

ผลกระทบบของปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อแรงตามแนวแกน
และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**INFLUENCE OF FRICTION STIR WELDING
PARAMETERS ON AXIAL FORCE AND
MECHANICAL PROPERTIES OF 7075
ALUMINUM ALLOY**

Kodcharawit Lamkam



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2020**

ผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อแรงตามแนวแกน
และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

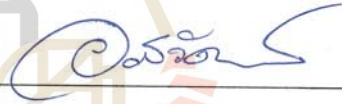
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.วรรณนัช นุ่งสุด)
ประธานกรรมการ



(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ดร.นิตราชัย โชติชชูขางกูร)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กชรวิศ หล้าคำ : ผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อแรงตามแนวแกน และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 (INFLUENCE OF FRICTION STIR WELDING PARAMETERS ON AXIAL FORCE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 7075 ALUMINUM ALLOY) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ ศิวคำรังพงศ์, 102 หน้า

อะลูมิเนียมถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า รถไฟ ความเร็วสูง และอากาศยาน เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดี น้ำหนักเบา แต่เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าอะลูมิเนียมบางเกรดมีความสามารถในการเชื่อมแบบหลอมละลายต่ำ เกิดปัญหาภายหลังการเชื่อม เช่น อะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 ที่มักเกิดรอยแตกร้าว รูพรุน การบิดงอเสียรูป จึงนิยมเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งให้สมบัติทางกลที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมักมีปัญหาเกิดแรงกระทำตามแนวแกนสูง ส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องจักร งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อแรงตามแนวแกนและสมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ได้ โดยใช้อะลูมิเนียมผสม 7075 ขนาด 100x50x4 มิลลิเมตร เป็นชิ้นงานทดสอบ กำหนดความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 และ 2220 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 และ 63 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้หัวกวนรูปทรงกรวย และทรงกระบอก ขนาด 3 มิลลิเมตร และขนาดของบ่ากวน 9, 12, 15 มิลลิเมตร แรงตามแนวแกนระหว่างการเชื่อมจะถูกวัดโดยใช้อุปกรณ์จับยึดที่ออกแบบขึ้น และทดลองเชื่อมบนเครื่องกัดแนวตั้ง 3 แกน กิ่งอัตโนมัติ พบว่าขนาดบ่ากวน และความเร็วเดินเชื่อมส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในขณะที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนและรูปทรงหัวกวนในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกนอย่างมีนัยสำคัญ หัวกวนทรงกระบอก ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที และขนาดบ่ากวนที่ 9 มม. เป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าแรงตามแนวแกนน้อยที่สุดที่ 3205 N และจากการทดสอบสมบัติทางกลของรอยเชื่อมมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง 334 MPa คิดเป็น 62% ของวัสดุเดิม

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
และระบบกระบวนการ
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา กชรวิศ หล้าคำ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สมศักดิ์ ศิวคำรังพงศ์

KODCHARAWIT LAMKAM : INFLUENCE OF FRICTION STIR
WELDING PARAMETERS ON AXIAL FORCE AND MECHANICAL
PROPERTIES OF 7075 ALUMINUM ALLOY. THESIS ADVISOR :
SOMSAK SIWADAMRONGPONG, Ph.D. 102 PP.

FRICTION STIR WELDING/7075 ALUMINUM ALLOY/AXIAL FORCES/ TENSILE
STRENGTH

Aluminum was widely used in many industries such as electric cars, high-speed trains, and aircraft due to its lightweight. It was generally known that some grades of Aluminum were low melting weldability which might lead to cracks, porosity, warping and deformation, such as 7075 Aluminum alloy. Therefore, friction stir welding technique was sometimes employed since there yielded good mechanical properties. However, friction stir welding technique often had problems with high axial force which affect to wear and runout of the machine. The aim of this research was to investigate influence of friction stir welding parameters on axial force and mechanical properties of 7075 aluminum alloy. 100x50x4 mm specimen was prepared and welded with varying parameters including rotation speed 1580 and 2220 rpm, welding speed 36 and 63 mm/min, 3 mm stir pin profile cylindrical and cone, and shoulder diameter 9, 12, 15 mm. The experiment was performed on force measuring fixture. Shoulder diameter and welding speed was found to affect axial force with significant level of 0.05. Rotation speed and pin profile in the range this studied were not significantly affect the axial force. The minimum axial force was 3205 N with cylindrical pin profile rotational speeds of 2220 rpm, welding speed of

36 mm/min, and Shoulder diameter 9 mm which given tensile strength of 334 MPa or 62% of based material.



School of Mechanical and
Process System Engineering
Academic Year 2020

Student's Signature _____ กอวิฬ

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้คำชี้แนะและข้อคิดเห็นในงานวิจัย รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่านที่ได้ปฏิบัติงานร่วมกันและได้ให้คำปรึกษาเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการ โคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้ดำเนินงานวิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

คุณประโยชน์ของงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกๆ ท่านผู้ดำเนินโครงการ ได้รับและจะถือเป็นแนวทางในการปฏิบัติ เพื่อตอบแทนต่อท่านและสังคม ผู้ดำเนินงานวิจัยขอมอบให้แก่ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับความสำเร็จในครั้งนี้ทุกๆ ท่านและโคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

นายชรวินิต หล้าคำ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรีक्षणัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปรีक्षणัวรรณกรรม.....	4
2.2 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน.....	8
2.3 อะลูมิเนียมผสม.....	12
2.3.1 คุณสมบัติอะลูมิเนียม.....	13
2.3.2 อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม.....	14
2.4 สมบัติทางโลหะวิทยา.....	17
2.4.1 พื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ).....	17
2.4.2 พื้นที่กระทบร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone ; TMAZ).....	18
2.4.3 พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ).....	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การทดสอบแรงดึง	19
2.6 การทดสอบความแข็ง.....	26
2.7 การออกแบบการทดลอง	27
2.7.1 ประเภทของการทดลอง.....	28
2.7.2 คำศัพท์ที่ควรรู้เกี่ยวกับการทดลอง	33
2.7.3 อิทธิพลของปัจจัย (Factor Effects).....	34
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	38
3.1 วัสดุและเครื่องที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.1.1 วัสดุ	37
3.1.2 เครื่องมือกวน หรือหัวกวน	37
3.1.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)	38
3.1.4 เครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	39
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงตามแนวแกนและอุณหภูมิขณะเชื่อมเสียดทาน แบบกวน	43
3.3 การทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนเบื้องต้นเพื่อหาความเป็นไปได้ของ พารามิเตอร์	44
3.4 การออกแบบการทดลอง	45
3.5 ดำเนินการทดลองเชื่อมตามการออกแบบการทดลอง	47
3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง.....	47
3.5.2 ทำการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียม เกรด 7075 เพื่อวัดแรงตาม แนวแกน.....	49
3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค	50
3.6.1 การตรวจสอบความแข็งแรงดึง.....	50
3.6.2 การตรวจสอบความแข็ง	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.3	การตรวจสอบ โครงสร้างมหภาคและจุลภาคด้วยกล้อง จุลทรรศน์แบบแสง	51
3.7	การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	52
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	53
4.1	ลักษณะทางกายภาพ และลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อม.....	53
4.2	ผลการวิเคราะห์แรงตามแนวแกนของการออกแบบการทดลองแบบแฟก ทอเรียล.....	57
4.2.1	การตรวจการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง	60
4.2.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวน	62
4.3	ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอ เรียล.....	68
4.3.1	การตรวจการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง	69
4.3.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง.....	71
4.4	ความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....	77
4.5	สมบัติความแข็ง	79
4.6	โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม.....	82
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	90
5.1	พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกน.....	90
5.2	พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสมต่อสมบัติทางกล.....	91
5.3	ข้อเสนอแนะ	91
	รายการอ้างอิง	92
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก.บทความงานประชุมนานาชาติ.....	96
	ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณลักษณะทั่วไปเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61..... 11
2.2	คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม..... 13
2.3	คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม..... 14
2.4	อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought Aluminium Alloys)..... 14
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุอะลูมิเนียม 7075..... 37
3.2	ตารางปัจจัยการทดลอง..... 46
3.3	ตารางการทดลอง..... 46
4.1	ตารางปัจจัยการทดลอง..... 58
4.2	ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป..... 58
4.3	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลอง..... 63
4.4	ตารางการทดสอบความแข็งแรงดึง..... 68
4.5	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง..... 72

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2. 1	กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....	9
2. 2	รูปแบบพื้นฐานการเชื่อมต่อวัสดุ	10
2. 3	รูปทรงหัวกวนแบบพื้นฐาน	11
2. 4	แผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียมผสมสังกะสี	16
2. 5	พื้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาค	17
2. 6	ลักษณะรูปร่างพื้นที่กวน	18
2. 7	ลักษณะโครงสร้างจุลภาคพื้นที่กระทบร้อนทางกล	18
2. 8	แสดงการตกตะกอนบริเวณพื้นที่เชื่อม	19
2. 9	ขั้นตอนทดสอบแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8	20
2. 10	เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก.....	21
2. 11	เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด แบบไม่มีจุดคราก	23
2. 12	เส้นโค้งเปรียบเทียบความเค้น - ความเค้น	24
2. 13	เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแรงดึง.....	25
2. 14	หัวกดเพชรที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	27
2. 15	การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ 3^2	30
2. 16	การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ 3^3	30
2. 17	ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ.....	31
3. 1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	36
3. 2	อะลูมิเนียมเกรด 7075 ต่อชน (Butt Joint).....	37
3. 3	ขนาดหัวกวนรูปทรงหัวกวนทรงกรวย และทรงกระบอกตรง	38
3. 4	อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน(Fixture).....	38
3. 5	เครื่องกัดแนวตั้ง.....	39
3. 6	กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3. 7	เครื่องทดสอบแรงดึง.....40
3. 8	เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....40
3. 9	เครื่องวัดกระดาษทรายและผ้าสักหลาด.....41
3. 10	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....42
3. 11	เครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน.....42
3. 12	อุปกรณ์จับยึดสำหรับกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ.....43
3. 13	การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด.....43
3. 14	การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง.....44
3. 15	ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเชื่อมเสียดทาน.....45
3. 16	ตัดแผ่นอะลูมิเนียม.....47
3. 17	ชิ้นงานผ่านการกัดผิวหน้าชิ้นงาน.....48
3. 18	แสดงขั้นตอนการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียม 7075.....49
3. 19	ลักษณะการตัดขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึง.....50
3. 20	ลักษณะการทดสอบความแข็ง.....51
4. 1	ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที.....54
4. 2	ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที.....55
4. 3	ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที.....56
4. 4	ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที.....57
4. 5	กราฟแสดงค่าแรงตามแนวแกนกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน.....60
4. 6	แสดงการกระจายแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residual).....61
4. 7	ผลลัพธ์การทดสอบสมมุติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล.....61
4. 8	ผลลัพธ์การทดลองความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล.....62
4. 9	กราฟพาร โดแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าแรงตามแนวแกน.....64
4. 10	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงตามแนวแกน.....64
4. 11	การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกน.....65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4. 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ความเร็วรอบในการหมุน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. กับความเร็วรอบในการ หมุน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 ขนาดปากกวน 15 มม. โดยใช้รูปทรง หัวกวนแบบทรงกระบอก	67
4. 13 แสดงการกระจายแบบปกติของค่าส่วนตกค้างจากการทดสอบความแข็งแรงดึง	70
4. 14 ผลลัพธ์การทดสอบสมมุติฐานความเป็นอิสระจากการทดสอบความแข็งแรงดึง	70
4. 15 ผลลัพธ์การทดลองความสม่ำเสมอของแปรปรวนของข้อมูลจากการทดสอบ ความแข็งแรงดึง	71
4. 16 กราฟพาเรโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง	73
4. 17 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึง	73
4. 18 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง	74
4. 19 เปรอร์เซ็นต์ความแข็งแรงดึงจากวัสดุเดิมที่ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวน 1580 รอบ/นาที	76
4. 20 เปรอร์เซ็นต์ความแข็งแรงดึงจากวัสดุเดิมที่ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวน 2220 รอบ/นาที	76
4. 21 กราฟแสดงความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน	77
4. 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง และปริมาณความร้อนในการ เชื่อม	78
4. 23 ผลค่าความแข็งที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกระบอก	79
4. 24 ผลค่าความแข็งที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย	80
4. 25 ผลค่าความแข็งที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4. 26	โครงสร้างมหภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย83
4. 27	โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย84
4. 28	โครงสร้างมหภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก85
4. 29	โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก85
4. 30	โครงสร้างมหภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที86
4. 31	ลักษณะช่องว่างของรอยเชื่อม87
4. 32	โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก87
4. 33	โครงสร้างมหภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก88
4. 34	โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อะลูมิเนียมปัจจุบันถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น รถไฟความเร็วสูง ยานยนต์ไฟฟ้า อากาศยาน เรือเดินสมุทร ทางทหาร เป็นต้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ทนการกัดกร่อน มีความเหนียว และต้านทานการแตกหัก ซึ่งปัจจุบันนิยมเชื่อมประสานอะลูมิเนียมโดยอาศัยการเชื่อมแบบหลอมละลายซึ่งใช้อุณหภูมิที่สูง (Baffari, Buffa, Campanella, Fratini, & Micari, 2014) แต่อะลูมิเนียมก็ไม่สามารถเชื่อมแบบหลอมละลายได้ทุกเกรด เช่น Al2XXX, Al7XXX เนื่องจากเมื่ออะลูมิเนียมดังกล่าว เมื่อถูกความร้อนที่สูงเกินไป โครงสร้างเกิดการไหลตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการแตกร้าว เกิดจุดบกพร่องหรือตำหนิ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อม อีกทั้งยังเกิดควันอันตรายต่อตัวผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

จากปัญหาดังกล่าวอะลูมิเนียมจึงถูกนิยมนำมาเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding ; FSW) เป็นเทคนิคการเชื่อมโลหะที่สภาวะของแข็ง มีข้อดีคือ โครงสร้างจุลภาคเนื้อละเอียด สมบัติทางกลที่ดี เชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้ ไม่ต้องใช้แก๊สปกคลุม ไม่เกิดควันและรังสีจากอาร์ค ซึ่ง (Yeni, Sayer, & Pakdil, 2009) ได้ศึกษาการเชื่อมอะลูมิเนียม 7075 โดยใช้กระบวนการเชื่อมที่แตกต่างกัน 3 กระบวนการคือ MIG, TIG และ FSW โดยการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล พบว่าโครงสร้างจุลภาคนขนาดเกรนมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อใช้กระบวนการเชื่อมด้วย FSW เมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่นๆ และจากการตรวจสอบสมบัติทางกลชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อม FSW ให้สมบัติทางกลดีที่สุด โดยความร้อนที่ได้จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเกิดจากการหมุนเสียดสีของเครื่องมือกวนกับชิ้นงาน โดยชิ้นงานด้านที่ถูกเติม คือ Advancing side ส่วนด้านที่ถูกเอาเนื้อออกไปเติม คือ Retreating side โดยหัวกวนจะถูกกดลงไปเพื่อกวนเนื้อวัสดุเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เครื่องมือกวนประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญคือ ปากกวน ทำหน้าที่เสียดสีกับผิวหน้าวัสดุสร้างความร้อนให้เกิดการอ่อนตัว และหัวกวน ทำหน้าที่เสียดสีสร้างความร้อนในรอยเชื่อม และกวนเนื้อวัสดุให้เกิดการไหลตัวเข้าผสมผสานกันในรอยเชื่อม แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนมักเกิดปัญหาคือมีแรงกระทำตามแนวแกนสูง ส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องจักรอีกทั้งตามรายงาน (Elangovan, Balasubramanian, & Valliappan, 2008) เมื่อแรงตามแนวแกนสูงเกินไปจึงส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุที่นำมาเชื่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมอะลูมิเนียมเกรดที่มีความแข็งแรงสูง ๆ เช่น อะลูมิเนียมเกรด

AI7075 ก็จะทำให้เกิดแรงตามแนวแกนสูงขึ้นด้วย

อะลูมิเนียมเกรด AI7075 นิยมนำมาใช้ในโครงสร้างเครื่องบิน อากาศยาน และชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากทนต่อการล้าได้ดี มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ดี นับว่าเป็นอะลูมิเนียมเกรดที่มีความแข็งแรงสูงเกรดหนึ่งในปัจจุบัน ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการนำมาเชื่อมเสียดทานแบบกวนจากรายงานมีการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมอะลูมิเนียม AI7075 คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 1400 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาที แรงตามแนวแกนที่สามารถเชื่อมได้เท่ากับ 8000 N ได้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 397 MPa (Rajakumar, Muralidharan, & Balasubramanian, 2011) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับแรงตามแนวแกนของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมเกรดอื่น ๆ โดยศึกษาความเร็วรอบในการหมุนกวนของเครื่องมือที่มีผลต่อแรงตามแนวแกน โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด AI5052 (Moshwan, Yusof, Hassan, & Rahmat, 2015) และการศึกษาขนาดหัวกวนและขนาดบ่ากวนต่างกันซึ่งมีผลต่อแรงตามแนวแกน และอุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อมอะลูมิเนียม AI5083 โดยใช้วิเคราะห์แบบ 3D FEM ใช้แบบจำลอง Neural network (Shojaeefard, Khalkhali, Akbari, & Asadi, 2015) ได้รายงานตรงกันว่า เมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนลดลงจะส่งผลให้แรงตามแนวแกนเพิ่มขึ้น และความเร็วเดินเชื่อมที่เร็วขึ้นก็ส่งผลให้แรงตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อแรงตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการกระจายความร้อนเป็นบริเวณกว้างส่งผลให้เกรนบริเวณพื้นที่กระทบร้อนขยายตัวทำให้คุณภาพรอยเชื่อมลดลง ทั้งนี้ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วเดินเชื่อม ขนาดหัวกวนและบ่ากวน ควรควบคุมให้สัมพันธ์กัน

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของหัวกวนขนาดเล็กในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ อะลูมิเนียมผสม 7075 โดยใช้เทคนิคการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป มีปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วเดินเชื่อม ขนาดบ่ากวน และรูปทรงหัวกวน จำนวน 4 ปัจจัย ต่อแรงตามแนวแกน และสมบัติทางกล โดยใช้รูปแบบการเชื่อมพื้นฐานแบบต่อชน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดแรงตามแนวแกน และสมบัติทางกลที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมที่ใช้หัวกวนขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้อะลูมิเนียมผสม 7075 ขนาด 100x50x4 มม.
- 1.3.2 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือกวนเป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน เกรด SKD61
- 1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกล คือ ทดสอบความแข็ง และความแข็งแรงดึง
- 1.3.4 ศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา
- 1.3.5 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง
 - 1.3.5.1 ปัจจัยแปรผัน
 - 1) ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580,2220 รอบ/นาที
 - 2) ความเร็วเดินเชื่อม 36,63 มม./นาที
 - 3) ขนาดปากกวน 9,12,15 มม.
 - 4) รูปทรงหัวกวน ทรงกรวย ทรงกระบอก
 - 1.3.5.2 ปัจจัยควบคุม
 - 1) ขนาดหัวกวน 2 มม.
 - 2) มุมเอียง 3°
 - 3) ระยะกดลึกลับงาน 0.1 มม.

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการลดแรงตามแนวแกน และพารามิเตอร์ที่ให้คุณสมบัติทางกลที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมผสม 7075 โดยประยุกต์ใช้หัวกวนขนาดเล็ก
- 1.4.2 ทราบถึงโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมที่เหมาะสม โดยใช้หัวกวนขนาดเล็ก

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรม

การสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding ; FSW) ผู้วิจัยที่ผ่านมามีเป้าหมายเพื่อพัฒนากระบวนการเชื่อมวัสดุที่สภาวะของแข็ง ซึ่งมีสมบัติทางกลที่ดี และไม่เกิดปัญหาหลังการเชื่อม โดยจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยมุ่งเน้นทิศทางการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่สำคัญต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วเดินเชื่อม และเครื่องมือกวน

งานวิจัยการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ของ อะลูมิเนียมผสม เกรด 2XXX และ 7XXX ซึ่งนิยมนำมาเชื่อมด้วยกระบวนการดังกล่าว เนื่องจาก อะลูมิเนียมเกรดที่มีทองแดงเป็นส่วนผสมอยู่มากจึงมีข้อจำกัดในการเชื่อมแบบหลอมละลายที่ต่ำ โดยมีผู้วิจัยดังนี้ (Anil Kumar, Karur, Chipili, & Singh, 2015) ได้ศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของ อะลูมิเนียมผสม Al2024-T351 โดยใช้การออกแบบการทดลอง แบบ Taguchi L9 เพื่อสมบัติทางกลที่ดี มีปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 355, 560, 900 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 12.5, 16, 20 มม./นาที และมุมเอียงหัวกวน 0, 1, 2 องศา และได้สรุปว่า ความเร็วรอบในการหมุนกวนส่งผลต่อความแข็งแรงดึงรอยเชื่อม ซึ่งความแข็งแรงดึง รอยเชื่อมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบในการหมุนกวนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุเกิดสภาวะ พลาสติกที่เหมาะสม แต่หากความเร็วรอบในการหมุนกวนที่สูงเกินไปนั้น ความแข็งแรงดึงรอย เชื่อมมีแนวโน้มที่ลดลง ต่อมา (Kadaganchi, Gankidi, & Gokhale, 2015) หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยออกแบบการทดลอง response surface methodology โดยศึกษาสมบัติทางกลรอยเชื่อม คือ ความแข็งแรงดึง และการยึดตัว ของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสม Al2014-T6 โดยศึกษา 4 ปัจจัยได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 600, 800, 1000, 1200, 1400 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 200, 400, 600, 800, 1000 มม./นาที มุมเอียงหัวกวน 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 องศา และรูปทรงหัวกวน ได้แก่ ทรง กรวย ทรงสามเหลี่ยม ทรงสี่เหลี่ยม ทรงห้าเหลี่ยม และทรงหกเหลี่ยม พบว่า การเพิ่มขึ้นของ ความเร็วในการหมุนกวน และการลดลงของความเร็วเดินเชื่อมนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ ลงสู่รอยเชื่อม และส่งผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมอย่างมาก ในขณะที่มุมเอียงหัวกวนที่เพิ่มขึ้น นั้นทำให้การไหลตัวของวัสดุภายใต้ปากกวนดีขึ้น โดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ให้สมบัติทางกล ที่ดีของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสม Al2014-T6 คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1000 รอบ/นาที

ความเร็วเดินเชื่อม 800 มม./นาทิจมูมเอียงหัวกวนที่ 3.5 องศา และรูปทรงหัวกวนหกเหลี่ยม ขณะที่ (El-Morsy, Ghanem, & Bahaiham, 2018) ศึกษาผลของพารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของ อะลูมิเนียมผสม Al2024-T4 โดยศึกษาความเร็วรอบในการหมุนกวน 560 - 1800 รอบ/นาทิจความเร็วเดินเชื่อม 11 - 45 มม./นาทิจ ผลการทดลองพบว่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 900 รอบ/นาทิจ และความเร็วเดินเชื่อม 35 มม./นาทิจ ได้รอยเชื่อมที่มีค่าสมบัติทางกลสูงสุด โดยจากการศึกษานั้นการเพิ่มขึ้น และลดลง ของความเร็วเดินเชื่อมในช่วงที่ศึกษาได้มีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงจากวัสดุเดิมที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นส่งผลที่ดีต่อโครงสร้างภายในรอยเชื่อมไม่ทำให้เกิดโพรง (Voids) ซึ่งเป็นจุดบ่งพร่องของรอยเชื่อมที่เกิดจากปริมาณความร้อนที่ไม่เหมาะสม และ (Rajakumar et al., 2011) การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงดึงในการเชื่อมอะลูมิเนียม Al7075 - T6 โดยศึกษาความเร็วรอบในการหมุนกวน 900 - 1800 รอบ/นาทิจ ความเร็วเดินเชื่อม 20 - 100 มม./นาทิจ แรงตามแนวแกน 6, 7, 8, 9, 10 kN พบว่าความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 1400 รอบ/นาทิจ ความเร็วเดินเชื่อม 60 มม./นาทิจ แรงตามแนวแกนที่ 8 kN ได้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 397 MPa จากรายงานสามารถสรุปได้ค่าแรงตามแนวแกนที่มากเกินไปทำให้เกิดปริมาณความร้อนสูงขึ้น วัสดุเกิดการอ่อนตัวมากจนเกินไปหรือสูญเสียสภาพพลาสติกมากขึ้น ทำให้ความหนาของรอยเชื่อมลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมลดลงด้วย อีกทั้งเมื่อแรงตามแนวแกนที่มากยังทำให้เกิดครีบ (Flash) บริเวณขอบรอยเชื่อมอีกด้วย ต่อมาได้มีรายงาน (Su, Wu, Pittner, & Rethmeier, 2013) การวัดแรงบิด มอเตอร์ และแรงตามแนวแกนพร้อมกัน กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมผสม AA2024 - T4 ใช้หัวกวนทรงกรวยเกลียวขนาด 6 มม. ปากกวนขนาด 15 มม. มุมเอียง 2.5 องศา มีระยะกดล็กผิวงานที่ 0.1 มม. ใช้ความเร็วในการป้อนล็ก 8 มม./นาทิจ เมื่อถึงระยะกดล็กเสียดทานแช่หัวกวนไว้ 10 s ความเร็วรอบในการหมุนกวน 600, 800, 1000 รอบ/นาทิจ ความเร็วเดินเชื่อม 40, 80, 120 มม./นาทิจ พบว่า แรงบิดของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นสูงเกิดที่แกน Z เมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนที่สูงจะส่งผลให้แรงบิดที่ลดลง ในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมส่งผลต่อแรงบิดเพียงเล็กน้อย แต่แรงบิดก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วเดินเชื่อม ส่วนค่าแรงตามแนวแกนทั้งหมดนั้นการเพิ่มขึ้นของความเร็วเดินเชื่อมจะมีผลที่มากกว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบในการหมุนกวน โดยลักษณะการเชื่อมที่ดีคือ ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำ และความเร็วรอบในการหมุนกวนที่สูงจะเกิดแรงเสียดทานที่ลดลง ส่งผลให้ค่าแรงตามแนวแกนต่ำ ที่ผ่านมามีรายงาน (Moshwan et al., 2015) ศึกษาผลของความเร็วรอบในการหมุนกวนที่มีผลต่อ แรงตามแนวแกน โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล อะลูมิเนียมผสม Al5052 โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 800 - 3000 รอบ/นาทิจ ความเร็วเดินเชื่อม

