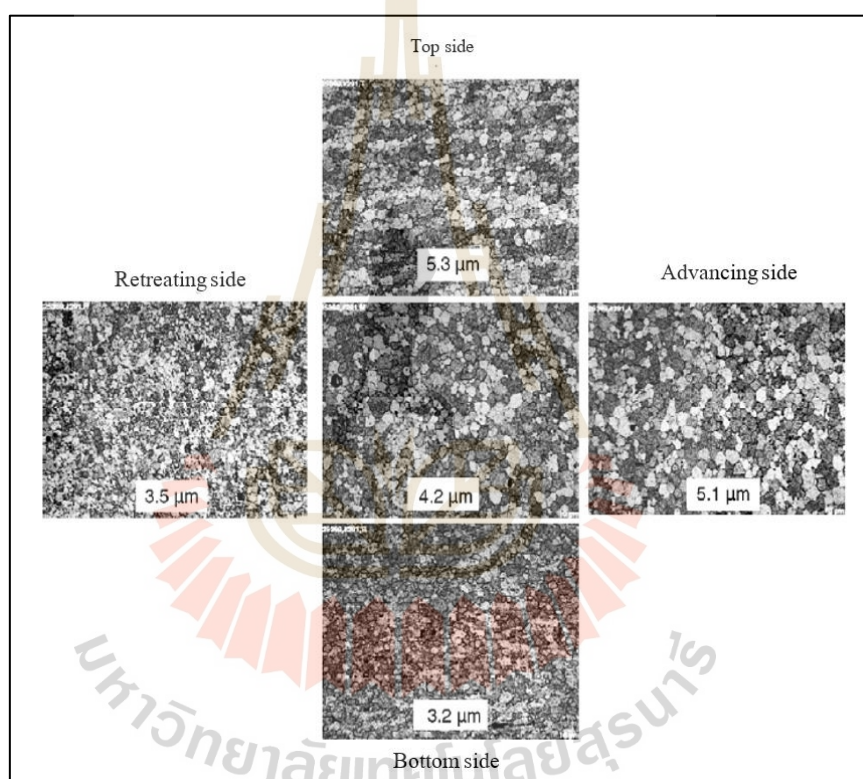
2.4.4.4 การตกผลึกใหม่

การตกผลึกใหม่ (Recrystallization) นั้นวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยมีกระบวนการตกผลึกใหม่แบบพลวัต ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแบบการตกผลึกใหม่แบบพลวัตไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Dynamic Recrystallization, DDRX) และแบบการตกผลึกใหม่แบบพลวัตอย่างต่อเนื่อง (Continuous Dynamic Recrystallization, CDRX) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วอะลูมิเนียมอัลลอยจะไม่เกิดการตกผลึกใหม่แบบพลวัตไม่ต่อเนื่องเพราะว่ามีอัตราการฟื้นตัวที่สูง เนื่องจากอะลูมิเนียมมีพลังงานที่เกิดการบิดเบี้ยวสะสมสูงจึงทำให้การฟื้นตัวได้รวดเร็ว โดยพฤติกรรมของการตกผลึกใหม่แบบพลวัตไม่ต่อเนื่อง เกรนที่เกิดใหม่ของนิวเคลียสนี้ทำให้เกิดขอบเกรนมุมสูงและขอบเกรนที่หยาบ ในส่วนการตกผลึกใหม่แบบพลวัตอย่างต่อเนื่องเกิดขึ้นมากกับอะลูมิเนียมอัลลอยและเหล็กกล้าไรสนิมที่มีโครงสร้าง 2 เฟส โดยทั่วไปกลไกการตกผลึกใหม่แบบพลวัตอย่างต่อเนื่องเกิดกรนย่อยลักษณะกลมและเกิดขอบเกรนมุมสูงจำนวนเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนี้กลไกการตกผลึกใหม่แบบพลวัตอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นบนพื้นฐานของการฟื้นตัวแบบพลวัต ทำให้เกิดขอบเกรนมุมต่ำเข้าไปแทนที่ขอบเกรนมุมสูงของเกรนเดิม หลังจากการเกิดกลไกนี้ ซึ่งกลไกการตกผลึกใหม่ในพื้นที่กวนจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมอัลลอยมีผลทำให้เกิดกรนย่อยขนาดเล็กและมีความแข็งแรงกว่าโลหะพื้น (Mishra และ Ma, 2005) จากรายงานของ K.V. Jata และ S.L. Semiatin การตกผลึกใหม่แบบพลวัตต่อเนื่องในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมความแข็งแรงสูง ทำให้เกิดการหมุนตัวของกรนย่อย การหมุนของแล็กทิกที่เกิดจากการเลื่อนจากตำแหน่งเดิมและเลื่อนไหลของขอบแล็กทิกจากการกวน รวมถึงการเติบโตของกรนย่อยเป็น ซึ่งกลไกการตกผลึกแบบพลวัตต่อเนื่องที่เกิดขึ้นก่อนและเข้าสู่กระบวนการตกผลึกใหม่แบบพลวัตที่ทำให้เกิดกรนย่อยที่มีขนาดเล็กละเอียด และการตกผลึกใหม่ของกรนอีควิแอกซ์ในแนวเชื่อมเป็นผลให้เกิดขอบเกรนมุมต่ำในช่วง 15-30° อย่างไรก็ตาม อัตราความเครียดและอุณหภูมิที่เกิดในการเชื่อมเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดกลไกการตกผลึกใหม่และขนาดของเกรนด้วย (Jata & Semiatin, 2000)

2.4.4.5 ขนาดเกรน

ขนาดเกรน (Grain Size) จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นอุณหภูมิจากการเสียดทานเกิดขึ้นสูงควบคู่ไปพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกเป็นบริเวณกว้างเป็นผลทำให้เกิดกรนขนาดเล็กละเอียดอันเนื่องมาจากการตกผลึกใหม่แบบพลวัต โดยขนาดเกรนของอะลูมิเนียมอัลลอยจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนี้จะมีขนาดเฉลี่ยในช่วง 1-20 μm (Jata & Semiatin, 2000; Mishra & Ma, 2005; Kasman & Yenier, 2014; Olea, Roldo, Strohaecker, & dos Santos, 2006) จากรายงานการศึกษาขนาดของเกรนเชิงตัวเลขในการเชื่อม

เสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061-T6 พบว่า ขนาดบ่ากวนมีผลต่อขนาดของเกรนในแนวเชื่อมเมื่อลดขนาดบ่ากวนให้เล็กลงเหลือ 16 มิลลิเมตร จะทำให้มีขนาดเกรนเฉลี่ยลดลงที่บริเวณพื้นผิวด้านบนอยู่ในช่วง 2.51-3.18 μm และพื้นผิวด้านล่างแนวเชื่อมอยู่ในช่วง 2.63-3.18 μm เนื่องจากมีปริมาณความร้อนในพื้นที่กวนลดลงและอัตราความเครียดที่เกิดขึ้นสูงทำให้เกรนมีการเติบโตได้น้อยทำให้ขนาดเกรนในพื้นที่กวนมีขนาดเล็กลง (Zhang & Wu, 2015) รวมถึงการปรับเปลี่ยนความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นมีผลให้ขนาดเกรนในพื้นที่การเชื่อมมีขนาดเล็กลงเช่นกัน



รูปที่ 2.23 ขนาดเกรนที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งในพื้นที่กวนของ AA 7075
(Mishra และ Ma, 2005)

ดังรายงานของ J. Y. Sheikh-Ahmad และคณะ ได้เชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยในกลุ่ม 5000 ด้วยความเร็วรอบเครื่องมือกวนคงที่และแปรเปลี่ยนความเร็วเดินเชื่อม ซึ่งที่ความเร็วเดินเชื่อมต่ำสุด 25 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดของเกรนมีขนาดเล็กถึง 25 μm เมื่อเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมให้สูงขึ้นเป็น 400 มิลลิเมตรต่อนาที ขนาดเกรนเล็กลงเฉลี่ย 12 μm การลดลงของขนาดเกรนเกิด

จากอิทธิพลของความร้อนและการเสียดรูปทำให้เกิดกลไกการตกผลึกใหม่แบบพลวัตต่อเนื่องและ ความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำกว่าความร้อนจากการใช้ความเร็วเดินเชื่อมต่ำและอัตราการเย็นตัวที่เร็วของ แนวเชื่อมจึงทำให้การเติบโตของเกรนเป็นไปอย่างช้าขนาดเกรนในพื้นที่กวนจึงมีขนาดเล็กลง (Sheikh-Ahmad, Ozturk, Jarrar, & Evis, 2016) และถ้าหากมีการเตรียมกรรมวิธีที่ทำให้ อัตรา การเย็นตัวอย่างรวดเร็วมาก ๆ จะสามารถทำให้ขนาดเกรนเล็กละเอียดลงได้เล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ เช่นกัน โดยตัวอย่างขนาดเกรนจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งพารามิเตอร์ด้านรูปทรง เครื่องมือกวน อัตราส่วนปังกวนต่อหัวกวน และอัตราส่วนความเร็วรอบเครื่องมือกวนต่อความเร็ว เดินเชื่อม องค์ประกอบของชิ้นงาน อุณหภูมิของชิ้นงาน แรงกดตามแนวแกน มีอิทธิพลต่อขนาด ของเกรนที่ตกผลึกใหม่ในแนวเชื่อม และขนาดเกรนภายในพื้นที่การเชื่อมมีแนวโน้มที่มีขนาดใหญ่ ในบริเวณด้านบนของพื้นที่การเชื่อมและจะลดลงตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแนวเชื่อม ทั้ง 2 ด้าน ซึ่งสอดคล้องกับการแปรผันของอุณหภูมิภายในพื้นที่การเชื่อม ซึ่งขนาดเกรนมี การกระจายตัวที่แตกต่างในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่กวน ดังรูปที่ 2.23 โดยความแตกต่างของขนาด เกรนจากด้านล่างสู่ด้านบนจากการเชื่อมกวนเกี่ยวเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น และการกระจายตัวของความร้อนในการเชื่อมเพราะว่าพื้นที่ด้านล่างของชิ้นงานสัมผัสกับแผ่นรอง จึงทำให้ถ่ายเทความร้อนได้ดีมีอุณหภูมิสูงสุดที่ต่ำและวงจรรความร้อนสั้นกว่าพื้นที่ด้านบนของ แนวเชื่อมจึงส่งผลให้ชะลอการเติบโตของเกรนพื้นที่ด้านล่างทำให้ขนาดเกรนตกผลึกใหม่มีขนาด ที่เล็กและขนาดเกรนโตขึ้นตามความหนาของชิ้นงานทำให้อุณหภูมิมีความแตกต่างกันระหว่าง พื้นที่ด้านบนกับพื้นที่ด้านล่างของแนวเชื่อมเป็นผลให้ขนาดเกรนมีความแตกต่างกัน (Mishra และ Ma, 2005)

2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

เซอร์โรนอล เอ.ฟิชเจอร์ (Sir Ronald A. Fisher) เป็นผู้คิดค้นการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการ ออกแบบการทดลอง และเป็นบุคคลแรกที่นำเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวกับการออกแบบ การทดลอง ในปี ค.ศ. 1993 การออกแบบการทดลองได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ใน อุตสาหกรรมเคมีและกระบวนการผลิตในสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตก กลุ่มอุตสาหกรรม เหล่านี้ได้รับประโยชน์อย่างมากในการใช้การออกแบบการทดลองสำหรับงานพัฒนาผลิตภัณฑ์ และกระบวนการผลิต นอกจากนี้ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำและอิเล็กทรอนิกส์ยัง ได้มี การนำเอาวิธีการทดลองนี้ไปใช้งาน และประสบความสำเร็จอย่างมากเช่นกัน หลายปีที่ผ่านมา ความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองในสหรัฐอเมริกามีมากขึ้น เพราะอุตสาหกรรมใน

อเมริกาจำนวนมากพบว่าคู่แข่งทางการค้าอยู่ในทวีปอื่น ๆ ซึ่งได้ใช้การออกแบบการทดลองมาเป็นเวลานานแล้ว และวิธีการออกแบบการทดลองนี้เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จทางการแข่งขันการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experimental) คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม ที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำได้สามารถสรุปข้อมูลที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเดียวที่นำมาในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งที่สำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้และหลักพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ

1. เรพลิเคชัน (Replication) หมายถึง การทดลองซ้ำ เรพลิเคชัน มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรก เรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาด กลายเป็นหน่วยของการชี้วัดขั้นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาว่าความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมวลผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมวลผลกระทบบนี้

2. แรนดอมไมเซชัน (Randomization) เป็นหลักพื้นฐานสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง และลำดับของการออกแบบการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระแรนดอมไมเซชันซึ่งจะทำให้สมมุติฐานนี้เป็นจริง การทดลองแรนดอมไมเซชันทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

แนวทางในการออกแบบการทดลอง การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องในการทดลองต้องมีความเข้าใจ

อย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลอย่างไร และจำวิเคราะห์ข้อมูลนั้นอย่างไร
ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา จะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบางครั้งจะต้องหาข้อมูลจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง การเข้าใจปัญหาอย่างชัดเจนเป็นผลอย่างมากต่อการหาคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น

2. การเลือกปัจจัยระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ดังนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการนั้นอย่างมาก ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรือจากทฤษฎี ความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดมีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อย การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกันในการทดลองเพื่อกรองปัจจัย เราควรกำหนดขอบเขตให้กว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตของปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้าง ๆ และเมื่อเราทราบว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ก็อาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

3. เลือกตัวแปรผลตอบแทน ในการเลือกตัวแปรผลตอบแทนนี้ผู้ทำการทดลองควรแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ หลายครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือทั้งคู่ของกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรผลตอบแทน ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบแทนหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่าจะอะไรคือตัวแปรผลตอบแทนและวัดค่าตัวแปรนั้นอย่างไร

4. เลือกการออกแบบการทดลอง เกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดตัวอย่าง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้การเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีการบล็อกหรือการใช้การแรนดอมไมเซชัน ในการเลือกทางวิศวกรรมศาสตร์ ส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มแล้วว่า ปัจจัยบางตัวมีผลต่อผลตอบแทนที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่างและประมาณขนาดของความแตกต่างที่จะเกิดขึ้น

5. การทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน หากมีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลอง ถือว่าการทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนการทดลองในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการทดลองเพื่อผลลัพธ์ และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบ มาเป็นอย่างดี และทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการของการทดลองทางสถิติคือ การทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจ มีเครื่องมือช่วยวัดประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการจะทำให้ข้อสรุปที่ได้ ออกแบบมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความ น่าเชื่อถือ

7. สรุปและข้อเสนอแนะเมื่อได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้อง หาข้อสรุปในการปฏิบัติ และนำเสนอแนะแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะนำเอา วิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องนำเสนอผลงานให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้ว การทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirming Testing) ควรทำขึ้นเพื่อที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้อง ของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.5.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) คือ การทดลองที่นิยม ใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผนการทดลอง เนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัย พร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือเรียกว่า “อันตรกิริยา” (Interaction) เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A, B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้ เป็น 3 ประเภท

1. ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดียว (Main Effects) คือ ผลกระทบ ที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบ ของปัจจัย C

2. ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factors or 2-Ways Interactions) คือ ผลกระทบ ที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยเป็นคู่พร้อมกัน (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB, BC และ AC

3. ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors or 3-Ways Interactions) คือ ผลกระทบ ที่เกิดจากการพิจารณาสามปัจจัยพร้อมกันในที่นี้ ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC โดยทั่วไปผู้ทดลองจะ ให้ความสำคัญแก่การศึกษาผลกระทบหลัก ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากผลกระทบ ร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงไม่นิยมนำมาพิจารณา

2.5.2 การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment)

การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปสำหรับการศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และ 3 ระดับ เป็นการทดลองที่ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบระหว่างปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ($k \geq 2$) โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ต้องการศึกษากผลกระทบรวม (Interaction) ผู้ทดลองจะใช้จำนวนของระดับปัจจัยที่ระดับนั้นขึ้นกับความสำคัญของปัจจัย ปัจจัยที่วิกฤต (Critical Factor) หรือปัจจัยที่ต้องการศึกษาละเอียดจะใช้จำนวนระดับที่มีค่ามากในการทดลองเดียวกัน ผู้ทดลองไม่จำเป็นต้องทำการศึกษาปัจจัยแต่ละปัจจัยที่จำนวนระดับเท่ากับค่าจำนวนระดับที่ระบุจะต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปกรณี 3 ปัจจัย มีตัวแบบสมการทางด้านสถิติเชิงเส้น (Lineal Statistical Model) คือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (2.4)$$

โดยที่	y_{ijkl}	คือ ค่าตอบสนอง (Response) ของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j ของการทดลองปัจจัย C ที่ระดับ k ที่ทำการทดลองซ้ำครั้งที่ l ให้ $i = 1, 2$ และ $l = 1, 2, \dots, n$
	μ	คือ ค่าเฉลี่ยผลรวม (Grand Mean)
	τ_i	คือ ผลกระทบของปัจจัย A ที่ระดับ i ; $i = 1, 2, \dots, a$
	β_j	คือ ผลกระทบของปัจจัย B ที่ระดับ j ; $j = 1, 2, \dots, b$
	γ_k	คือ ผลกระทบของปัจจัย C ที่ระดับ k ; $k = 1, 2, \dots, c$
	$\tau\beta_{ij}$	คือ อันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j
	$\tau\gamma_{ik}$	คือ อันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย C ที่ระดับ k
	$\beta\gamma_{jk}$	คือ อันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย B ที่ระดับ j และปัจจัย C ที่ระดับ k
	$\tau\beta\gamma_{ijk}$	คือ อันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วมของปัจจัย A ที่ระดับ i ปัจจัย B ที่ระดับ j และปัจจัย C ที่ระดับ k
	ε_{ijkl}	คือ ค่าผิดพลาดของการทดลองปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j และปัจจัย C ที่ระดับ k โดยทำการทดลองซ้ำ 1 รูปแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับหารออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลกรณี 3 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 วิเคราะห์ความแปรปรวนกรณี 3 ปัจจัย

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares (MS)	F-value
A	SS_A	$a-1$	MS_A	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b-1$	MS_B	$\frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$c-1$	MS_C	$\frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	MS_{AB}	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a-1)(c-1)$	MS_{AC}	$\frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	$(b-1)(c-1)$	MS_{BC}	$\frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	MS_{ABC}	$\frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	$abc(n-1)$	MS_E	-
Total	SS_T	$abcn-1$	MS_T	-

โดยที่

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2}{abcn} \quad (2.5)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i...}^2}{bcn} - \frac{y^2}{abcn} \quad (2.6)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{j...}^2}{abcn} - \frac{y_{...}^2}{abcn} \quad (2.7)$$

$$SS_C = \sum_{k=1}^c \frac{y_{k...}^2}{abcn} - \frac{y_{...}^2}{abcn} \quad (2.8)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij...}^2}{cn} - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B \quad (2.9)$$

$$SS_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{ik...}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C \quad (2.10)$$

$$SS_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{jk...}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C \quad (2.11)$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk...}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{BC} \quad (2.12)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{subtotal}(ABC)} \quad (2.13)$$

$$SS_{\text{subtotal}(ABC)} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abcn} \quad (2.14)$$

2.5.3 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล (Experimental Performing)

1. การตรวจสอบว่ามีการกระจายของแบบปกติหรือไม่โดยใช้ Normal Probability Paper หรือฮิสโตแกรมทดสอบ โดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือ และค่าความถี่สะสมว่าเป็นแบบเส้นตรงหรือไม่ ถ้าเป็นแบบเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภาพการกระจายทดสอบ โดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือและค่าลำดับการสุ่มว่าสามารถคาดการณ์ได้หรือไม่ ถ้าทุกจุดของข้อมูลไม่สามารถคาดการณ์ได้ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

3. การตรวจสอบความสม่ำเสมอของการแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภาพการกระจายทดสอบ โดยดูความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการปฏิบัติ (Treatment) และเศษเหลือ

ว่ากราฟมีความสูงสม่ำเสมอหรือไม่ ถ้ากราฟของแต่ละการปฏิบัติมีความสูงไม่แตกต่างกันแสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

2.5.4 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2)

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ และแสดงผลว่าข้อมูลได้รับการเก็บรวบรวมภายใต้สภาวะการควบคุมตามแบบการทดลองแล้ว จะทำการวิเคราะห์ค่า R^2 ทั้งหมดของข้อมูลในรูป SS_T ว่าเกิดความแปรปรวนจากทริตเมนต์เท่าใด หาได้จากสมการที่ 2.14

$$R^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้}}{\text{ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล}} \quad (2.14)$$

ซึ่งถ้าค่า R^2 ออกมาต่ำสามารถแก้ไขได้โดย

- 1) เพิ่มจำนวนการทำซ้ำโดยเพิ่มชิ้นงานในการทดสอบมากขึ้น
- 2) ตรวจสอบว่ามีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องหรือไม่ ถ้ามีการออกแบบการทดลองใหม่
- 3) ถ้าเพิ่มจำนวนทำซ้ำแล้วค่า R^2 ยังคงที่อยู่ควรจะมีการบล็อก เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.5.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการหาความแปรปรวนโดยรวมแล้วแยกความแปรปรวนเนื่องจาก ทริตเมนต์ และความแปรปรวนที่ไม่ได้รับการควบคุมซึ่ง หมายถึง รีพีท-ทะบิลิตี (Repeatability) แล้วพิจารณาเทอมความแปรปรวนเนื่องจากทริตเมนต์ว่ามีปริมาณมากหรือไม่ เมื่อเทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขการทดลองหรือ รีโพรดิวซิบิลิตี

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากปรีทศวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 นำมาสู่วิธีการดำเนินงาน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมเกรด 2024 หล่อแบบกึ่งของแข็ง รายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุ
- 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง
- 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึดและวัดแรงกด
- 3.4 การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง
- 3.5 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล
- 3.6 การดำเนินการทดลองและการวิเคราะห์เชิงพยากรณ์
- 3.7 การวัดแรงกดและความร้อน
- 3.8 การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพ
- 3.9 การทดสอบทางกล
- 3.10 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย คือ อลูมิเนียมหล่อ เกรด A2024 ลักษณะชิ้นงานทดสอบที่หล่ออัดในสถานะกึ่งของแข็งมีลักษณะเกรนแบบก้อนกลม (Globular Structure) โดยมีเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) อยู่บริเวณโคจรอบของขอบเกรน การเกิดโครงสร้างเกรนก้อนกลม (Globular Grain Structure) จากการขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งเริ่มจากการเกิดอนุภาคของของแข็งที่มีขนาดเล็กเกาะที่แท่งแกรไฟต์พอร์น เมื่อทำการเป่าแก๊สออกมาทางแท่งแกรไฟต์พอร์นส่งผลให้อนุภาคของของแข็งดังกล่าวหลุดออกจากแท่งแกรไฟต์พอร์นมาอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวทำให้พื้นผิวบางส่วนของอนุภาคของของแข็งดังกล่าวนั้นมีการละลาย ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของของแข็งมีความมนกลมขึ้นและมีรูปร่างของเกรนแบบ Equiaxed ทำให้เกรนเหล่านี้กลายเป็นเกรนที่มีลักษณะคล้ายก้อนกลม โดยที่ในขั้นตอนของการหลอมอะลูมิเนียมนั้น จะเกิดนิวเคลียสของเฟส Al- α ขึ้นในอะลูมิเนียมหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงทำให้เฟส Al- α โตขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิของ

อะลูมิเนียมหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) ของเหลวจะแข็งตัว และฟอร์มเป็นเฟสยูเทคติก ซึ่งจากการศึกษาอะลูมิเนียมหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็ง 2024 พบว่าเฟสยูเทคติกประกอบไปด้วย $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}/\text{Al}_2\text{CuMg}$ ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสามารถแสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 ตามลำดับ

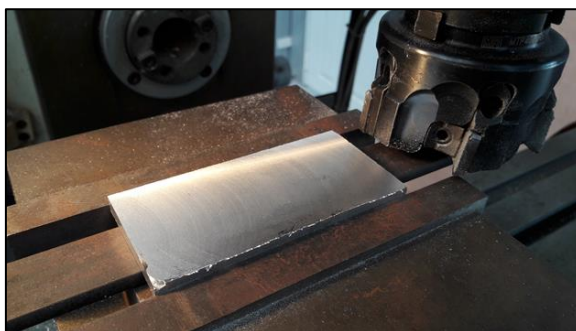
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

ส่วนผสม	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
ปริมาณ	5.09	1.67	0.63	0.4	0.33	0.04	Bal.



รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมหล่อหมายเลข A2024

วัสดุชิ้นงานสำหรับการทดลองถูกขึ้นรูปโดยการตัดเฉือนให้มีขนาด $100 \times 50 \times 4$ มิลลิเมตร (ความกว้าง \times ความยาว \times ความสูง) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วัสดุชิ้นงานอะลูมิเนียม A2024 สำหรับการทดลอง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องกัด

เครื่องกัดแนวตั้งยี่ห้อ Haven รุ่น XLW6332HIV แสดงดังรูปที่ 3.3 เป็นเครื่องจักร กิ่งอัตโนมัติที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อนให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปหาเครื่องมือเชื่อม เพื่อให้เกิดการเชื่อมเสียดทานแบบหมุนกวนผ่านวัสดุในแนวแกน X การกำหนดขั้นตอนการทำงาน การเลือกใช้เครื่องมือเชื่อม การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ การควบคุมอัตราการป้อน และความเร็วนรอบ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง ข้อมูลจำเพาะของ เครื่องกัดมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 4,660 รอบต่อนาที และอัตราป้อนสูงสุด 555 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.3 เครื่องกัด HAVEN รุ่น XLW6332HIV

3.2.2 เครื่องมือเชื่อม

เครื่องมือเชื่อมทำมาจากวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 (SKD11 Modified) มีสมบัติเด่น คือ มีความเหนียวสูง และความแข็งสูงกว่าเหล็ก SKD 11 (D2) ทำให้มีความคงทน และทนทานต่อการสึกหรอได้ดีกว่า ขึ้นรูปด้วยวิธีตัดเฉือนทั่วไปได้ง่าย สามารถชุบแข็งได้ดี โดยกำหนดให้บ่าของหัวเชื่อมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และกำหนดหัวพินให้มีขนาด 5 มิลลิเมตร ลักษณะหัวกวนของเครื่องมือเชื่อมมีอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หัวเชื่อมกวน 3 รูปแบบ

3.2.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

เครื่องมือจับยึดชิ้นงาน (Fixture) และวัดแรงกดขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นอุปกรณ์ช่วยในการจับยึดชิ้นงานที่ติดตั้งโหลดเซลล์ (Load Cell) เข้ากับเครื่องกัดโลหะแบบ แกนตั้งกึ่งอัตโนมัติให้มีความมั่นคงในขณะที่ทำการเชื่อมเพื่อวัดแรงกด (Down Force) ในแนวตั้งมา ที่โหลดเซลล์ และบันทึกค่าตลอดการเชื่อม มีความสะดวกรวดเร็วในการถอดและจับยึดชิ้นงาน ช่วยให้การทำงานสะดวก รวดเร็ว และมีความเที่ยงตรงในการกำหนดตำแหน่งในแต่ละครั้งการออกแบบ อุปกรณ์จับยึดจะมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์จับยึดและวัดแรงกดในเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.2.4 กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera: IR)

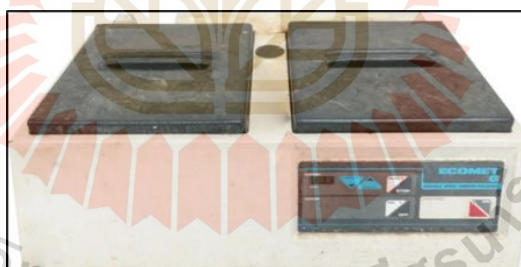
กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera, IR) ยี่ห้อ FLIR รุ่น E50 ความละเอียด 240×180 Pixels ความแม่นยำ $\pm 2^\circ\text{C}$ or $\pm 2\%$ of reading ฟังก์ชัน MSX® Thermal Image Enhancement Auto hot/cold spot ค่าขอบเขตการมองเห็น $25^\circ \times 19^\circ$ ช่วงการวัดอุณหภูมิ -20 ถึง $+650^\circ\text{C}$ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กล่องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50

3.2.5 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน

เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน ยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 6 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นเครื่องสำหรับการเตรียมผิวทางกล โดยการขัดระนาบมีขั้นตอนตั้งแต่การขัดหยาบและขัดละเอียดผิวชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการทดสอบค่าความแข็ง ทดสอบส่วนผสมทางเคมี และส่อง โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ



รูปที่ 3.7 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน

3.2.6 เครื่องมือวัดค่าความแข็งผิวงาน

เครื่องวัดความแข็งผิวชิ้นงาน เป็นเครื่องสำหรับวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ ดังรูปที่ 3.8 โดยการใช้น้ำหนักเพชรรูปปริรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็กลงไปที่ผิววัสดุด้วยน้ำหนักกดคงที่ 100 กรัม กดเป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ

3.2.7 เครื่องทดสอบแรงดึง

เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-X แสดงดังรูปที่ 3.9 สามารถรองรับแรงดึงสูงสุดได้ 50 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่มีคุณภาพสูง มีช่วงความละเอียดสูงถึง 1/1000 เท่าของโหลดเซลล์ รองรับความเร็วในการทดสอบ 0.0005 ถึง 1,000 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแม่นยำของแรง $\pm 1\%$ ของค่าที่แสดง



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.2.8 เครื่องมือวิเคราะห์และประมวลภาพถ่าย (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized ใช้เพื่อตรวจสอบรูปร่างรอยเชื่อม และศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่ส่วนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ได้แก่ บริเวณพื้นที่กวน บริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล พื้นที่ผลกระทบทางความร้อน และพื้นที่วัสดุพื้น



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JSM รุ่น 7100F เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค โดยอาศัยหลักการปล่อยคลื่นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงส่องกราดไปบนผิวหน้าของชิ้นทดสอบในขณะที่เดียวกันขนาดของลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) จะถูกควบคุมด้วยเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser Lens) และปรับโฟกัสด้วยเลนส์วัตถุ (Objective Lens) สัญญาณที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector) แล้วส่งไปประมวลผลเพื่อสร้างภาพในแนวระนาบและแนวลึกบนจอภาพต่อไป เครื่อง SEM JSM รุ่น 7100F มีกำลังขยายอยู่ในช่วง 8 ถึง 300,000 เท่า มีความละเอียดในระดับ 5 นาโนเมตร สามารถใช้ในการบ่งชี้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวและข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM JSM รุ่น 7100F

3.3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดแรงกดและความร้อนขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนขั้นตอนการเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ดังนี้

1) ประกอบชุดจับยึด (Fixture) ที่ติดตั้งโหลดเซลล์วัดแรงกดในแนวตั้งลงบนแท่นโต๊ะของเครื่องกัดแนวตั้ง และปรับระดับความขนานด้วยไดอัลเกจของระนาบแกน X หลังจากนั้นทำการจับยึดฐานของอุปกรณ์จับยึดและวัดแรงกดโดยการยึดด้วยสกรูขนาด M14 จำนวน 2 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การติดตั้งชุดจับยึด (Fixture) ที่ติดตั้งโหลดเซลล์วัดแรงกด

2) เชื่อมต่อสายสัญญาณจากโพลเซลล์เข้ากับชุดคอนโทรลบอร์ด MATLAB Simulink เพื่อบันทึกค่าแรงกดที่กระทำกับชิ้นงานทดสอบมายังโพลเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

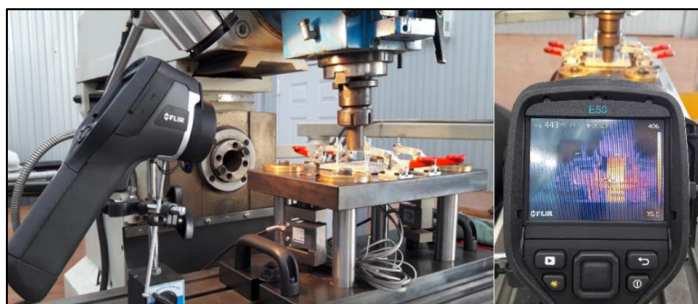


รูปที่ 3.13 การติดตั้งชุดคอนโทรลบอร์ด MATLAB Simulink เพื่อบันทึกค่าแรงกด

3) เชื่อมต่อสายสัญญาณของชุดคอนโทรลบอร์ด MATLAB Simulink เข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกค่าด้วยโปรแกรม MATLAB

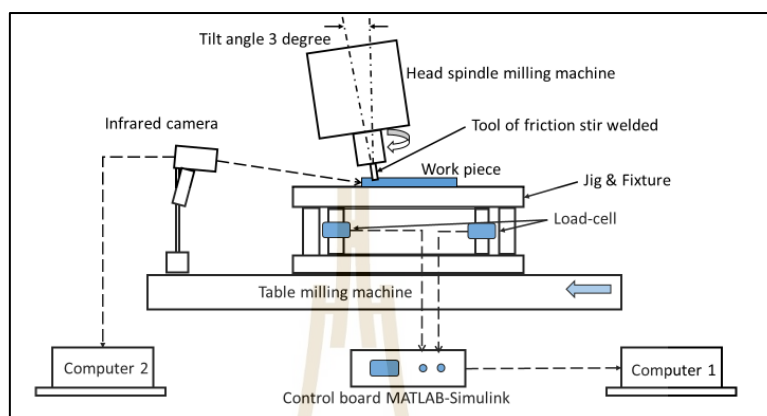
4) ติดตั้งโปรแกรม MATLAB ลงในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้แสดงผลของแรงกด

5) ประกอบชุดวัดความร้อน กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50 จะถูกติดตั้งไว้บนแท่นโต๊ะเครื่องกัด โดยมีระยะห่างจากชิ้นงานทดสอบบนอุปกรณ์จับยึด 40 มิลลิเมตร การตั้งค่าการทำงานของกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อนในการศึกษานี้จะต้องกำหนดการทำงานผ่านโปรแกรม FLIR Tool+ ซึ่งช่วงการวัดอุณหภูมิถูกกำหนดไว้ที่ 0 ถึง 650 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ในการบันทึกข้อมูล 30 ภาพต่อวินาที (fps) และการบันทึกภาพเป็นแบบ Live Stream ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน

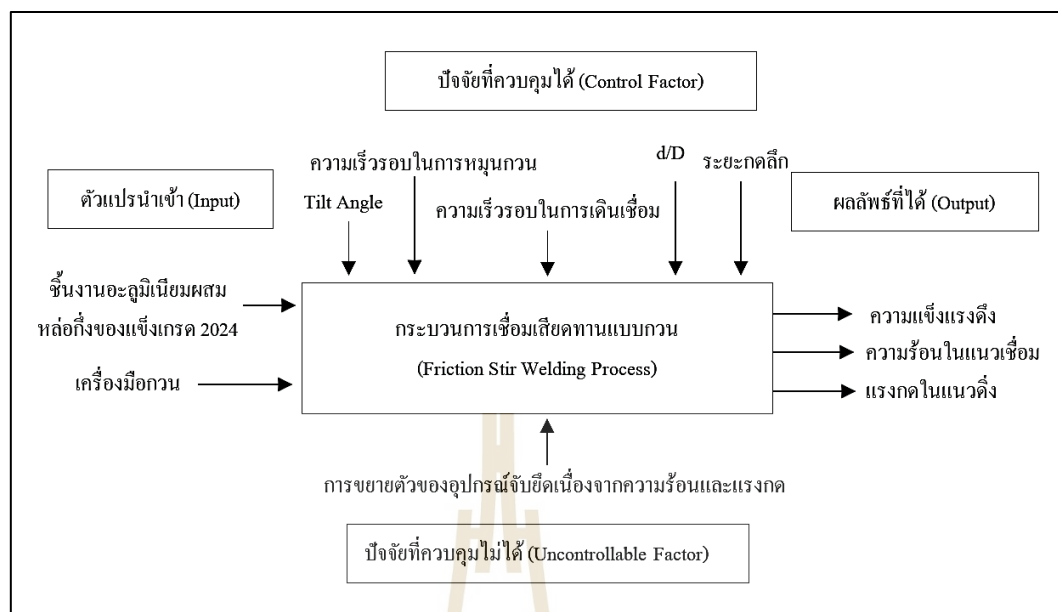
- 6) เชื่อมต่อสายสัญญาณของกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน FLIR E50 เข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกค่าด้วยโปรแกรม FLIR
- จากขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ที่กล่าวมาสามารถแสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

3.4 การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยสำหรับการทดลอง

การพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจากงานวิจัยหลาย ๆ งานวิจัยพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการกวดมีหลายปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม รูปทรงหัวกวน ชนิดของวัสดุ มุมเอียงของหัวกวน สัดส่วนของบ่ากวนต่อหัว และระยะความลึกที่สัมพันธ์กับแรงกด แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเวลา การปฏิบัติงาน และทรัพยากรที่มีในการวิจัย ผู้วิจัยได้คัดเลือกปัจจัยที่ควบคุมได้สำหรับงานวิจัย ดังรูปที่ 3.16 โดยกำหนดให้มี 3 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน (Rotation Speed) มี 2 ระดับ คือ 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม (Welding Speed) มี 2 ระดับ คือ 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และชนิดรูปทรงของหัวกวน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว ปัจจัยที่ควบคุมคงที่ คือ การเอียงองศาของตัวกวน 3 องศา (Tool Tilt Angle) ขนาดของตัวกวน (Pin Dimensions) และระยะกดลึกที่ 100% ของขนาดบ่าของตัวกวน (Shoulder) ที่ความลึกเท่ากับ 3.8 มิลลิเมตร โดยค่าระยะเพื่อแผ่นรองหลัง (Penetration) คือ ระยะที่ปลายหัวกวนห่างจากพื้นด้านล่างเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแจ๊จเกรด 2024 ผู้วิจัยได้อ้างอิงข้อแนะนำพารามิเตอร์ในการเชื่อมสำหรับการใช้เครื่องมือกวน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากกวน 20 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกวน 5 มิลลิเมตร สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม โดยที่ค่าระดับของแต่ละพารามิเตอร์สามารถคิดเป็นค่าเรโวลูชันพิทช์ (Revolution Pitch) 0.03-0.07 มิลลิเมตรต่อรอบ (H. J. Liu, H. Fuji, M. Maeda and K. Nogi Imam, 2003) และค่าดัชนีความร้อน (Heat Index, HI) 1.3-2.9 (M. Imam, V. Racherla and K. Biswas, 2014) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและระดับของแต่ละปัจจัยในการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

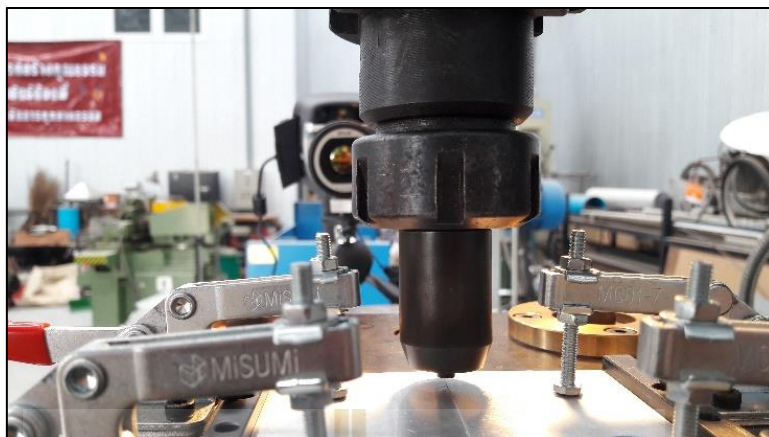
ปัจจัยในการทดลอง	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
ความเร็วรอบในการหมุนกวน	RPM	530	790	-
ความเร็วในการเดินเชื่อม	mm/min	22	36	-
รูปทรงของหัวกวน	None	Cone	Cylinder	Thread

3.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

เพื่อศึกษาปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึงตลอดจนการสร้างสรรค์ พยากรณ์ ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง โดยถูกออกแบบภายใต้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน (Full Factorial Design) ที่มีความเหมาะสมกับการออกแบบการทดลองในกรณีที่เลือกจำนวนระดับของปัจจัยต่างกัน โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการศึกษา 3 พารามิเตอร์ ซึ่งปัจจัยที่มี 2 ระดับ 2 ปัจจัย และปัจจัยที่มี 3 ระดับ 1 ปัจจัย ประกอบด้วยความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวน ผลการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของความแข็งแรงดึง โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$)

3.6 การดำเนินการทดลอง

ขณะเริ่มกระบวนการเชื่อมชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.17 การทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จะเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้งยี่ห้อ Haven รุ่น XLW6332HIV เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน การปรับมุมเอียงเครื่องมือของหัวกดเชื่อม ให้ตั้งมุมเครื่องมือเชื่อมเป็น 3 องศา กับชิ้นงานในแนวระนาบชิ้นงาน และทำการเชื่อมโดยกำหนดความเร็วในการหมุน 420 และ 1,320 รอบต่อนาที และกำหนดความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที โดยการเชื่อมในขั้นตอนแรกเริ่มจากการเปิดเครื่องกัดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนตามปัจจัยในการทดลองล้อยู่เหนือชิ้นงาน จากนั้นหมุนโต๊ะงานขึ้นให้เครื่องมือเชื่อมกดลงไปบนเนื้อวัสดุทดลองจนกระทั่งปลายของหัวพินถูกสอดไปในระยะความลึกจนสัมผัสกับบ่อกวนเป็นระยะเวลา 120 วินาที จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างเครื่องมือเชื่อมกับชิ้นงานจะทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวในสภาวะพลาสติก เมื่อครบเวลาที่กำหนดก็เคลื่อนที่โต๊ะงานของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติตามความเร็วเดินเชื่อมที่กำหนดตามปัจจัยในการทดลอง เมื่อสิ้นสุดแนวเชื่อมให้หยุดการเคลื่อนที่ของโต๊ะงานและให้หมุนหัวพินแช่อยู่บริเวณปลายแนวเชื่อมประมาณ 20 วินาที จากนั้นเลื่อนโต๊ะงานเครื่องกัดลงเพื่อให้หัวพินลอยขึ้นออกจากรอยเชื่อม และนำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

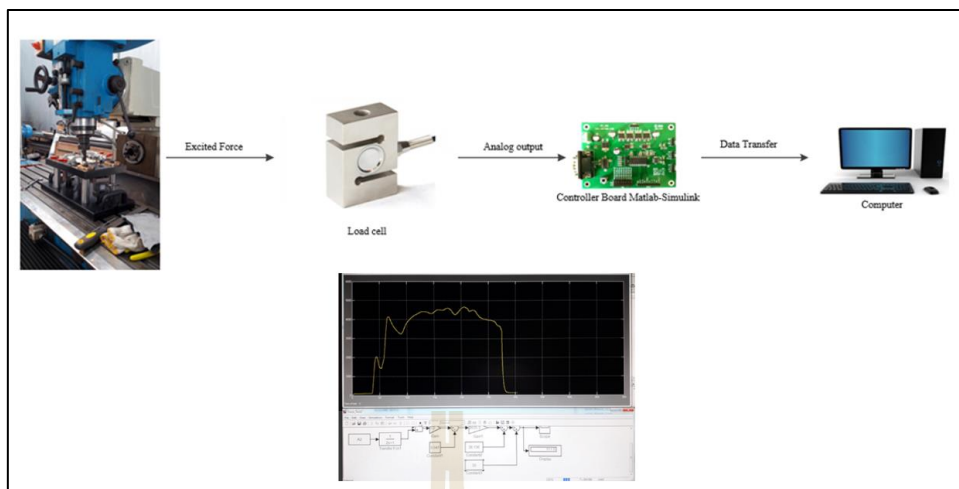


รูปที่ 3.17 ตำแหน่งเริ่มต้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

3.7 การวัดแรงกดและค่าทางความร้อน

3.7.1 ค่าแรงกดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

เมื่อหัวกวนเริ่มสัมผัสชิ้นงานที่อยู่บนอุปกรณ์จับยึดที่ติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อวัดแรงกด (Down Force) ในแนวตั้งมาที่โหลดเซลล์ และบันทึกค่าตลอดการเชื่อม การบันทึกแรงกดพบว่า แรงกดเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่หัวกวนลงในชิ้นงาน และลดลงเมื่อแห่หัวกวนทิ้งไว้ หลังจากกดจนได้ระยะกดลึกต่ำสุด และแรงกดเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเริ่มเดินเชื่อม จากรูปที่ 3.18 ทำให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้น โดยสัมพันธ์กับระยะกดลึกเสียดทาน (Plunge Depth) ทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวหรืออยู่ในสภาวะพลาสติก การเกิดการเสียดทานระหว่างพื้นผิวของบ่าเครื่องมือกวนกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ระยะกดลึกเสียดทานเพิ่มมากขึ้นมีผลต่อปริมาณความร้อนที่เกิดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเกิดครีบด้านข้างแนวเชื่อมมาก และมีผลกระทบให้ชิ้นงานบางลง ส่วนระยะกดลึกเสียดทานน้อยทำให้ปริมาณความร้อนเกิดขึ้นน้อยในการเชื่อม ความร้อนที่ไม่เพียงพอนี้อาจส่งผลให้เกิดรูตำหนิขึ้นภายในโครงสร้าง ในงานวิจัยนี้ควบคุมระยะเวลาการแห่หัวกวนทิ้งไว้ จนกระทั่งแรงกดเริ่มต้นคงที่ โดยใช้เวลาประมาณ 800 วินาที เพื่อเป็นการกระจายความร้อน และลดแรงกดก่อนเดินเชื่อม และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อชุดหัวแกนสปินเดิลของเครื่องจักร โดยแรงกดสูงสุดตลอดการเชื่อมอยู่ในช่วง 8,200-8,400 นิวตัน



รูปที่ 3.18 การวัดแรงกดด้วยโปรแกรม MATLAB

3.7.2 ค่าของความร้อนในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การวัดค่าความร้อนทำได้โดยการตั้งค่าการทำงานของกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อนในการศึกษานี้จะต้องกำหนดการทำงานผ่านโปรแกรม FLIR Tool ซึ่งช่วงการวัดอุณหภูมิถูกกำหนดไว้ที่ 0 ถึง 650 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ในการบันทึกข้อมูล 30 ภาพต่อวินาที (fps) และการบันทึกภาพเป็นแบบ Live Stream ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การวัดค่าความร้อนด้วยกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน

จากการทบทวนวรรณกรรม ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความเร็วเดินกวน (v) และความเร็วในการหมุนเครื่องมือ (ω) และช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการสำหรับอะลูมิเนียม คือ 0.6-0.9 เท่าของอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ อุณหภูมิหลอมละลายของอะลูมิเนียมเกรด 2024 (T_m) เท่ากับ 649 องศาเซลเซียส ช่วงอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุอะลูมิเนียม คือ 0.6- 0.9 เท่าของอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุ จะได้ขอบเขตอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เหมาะสมของวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 2024 อยู่ระหว่าง 413 ถึง 518 องศาเซลเซียส

จากสมการความสัมพันธ์ $T = T_m \times K (\omega^2/v \times 10^4)^{\alpha}$ K, α มีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของกระบวนการแปรผันตามอัตราส่วนของ ω^2/v ดังนั้นจึงใช้ค่านี้กำหนดขอบเขตของการเดินกวน ค่าคงที่ α มีค่าระหว่าง $0.04 < \alpha < 0.06$ และ K มีค่าระหว่าง $0.65 < K < 0.75$ จึงทำการแบ่งช่วงของค่าคงที่ทั้งสองออกเป็น 3 ระดับ เพื่อศึกษาความไวของค่าคงที่ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระบวนการ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K, \alpha, \omega^2/v$ ต่ออุณหภูมิกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K, \alpha, \omega^2/v$ ต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น

	K = 0.65	K = 0.7	K = 0.75	เงื่อนไข	ω (รอบ/นาที)	v (มม./นาที)	ω^2/v
$\alpha = 0.04$	440	472	508	ω_{max}, v_{min}	790	22	28368
	425	458	491	ω_{max}, v_{min}	530	22	12768
	431	464	498	ω_{max}, v_{min}	790	36	17336
	413	445	477	ω_{max}, v_{min}	530	36	7802
$\alpha = 0.05$	444	478	513	ω_{max}, v_{min}	790	22	28368
	434	467	500	ω_{max}, v_{min}	530	22	12768
	427	459	493	ω_{max}, v_{min}	790	36	17336
	416	448	480	ω_{max}, v_{min}	530	36	7802
$\alpha = 0.06$	449	484	518	ω_{max}, v_{min}	790	22	28368
	436	470	503	ω_{max}, v_{min}	530	22	12768
	428	461	494	ω_{max}, v_{min}	790	36	17336
	416	448	480	ω_{max}, v_{min}	530	36	7802

3.8 การตรวจสอบทางโครงสร้างทางกายภาพ

การตรวจสอบทางกายภาพของฝิวด้านบนของรอยเชื่อมใช้ร่วมกับการตรวจสอบด้วยสายตา การเตรียมชิ้นทดสอบมหภาค และตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ตรวจสอบทางกายภาพ เพื่อคุณลักษณะรอยเชื่อมและตรวจสอบ โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50-2,500 เท่า

การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพมีจุดประสงค์ดังนี้

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

3.8.1 การตรวจสอบฝิวด้านบนของรอยเชื่อมด้วยสายตา

การตรวจสอบฝิวด้านบนของรอยเชื่อมจากภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล กำลังขยาย 5-10 เท่า ในแต่ละปัจจัยและทุกระดับ เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและ ข้อบกพร่องของรอยเชื่อม เปรียบเทียบกับลักษณะและความแตกต่างของรอยเชื่อมในแต่ละปัจจัย ของแต่ละระดับ

3.8.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

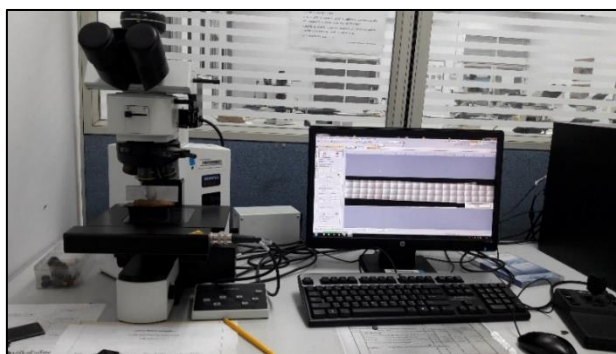
การเตรียมชิ้นงานทดสอบ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมภาคตัดขวางตั้งฉากกับแนวเชื่อม กล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง โดยการขัดชิ้นงานทดสอบด้วยกระดาษทราย เบอร์ 400, 600, 800, 1,000, 1,200 และ 2,400 จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาด และผงขัดอะลูมิน่าขนาด 5 ไมครอน และนำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ ตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง ในแต่ละปัจจัยและทุกระดับ เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ และข้อบกพร่องของ รอยเชื่อม เปรียบเทียบกับลักษณะและความแตกต่างของรอยเชื่อมในแต่ละปัจจัยของแต่ละระดับ ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง

3.8.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ชั้นทดสอบจะถูกตัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้แนวเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชั้นทดสอบ นำชั้นทดสอบมาขัดตามขั้นตอนการตรวจสอบ โครงสร้างชั้นทดสอบ ด้วยกระดาษทราย เบอร์ 400, 600, 800, 1,000, 1,200 และ 2,400 จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดและผงขัดอะลูมิน่าขนาด 5 ไมครอน และนำชิ้นงานไปล้างด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมบริเวณเนื้อโลหะเดิม เขตอิทธิพลของความร้อนด้าน Retreating Side กับ Advancing Side และบริเวณที่ถูกกวนของงานเชื่อม ตรวจสอบข้อบกพร่องของรอยเชื่อมแต่ละปัจจัยในแต่ละระดับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสงที่กำลังขยาย 50 ถึง 200 เท่า ดังรูปที่ 3.21

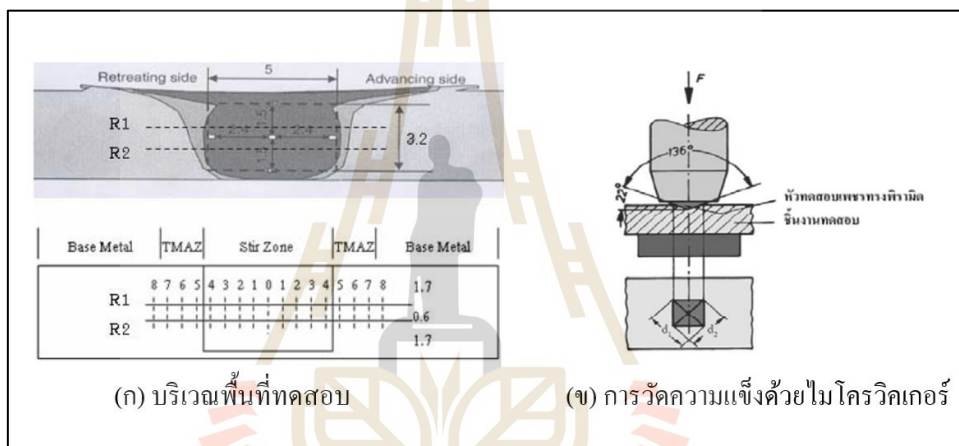


รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง

3.9 การทดสอบทางกล

3.9.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็ง

การวัดค่าความแข็งผิวชิ้นงานด้วยไมโครวิกเกอร์ภาคตัดขวางของรอยเชื่อม โดยใช้หัวกดเพชรรูปทรงปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ปลายหัวกดทำมุม 136 องศา กดลงที่ผิววัสดุบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ดังรูปที่ 3.22 ด้วยน้ำหนักคงที่ 100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที บันทึกค่าความแข็งวิกเกอร์ที่แสดงบนจอมอนิเตอร์ของเครื่องทำการวัด 1 ครั้งต่อระยะห่างของรอยกด 1 มิลลิเมตร นำข้อมูลที่ได้ในแต่ละการทดลองมาคำนวณค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อนำไปแสดงผลเปรียบเทียบกับกราฟ