ควบคุมไว้ที่ 120 มม./นาทิต พบว่า ค่าแรงตามแนวแกนเกิดขึ้นสูงสุดที่ แกน Z ของเครื่องกัด โดยค่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นนั้นจะแปรผันไปตามความเร็วรอบในการหมุนกวน ซึ่งความเร็วรอบในการหมุนกวนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงตามแกนที่น้อยก็จริง แต่ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่สูงเกินไปนั้นทำให้ค่าสมบัติทางกลของรอยเชื่อมที่ลดลง และตามรายงานความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 1000 รอบ/นาทิต ให้ค่าความแข็งดึงสูงสุดเท่ากับ 132 Mpa ความแข็งรอยเชื่อม 55 HV เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมอะลูมิเนียมผสม Al5052 เป็นไปตามรายงานที่ (Jassim, Abtan, & Marmoos, 2019) ศึกษาผลกระทบความเร็วในการหมุนกวน และความเร็วเดินเชื่อม ต่อการเกิดกระจายตัวอุณหภูมิกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมผสม AA2024 - T3 ใช้ความเร็วในการหมุนกวน 690, 1130, 2000 รอบ/นาทิต ความเร็วเดินเชื่อม 20, 32, 45 มม./นาทิต มุมเอียง 3 องศา ในการวัดอุณหภูมิระหว่างกระบวนการใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K-type โดยทำการทดลองเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองจริง กับค่าจำลองทางทฤษฎี พบว่า ค่าอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อใช้ ความเร็วในการหมุนกวน 2000 รอบ/นาทิต ความเร็วเดินเชื่อม 20 มม./นาทิต โดยค่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลอง เท่ากับ 860 K ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณพื้นที่กวน NZ ทั้งนี้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ อะลูมิเนียมผสม AA2024 อยู่ที่ 911 K ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อมสูงหรือต่ำ จะขึ้นอยู่กับค่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการหมุนกวน และความเร็วเดินเชื่อมช้าลง ซึ่งปัจจัยหลักที่สำคัญต่อคุณภาพของรอยเชื่อม คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน และความเร็วเดินเชื่อม โดยความเร็วรอบในการหมุนกวน ทำให้เกิดความร้อน และการเสีรูปร่างพลาสติก เมื่อความเร็วรอบมากเกินไปส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง ส่วนความเร็วเดินเชื่อมควบคุมร้อนให้มีปริมาณที่เหมาะสม หากความเร็วเดินเชื่อมสูงเกินไปทำให้การเสีรูปร่างพลาสติกไม่เพียงพอส่งผลต่อโครงสร้างภายในรอยเชื่อม และทำให้เกิดแรงตามแนวแกนในการเชื่อมที่สูงขึ้นตามไป ความเร็วรอบในการหมุนกวน และความเร็วเดินเชื่อมต้องควบคุมให้สัมพันธ์กัน

งานวิจัยที่พัฒนาเครื่องมือ เช่น หัวกวนและบ่ากวน ซึ่งทำหน้าที่เสียดสีสร้างความร้อน เกิดการอ่อนตัว และกวนเนื้อวัสดุให้เกิดการผสมผสานภายในรอยเชื่อม ในการเชื่อมวัสดุที่ชนิดเดียวกัน และแตกต่างกันมีผู้ที่วิจัยดังต่อไปนี้ รายงานของ (Shojaeefard et al., 2015) การศึกษาขนาดหัวกวน และขนาดบ่ากวนต่างกันว่าผลต่ออุณหภูมิระหว่างกระบวนการเชื่อมอะลูมิเนียม Al5083 โดยใช้วิเคราะห์แบบ 3D FEM ใช้แบบจำลอง Neural network ศึกษาหัวกวนที่ขนาด 2, 3, 4, 5 มม. ขนาดบ่ากวน 9, 12 มม. พบว่า การเพิ่มขึ้นของบ่ากวนทำให้อุณหภูมิบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ มีการกระจายความร้อนบริเวณที่กว้างขึ้นส่งผลให้คุณภาพของรอยเชื่อมลดลง ขณะที่ขนาดหัวกวนไม่ส่งผลมากนักต่อการกระจายความร้อนบริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ ต่อมา (Venkateswarlu, Mandal, Mahapatra, & Harsh, 2013) ออกแบบหัวกวนกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

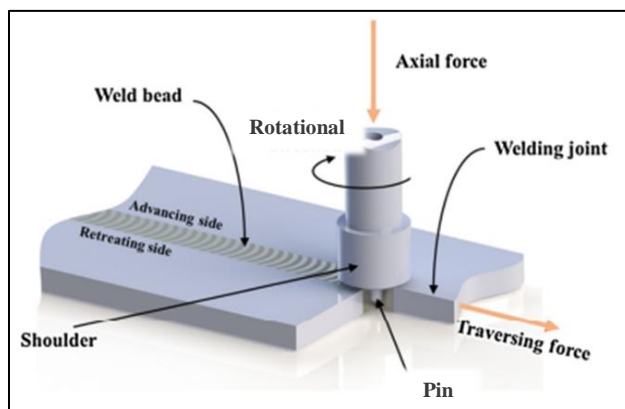
อะลูมิเนียมผสม AA7039 ปัจจัยที่ศึกษาพื้นผิวบ่ากวนเอียง 3, 2, 1 องศา ขนาดบ่ากวน 22, 19, 16 มม. และหัวกวนขนาด 8, 7, 6 มม. เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง, การยืดตัว โดยขึ้นรูปขึ้นตามทดสอบมาตรฐาน ASTM - E8 รายงานว่า ทุกปัจจัยส่งผลต่อความแข็งแรงดึง และการยืดตัว โดยพื้นผิวบ่ากวนเอียง 2 องศา ขนาดบ่ากวน 19 มม. และหัวกวนขนาด 7 มม. ให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 290.12 Mpa คิดเป็น 44.3% จากวัสดุเดิม และการยืดตัวที่ 7.02% เป็นสมบัติทางกลที่ดีที่สุดในช่วงปัจจัยที่ศึกษา (Saravanan, Rajakumar, Banerjee, & Amuthakkannan, 2016) ศึกษาอัตราส่วนของบ่ากวนต่อขนาดหัวกวน เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ซึ่งเชื่อมวัสดุที่แตกต่างกัน ระหว่าง AA2024 - T6 และ AA7075 - T6 โดยมีปัจจัยควบคุมคือความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 1200 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 12 มม./นาที แรงตามแนวแกน 8 kN และอัตราส่วนบ่ากวนที่ 2, 2.5, 3, 3.5, 4 เท่า จากขนาดหัวกวน พบว่า อัตราส่วนบ่ากวนที่ 3 เท่าให้ค่าสมบัติทางกลที่ดี มีการแตกหักแบบเหนียว ให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 356 Mpa และความแข็งแรงเชื่อมสูงสุดบริเวณพื้นที่กวน NZ เท่ากับ 151 HV ซึ่งบริเวณดังกล่าวเกิดเกรนที่ละเอียดกว่าวัสดุเดิม ส่วนบริเวณที่มีความแข็งแรงต่ำสุด บริเวณพื้นที่กระทบร้อน HAZ มีขนาดเกรนที่หยาบกว่าบริเวณวัสดุเดิม เช่นเดียวกันกับรายงานของ (Othman, Ishak, & Shah, 2017) ศึกษาอัตราส่วนของบ่ากวนและขนาดหัวกวน ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และความแข็งแรงดึง โดยเชื่อมแม่กนิเชื่อมอัลลอย AZ31 โดยมีปัจจัยควบคุมคือความเร็วรอบในการหมุนหัวกวนที่ 1000 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 100 มม./นาที มุมเอียง 3 องศา และอัตราส่วนบ่ากวนที่ 2.5, 2.75, 3, 3.33, 3.66, 4.5, 5, 5.5 เท่า จากขนาดหัวกวน พบว่า อัตราส่วนบ่ากวนที่ 3.33 เท่า ขึ้นทดสอบมีขนาดเกรนบริเวณพื้นที่กวน NZ ที่ละเอียดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ จึงส่งผลให้บ่ากวนอัตราส่วนที่ 3.33 ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 241.4 Mpa ต่อมา (Prakash, Jha, & Lal, 2018) ศึกษารูปทรงของหัวกวนเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม Al6061 โดยควบคุมความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ 1120 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 80 มม./นาที บ่ากวนขนาด 18 มม. ซึ่งหัวกวนมีรูปทรงดังนี้ ทรงกระบอก ทรงกรวย ทรงกระบอกกรวย และทรงสี่ปกรวย ศึกษาโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม และความแข็งแรงดึง พบว่า หัวกวนทรงกรวยนั้นให้โครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม NZ ที่ละเอียด เมื่อเทียบกับรูปทรงอื่นๆ และให้ลักษณะรอยเชื่อม แบบอ่างขนาดเล็ก ทำให้สมบัติทางกลที่ดี จากรายงานของ (Kasman & Yenier, 2014) ศึกษาการวิเคราะห์การเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยที่ใช้วัสดุที่นำมาเชื่อมต่างกัน ระหว่าง AA5754 กับ AA7075 มีปัจจัยศึกษาดังต่อไปนี้ ขนาดบ่ากวน 18, 20, 22 มม. ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1000, 1250 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 80, 100, 125 มม./นาที หัวกวนขนาด 3 มม. มุมเอียง 3 องศา ช่วงเวลาระยะกดลึกลึกเสียดทาน 30 s หัวกวนทรงกระบอกทำจากวัสดุ H13 มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 51 HRC พบว่า ขนาดบ่ากวน 22 มม. ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1000 รอบ/

นาที ความเร็วเดินเชื่อม 80 มม./นาที ให้สมบัติทางกลดีที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลลัพธ์สรุปได้ว่า พารามิเตอร์ทั้งหมดมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงดึง โดยความเร็วรอบในการหมุนกวน 13.28% ขนาดปากกวน 17.58% และความเร็วเดินเชื่อม 41.41% มากไปกว่านั้นมีการศึกษารูปทรงหัวกวน ต่อแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Trimble, Monaghan, & O'donnell, 2012) ศึกษาแรงตามแนวแกนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมผสม AA2024-T3 โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ในการวัดแรงจากความเร็วรอบในการหมุนกวน หัวกวนรูปทรงกระบอก และทรงกระบอกเกลียวจากวัสดุ H13 ปากกวนขนาด 18 มม. มุมเอียง 2 องศา โดยศึกษาที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 450 รอบ/นาที และความเร็วเดินเชื่อม 90, 180 มม./นาที ระยะกดลึกลับงาน 0.2 มม. พบว่า หัวกวนทรงกระบอกเกลียวทำให้เกิดการไหลตัวของวัสดุมาก ส่งผลให้ค่าแรงตามแนวแกน แนวตั้งมีค่าที่ลดลง ทั้งนี้ค่าแรงแนวตั้งจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วเดินเชื่อมที่สูงขึ้นจากผลลัพธ์แรงแนวตั้งสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่าง ระยะกดหัวกวน (Plunging) และลดลงอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 35% เมื่อถึงระยะกดลึกลับเสียดทาน (Dwelling) อีกทั้งหัวกวนทรงกระบอกเกลียวยังให้ค่าความแข็งแรงดึง และการยึดตัวสูง

จากการสำรวจยังไม่มียานวิจัยใดศึกษาหัวกวนที่มีขนาดเล็ก ซึ่งคาดว่าจะสามารถลดแรงตามแนวแกนที่ใช้ในการเชื่อมลงได้ พร้อมกับให้สมบัติทางกลที่ดี และสามารถนำไปต่อยอดประยุกต์ใช้กับเครื่องกัดอัตโนมัติ เนื่องจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนี้ เกิดแรงตามแนวแกนที่ใช้ในการเชื่อมสูง แต่เครื่องกัดอัตโนมัติอาจเกิดการสึกหรอสูง ซึ่งผู้วิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะทำการทดลองเชื่อมบนเครื่องกัดกึ่งอัตโนมัติเพียงเท่านั้น

2.2 การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding ; FSW) (ศิริรักษ์, 2016) เป็นเทคนิคการเชื่อมโลหะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมละลายเรียกว่า การเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid state) เทคนิคนี้มีข้อดีได้แก่ โครงสร้างจุลภาคเล็กละเอียดคุณสมบัติทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมดี ไม่สูญเสียธาตุผสม เป็นต้น

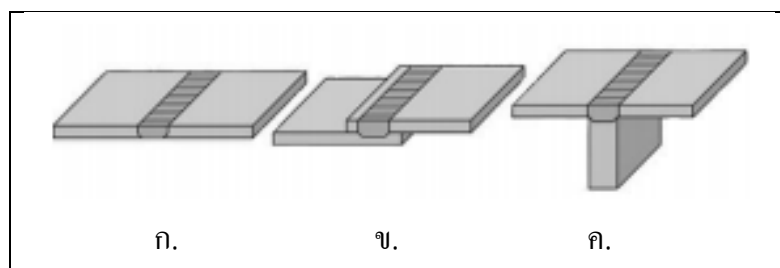


รูปที่ 2. 1 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Eslami, Tavares, & Moreira, 2017)

ความร้อนสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเกิดจากการหมุนเสียดสีของเครื่องมือกวนกับชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.1 ชิ้นงานด้านที่ถูกเติมเนื่องจากอีกฝั่งเรียกว่า ด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side ; AS) ส่วนด้านที่ถูกเอาเนื้อออกไปเติมให้ด้าน AS เรียกว่า ด้านรีทเรตติงไซด์ (Retreating side ; RS) เมื่อวัสดุชิ้นงานเกิดการอ่อนตัวเสียรูปแบบพลาสติก เครื่องมือกวนจะถูกสอดลงไปเพื่อผสมผสานเนื้อวัสดุเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถแก้ปัญหาการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอยได้ดี ทำให้มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องด้านโลหะวิทยา และกลไกความแข็งแรงของรอยเชื่อม พบว่า ประสิทธิภาพทางกลของรอยเชื่อมยังต่ำกว่าโลหะพื้น (Base metal) ถึงแม้ว่าพารามิเตอร์กระบวนการเชื่อมถูกควบคุมให้เหมาะสมแล้วก็ตาม อิทธิพลของปัจจัยด้านการสึกหรอของเครื่องมือกวนและการนำความร้อนของวัสดุที่แตกต่างกันทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นและเกิดกลไกความแข็งแรงไม่สม่ำเสมอตลอดแนวเชื่อม

2.2.1 องค์ประกอบของการเชื่อม พารามิเตอร์กระบวนการที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพรอย เชื่อมประกอบด้วย รูปแบบการเชื่อมต่อวัสดุ เครื่องมือกวน และพารามิเตอร์การเชื่อม

2.2.1.1 รูปแบบการเชื่อมต่อ รูปแบบพื้นฐานของการเชื่อมต่อวัสดุ ประกอบด้วย 3 รูปแบบ ได้แก่ การเชื่อมเชื่อมต่อบน (Butt joint) แบบต่อเกย (Lap joint) และแบบต่อตัวที (T-joint) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2 รูปแบบพื้นฐานการเชื่อมต่อวัสดุ (ศิริรักษ์, 2016)

ก. การเชื่อมเชื่อมต่อบนขอบ (Butt joint)

ข. แบบต่อเกย (Lap joint)

ค. แบบต่อตัวที (T-joint)

นอกจากนี้ยังมีรูปแบบการเชื่อมแบบต่อประยุกต์ เช่น แบบต่อชนขอบ (Edge butt joint) แบบต่อชนตัวที (T-butt joint) แบบต่อเกยหลายๆชั้น (Multiple lap joint) โดยแต่ละรูปแบบการเชื่อมต่อนั้น เกิดการไหลของเนื้อวัสดุในลักษณะที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพรอยเชื่อม โดยการเชื่อมแบบต่อชนมีลักษณะการไหลตัวผสมกันของเนื้อวัสดุแบบราบเรียบ โครงสร้างรอยเชื่อมมีความสม่ำเสมอ และเป็นเนื้อเดียวกัน มีประสิทธิภาพรอยเชื่อมที่ดี ส่วนการเชื่อมแบบต่อเกย และการต่อแบบตัวที การไหลของเนื้อวัสดุเป็นแบบปั่นป่วนเพื่อให้เกิดการผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุด้านบน และด้านล่าง ซึ่งการไหลตัวของเนื้อวัสดุแบบปั่นป่วนที่ไม่เพียงพอทำให้โครงสร้างรอยเชื่อมเกิดจุดบกพร่องได้ง่าย ส่งผลต่อประสิทธิภาพทางกลต่ำลง เนื่องจากการต่อแบบต่อเกย ความร้อนจะมีผลกระทบกับรอยเชื่อมที่มากกว่าทำให้เกิดจุดบกพร่องได้ง่าย นำไปสู่การพังเสียหายได้เร็วกว่าการเชื่อมแบบต่อชน

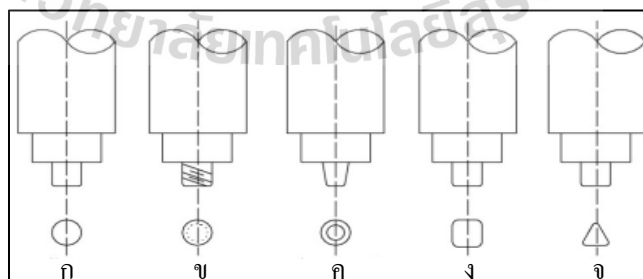
2.2.1.2 เครื่องมือกวน ทำหน้าที่สร้างความร้อนขึ้นในขณะที่เชื่อมและกวนให้เกิดการประสานติดกัน เครื่องมือกวนมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ

1) บ่ากวน (Shoulder) ทำหน้าที่เสียดสีกับผิวหน้าวัสดุเชื่อม ทำให้เกิดความร้อนกับแนวเชื่อมและเกิดการอ่อนตัว โดยส่วนใหญ่ยังไม่มีการกำหนดหลักเกณฑ์ที่แน่นอนในการกำหนดขนาดของบ่ากวน แต่จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาขนาดของบ่ากวนที่ดีควรรอยู่ที่ 3-4 เท่าของความหนาวัสดุที่ทำการเชื่อม (Rajakumar et al., 2011, Saravanan et al., 2016, Kasman & Yenier, 2014, และศิริรักษ์, 2016)

2) หัวกวน (Pin) ทำหน้าที่เสียดสีสร้างความร้อนในรอยเชื่อมและกวนเนื้อวัสดุให้เกิดการไหลตัวเข้าไปผสมผสานภายในรอยเชื่อม รูปทรงหัวกวนพื้นฐาน ดังรูปที่ 2.3 เริ่มแรกรูปทรงของหัวกวนแบบพื้นฐานออกแบบให้มีหัวกวนทรงกระบอก บ่ากวนแบนราบ จากนั้นพัฒนาให้มีเกลียว และบ่าเว้า การเลือกชนิดของวัสดุเครื่องมือกวนให้เหมาะสมกับวัสดุเชื่อมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ควรเลือกวัสดุที่มีสมบัติด้านทานการสึกหรอได้ดี เช่น วัสดุในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61 (JIS) หรือ H13 (AISI) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนประเภท Cr-Mo-V สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางรวมถึงเครื่องมือกวน หรือหัวกวน เนื่องจากมีผสมคาร์บอนประมาณ 0.4% ช่วยให้มีความแข็งแรง และความเหนียวสูง มีความสามารถในการชุบแข็งได้ดี ทำให้มีความต้านทานต่อการเสียดสี และการสึกหรอสูงมาก นิยมนำไปใช้งานที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง เช่น งานแม่พิมพ์ฉีดโลหะ แม่พิมพ์อัดขึ้นรูป แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูป แม่พิมพ์พลาสติก แม่พิมพ์งานร้อนต่างๆ สกรูและกระบอกงานฉีดพลาสติกและโลหะ ตัวปลดชิ้นงาน ใบตัดเหล็กร้อน รวมถึงเครื่องมือกวน หรือหัวกวนในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Trimble et al., 2012 และ Kasman & Yenier, 2014)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD61

ส่วนผสมทางเคมี (%wt)	C	Si	Mn	Cr	Mo
	0.40	1.00	0.40	5.00	1.30
กระบวนการอบชุบทางความร้อน(การชุบแข็ง)					
อุณหภูมิ (°C)	สารชุบ	อุณหภูมิอบคืนตัว (°C)	ความแข็ง (HRC)		
1020 - 1050	น้ำมัน, อากาศ, อ่างเกลือ	100 - 650	42 - 56		



รูปที่ 2.3 รูปทรงหัวกวนแบบพื้นฐาน (Elangovan & Balasubramanian, 2007)

- ก. ทรงกระบอก ข. ทรงกระบอกเกลียว ค. ทรงกรวย
ง. ทรงสี่เหลี่ยม จ. ทรงสามเหลี่ยม

2.2.1.3 พารามิเตอร์การเชื่อม เป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อคุณภาพของรอยเชื่อม ประกอบด้วย (Jassim et al., 2019)

1) ความเร็วรอบในการหมุนกวน (Rotational speed) ทำให้เกิดปริมาณความร้อนและการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปริมาณความร้อนแปรเปลี่ยนตามอัตราความเร็วรอบการหมุนกวน

2) ความเร็วเดินเชื่อม (Welding speed) ควบคุมความร้อนให้มีปริมาณที่เหมาะสม ถ้าหากความเร็วเดินเชื่อมสูงทำให้ความร้อนที่เกิดมีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกไม่เพียงพอสำหรับการไหลของเนื้อวัสดุและส่งผลต่อโครงสร้างภายในรอยเชื่อม

ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 2 ต้องควบคุมให้สัมพันธ์กัน ส่วนพารามิเตอร์ด้านรูปทรงของบ่าเครื่องมือกวน และหัวกวนทำให้เกิดการกวนและปั่นป่วนเนื้อวัสดุผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3) การเอียงมุมแท่งกวน (Tool tilt) เป็นพารามิเตอร์ที่ช่วยให้การกวนเกิดการปั่นป่วนของเนื้อวัสดุ และผสมผสานเข้ากันได้ดีมากขึ้น โดยมุมเอียงควรอยู่ระหว่าง $0-3^{\circ}$ (Anil Kumar et al., 2015, Kadaganchi et al., 2015 และ Trimble et al., 2012)

4) ระยะกดลึกผิวงาน (Tool penetration) ทำให้เกิดความร้อนและการอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมได้ดี ควรอยู่ระหว่าง 0.1-0.3 มม. (Su et al., 2013)

2.2.1.4 ข้อดีของกระบวนการเชื่อมเสียดทาน

- ให้สมบัติทางกลที่ดีกว่าการเชื่อมที่ให้ความร้อนสูง
- สามารถเชื่อมวัสดุต่างชนิดกันได้
- ไม่ต้องมีการเติมเนื้อจากลวดเชื่อม
- ไม่ต้องใช้แก๊สปกคลุมผิวระหว่างการเชื่อม
- ใช้พลังงานความร้อนต่ำ
- ไม่เกิดควันและรังสีจากการอาร์ค
- ไม่ต้องตกแต่งผิวภายหลังการเชื่อม
- ไม่เกิดรูพรุนภายในแนวเชื่อม

2.3 อะลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys) (ธรรมโชติ, 2549) เป็นวัสดุโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น มีความหนาแน่นต่ำประมาณ 2.7 g/cm^3 เมื่อเทียบกับเหล็กซึ่งมีความหนาแน่น 7.9 g/cm^3 นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในสภาวะแวดล้อมบางสภาวะ รวมทั้งในอากาศ มีค่าความเหนียวสูง (High Ductility) ซึ่งง่ายต่อการขึ้นรูปใน

ขณะเดียวกันก็ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติโดยการเติมธาตุบางตัว หรือปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน (Heat Treatment) เพื่อให้โลหะอะลูมิเนียมหรืออะลูมิเนียมผสมนั้นมีสมบัติเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันชั้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงประมาณ 49 MPa และ 400 MPa ถ้าทำเป็นโลหะผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้าและทองแดง อ่อน สามารถตัดได้สะดวก กิ่งและหล่อแบบได้ง่าย มีความสามารถต่อต้านการกัดกร่อนสูง พื้นหน้ากระจกเงาที่เป็นอะลูมิเนียมมีการสะท้อนแสงมากกว่าโลหะอื่น ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 200 - 400 nm (UV) และ 3000 - 10000 nm ส่วนในช่วงที่มองเห็นได้ คือ 400 - 700 nm โลหะเงินสะท้อนแสงได้ดีกว่าเล็กน้อย และในช่วง 700 - 3000 โลหะเงิน ทองคำ และทองแดง สะท้อนแสงได้ดีกว่า อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ตัดได้ง่าย และสามารถนำความร้อนได้ดี

2.3.1 คุณสมบัติอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมมีจุดหลอมละลายที่ 660°C เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา รับภาระต่อน้ำหนักได้สูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ไม่เสียดื้อรอยร้าว และการแตกหัก ไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อน และไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ โดยเฉพาะการนำมาผสมกับโลหะอื่นๆแล้วจะทำให้คุณสมบัติต่างๆเพิ่มมากขึ้น เช่น จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมจะอยู่ที่ $1140 - 1205^{\circ}\text{C}$ นอกจากนั้น ยังมีคุณสมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียมในลักษณะต่างๆ

ตารางที่ 2. 2 คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียม

คุณสมบัติทั่วไป	
ชื่อ สัญลักษณ์ เลขอะตอม	อะลูมิเนียม Al 13
อนุกรมเคมี	โลหะ
ลักษณะ	มันวาว
มวลอะตอม	26.98 g/mol
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	(Ne) ^{3s² 3p¹}
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2,8,3

ตารางที่ 2. 3 คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียม

คุณสมบัติทางกายภาพ	
สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่นอุณหภูมิห้อง	2.70 g/cm ³
ความหนาแน่นของของเหลวที่จุดหลอมเหลว	2.38 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	933.47 K (660.32 °C)
จุดเดือด	2792 K (2519 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	10.71 kJ/mol
ความร้อนการกลายเป็นไอ	294.00 kJ/mol

2.3.2 อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought Aluminium Alloys) การแบ่งเกรดอะลูมิเนียม มีการแบ่งเกรดจากสมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา โดยใช้หลักเกณฑ์ของส่วนผสมเป็นเกณฑ์ ด้วยเลข 4 หลัก สำหรับใช้แทนเป็นสัญลักษณ์เกรดอะลูมิเนียมขึ้นรูป

ตารางที่ 2. 4 อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought Aluminium Alloys)

อะลูมิเนียมขึ้นรูปเย็นผสม (Wrought Aluminium Alloys)	
สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1xxx	อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.00 %
2xxx	ทองแดง (Copper ; Cu)
3xxx	แมงกานีส (Manganese ; Mn)
4xxx	ซิลิกอน (Silicon ; Si)
5xxx	แมกนีเซียม (Magnesium ; Mg)
6xxx	แมกนีเซียม (Magnesium ; Mg) และซิลิกอน (Silicon ; Si)
7xxx	สังกะสี (Zinc ; Zn)
8xxx	อื่นๆ เช่น นิกเกิล (Nickel ; Ni) ไททานียม (Titanium ; Ti) โครเมียม (Chromium ; Cr) บิสมัท (Bismuth ; Bi) และตะกั่ว (Lead ; Pb)
9xxx	ยังไม่มีใช้

1) หลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุดในการแสดงหมวดหมู่ของโลหะผสม ใน 8 กลุ่ม ดังรายละเอียดในขั้นต้น เช่น 1xxx แทนหมวดโลหะอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.00 โดยน้ำหนัก

2) หลักที่สอง เป็นตัวเลขที่ใช้กำกับโลหะอะลูมิเนียมที่มีการผสมโลหะอื่นให้มีปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น 2024 ที่ประกอบด้วย 4.5Cu 1.5Mg 0.5Si และ 0.1Cr เมื่อเปลี่ยนเป็น 2218 จะประกอบด้วย 4.0Cu 2.0Ni 1.5Mg และ 0.2Si ซึ่งเป็นการผสม Ni แทน Cr

3) หลักที่สาม และสี่ เป็นตัวเลขที่แสดงชนิดย่อยของโลหะผสมที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่แสดงส่วนผสมที่แตกต่างกัน เช่น 2014 ที่ประกอบด้วย 4.4Cu 0.8Si 0.8Mn และ 0.4Mg เมื่อเปลี่ยนเป็น 2017 จะประกอบด้วย 4.0Cu 0.8Si 0.5Mn และ 0.1Cr

4) อะลูมิเนียมผสมทองแดง (2xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่ผสมทองแดงโดยพบว่าทองแดงสามารถละลายได้ในอะลูมิเนียมสูงสุดที่ 5.65 % ที่อุณหภูมิ 548 °C และจะละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จนเหลือประมาณ 0.5 % ที่อุณหภูมิ 200 °C เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านความร้อน

5) อะลูมิเนียมผสมแมงกานีส (3xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่ผสมแร่แมงกานีส โดยหากเพิ่มแร่แมงกานีสที่ 1.2 % จะทำให้เป็นโลหะผสมที่มีความแข็งแรงพอควร เหมาะสำหรับใช้งานในด้านโครงสร้างต่างๆ

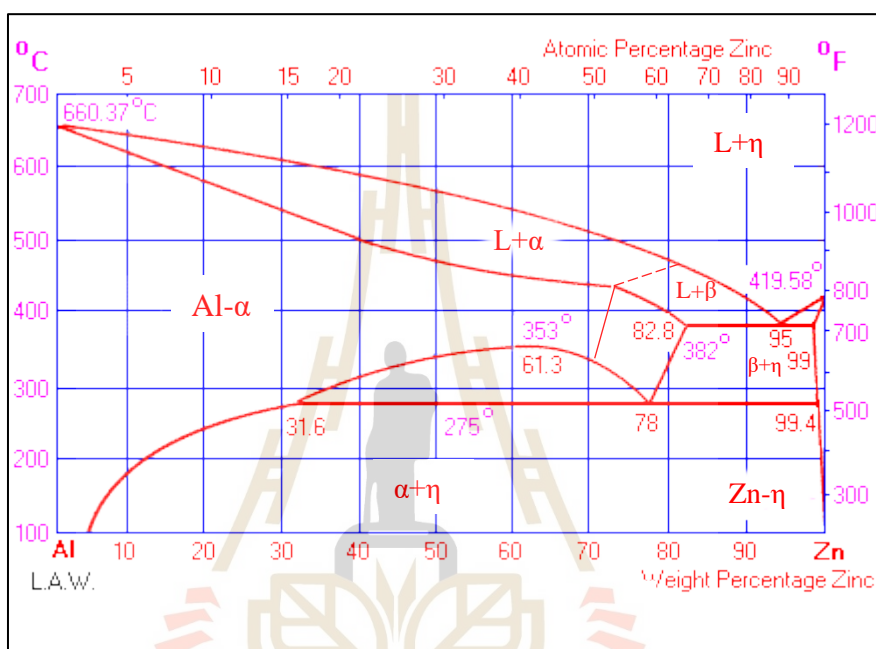
6) อะลูมิเนียมผสมซิลิกอน (4xxx) มักพบเป็นอะลูมิเนียมที่ผสมด้วยซิลิกอนพร้อมกับแร่อื่นๆ แต่มีอัตราส่วนน้อยกว่า เช่น ซิลิกอน 11.0 - 13.5 % ทองแดง 0.5 - 1.3 % สังกะสี 0.5 % เหล็ก 1 % แมกนีเซียม 0.8 - 1.3 % และนิกเกิล 0.5 - 1.3 % เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้งานประเภทที่ทนความร้อน เช่น กระจบokus ลูกสูบ ก้านสูบ ห้องเครื่อง เป็นต้น

7) อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม (5xxx) เป็นอะลูมิเนียมที่ผสมแร่แมกนีเซียม แต่พบน้อยมากในอัตราส่วนผสมของแมกนีเซียมมากๆ ส่วนมากมักใช้ผสมร่วมกับแร่อื่นๆ เนื่องจากมีความสามารถในการละลาย และหลอมรวมกับอะลูมิเนียมได้ไม่ดี หากใช้เป็นส่วนผสมมากจะทำให้วัสดุแข็ง และเปราะหักง่าย

8) อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมกับซิลิกอน (6xxx) มักเป็นอะลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนของแมกนีเซียม และซิลิกอนในอัตราส่วนน้อย โดยทั่วไปผสมแมกนีเซียม 0.6 - 1.2 % ซิลิกอน 0.4 - 1.3 % นอกจากนี้อาจมีการผสมโครเมียมหรือทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงด้วย

9) อะลูมิเนียมผสมสังกะสี (7xxx) มักเป็นอะลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนของสังกะสีหรืออาจผสมแร่อื่นๆร่วมด้วยเล็กน้อย เช่น แมกนีเซียมและทองแดง โดยสังกะสีกับแมกนีเซียมรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงโลหะ $MgZn_2$ โดยความสามารถในการละลายของสังกะสีกับแมกนีเซียมในอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างสูง ทำให้เกิดตะกอนที่หนาแน่นมากจึงทำให้มีความแข็งแรงขึ้นเมื่อนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยหนึ่งในอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูปเย็นที่มีความนิยมากที่สุดคือ A17075 ซึ่งกลุ่มอะลูมิเนียมนี้มักประยุกต์ใช้ในด้านความทนทาน แข็งแรงสูง เช่น

โครงสร้างเครื่องบินและอากาศยานขนาดใหญ่ เป็นต้น แต่ยังมีข้อจำกัดที่ว่าอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้ ผุกร่อนแตกร้าวได้ง่ายกว่าอะลูมิเนียมกลุ่มอื่นๆ จึงมักจะผสม โครเมียมเล็กน้อย ทำให้ทนทานต่อการผุกร่อนสูงขึ้น แต่ยังคงมีความสามารถในการเชื่อมแบบหลอมละลายที่ต่ำ เนื่องจากมีการผสมของทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแต่ก็เกิดการแตกร้าวเมื่อนำมาเชื่อมแบบหลอมละลาย อีกทั้งยังสังกะสีเกิดเป็นควันอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และสิ่งแวดล้อม



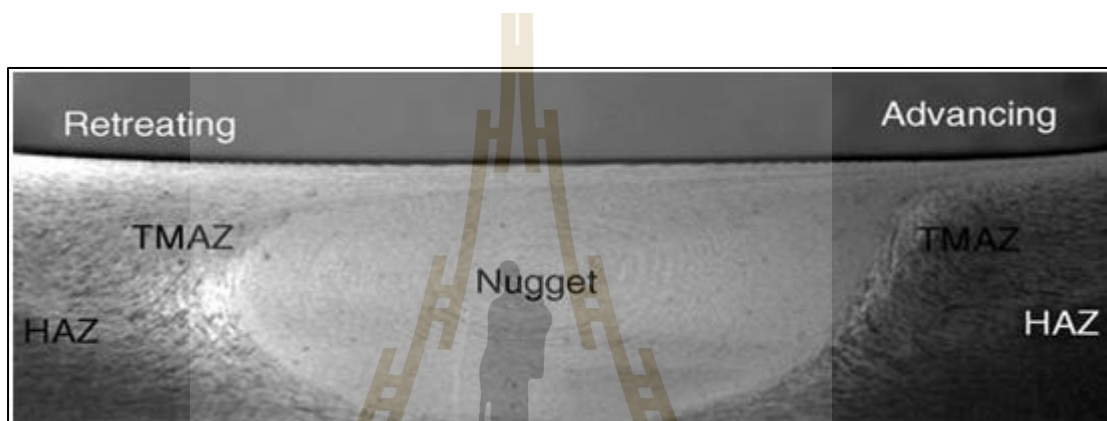
รูปที่ 2. 4 แผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Ares & Schvezov, 2007)

จากแผนภาพสมดุลอะลูมิเนียมมีจุดหลอมละลายที่ประมาณ 660 °C ซึ่งสูงกว่าสังกะสีที่มีจุดหลอมละลายที่ประมาณ 419 °C โดยสังกะสีนั้นสามารถละลายในอะลูมิเนียมสูงสุด 31.6% เกิดปฏิกิริยายูเทคตอยที่ 78% ของสังกะสี อุณหภูมิประมาณ 275 °C และเกิดเกิดปฏิกิริยาเพคติกที่ 95% ของสังกะสี อุณหภูมิประมาณ 382 °C

10) อะลูมิเนียมผสมแร่อื่นๆ (8xxx) เป็นอะลูมิเนียมผสมที่ใช้แพร่ผสมชนิดอื่น นอกเหนือจากข้างต้น เช่น นิเกิล ไททาเนียม โครเมียม บิสมัท และตะกั่ว

2.4 สมบัติทางโลหะวิทยา

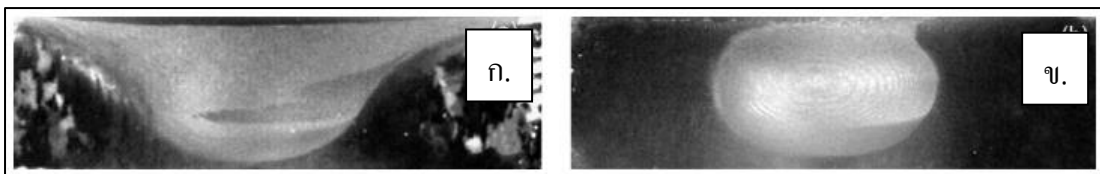
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะทำให้บริเวณที่ผ่านการเชื่อมมานั้นมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคในรอยเชื่อมมีบริเวณที่รับผลกระทบจากการเชื่อมมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อน และการกวน ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ การตกตะกอน และขนาดของเกรนที่ต่างกัน โดยประกอบไปด้วย พื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ) พื้นที่กระทบร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone ; TMAZ) และพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) (Mishra & Ma, 2005) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 พื้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Mishra & Ma, 2005)

2.4.1 พื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ)

เป็นพื้นที่บริเวณตรงกลางแนวเชื่อมได้รับอิทธิพลจากความร้อน และการกวน โดยตรง มีอุณหภูมิสูงในช่วง 400-550 °C เกิดการไหลของเนื้อวัสดุรอบๆ หัวกวนด้าน RS ไปด้าน AS ผสมผสานเป็นเนื้อเดียวกัน โดยปัจจัยด้านรูปทรงหัวกวน อุณหภูมิของชิ้นงาน และการนำความร้อนของวัสดุ มีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของพื้นที่กวน ผลของความร้อนและการกวน โครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นวงแหวน (Onion ring) เป็นผลมาจากอิทธิพลของหัวกวน เกิดการปั่นป่วนรอบๆ หัวกวนจึงเกิดเป็นชั้นๆ ในพื้นที่กวน โครงสร้างของเกรนจะมีขนาดเล็กละเอียด และเกิดเกรนที่ยืดยาวหรือเกรนอิควิแอกซ์เล็กละเอียด โดยลักษณะรูปร่างของพื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ) ประกอบด้วย 2 รูปร่าง คือ แบบอ่าง (Basin-shaped nugget) มีรูปร่างกว้างบริเวณพื้นผิวหน้าด้านบนที่เกิดจากการเสียรูปและความร้อนจากการเสียดทานของหน้าสัมผัสกับผิวหน้ารอยเชื่อม และแบบวงรี (Elliptical nugget) มีลักษณะโค้งมนคล้ายรูปไข่ เกิดจากความเร็วในการกวนสูงทำให้เกิดรูปร่างดังกล่าว ดังรูปที่ 2.6



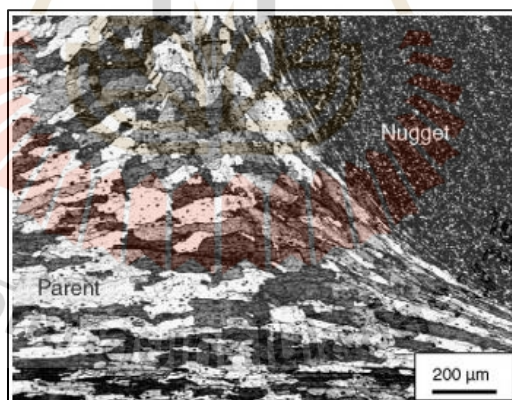
รูปที่ 2. 6 ลักษณะรูปร่างพื้นที่กวน (Mishra & Ma, 2005)

ก. แบบอ่าง (Basin-shaped nugget)

ข. แบบวงรี (Elliptical nugget)

2.4.2 พื้นที่กระทบร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone ; TMAZ)

เป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการกวนของหัวกวนจากพื้นที่กวน มีผลให้โครงสร้างจุลภาคในพื้นที่กระทบร้อนทางกล เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดจากการเสีรูปร่าง และไหลตัวของวัสดุเพื่อเข้าไปผสมผสานกันในพื้นที่กวน จากอิทธิพลของความร้อนและการกวน การตกผลึกใหม่เกิดขึ้นน้อยเพราะความร้อนไม่เพียงพอ และผลของการกวน โครงสร้างเกรนมีลักษณะบิดเบี้ยวยืดยาวมีทิศทางการไหลตัวของเนื้อวัสดุ

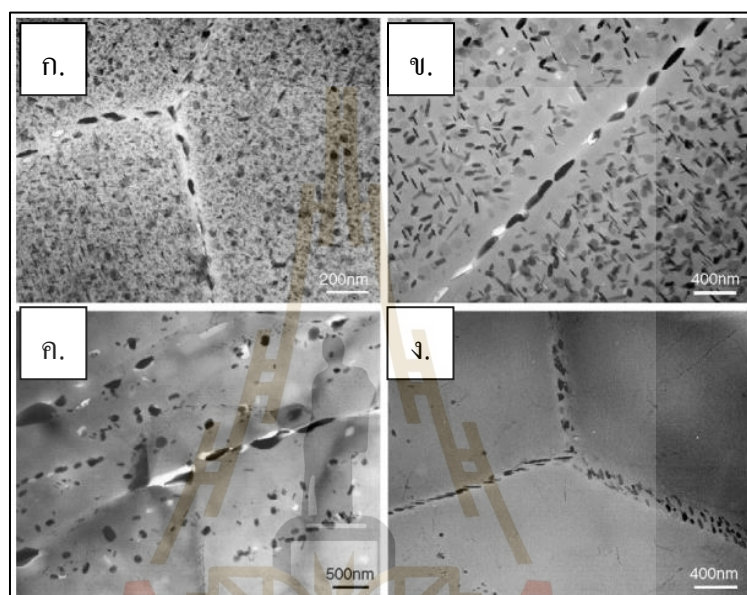


รูปที่ 2. 7 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคพื้นที่กระทบร้อนทางกล (Mishra & Ma, 2005)

2.4.3 พื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ)

เป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบความร้อนในการเชื่อมต่อกับพื้นที่ TMAZ ความร้อนส่งผลให้เกรนเกิดการเติบโตขึ้นขนาดเกรนใหญ่ขึ้นกว่าเกรนโลหะพื้น การเติบโตของเกรนเกิดขึ้นทั้งฝั่ง AS และ RS แต่ไม่เกิดการเสีรูปร่างแบบพลาสติก พื้นที่กระทบร้อนมีสมบัติทางกลต่ำสุดเมื่อ

เทียบกับพื้นที่ในส่วนอื่นๆ และมักเกิดการแตกหักขึ้นในพื้นที่ที่กระทบร้อน โครงสร้างภายในรอยเชื่อมรับผลกระทบจากความร้อนและการกวนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน เกรนเกิดการตกผลึกใหม่มีขนาดเล็กกลง และเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนในพื้นที่ NZ และ TMAZ ส่วนพื้นที่ HAZ ได้รับอิทธิพลจากความร้อนเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดการเติบโตของเกรน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้ยังนำไปสู่ความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ลดลง



รูปที่ 2. 8 แสดงการตกตะกอนบริเวณพื้นที่เชื่อม (Mishra & Ma, 2005)

ก. วัสดุพื้น

ข. บริเวณพื้นที่ HAZ

ค. บริเวณพื้นที่ HAZ ใกล้กับ TMAZ

ง. บริเวณพื้นที่ TMAZ ใกล้กับ NZ

2.5 การทดสอบแรงดึง

วัสดุแทบทุกชนิดที่ผลิตขึ้นมา เพื่อนำไปใช้งานต่างๆ นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบสมบัติของวัสดุ สมบัติต่างๆ เหล่านี้ เป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการนำไปแก้ไขข้อบกพร่อง หรือพัฒนาให้มีคุณรูปที่ดียิ่งขึ้น สมบัติเด่นที่มีความสำคัญ ข้อหนึ่งคือ สมบัติทางกล ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรง และทนทานต่อการนำไปใช้งาน ดังนั้นการทดสอบแรงดึงของวัสดุ ที่เป็นส่วนหนึ่งของสมบัติทางกล จึงได้ถูกจัดทำเป็นมาตรฐานขึ้นมา เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการทดสอบและเพื่อเป็นแหล่งอ้างอิงการ

ทดสอบแรงดึง ของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วเริ่มจากการนำวัสดุมาเตรียมเป็นชิ้นตัวอย่าง ไม่ว่าจะเป็นวัสดุที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปหรือขึ้นรูปแล้วก็ตาม การเตรียมเป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเตรียมเป็นลักษณะรูปร่างคล้ายดรัมเบลล์ (Drum Bell) คือปลายทั้งสองด้าน จะมีขนาดโตกว่าบริเวณส่วนกลางของชิ้นงานตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้การดึงเป็นไปอย่างสมบูรณ์แบบ และขาดบริเวณตรงกลาง

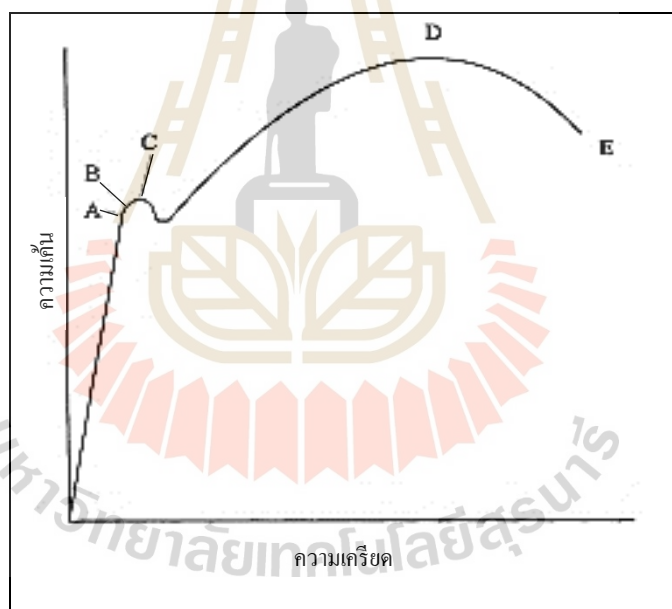
โดยการเตรียมชิ้นงานทดสอบต้องเตรียมให้เตรียมตามมาตรฐาน ซึ่งก็มีหลายมาตรฐานด้วยกัน ซึ่งมีการกำหนดให้ขนาดชิ้นทดสอบมีความแตกต่างกันไป อีกทั้งยังกำหนดความเร็วสำหรับแรงที่ใช้ในการดึงไว้ด้วย เพื่อให้ผลทดสอบมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยมาตรฐาน American Society of Testing and Materials: ASTM, มาตรฐาน Japanese Industrial Standards: JIS, มาตรฐาน Deutsches Institut für Normung: DIN รวมถึงมาตรฐาน มอก. ในการเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในงานวิจัยนี้ จะกำหนดขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานของ ASTM E8 (Prakash et al., 2018 และ Venkateswarlu et al., 2013) ดังรูปที่ 2.9

Dimensions	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

รูปที่ 2. 9 ชิ้นทดสอบแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8 (international, 2013)

ขนาดสัดส่วนชิ้นทดสอบตามมาตรฐานถูกระบุไว้ตามขนาดความหนาของชิ้นทดสอบ หากไม่ได้ระบุความหนาไว้จึงสามารถเลือกขนาดสัดส่วนชิ้นทดสอบได้ตามความเหมาะสม แม้ว่าขนาดสัดส่วนต่างๆของชิ้นทดสอบถูกกำหนดไว้ตามความยาวที่เป็นมาตรฐาน ก็สามารถกำหนดให้ เป็นไปตามความเหมาะสมได้ โดยต้องมีพื้นที่สามารถจับชิ้นงานทดสอบได้ประมาณ 2 ใน 3 ของขนาดความยาวปากจับชิ้นงาน (Grips) ของเครื่องทดสอบ ทั้งนี้การทดสอบสามารถทดสอบได้ทั้ง

การดึงตามทิศทางแนวรีดขึ้นรูป และทิศทางตั้งฉากกับแนวรีดขึ้นรูปได้ โดยต้องระบุไว้รายงานการทดสอบ หลังจากที่ได้จับยึดชิ้นทดสอบกับปากจับยึดชิ้นงานแล้ว ทำการให้แรงดึงแก่ชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วคงที่ แบบช้าๆ โดยปกติจะใช้ประมาณ 1 มม./นาทีก (Kasman & Yenier, 2014 และ Saravanan et al., 2016) เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ จากนั้นทำการดึงชิ้นทดสอบให้ยืดออกพร้อมบันทึกค่าของแรงดึงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบอย่างสม่ำเสมอ และตรวจวัดระยะยืดของชิ้นทดสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงจากการเสียรูปของชิ้นทดสอบ จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับขนาดชิ้นทดสอบเริ่มต้น ในช่วงแรงดึงต่างๆ จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาด จากความสัมพันธ์ดังกล่าวระหว่างแรงที่กระทำกับระยะยืดของชิ้นทดสอบ ดังกราฟรูปที่ 2.10 ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด โดยแนวตั้งแสดงถึงค่าความเค้น และแนวนอนแสดงถึงค่าความเครียดของชิ้นทดสอบ โดยลักษณะของกราฟที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุนั้นที่นำมาทดสอบ ซึ่งบ่งบอกว่าวัสดุมีความแข็งแรงดึงเท่าไร และมีความเหนียวหรือความเปราะของตัววัสดุที่นำมาเป็นชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2. 10 เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (ศรีมุกข์, 2015)

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น - ความเครียด พบว่าเกิดค่าต่างๆ ดังนี้

จุด A เรียกว่า พิกัดสัดส่วน (Proportional limit) เกิดขึ้นหลังจากดึงชิ้นทดสอบอย่างช้าๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆ ยืดออก ทำให้ได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุก (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรม

การคืนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic behavior) นั่นคือ เมื่อปล่อยแรงที่กระทำต่อชิ้นทดสอบจะกลับคืนไปที่ขนาดความยาวเดิม

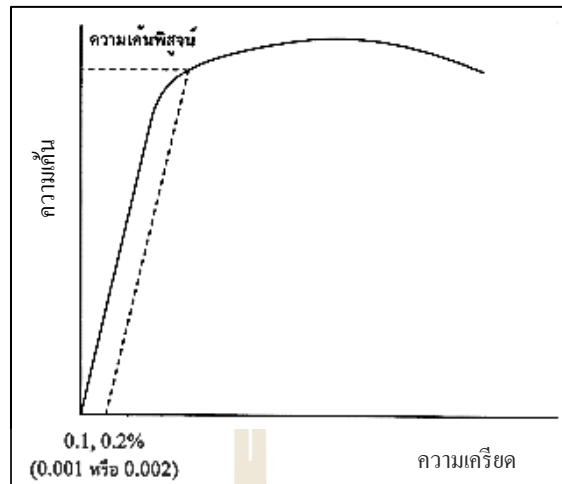
จุด B เรียกว่า พิกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) เป็นจุดที่กำหนดค่าความเค้นสูงสุด ที่จะไม่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เกิดขึ้นหลังจากเพิ่มแรงกระทำต่อวัสดุไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเสียรูปอย่างถาวร (Plastic deformation)

จุด C เรียกว่า จุดคราก (Yield Point) เป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกและค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก หรือ Yield Strength ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

จุด D เรียกว่า ความแข็งแรงดึง (Ultimate Tensile Strength) เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดออกจากกัน (Fracture)

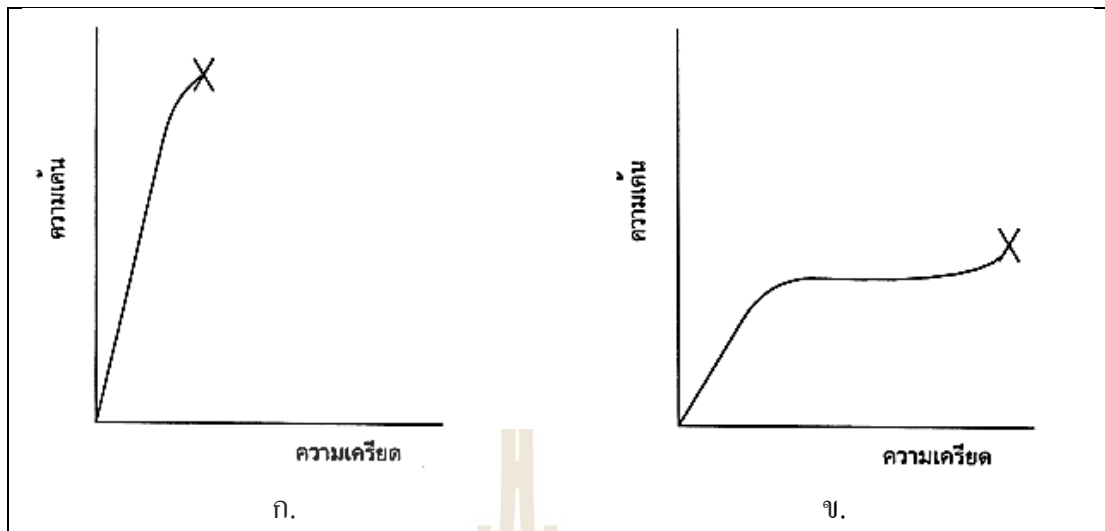
จุด E เรียกว่า จุดที่วัสดุเกิดการแตกหักหรือขาดออกจากกัน (Fracture) หรืออาจเรียกว่า ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียวที่ค่าต่ำกว่าความเค้นสูงสุด ส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการรีดขึ้นรูปเย็น (Cold work) มักจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด

วัสดุหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจนแต่สามารถหาความเค้นจุดครากได้โดยวิธีการกำหนดความเครียดที่ 0.2 % ของความยาวเดิม จากนั้นลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งค่าความเค้นที่จุดตัดนี้สามารถนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress)



รูปที่ 2. 11 เส้น โ้ก้งความเค้น - ความเครียด แบบไม่มีจุดคราก (ศรีมุกข์, 2015)

จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุทดสอบจะเกิดการแตกหักหรือขาดออกจากกัน (Fracture) ซึ่งโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัยนี้จะต่ำกว่าค่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไปแล้ว พื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุทดสอบจะลดลง ทำให้พื้นที่ที่ต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่ยังสามารถคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลงส่วนโลหะอื่นๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold work) มาแล้ว จะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุดโดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูปที่ 2.12 ก. วัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุเหนียวจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.12 ข.