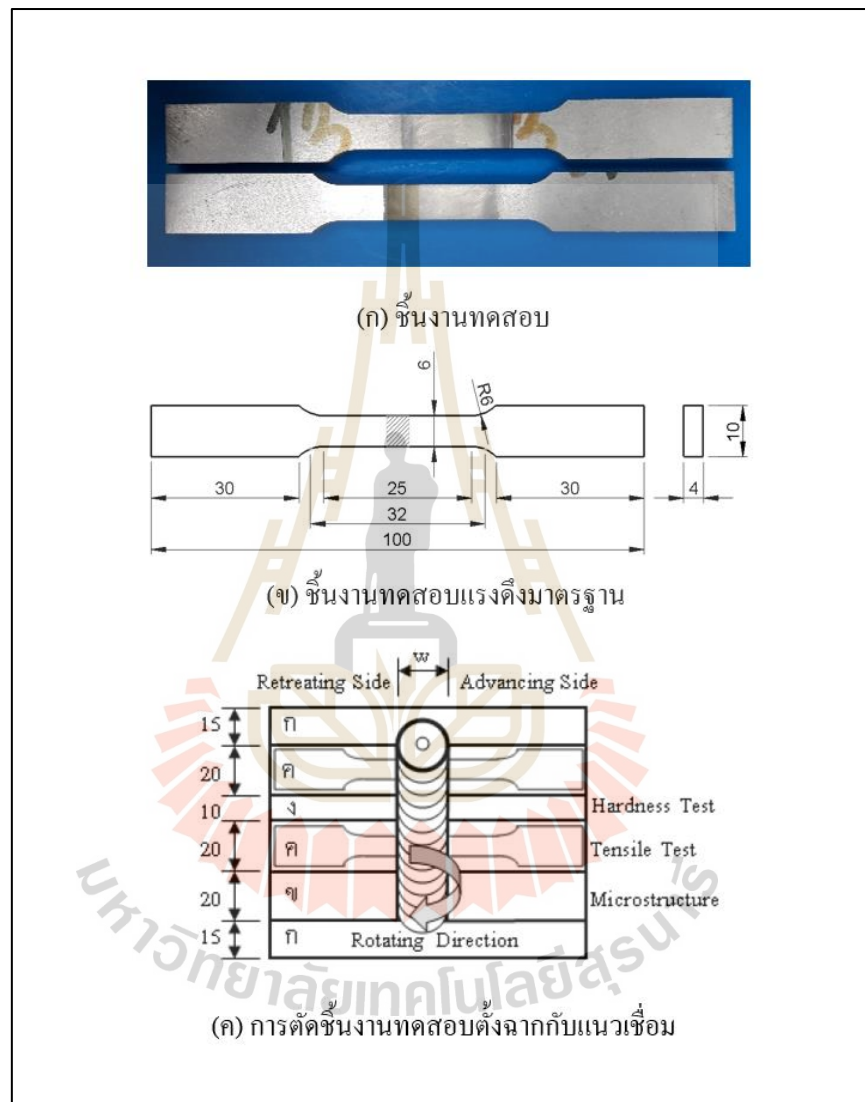


รูปที่ 3.22 บริเวณการกดวัดค่าความแข็งด้วยไมโครวิกเกอร์

3.9.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึง

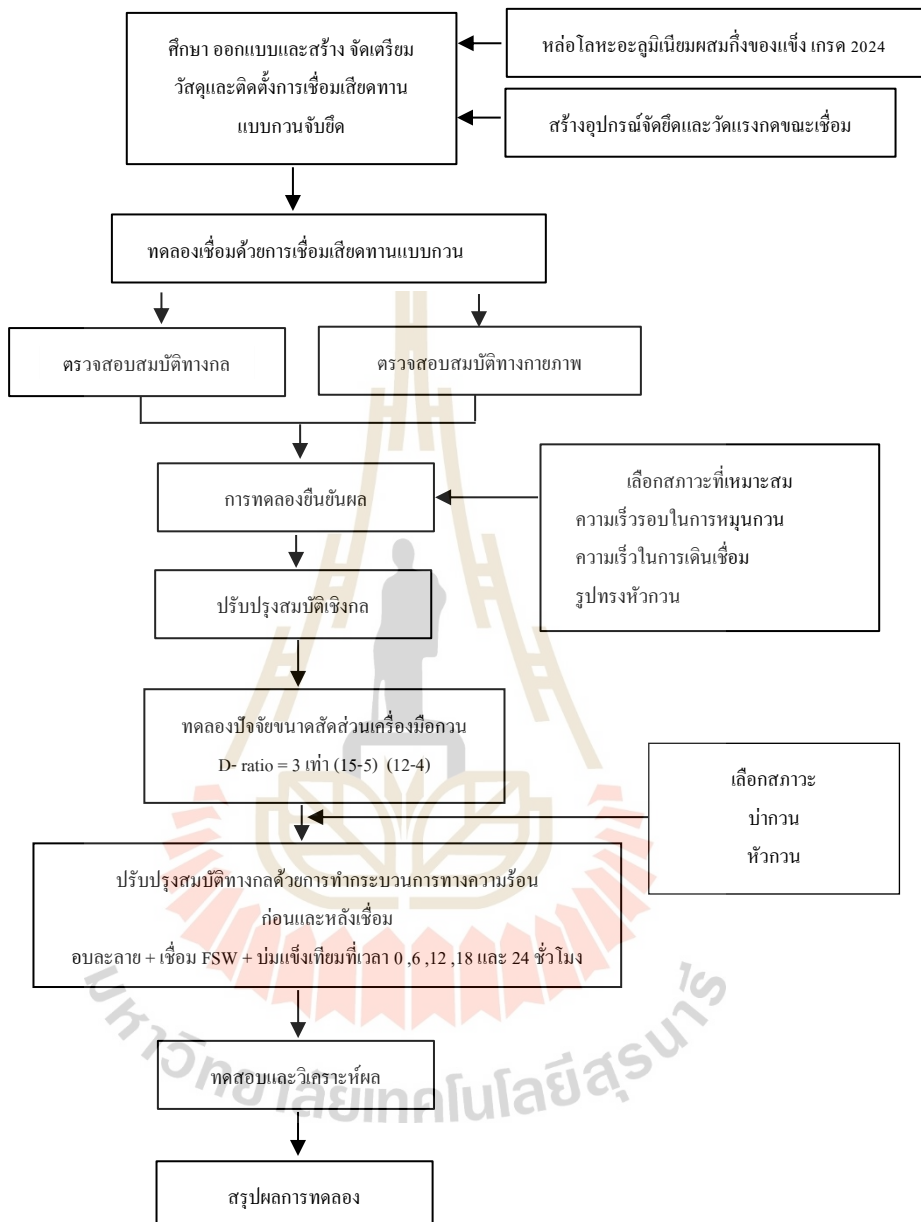
การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงของรอยเชื่อม อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024 เป็นการทดสอบสมบัติทางกล เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม จากแผ่นงานเชื่อมต่อชนด้วยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยตัดชิ้นงานทดสอบตั้งฉากกับแนวเชื่อมเพื่อทดสอบแรงดึงโดยใช้ขนาดกำหนดตามมาตรฐาน ASTM E-8M ดังรูปที่ 3.23 สำหรับงานเชื่อมโลหะแบบแผ่นหนาไม่เกิน 25 มิลลิเมตร มีความยาวช่วงทดสอบเท่ากับ 32 มิลลิเมตร (Gauge Length) กลางรอยเชื่อมกว้าง 20 มิลลิเมตร รัศมีของความโค้งขึ้นรูป 6 มิลลิเมตร ความกว้างสำหรับปากจับ 10 มิลลิเมตร ส่วนความยาวสำหรับปากจับกำหนดตามความเหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้ทดสอบในที่นี้ให้ความยาวเท่ากับ 100 มิลลิเมตร โดยใช้ชิ้นงานในการทดสอบทั้งหมด 12 ตัวอย่าง

การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมด้วยเครื่องตัดชิ้นงานใต้น้ำด้วยกระแสไฟฟ้าแบบลวดระบบอัตโนมัติ (CNC Wire Cut EDM) ยี่ห้อ Mitsubishi Electric รุ่น MV-R และทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกล ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-50 kNX



รูปที่ 3.23 การเตรียมชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม

3.10 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.24 แผนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ เพื่อศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- 4.1 ลักษณะทางกายภาพ และผิวด้านบนของรอยเชื่อม
- 4.2 การวิเคราะห์แรงกด
- 4.3 การวิเคราะห์ความร้อน
- 4.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงดึง
- 4.5 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล
- 4.6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม
- 4.7 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลหลังเชื่อม
- 4.8 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

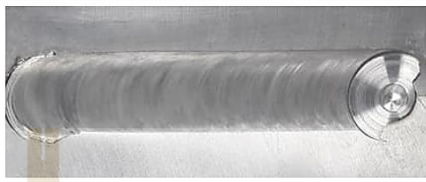
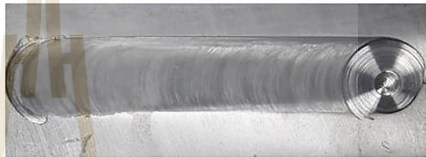

4.1 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ และผิวด้านบนของรอยเชื่อม

จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ลักษณะผิวของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงของหัวกวน แบบทรงกรวย ทรงกระบอกเรียบ และทรงกระบอกเกลียว มีลักษณะดังนี้

- 4.1.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว

จากการทดลองพบว่า ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว ลักษณะโดยทั่วไปมีผิวเรียบ มันวาว เกือบของผิวเชื่อมละเอียด และบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) เกิดครีบมากกว่าด้านรีทเรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS)

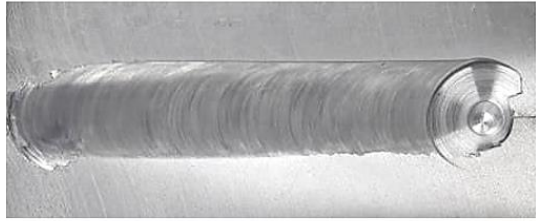


เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) ดังรูปที่ 4.1

รูปทรงของหัวกวน	ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที
แบบทรงกรวย	
แบบทรงกระบอกเรียบ	
แบบทรงกระบอกเกลียว	

รูปที่ 4.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อนาที
ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

4.1.2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว


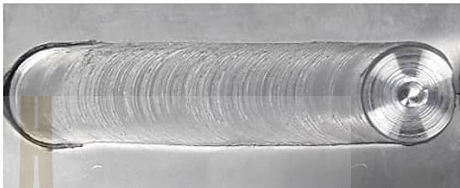

จากการทดลองพบว่า ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว ลักษณะโดยทั่วไปมีผิวเรียบ เกล็ดของผิวเชื่อมละเอียด และบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) เกิดครีบกมากกว่าด้านรีเทตริงไซด์ (Retreating side, RS) โดยผลการทดลองพบว่า ผิวด้านบนของรอยเชื่อมมีลักษณะผิวภายนอกไม่ปรากฏผลของความแตกต่างเมื่อเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที รอยเชื่อมผิวหน้าไม่พบความผิดปกติใด ๆ ดังรูปที่ 4.2

รูปทรงของหัวกวน	ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที
แบบทรงกรวย	
แบบทรงกระบอกเรียบ	
แบบทรงกระบอกเกลียว	

รูปที่ 4.2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อนาที
ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

4.1.3 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว




จากการทดลองพบว่า ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบ
กึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม
22 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอก
เกลียว ลักษณะโดยทั่วไปมีผิวเรียบ เกือบของผิวเชื่อมละเอียด และบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์
(Advancing side, AS) เกิดครีบทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) มากกว่าด้านรีทเรตติงไซด์
(Retreating side, RS) เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน
การเดินเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) ดังรูปที่ 4.3

รูปทรงของหัวกวน	ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที
แบบทรงกรวย	
แบบทรงกระบอกเรียบ	
แบบทรงกระบอกเกลียว	

รูปที่ 4.3 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที
ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

4.1.4 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว

จากการทดลองพบว่า ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบ
กึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม
36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอก
เกลียว ลักษณะโดยทั่วไปมีผิวเรียบ เกือบของผิวเชื่อมละเอียด บริเวณจุดเริ่มต้นจะเกิดครีบมาก
เนื่องจากใช้เวลาในการกดและแซ่หัวกวนเพื่อสร้างความร้อน และเมื่อหัวกวนเคลื่อนที่จะเกิด
ครีบทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) มากกว่าด้านรีทเรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS)
เล็กน้อย เนื่องจากลักษณะทิศทางไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินเชื่อมทำให้
เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) ดังรูปที่ 4.4

รูปทรงของหัวกวน	ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที
แบบทรงกรวย	
แบบทรงกระบอกเรียบ	
แบบทรงกระบอกกรวย	

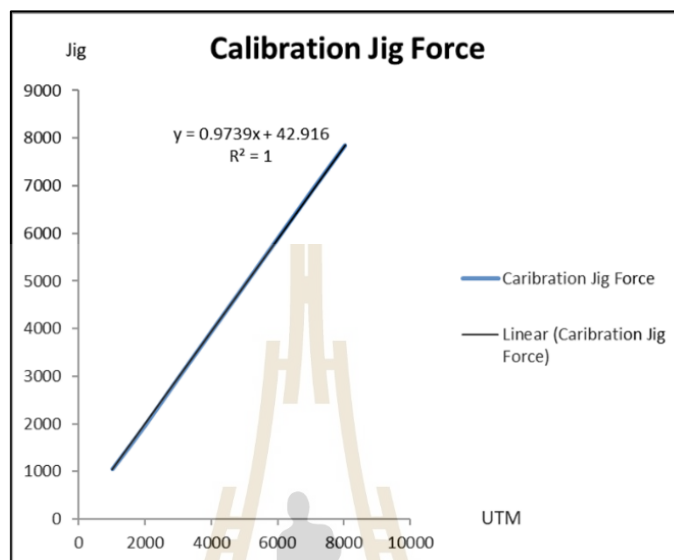
รูปที่ 4.4 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที
ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แรงกด

ในการวิเคราะห์แรงกดของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อให้ทราบแนวโน้มของแรงกดที่ชัดเจนมากขึ้น สำหรับการทดลองของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ผู้วิจัยได้สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงกดและบันทึกค่าของแรงกดของหัวกวนกับชิ้นงานที่อยู่บนอุปกรณ์จับยึดที่ติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อวัดแรงกด (Down force) ในแนวตั้งมาที่โหลดเซลล์ และบันทึกค่าแรงกดด้วยชุดควบคุมสัญญาณร่วมกับโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2017a โดยออกแบบให้ประกอบใช้ร่วมในอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานในทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ผลการวัดเทียบค่าแรงกดของทดสอบอุปกรณ์วัดแรงกดก่อนการทดลอง โดยการนำไปวัดเทียบแรงกดกับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) เพื่อให้ได้ค่าที่เที่ยงตรงในการเก็บข้อมูลมีความถูกต้อง โดยนำข้อมูลที่ได้อ่านเปรียบเทียบกับแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดจริงจากเครื่อง UTM (Applied load compress) กับค่าแรงกดที่อ่านได้จริงจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในการวัด

แรงกด (Read out) ได้ผลความเที่ยงตรงของการวัดเทียบที่ R^2 มีค่าเท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์วัดแรงกดนั้นมีความน่าเชื่อถือ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงแรงกดที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดเทียบกับแรงกดเครื่อง UTM

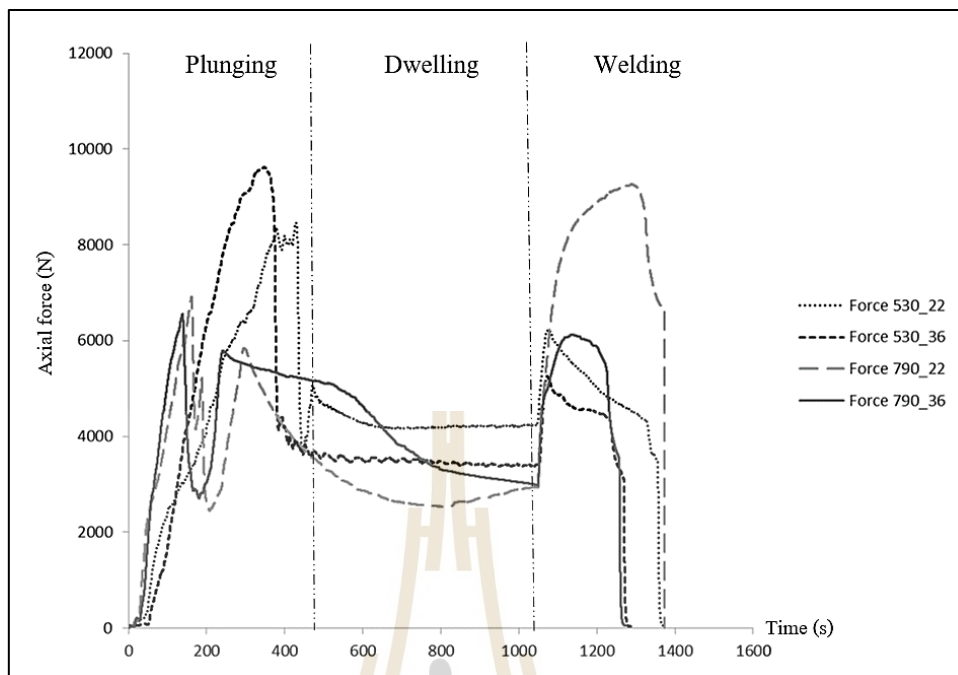
การทดลองสามารถวัดผลแรงกด แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นที่หัวกวนหมุนสัมผัสกับชิ้นงานเกิดแรงกดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และแรงกดจะลดลงเมื่อวัสดุเริ่มอ่อนตัวจากการสร้างความร้อนของหัวกวน ช่วงที่สองเป็นช่วงที่ป่าหัวกวนสัมผัสกับชิ้นงานแรงกดจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งจากการสร้างความร้อนจากแรงเสียดทานของหัวกวนและป่ากวน และช่วงที่สามคือ ช่วงที่หัวกวนเริ่มเคลื่อนที่ตามแนวเชื่อมจะเกิดแรงกดเพิ่มขึ้นมาจากความสัมผัสระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวนกับความเร็วในการเดินเชื่อม

4.2.1 แรงกดของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย

จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถวัดแรงกดขณะเชื่อม พบว่าการเชื่อมด้วยรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที จากการวัดแรงกดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ในช่วงแรกมีค่าแรงกดประมาณ 8,000 ถึง 10,000 นิวตัน ส่งผลให้เกิดแรงกดที่สูงจากการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของหัวกวน และเมื่อหัวกวนเริ่มสัมผัสกับชิ้นงานแรงกดจะค่อย ๆ ลดลงจนแรงกดเริ่มคงที่ประมาณ

3,800 ถึง 4,200 นิวตัน เมื่อหัวกวอนเริ่มเคลื่อนที่ตามแนวเชื่อมในช่วงที่ 3 แรงกดจะเพิ่มสูงขึ้น 5,000 ถึง 6,000 นิวตัน ขณะที่ความเร็วรอบในการหมุนกวอน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที แรงกดที่เกิดขึ้นในช่วงแรกมีค่าระหว่าง 6,500 ถึง 7,000 นิวตัน ในช่วงที่สอง เมื่อหัวกวอนสัมผัสชิ้นงานแรงกดจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ประมาณ 3,000 นิวตัน เนื่องจากความร้อนจากการเสียดทานระหว่างบ่ากวอนมีพื้นที่สัมผัสกับชิ้นงานได้มากขึ้น ทำให้วัสดุอ่อนตัวลง เมื่อหัวกวอนเริ่มเคลื่อนที่ตามแนวเชื่อมในช่วงที่สาม แรงกดจะเพิ่มสูงขึ้น 6,000 ถึง 9,500 นิวตัน ในการทดลองและบันทึกค่าแรงกดภายใต้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวอน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวอน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที แรงกดขณะเดินเชื่อมของทุกช่วงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4,498, 4,141, 4,394 และ 4,222 นิวตัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 จากกราฟแสดงให้เห็นค่าแรงกดสูงสุดของหัวกวอนแบบทรงกรวยที่ความเร็วรอบในการหมุนกวอน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าแรงกดสูงสุดที่ 9,264 นิวตัน ในการเดินเชื่อมในช่วงที่ 3 ขณะที่ค่าแรงกดต่ำสุดของหัวกวอนแบบทรงกรวยที่ความเร็วรอบในการหมุนกวอน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าแรงกดต่ำสุดที่ 5,180 นิวตัน

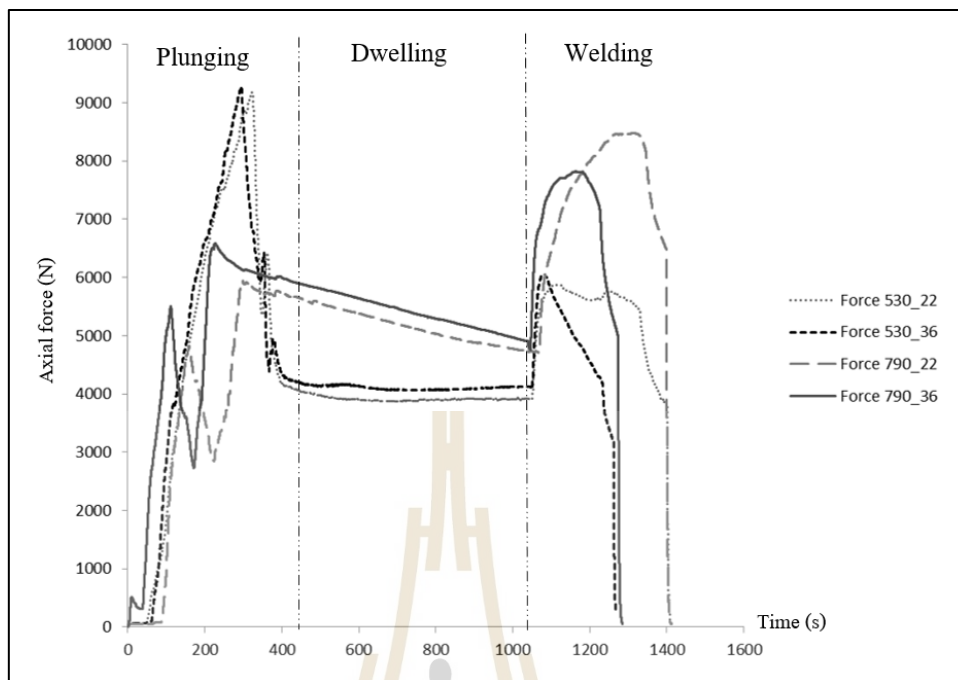
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวอนที่แตกต่างกันพบว่า ค่าแรงกดจะในช่วงการเริ่มต้นจะมีแรงกดที่สูงในความเร็วรอบที่ต่ำ เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนกวอนที่ต่ำทำให้สร้างความร้อนได้น้อยจากขนาดหัวกวอน ส่งผลให้วัสดุเกิดสภาวะพลาสติก หรือวัสดุเกิดความอ่อนตัวได้น้อยกว่าความเร็วรอบในการหมุนกวอนที่สูงกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความร้อนที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้การไหลของวัสดุไม่ราบรื่นและก่อให้เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม (Voids on the advancing side) เกิดขึ้นช่วงบริเวณระหว่างตรงกลางหรือมุมด้านล่างทางด้านแอดวานซิงไซด์ (T. Santos, P. Vilaça, L. Quintino, 2006)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าแรงกดที่ความเร็วรอบในการหมุนแกน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย

4.2.2 แรงกดของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนแกน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ

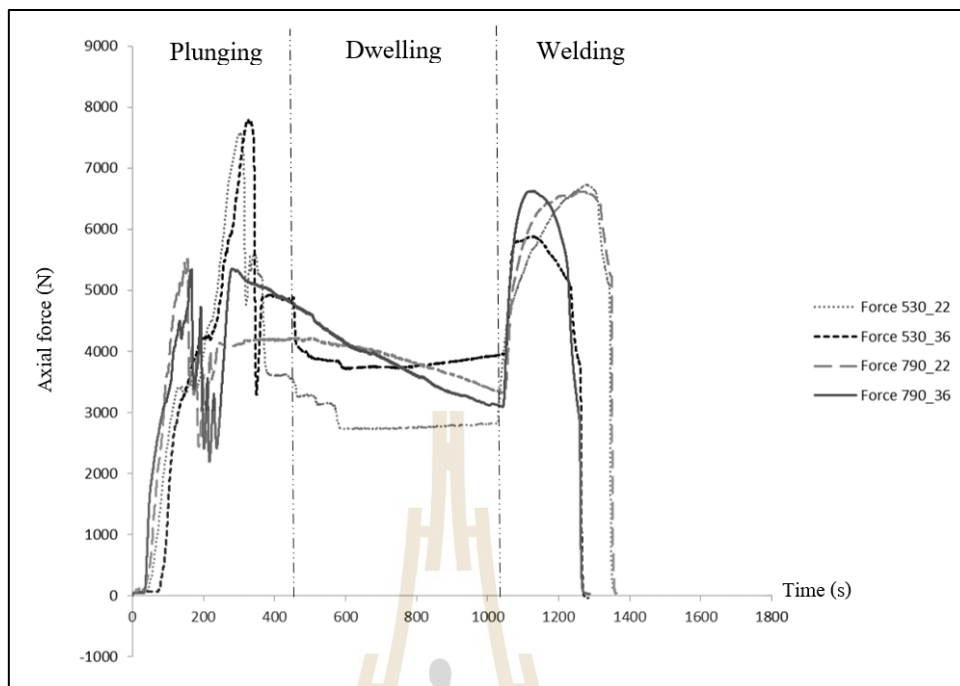
จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า แรงกดขณะเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนแกน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าแรงกดขณะเดินเชื่อมของทุกช่วงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4,475, 4,461, 5,199 และ 5,403 นิวตัน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.7 จากกราฟแสดงให้เห็นค่าแรงกดสูงสุดของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่ความเร็วรอบในการหมุนแกน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าแรงกดสูงสุดที่ 8,477 นิวตัน ในการเดินเชื่อมในช่วงที่ 3 ขณะที่ค่าแรงกดต่ำสุดของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่ความเร็วรอบในการหมุนแกน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าแรงกดต่ำสุดที่ 4,912 นิวตัน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าแรงกดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ

4.2.3 แรงกดของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว

จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า แรงกดขณะเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าแรงกดขณะเดินเชื่อมของทุกช่วงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3,767, 4,002, 4,140 และ 4,018 นิวตัน ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8 จากกราฟแสดงให้เห็นค่าแรงกดสูงสุดของหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าแรงกดสูงสุดที่ 6,615 นิวตัน ในการเดินเชื่อมในช่วงที่ 3 ขณะที่ค่าแรงกดต่ำสุดของหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าแรงกดต่ำสุดที่ 5,822 นิวตัน



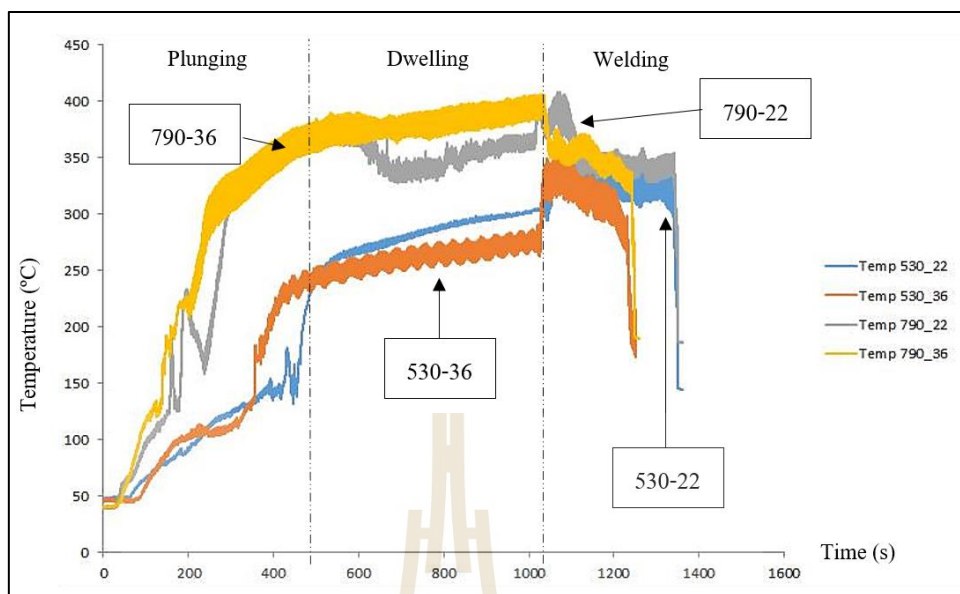
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าแรงกดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ความร้อน

ในการวิเคราะห์ความร้อนของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และแรงกดจากหัวกวนในแนวดิ่ง ทำให้เกิดความร้อนจากการเสียดทานทางกล โดยความร้อนที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นที่หัวกวนหมุนสัมผัสกับชิ้นงาน ช่วงที่สองเป็นช่วงที่เมื่อป้อนความลึกของหัวกวนจนกระทั่งป้าหัวกวนสัมผัสกับชิ้นงาน และช่วงที่สามคือช่วงที่หัวกวนเริ่มเคลื่อนที่ตามแนวเชื่อม ความร้อนที่ได้จากการวัดจากกล้องบันทึกภาพอินฟราเรดให้ทราบแนวโน้มค่าความร้อนที่จะส่งผลกระทบต่อทางด้าน โครงสร้างหลังการเชื่อม เพื่อนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลได้ชัดเจนมากขึ้น สำหรับการทดลองของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที

4.3.1 ความร้อนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบ ทรงกรวย

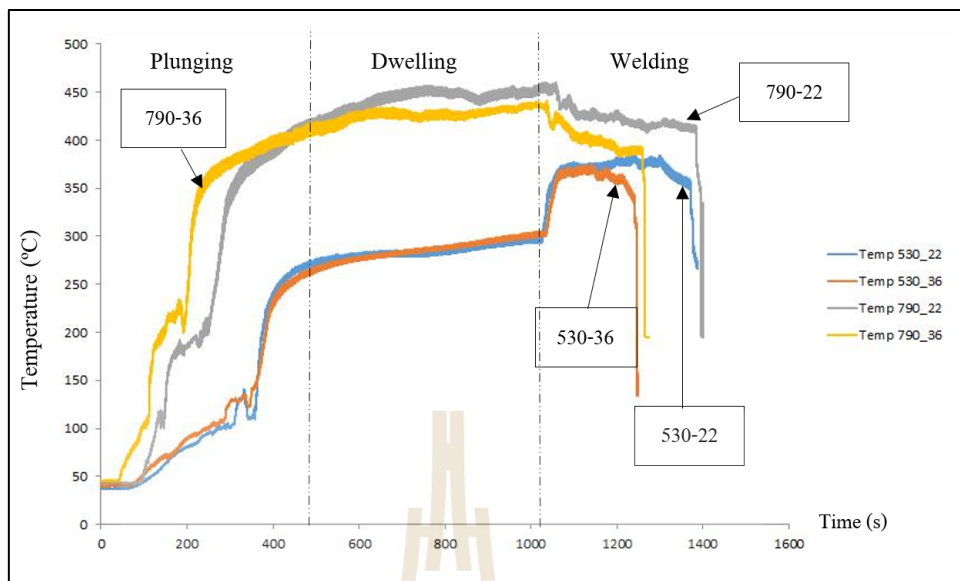
จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า ความร้อนขณะเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยรูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ความร้อนในช่วงที่ 1 สร้างความร้อนได้ช้าจากหัวกวนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ต่ำ มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเข้าสู่ช่วง 2 เมื่อป้าหัวกวนสัมผัสชิ้นงาน ความร้อนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 250-300 องศาเซลเซียส ในช่วงที่ 3 เมื่อหัวกวนเริ่มเคลื่อนที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 300-350 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนกวนที่สูงขึ้นพบว่า ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ความร้อนในช่วงที่ 1 สร้างความร้อนสูงกว่าได้เร็วขึ้นจากหัวกวนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่เพิ่มสูงขึ้นมีอุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเข้าสู่ช่วง 2 ได้เร็วขึ้น คือ ป้าหัวกวนเริ่มสัมผัสชิ้นงาน ความร้อนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 350-400 องศาเซลเซียส ในช่วงที่ 3 เมื่อหัวกวนเริ่มเคลื่อนที่อุณหภูมิลดลงอยู่ประมาณ 350 องศาเซลเซียส ในการวัดอุณหภูมิภายใต้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่าความร้อนขณะเดินเชื่อมของทุกช่วงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 228, 214, 303 และ 319 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.9 จากกราฟแสดงให้เห็นค่าของอุณหภูมิสูงสุดของหัวกวนแบบทรงกรวยที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าความร้อนเฉลี่ยสูงสุดที่ 337 องศาเซลเซียส ในการเดินเชื่อมในช่วงที่ 3 ขณะที่ค่าของอุณหภูมิต่ำสุดของหัวกวนแบบทรงกรวย ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าความร้อนเฉลี่ยต่ำสุดที่ 316 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดภายใต้กระบวนการทดลองจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงพออยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ทำให้โครงสร้างเสียรูปในสภาวะพลาสติกส่งผลให้บริเวณพื้นที่ที่ถูกกวนเกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน ทำให้บริเวณพื้นที่นี้เกรนมีความหนาแน่น และเล็กละเอียดกระจายทั่วพื้นที่แบบสม่ำเสมอทำให้ขอบเกรนมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นส่งผลดีต่อทางสมบัติความแข็งแรงของรอยเชื่อม



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความร้อนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย

4.3.2 ความร้อนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ

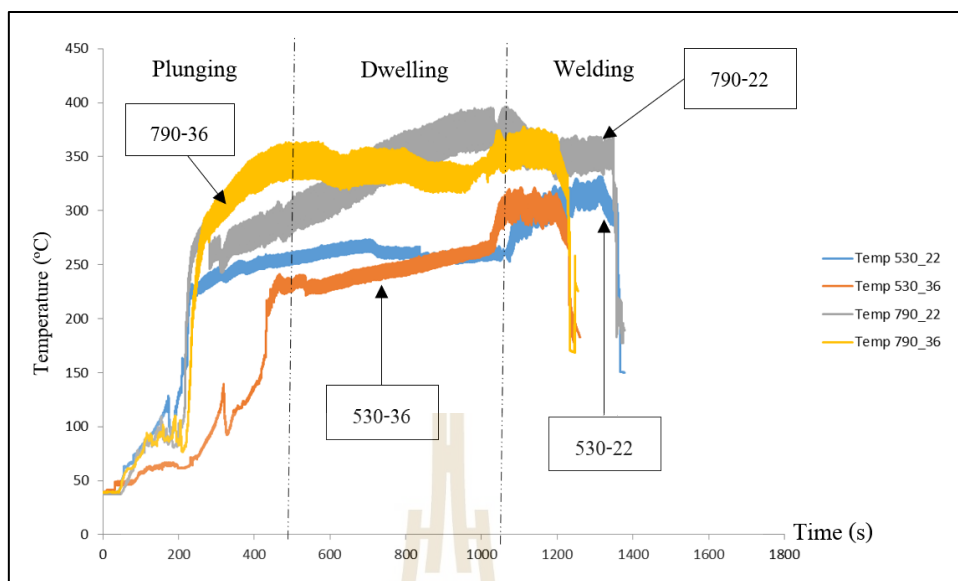
จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า ความร้อนขณะเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าความร้อนขณะเดินเชื่อมของทุกช่วงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 246, 233, 363 และ 362 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นค่าของอุณหภูมิสูงสุดของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าความร้อนเฉลี่ยสูงสุดที่ 414 องศาเซลเซียส ในการเดินเชื่อมในช่วงที่ 3 ขณะที่ค่าของอุณหภูมิต่ำสุดของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าความร้อนเฉลี่ยต่ำสุดที่ 364 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความร้อนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ

4.3.3 ความร้อนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว

จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า ความร้อนขณะเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียวที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า ความร้อนขณะเดินเชื่อมของทุกช่วงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 222, 193, 285 และ 283 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นค่าของอุณหภูมิสูงสุดของหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าความร้อนเฉลี่ยสูงสุดที่ 374 องศาเซลเซียส ในการเดินเชื่อมในช่วงที่ 3 ขณะที่ค่าของอุณหภูมิต่ำสุดของหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ค่าความร้อนเฉลี่ยต่ำสุดที่ 302 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.11

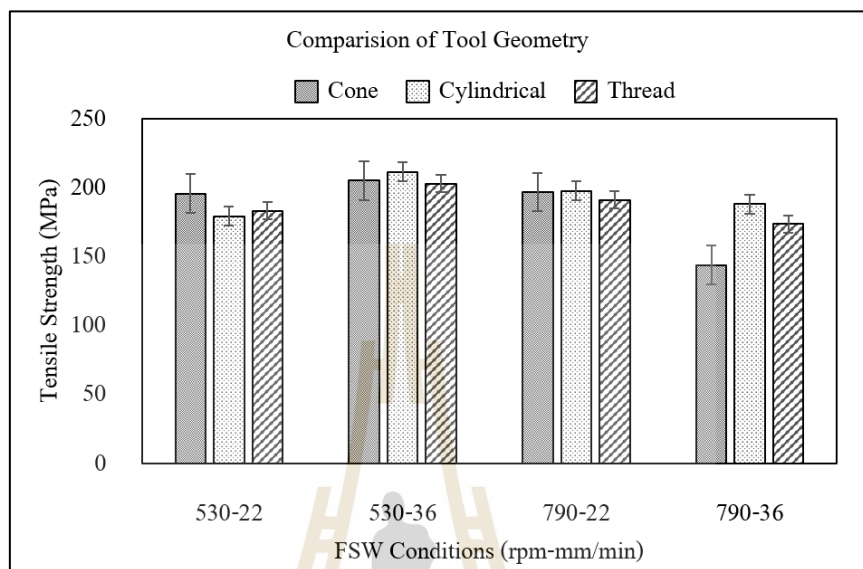


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความร้อนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว

4.4 สมบัติความแข็งแรงดึง

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า หัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 212 MPa ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่การขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณขอบรอยเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ทางด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating Side) เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงบริเวณนี้จะมีค่าความแข็งแรงต่ำสุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเกรนในบริเวณที่รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เกรนมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างเดิมทำให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงดึงลดลง (T. Santos, P. Vilaça, L. Quintino, 2006) เนื่องจากค่าความร้อนในการเชื่อม (Heat input) ที่เหมาะสม ความเร็วในการหมุนกวนต่ำ และความเร็วในการเดินเชื่อมสูงทำให้อุณหภูมิในขณะเชื่อมไม่สูงมาก ส่งผลให้พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนน้อยลงด้วย ทำให้เกรนมีขนาดเล็กกว่าการเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 790 รอบต่อนาที เกิดอุณหภูมิในการเชื่อมสูงกว่า ขณะที่หัวกวนแบบทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 145 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 790 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

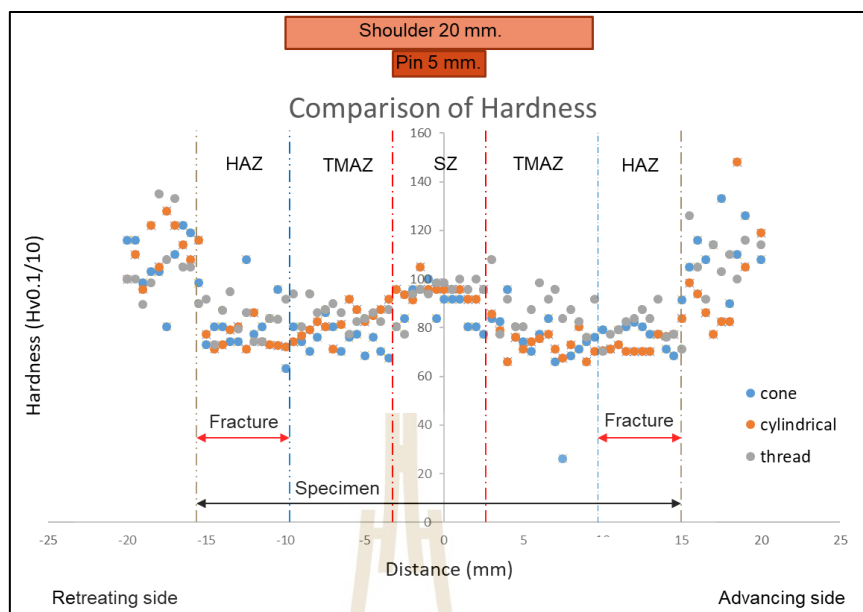
เนื่องจากการวัสดุอาจมีจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุก่อนนำมาเชื่อม จากการทดลองในงานวิจัยนี้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 212 MPa มีประสิทธิภาพ 99% ของความแข็งแรงวัสดุพื้น



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงในสภาวะต่างของรูปทรงหัวกวนทั้ง 3 รูปแบบ

4.5 สมบัติความแข็ง

ทดสอบความแข็งของชิ้นงานเชื่อมแบบไมโครวิกเกอร์ บริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อม ซึ่งถูกตัดตามขวางกับรอยเชื่อม (Cross-Section) โดยใช้แรงกด 100 กรัม และใช้เวลากดวัด 10 วินาที โดยรอยกดจะมีระยะห่างกัน 0.25 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าความแข็งในบริเวณต่าง ๆ ของรอยเชื่อม โดยเลือกพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วรอบ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงรอยเชื่อมทั้ง 3 รูปแบบ มาทดสอบความแข็งในแต่ละบริเวณพื้นที่ในการเชื่อม



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบความแข็งที่ความเร็วรอบ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงรอยเชื่อมทั้ง 3 รูปแบบ

จากรูปที่ 4.13 ค่าความแข็งของแนวเชื่อมลักษณะรูปร่างแบบ W (W-Shape) โดยค่าของความแข็งจะแบ่งออกเป็น 4 บริเวณ คือ บริเวณพื้นที่กวน (SZ) บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล (TMAZ) บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) โดยบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) มีความแข็งต่ำสุด มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 70-75 HV เนื่องจากความร้อนส่งผลต่อโครงสร้างให้เกรนมีขนาดโตขึ้น และเมื่อนำไปทดสอบความต้านทานแรงดึงจะเกิดการฉีกขาดในบริเวณพื้นที่นี้

4.6 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) เป็นการทดลองเพื่อระบุปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) โดยการศึกษาครั้งนี้กำหนดปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยที่มี 2 ระดับ 2 ปัจจัย และปัจจัยที่มี 3 ระดับ 1 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ปัจจัยในการทดลอง	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
		530	790	-
ความเร็วรอบในการหมุนกวน	RPM	530	790	-
ความเร็วในการเดินเชื่อม	mm/min	22	36	-
รูปทรงของหัวกวน	None	Cone	Cylinder	Thread

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง โดยจำนวนการทดลองทั้งหมด 24 ครั้ง ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีผลตอบสนองคือค่าความแข็งแรงดึงแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบที่มีจำนวนตัวอย่างการทดลอง 2 จำนวนของค่าความแข็งแรงดึง

ลำดับการทดลอง	ระดับของปัจจัย			ค่าความแข็งแรงดึง		ค่าเฉลี่ย
	รูปแบบหัวกวน	ความเร็วรอบในการหมุนกวน	ความเร็วในการเดินเชื่อม	Uts1	Uts2	
1	Cone	530	22	202.1	189.7	195.9
2	Cone	530	36	204.6	205.9	205.3
3	Cone	790	22	196.9	196.9	196.9
4	Cone	790	36	143.7	144.3	144.1
5	Cylinder	530	22	177.7	181.0	179.4
6	Cylinder	530	36	215.0	208.4	211.7
7	Cylinder	790	22	199.6	196.0	197.8
8	Cylinder	790	36	187.0	189.8	188.4
9	Thread	530	22	180.7	185.8	183.2
10	Thread	530	36	190.3	216.1	203.2
11	Thread	790	22	190.5	191.8	191.1
12	Thread	790	36	174.5	173.2	173.9

เพื่อให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองฟูลแฟกทอเรียลมีความถูกต้องและรวดเร็ว ผู้วิจัยจึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab Version 18 ช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4.6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองความแข็งแรงดึง

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลอง ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยมีสมมติฐานคือ รูปแบบของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียงศูนย์ และมีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยการตรวจสอบมี 4 ขั้นตอน ดังนี้

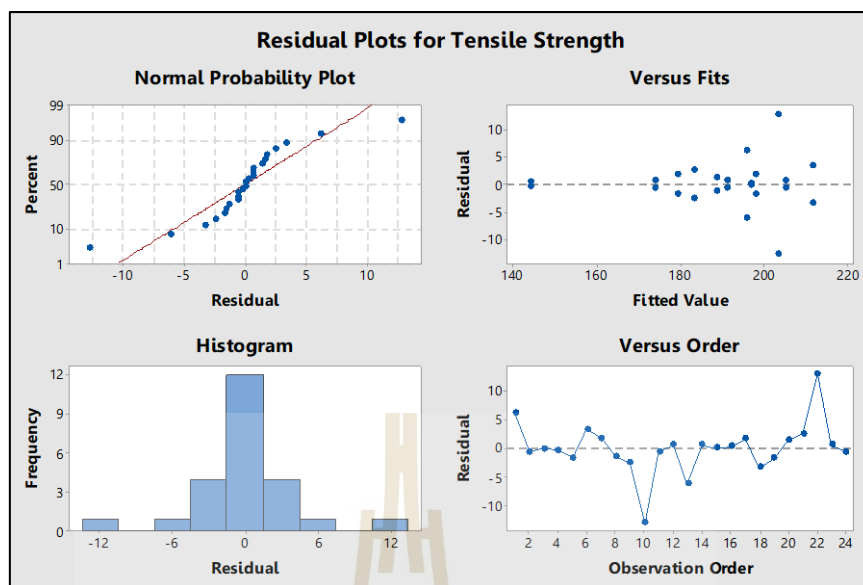
1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของส่วนตกค้าง (Residuals) แสดงดังรูปที่ 4.14 (บนซ้าย) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า “ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ”

2) การตรวจสอบความเสถียรภาพของ σ^2 (Variance Stability) แสดงดังรูปที่ 4.14 (บนขวา) พบว่า σ^2 ของส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า “ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน”

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.14 (ล่างซ้าย) พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า “ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน”

4) การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.14 (ล่างขวา) พบว่า ส่วนตกค้างในแต่ละระดับของปัจจัยที่กระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า “ค่าเฉลี่ยส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์”

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองพบว่า รูปแบบส่วนตกค้างของผลการทดลองความแข็งแรงดึงเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ



รูปที่ 4.14 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนการทดลองความแข็งแรงดึง

4.6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในการหาค่าความแข็งแรงดึงเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของความแข็งแรงดึง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	7102.7	645.70	16.76	0.000
Linear	4	1636.1	409.01	10.62	0.001
Tool geometry	2	334.09	167.04	4.34	0.038
Rotation speed	1	1248.4	1248.4	32.40	0.000
Welding speed	1	53.61	53.61	1.39	0.261
2-Way Interactions	5	5289.3	1057.9	27.46	0.000
Tool geometry*Rotation speed	2	808.28	404.14	10.49	0.002
Tool geometry*Welding speed	2	1158.9	579.43	15.04	0.001
Rotation speed*Welding speed	1	3322.1	3322.1	86.23	0.000

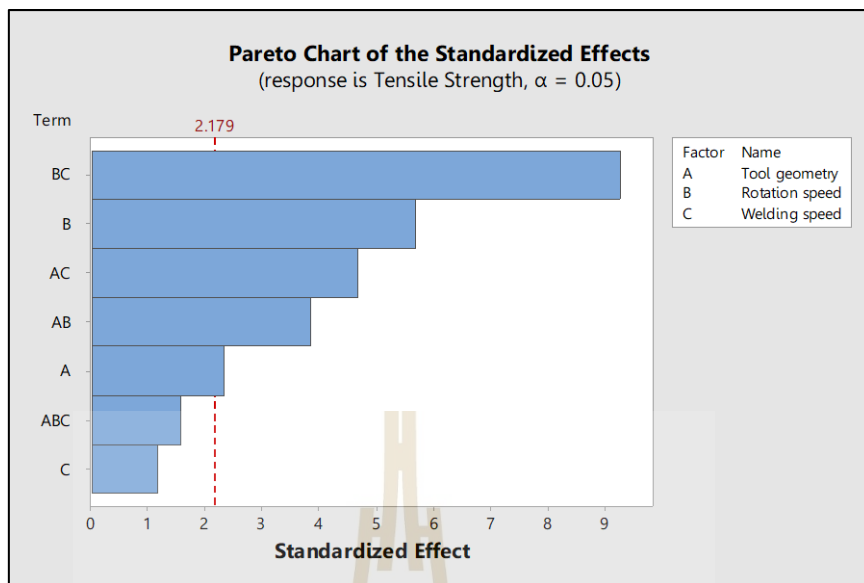
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองของความแข็งแรงดึง (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
3-Way Interactions	2	177.41	88.71	2.30	0.142
Tool geometry*Rotation speed*Welding speed	2	177.41	88.71	2.30	0.142
Error	12	462.30	38.52		
Total	23	7565.0			
Source					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
6.2068	93.89%	88.29%	75.56%		

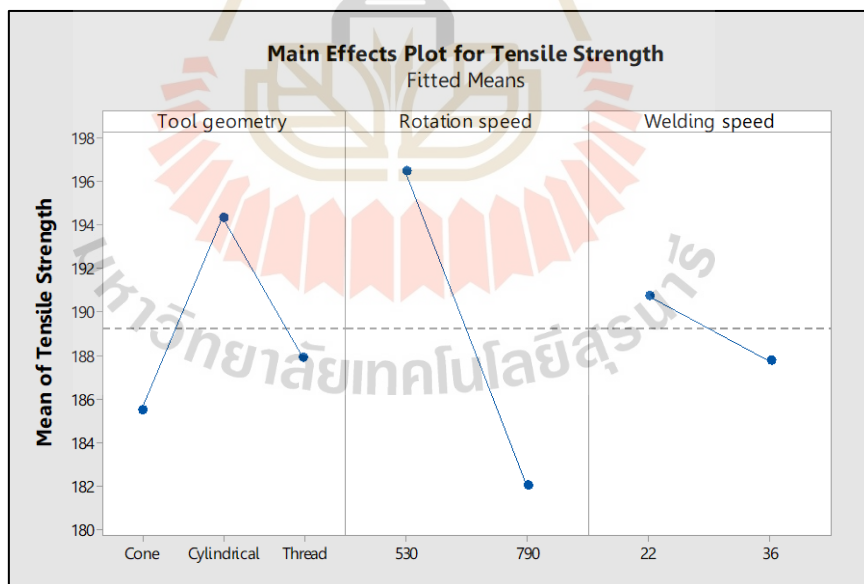
จากผลการทดลองได้นำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงโดยใช้โปรแกรมมินิแทป รุ่น 18 (Minitab 18) ดังตารางที่ 4.3 เพื่อชี้ให้เห็นถึงผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ผลกระทบหลักของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด ประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวนและรูปทรงของหัวกวนตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจได้จากการทดลอง R^2 มีค่าเท่ากับ 93.9 เปอร์เซ็นต์ และค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 88.3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงจำนวนที่เพียงพอต่อการประมาณค่าพยากรณ์ของความแข็งแรงดึง โดยความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองมาจากผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของแต่ละพารามิเตอร์ในการทดลอง 88.3 เปอร์เซ็นต์ และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ 11.7 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ยังพบว่า ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม รูปทรงของหัวกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวนและความเร็วรอบในการหมุนกวน ตามลำดับ โดยผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม มีผลต่อความแข็งแรงดึงมากที่สุด ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบของความแข็งแรงดึง



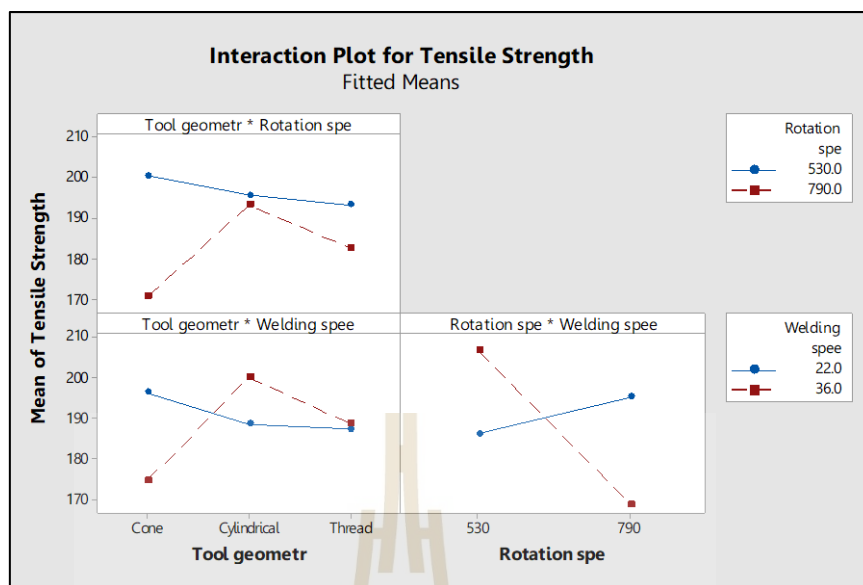
รูปที่ 4.16 การประมาณอิทธิพลของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบของความแข็งแรงดึง

จากการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main Effect Plot) ทั้งสามปัจจัยประกอบด้วย รูปแบบกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวนที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงดึง ดังรูปที่ 4.16 แสดงถึงผลกระทบหลักของ พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของหัวเชื่อมแบบทรงกระบอก เรียบให้ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ผลกระทบหลักของความเร็วรอบในการหมุนกวน มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความแข็งแรงดึงเมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนลดลงส่งผลให้ ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อมก็มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความแข็งแรงดึง เช่นกัน เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าค่าความเร็วในการเดิน เชื่อมสูง

จากการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Plot) แสดงดังรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ร่วมของแต่ละพารามิเตอร์ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการ หมุนกวน และความเร็วในการเดินเชื่อมพบว่า เมื่อใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าความเร็ว ในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้ความเร็วรอบของหัวกวนที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าความเร็ว ในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวเชื่อมและความเร็วรอบในการหมุนกวน พบว่า รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมสูงที่สุด ตามด้วยหัวกวน แบบทรงกระบอกเรียบและหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียว ตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณาทั้งความเร็ว รอบในการหมุนกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที พบว่ารูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของรอยเชื่อมสูงที่สุด ตามด้วยหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียวและหัวกวน แบบทรงกรวย ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวเชื่อม และความเร็วในการเดินเชื่อม พบว่า ที่ระดับความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงแบบกรวยให้ค่าความแข็งแรง สูงสุด ในขณะที่เมื่อใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า รูปทรงหัวกวน แบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงที่สุด



รูปที่ 4.17 การประมาณอิทธิพลร่วมของปัจจัยของแผนการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบของความแข็งแรงดึง



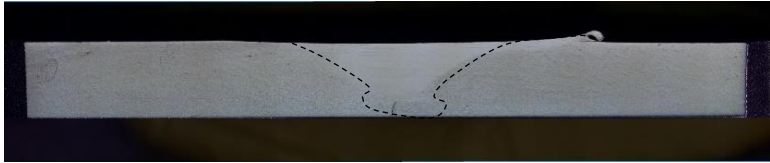
4.7 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความแข็งแรงดึงพบว่า รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าที่ให้ความแข็งแรงที่สูงสุดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที และที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ดังนั้นผู้วิจัยได้เลือกชิ้นงานทดสอบจากการเชื่อมในสภาวะดังกล่าวซึ่งให้ค่าที่ดีนำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะคูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็งเกรด 2024 โดยการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้แนวเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นงานทดสอบ ขัดตามขั้นตอนของการเตรียมชิ้นทดสอบ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของการเชื่อม รอยเชื่อม และเขตอิทธิพลความร้อนด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) และด้านรีทเรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังนี้

4.7.1 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

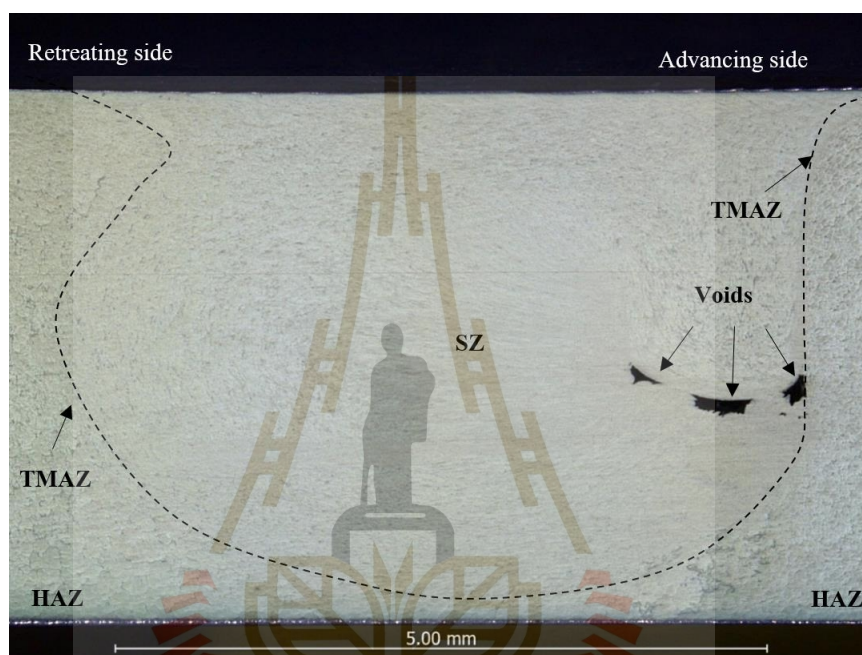
จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนทั้ง 3 รูปแบบ มีรูปทรงของรอยเชื่อมที่แตกต่าง

กันตามลักษณะของรูปทรงหัวกวน โดยลักษณะรูปร่างของรอยเชื่อมของหัวกวนแบบกรวยจะมีรูปร่างรอยเชื่อมลักษณะคล้ายกับหัวกวนที่เป็นรูปทรงกรวย ในส่วนที่หัวกวนสัมผัสโดยตรงด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) มีลักษณะเกรนที่เล็กละเอียดกว่าทางด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS) ลักษณะของรอยเชื่อมของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบในส่วนที่หัวกวนสัมผัสโดยตรงด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) เกรนมีขนาดเล็กลงและรูปร่างรอยเชื่อมจะมีลักษณะตั้งฉากตามรูปทรงหัวกวน และหัวกวนแบบทรงกระบอกเกลียวจะมีรูปร่างบริเวณรอยเชื่อมเป็นแบบอ่าง รอยเชื่อมในส่วนที่หัวกวนสัมผัสโดยตรงมีลักษณะเกรนที่เล็กละเอียดทั่วบริเวณพื้นที่ถูกกวน จากการตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมหัวกวนทั้งสามรูปแบบพบข้อบกพร่องเกิดช่องว่างที่มุมด้านล่างของตัวกวนด้านแอดวานซิงไซด์ ดังรูปที่ 4.18

รูปทรงของหัวกวน	ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที
แบบทรงกรวย	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Retreating side Advancing side </div>  <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 5px;"> BM HAZ TMAZ SZ TMAZ HAZ BM </div>
แบบทรงกระบอกเรียบ	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Retreating side Advancing side </div>  <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 5px;"> BM HAZ TMAZ SZ TMAZ HAZ BM </div>
แบบทรงกระบอกเกลียว	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Retreating side Advancing side </div>  <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 5px;"> BM HAZ TMAZ SZ TMAZ HAZ BM </div>