รูปที่ 2. 12 เส้น โคง์เปรียบเทียบความเค้น - ความเค้น (ศรีมุกข์, 2015)

- ก. วัสดุเปราะ
ข. วัสดุเหนียว

การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโลหะ หรือ โลหะผสมการใช้วิธีดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้นๆ ด้วยอัตราคงที่ ซึ่งงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะแตกต่างกันไป สำหรับโลหะ อาจทำเป็นแผ่นหรือทำเป็นแท่ง ข้อมูลของแรงสามารถหาได้จาก กราฟของการทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมความต้านแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) การเพิ่มภาระแก่ชิ้นทดสอบจนเลยจุดคราก ชิ้นงานจะยืดขึ้นเรื่อยๆ จนขาดที่ภาระสูงสุด (R_m) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ความเค้นแรงดึงสูงสุด ; } \sigma_{Rm} = \frac{\text{แรงที่กระทำ}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบก่อน}} \quad (2.1)$$

การยืดตัว (Elongation) และการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Reduction of Area) บอกรวมบัติความอ่อนตัว (Ductility) ของเนวเชื่อมแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{\text{ความยาวชิ้นทดสอบหลังขาด} - \text{ความยาวชิ้นทดสอบก่อนขาด}}{\text{ความยาวชิ้นทดสอบก่อนขาด}} \times 100 \quad (2.2)$$

$$\text{ค่าเฉลี่ยของแรงดึงสูงสุด} = \frac{\text{ผลรวมของแรงดึงสูงสุด}}{\text{ผลรวมของจำนวนชิ้นทดสอบ}} \quad (2.3)$$

เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแรงดึง เรียกว่า เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) เครื่องมือดังกล่าวนี้ จะมีปากสำหรับจับชิ้นงานตัวอย่างอยู่ 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ยึดติดกับแท่งเครื่อง ส่วนที่ 2 ยึดติดกับตัววัดแรง (Load Cell) และสามารถเคลื่อนที่ได้ ในการทดสอบนั้นจะต้องนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมไว้ระหว่างปากจับทั้งสองข้าง โดยจับที่ส่วนปลายของชิ้นงานตัวอย่าง แล้วล็อคให้แน่น หลังจากนั้นจึงดึงให้ปากจับส่วนที่ 2 เคลื่อนที่ห่างออกไป โดยปลายอีกข้างหนึ่งของชิ้นตัวอย่าง ยังอยู่กับที่ ชิ้นตัวอย่างที่กำลังยืดออกจะมีแรงต้าน ซึ่งแรงต้านของชิ้นงานตัวอย่างนี้มีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมา ได้แรงที่วัดออกมา มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) การทดสอบจะต้องดึงชิ้นตัวอย่าง จนขาดออกจากกัน แรงต้านสูงสุดของชิ้นตัวอย่างได้เท่าไร ผลที่ได้จากตัววัดแรงก็จะได้เท่านั้น นั่นก็หมายความว่าชิ้นตัวอย่าง ทนแรงดึงสูงสุดเท่ากับแรงต้าน ของตัวเองที่ทนได้ก่อนขาดออกจากกันค่าที่วัดได้ดังกล่าวเป็นเพียง ค่าที่วัสดุทนแรงดึงเท่านั้น ซึ่งไม่ใช่ค่าความแข็งแรงหรือที่เรียกว่า Tensile Strength ดังนั้น การคำนวณค่าความแข็งแรงของวัสดุ ทำได้โดยการนำค่าแรงดึงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง ผลที่ได้ออกมาเป็นค่าความแข็งแรง ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 2. 13 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบแรงดึง

2.6 การทดสอบความแข็ง

ความแข็งเป็นสมบัติทางกลของวัสดุอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญโดยความแข็งของวัสดุเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรง (อมรสิทธิ์, 2545) และความสามารถในการต้านทานต่อการสึกหรอของเครื่องมือ (Tools) และชิ้นส่วนในเครื่องจักรกล(Machine Path) โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของวัสดุนั้นมีอยู่ 2 ปัจจัยคือ ลักษณะโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยา และส่วนผสมทางเคมีภายในวัสดุ โดยค่าความแข็งจะมีผลต่อสมบัติทางกลด้านอื่นด้วยได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดึง ความเหนียว และความต้านทานต่อการชุบแข็ง โดยการทดสอบความแข็งของวัสดุมีอยู่หลายวิธีที่นิยมใช้ได้แก่ การวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Testing) การวัดความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell Hardness Testing) การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Testing) การวัดความแข็งแบบนูป (Knoop Hardness Testing)

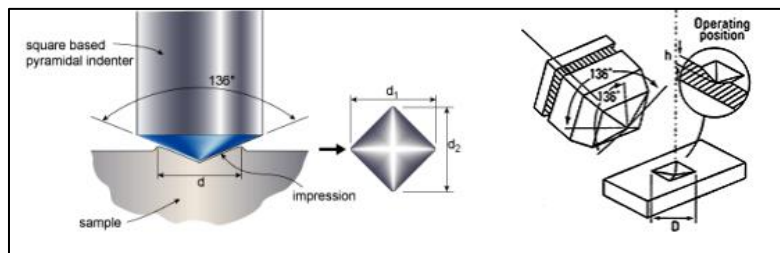
2.6.1 การทดสอบความแข็งระดับจุลภาคนิยมใช้การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ โดยค่าที่ได้จะเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ ต่อพื้นที่ของรอยกดซึ่งแรงที่ใช้จะเป็นแรงกดคงที่ โดยความแข็งของวัสดุจะมีผลต่อความลึกของรอยกด หัวกดที่ใช้จะเป็นหัวกดที่ทำด้วยเพชรรูปทรงปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสทุกด้านทำมุม 136° โดยแรงที่ใช้กดมีตั้งแต่ 1-1000 กรัม ขึ้นอยู่กับความแข็งวัสดุ โดยค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์จะได้ออกจากการวัดความกว้างของรอยกดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากนั้นนำมาคำนวณค่าความแข็งโดยใช้สูตร

$$HV = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (2.4)$$

โดยที่

- | | |
|----|--|
| HV | คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ |
| P | คือ แรงกด (กรัม) |
| D | คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (มิลลิเมตร) |

วิธีการวัดค่าความแข็งวิธีนี้จะเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กพื้นที่การวัดความแข็งน้อยแต่ที่นิยมมากที่สุดคือการนำไปวัดความแข็งของโครงสร้างจุลภาคในวัสดุ การวัดชั้นความแข็งลึกของงานชุบผิวแข็ง และการวัดความแข็งของแนวเชื่อมโดยค่าความแข็งที่วัดได้จะมีหน่วยเป็น HV (Hardness Vickers Hardness Testing)



รูปที่ 2. 14 หัวกดเพชรที่ใช้ในการทดลองความแข็งแบบวิกเกอร์ (อมรสิทธิ์, 2545)

2.6.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบความแข็งสำหรับการทดสอบด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์จะมีความละเอียดกว่าวิธีการวัดความแข็งแบบอื่น เนื่องจากการทดสอบจะให้ลักษณะของรอยกดที่เล็กมากจึงต้องใช้กล้องขยายเพื่อใช้ในการวัดความกว้างของรอยกด โดยในการเตรียมชิ้นงานจะเตรียมเหมือนกับการทดสอบโครงสร้างจุลภาค กล่าวคือต้องมีการเตรียมผิวโดยเริ่มจากการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายโดยเริ่มต้นขัดไล่ตั้งแต่กระดาษทรายเบอร์หยาบสุดที่ 180 จนถึงเบอร์ละเอียดสุด 2000 จากนั้นนำไปขัดบนผ้าสักหลาดด้วยผงเพชรหรือผงอะลูมินาเพื่อลดการรบกวนของสภาพผิวที่หยาบ นอกจากนี้ในการจับยึดชิ้นงานจำเป็นต้องให้ผิวที่ทำการวัดได้ระนาบและตั้งฉากกับหัวกดให้มากที่สุด โดยในการจับยึดชิ้นงานบางครั้งจำเป็นต้องใช้ระดับน้ำเล็กๆ ช่วยในการปรับระนาบของผิวทดสอบก่อนการกดด้วย ซึ่งจะทำได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น

2.7 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (ชุดิมา, 2545) เป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัย (factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบ (Response) ที่เกิดขึ้นกระบวนการที่มีปัจจัย (Factors) หรือผลตอบ (Response : X1, X2, X3, X4) ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality Characteristic) ของกระบวนการ ในการออกแบบการทดลองเราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X อื่นๆ โดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ความสัมพันธ์เชิงสถิติที่

ได้จะทำให้เรามีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ (Process Knowledge) เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการต่อไป

2.7.1 ประเภทของการทดลอง

การออกแบบการทดลองมีหลากหลายประเภทซึ่งผู้ทำการทดลองต้องเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะของปัญหาซึ่งประกอบด้วย จำนวนปัจจัย เงื่อนไขการพิจารณา โครงสร้างการทดลอง โดยเฉพาะด้านการสุ่ม ความยาก - ง่ายในการทำการทดลอง ระยะเวลาที่มี ต้นทุนที่ยอมรับได้ เป้าหมายของการทำการทดลอง เป็นต้น ประเภทของการทดลองมีตั้งแต่แบบที่ไม่ซับซ้อน ไปจนถึงแบบที่มีความซับซ้อนมาก เช่น การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design) การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) การทดลองแบบละตินสแควร์ (Latin Squares Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูปแบบ (Fractional Factorial Design) และการทดลองด้วยเทคนิคของ Taguchi เป็นต้น ในการแนะนำเบื้องต้นเกี่ยวกับ DOE นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design) การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และการทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูปแบบ (Fractional Factorial Design) เท่านั้น สำหรับการออกแบบอื่นๆ ผู้อ่านสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากหนังสือด้านการออกแบบการทดลองทั่วไป เช่น Montgomery 2001 เป็นต้น

2.7.1.1 การทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) เป็นการออกแบบการทดลองเมื่อสงสัยว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response มีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น การทดลองจึงมุ่งไปที่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และ Response ซึ่งเป็นการทดลองที่ออกแบบง่าย แต่อาจนำไปสู่ผลการวิเคราะห์ที่มีได้ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเสมอไป (เนื่องจากพิจารณาเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น ในขณะที่อาจมีปัจจัยอื่นๆ เกี่ยวข้อง และมีอิทธิพลแบบ Interaction ได้)

2.7.1.2 การทดลองแบบครั้งละปัจจัย (One Factor at a Time Design) เมื่อมีปัจจัยที่สนใจมากกว่า 1 ปัจจัย การออกแบบการทดลองที่ง่ายที่สุดคือการทดลองโดยปรับเปลี่ยนทีละปัจจัย และกำหนดระดับของปัจจัยอื่น ๆ คงที่ อย่างไรก็ตามการออกแบบการทดลองลักษณะนี้เป็น การออกแบบที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เพราะจะไม่ได้ข้อมูลของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยเลย

2.7.1.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design) การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากเป็นการ

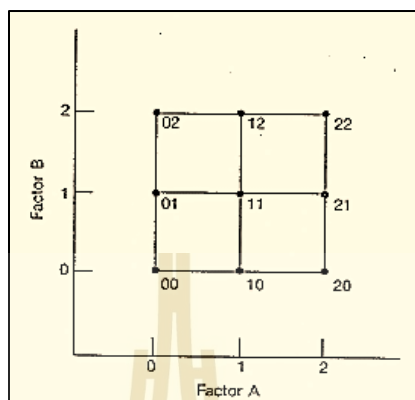
ออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองที่ละปัจจัย และทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลต่อเนื่องกันของการทดลองได้ ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่

1) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละเรพลิเคตของการทดลอง จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ $a \times b$ การทดลองและโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง

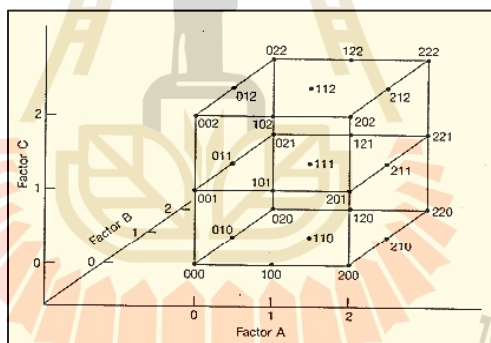
2) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีมีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณเช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงานและใน 2 ระดับที่กล่าวนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่ง ๆ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูล การออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้

3) การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ โดยสามารถทำได้ตั้งแต่ 2 ปัจจัย ถึง 15 ปัจจัย การทดลองชนิดนี้สามารถศึกษาที่ค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการได้ต่อจากการออกแบบการทดลองแบบ 2^k โดยใช้ผลการทดลองของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k มาใช้ในการวิเคราะห์ผล ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง ในขณะที่การออกแบบการทดลองบางชนิดต้องทำการทดลองใหม่ทั้งหมด ซึ่งการออกแบบการทดลองชนิดนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีค่าใช้จ่ายในแต่ละการทดลองสูง และมีงบประมาณจำกัด นอกจากนี้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^k ยังสามารถทำการศึกษาถึงอิทธิพลร่วมของปัจจัยได้ กำหนดให้สัญลักษณ์ของปัจจัยและอันตรกิริยาแทนด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลาง และสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจจะใช้เป็นตัวเลข 0 (ต่ำ), 1 (ปานกลาง) และ 2 (สูง) การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ 3^k จะแทนด้วยตัวเลข k ตัว โดยที่ตัวเลขตัวแรกแทนระดับของปัจจัย A, ตัวเลขตัวที่สองแทนระดับของปัจจัย B, ..., และตัวเลขตัวที่ k แทนระดับของปัจจัย k ตัวอย่างเช่น ในการออกแบบ 3^k ตัวเลข 00 หมายถึง การทดลองร่วมปัจจัยซึ่งทั้ง A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ, 01

หมายถึงการทดลองร่วมปัจจัยที่ A อยู่ที่ระดับต่ำ และ B อยู่ที่ระดับปานกลาง ภาพที่ 2.15 และ 2.16 แสดงโครงสร้างทางเรขาคณิตของการออกแบบ 3^2 และ 3^3 ตามลำดับ



รูปที่ 2. 15 การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ 3^2 (ชุดีมา, 2545)



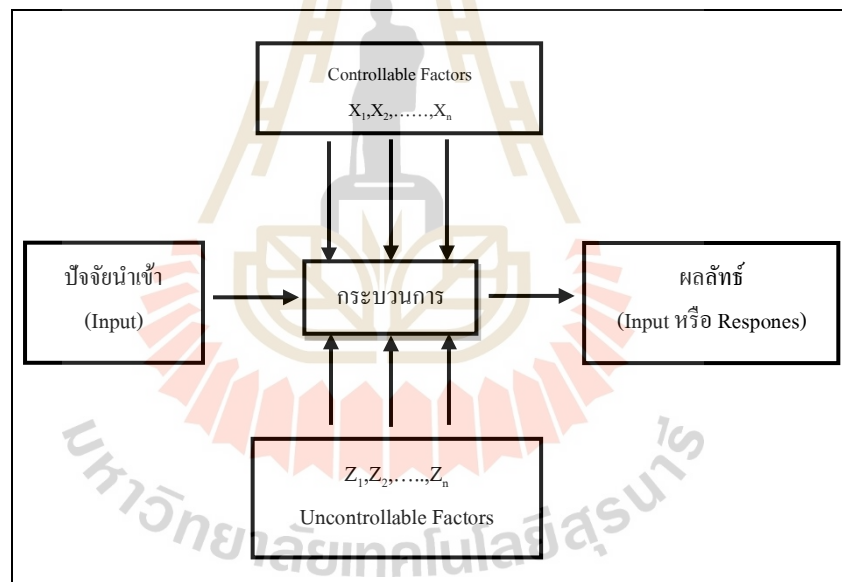
รูปที่ 2. 16 การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ 3^3 (ชุดีมา, 2545)

การออกแบบ 3^3 คือการศึกษาปัจจัยที่มีอยู่ 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับซึ่งถูกจัดอยู่ในรูปแบบของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล การออกแบบในกรณีนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3^3 โครงสร้างของการทดลองและสัญลักษณ์ของการทดลองร่วมปัจจัยต่างๆ ดังรูปที่ 2.16 โดยในการทดลองนี้จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยจำนวนทั้งหมด $3 \times 3 \times 3 = 27$ การทดลอง โดยไม่มีการทดลองซ้ำ (Replicate) ถ้าในกรณีมีการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดคือ $27 \times 2 = 54$ การทดลอง

2.7.1.4 นอกจากนี้ยังมีคำศัพท์อื่นๆ ซึ่งจะอธิบายสอดคล้องกันในเนื้อหาตามความจำเป็น ความสัมพันธ์ระหว่าง ปัจจัย กระบวนการและ ผลลัพธ์ แสดงได้ด้วยตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ

วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) บังชี้ปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อ Response
- 2) กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้ Y มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด
- 3) กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้มีความผันแปรของค่า Y ต่ำ
- 4) กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่อิทธิพลต่อ Response Y เพื่อให้อิทธิพลของ Uncontrollable factor มีน้อยที่สุด



รูปที่ 2. 17 ตัวแบบทั่วไปของกระบวนการ (ชุติมา, 2545)

2.7.1.5 การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ เช่น หากผลของการติดตามกระบวนการด้วยแผนภูมิควบคุมบ่งชี้ว่ากระบวนการ Out-of-control ซึ่งอาจมีปัจจัยจำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของความผิดปกติ การที่จะปรับปรุง แก้ไขเพื่อนำกระบวนการกลับสู่ภาวะภายใต้การควบคุมจะเป็นไปได้ยากหากไม่ทราบว่

ปัจจัยตัวไหนที่ส่งผลกระทบต่อ Response อย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบการทดลองจึงเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เพื่อบ่งชี้ปัจจัยเหล่านี้ ทั้งนี้หากมีการประยุกต์หลักการของ DOE ตั้งแต่เริ่มต้นพัฒนาผลิตภัณฑ์จะนำไปสู่ผลการดำเนินการที่ดีขึ้นดังนี้

- 1) จำนวนผลผลิตจะดีขึ้น
- 2) ความผันแปรลดลงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าคุณลักษณะทางคุณภาพอยู่ในช่วงที่กำหนด และใกล้กับค่าเป้าหมายที่ต้องการ

- 3) ลดเวลาการพัฒนาผลิตภัณฑ์

- 4) ลดต้นทุนโดยรวม

2.7.1.6 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเพื่อให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DOE มีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นที่ผู้วิเคราะห์ต้องมีเป้าหมายการศึกษา Response ที่สนใจ ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อ Response วิธีการเก็บข้อมูล ตลอดจนแนวทางการวิเคราะห์ อย่างชัดเจน ซึ่ง Montgomery (2001) และ Montgomery (2005)

- 1) ศึกษาปัญหา

- 2) กำหนด Response ที่ต้องการศึกษา

- 3) กำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม และ ระดับของปัจจัย

- 4) กำหนดรูปแบบการทดลอง

- 5) ทำการทดลอง และเก็บข้อมูล

- 6) วิเคราะห์ข้อมูล

- 7) สรุป และ นำเสนอแนวทางการปรับปรุง

2.7.1.7 การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) เป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุกๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Combinations) ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อ Response ได้ทั้งแบบ Main Effect และ Interaction แต่การออกแบบการทดลองแบบนี้ต้องการเวลาและทรัพยากรในการทดลองมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนปัจจัยมีมากขึ้น การออกอาจแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย คือ 1) เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยมากกว่า 2 ระดับขึ้นไป และ 2) เมื่อจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ ในกรณีที่ 2 จะใช้สัญลักษณ์ 2^k Design โดยเลข 2 แทนจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย และ k แทนจำนวนปัจจัยที่พิจารณาในการทดลอง ในการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องคือ

ระดับของปัจจัย A สามารถปรับเปลี่ยนได้ จากระดับ 1, 2, ..., a แทนด้วย i

ระดับของปัจจัย B สามารถปรับเปลี่ยนได้ จากระดับ 1, 2, ..., b แทนด้วย j

ระดับของปัจจัย C สามารถปรับเปลี่ยนได้จากระดับ 1, 2, ..., c แทนด้วย k จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำหรือ Replication แทนด้วย n

ผลการทดลองจากการทดลองที่ปัจจัย A, B และ C ระดับ i, j และ k ตามลำดับครั้งที่ n

2.7.1.8 การทดลองแบบแฟกทอเรียลไม่เต็มรูป (Fractional Factorial Design) จากการที่จำนวน Runs ของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial จะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนปัจจัยเพิ่มขึ้น เช่น 2^5 จะมี 32 Runs ถ้ามี 3 Replicates จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 96 ครั้ง ในการทดลองนี้จะมี อิทธิพลหลัก (Main Effects) 5 ตัว อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย (2 Ways Interactions) 10 ตัว เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากทราบหรือมีแนวโน้มว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย หลายปัจจัย (High Order Interactions) จะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการทดลองเพียงบางส่วน หรือการทดลองแบบไม่เต็มรูปจะยังคงให้ข้อมูลที่มีนัยสำคัญเพียงพออยู่ โดยการทดลองแบบไม่เต็มรูปจะเป็นแบบ 2^{k-p} Factorial Design เช่นเมื่อ $p=1$ จะเป็นการทดลองแบบ Half Factorial Design ซึ่งจะลดจำนวนการทดลองได้ครึ่งหนึ่ง เมื่อ $p=2$ จะลดจำนวนการทดลองเหลือเพียง 1/4 เท่านั้น โดยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะ Half Factorial Design เท่านั้น

2.7.2 คำศัพท์ที่ควรรู้เกี่ยวกับการทดลอง

2.7.2.1 การทดลอง (Experiment) หมายถึงกระบวนการค้นคว้าหาความจริงแบบหนึ่ง โดยกระทำอย่างใดอย่างหนึ่งกับตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ที่ศึกษาหรืออาจเรียกว่า ตัวแปรทดลอง (Experimental Variable) เพื่อดูตัวแปรตามซึ่งเป็นผลที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากผลของตัวแปรอิสระนั้น การออกแบบทดลอง (Experiment Design) เป็นการออกแบบทั่วไปของการทดลอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนและการจัดการตัวแปรอิสระ รวมทั้งการสุ่มหรือการเลือกตัวอย่าง และการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเพื่อควบคุมตัวแปรแทรกซ้อน หรือตัวแปรเกินมิให้มีผลต่อตัวแปรตาม การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องดำเนินการได้ง่าย และให้คำตอบที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา

2.7.2.2 ตัวแปร (Variable) หมายถึง ลักษณะของสิ่งที่สนใจศึกษา ซึ่งอาจเป็นคนที่พิชิตตัว หรือสิ่งของที่สามารถแปรเปลี่ยนค่าได้ตามเวลา การแปรเปลี่ยนค่าของตัวแปรนั้น เรียกว่า ระดับของตัวแปร เช่น เพศ แบ่งเป็นเพศชาย เพศหญิง ดังนั้นเพศเป็นตัวแปรที่มี 2 ระดับ

2.7.2.3 ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) บางครั้งเรียกว่าปัจจัย (Factor) หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นก่อนและเป็นตัวแปรเหตุที่ทำให้ผลหรือสิ่งที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะหรือแปรสภาพไป

2.7.2.4 ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นทีหลัง หรือต้องเปลี่ยนแปลงหรือคุณลักษณะไปตามอิทธิพลของตัวแปรอิสระ ตัวอย่างของตัวแปรอิสระ

ระดับของตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม เช่น การศึกษาผลของอาหาร 3 สูตร ต่อการเจริญเติบโตของไก่ตัวแปรอิสระคือ อาหาร ระดับของตัวแปรอิสระมี 3 ระดับ (3 สูตร) และตัวแปรตามคือน้ำหนักไก่ที่เพิ่มขึ้น

2.7.2.5 ตัวแปรแทรกซ้อนหรือตัวแปรเกิน (Extraneous Variable) หมายถึงตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาในขณะนั้น ซึ่งตัวแปรเกินจะมีลักษณะเหมือนตัวแปรอิสระที่มีผลหรืออาจจะมีส่วนต่อตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ทำให้การวัดค่าตัวแปรตามคลาดเคลื่อนไปได้ ดังนั้น ในการทดลองจึงต้องพยายามควบคุมหรือขจัดอิทธิพลของตัวแปรเกินที่มีผลต่อตัวแปรตามให้หมดไปหรือให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

2.7.2.6 ปัจจัย (Factor) หมายถึง ตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาว่ามีผลกระทบต่อตัวแปรตามหรือไม่ เช่น ในการศึกษาเกี่ยวกับอาหาร 3 สูตร ที่ใช้ในการเลี้ยงไก่ ปัจจัยที่ต้องการศึกษาคืออาหาร (ตัวแปรอิสระ)

2.7.2.7 ระดับของปัจจัย (Factor Levels) หมายถึงชนิดย่อย ๆ หรือประเภทต่าง ๆ ของปัจจัย บางครั้งเรียกว่า ทรีทเมนต์ (Treatment) เช่น การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ย 2 ชนิด คือ ปุ๋ยคอกไรต์ กับปุ๋ยซัลเฟตต่อการเจริญเติบโตของหอมแดง ปัจจัยที่ต้องการศึกษาคือ ปุ๋ย ส่วนระดับของปัจจัยหรือทรีทเมนต์ที่ต้องการศึกษาคือ ปุ๋ยคอกไรต์และปุ๋ยซัลเฟต

2.7.3 อิทธิพลของปัจจัย (Factor Effects)

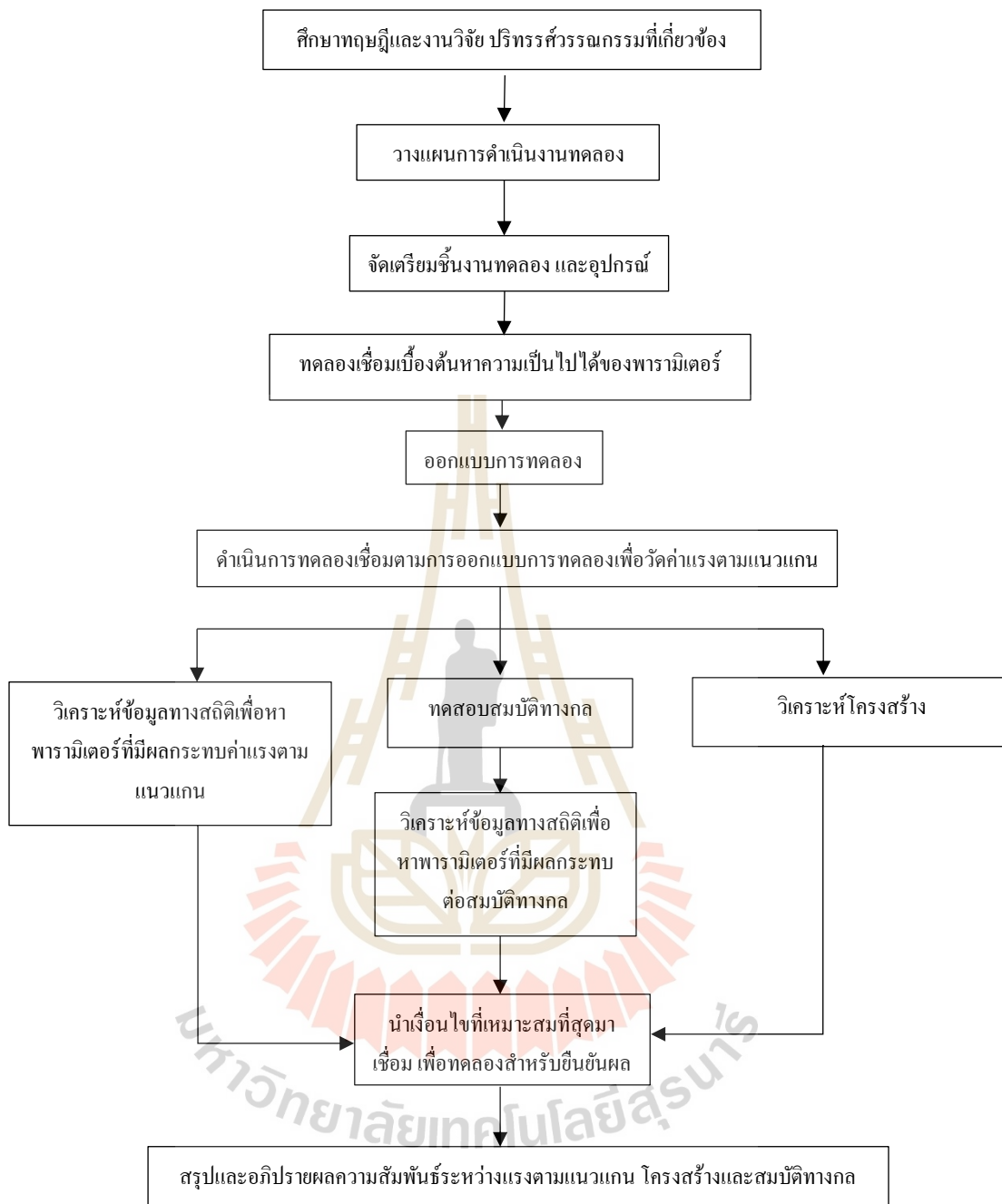
อิทธิพลของปัจจัยจะประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของ Response เมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษาเปลี่ยนแปลงไปซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ อิทธิพลหลัก หรือ Main Effect และ อิทธิพลร่วม หรือ Interaction Effect Main Effect เป็นผลของการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยเฉพาะปัจจัยหนึ่งโดยตรงต่อ Response โดยมิได้เกี่ยวข้องกับเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งสมมติว่ามีปัจจัย A และ B ที่คาดว่าส่งผลต่อ Response y แต่ละปัจจัยสามารถปรับได้ 2 ระดับ เรียกว่าระดับสูง (High level) แทนด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำ (Low level) แทนด้วยเครื่องหมาย “-“ กล่าวคือ ระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัย A จะแทนได้ด้วย A+ และ A- ตามลำดับ และระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัย B จะแทนได้ด้วย B+ และ B- ตามลำดับ (ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 2^k)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเพื่อ ศึกษาผลกระทบของหัวกวนขนาดเล็กในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนต่อแรงตามแนวแกนและสมบัติทางกล วัสดุอะลูมิเนียมผสม เกรด 7075 โดยศึกษาแรงกดตามแนวแกนระหว่างกระบวนการเชื่อม และนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมไปศึกษาสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึง และความแข็งของรอยเชื่อม จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ตรวจสอบข้อบกพร่อง เพื่ออภิปรายผลความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ได้จากกระบวนการเชื่อม โดยใช้หัวกวนขนาดเล็ก ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาหลักการเชื่อมเสียดทานแบบกวน และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาอย่างเข้าใจ เพื่อนำมาสู่การเลือกวัสดุ อุปกรณ์ การกำหนดปัจจัยในกระบวนการเชื่อม การออกแบบการทดลอง การทดสอบสมบัติทางกล และ โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม รายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุและเครื่องที่ใช้ในการทดลอง
- 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงตามแนวแกนและอุณหภูมิขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- 3.3 การทดลองเชื่อมเสียดทานเบื้องต้นเพื่อหาความเป็นไปได้ของพารามิเตอร์
- 3.4 การออกแบบการทดลอง
- 3.5 ดำเนินการทดลองเชื่อมตามการออกแบบการทดลอง
- 3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกลและ โครงสร้างจุลภาค
- 3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและเครื่องที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัสดุ

สำหรับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อผลกระทบของหัวกวนขนาดเล็กในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวนต่อตามแนวแกนและสมบัติทางกล คือ อะลูมิเนียมเกรด 7075 หนา 4 มม. โดยในการทดลองจะนำชิ้นงานมาทำการเชื่อมแบบต่อชน (Butt Joint) ดังรูปที่ 3.2 โดยทำการตัดให้ได้ขนาดกว้าง 50 มม. ความยาว 100 มม. โดยแสดงส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1



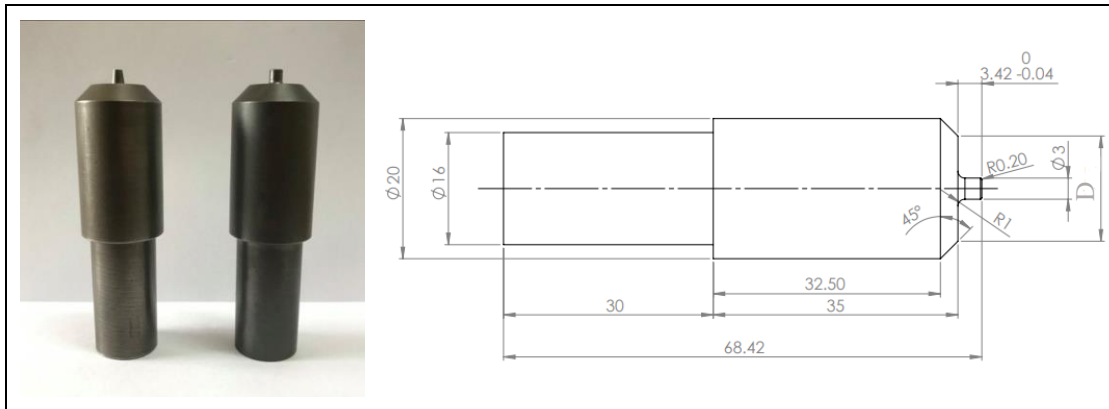
รูปที่ 3.2 อะลูมิเนียมเกรด 7075 ต่อชน (Butt Joint)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุอะลูมิเนียม 7075

Mg	Mn	Zn	Fe	Cu	Si	Al
2.1	0.12	5.1	0.35	1.2	0.58	Bal

3.1.2 เครื่องมือกวน หรือหัวกวน

การสร้างหัวกวนนั้นจะใช้วัสดุเหล็กกล้า SKD61 ซึ่งเป็นเหล็กกล้างานร้อน เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง สามารถคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงได้ ทนการเสียดสีได้ดี ทำการกลึงขึ้นรูปให้มีขนาดหัวกวน 3 มม. ขนาดปากกวน (D) 9,12,15 มม. ตามลำดับ รูปทรงหัวกวนทรงกรวย และทรงกระบอกตรง จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางชุบแข็งให้มีค่าความแข็ง 55 HRC ขนาดหัวกวนดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 ขนาดหัวกวนรูปทรงหัวกวนทรงกรวย และทรงกระบอกตรง

3.1.3 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

เนื่องจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เครื่องกัดแนวตั้งในการทดลองเชื่อมเพื่อให้สามารถยึดชิ้นงานทดลองให้มั่นคงและเชื่อมในตำแหน่งเดียวกันทุกๆการทดลอง อีกทั้งมีความสะดวกรวดเร็วในการถอดและจับยึดชิ้นงาน ซึ่งในตัวอุปกรณ์จับยึดดังกล่าวติดตั้งโหลดเซลล์ เพื่อให้สามารถทำการวัดบันทึกแรงตามแนว (Axial Force) ตลอดเวลาการเชื่อม ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (Fixture)

3.1.4 เครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.4.1 เครื่องกัดกึ่งอัตโนมัติแนวตั้ง 3 แกน ยี่ห้อ HAVEN รุ่น XLW6332HIV มีความเร็วรอบสูงสุดที่ 4,660 รอบ/นาที และอัตราป้อนสูงสุด 555 มม./นาที



รูปที่ 3.5 เครื่องกัดแนวตั้ง HAVEN รุ่น XLW6332HIV

3.1.4.2 กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera: IR) ยี่ห้อ FLIR รุ่น E50 ความละเอียด 240x180 Pixels ความแม่นยำ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ or $\pm 2\%$ of reading ฟังก์ชัน MSX®ThermalImage Enhancement Auto hot/cold spot ค่าขอบเขตการมองเห็น $25^{\circ}\times 19^{\circ}$ ช่วงการวัดอุณหภูมิ -20 ถึง $+650^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.6 กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50

3.1.4.3 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ LLOYD รุ่น LD100K ขนาดโหลดเซลล์ 100 KN ใช้ความเร็วในการทดสอบที่ 1.002 มม./นาที (Kasman & Yenier, 2014 และ Saravanan et al., 2016)



รูปที่ 3. 7 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.1.4.4 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ยี่ห้อ FUTURE-TECH รุ่น FM-800 โดยใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส



รูปที่ 3. 8 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

3.1.4.5 เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับจัดเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อการทดสอบด้าน

โลหะวิทยา

1) เครื่องขัดกระดาษทรายและผ้าสักหลาด



รูปที่ 3.9 เครื่องขัดกระดาษทรายและผ้าสักหลาด

- 2) กระดาษทรายเบอร์ 100-2000
- 3) ผ้าสักหลาด
- 4) กรด Keller's reagent
- 5) แอลกอฮอล์
- 6) พงซ์คอลลูมิน่า 5 ไมครอน

3.1.4.6 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized ใช้ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และโครงสร้างจุลภาครอยเชื่อม เพื่อศึกษาบริเวณพื้นที่ส่วนต่างๆ ได้แก่ บริเวณพื้นที่กวน บริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล พื้นที่ผลกระทบทางความร้อน และพื้นที่วัสดุพื้น



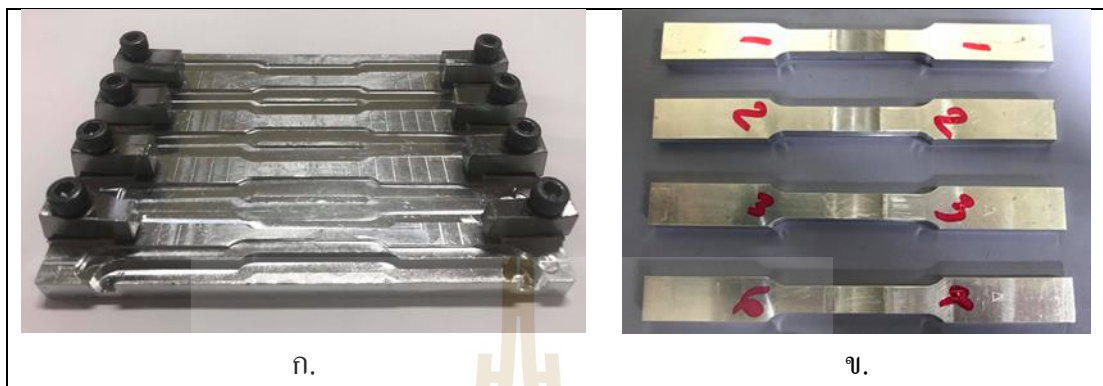
รูปที่ 3. 10 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized

3.1.4.7 เครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน ยี่ห้อ Bridgeport รุ่น VMC500 ใช้สำหรับกัดชิ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8



รูปที่ 3. 11 เครื่องกัด CNC แบบ 3 แกนยี่ห้อ Bridgeport รุ่น VMC500

3.1.4.8 อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานทดสอบ (Fixture) สำหรับกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8



รูปที่ 3. 12 ก. อุปกรณ์จับยึดสำหรับกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ
ข. ชิ้นงานทดสอบแรงดึงมาตรฐาน ASTM E8

3.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงตามแนวแกนและอุณหภูมิขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวน

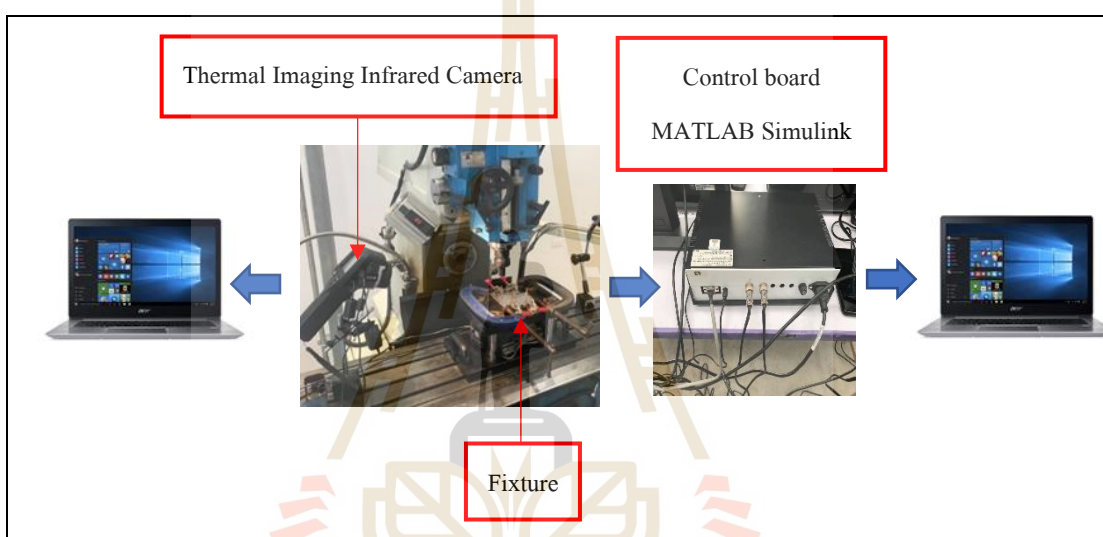
1) เริ่มประกอบอุปกรณ์จับยึด (Fixture) บนแท่น โต๊ะของเครื่องกัดแนวตั้ง โดยอุปกรณ์จับยึดดังกล่าวได้ทำการติดตั้งโหลดเซลล์เพื่อที่จะสามารถวัดแรงตามแนวแกน (แรงกด) จากนั้นเซตระดับความขนานของอุปกรณ์จับยึดกับแท่น โต๊ะเครื่องกัด ตามระนาบแกน X ด้วยไดอัลเกจ และทำการขันลึกรูฐานของอุปกรณ์จับยึดกับแท่น โต๊ะเครื่องกัด ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3. 13 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด

2) เชื่อมต่อสายสัญญาณจากโหนดเซลล์กับคอนโทรลบอร์ด MATLAB Simulink เข้ากับคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม MATLAB เพื่อบันทึกค่าและแสดงผลของค่าแรงตามแนวแกน

3) ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิขณะเชื่อม โดยกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera: IR) ยี่ห้อ FLIR รุ่น E50 ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้บนแท่นโต๊ะเครื่องกัด การตั้งค่าการทำงานของกล้องจะวัดช่วงอุณหภูมิที่ถูกกำหนดไว้คือ 0 ถึง 650 องศาเซลเซียส ความถี่ในการบันทึกข้อมูล 30 ภาพต่อวินาที (fps) และการบันทึกภาพเป็นแบบ Live Stream พร้อมเชื่อมสายสัญญาณของกล้องเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม FLIR เพื่อบันทึกค่า ดังรูปที่ 3.14

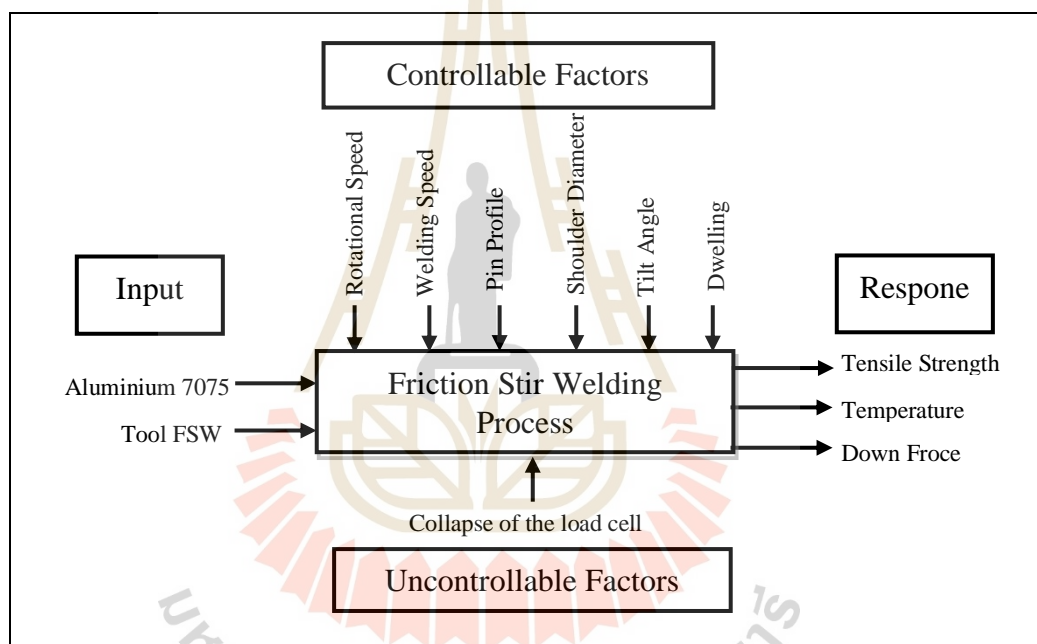


รูปที่ 3. 14 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

3.3 การทดลองเชื่อมเลียดทานแบบกวนเบื้องต้นเพื่อหาความเป็นไปได้ของพารามิเตอร์

สำหรับการเชื่อมเลียดทานเบื้องต้นเป็นการทดลองเชื่อมชิ้นงานเพื่อหาความเป็นไปได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมเกรด 7075 จากการทดลองเบื้องต้นกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามรายงานของ (Rajakumar et al., 2011) ที่ความเร็วรอบที่ 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 63 มม./นาที มุมเอียง 3° ระยะกดลิก 0.1 มม. โดยระยะกดลิกที่ 100% ของขนาดปากกวน (Shoulder) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และตามรายงานของ (Lammlein, DeLapp, Fleming, Strauss, & Cook, 2009 และ Ugender, Kumar, & Reddy, 2014) พบว่าหัวกวนทรงกรวยสามารถสร้างความร้อนได้สูงสุด ทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัวดีที่สุด จึงเป็นผลมาให้สามารถลดแรงกดลงได้ และ

ให้สมบัติทางกลที่ดี ซึ่งนำไปสู่การออกแบบรูปทรงของหัวกวนให้เหมาะสมกับการเชื่อม ส่วนขนาดของหัวกวนผู้วิจัยได้ทำการขึ้นรูปหัวกวนได้มีขนาดเล็กคือ 3 มม. ซึ่งสามารถทำการเชื่อมได้และไม่เกิดการแตกหักขึ้นบริเวณปลายหัวกวน และความสำคัญของปากกวนคือทำหน้าที่สร้างความร้อนบริเวณผิวชิ้นงานซึ่งจากเมื่อปากกวนมีขนาดใหญ่สามารถสร้างร้อนได้ดี แต่เมื่อปากกวนมีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง Mohammad et.al.และคณะ, 2015 ซึ่งการตรวจสอบรอยเชื่อมต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของรอยเชื่อมเป็นสำคัญเพื่อนำไปใช้งานได้จริง จากการทดลองเบื้องต้นนี้สามารถทำการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมเกรด 7075 ได้ดีติดกันและตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสายตาเบื้องต้นพบว่ารอยเชื่อมสมบูรณ์



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการเชื่อมเสียดทาน

3.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองสำหรับศึกษาผลกระทบของหัวกวนขนาดเล็กในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อแรงตามแนวแกนและสมบัติทางกล อะลูมิเนียมผสม 7075 โดยการออกแบบการทดลองโดยใช้แบบแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ โดยใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการออกแบบการทดลองซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นทำให้ผู้วิจัยสามารถกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้ โดยกำหนดค่าระดับของปัจจัยดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 ตารางปัจจัยการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
ความเร็วรอบในการหมุนกวน	1,580	2,220	-	รอบ/นาที
ความเร็วเดินเชื่อม	36	63	-	มม./นาที
ขนาดปากกวน	9	12	15	มม.
รูปทรง	Cone	Cylindrical	-	-

ตารางที่ 3. 3 ตารางการทดลอง

StdOrder	Rotational Speed (รอบ/นาที)	Welding Speed (มม./นาที)	Pin Profile	Shoulder Diameter (มม.)	Axial Force (N)	Tensile (Mpa)
1	1580	36	Cone	9		
2	1580	36	Cone	12		
3	1580	36	Cone	15		
4	1580	36	Cylindrical	9		
5	1580	36	Cylindrical	12		
6	1580	36	Cylindrical	15		
7	1580	63	Cone	9		
8	1580	63	Cone	12		
9	1580	63	Cone	15		
10	1580	63	Cylindrical	9		
11	1580	63	Cylindrical	12		
12	1580	63	Cylindrical	15		
13	2220	36	Cone	9		
14	2220	36	Cone	12		
15	2220	36	Cone	15		
16	2220	36	Cylindrical	9		
17	2220	36	Cylindrical	12		
18	2220	36	Cylindrical	15		
19	2220	63	Cone	9		
20	2220	63	Cone	12		
21	2220	63	Cone	15		

ตารางที่ 3. 3 ตารางการทดลอง(ต่อ)

StdOrder	Rotational Speed (รอบ/นาที)	Welding Speed (มม./นาที)	Pin Profile	Shoulder Diameter (มม.)	Axial Force (N)	Tensile (Mpa)
22	2220	63	Cylindrical	9		
23	2220	63	Cylindrical	12		
24	2220	63	Cylindrical	15		

3.5 ดำเนินการทดลองเชื่อมตามการออกแบบการทดลอง

ดำเนินการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองโดยใช้แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ และเตรียมชิ้นงานทดลอง จากนั้นนำชิ้นงานทดลองมาดำเนินการทดลองเชื่อมตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบตามตารางการทดลอง โดยมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้

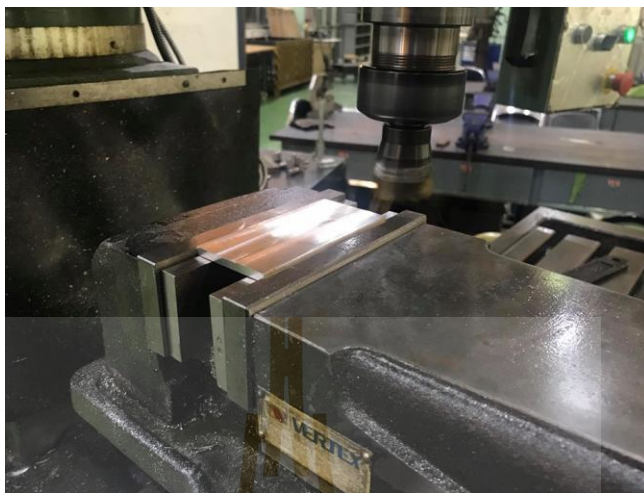
3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง

3.5.1.1 ตัดแผ่นอะลูมิเนียมให้ได้ขนาด 105 x 53 x 6.35 มม. ด้วยเลื่อยสายพาน แนวนอนโดยเผื่อขนาดไว้สำหรับปรับผิวเรียบ ดังรูปที่ 3.16