รูปที่ 4.18 โครงสร้างมหภาครูปร่างรอยเชื่อมของรูปทรงหัวกวน 3 รูปแบบ
ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที
ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการตรวจสอบทางด้านโครงสร้างจุลภาค หัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดพบว่า มีข้อบกพร่องของรอยเชื่อมในพื้นที่กวนมีขนาดความกว้างประมาณ 120-130 ไมโครเมตร และยาว 250-300 ไมโครเมตร เมื่อตัดขวางขึ้นทดสอบบริเวณส่วนอื่น ๆ ของรอยเชื่อมยังปรากฏผลของข้อบกพร่องดังกล่าว แต่มีขนาดเล็กลงและเกิดเป็นเส้นของการประสานไม่ติดกันตลอดความยาวของรอยเชื่อมขนาดประมาณ 30-40 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.19

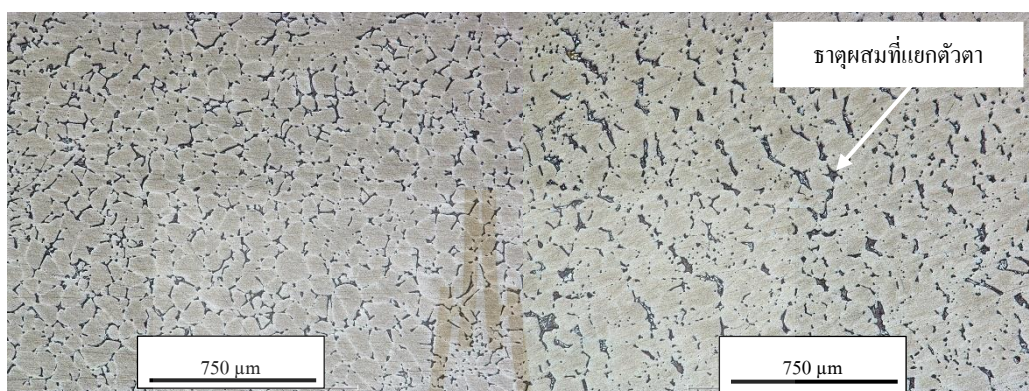


รูปที่ 4.19 ลักษณะ โครงสร้างมหภาคของของรอยเชื่อมโครงสร้างบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวน ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ

โครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Material, BM) ของอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 มีลักษณะโครงสร้างเป็นก้อนกลม ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติหรือเส้นปฏิบัติการยู่เทคดิกของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 2024 อุณหภูมิ 595 °C ซึ่งทำให้โครงสร้างคงสภาพเดิมไว้ได้ ดังรูปที่ 4.20 (ก)

บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone, HAZ) เป็นพื้นที่อยู่ระหว่างผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิมคือ บริเวณที่ห่างจากตัวกวนมีเกรนขนาด 60-80 ไมโครเมตร โครงสร้างมีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม เนื่องจาก

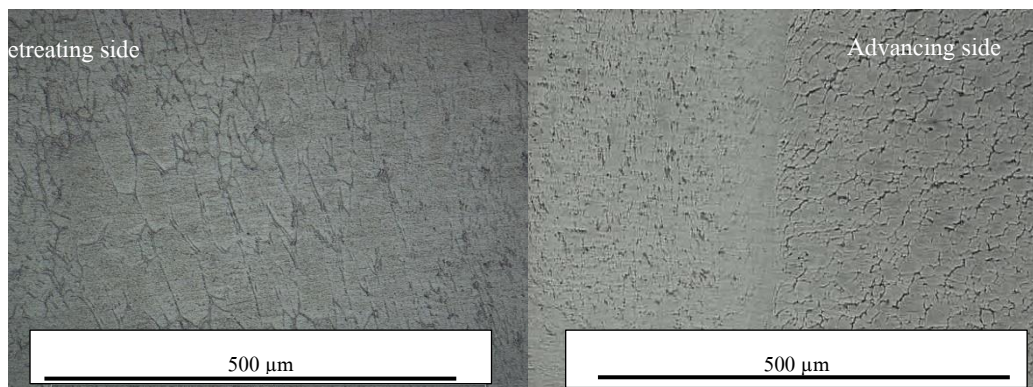
ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และบริเวณเกิดการแยกตัวของธาตุผสมทำให้ขอบเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้บริเวณพื้นที่นี้มีความอ่อนแอลงมากกว่าบริเวณพื้นที่เนื้อวัสดุพื้น ดักรูปที่ 4.20 (ข)



(ก) โครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม (ข) บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน

รูปที่ 4.20 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของของรอยเชื่อม โครงสร้างบริเวณ และบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ

บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล ซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างเป็น 2 ส่วน คือ ด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) และด้านรีทเรตติงไซด์ (Retreating side, RS) จากการทดลองพบว่า โครงสร้างด้านแอดวานซิงไซด์เกิดจากการกวนของตัวกวนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โลหะที่อ่อนตัวไหลวนคู่ไปตามทิศทางการหมุนรอบตัวกวนทำให้เกิด โครงสร้างที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่างบริเวณพื้นที่กวน และพื้นที่รับผลกระทบทางความร้อนมีเกรนขนาด 50-60 ไมโครเมตร ด้านรีทเรตติงไซด์จะสังเกตเห็นบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล โครงสร้างเกรนมีลักษณะยาวรีและยึดไปตามทิศทางของหัวกวน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ในส่วนโครงสร้างด้านรีทเรตติงไซด์เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการหมุนของตัวกวนในทิศทางการเดินเชื่อมแนวเชื่อมที่ตรงกันข้ามทำให้มีลักษณะ โครงสร้างเป็นพื้นที่บริเวณแคบ ๆ ประมาณ 500 ไมโครเมตร ดักรูปที่ 4.21



(ก) โครงสร้างบริเวณด้านรีเทรตติ้งไซด์

(ข) บริเวณด้านแอดวานซ์ซิงไซด์

รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกลของรอยเชื่อมที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ

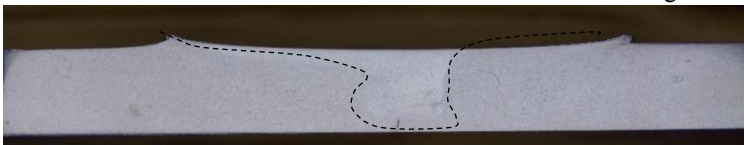
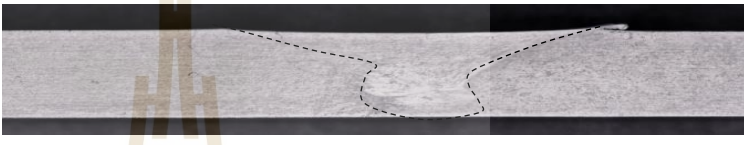



รูปที่ 4.22 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของของรอยเชื่อม โครงสร้างบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวน ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ

โครงสร้างบริเวณพื้นที่กวน (Stir zone, SZ) เป็นบริเวณพื้นที่ที่หัวกวนสัมผัสโดยตรงจากหัวกวน โดยโครงสร้างตรงกลางรอยเชื่อมจะมีโครงสร้างที่มีเกรนเล็กละเอียด และโครงสร้างจะค่อย ๆ หยิบขึ้นไปจนถึงด้านแอดวานซ์ไซด์ และด้านรีเทรตไซด์ บริเวณพื้นที่ถูกกวนจะพบว่า ทิศทางการไหลของวัสดุที่เห็นได้ชัดเจนมีลักษณะคล้ายเป็นวงแหวนที่หมุนวนจากทางด้านรีเทรตไซด์ไปยังด้านแอดวานซ์ไซด์ ส่งผลให้รูปร่างของโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมมีความแตกต่างจากบริเวณเนื้อพื้นเดิมของวัสดุอย่างชัดเจน โดยเกรนมีขนาดเล็กละเอียดมาก เนื่องจากบริเวณที่ถูกกวนมีอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการตกผลึกใหม่และการเสียรูปแบบพลาสติกทำให้เกรนมีขนาดเล็กประมาณ 5-7 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.22

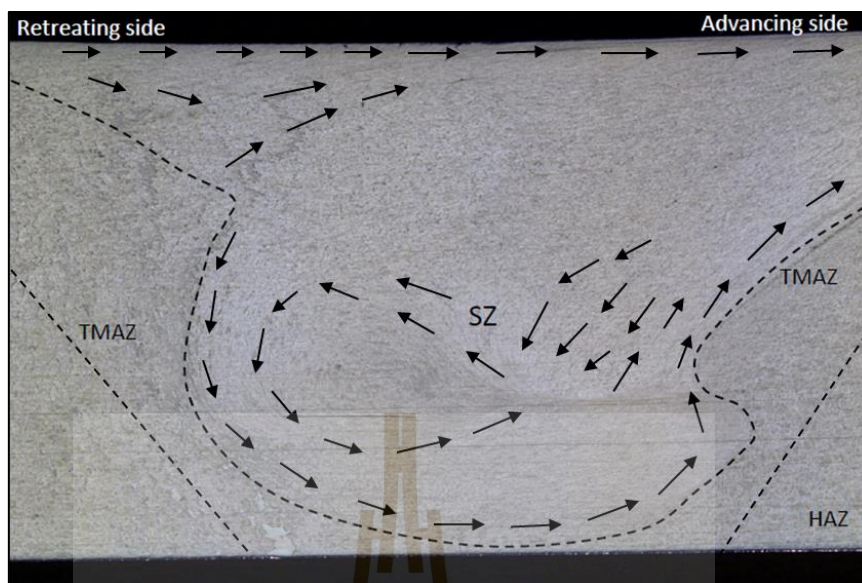
4.7.2 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนทั้ง 3 รูปแบบ มีรูปทรงของรอยเชื่อมที่คล้ายกัน โดยลักษณะรูปร่างของรอยเชื่อมจะมีรูปร่างบริเวณรอยเชื่อมเป็นแบบอ่าง เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนกวนที่สูงขึ้นสามารถสร้างความร้อนได้มากขึ้น ทำให้โครงสร้างบริเวณรอบ ๆ ในส่วนที่หัวกวนสัมผัสโดยตรงส่งผลให้วัสดุอ่อนตัวในสถานะพลาสติก เกิดการไหลวนของเนื้อโลหะได้ง่าย จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของการเชื่อม หัวกวนทั้งสามรูปแบบไม่พบข้อบกพร่องในบริเวณรอยเชื่อม และรอยเชื่อมเกิดเป็นเส้นของการประสานติดกันได้ดี ดังรูปที่ 4.23

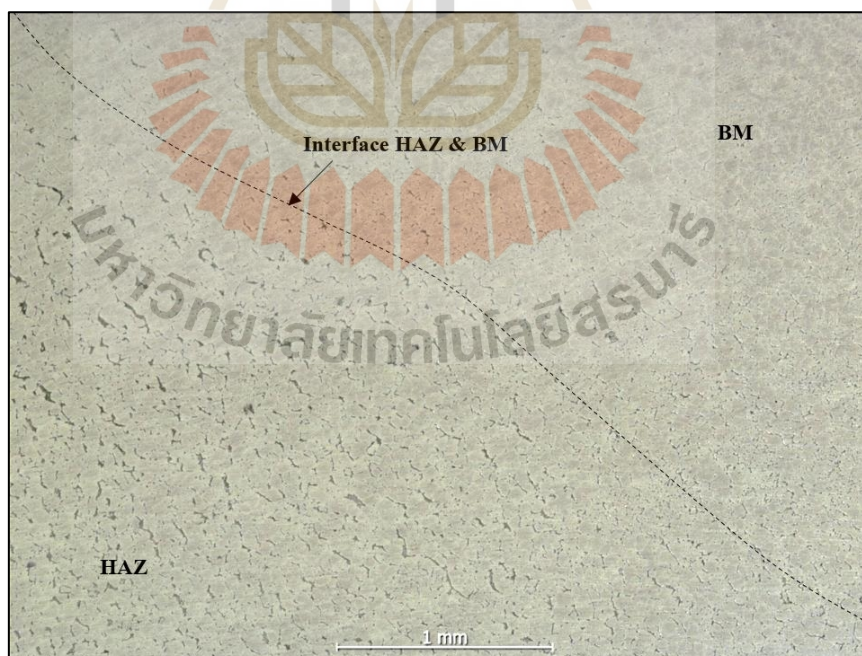
รูปทรงของหัวกวน	ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที
แบบทรงกรวย	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Retreating side Advancing side </div>  <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 5px;"> BM HAZ TMAZ SZ TMAZ HAZ BM </div>
แบบทรงกระบอกเรียบ	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Retreating side Advancing side </div>  <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 5px;"> BM HAZ TMAZ SZ TMAZ HAZ BM </div>
แบบทรงกระบอกเกลียว	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Retreating side Advancing side </div>  <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 5px;"> BM HAZ TMAZ SZ TMAZ HAZ BM </div>

รูปที่ 4.23 โครงสร้างมหภาคของรูปร่างรอยเชื่อมของรูปทรงหัวกวน 3 รูปแบบ
ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที
ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการตรวจสอบทางด้านโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดพบว่า รูปร่างของรอยเชื่อมเป็นลักษณะรูปอ่าง (M.Sharma, 2006) สามารถสังเกตทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุเป็นชั้น คล้ายกับหัวหอมไม่มีข้อบกพร่องของรอยเชื่อม เนื้อเชื่อมมีความสมบูรณ์ ในพื้นที่กวนตลอดความยาวของรอยเชื่อม ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 โครงสร้างมหภาค ของหัวกวนทรงกระบอกเรียบ
ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที
ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.25 โครงสร้างมหภาคระหว่างพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนกับบริเวณพื้นที่เนื้อเดิม
ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม
22 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ

จากการตรวจสอบโครงสร้างบริเวณเนื้อ โลหะเดิม (Base material, BM) และบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affect zone, HAZ) เป็นพื้นที่อยู่ระหว่างผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิมพบว่า บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน โครงสร้างมีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยสังเกตได้จากบริเวณขอบเกรนจะมีขนาดที่หนาขึ้นจนเห็นความแตกต่างขอบเขตของพื้นที่ได้ชัดเจนระหว่างบริเวณเนื้อโลหะเดิม และบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน ดังรูปที่ 4.25

บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล ซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างเป็น 2 ส่วน คือ ด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) และด้านรีทเรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS) จากการทดลองพบว่า โครงสร้างด้านแอดวานซิงไซด์เกิดจากการกวนของตัวกวนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โลหะที่อ่อนตัวไหลวนคู่ไปตามทิศทางการหมุนรอบตัวกวนทำให้เกิด โครงสร้างที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่างบริเวณพื้นที่กวน และพื้นที่รับผลกระทบทางความร้อนมีเกรนขนาด 50-60 ไมโครเมตร โดยโครงสร้างเกรนมีลักษณะยาวรี ดังรูปที่ 4.26 (ก) และยึดไปตามทิศทางของหัวกวน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ในส่วนโครงสร้างด้านรีทเรตติ้งไซด์ เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการหมุนของตัวกวนในทิศทางกวนเคลื่อนเชื่อมแนวเชื่อมที่ตรงกันข้ามทำให้มีลักษณะ โครงสร้างเป็นบริเวณแคบ ๆ ดังรูปที่ 4.26 (ข)



(ก) โครงสร้างบริเวณด้านรีทเรตติ้งไซด์

(ข) บริเวณด้านแอดวานซิงไซด์

รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกลของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที หัวกวนทรงกระบอกเรียบ

โครงสร้างบริเวณพื้นที่กวน (Stir zone, SZ) เป็นบริเวณพื้นที่ที่หัวกวนสัมผัสโดยตรงจากหัวกวน โดยโครงสร้างตรงกลางรอยเชื่อมจะมีโครงสร้างที่มีเกรนเล็กละเอียด และ

โครงสร้างจะค่อย ๆ หยาบขึ้นไปจนถึงด้านแอดวานซ์ไซด์ และด้านรีเทรตไซด์ บริเวณพื้นที่ถูกกวนจะพบว่า ทิศทางการไหลของวัสดุที่เห็นได้ชัดเจนมีลักษณะคล้ายเป็นวงแหวนที่หมุนวนจากทางด้านรีเทรตไซด์ไปยังด้านแอดวานซ์ไซด์ ส่งผลให้รูปร่างของโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมมีความแตกต่างจากบริเวณเนื้อพื้นเดิมของวัสดุอย่างชัดเจน โดยเกรนมีขนาดที่เล็กละเอียดมาก เนื่องจากบริเวณที่ถูกกวนมีอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการตกผลึกใหม่และการเสียรูปแบบพลาสติก ทำให้เกรนมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว

4.8 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลชิ้นงานหลังเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

จากการทดลองหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากผลวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ ความแข็งแรงดึงที่ดี และไม่เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม ผู้วิจัยจึงเลือกพารามิเตอร์นี้นำมาทดลอง

โดยเพิ่มปัจจัยของอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อขนาดหัวกวน เพื่อลดแรงกดและความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเชื่อมสามารถช่วยให้บริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างไม่มาก เกิดครีบน้อยลง และปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกลไกการตกตะกอน โดยการทำการบวกรวมการทางความร้อนก่อนและหลังในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 เพื่อให้สมบัติทางกลของชิ้นงานมีความแข็งแรงดิ่งเพิ่มขึ้นตามขั้นตอนดังนี้

- 1) ทดลองพารามิเตอร์ของอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d)
- 2) การทำการบวกรวมการทางความร้อนก่อนและหลังเชื่อมเสียดทานแบบกวน

4.8.1 การเชื่อมเสียดทานของอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) เท่ากับ 3 เท่า

ในการปรับปรุงพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองโดยกำหนดปัจจัยในการทดลองเพิ่มขึ้นอีก 1 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่อัตราส่วนเท่ากับ 3 เท่า จากเดิมที่ใช้อัตราส่วนเท่ากับ 4 เท่า คือ ขนาดปากกวน 20 มิลลิเมตร หัวกวน 5 มิลลิเมตร จากรายงานวิจัยมีนักวิจัยหลายท่านนำมาทดลองที่ใช้วิธีการทางสถิติช่วยหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) เท่ากับ 3 เท่า ให้ค่าประสิทธิภาพของแนวเชื่อมที่สูงถึง 90 % ของการทดลอง (Boulaheem และคณะ, 2015) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกพารามิเตอร์ของอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) โดยมีระดับปัจจัย 2 ระดับ คือ ขนาดปากกวน 12 มิลลิเมตร หัวกวน 4 มิลลิเมตร และขนาดปากกวน 15 มิลลิเมตร หัวกวน 5 มิลลิเมตร ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองที่จะนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

4.8.1.1 โครงสร้างทางกายภาพและลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อม

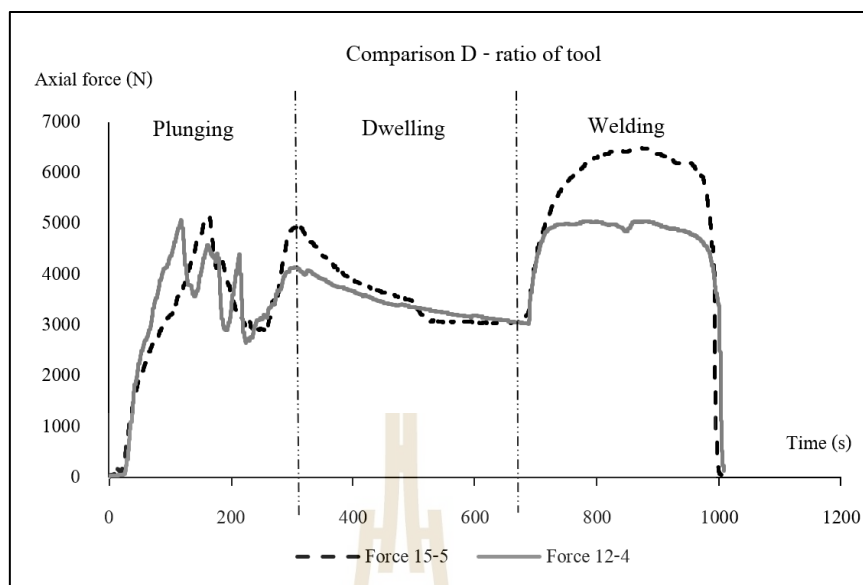
จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนลักษณะผิวของรอยเชื่อมมีการประสานกันได้ดีไม่เกิดรอยแยกและข้อบกพร่องบนผิวตามแนวเชื่อม ลักษณะโดยทั่วไปมีผิวเรียบ มันวาวเกล็ดของผิวเชื่อมละเอียด และบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) เกิดครีบน้อยกว่าด้านรีทเรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS) เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) ดังรูปที่ 4.28

อัตราส่วนของขนาดปากกวน กับหัวกวน	ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที
ปากกวน 12 มิลลิเมตร หัวกวน 4 มิลลิเมตร	
ปากกวน 15 มิลลิเมตร หัวกวน 5 มิลลิเมตร	

รูปที่ 4.28 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที
ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

4.8.1.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์แรงกด

จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าแรงกดขณะเชื่อมที่เกิดขึ้น จากเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบเท่ากับ 3 เท่า ปากกวนขนาด 12 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 4 มิลลิเมตร และปากกวนขนาด 15 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 5 มิลลิเมตร ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า แรงกดขณะเดินเชื่อมของทุกช่วงมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3,876 และ 4,104 นิวตัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.29 จากกราฟแสดงให้เห็นค่าแรงกดสูงสุดของอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ปากกวนขนาด 15 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 5 มิลลิเมตร มีค่าแรงกดสูงสุดที่ 6,495 นิวตัน ในการเดินเชื่อมในช่วงที่ 3 แรงกดที่สูงนั้นช่วยให้ลดข้อบกพร่องที่จะเกิดในรอยเชื่อม (K. Kumar & Kailas, 2008) ขณะที่ค่าแรงกดต่ำสุดของอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ปากกวนขนาด 12 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 4 มิลลิเมตร มีค่าแรงกดต่ำสุดที่ 4,912 นิวตัน



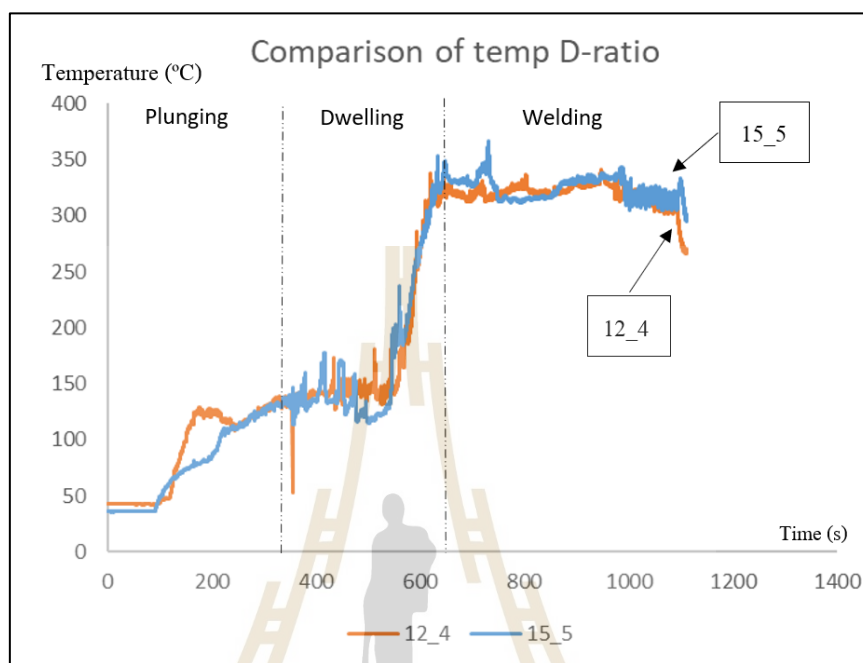
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าแรงกดเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวต่อหัวกว
(D/d) ของรูปทรงหัวกวแบบทรงกระบอกเรียบ เท่ากับ 3 เท่า

4.8.1.3 ความร้อนขณะเชื่อม

จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า ความร้อนขณะเชื่อมที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวต่อหัวกว (D/d) ของรูปทรงหัวกวแบบทรงกระบอกเรียบเท่ากับ 3 เท่า ปากกวขนาด 12 มิลลิเมตร หัวกวขนาด 4 มิลลิเมตร และปากกวขนาด 15 มิลลิเมตร หัวกวขนาด 5 มิลลิเมตร ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบในการหมุนกว 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทดลองพบว่า ความร้อนในช่วงที่ 1 สร้างความร้อนได้จากหัวกวมี่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเข้าสู่ช่วง 2 เมื่อป่าหัวกวสัมผัสชิ้นงานความร้อนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 150-200 องศาเซลเซียส ในช่วงที่ 3 เมื่อหัวกวเริ่มเคลื่อนที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นอยู่ในช่วงระหว่าง 300-350 องศาเซลเซียส จะเกิดความร้อนที่สูงของช่วงอุณหภูมิในการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) เกรนใหม่จะเริ่มเกิดขึ้นและความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (Dislocation) จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้โครงสร้างบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวมมีขนาดของเกรนของผลึกใหม่จะยิ่งเล็กลง ส่งผลดีต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ช่วยลดค่าหน้าต่าง ๆ และความเสียหายจากการแตกร้าวในบริเวณรอยเชื่อม

ในการวัดอุณหภูมิภายใต้กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนพบว่า ความร้อนขณะเดินเชื่อมของทุกช่วงมีค่าใกล้เคียงกันเฉลี่ยประมาณ 206 และ 207 องศาเซลเซียส

ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30 จากกราฟแสดงให้เห็นค่าความร้อนสูงสุดของหัวกวนทั้ง 2 ระดับ มีค่าความร้อน ในการเดินเชื่อมในช่วงที่ 3 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 340 และ 360 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

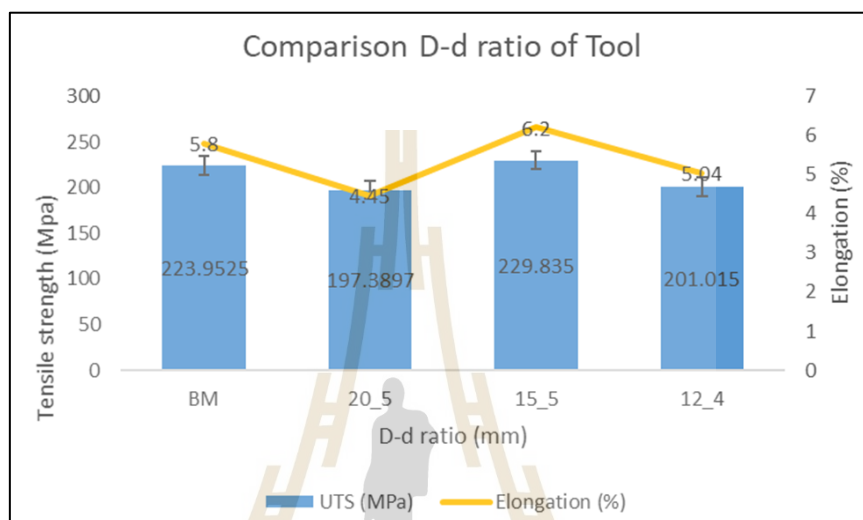


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าความร้อนกราฟแสดงค่าแรงกดเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วนความโตป่า เครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบเท่ากับ 3 เท่า

4.8.1.4 สมบัติความแข็งแรงดึง

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.31 พบว่า หัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบเท่ากับ 3 เท่า ปากวนขนาด 15 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 5 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 229.8 MPa ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนในการเชื่อม (Heat input) และแรงกดที่เหมาะสม ส่งผลให้พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนน้อยกว่า อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบเท่ากับ 4 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่การขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณของรอยเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ทางด้านรีเทตริงไซด์ (Retreating side) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มี

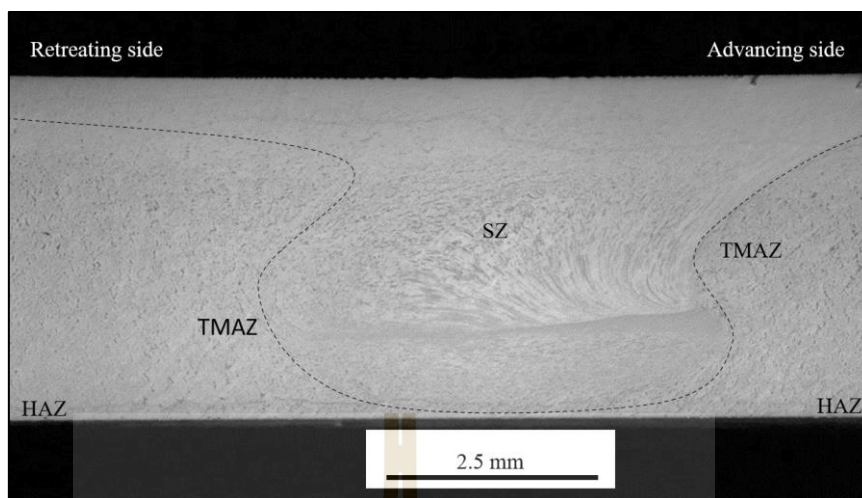
การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเกรนในบริเวณที่รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เกรนมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างเดิมทำให้ความแข็งแรงดิ่งลดลง โดยค่าแรงดิ่งสูงสุดในการทดลองที่ความต่างระหว่างอัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) นี้มีค่าเท่ากับ 229.3 MPa มีประสิทธิภาพใกล้เคียงของความแข็งแรงวัสดุพื้น



รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบความแข็งแรงดิ่งของอัตราส่วนของขนาดป่ากวนกับหัวกวน

4.8.1.5 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

จากผลการทดสอบแรงดิ่งพบว่า รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าที่ให้ความแข็งแรงที่สูงสุด ที่อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบเท่ากับ 3 เท่า ป่ากวนขนาด 15 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 5 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที โดยนำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็งเกรด 2024 โดยการตัดชิ้นทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับแนวเชื่อมและให้แนวเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นงานทดสอบ ขัดตามขั้นตอนของการเตรียมชิ้นทดสอบ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของการเชื่อม รอยเชื่อม และเขตอิทธิพลความร้อนด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) และด้านรีเทตริงไซด์ (Retreating side, RS) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ จากการตรวจสอบโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อมนั้น ไม่มีข้อบกพร่องเกิดขึ้น ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างมหภาคสามารถสังเกตรูปร่าง ทิศทางการไหลของวัสดุ และพื้นที่ในส่วนต่าง ๆ ของรอยเชื่อมได้ชัดเจน ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 โครงสร้างมหภาคบริเวณพื้นที่รอยเชื่อม

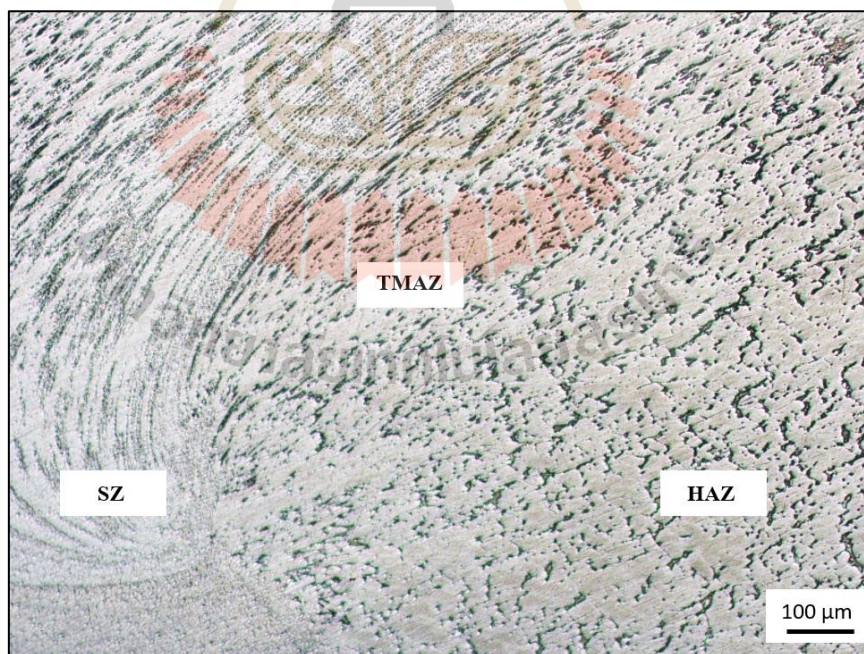


รูปที่ 4.33 โครงสร้างมหภาคระหว่างพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน และบริเวณเนื้อโลหะเดิม

บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affect zone, HAZ) เป็นพื้นที่อยู่ระหว่างผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิมคือ บริเวณที่ห่างจากตัวกวนมีเกรนขนาด 200 ถึง 300 ไมโครเมตร โครงสร้างมีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากการตรวจสอบทางโครงสร้างทางมหภาคจะสังเกตเห็นเส้นแบ่งระหว่าง โครงสร้างบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน

และโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base material, BM) ของอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ได้ชัดเจน ซึ่งโครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม มีลักษณะโครงสร้างเป็นก้อนกลม ความร้อนที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนไม่ทำส่งผลกระทบต่อโครงสร้างเดิม ดังรูปที่ 4.33

บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็น 2 ส่วน คือ ด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) และด้านรีทเรตติ้งไซด์ (Retreating side, RS) จากการตรวจสอบทางโครงสร้างจุลภาคพบว่า ลักษณะของโครงสร้างด้านแอดวานซิงไซด์ที่เกิดจากการกวนของตัวกวนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โลหะที่อ่อนตัวไหลวนคู่ไปตามทิศทาง การหมุนรอบตัวกวนทำให้เกิดโครงสร้างที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่างบริเวณพื้นที่กวนและพื้นที่รับผลกระทบทางความร้อนเป็นพื้นที่บริเวณแคบ ๆ มีเกรนขนาด 50 ถึง 60 ไมโครเมตร ด้านรีทเรตติ้งไซด์ จะสังเกตเห็นบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล โครงสร้างเกรนมีลักษณะยาวรีและยืดไปตามทิศทางของหัวกวน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลในส่วนโครงสร้างด้านรีทเรตติ้งไซด์ เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการหมุนของตัวกวนในทิศทางการเดินเชื่อมแนวเชื่อมที่ตรงกันข้ามทำให้มีลักษณะประมาณ 500 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล



รูปที่ 4.35 โครงสร้างจุลภาคบริเวณพื้นที่ถูกกวนด้วยเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วนความโตบ่า เครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) เท่ากับ 3 เท่า บ่ากวนขนาด 15 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 5 มิลลิเมตร ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

โครงสร้างบริเวณพื้นที่กวน (Stir zone, SZ) เป็นบริเวณพื้นที่ที่หัวกวนสัมผัสโดยตรงจากหัวกวน โดยโครงสร้างตรงกลางรอยเชื่อมจะมีโครงสร้างที่มีเกรนเล็กละเอียดและโครงสร้างจะค่อย ๆ หยิบขึ้นไปจนถึงด้านรีเทรตติ้งไซด์ บริเวณพื้นที่ถูกกวนจะพบว่าทิศทางการไหลของวัสดุที่เห็นได้ชัดเจนมีลักษณะคล้ายเป็นวงแหวนที่หมุนวนจากทางด้านรีเทรตติ้งไซด์ไปยังด้านแอดวานซ์ติ้งไซด์ ส่งผลให้รูปร่างของโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมมีความแตกต่างจากบริเวณเนื้อพื้นเดิมของวัสดุอย่างชัดเจน โดยเกรนมีขนาดที่เล็กละเอียดมาก เนื่องจากบริเวณที่ถูกกวนมีอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการตกผลึกใหม่และการเสียรูปแบบพลาสติก ทำให้เกรนมีขนาดเล็กประมาณ 3 ถึง 5 ไมโครเมตร โครงสร้างบริเวณนี้ประกอบไปด้วยอนุภาคทองแดงและแมกนีเซียมผสมอยู่ในออลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวน อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนของเครื่องมือเชื่อมกับเนื้ออะลูมิเนียมเกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม และเฟสยูเทคติกทำให้เนื้อที่ถูกกวนเกิดการประสานเข้ากันกันได้ดีของชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้น ที่นำมาเชื่อมด้วยวิธีการต่อชน สภาวะในการเชื่อมนี้ส่งผลให้การไหลของเนื้อวัสดุมีการไหลตัวที่ดีไม่เกิดข้อบกพร่องใด ๆ เป็นสภาวะที่มีความร้อนและแรงกด

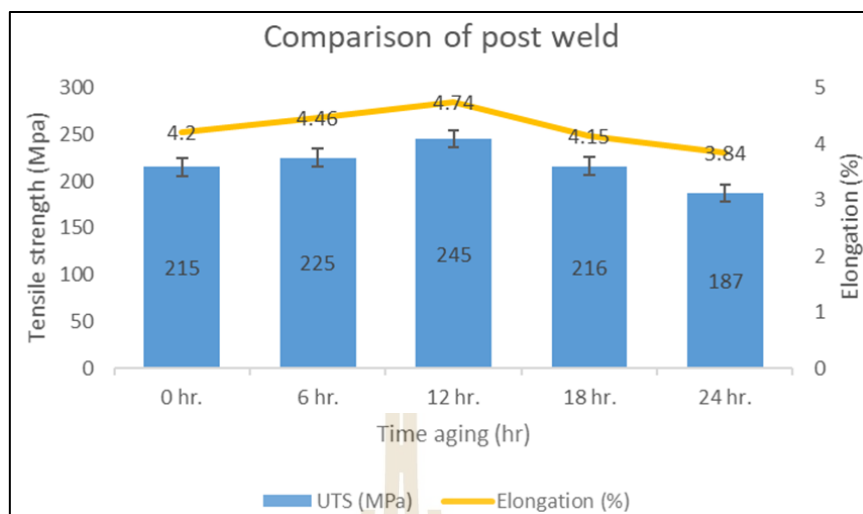
ในการเชื่อมที่เหมาะสม ส่งผลให้พื้นที่บริเวณรอยเชื่อมและรูปร่างรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.35

4.8.2 การทำกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังเชื่อม

จากผลการทดลองทดสอบแรงดึงในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของเครื่องมือเชื่อมที่อัตราส่วนความโตป่าเครื่องมือกวนต่อหัวกวน (D/d) ของรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ เท่ากับ 3 เท่า ปากกวนขนาด 15 มิลลิเมตร หัวกวนขนาด 5 มิลลิเมตร ทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงที่สูงสุด ผู้วิจัยจึงเลือกปัจจัยของระดับนี้นำมาปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยการทำกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังเชื่อม โดยนำวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024 ไปอบละลายที่อุณหภูมิ 505 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุมาขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้ตามขนาดเพื่อทำการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยพารามิเตอร์ข้างต้น หลังจากที่เชื่อมได้ นำชิ้นงานมาบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยกำหนดระดับปัจจัยของเวลาที่ใช้บ่มแข็ง 5 ระดับ คือ 0, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงสุดและนำชิ้นงานที่ได้จากการทำกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังเชื่อมไปตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและทางจุลภาค

4.8.2.1 สมบัติความแข็งแรงดึง

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และนำมาบ่มแข็งที่เวลา 12 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 245 MPa ดังรูปที่ 4.36 เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายแล้วที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าวทำให้สารละลายอิมตัวยิ่งยวด มีการแพร่เข้าสู่ภายในเมทริกซ์อะลูมิเนียมนั้นเกิดการฟอร์มตัวเกิดพรีซิพิเตต (Precipitate) คือ เฟสที่เรียกว่า “จีพีโซน (GP zone)” เมื่อเวลาผ่านไปจีพีโซนจะค่อย ๆ เกิดการขยายตัว ส่งผลให้ความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น ที่เวลาบ่มแข็ง 6 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งแรงดึง 225 MPa และให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่สภาวะบ่มแข็งหลังเชื่อมที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ที่เวลา 12 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิข้างต้นเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มแข็งที่ 18 และ 24 ชั่วโมง ทำให้พรีซิพิเตตที่อยู่ภายในเกรนเกิดการขยายตัวจากเฟสที่ไม่เสถียรกลายเป็นเฟสที่มีความเสถียร ส่งผลให้ความแข็งและความแข็งแรงค่อย ๆ ลดลง



รูปที่ 4.36 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของอัตราส่วนของขนาดปากกวนกับหัวกวน

4.8.2.2 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

การบ่มแข็งที่เวลา 12 ชั่วโมง ที่สภาวะนี้มีการกระจายตัวของทองแดงและแมกนีเซียม กระจายตัวที่สม่ำเสมอในเนื้อเมตริกซ์ และตามบริเวณของเกรน การบ่มแข็งที่เย็นหลังการอบละลายและการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของสภาวะนี้ทำให้สารละลาย (ทองแดงและแมกนีเซียม) เกิดการฟอร์มตัวเป็นพรีซิพิเตต (Precipitate) ซึ่งส่งผลให้ได้สมบัติทางกลที่ดีของชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่สเกล 50 ไมโครเมตร พบว่าโครงสร้างที่ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างกัน ได้แก่ 0, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.37

เวลาที่ใช้ปมแข็งเทียม	ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที
As welded	
6 ชั่วโมง	
12 ชั่วโมง	
18 ชั่วโมง	
24 ชั่วโมง	

รูปที่ 4.37 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการปมแข็งที่อุณหภูมิ 190 °C
ที่เวลา 0, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง

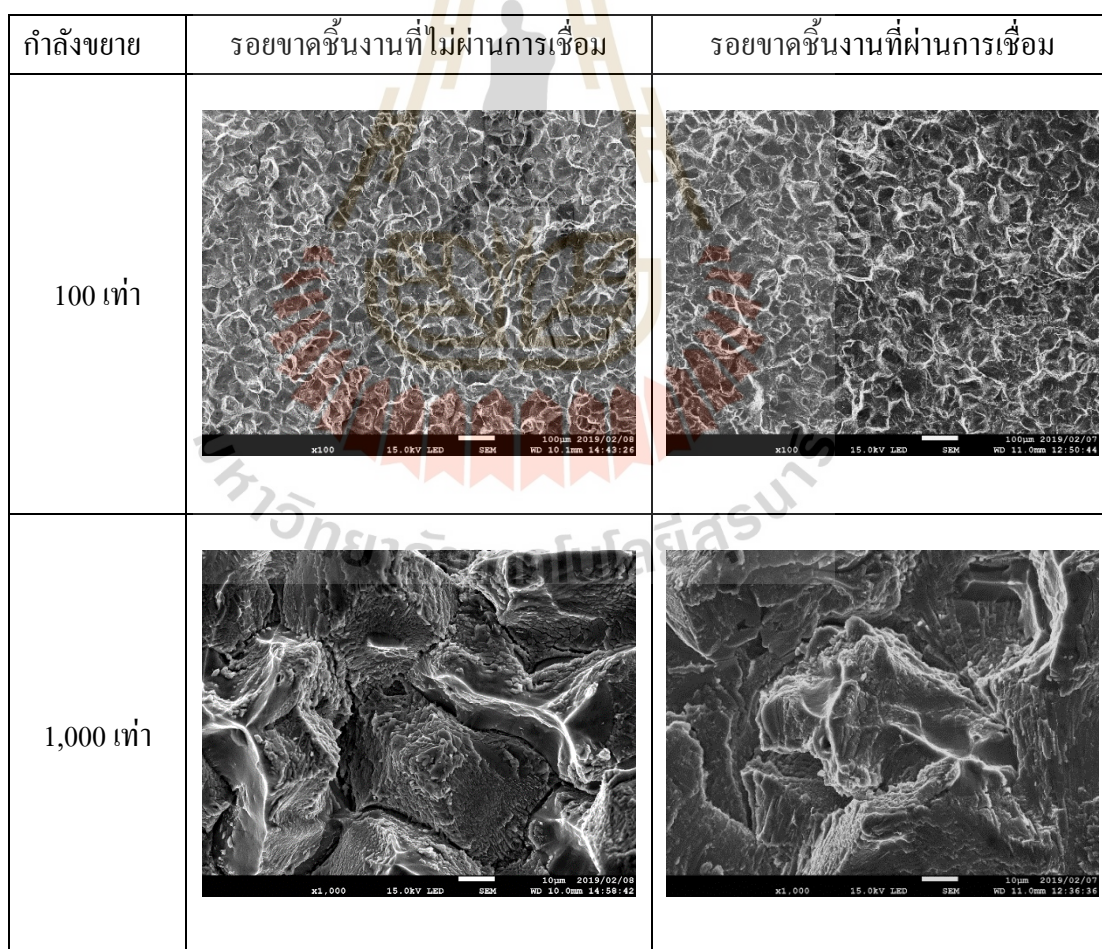
4.9 การวิเคราะห์ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีระบบ เอ็กซ์เรย์ (EDX) ของผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 หลังทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อเปรียบเทียบลักษณะบริเวณจุดแตกหักจากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงจากการทดสอบพบว่า บริเวณที่เกิดการแตกหักทำให้ชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกัน เกิดขึ้นบริเวณที่อยู่ถัดมาจากบริเวณรอยเชื่อมหรือบริเวณที่ถูกเครื่องมือกวนสัมผัส โดยบริเวณดังกล่าวอยู่ในพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ทางด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating side) เป็นส่วนมาก ซึ่งบริเวณนี้จะมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณพื้นที่อื่น ๆ ในแนวเชื่อม (Lakshinaryanan และคณะ, 2011; Xu Lui และคณะ 2012) ดังรูปที่ 4.38



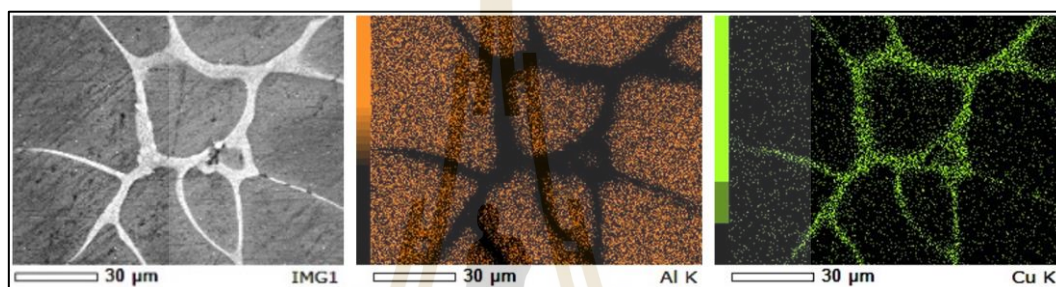
รูปที่ 4.38 บริเวณจุดแตกหักจากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง

จากการตรวจสอบบริเวณจุดแตกหักของโครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะผิวชิ้นงานระหว่างชิ้นงานทดสอบที่เป็นวัสดุพื้นไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทาน กับชิ้นงานผ่านการทดลองด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยกำลังขยาย 100 เท่า และ 1,000 เท่า พบว่า พื้นที่ชิ้นงานขาดออกจากกันอยู่ในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เมื่อนำไปตรวจสอบด้วยภาพถ่าย และกราฟในการทดสอบแรงดึง ชิ้นงานมีลักษณะขาดแบบเปราะ โดยการแตกหักที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นรอยยาวของการกะเทาะหรือรอยร้าวที่เป็นเส้นยาว ผิวโลหะที่แตกค่อนข้างตรงและค่อนข้างวาวเมื่อมองด้วยตาเปล่า และเมื่อเปรียบเทียบขนาดเกรนพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมรอยขาดของเกรนที่บริเวณนี้มีขนาดที่ใหญ่กว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเชื่อม ประมาณ 10 ถึง 15 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.39



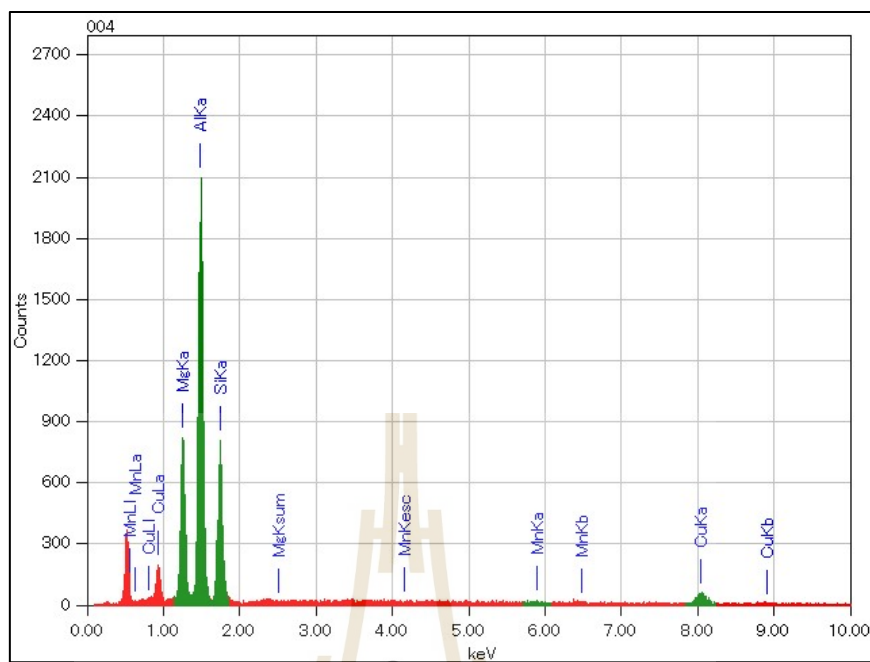
รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของรอยแตกหัก

จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDX ของบริเวณจุดเกิดการแตกหักโครงสร้างจุลภาคจากการทดสอบความแข็งแรงดึง ด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีระบบเอ็กซ์เรย์ (EDX) พบว่าในพื้นที่บริเวณผลกระทบจากความร้อนที่สภาวะหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถสังเกตรูปร่างของเกรนและบริเวณขอบเกรนได้อย่างชัดเจน และพบการกระจายตัวของธาตุทองแดง (Cu) อย่างเด่นชัดในบริเวณพื้นที่ขอบเกรนเป็นจำนวนมาก และมีการกระจายตัวของธาตุแมกนีเซียม ดังรูปที่ 4.40 บริเวณพื้นที่ขอบเกรนนี้เมื่อนำไปตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบจะพบเฟสยูเทคติก $Mg-Al_2Cu/Cu-Al_2$



รูปที่ 4.40 การกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ จาก EDX บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

รูปที่ 4.41 แสดงธาตุอะลูมิเนียมเป็นเนื้อหลักและธาตุที่เป็นองค์ประกอบอื่น ๆ ในส่วนบริเวณขอบเกรน จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยมีระบบเอ็กซ์เรย์ (EDX) พบส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ มีสัดส่วนดังนี้ อะลูมิเนียม (Al) 54.18% แมกนีเซียม (Mg) 20.87% ซิลิกอน (Si) 20.31% แมงกานีส (Mn) 2.81% และทองแดง (Cu) 4.34% ซึ่งธาตุผสมเหล่านี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานเชื่อมรวมถึงช่วยในด้านกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) การผสมธาตุทองแดงและแมกนีเซียม เข้าไปจะช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรง (L.B Ber; 2000) แต่หากมีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลต่อ ความแข็งแรงดึง ความเหนียว (Toughness) เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของวัสดุ และความสามารถในการกระทำกระบวนการทางความร้อน



รูปที่ 4.41 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การดำเนินการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็งเกรด 2024 ผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 5.1 พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงดึง
- 5.2 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.1 พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงดึง

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง วัสดุพื้นมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ย 224 MPa และผลที่ได้จากการเชื่อมด้วยหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 212 MPa ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากค่าความร้อนในการเชื่อม (Heat Input) ที่เหมาะสม ความเร็วในการหมุนกวนต่ำและความเร็วในการเดินเชื่อมสูงทำให้อุณหภูมิในขณะเชื่อมไม่สูงมาก ส่งผลให้พื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนน้อย เกรนมีขนาดเล็กกว่าการเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 790 รอบต่อนาที ที่เกิดอุณหภูมิในการเชื่อมสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึงที่การขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณขอบรอยเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ทางด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating Side) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเกรนในบริเวณที่รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เกรนมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างเดิมทำให้ความแข็งแรงดึงลดลง ขณะที่หัวกวนแบบทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 145 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 790 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทดลองในงานวิจัยนี้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 212 MPa มีประสิทธิภาพ 99% ของความแข็งแรงวัสดุพื้น

ผลวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวน และรูปทรงของหัวกวน ตามลำดับ โดยความเร็วในการเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ และ พารามิเตอร์

ที่ให้ความแข็งแรงที่ดีและเหมาะสมในการนำมาปรับปรุงสมบัติเชิงกลในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยหัวกวนรูปทรงแบบทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

5.2 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

การปรับปรุงหลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การเปลี่ยนขนาดสัดส่วนรูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ จากขนาดหัวกวนต่อปากกวนเดิมเท่ากับ 4 เท่า โดยที่ปากกวนมีขนาด 20 มิลลิเมตร และหัวกวนมีขนาด 5 มิลลิเมตร ปรับปรุงให้สัดส่วนของปากกวนต่อหัวกวนลดลงเหลือเท่ากับ 3 เท่า ปากกวนมีขนาด 15 มิลลิเมตร และหัวกวนมีขนาด 5 มิลลิเมตร นำมาเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้นจากเดิม มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 230 MPa มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับความแข็งแรงวัสดุพื้น

2) การทำกระบวนการทางความร้อนก่อนและหลังการเชื่อมส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงจากเดิม โดยการนำอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็งเกรด 2024 นำไปอบละลายที่อุณหภูมิ 505 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการอบละลายไปผ่านกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยหัวกวนทรงกระบอกเรียบที่มีสัดส่วนของปากกวนต่อหัวกวน 3 เท่า คือ มีขนาดปากกวน 15 มิลลิเมตร และขนาดหัวกวน 5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง พบว่า การบ่มแข็งเทียมเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 245 MPa มีประสิทธิภาพ 109% ของความแข็งแรงวัสดุพื้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าองค์ความรู้และกระบวนการในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็งเกรด 2024 นี้ จะเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยการเชื่อมในรูปแบบอื่น ๆ ต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งควรมีการออกแบบและสร้างเครื่องมือ อุปกรณ์เฉพาะทาง สำหรับการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เพื่อให้เกิดแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมให้มีประสิทธิภาพที่ดี สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริงและเกิดประโยชน์สูงสุด

รายการอ้างอิง

- Aval, H., Serajzadeh, S., & Kokabi, A. (2012). Experimental and theoretical evaluations of thermal histories and residual stresses in dissimilar friction stir welding. **Int J Adv Manuf Technol**, 61, 149-160.
- Bhanodaya Kiran Babu, N., Davidson, M., Neelakanteswara Rao, A., & Balasubramanian, K. (2014). Effect of differential heat treatment on the formability of aluminum tailor welded blanks. **Materials and Design**, 55, 35-42.
- El-Danaf, E., & El-Rayes, M. (2013). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 AA in as welded and post weld heat treated conditions. **Materials and Design**, 46, 561-572.
- Ilangvan, M., Rajendra Boopathy, S., & Balasubramanian, V. (2015). Microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA6061-AA5086 aluminums alloy joints. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 25(4), 1080-1090.
- Kasman, S. (2013). Multi-response optimization using the Taguchi-based grey relational analysis: a case study for dissimilar friction stir butt welding of AA6082-T6/AA5754-H111. **Int J Adv Manuf Technol**, 68, 795-804.
- Liu, F., & MA, Z. (2008). Influence of Tool Dimension and Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded 6061-T651 Aluminum Alloy. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 39A, 2378-2388.
- Liu, H., Zhang, H., Pan, Q., & Yu, L. (2012). Effect of friction stir welding parameters on microstructural characteristics and mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints. **Int J Mater Form**, 5, 235-241.
- Mishra, R., Sarathi De, P., & Kumar, N. (2014). Friction Stir Welding and Processing Science and Engineering. **Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London**.
- Mishra, R., & Ma, Z. (2005). Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering**, R 50, 1-78.