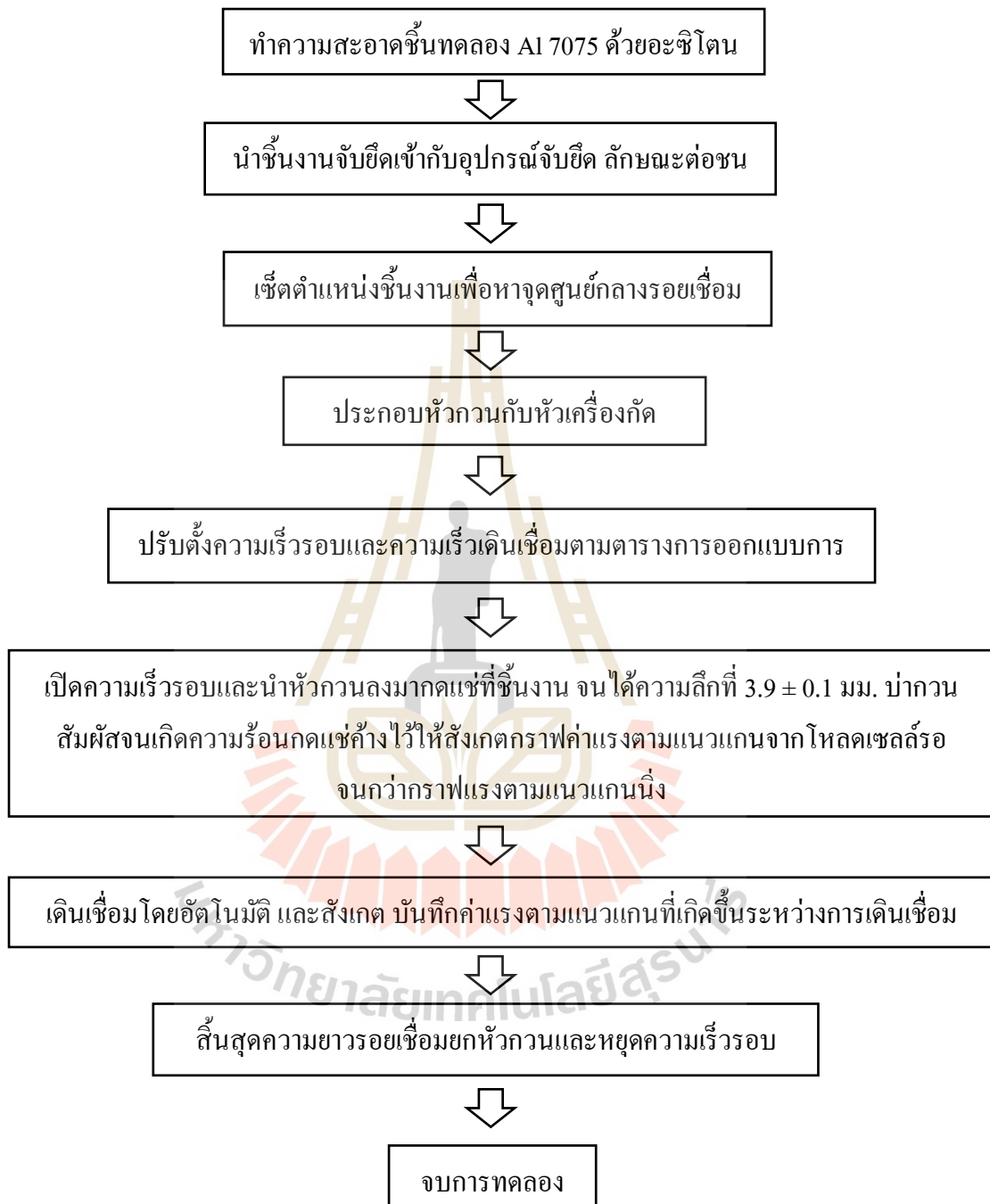
รูปที่ 3. 16 ตัดแผ่นอะลูมิเนียม

3.5.1.2 กัดปาดหน้าชิ้นงานทดลองให้ได้ขนาด 100 x 50 x 4 มม. ดังรูป 3.17



รูปที่ 3.17 ชิ้นงานผ่านการกัดผิวหน้าชิ้นงาน

3.5.2 ทำการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียมเกรด 7075 เพื่อวัดแรงตามแนวแกน

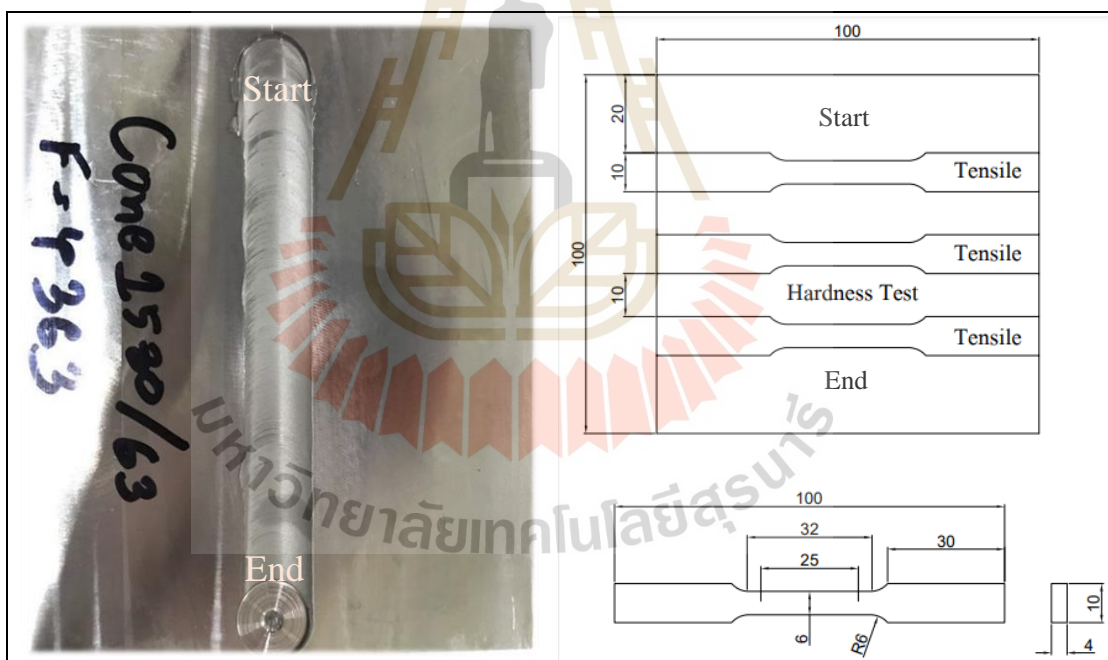


รูปที่ 3. 18 แสดงขั้นตอนการทดลองเชื่อมอะลูมิเนียม 7075

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค

3.6.1 การตรวจสอบความแข็งแรงดึง

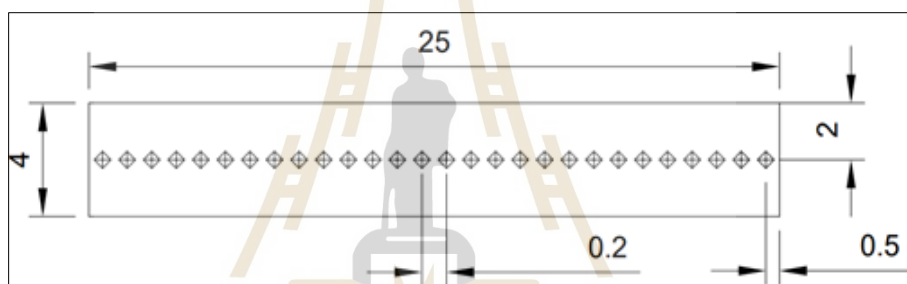
การทดสอบความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อมชั้นทดสอบแรงดึงตัดตามขนาดมาตรฐาน ASTM E8 โดยตัดชิ้นงานทดสอบขวางแนวเชื่อมด้วยเครื่องกัด CNC จำนวน 3 ชิ้น ในแต่ละการทดลองสำหรับการทดสอบแรงดึง โดยบริเวณพื้นที่จุดเริ่มต้น (Start) และจุดสิ้นสุด (End) ของชิ้นงานจะถูกตัดออกไป เนื่องจากบริเวณพื้นที่จุดเริ่มต้นได้รับความร้อนสะสมสูงสุดจากระยะกดลึกละเอียด (Dwelling) และบริเวณพื้นที่จุดสิ้นสุดจะเกิดรูจากหัวควน โดยบริเวณพื้นที่ทั้งสองจะไม่นำมาทดสอบเนื่องจากมีความแข็งแรงดึงที่ต่ำ ซึ่งการทดลองจะนำบริเวณพื้นที่กลางชิ้นงานไปขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ดังรูปที่ 3.19 และนำไปทดสอบจนชิ้นงานขาด โดยใช้ความเร็วทดสอบที่ 1.002 มม./นาที (Prakash et al., 2018, Kasman & Yenier, 2014 และ Saravanan et al., 2016) และสังเกตการณ์ขาดของชิ้นงาน บันทึกค่าการทดลอง



รูปที่ 3.19 ลักษณะการตัดชิ้นทดสอบความแข็งแรงดึง

3.6.2 การตรวจสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของแนวเชื่อมนั้นจะนำชิ้นงานไปตัดชิ้นทดสอบขวางแนวเชื่อมบริเวณส่วนกลางของชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.19 ในลักษณะภาคตัดขวางให้มีขนาดกว้าง 10 มม. จากนั้นนำชิ้นทดสอบนั้นไปขัดแนวเชื่อมในภาคตัดขวางด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 - 2000 จากนั้นขัดพื้นผิวมันด้วยผงอะลูมินาขนาดระหว่าง 5 ไมครอน ให้มีพื้นผิวเรียบมันของแต่ละการทดลอง ซึ่งชิ้นงานต้องผ่านการตรวจสอบโครงสร้างมาก่อน โดยจะตรวจสอบความแข็งรอยเชื่อมจากภาคตัดขวางโดยเริ่มวัดจากบริเวณพื้นที่วัสดุเดิมด้านแอดวานซิงไซด์ไซด์ไปจนถึงด้านรีเทรติงไซด์ ระยะห่างรอยกกดจุดละ 0.2 มม. มีความยาวรอยกกดประมาณ 25 มม. ดังรูปที่ 3.20 โดยใช้หัวกกดแบบเพชร แรงกกด 100 กรัม และเวลากกดแช่ 15 วินาที (Kasman & Yenier, 2014) เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และพื้นที่กวน



รูปที่ 3. 20 ลักษณะการทดสอบความแข็ง

3.6.3 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างของแนวเชื่อมของแนวเชื่อมนั้นนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการขัดเตรียมพื้นผิวแล้ว ไปกัดกรดโดยใช้กรดไฮดรอกฟลูอออริกที่ปริมาณ 1 มิลลิลิตร กรดไฮดรอกครอลิก 1.5 มิลลิลิตร กรดไนตริก 2.5 มิลลิลิตร และน้ำเปล่า 95 มิลลิลิตร (กรด Keller's reagent) จุ่มแช่เป็นเวลา 10 วินาที ล้างด้วยน้ำสะอาดและแอลกอฮอล์ เป่าลมให้แห้ง การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมตรวจสอบด้วยกำลังขยายต่ำที่ระดับ 5x และถ่ายภาพเพื่อการตรวจสอบตำหนิหรือจุดบกพร่องและลักษณะโครงสร้างโดยรวมแนวเชื่อม ในส่วนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ส่องกล้องที่ระดับกำลังขยาย 10x และ 20x สำหรับการตรวจสอบขนาดเกรน ขนาดรอยตำหนิขนาดเล็กที่เกิดขึ้นใน พื้นที่กวน พื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน

3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อดำเนินการทดลองเชื่อมชิ้นงานทดลองและนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของรอยเชื่อมและโครงสร้างรอยเชื่อมแล้วเสร็จ จึงนำค่าที่ได้มาศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลและแรงตามแนวแกนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติผู้ดำเนินโครงการเลือกใช้โปรแกรม Minitab ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและง่ายต่อการใช้งานมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อความรวดเร็วในการวิเคราะห์ผล ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไว้ในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ สามารถเก็บรวบรวมข้อมูล ผลการวิเคราะห์โดยมีผลการทดลองและขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

- 4.1 ลักษณะทางกายภาพ และลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อม
- 4.2 ผลวิเคราะห์แรงตามแนวแกนของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล
- 4.3 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล
- 4.4 ความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน
- 4.5 สมบัติความแข็ง
- 4.6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

4.1 ลักษณะทางกายภาพ และลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อม

จากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน พบว่าลักษณะพื้นผิวของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด AI7075 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 และ 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 และ 63 มม./นาที รูปทรงหัวกวน แบบกรวย และแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม. มีลักษณะดังนี้

4.1.1 ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม.

จากการทดลองพบว่า พื้นผิวด้านบนรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมเกรด AI7075 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม. ลักษณะโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นวงแหวนที่มีผิวเรียบ มันวาว เกล็ดของผิวรอยเชื่อมละเอียด บริเวณจุดเริ่มต้นของของรอยเชื่อมจะเกิดครีบมาก เกิดจากต้องใช้ระยะเวลาเพื่อถอดแห้วกวนเพื่อสร้างความร้อน และครีบบางส่วน

บริเวณทั้งด้านแอดวานซิงไซด์ไซด์ (Advancing side ; AS) และด้านรีทเรตติงไซด์ (Retreating side ; RS) HI Dawood et.al. (2015) เกิดจากการไหลตัวของเนื้อวัสดุตามทิศทางการหมุนของหัวกวนและจากการเดินเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุเกิดไหลตัวไปอัดทางด้านแอดวานซิงไซด์ไซด์ (Advancing side ; AS) จึงทำให้มักจะเกิดครีปด้านแอดวานซิงไซด์ไซด์ (Advancing side ; AS) มากกว่าด้านรีทเรตติงไซด์ (Retreating side ; RS)


รูปทรงหัวกวน	ขนาดปากกวน	ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที
Cone	9	
	12	
	15	
Cylindrical	9	
	12	
	15	

รูปที่ 4. 1 ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที

4.1.2 ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม.

จากการทดลองพบว่า พื้นผิวด้านบนรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด AI7075 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม. ลักษณะโดยทั่วไปมีลักษณะ

เป็นวงแหวนที่มีผิวเรียบ เกล็ดของผิวรอยเชื่อมละเอียด บริเวณจุดเริ่มต้นของของรอยเชื่อมจะเกิดครีบก เกิดจากต้องใช้เวลาเพื่อคั่นหัวกวนเพื่อสร้างความร้อน และเกิดครีบกบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side ; AS) ซึ่งเกิดจากการไหลตัวของเนื้อวัสดุตามทิศทางการหมุนของหัวกวน และจากการเดินเชื่อมที่ทำให้เนื้อวัสดุเกิดไหลตัวไปอัดทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side ; AS) มากกว่าด้านรีเทรตติ้งไซด์ (Retreating side ; RS)

รูปทรงหัวกวน	ปากกวน	ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที
Cone	9	
	12	
	15	
Cylindrical	9	
	12	
	15	

รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที

4.1.3 ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม.

จากการทดลอง พื้นผิวด้านบนรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม A17075 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม. ลักษณะโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นวงแหวนที่มีผิวเรียบ เกล็ดของผิวรอยเชื่อมละเอียด บริเวณจุดเริ่มต้นของของรอยเชื่อมจะเกิดครีบก เกิด

จากต้องใช้ระยะเวลาเพื่อถอดแซ่หัวกวนเพื่อสร้างความร้อน และเกิดครีบบากบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side ; AS) และด้านรีทเรตติงไซด์ (Retreating side ; RS) ซึ่งเกิดจากการไหลตัวของเนื้อวัสดุตามทิศทางการหมุนของหัวกวน เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนหัวกวนที่เพิ่มขึ้นจะสังเกตได้ว่าครีบที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้น

รูปทรงหัวกวน	ปากกวน	ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที
Cone	9	
	12	
	15	
Cylindrical	9	
	12	
	15	

รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที

4.1.4 ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม.

จากการทดลอง พื้นผิวด้านบนรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมเกรด A17075 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม. ลักษณะโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นวงแหวนที่มีผิวเรียบ เกือบของผิวรอยเชื่อมละเอียด บริเวณจุดเริ่มต้นของของรอยเชื่อมจะเกิดครีบ เกิดจากต้องใช้ระยะเวลาเพื่อถอดแซ่หัวกวนเพื่อสร้างความร้อน และเกิดครีบบริเวณด้านแอดวานซิงไซด์

ไซค์ (Advancing side ; AS) และด้านรีทเรตติ้งไซค์ (Retreating side ; RS) แต่จะสังเกตว่าครีปที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณที่ลดลงเนื่องจากความเร็วเดินเชื่อมที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุมีปริมาณไม่สูงจนเกินไป

รูปทรงหัวกวน	ปากกวน	ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที
Cone	9	
	12	
	15	
Cylindrical	9	
	12	
	15	

รูปที่ 4. 4 ลักษณะพื้นผิวรอยเชื่อมความเร็วในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที

4.2 ผลการวิเคราะห์แรงตามแนวแกนของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล
งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (Full factorial design) โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้การเชื่อมเสียดทานแบบกวนประกอบด้วย 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการหมุน (Rotational Speed) ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) รูปทรงหัวกวน (Pin Profile) และขนาดปากกวน (Shoulder Diameter) โดยปัจจัยที่มี 2 ระดับ 3 ปัจจัย และปัจจัยที่มี 3 ระดับ 1 ปัจจัยดังตารางที่ 4.1 เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลกระทบต่อแรงตามแนวแกนอย่างมีนัยสำคัญ โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) เพื่อให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองมีความ

ถูกต้องและรวดเร็ว ผู้วิจัยจึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยผลจากการทดลองวัดค่าแรงตามแนวแกนจะบันทึกลงตารางการทดลอง ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 1 ตารางปัจจัยการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
ความเร็วรอบในการหมุนกวน	1,580	2,220	-	รอบ/นาที
ความเร็วเดินเชื่อม	36	63	-	มม./นาที
ขนาดปากกวน	9	12	15	มม.
รูปทรง	Cone	Cylindrical		-

ตารางที่ 4. 2 ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป

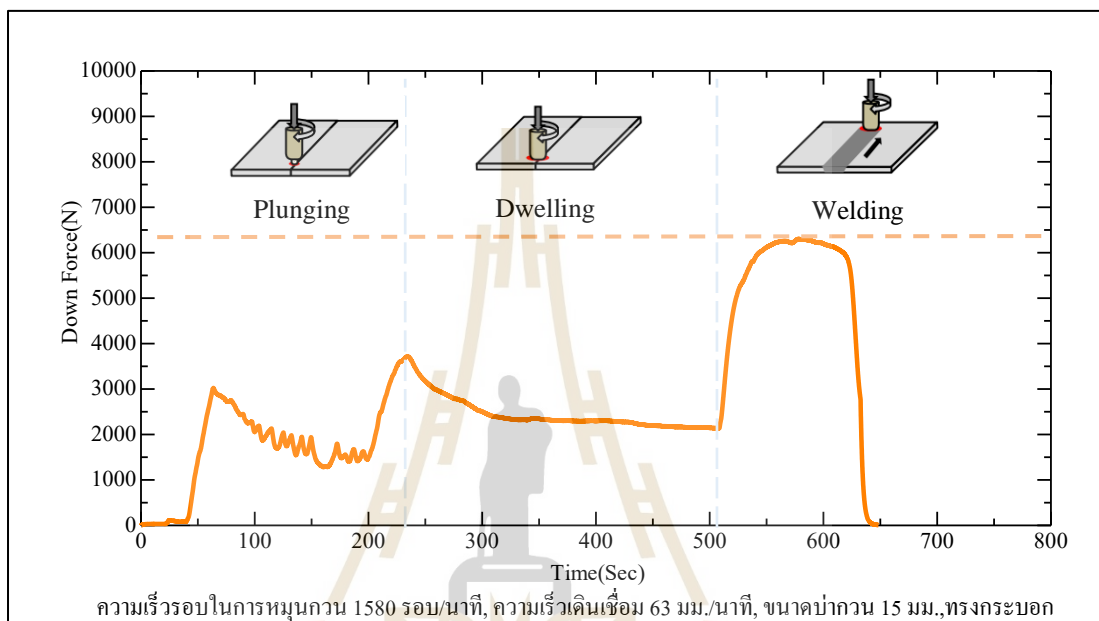
StdOrder	Rotational Speed (รอบ/นาที)	Welding Speed (มม./นาที)	Pin Profile	Shoulder Diameter (มม.)	Axial Force (N)
1	1580	36	Cone	9	3661
2	1580	36	Cone	12	5037
3	1580	36	Cone	15	5560
4	1580	36	Cylindrical	9	3433
5	1580	36	Cylindrical	12	5285
6	1580	36	Cylindrical	15	5465
7	1580	63	Cone	9	4157
8	1580	63	Cone	12	4363
9	1580	63	Cone	15	5473
10	1580	63	Cylindrical	9	3825
11	1580	63	Cylindrical	12	5274
12	1580	63	Cylindrical	15	6301
13	2220	36	Cone	9	3550
14	2220	36	Cone	12	4781
15	2220	36	Cone	15	5193

ตารางที่ 4. 2 ผลการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป (ต่อ)

StdOrder	Rotational Speed (รอบ/นาที)	Welding Speed (มม./นาที)	Pin Profile	Shoulder Diameter (มม.)	Axial Force (N)
16	2220	36	Cylindrical	9	3205
17	2220	36	Cylindrical	12	4857
18	2220	36	Cylindrical	15	4893
19	2220	63	Cone	9	4342
20	2220	63	Cone	12	5693
21	2220	63	Cone	15	5955
22	2220	63	Cylindrical	9	3900
23	2220	63	Cylindrical	12	5206
24	2220	63	Cylindrical	15	5682

การวิเคราะห์แรงตามแนวแกนของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้น เพื่อทราบถึงแนวโน้มแรงตามแนวแกน จากพารามิเตอร์ในการดำเนินการทดลอง คือ ความเร็วรอบในการหมุน 1580 และ 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 และ 63 มม./นาที รูปทรงหัวกวนแบบทรงกรวยและแบบทรงกระบอก และขนาดปากกวน 9, 12 และ 15 มม. ผู้วิจัยได้ใช้อุปกรณ์ที่สามารถจับยึดชิ้นงานทดลอง โดยอุปกรณ์จับยึดนั้นติดตั้งโหลดเซลล์ เพื่อวัดและบันทึกค่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นระหว่างหัวกวนกับชิ้นงานตลอดระยะเวลาการเชื่อม (Angkarn Kamruan, 2020) โดยการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน มี 3 ระยะ ได้แก่ ระยะกดหัวกวน (Plunging) ระยะกดลึกเสียดทาน (Dwelling) ระยะเดินเชื่อม (Welding) โดยระยะกดหัวกวน (Plunging) คือการที่หัวกวนค่อยๆ เคลื่อนตัวลงกลดลงในชิ้นงานจนถึงระยะที่ปากกวนสัมผัสกับ ซึ่งตลอดระยะกดหัวกวนลงนั้น ทุก ๆ ระยะกดหัวกวนที่เพิ่มขึ้นค่าแรงตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อแชนหัวกวนกับชิ้นงานในระยะเวลาหนึ่งจนความร้อนเพิ่มขึ้นวัสดุจะเกิดสภาวะพลาสติก ค่าแรงตามแนวแกนจะค่อยๆ ลดลง และค่าแรงตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อถึงระยะที่พื้นผิวปากกวนสัมผัสกับบริเวณผิวชิ้นงานเกิดการเสียดทานจนความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกว่า ระยะกดลึกเสียดทาน (Dwelling) โดยเมื่อถึงระยะดังกล่าวจะรักษาระดับความลึกของการกดแชนหัวกวนกับชิ้นงานไว้คงที่ เพื่อกระจายความร้อนสู่ชิ้นงานจนวัสดุเกิดสภาวะพลาสติกจนค่าแรงตามแนวแกนลดลง ซึ่งใช้

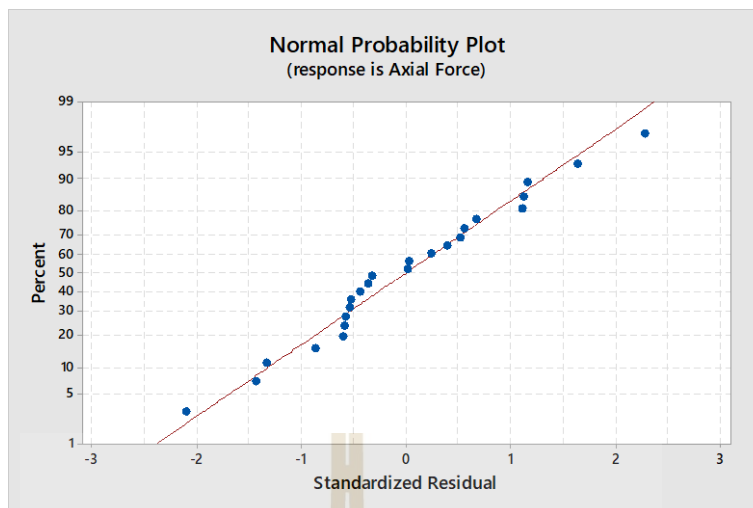
ระยะเวลาทั้งหมดโดยเริ่มนับจากระยะกดหัวกวนเท่ากับ 500 วินาที และเมื่อถึงระยะเดินเชื่อม (Welding) หัวกวนจะเคลื่อนที่ตามรอยต่อชนและเชื่อมชิ้นงานเข้าด้วยกัน ลักษณะแรงตามแนวแกนจะมีค่าสูงสุดตลอดการเชื่อมซึ่งจะเป็นค่าที่นำมาบันทึกลงในตารางการทดลอง และค่าแรงตามแนวแกนจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงระยะสิ้นสุดรอยเชื่อมจนยกหัวกวนขึ้นจากชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4. 5 กราฟแสดงค่าแรงตามแนวแกนกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

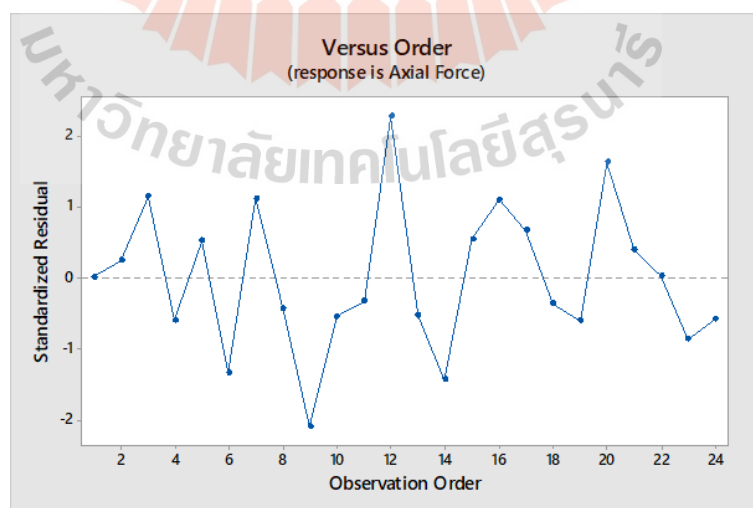
4.2.1 การตรวจการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) การตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูล เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ในตารางที่ 4.2 โดยอาศัยโปรแกรมทางสถิติ Minitab มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ในการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูล ที่ได้จากการนำผลการทดลองใน ตารางที่ 4.2 โดยใช้การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Distribution Plot) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ดังรูปที่ 4.6



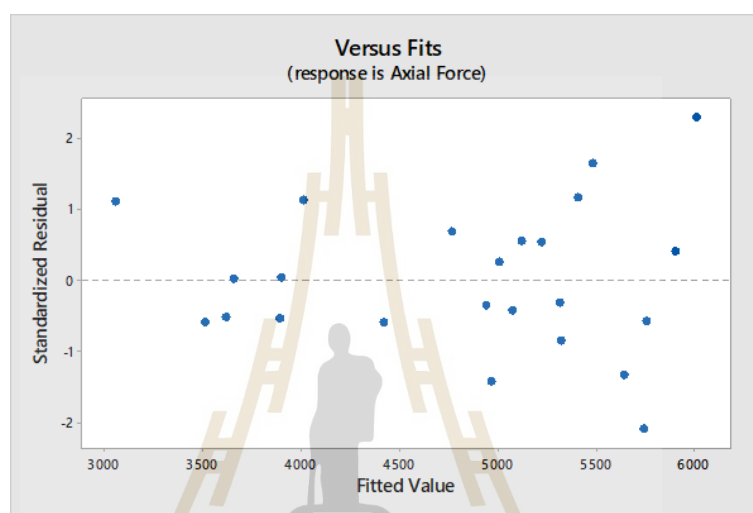
รูปที่ 4. 6 แสดงการกระจายแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Residual)

2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง พบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน ได้จากการนำผลการทดลองในตารางที่ 4.2 มาสร้างเป็นแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) สามารถพิจารณาได้ว่า การกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิ พบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4. 7 ผลลัพธ์การทดสอบสมมุติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล

3) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลื่อน จากรูปที่ 4.8 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนาย (Plots of Residuals Versus Fitted Values) พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่ต่างกัน มีการกระจายตัวแบบอิสระทั้งทางบวกและลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 4. 8 ผลลัพธ์การทดลองความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของข้อมูล

4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

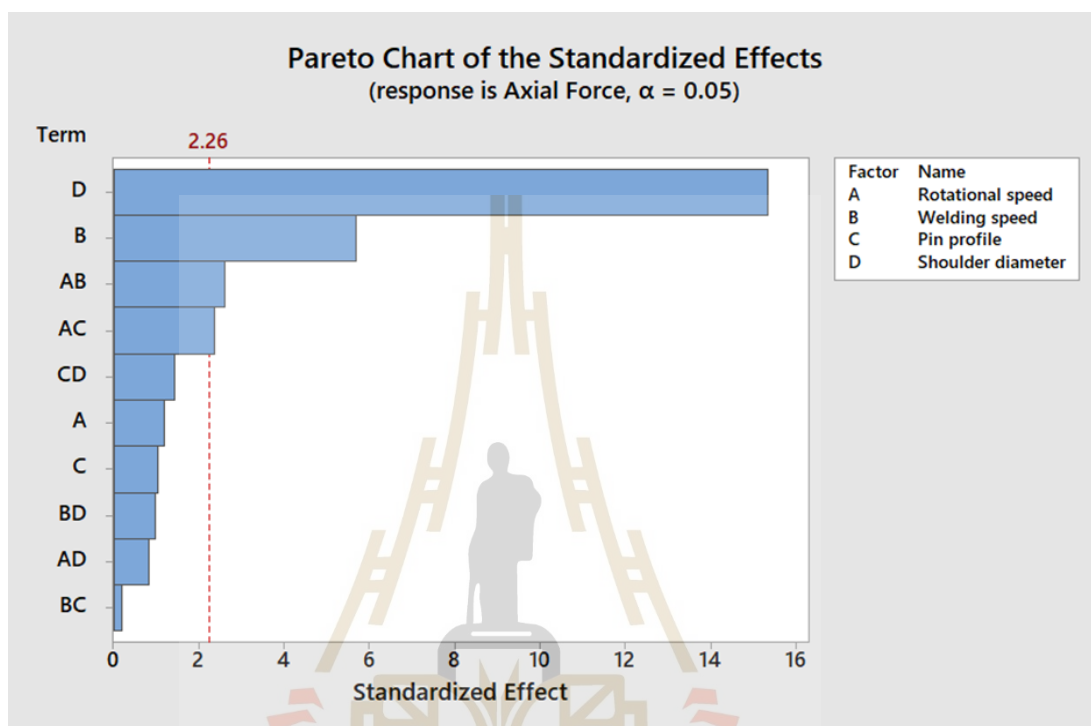
จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองพบว่า ไม่มีความผิดปกติของการทดลองเกิดขึ้น และข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงได้นำข้อมูลในตารางที่ 4.2 นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยกำหนดระดับความเชื่อถือนั้นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) โดยใช้โปรแกรม Minitab มาทำวิเคราะห์ผลการทดลอง และสามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4. 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลอง

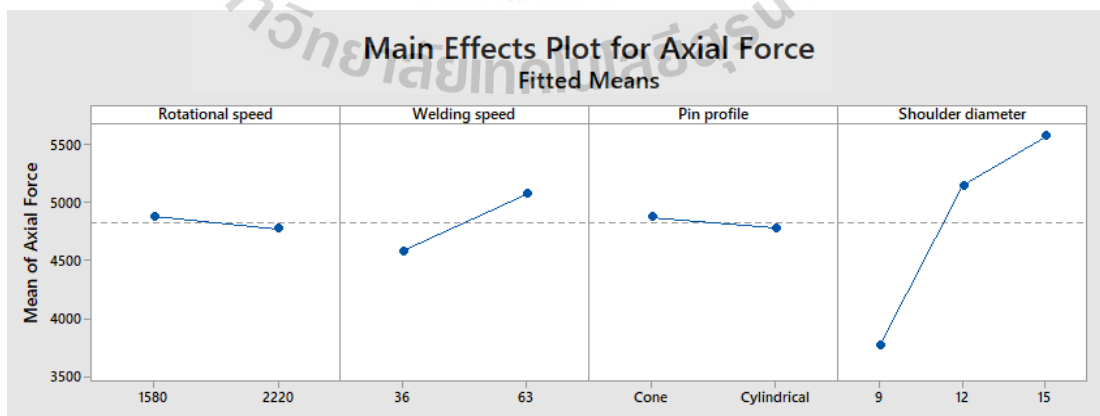
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	16770099	1197864	26.78	0.000
Linear	5	15846975	3169395	70.85	0.000
Rotational speed	1	62833	62833	1.40	0.266
Welding speed	1	1451400	1451400	32.45	0.000
Pin profile	1	49504	49504	1.11	0.320
Shoulder diameter	2	14283238	7141619	159.65	0.000
2-Way Interactions	9	923125	102569	2.29	0.116
Rotational speed*Welding speed	1	302851	302851	6.77	0.029
Rotational speed*Pin profile	1	250513	250513	5.60	0.042
Rotational speed*Shoulder diameter	2	83336	41668	0.93	0.429
Welding speed*Pin profile	1	1634	1634	0.04	0.853
Welding speed*Shoulder diameter	2	103119	51560	1.15	0.358
Pin profile*Shoulder diameter	2	181673	90837	2.03	0.187
Error	9	402597	44733		
Total	23	17172696			
R-sq = 97.66% R-sq (adj) = 94.01% R-sq (pred) = 83.33%					

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงตามแนวแกน ดังตารางที่ 4.3 พบว่า ผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วม จากพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อแรงตามแนวแกนที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกนมากที่สุด ประกอบด้วย ขนาดปากกวน และความเร็วเดินเชื่อม ตามลำดับ ในขณะที่รูปทรงของหัวกวนและความเร็วรอบในการหมุนกวน ในช่วงระดับของปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงตามแนวแกนอย่างมีนัยสำคัญ และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงตามแนวแกน ประกอบด้วยความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วเดินเชื่อม และความเร็วรอบในการหมุนกวน รูปทรงหัวกวนก็มีผลต่อแรงตามแนวแกนอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ดังรูปที่ 4.9

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของระดับความเชื่อถือการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากการทดลองมีค่า R-sq เท่ากับ 97.66% และมีค่า R-sq (adj) เท่ากับ 94.01% แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือ และจำนวนที่เพียงพอต่อการพยากรณ์ของค่าแรงตามแนวแกน

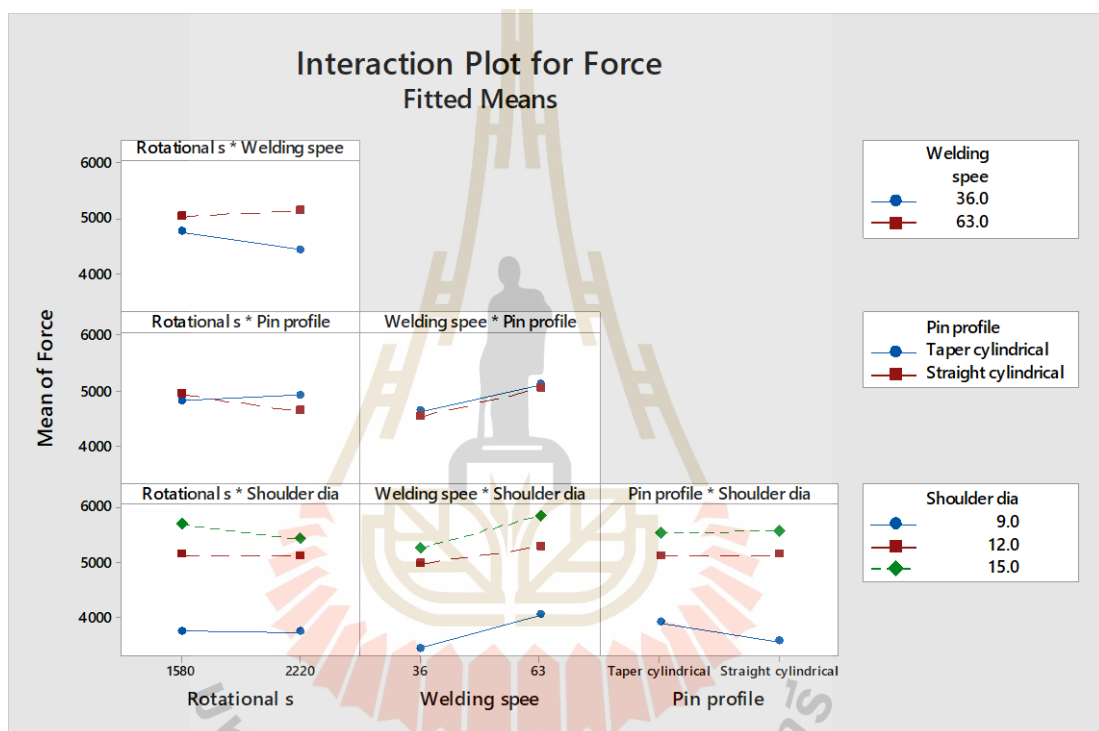


รูปที่ 4. 9 กราฟพาเรโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อค่าแรงตามแนวแกน



รูปที่ 4. 10 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบหลักต่อค่าแรงตามแนวแกน

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงตามแนวแกน (Main Effect) ทั้งสี่ปัจจัยประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วเดินเชื่อม รูปทรงหัวกวน และขนาดปากกวน ดังรูปที่ 4.10 แสดงปัจจัยผลกระทบต่อค่าแรงตามแนวแกน (Zhang, Qi, & Zhang, 2014 และ Ramanjaneyulu, Reddy, & Rao, 2014) พบว่า ขนาดปากกวนที่เล็กลง และความเร็วเดินเชื่อมที่ลดลงจะส่งผลให้แรงตามแนวแกนลดลง ในขณะที่ความเร็วรอบในการหมุนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงตามแนวแกนลดลง และหัวกวนทรงกระบอกทำให้เกิดแรงตามแนวแกนน้อยเช่นกัน



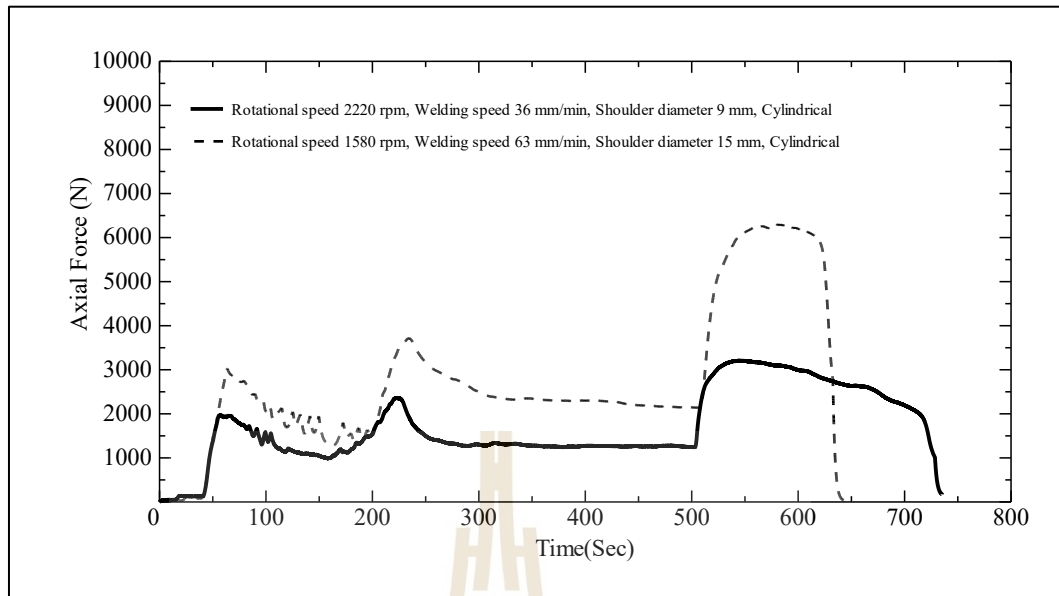
รูปที่ 4. 11 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกน

จากการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Plot) ดังรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ร่วมของแต่ละพารามิเตอร์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนและความเร็วเดินเชื่อม พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุน 1580 และ 2220 รอบ/นาที ความเร็วเชื่อมที่ 36 มม./นาที มีแนวโน้มให้ค่าแรงตามแนวแกนที่ลดลงเมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้น ส่วนความเร็วเดินเชื่อมที่ 63 มม./นาที มีแนวโน้มที่ค่าแรงตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมต่อมาของรูปทรงหัวกวนและความเร็วรอบในการหมุนกวน พบว่าเมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนจาก 1580 รอบ/นาที ไป 2220 รอบ/นาที เมื่อใช้หัวกวนทรงกระบอกให้ค่าแรงตามแนวแกนลดลง ส่วนหัวกวนทรงกรวยเมื่อความเร็วรอบในการหมุนกวนสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าแรงตามแนวแกนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ต่อมาหัวกวนทรงกรวยและหัวกวนทรงกระบอก เมื่อความเร็วเดินเชื่อมเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้ค่าแรงตามแนวแกนเพิ่มขึ้นซึ่งมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างขนาดบ่อกวนและความเร็วรอบในการหมุนกวน พบว่าขนาดบ่อกวน 9 มม. ให้ค่าแรงตามแนวแกนน้อยที่สุด โดยความเร็วรอบในการหมุนกวนที่สูงขึ้นในทุกๆขนาดบ่อกวนให้ค่าแรงตามแนวแกนที่ใกล้เคียงกัน ต่อมาในทุกๆขนาดบ่อกวน เมื่อใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้แรงตามแนวแกนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยความเร็วเดินเชื่อมที่ 36 มม./นาที ขนาดบ่อกวน 9 มม. ให้ค่าแรงตามแนวแกนน้อยที่สุด และขนาดบ่อกวน 9 มม. ก็ยังคงให้ค่าแรงตามแนวแกนที่น้อยเมื่อใช้รูปทรงหัวกวนทรงกรวยและทรงกระบอกตรง โดยหัวกวนทรงกระบอกตรงจะให้แรงตามแนวแกนที่น้อยที่สุด

จากการทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสามารถวัดแรงตามแกนที่เกิดขึ้นขณะเชื่อม พบว่า ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดบ่อกวน 9 มม. หัวกวนทรงกระบอก ระยะกวดหัวกวนมีค่าแรงตามแนวแกนสูงสุดประมาณ 2000 N จากนั้นแรงตามแนวแกนจะค่อยๆลดลง จนถึงระยะที่พื้นผิวบ่อกวนสัมผัสกับชิ้นงานที่เรียกว่าระยะกวดลึก เสียดทานมีค่าแรงตามแนวแกนสูงสุดประมาณ 2500 N เมื่อถึงระยะดังกล่าวจะรักษาระยะความลึกของหัวกวนกับชิ้นงานไว้คงที่ เพื่อให้ความร้อนกระจายสู่ชิ้นงานจนค่าแรงตามแนวแกนนิ่ง รวมระยะเวลาประมาณ 500 Sec จากนั้นทำการเดินเชื่อมได้ค่าแรงตามแนวแกนระยะเดินเชื่อมเท่ากับ 3200 N ซึ่งเป็นค่าสูงสุดตลอดระยะเวลาเชื่อมจากพารามิเตอร์ดังกล่าวและพบว่าเป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าแรงตามแนวแกนที่น้อยสุด ในขณะที่เทียบจากการทดลองที่ใช้ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดบ่อกวน 15 มม. หัวกวนแบบทรงกระบอก ให้ค่าแรงตามแนวแกนระยะกวดหัวกวนสูงสุดประมาณ 3000 N ระยะกวดลึกเสียดทานสูงสุดประมาณ 3900 N และระยะเดินเชื่อมเท่ากับ 6301 N ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากพารามิเตอร์ดังกล่าว พบว่าเป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าแรงตามแนวแกนที่สูงที่สุด ดังรูป 4.12 แสดงกราฟตลอดกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างพารามิเตอร์ที่ให้แรงตามแนวแกนที่น้อยสุด และสูงสุด



รูปที่ 4. 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ความเร็วรอบในการหมุน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. กับความเร็วรอบในการหมุน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 ขนาดปากกวน 15 มม. โดยใช้รูปทรงหัวกวนแบบทรงกระบอก

ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงตามแนวแกนสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อความเร็วรอบในการหมุนหัวกวนเพิ่มขึ้น ความเร็วเดินเชื่อมที่ช้าลง และขนาดปากกวนที่เล็กลง จะให้ค่าแรงตามแนวแกนที่ลดลง (Moshwan et al., 2015) เนื่องจากความเร็วในการหมุนหัวกวนมีผลต่อปริมาณการสร้างความร้อนเสียดทาน ทำให้วัสดุเกิดสภาวะพลาสติกจนเกิดการไหลตัวของวัสดุได้ง่ายขึ้น เนื่องจากในระยะเวลาหมุนหัวกวนที่เท่ากันแต่ความเร็วรอบในการหมุนกวนหัวกวนที่เพิ่มขึ้นหัวกวนมีการหมุนเสียดทานวัสดุที่จำนวนรอบที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบในการหมุนกวนหัวกวนที่ต่ำ จึงให้ค่าแรงตามแนวแกนที่ลดลง ส่วนความเร็วเดินเชื่อมจะมีผลต่อการควบคุมความร้อนเสียดทานให้เพียงพอตลอดระยะทางการเคลื่อนที่ของหัวกวนในระยะทางการเคลื่อนที่หัวกวนที่เท่ากันแต่เวลาที่ใช้ในการเชื่อมต่างกัน (Kumar, Singh, & Pandey, 2012 และ Su et al., 2013) กล่าวคือเมื่อความเร็วเดินเชื่อมที่ช้าลง เวลาในการสร้างความร้อนเสียดทานนานกว่า ทำให้ปริมาณการเกิดวัสดุในสภาวะพลาสติกที่มากขึ้นเกิดการไหลตัวของวัสดุที่ง่ายขึ้นค่าแรงตามแนวแกนจึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความเร็วเดินเชื่อมที่สูง (Shojaeefard et al., 2015) ต่อมาขนาดปากกวนมีผลอย่างมากต่อการสร้างร้อนเสียดทานบนผิววัสดุ แต่เนื่องจากหัวกวนที่มีขนาดปากกวนเล็กลง ทำให้บริเวณ

พื้นผิวของบ่ากวนมีการสัมผัสกับผิววัสดุที่มีพื้นที่ๆ น้อยลงไปจึงทำให้ค่าแรงตามแนวแกนลดลงไปตามขนาดบ่ากวนนอกจากนี้รูปร่างของหัวกวนทรงกรวยและทรงกระบอก จากการวิเคราะห์ทางสถิติไม่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกน โดยรูปร่างหัวกวนทั้งสองแบบให้ค่าแรงตามแนวแกนที่ใกล้เคียงกันเมื่อมีขนาดบ่ากวนที่เท่ากัน

4.3 ผลวิเคราะห์ความแข็งแรงดึงของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) โดยศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) การศึกษาครั้งนี้กำหนดปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย ประกอบด้วย ความเร็วในการหมุน (Rotational Speed) ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) รูปร่างหัวกวน (Pin Profile) และขนาดบ่ากวน (Shoulder Diameter) เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงในตารางที่ 4.1 และจากการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E8M โดยเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจากจำนวนตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่าง ซึ่งผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4. 4 ตารางการทดสอบความแข็งแรงดึง

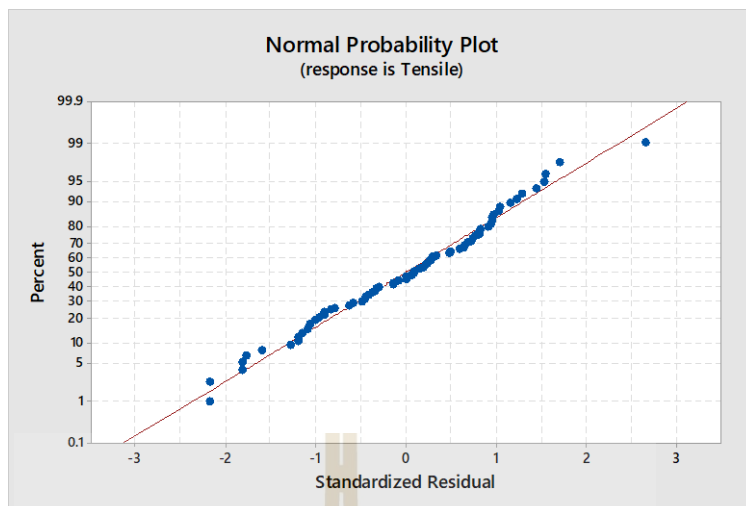
StdOrder	Rotational Speed (รอบ/นาที)	Welding Speed (มม./นาที)	Pin Profile	Shoulder Diameter (มม.)	Tensile Strength (MPa)			
					#1	#2	#3	เฉลี่ย
1	1580	36	Cone	9	356.33	377.23	364.08	366
2	1580	36	Cone	12	277.77	295.72	276.12	283
3	1580	36	Cone	15	295.91	285.20	251.26	277
4	1580	36	Cylindrical	9	335.34	326.97	292.00	318
5	1580	36	Cylindrical	12	356.36	357.52	358.54	357
6	1580	36	Cylindrical	15	253.56	251.70	266.29	257
7	1580	63	Cone	9	311.86	306.7	339.94	320
8	1580	63	Cone	12	256.42	276.63	279.38	271
9	1580	63	Cone	15	236.71	265.60	265.60	256
10	1580	63	Cylindrical	9	307.94	317.60	280.95	302
11	1580	63	Cylindrical	12	352.20	310.34	298.48	320
12	1580	63	Cylindrical	15	254.70	247.47	255.12	252
13	2220	36	Cone	9	301.89	291.54	317.60	304
14	2220	36	Cone	12	296.53	292.03	278.06	289

ตารางที่ 4. 4 ตารางการทดสอบความแข็งแรงดึง (ต่อ)

StdOrder	Rotational Speed (รอบ/นาที)	Welding Speed (มม./นาที)	Pin Profile	Shoulder Diameter (มม.)	Tensile (MPa)			
					#1	#2	#3	เฉลี่ย
15	2220	36	Cone	15	289.65	282.40	263.05	278
16	2220	36	Cylindrical	9	320.17	329.46	352.21	334
17	2220	36	Cylindrical	12	333.08	345.04	353.82	344
18	2220	36	Cylindrical	15	261.60	286.82	275.15	275
19	2220	63	Cone	9	301.36	309.88	310.63	307
20	2220	63	Cone	12	291.41	301.01	276.54	290
21	2220	63	Cone	15	276.40	264.34	264.10	268
22	2220	63	Cylindrical	9	252.75	289.30	281.67	275
23	2220	63	Cylindrical	12	306.68	295.20	318.23	307
24	2220	63	Cylindrical	15	244.78	219.46	237.36	234

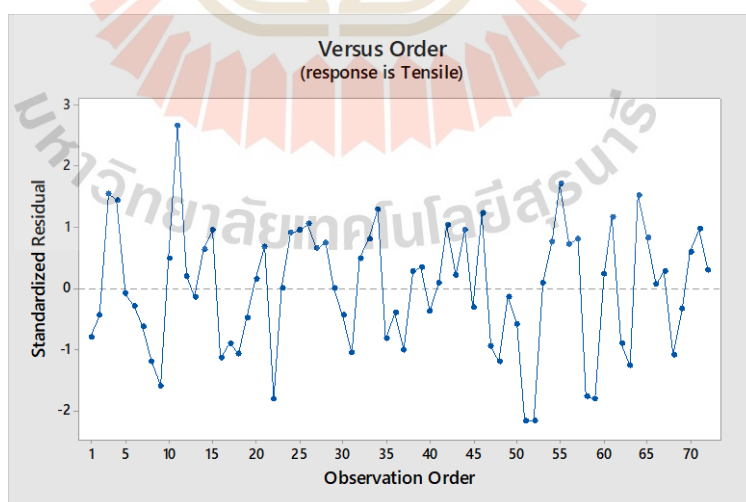
4.3.1 การตรวจการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) การตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูล เป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ในตารางที่ 4.4 โดยอาศัยโปรแกรมทางสถิติ Minitab มาทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ในการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของข้อมูลที่ได้จากการนำผลการทดสอบใน ตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ดังรูปที่ 4.13