- Tan, C., jiang, Z., Li, L., Chen, T., & Chen, X. (2013). Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints produced by friction stir welding. **Materials and Design**, 51, 466-473.
- Yoon, S., Kang, M., Nam, H., Kwon, Y., Hong, S., Kim, J., . . . Seo, J. (2012). Friction stir butt welding of A5052-O aluminum alloy plates. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22, s619-s623.
- Adalarasan, R., & Santhanakumar, M. (2015). Parameter Design in Fusion Welding of AA6061 Aluminium Alloy using Desirability Grey Relational Analysis (DGRA) Method. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series C**, 96 (1), 57-63.
- Ahmadnia, M., Shahraki, S., & Kamarposhti, M. (2016). Experimental studies on optimized mechanical properties while dissimilar joining AA6061 and AA5010 in a friction stir welding process. **Int J Adv Manuf Technol**,
- Amir, H., & Salman, N. (2014). Effect of Welding Parameters on Microstructure, Thermal, and Mechanical Properties of Friction-Stir Welded Joints of AA7075-T6 Aluminum Alloy. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 45A, 2792-2807.
- Baffari, D., Buffa, G., Campanella, D., Fratini, L., & Micari, F. (2014). Friction based Solid State Welding Techniques for Transportation Industry Applications. **Procedia CIRP**, 18, 162-167.
- Bechetti, D., Dupont, J., J.J. de Barbadillo, & Baker, B. (2014). Homogenization and Dissolution Kinetics of Fusion Welds in INCONEL Alloy 740H. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 45A, 3051-3063.
- Bisadi, H., Rasaei, S., & Farahmand, M. (2014). Effects of Pin Shape on the Tool Plunge Stage in Friction Stir Welding. **Trans Indian Inst Met**, 67(6), 989-995.
- Bisadi, H., Tavakoli, A., Sangsaraki, M., & Sangsaraki, K. (2013). The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir weld Al5083 and commercially pure copper sheets lap joint. **Materials and Design**, 43, 80-88.
- Boulaheem, K., Salem, S., & Bessrouer, J. (2015). Surface Roughness Model and Parametric Welding Optimization in Friction Stir Welded AA2017 Using Taguchi Method and Response Surface Methodology. **Design and Modeling of Mechanical Systems-II**, 83-93.

- Cavaliere, P., Nobile, R., Panella, F., & Squillace, A. (2006). Mechanical and microstructural behaviour of 2024-7075 aluminum alloy sheets joined by friction stir welding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 46, 588-594.
- Chen, H., Yan, K., Lin, T., Chen, S., Jiang, C., & Zhao, Y. (2006). The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. **Materials Science and Engineering A**, 433, 64-69.
- Chen, R., Wang, C., Jiang, P., Shao, X., Zhao, Z., Gao, Z., & Yue, C. (2016). Effect of axial magnetic field in the laser beam welding of stainless steel to aluminum alloy. **Materials and Design**, 109, 146-152.
- Chennaiah, M., Kumar, P., & Rao, K. (2015). Effect of Pulsed TIG Welding Parameters on the Microstructure and Micro-Hardness of AA6061 Joints. **Material Science & Engineering**, 4(4), 1-4.
- Contuzzi, N., Campanelli, S., Casalino, G., & Ludovico, A. (2016). On the role of the Thermal Contact Conductance during the Friction Stir Welding of an AA5754-H111 butt joint. **Applied Thermal Engineering**.
- De Backer, J. (2014). Feedback control of robotic friction stir welding. (Vol. 74). **University West: 136**.
- Des, P. (1996). Aluminum casting technology. **Ameran Foundrymen's Society**.
- Devinder, Y., & Ranjit, B. (2012). Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of aluminium. **Materials Science and Engineering**, A 539, 85-92.
- Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. **Materials & Design**, 29(2), 362-373.
- Elatharasan, G., & Senthil Kumar, V. (2013). An experimental analysis and optimization of process parameter on friction stir welding of AA6061-T6 aluminum alloy using RSM. **Procedia Engineering**, 64, 1227-1234.
- Fei, X., Jin, X., Ye, Y., Xiu, T., & Yang, H. (2016). Effect of pre-hole offset on the property of the joint during laser-assisted friction stir welding of dissimilar metals steel and aluminum alloys. **Materials Science & Engineering A**, 653, 43-52.

- Forcellese, A., Martarelli, M., & Simoncini, M. (2015). Effect of process parameters on vertical forces and temperatures developed during friction stir welding of magnesium alloys. **Int J Adv Manuf Technol**, Doi:10.1007/s00170-015-7957-6.
- Galvao, I., Loureiro, A., Verdera, D., & Gesto, D. (2012). Influence of Tool Offsetting on the Structure and Morphology of Dissimilar Aluminum to Copper Friction-Stir Welds. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 43A, 5096-5105.
- Genevois, C., Girard, M., Huneau, B., Sauvage, X., & Racineux, G. (2011). Interfacial Reaction during Friction Stir Welding of Al and Cu. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 42(8), 2290-2295.
- Ghaffarpour, M., Kolahgar, S., Mollaei Dariani, B., & Dehghani, K. (2013). Evaluation of Dissimilar Welds of 5083-H12 and 6061-T6 Produced by Friction Stir Welding. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Volume 44 A, 3697-3707.
- Giraud, L., Robe, H., Claudin, C., Desrayaud, C., Bocher, P., & Feulvarch, E. (2016). Investigation into the dissimilar friction stir welding of AA7020-T651 and AA6060-T6. **Journal of Materials Processing Technology**, 235, 220-230.
- GUÉRLER, R. (1998). Fusion welding of SiC particulate-reinforced aluminum 392 metal matrix composite. **Journal of Materials Science Letters**, 17, 1543-1544.
- Guo, H., Hu, J., & Tsai, H. (2009). Formation of weld crater in GMAW of aluminum alloys. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 52, 5533-5546.
- Guo, J. (2015). Solid State Welding Processes in Manufacturing. In J. Guo, **Handbook of Manufacturing Engineering and Technology** (pp. 576-583). Springer-Verlag London.
- Guo, J. F., Chen, H., Sun, C., Bi, G., Sun, Z., & Wei, J. (2014). Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters. **Materials & Design**, 56, 185-192.
- Habibnia, M., Shakeri, M., Nourouzi, S., & Besharati Givi, M. (2015). Microstructural and mechanical properties of friction stir welded 5050 Al alloy and 304 stainless steel plates. **Int J Adv Manuf Technol**, 76, 819-829.
- Hakan, A., Mumin, T., Ali, D., Ali, B., & Tayfun, S. (2012). Effect of Welding Parameters on Tensile Properties and Fatigue Behavior of Friction Stir Welded 2014-T6 Aluminum Alloy. **Trans Indian Inst Met**, 65(1), 21-30.

- Huang, Y., Wang, Y., Wan, L., Liu, H., Shen, J., dos Santos, J., . . . Feng, J. (2016). Material-flow behavior during friction-stir welding of 6082-T6 aluminum alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 83(5-8), 1-9.
- Hussein, S., Md Tahir, A., & Izamshah, R. (2015). Generated forces and heat during the critical stages of friction stir welding and processing. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 29 (10), 4319-4328.
- Jain, R., Kumari, K., Kesharwani, R., Kumar, S., Pal, S., Singh, S., . . . Samantaray, A. (2015). Friction Stir Welding: Scope and Recent Development. In **J. Davim, Modern Manufacturing Engineering, Materials Forming** (p. 184). Switzerland: Springer International Publishing.
- Jata, K., & Semiatin, S. (2000). Continuous Dynamic Recrystallization During Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys. **Scripta mater**, 43, 743-749.
- Kah, P., Rajan, R., Martikainen, J., & Suoranta, R. (2015). Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, 10(26), 1-10.
- Karam, A., Mahmoud, T., Zakaria, H., & Khalifa, T. (2014). Friction Stir Welding of Dissimilar A319 and A413 Cast Aluminum Alloys. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 39 (8), 6363-6373.
- Kasman, S., & Yenier, Z. (2014). Analyzing dissimilar friction stir welding of AA5754/AA7075. **Int J Adv Manuf Technol**, 70, 145-156.
- Katayama, S., Kawahitoa, Y., & Mizutania, M. (2010). Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects. **Physics Procedia**, 5, 9-17.
- KE, L., XING, L., & INDACOCHEA, J. (2004). Material Flow Patterns and Cavity Model in Friction-Stir Welding of Aluminum Alloys. **Metallurgical and Materials Transactions B**, 153-160.
- Khan, N., Khan, Z., & Siddiquee, A. (2015). Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength of friction stir welded 6063 aluminium alloy. **Materials Today: Proceedings**, 2, 1450-1457.
- Kim, N., Kim, B., An, Y., Jung, B., Song, S., & Kang, C. (2009). The Effect of Material Arrangement on Mechanical Properties in Friction Stir Welded Dissimilar A5052/A5J32 Aluminum Alloys. **Met. Mater. Int.**, 15(4), 671-675.

- Koilraj, M., Sundareswaran, V., Vijayan, S., & Koteswara Rao, S. (2012). Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 Optimization of process parameters using Taguchi technique. **Materials and Design**, 42, 1-7.
- Kumar, K. &. (2008). The role of friction stirs welding tool on material flow and weld formation. **Materials Science and Engineering**, 51(3), 485(1-2), 367-374.
- Kumar, R., Dilthey, U., Dwivedi, D., & Ghosh, P. (2009). Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding. **Materials and Design**, 30, 306-313.
- Kumar, R., Singh, K., & Pandey, S. (2012). Process forces and heat input as function of process parameters in AA5083 friction stir welds. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22(2), 288-298.
- LAKSHMINARAYANAN, A., MA LARVIZHI, S., & BALASUBRAMANIAN, V. (2011). Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 21, 2339-2347.
- Lan, S., Liu, X., & Ni, J. (2016). Microstructural evolution during friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high-strength steel. **Int J Adv Manuf Technol**, 82, 2183-2193.
- Li, B., & Shen, Y. (2012). A feasibility research on friction stir welding of a new-typed lap-butt joint of dissimilar Al alloys. **Materials and Design**, 34, 725-731.
- Lin, Y.-C., Liu, J.-J., & Chen, J.-N. (2013). Material Flow Tracking for Various Tool Geometries During the Friction Stir Spot Welding Process. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 22(12), 3674-3683.
- M. Nourani, Milani, A., & Yannacopoulos, S. (2015). On experimental optimization of friction stir welding of aluminum 6061: understanding processing-microstructure-property relations. **Int J Adv Manuf Technol**, Doi: 10.1007/s00170-015-6932-6.
- M.Sivashanmugam, Ravikumar, S., Kumar, T., Seshagiri Rao, V., & Muruganandam, D. (2010). A Review on Friction Stir Welding for Aluminium Al. **Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering (FAME)**, 216-221.
- Ma, H., Qin, G., Bai, X., Wang, L., & Liang, Z. (2016). Effect of initial temperature on joint of aluminum alloy to galvanized steel welded by MIG arc brazing-fusion welding process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 1-9.

- Ma, R., Fang, K., Yang, J., Liu, X., & Fang, H. (2014). Grain refinement of HAZ in multi-pass welding. **Journal of Materials Processing Technology**, 214, 1131-1135.
- Ma, Z., Sharma, S., & Mishra, R. (2006). Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum. **Materials Science and Engineering A**, 433, 269-278.
- Mastanaiah, P., Sharma, A., & Madhusudhan Reddy, G. (2015). Dissimilar Friction Stir Welds in AA2219-AA5083 Aluminium Alloys: Effect of Process Parameters on Material Inter-Mixing, Defect Formation, and Mechanical Properties. **Trans Indian Inst Met.**
- Matsunawa, A., Seto, N., Kimft, J., Mizutani, M., & Katayama, S. (2001). Observation of Keyhole and Molten Pool Behavior in High Power Laser Welding. *Trans. JWRI*, 30 (1), 13-27.
- Mei, Y., Liu, Y., Liu, C., Li, C., Yu, L., Guo, Q., & Li, H. (2016). Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718. **Materials and Design**, 89, 964-977.
- Meilinger, A., & Török, I. (2013). The Importance of Friction Stir Welding Tool. **Production Processes and Systems**, 6(1), 25-34.
- Mendes da Silva, C., & Scotti, A. (2006). The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW. *Journal of Materials Processing Technology* 171, 171, 366-372.
- Olea, C., Roldo, L., Strohaecker, T., & dos Santos, J. (2006). Friction Stir Welding of Precipitate Hardenable Aluminium Alloys: A Review. **Welding in the World**, 50(11/12), 78-87.
- Ouyang, J., & Kovacevic, R. (2002). Material Flow and Microstructure in the Friction Stir Butt Welds of the Same and Dissimilar Aluminum Alloys. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 11(1), 51-63.
- Palanivel, R., Koshy Mathews, P., Murugan, N., & Dinaharan, I. (2012). Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys. **Materials & Design**, 40, 7-16.
- Peel, M., Steuwer, A., & Withers, P. (2006). Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. Part II: Process parameter effects on microstructure. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 37(7), 2195-2206.
- Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M., & Withers, P. (2003). Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. **Acta Materialia**, 51(16), 4791-4801.

- R. Kadaganchi, Gankidi, M., & Gokhale, H. (2015). Optimization of process parameters of aluminum alloy AA 2014-T6 friction stir welds by response surface methodology. **Defense Technology**, xx, 1-11.
- Radisavljevic, I., Zivkovic, A., Radovic, N., & Grabulov, V. (2013). Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T3 5 l butt welded joints. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 23, 3525-3539.
- Ramachandran, K., Murugan, N., & Shashi Kumar, S. (2016). Performance analysis of dissimilar friction stir welded aluminium alloy AA5052 and HSLA steel butt joints using response surface method. **Int J Adv Manuf Technol**.
- Ramulu, P., R. Ganesh Narayanan, & Kailas, S. (2013). Forming limit investigation of friction stir welded sheets: influence of shoulder diameter and plunge depth. **Int J Adv Manuf Technol**, 69, 2757-2772.
- Ren, S., Ma, Z., & Chen, L. (2007). Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy. **Scripta Materialia**, 56, 69-72.
- Reshad Seighalani, K., Besharati Givi, M., Nasiri, A., & Bahemmat, P. (2010). Investigations on the Effects of the Tool Material, Geometry, and Tilt Angle on Friction Stir Welding of Pure Titanium. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 19(7), 955-962.
- Rodriguez, R., Jordon, J., Allison, P., Rushing, T., & Garcia, L. (2015). Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding of 6061-to-7050 aluminum alloys. **Materials & Design**, 83(a), 60-65.
- Roshan, S. B., Jooibari, M., Teimouri, R., Asgharzadeh-Ahmadi, G., Falahati-Naghbi, M., & Sohrabpoor, H. (2013). Optimization of friction stir welding process of AA7075 aluminum alloy to achieve desirable mechanical properties using ANFIS models and simulated annealing algorithm. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 69(5-8), 1803-1818.
- Saeid, T., Abdollah-zadeh, A., & Sazgari, B. (2010). Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joint made by friction stir welding. **Journal of Alloys and Compounds**, 490, 652-655.

- Safeen, W., Hussain, S., Wasim, A., & Jahanzaib, M. (2016). Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061- T6 using response surface methodology. **Int J Adv Manuf Technol**.
- Sahu, P., Pal, S., . Pal, S., & Jain, R. (2016). Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints. **Journal of Materials Processing Technology**, 235, 55-67.
- Sattari, S. B. (2012). Mechanical Properties and Temperature Distributions of Thin Friction Stir Welded Sheets of AA5083. **Mechanics and Applications**, 2(1), 1-6.
- Shanmuga Sundaram, N., & Murugan, N. (2010). Tensile behavior of dissimilar friction stir welded joints of aluminium alloys. **Materials and Design**, 31, 4184–4193.
- Sharifitabar, M., Sarani, A., Khorshahian, S., & Shafiee Afarani, M. (2011). Fabrication of 5052 Al/Al₂O₃ nanoceramic particle reinforced composite via friction stir processing route. **Materials & Design**, 32(8-9), 4164-4172.
- Sheikh-Ahmad, J., Ozturk, F., Jarrar, F., & Evis, Z. (2016). Thermal history and microstructure during friction stir welding of Al-Mg alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 1-11.
- Shigematsu, I., Kwon, Y., Suzuki, K., Imai, T., & Saito, N. (2003). Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding. **Journal of Materials Science Letters**, 22(5), 353-356.
- Sidhu, M., & Chatha, S. (2012). Friction Stir Welding-Process and its Variables: A Review. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, 2(12), 275-279.
- Sundaresan, S., Janaki Ram, G., & Madhusudhan Reddy, G. (1999). Microstructural refinement of weld fusion zones in α - β titanium alloys using pulsed current welding. **Materials Science and Engineering: A**, 262(1-2), 88-100.
- Ugunder, S., Kumar, A., & Reddy, A. (2014). Experimental Investigation of Tool Geometry on Mechanical Properties of Friction Stir Welding of AA2014 Aluminium Alloy. **Procedia Materials Science**, 5, 824-831.

- Vijayavel, P., Balasubramanian, V., & Sundaram, S. (2014). Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength and ductility of friction stir processed LM25AA-5% SiCp metal matrix composites. **Materials & Design**, 57, 1-9.
- Vivekanandan, P., Arunachalam, V., Prakash, T., & Savadamuthu, L. (2012). The Experimental Analysis of Friction Stir Welding on Aluminium Composites. **International Journal of Metallurgical Engineering**, 1(4), 60-65.
- Wananasin, J. (2006). Semi-Solid Die Casting Technology. **Proceedings of the Third Thai Foundry Conference**, (pp. 1-12). Bangkok, Thailand.
- Xiacong, H., Fengshou, G., & Andrew, B. (2014). A review of numerical analysis of friction stir welding. **Progress in Materials Science**, 65, 1-66.
- Xu, W., Liu, J., Chen, D., Luan, G., & Yao, J. (2012). Improvements of strength and ductility in aluminum alloy joints via rapid cooling during friction stir welding. **Materials Science and Engineering A**, 548, 89-98.
- Yazdipour, A., & Heidarzadeh, A. (2016). Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloy joints. **Journal of Alloys and Compounds**, 680, 595-603.
- Yoo, J., Yoon, J., Min, K., & Lee, H. (2015). Effect of Friction Stir Welding Process Parameters on Mechanical Properties and Macro Structure of Al-Li alloy. **Procedia Manufacturing**, 2, 325-330.
- Zhang, Z., Xiao, B., & Ma, Z. (2012). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2219Al-T6 joints. **J Mater Sci**, 47, 4075-4086.
- ZHANG, Q., GONG, W., & LIU, W. (2015). Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints by friction stir welding. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 25, 1779-1786.
- Zhang, Y., Li, F., Guo, G., Wang, G., & Wei, H. (2016). Effects of different powders on the micro-gap laser welding-brazing of an aluminium-steel butt joint using a coaxial feeding method. **Materials and Design**, 109, 10-18.
- Zhang, Z., & Wu, Q. (2015). Numerical studies of tool diameter on strain rates, temperature rises and grain sizes in friction stir welding. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 29(10), 4121-4128.



ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Angkarn Kamruan, Somsak Siwadamrongpong, Ukrit Thanasubtawee and Prapas Muangjunburee.
(2020). Influence of friction stir welding parameters on tensile strength of semi-solid-solid cast 2024 aluminium alloy butt joint. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. vol.31 No.2 (April-Jun, 2021).



ผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อความแข็งแรงดึงของรอยต่อชน อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งเกรด 2024

อังคาร คำเรือน และสมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ประกาศ เมืองจันทบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 044-224-236 อีเมล: somsaksi@sut.ac.th

บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเป็นการเชื่อมแบบไม่หลอมละลายซึ่งให้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดี โดยเฉพาะสำหรับวัสดุที่เชื่อมได้ยากด้วยวิธีหลอมละลาย อย่างไรก็ตามในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นจำเป็นต้องตั้งพารามิเตอร์การเชื่อมให้เหมาะสมเพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่ดี ประกอบกับการศึกษาเรื่องการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็งยังมีจำนวนน้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมต่อชนวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 ด้วยเทคนิคออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน โดยกำหนดปัจจัยในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และรูปทรงของหัวกวน แบบทรงกรวย ทรงกระบอกเรียบ และทรงกระบอกเกลียว ผลการทดลองพบว่าผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน และรูปทรงของหัวกวนตามลำดับ ที่ระดับนัยสำคัญ 95% ในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ โดยรูปทรงของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุด 212 เมกะปาสคาล คิดเป็นความแข็งแรงดึงของงานเชื่อมต่อเนื้อวัสดุเดิมเท่ากับ 99%

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน ความแข็งแรงดึง อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024

Influence of Friction Stir Welding Parameters on Tensile Strength of Semi-Solid Cast 2024 Aluminum Alloy Butt Joints

Angkarn Kamruan and Somsak Siwadamrongpong*

School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

Ukrit Thanasubtawee

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Prapas Muangjunburee

Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*Corresponding Author, Tel. 044-224-236 E-mail: somsak@sut.ac.th

Abstract

Friction stir welding is one of solid state welding techniques which provide good weld joint compared with fusion welding technique, especially for difficult-to-fusion welded materials. However, appropriate welding parameters were necessary to achieve good weld joint with friction stir welding. Moreover, there are a few reports on welding of semi-solid aluminum. Therefore, aims of this study was to investigate influence of friction stir welding parameters on the microstructure and tensile strength of friction stir welding of butt joints between Semi-Solid cast aluminum alloy 2024. Full factorial design technique was employed with 3 parameters which composed of rotation speed, welding speed and shape of stir head (cone, cylindrical and thread). Based on statistical results, it was found that rotational speed and shape of stir head parameters had an influence on microstructure and tensile strength of welded joint while welding speed was not significant parameter with 95% significant level. It was indicated that cylindrical stir head with rotational speed of 790 rpm and 36 mm/min welding speed yielded the highest tensile strength of 212 MPa which was 99% of based material tensile strength.

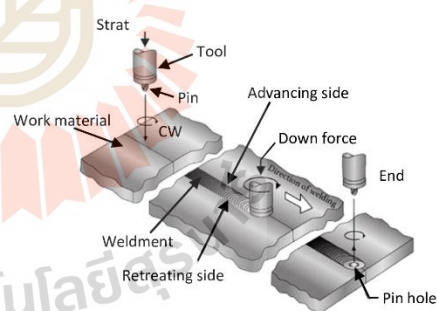
Keywords: Friction stir welding, Tensile strength, Aluminum Alloy Semi-solid metal 2024

1. บทนำ

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมผสมเข้ามามีบทบาทที่สำคัญ และมีปริมาณการใช้งานเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรม ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน อุตสาหกรรม แม่พิมพ์ และชิ้นส่วนประกอบเครื่องจักรกล เป็นต้น เนื่องจากว่าเป็นวัสดุที่หล่อขึ้นรูปได้ง่าย ง่ายต่อการแปรรูป มีความแข็งและความแข็งแรงสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ไม่เป็นสนิม สามารถเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการอบชุบ กัดแต่งได้ง่ายและขึ้นรูปได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเพียง 1 ใน 3 ของเหล็กกล้า ซึ่งเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักแล้วอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กมาก [1] และในบางกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการขึ้นรูปด้วยวิธีการเชื่อม แต่อะลูมิเนียมผสมบางชนิดเป็นวัสดุที่เชื่อมได้ค่อนข้างยากด้วยการเชื่อมแบบหลอมละลาย เนื่องจากยากในการควบคุมโลหะหลอมเหลวระหว่างเชื่อม ด้วยเหตุนี้การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction stir welding; FSW) ซึ่งเป็นการเชื่อมโลหะในสถานะของแข็ง (Solid state welding) สามารถให้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดี และมีประสิทธิภาพในด้านความแข็งแรงที่สูงกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างของแนวเชื่อมที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียด สามารถรับแรงได้สูง [2] และมีความเหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมโลหะที่ไม่ต้องการให้เกิดการหลอมละลายขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคจากการเย็นตัวจากสถานะของเหลวไปสู่สถานะของแข็งได้ เช่น โลหะอะลูมิเนียมผสม เกรด 2024 7075 ที่เป็นอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงสูง รวมถึงอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อขึ้นรูปแบบกึ่งของแข็งที่ยังมีการวิจัยการเชื่อมอย่างจำกัด

อะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 2024 เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม ได้จากกรรมวิธีการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง (GISS) [3] การเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งยังเป็นเรื่องที่มีการค้นคว้าวิจัยอยู่

ในวงจำกัด ถึงแม้จะมีการเริ่มนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมผลิต ชิ้นส่วนยานยนต์ทั้งในประเทศและต่างประเทศแล้วก็ตาม ในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุน กวน ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ความสมดุลของแรงกดและรูปแบบของหัวกวน เป็นต้น ดังรูปที่ 1 โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการประสานของเนื้อโลหะ ความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งความร้อนจากแรงเสียดทาน เนื่องจากการกวนมีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม จุดมุ่งหมายในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสม คือรักษาสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical properties of joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อวัสดุเดิมมากที่สุด และลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ซึ่งส่งผลทำให้แนวเชื่อม (Welded region) รวมถึงบริเวณรอบๆ แนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทำให้สมบัติทางกลมีความแข็งแรงลดลงจากผลกระทบทางด้านความร้อน (Heat affected zone; HAZ) [4] ดังนั้นพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมส่งผลให้ได้คุณภาพรอยเชื่อมที่ดี มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงขึ้น



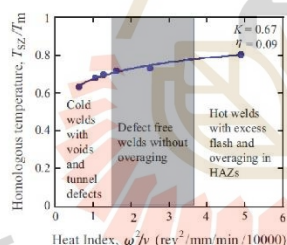
รูปที่ 1 การเชื่อมเสียดทานแบบกวน [5]

รายงานของ Lui และคณะ (2003) [6] ได้ศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึงต่อกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม AA2017-T351 โดยได้กำหนดค่าของค่าเรโวลูชันพิทช์ (Revolution pitch) ที่ 0.02 ถึง 0.4 มิลลิเมตรต่อรอบ ดังสมการที่ (1)

$$\text{Revolution pitch} = \frac{T}{R} \quad (1)$$

โดยที่ T คือความเร็วในการเดินเชื่อม (mm/min) และ R คือความเร็วรอบในการหมุนกวน (rpm) พบว่าค่าเรโวลูชันพิทช์ (Revolution pitch, mm/rev) เท่ากับ 0.07 มิลลิเมตรต่อรอบให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 82% ของเนื้อวัสดุเดิม

รายงานของ Iman และคณะ [7] ที่ได้ศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด AA6063-T4 พบว่า รอยเชื่อมมีความสมบูรณ์โดยไม่เกิดข้อบกพร่อง (Defect free Weld) สอดคล้องตาม ค่าดัชนีความร้อน (Heat index; HI) ที่ช่วง 1.5–3.5 ไม่เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพของช่วงค่าดัชนีความร้อน [7]

ประกอบกับยังไม่มีรายงานข้อมูลการศึกษาการเชื่อมวัสดุอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็ง เกรด 2024 งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็ง เกรด 2024 โดยมีปัจจัย ที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวนที่ใช้ใน

การหมุนกวน ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาค และความแข็งแรงดึง โดยการกำหนดระดับปัจจัยจะอ้างอิงกับค่าเรโวลูชันพิทช์ (Revolution Pitch) และค่าดัชนีความร้อน (Heat index; HI)

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุทดลอง

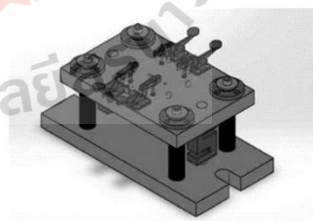
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ อะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งของแข็ง โดยมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีส่วนผสมสอดคล้องกับอะลูมิเนียมผสมเกรด 2024 ตามมาตรฐาน JIS A2024

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของโลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งของแข็งเกรด 2024 (wt%)

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Ti	Zn	Al
5.09	1.67	0.63	0.4	0.33	0.03	0.04	Bal.

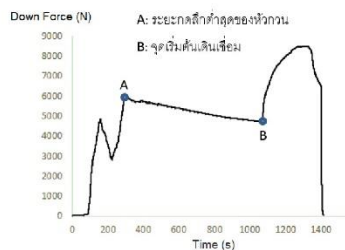
2.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม

ชิ้นงานทดลองนำมาขึ้นรูปให้มีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร นำชิ้นงาน 2 ชิ้นมาเชื่อมด้วยวิธีต่อชนโดยติดตั้งอุปกรณ์จับยึด (Jig & Fixture) ที่สามารถวัดแรงกดในขณะที่เชื่อมได้ ดังรูปที่ 3 โดยนำอุปกรณ์จับยึดมาติดตั้งบนชุดโต๊ะของแท่นเครื่องมิลลิ่ง (Milling machine)



รูปที่ 3 อุปกรณ์จับยึดในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

ขณะเริ่มกระบวนการเชื่อมชิ้นงาน ดังรูปที่ 1 เมื่อหัวกวนเริ่มสัมผัสชิ้นงานที่อยู่บนอุปกรณ์จับยึดที่ติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อวัดแรงกด (Down force) ในแนวตั้งมาที่โหลดเซลล์ และบันทึกค่าตลอดการเชื่อม ดังรูปที่ 4 และแรงกดตลอดการเชื่อมดังรูปที่ 5 การบันทึกแรงกดพบว่า แรงกดเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่หัวกวนลงชิ้นงาน และลดลงเมื่อแห่หัวกวนทิ้งไว้หลังจากกดจนได้ระยะกดลึกที่สุด และแรงกดเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเริ่มเดินเชื่อมจากรูปที่ 5 ทำให้ทราบพฤติกรรมของแรงกดที่เกิดขึ้น โดยสัมพันธ์กับระยะกดลึกเสียหาย (Plunge depth) ทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวหรืออยู่ในสภาวะพลาสติก การเกิดการเสียหายระหว่างพื้นผิวของบ่าเครื่องมือกวนกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ระยะกดลึกเสียหายเพิ่มมากขึ้นมีผลต่อปริมาณความร้อนที่เกิดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเกิดครีบด้านข้างแนวเชื่อมมาก และมีผลกระทบให้ชิ้นงานบางลง ส่วนระยะกดลึกเสียหายน้อยทำให้ปริมาณความร้อนเกิดขึ้นน้อยในการเชื่อม ความร้อนที่ไม่เพียงพออาจส่งผลให้เกิดรูตำหนิขึ้นภายในโครงสร้าง [5] ในงานวิจัยนี้ควบคุมระยะเวลาการแห่หัวกวนทิ้งไว้ จากจุด A ถึงจุด B เป็นระยะเวลา 800 วินาที เพื่อเป็นการกระจายความร้อน และลดแรงกดก่อนเดินเชื่อม และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อชุดแกนสปีนเดิลของเครื่องจักร โดยแรงกดสูงสุดตลอดการเชื่อมอยู่ในช่วง 8,200-8,400 นิวตัน



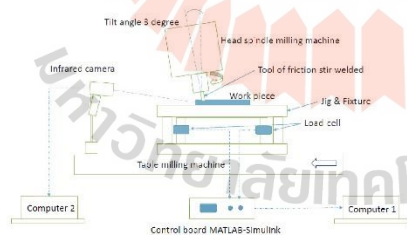
รูปที่ 5 แรงกดในขณะที่เชื่อมเสียหายแบบกวนของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

2.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกออกแบบภายใต้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน (Full factorial design) ที่มีความเหมาะสมกับการออกแบบการทดลองในกรณีที่มีเลือกจำนวนระดับของปัจจัยต่างกัน โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการศึกษา 3 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวน แสดงดังตารางที่ 2 โดยเก็บข้อมูลการทดสอบความแข็งแรงดึงจากจำนวนสิ่งตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 2 โดยที่ค่าระดับของแต่ละพารามิเตอร์สามารถคิดเป็นค่าเรโวลูชันพิทช์ (Revolution pitch) 0.03-0.07 มิลลิเมตรต่อรอบ และค่าดัชนีความร้อน (Heat index; HI) 1.3-2.9 อ้างอิงตามรายงานของ Liu และคณะ (2003) [6] Imam และคณะ (2014) [7]

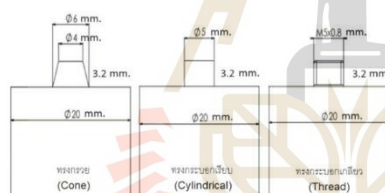
ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับในการทดลอง

ปัจจัยในการทดลอง	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
ความเร็วรอบในการหมุนกวน	RPM	530	790	-
ความเร็วในการเดินเชื่อม	mm/min	22	36	-
รูปทรงของหัวกวน	None	Cone	Cylinder	Thread



รูปที่ 4 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

หัวทวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 รูปแบบ เนื่องจากมีรายงานเกี่ยวกับอิทธิพลของหัวทวน ต่อการไหลตัวของเนื้อวัสดุในแนวอนจากด้านหน้าไปด้านหลังและในแนวตั้งจากด้านบนลงด้านล่าง จึงทำให้เกิดการผสมผสานเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีภายในโครงสร้างรอยเชื่อม โดยทั่วไปแล้วลักษณะพื้นฐานหัวทวนที่นิยมใช้เป็นแบบ หัวทวนทรงกระบอกเรียบ และหัวทวนทรงกรวย นอกจากนี้แล้วผู้วิจัยยังได้ออกแบบให้มีการสร้างเกลียวหรือร่องเกลียวในพื้นที่ผิวหัวทวนเพิ่มเติมเพื่อให้การไหลตัวของเนื้อวัสดุมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการลดแรงกระทำที่เกิดขึ้นในกระบวนการอีกด้วย [8] หัวทวนที่ใช้ผลิตจากเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีความแข็งทนต่อการสึกหรอสูง เกรด DC53 (SKD61 modified) โดยหัวทวนทั้ง 3 แบบ มีขนาดความยาวของหัวทวน 3.2 มิลลิเมตร ขนาดความโตของหัวทวน 5 มิลลิเมตร และมีขนาดป่า (Shoulder) 20 มิลลิเมตร โดยคิดเป็นอัตราส่วนขนาดป่าทวนต่อหัวทวน D/d เท่ากับ 4 เท่า ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เครื่องมือรูปทรงของหัวทวนที่ใช้ในการทดลอง

โดยการทดลองครั้งนี้การเชื่อมเสียดทานแบบทวนถูกเชื่อมด้วยเครื่องมิลลิ่ง (Milling machine) ยี่ห้อ Haven รุ่น XLW6332HIV มุมเอียงการทวน (Tilt angle) 3 องศา จุดเริ่มต้นของการเชื่อมเริ่มจากบริเวณตรงกลางจุดต่อของชิ้นงานทั้งสองชิ้น และห่างจากขอบชิ้นงาน 15 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อหัวทวนเริ่มหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ตามที่กำหนดไว้ เริ่มป้อนหัวทวนลงไปยังชิ้นงาน จนกระทั่งได้ความลึกและป่าของหัวทวนสัมผัสกับผิวชิ้นงานตามความลึกที่กำหนด จากนั้นหัวทวนหมุนอยู่กับ

ที่เพื่อเป็นการกระจายความร้อนให้ทั่วถึงและแรงกดค่อยๆ ลดลง จากนั้นจึงเริ่มเดินเชื่อมบนชิ้นทดสอบตามความเร็วในการเดินเชื่อมที่กำหนดโดยระบบอัตโนมัติ เมื่อถึงปลายแนวเชื่อมหัวทวนหมุนอยู่กับที่ 15 วินาที ก่อนยกหัวทวนออกจากแนวเชื่อม

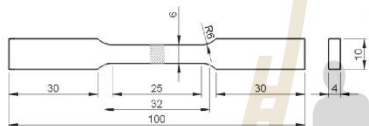
ปัจจัยในการทดลอง ดังตารางที่ 2 กำหนดให้มี 3 ปัจจัยหลัก คือ ความเร็วรอบในการหมุนทวน (Rotation speed) มี 2 ระดับ คือ 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม (Welding speed) มี 2 ระดับ คือ 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และชนิดรูปทรงของหัวทวน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบทรงกรวย แบบทรงกระบอกเรียบ และแบบทรงกระบอกเกลียว ปัจจัยที่ควบคุมคงที่ คือ การเอียงองศาของหัวทวน 3 องศา (Tool tilt angle) ขนาดของหัวทวน (Pin dimensions) และระยะกัดลึกที่ 100% ของขนาดป่าของหัวทวน (Shoulder) ที่ความลึกเท่ากับ 3.8 มิลลิเมตร ระยะกัดลึกมีผลกับการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงจากกลไกความเครียด ช่วยให้แนวเชื่อมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะกัดลึกจึงมีผลต่อการลดความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (dislocation) ดังนั้นจึงช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลในการเชื่อม โดยค่าระยะเผื่อแผ่นรองหลัง (Penetration) คือระยะที่ปลายหัวทวนห่างจากพื้นด้านล่างเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร [9]

2.4 โครงสร้างทางโลหวิทยา

หลังจากเชื่อมชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้วชิ้นทดสอบถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทราย เบอร์ 400 600 800 1000 1200 และ 2400 จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดและผงขัดอะลูมินา ขนาด 5 ไมครอน และนำไปถ่ายภาพโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบลำแสง (O.M.) ยี่ห้อ Olympus รุ่น LEXT 3D OSL4000 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM & EDS & EBSD) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM7100F เพื่อดูลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคบริเวณเนื้อวัสดุเติมเปรียบเทียบกับบริเวณรอยเชื่อม

2.5 การทดสอบความแข็งแรงดึง

ชิ้นงานที่ได้ถูกนำไปทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม โดยชิ้นงานทดสอบถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม และให้รอยเชื่อมอยู่ที่กึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ใช้อัตราเร็วในการดึงที่ 1.02 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งขนาดและรูปทรงของชิ้นทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E8M [9] ดังรูปที่ 7 โดยชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ถูกเตรียมด้วยเครื่องตัดชิ้นงานได้น้ำ ด้วยกระแสไฟฟ้าแบบลวดระบบอัตโนมัติ (CNC wire cut EDM) ยี่ห้อ Mitsubishi electric รุ่น MV-R และทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกล ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-50 kNX



รูปที่ 7 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M [9]

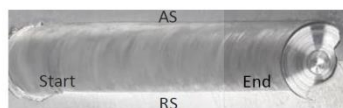
3. ผลการวิจัย

การทดลองเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมผสมล่อกิ่งของแข็ง เกรด 2024 โดยการนำเครื่องมือกลึง (Milling machine) มาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน รอยเชื่อมที่ได้จากการสังเกตและตรวจสอบทางกายภาพเบื้องต้น มีการประสานของวัสดุทั้งสองได้ดี ซึ่งลักษณะแนวเชื่อมที่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยที่ใช้ในแต่ละเงื่อนไขของการเชื่อม ค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้

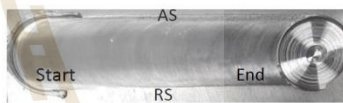
3.1 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมพบว่า ที่ความเร็วการหมุนหัวกวน 530 และ 790 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ผิวหน้าของรอยเชื่อมจากวิธีแบบต่อชนประสานกันได้ดี ไม่เกิดข้อบกพร่องหรือรอยแยกของชิ้นงานทั้งสองชิ้น ดังรูปที่ 8 ลักษณะผิวหน้ารอยเชื่อมที่ความเร็วรอบ 530 รอบต่อนาที

มีความเรียบ มั่นวากกว่ารอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที บริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side; AS) เกิดครีบมากกว่าด้านรีทเรตติ้งไซด์ (Retreating side; RS) เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) [10] โดยที่ความเร็วรอบของหัวกวนที่สูงขึ้นเกิดครีบมากกว่าความเร็วรอบการหมุนที่ต่ำกว่า เนื่องจากความเร็วรอบที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสร้างความร้อนได้มากขึ้น ทำให้วัสดุเกิดสภาวะพลาสมิกและเกิดการไหลตัวได้ง่ายขึ้นตามทิศทางความเร็วรอบของหัวกวน



(ก) ความเร็วรอบในการหมุน 530 รอบต่อนาที



(ข) ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที

รูปที่ 8 ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนระหว่าง 530 และ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของลักษณะภาพตัดขวาง ดังรูปที่ 9 โครงสร้างรอยเชื่อมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ พื้นที่ถูกกวน (SZ) พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล (TMAZ) และพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนเพียงอย่างเดียว (HAZ) [2] พบว่ารอยเชื่อมของรูปแบบหัวกวนทั้ง 3 แบบ ที่ความเร็วรอบของหัวกวนที่ 790 รอบต่อนาที ทั้งความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่ารอยเชื่อมมีความสมบูรณ์โดยไม่เกิดข้อบกพร่อง

(Defect free weld) สอดคล้องตามรายงานของ Iman และคณะ [7] ที่ได้ศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรด AA6063-T4 พบว่า Heat Index ที่ช่วง 1.5-3.5 ไม่เกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อม แต่ที่ความเร็วในการหมุนกวน 530 รอบต่อนาที ทั้งความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที และทุกรูปแบบของหัวกวน พบจุดบกพร่องของรอยเชื่อม เกิดรูโพรงขนาดเล็กๆ บริเวณที่ขอบด้านข้างตรงกลางของรอยเชื่อมในพื้นที่กวน (Nugget) ด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) ดังรูปที่ 10 โดยมีลักษณะเป็นการไหลของเนื้อวัสดุที่ไหลไม่เต็มในบริเวณพื้นที่กวนหรือไม่สมบูรณ์เนื่องจากความร้อนที่มากหรือน้อยเกินไป และแรงกดที่ไม่เพียงพอและเหมาะสม [11]



รูปที่ 10 ลักษณะจุดบกพร่อง (Void) ที่เกิดในรอยเชื่อม



(ก) โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อมลักษณะตัดขวาง



(ข) บริเวณพื้นที่ A

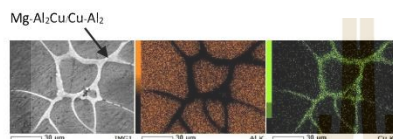
รูปที่ 9 โครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที

ในส่วนพื้นที่ของการเชื่อมที่ได้รับผลกระทบทั้ง 3 ส่วน ดังรูปที่ 9 ได้แก่ บริเวณแรก คือ บริเวณที่ถูกสัมผัสกับหัวกวนโดยตรง (SZ) ซึ่งมีเกรนขนาดเล็กละเอียด บริเวณที่สอง คือ บริเวณพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล (TMAZ) ลักษณะเกรนมีทิศทางที่ยีตอกไปตามหัวกวน และบริเวณสุดท้ายคือบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนเพียงอย่างเดียว (HAZ) สังเกตรูปร่างของเกรนได้ง่าย มีขอบเกรนชัดเจน [14]

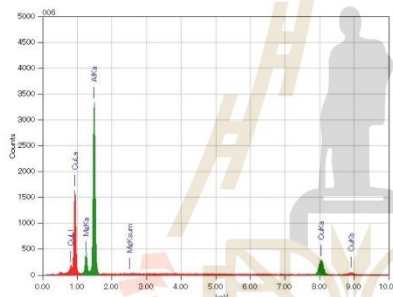
ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM & EDS & EBSD) พบว่าในพื้นที่บริเวณผลกระทบจากความร้อนสามารถสังเกตรูปร่างของเกรนและบริเวณของเกรนได้อย่างชัดเจน และพบการกระจายตัวของธาตุทองแดง (Cu) ในบริเวณพื้นที่ขอบเกรนเป็นจำนวนมาก และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 11 ซึ่งในบริเวณพื้นที่ขอบเกรนเมื่อนำไปตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบพบเฟสยูเทคติก $Mg-AL_2Cu/Cu-AL_2$ ดังรูปที่ 12 สอดคล้องกับรายงานของ Jacob และคณะ (2018) [13]

ส่วนบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกลพบว่าเกรนมีลักษณะเสียรูปในลักษณะยืดยาวออก (Elongated grain) ไปตามทิศทางการหมุนของหัวกวน [12] และบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวนด้วยหัวกวนพบว่าไม่มีเกรน

ลักษณะเล็กและละเอียด เกิดโครงสร้างเป็นผลึกใหม่ (Recrystallized) จากความร้อนจากการหมุนวน และมีความแข็งแรงจากการตกตะกอน (Precipitates) โดยมีเฟสยูเทคติก Mg-Al₂Cu และ Cu-Al₂ กระจายตัวในเฟสหลักที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียมอย่างสม่ำเสมอ [13]



รูปที่ 11 การกระจายตัวของธาตุในบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน

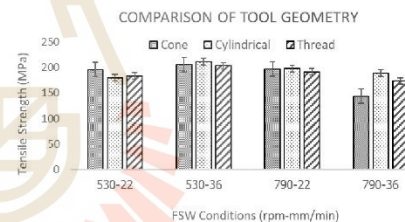


รูปที่ 12 ชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณขอบเกรน

3.2 ความแข็งแรงดึงจากการทดสอบ

จากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบการดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวนตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 13 พบว่าหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 212 MPa ที่ความเร็วรอบในการหมุนวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากค่าความร้อนในการเชื่อม (Heat input) ที่เหมาะสม ความเร็วในการหมุนวนต่ำ

และความเร็วในการเดินเชื่อมสูงทำให้อุณหภูมิในขณะเชื่อมไม่สูงมาก ส่งผลให้พื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ได้รับความร้อนน้อยลงด้วย ทำให้เกรนมีขนาดเล็กกว่าการเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนวนที่ 790 รอบต่อนาที เกิดอุณหภูมิในการเชื่อมสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็งแรงดึง ที่การขาดของชิ้นงานเกิดขึ้นบริเวณขอบรอยเชื่อมซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) ทางด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating side) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเกรนในบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เกรนมีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างเดิมทำให้ความแข็งแรงดึงลดลง ขณะที่หัวกวนแบบทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 145 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 790 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่าแรงดึงสูงที่สุดในการวิจัยนี้มีค่า เท่ากับ 212 MPa มีประสิทธิภาพ 99% ของความแข็งแรงวัสดุพื้น



รูปที่ 13 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงในสภาวะต่างของรูปทรงหัวกวนทั้ง 3 รูปแบบ

3.3 ผลวิเคราะห์ทางสถิติ

จากผลการทดลอง ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงโดยใช้โปรแกรมมินิแทป รุ่น 18 (Minitab 18) ดังตารางที่ 3 เพื่อชี้ให้เห็นถึงผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ผลกระทบหลักของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อ

ต่อค่าความแข็งแรงมากที่สุด ประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนงวนและรูปทรงของหัวกวนตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดังมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจได้จากการทดลอง R^2 มีค่าเท่ากับ 93.9 เปอร์เซ็นต์ และค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 88.3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงจำนวนที่เพียงพอต่อการประมาณค่าพยากรณ์ของความแข็งแรงซึ่งโดยความผันแปรที่เกิดขึ้นในการทดลองมาจากผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของแต่ละพารามิเตอร์ในการทดลอง 88.3 เปอร์เซ็นต์ และเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ 11.7 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึง

Analysis of Variance

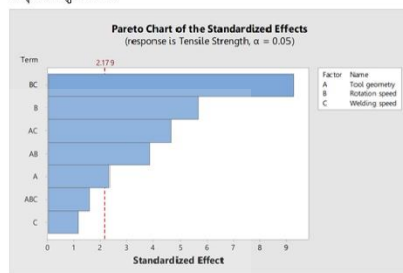
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	7102.7	645.70	16.76	0.000
Linear	4	1636.1	409.01	10.62	0.001
Tool geometry	2	334.09	167.04	4.34	0.038
Rotation speed	1	1248.4	1248.4	32.40	0.000
Welding speed	1	53.61	53.61	1.39	0.261
2-Way Interactions	5	5289.3	1057.9	27.46	0.000
Tool geometry*Rotation speed	2	808.28	404.14	10.49	0.002
Tool geometry*Welding speed	2	1158.9	579.43	15.04	0.001
Rotation speed*Welding speed	1	3322.1	3322.1	86.23	0.000
3 Way Interactions	2	177.41	88.71	2.30	0.142
Tool geometry*Rotation speed*Welding speed	2	177.41	88.71	2.30	0.142
Error	12	462.30	38.52		
Total	23	7565.0			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(Adj)	R-sq(Pred)
6.20682	93.89%	88.29%	75.56%

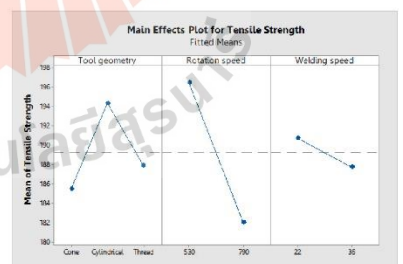
นอกจากนี้ยังพบว่าผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงประกอบด้วยความเร็วรอบในการหมุนงวนและความเร็วในการเดินเชื่อม รูปทรงของหัวกวนและความเร็วในการเดินเชื่อม และ รูปทรงของ

หัวกวนและความเร็วรอบในการหมุนงวน ตามลำดับ โดยผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วรอบในการหมุนงวนและความเร็วในการเดินเชื่อม มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด ดังรูปที่ 14

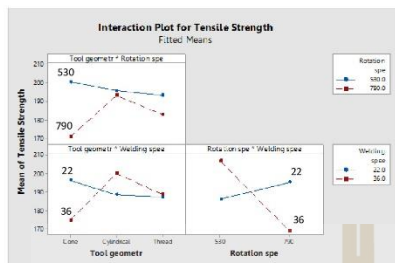


รูปที่ 14 ปัจจัยของผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึง

รูปที่ 15 แสดงถึงผลกระทบหลักของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของหัวเชื่อมแบบทรงกระบอกเรียกว่าค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ผลกระทบหลักของความเร็วรอบในการหมุนงวนมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความแข็งแรงดึงเมื่อความเร็วรอบในการหมุนงวนลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อมก็มีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความแข็งแรงดึงเช่นกัน เมื่อความเร็วในการเดินเชื่อมต่ำส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าค่าความเร็วในการเดินเชื่อมสูง



รูปที่ 15 ผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง



รูปที่ 16 ผลกระทบร่วมที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ร่วมของแต่ละพารามิเตอร์ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนทวน และความเร็วในการเดินเชื่อม พบว่าเมื่อใช้ค่าความเร็วรอบในการหมุนทวนที่ 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้ความเร็วรอบของหัวทวนที่ 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวเชื่อมและความเร็วรอบในการหมุนทวน พบว่า รูปทรงหัวทวนแบบทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมสูงที่สุดตามด้วยหัวทวนแบบทรงกระบอกเรียบและหัวทวนแบบทรงกระบอกเกลียว ตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณาทั้งความเร็วรอบในการหมุนทวน 530 และ 790 รอบต่อนาทีพบว่ารูปทรงหัวทวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยของรอยเชื่อมสูงที่สุด ตามด้วยหัวทวนแบบทรงกระบอกเกลียวและหัวทวนแบบทรงกรวย ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงหัวเชื่อมและความเร็วในการเดินเชื่อม พบว่าที่ระดับความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตรต่อนาที รูปทรงแบบกรวยให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด ในขณะที่เมื่อใช้ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่ารูปทรงหัวทวนแบบทรงกระบอกเรียบให้ค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมสูงที่สุด

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง เกรด 2024 พบว่าทุกสภาวะของการเชื่อมให้ลักษณะผิวด้านบนของแนวเชื่อมเรียบและสม่ำเสมอ มีการผสมเข้ากันได้ดีของเนื้อโลหะ เกิดครีบเล็กน้อยบริเวณแนวเชื่อมด้านแอดวานซ์ซิงไซด์ (Advancing side) และโครงสร้างทางจุลภาคของแนวเชื่อม บริเวณตรงกลางแนวเชื่อม (SZ) เกรนมีขนาดเล็กละเอียด เมื่อเทียบกับเกรนที่บริเวณเนื้อโลหะเดิม ในขณะที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกล (TMAZ) มีลักษณะเกรนเรียวยาวและยืดยาวเนื่องจากปฏิกิริยาทางกลที่ได้รับจากตัวกวน และบริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) มีลักษณะเกรนขนาดใหญ่กว่าเนื้อโลหะเดิม

ผลวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนทวนและรูปทรงของหัวทวนตามลำดับ โดยความเร็วในการเดินเชื่อมในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ และการพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด 212 MPa คือการเชื่อมด้วยหัวทวนแบบทรงกระบอกเรียบ ความเร็วรอบในการหมุนทวน 530 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที

4.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ยังมีตัวแปรอื่นที่น่าสนใจ ได้แก่ ขนาดสัดส่วนของปากทวนต่อหัวทวน (D/d ratio) และแรงกดที่เหมาะสมต่อขนาดของหัวทวน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้หรือเป็นแนวทางวิจัยในการพัฒนาในกระบวนการเชื่อมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Thammachot, *Metallurgy*. Bangkok: Chulalongkorn University Press., 2013 (in Thai).
- [2] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing," *Materials Science and Engineering*, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.
- [3] J. Wananasin, "Semi-Solid Die Casting Technology," in *Proceedings of the Third Thai Foundry Conference, Bangkok, Thailand, November 23, 2006*, pp. 1-12 (in Thai).
- [4] C. Yu, D. Hua, J. Li, J. Zhao, M. Fu, X. Li, "Effect of welding heat input and post-welded heat treatment on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 25, pp. 2524-2532, 2015.
- [5] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, S. P. Temple and C. J. Dawes, "Friction Stir Butt Welding," *International Patent Application*, No. PCT/GB92/02203 and GB patent application, No. 9125978.8, 1991.
- [6] H. J. Liu, H. Fuji, M. Maeda and K. Nogi, "Tensile properties and fracture locations of friction stir welded joints of 2017-T351 aluminum alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 3, pp. 692-696, 2003.
- [7] M. Imam, V. Racherla and K. Biswas, "Effect of Post Weld Natural Aging on Mechanical and Microstructural Properties of Friction Stir Welded 6063-T4 Aluminium Alloy," *Journal of Materials and Design*, Vol. 64, pp. 657-686, 2014.
- [8] J. Guo, "Solid State Welding Processes in Manufacturing," in *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, London: Springer-Verlag, 2015, pp. 576-583.
- [9] P. Muangjunburee, *The effect of welding parameters on Metallurgical and Mechanical Properties of Joining of Semi Solid (SSM) Aluminium alloy A356 by Friction Stir Welding process (FSW)*, Songkla: Prince of Songkla University. 2007 (in Thai).
- [10] Y. C. Lin, J. J. Liu and J. N. Chen, "Material flow tracking for various tool geometries during the friction stir spot welding process," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 22, No. 12, pp. 3674-3683, 2013.
- [11] J. Y. Sheikh-Ahmad, F. Ozturk, F. Jarrar, and Z. Evis, "Thermal history and microstructure during friction stir welding of Al-Mg alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp. 1-11, 2016.
- [12] A. K. Lakshminarayanan, S. malavizhi, and V. Balasubramanian. "Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 21, pp. 2339-2347, 2011.
- [13] J. Jacob, S. P. Shanmunghanatan and M. B. Kiran, "Effect of tool on microstructure and mechanical properties of friction stir processed AA2024-T351 aluminium alloy," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, pp. 2965-2979, 2018.
- [14] I. Radisavljevic, A. Zivkovic, N. Radovic, and V. Grabulov, "Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints," *Trans.*

Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 23, pp. 3525-3539, 2013.

- [15] H. K. Mohanty, M. M. Mahapatra, P. Kumar, P. Biswas and N. R. Mandal, "Modeling the effects of tool shoulder and probe profile geometries on friction stirred aluminum welds using response surface methodology," *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 11, pp. 493-503, 2012.



ประวัติผู้เขียน

นายอังกอร์ คำเรือน เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอโซคชัย จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนสุนทรวิจิตร จังหวัดนครพนม มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนนครพนมวิทยาคม ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างกลโรงงาน ที่วิทยาลัยเทคนิคนครพนม ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาช่างเครื่องกล ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2546

หลังจากสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2547 ได้รับเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร แผนกวิศวกรรม บริษัท ไคชิน จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ระหว่างทำงานในปี พ.ศ. 2551 ได้ศึกษาต่อระดับครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร จนสำเร็จการศึกษาเมื่อ พ.ศ. 2553 และทำวิจัยในเรื่อง การศึกษาการแปรผันสัดส่วนของแก๊สปกคลุมในกระบวนการเชื่อมทั้งสแตนอาร์กอนต่อคุณภาพงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมคูเพิล็กซ์เกรด UNS S31803

ในปี พ.ศ. 2552 ได้รับเข้าทำงานในวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา ในตำแหน่ง ครู แผนกช่างกลโรงงาน ผู้วิจัยได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ทางด้านการผลิต เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ และเครื่องจักรอุตสาหกรรม ตั้งแต่ระดับขั้นพื้นฐาน จนถึงระดับการควบคุมในขั้นสูง และระบบอัตโนมัติในการผลิต

ในปี พ.ศ. 2554 ได้รับเข้าทำงานที่สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และในปี พ.ศ. 2558 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาระดับปริญญาเอก ผู้วิจัยในปี พ.ศ. 2561 ได้รับโอกาสเป็นนักศึกษาแลกเปลี่ยน สถาบันเทคโนโลยีชิวะฮูระ (SIT) ณ ประเทศญี่ปุ่น เพื่อศึกษาและใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยเป็นระยะเวลา 3 เดือน ผู้วิจัยได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากที่มีประสบการณ์ด้านการสอนปฏิบัติการ และการทำงานวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความชำนาญทางด้านการผลิต การใช้เครื่องจักรในงานอุตสาหกรรม และการนำเครื่องจักรมาประยุกต์ใช้ในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ปรากฏดังภาคผนวก ก.