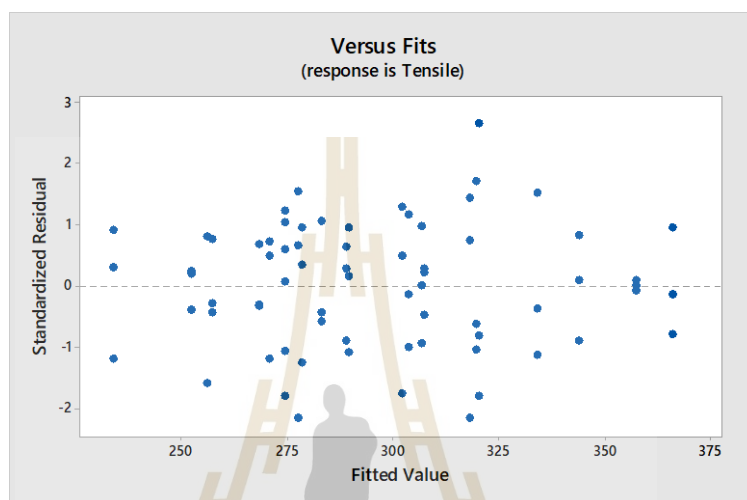
รูปที่ 4. 13 แสดงการกระจายแบบปกติของค่าส่วนตกค้างจากการทดสอบความแข็งแรงดึง

2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง พบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน จากแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) สามารถพิจารณาได้ว่า การกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4. 14 ผลลัพธ์การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระจากการทดสอบความแข็งแรงดึง

3) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความเค้น พบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้างมีลักษณะที่ต่างกัน มีการกระจายตัวแบบอิสระทั้งทางบวกและลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4. 15 ผลลัพธ์การทดลองความสม่ำเสมอของแปรปรวนของข้อมูลจากการทดสอบความแข็งแรงดึง

4.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งแรงดึง

จากข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือซึ่งไม่มีความผิดปกติจากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง จึงนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) โดยใช้โปรแกรม Minitab มาทำวิเคราะห์ผลการทดสอบ และสามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

จากตารางที่ 4.4 ได้นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงดึงด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ชี้ให้เห็นผลกระทบหลัก และผลกระทบรวมของปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อผลตอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังตาราง 4.5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ประกอบด้วย ขนาดปากกวน และความเร็วเดินเชื่อม ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วรอบ และรูปทรงในช่วงระดับปัจจัยที่

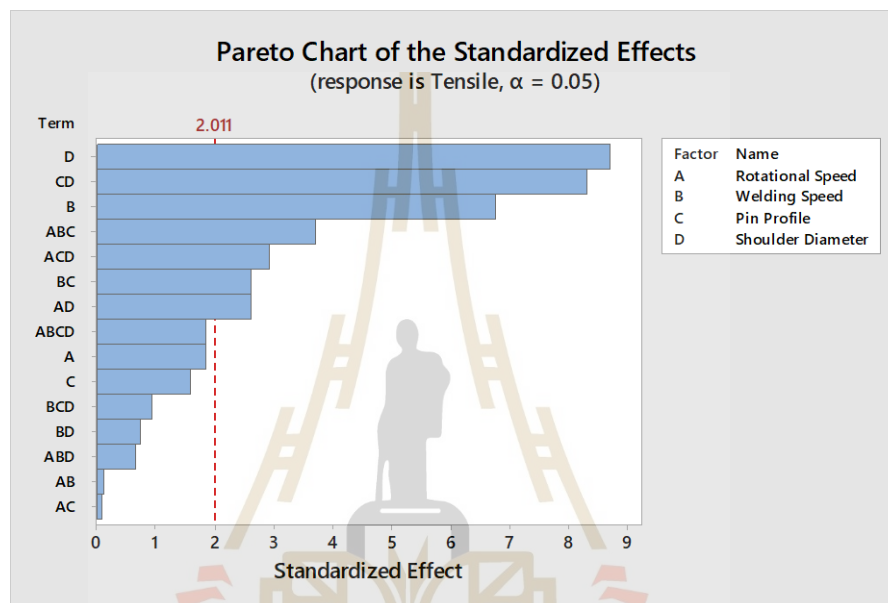
ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึง นอกจากนี้พบว่า ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงคือ ผลกระทบร่วมระหว่างรูปทรงและขนาดปากวน

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 88.43% และค่า R-sq (adj) เท่ากับ 82.89% ถือว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพึงพอใจ

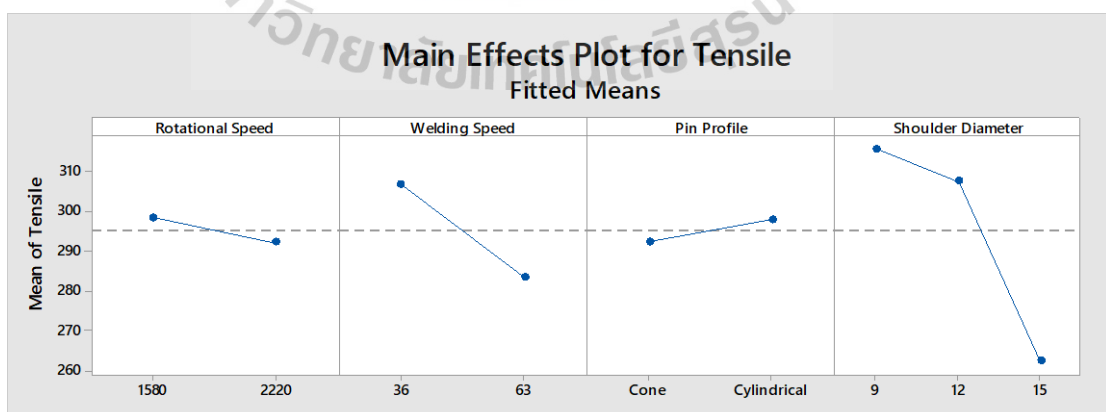
ตารางที่ 4. 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	23	79384.0	3451.5	15.95	0.000
Linear	5	50942.1	10188.4	47.09	0.000
Rotational speed (A)	1	736.8	736.8	3.41	0.071
Welding speed (B)	1	9876.4	9876.4	45.65	0.000
Pin profile (C)	1	550.0	550.0	2.54	0.117
Shoulderdiameter (D)	2	39778.9	19889.4	91.93	0.000
2-Way Interactions	9	20953.6	2328.2	10.76	0.000
Rotational speed*Welding speed	1	3.0	3.0	0.01	0.907
Rotational speed*Pin profile	1	1.5	1.5	0.01	0.935
Rotational speed*Shoulderdiameter	2	2103.6	1051.8	4.86	0.012
Welding speed*Pin profile	1	1489.9	1489.9	6.89	0.012
Welding speed*Shoulderdiameter	2	349.7	174.9	0.81	0.452
Pin profile*Shoulderdiameter	2	17005.9	8503.0	39.30	0.000
3-Way Interactions	7	6275.7	896.5	4.14	0.001
A*B*C	1	2966.4	2966.4	13.71	0.001
A*B*D	2	301.9	150.9	0.70	0.503
A*C*D	2	2549.6	1274.8	5.89	0.005
B*C*D	2	457.8	228.9	1.06	0.355
4-Way Interactions	2	1212.5	606.2	2.80	0.071
A*B*C*D	2	1212.5	606.2	2.80	0.071
Error	48	10384.6	216.3		
Total	71	89768.6			
R-sq = 88.43% R-sq (adj) = 82.89% R- sq (pred) = 73.97%					

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า ขนาดปากกวน ความเร็วเดินเชื่อม และผลกระทบร่วมระหว่างรูปทรงหัวกวน กับขนาดปากกวน ความเร็วเดินเชื่อม กับรูปทรงหัวกวน และความเร็วรอบในการหมุนกวน กับขนาดปากกวน และผลกระทบร่วม 3 ปัจจัยคือความเร็วรอบในการหมุนกวน, ความเร็วเดินเชื่อม, รูปทรงหัวกวน และความเร็วรอบในการหมุนกวน, รูปทรงหัวกวน, ขนาดปากกวน ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงเช่นกัน

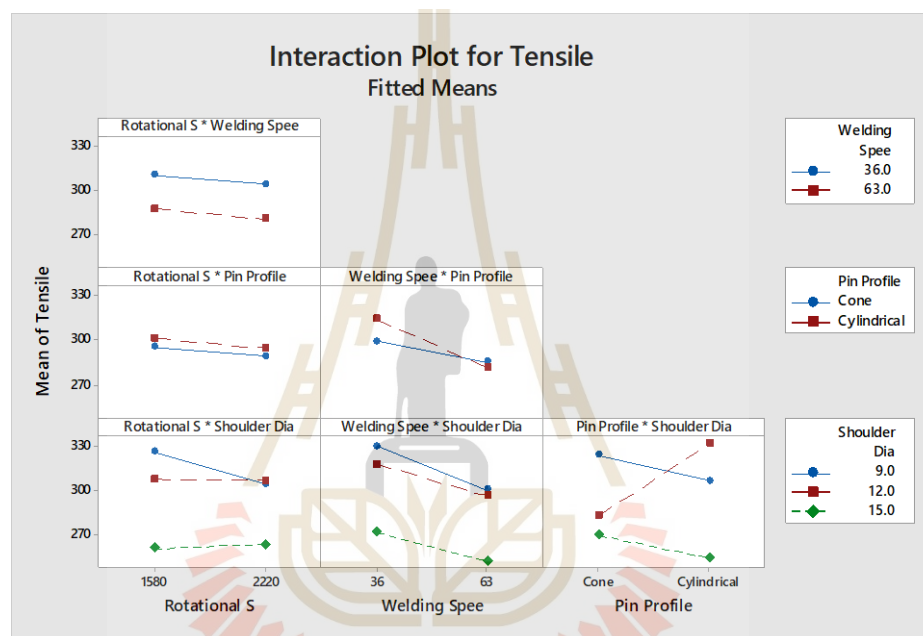


รูปที่ 4. 16 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่มีผลต่อความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4. 17 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบหลักต่อความแข็งแรงดึง

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อหลัก (Main Effect) ทั้งสี่ปัจจัยประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วเดินเชื่อม รูปทรงหัวกวน และขนาดปากกวน ดังรูปที่ 4.17 แสดงปัจจัยผลกระทบต่อความแข็งแรงดึง แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วรอบในการหมุนที่ลดลงให้ค่าความแข็งแรงดึงที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันเมื่อความเร็วเดินเชื่อมที่ลดลงก็จะให้ค่าความแข็งแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ต่อมารูปทรงหัวกวนทรงกระบอกจะให้ค่าความแข็งแรงดึงที่มากกว่ารูปทรงกรวย ในขณะที่ขนาดปากกวนที่ 9 มม. ก็ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 4. 18 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง

จากการวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Plot) ดังรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ร่วมของแต่ละพารามิเตอร์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนและความเร็วเดินเชื่อม พบว่า ความเร็วรอบในการหมุน 1580 และ 2220 รอบ/นาที หากใช้ความเร็วรอบในการหมุนที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด

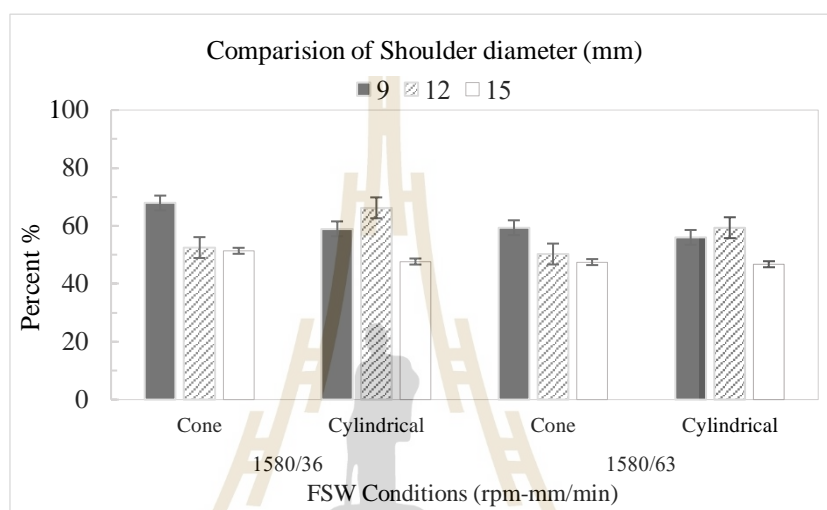
เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมต่อมาของรูปทรงหัวกวนและความเร็วรอบในการหมุน พบว่าเมื่อความเร็วรอบในการหมุนจาก 1580 รอบ/นาที และ 2220 รอบ/นาที เมื่อใช้หัวกวน

ทรงกระบอกให้ค่าความแข็งแรงที่มากกว่าหัวกวนทรงกรวย ต่อมาหัวกวนทรงกรวยและหัวกวนทรงกระบอก เมื่อความเร็วเดินเชื่อมลดลงก็ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งที่เพิ่มขึ้น

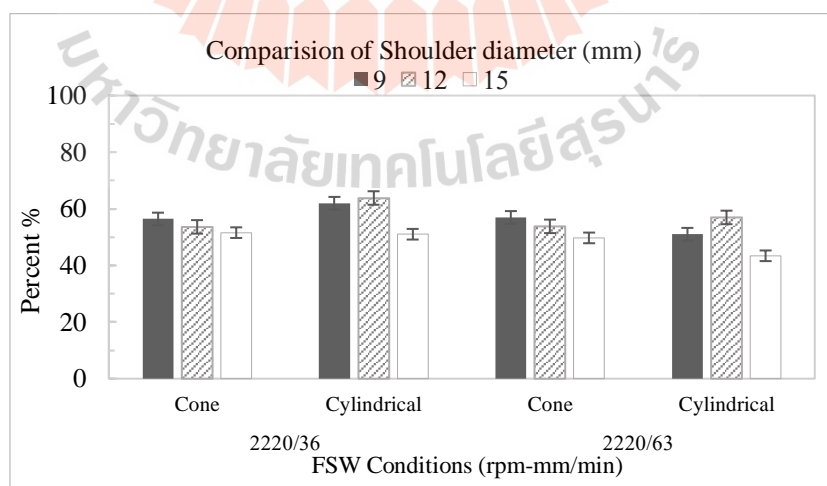
เมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างขนาดบ่อกวนและความเร็วรอบในการหมุนกวน พบว่าขนาดบ่อกวน 9 มม. ให้ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงที่สุด หากแต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนกวนขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงที่ลดลง ต่อมาในทุกๆ ขนาดบ่อกวน เมื่อใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่ลดลงจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งเพิ่มขึ้น และหัวกวนทรงกรวย เมื่อมีขนาดบ่อกวนที่ 9 กับ 15 มม. จะให้ค่าความแข็งแรงดิ่งที่มากกว่าหัวกวนทรงกระบอก ในทางตรงกันข้ามเมื่อขนาดบ่อกวนที่ 12 มม. หัวกวนทรงกระบอกจะให้ค่าความแข็งแรงดิ่งที่มากกว่าหัวกวนทรงกรวย

จากการสอบความแข็งแรงดิ่งของชิ้นงานทดสอบของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดิ่งเฉลี่ยจากจำนวน 3 ตัวอย่าง พบว่าความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดบ่อกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดิ่งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 366 MPa คิดเป็น 68 % ของวัสดุเดิม (Elangovan, Balasubramanian, & Valliappan, 2008, Prakash, Jha, & Lal, 2013 และ Prakash et al., 2018) จากการทดสอบความแข็งแรงดิ่งบริเวณแตกหักของชิ้นงานทดสอบเกิดบริเวณขอบรอยเชื่อม ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) ทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) ซึ่งจากการทดสอบความแข็งแรงรอยเชื่อม บริเวณพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ๆ มีค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างขนาดเกรนในบริเวณพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) เกิดเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างวัสดุเดิม ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลงบริเวณดังกล่าว โดยความร้อนในการเชื่อมที่เหมาะสม เกิดจากความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ต่ำ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเชื่อมไม่สูงมาก ส่วนความเร็วเดินเชื่อมในช่วงการทดลองนั้นให้การควบคุมความร้อนในขณะที่เดินเชื่อมได้เหมาะสม ซึ่งเมื่อความเร็วเดินเชื่อมที่สูงเกินไปความร้อนในที่ลงสู่รอยเชื่อมที่ทำให้เกิดสภาวะพลาสติกไม่เพียงพอ ในขณะที่ขนาดบ่อกวนที่เล็กก็สร้างความร้อนที่ไม่สูงจนเกินไป ซึ่งทั้งสามปัจจัยสัมพันธ์กันส่งผลให้พื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) น้อยลง ทำให้เกรนมีขนาดเล็กกว่า เมื่อใช้ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดบ่อกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอกที่เกิดอุณหภูมิขณะเชื่อมที่สูงเกินไปซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดิ่งเฉลี่ยต่ำสุด 234 MPa คิดเป็น 43 % ของวัสดุเดิม จากรูปที่ 4.19 ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดบ่อกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก คือพารามิเตอร์ที่ให้แรงตามแนวแกน

สูงสุด เท่ากับ 6301 N ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 252 MPa คิดเป็น 47 % ของวัสดุเดิม และรูปที่ 4.20 ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกระบอก คือพารามิเตอร์ที่ให้แรงตามแนวแกนต่ำสุด เท่ากับ 3205 N ให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 334 MPa คิดเป็น 62 % ของวัสดุเดิม พบว่า พารามิเตอร์ที่มีแรงตามแนวแกนสูงจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมต่ำ



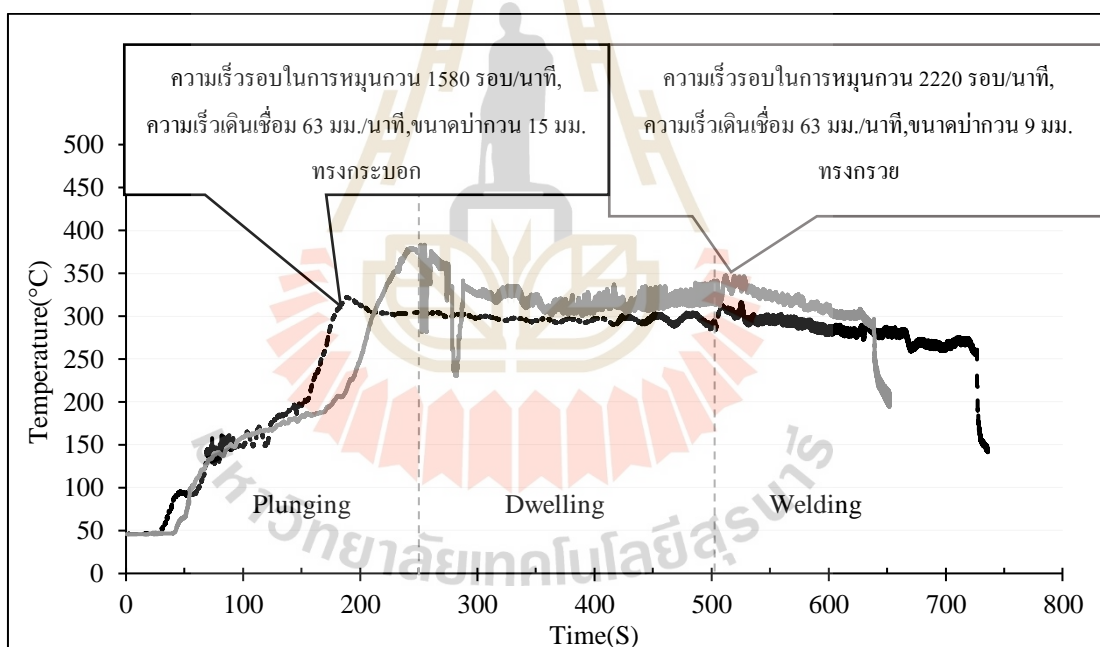
รูปที่ 4. 19 เปรอ์เซ็นต์ความแข็งแรงดึงจากวัสดุเดิมที่ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวน 1580 รอบ/นาที



รูปที่ 4. 20 เปรอ์เซ็นต์ความแข็งแรงดึงจากวัสดุเดิมที่ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวน 2220 รอบ/นาที

4.4 ความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

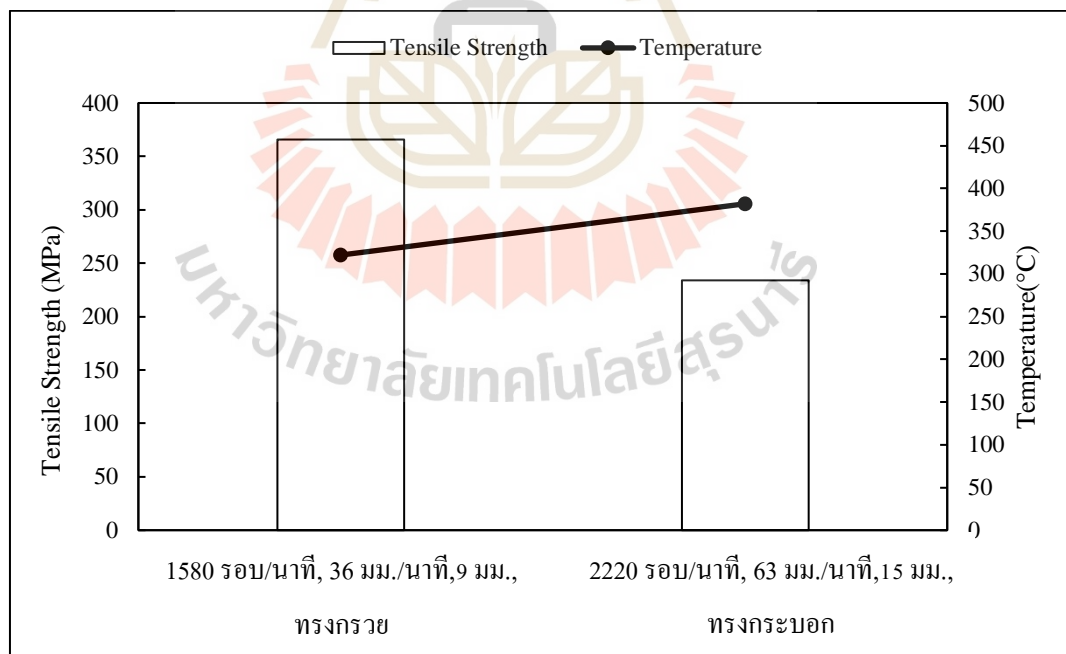
ความร้อนระหว่างกระบวนการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน จากปัจจัยการทดลองที่จะส่งผลกระทบต่อปริมาณการเกิดความร้อน คือ ความเร็วในการหมุน (Rotational Speed) ความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) และขนาดปากกวน (Shoulder Diameter) โดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนขณะทำการทดลอง เพื่อวัดความร้อนสะสมสูงสุดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เนื่องจากค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างภายในรอยเชื่อม และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โดยจะเลือกเป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย และความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก เป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

จากรูปที่ 4.21 แสดงความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมจากพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและต่ำสุด เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมนั้นจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างภายในรอยเชื่อม และส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม จากพารามิเตอร์ที่ให้

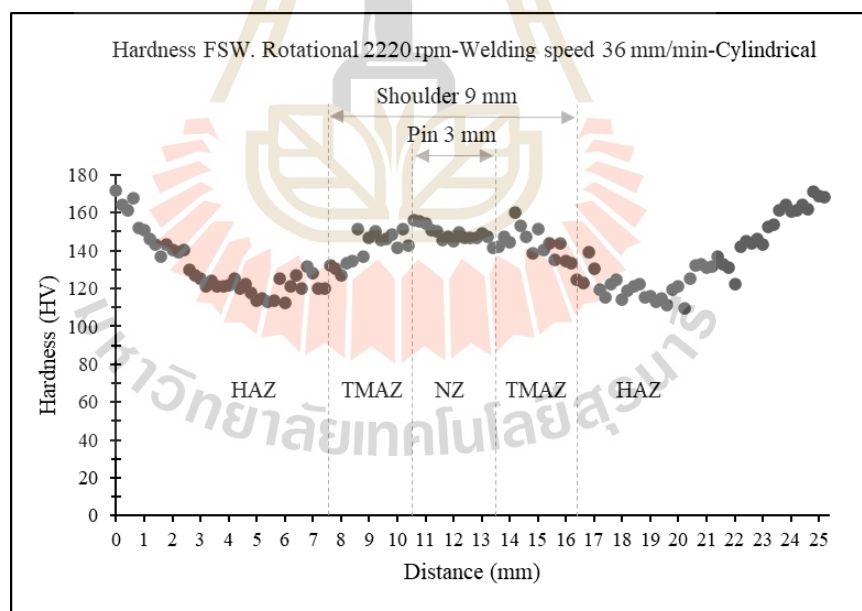
ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ ความเร็วรอบในการหมุนทวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากทวน 9 มม. และหัวทวนทรงกรวย ซึ่งความร้อนจากพารามิเตอร์ดังกล่าว จากระยะกดหัวทวนที่เริ่มสัมผัสเสียดทานกับชิ้นงานจนถึงระยะกดลึกเสียดทานที่กำหนดจะมีความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาที่หัวทวนเป็นเวลาระหว่าง 200 - 250 s โดยความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นประมาณ 322 °C ซึ่งเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นสูงสุดระหว่างกระบวนการเชื่อม จากนั้นเมื่อถึงระยะกดลึกเสียดทานและระยะเดินเชื่อม ความร้อนมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยและจากนั้นก็เริ่มคงที่ จนถึงระยะที่ยกหัวทวนออกจากชิ้นงานความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ความเร็วรอบในการหมุนทวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากทวน 15 มม. และหัวทวนทรงกระบอก คือพารามิเตอร์ที่มีปริมาณความร้อนที่สูงที่สุด โดยจากระยะกดหัวทวนจนถึงระยะกดลึกเสียดทานมีปริมาณความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นประมาณ 382 °C ซึ่งความร้อนดังกล่าวจะส่งผลให้ต่อโครงสร้างภายในรอยเชื่อม พื้นที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อน(Heat Affect Zone ; HAZ) เกิดเกรนขยายตัวจึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงจากพารามิเตอร์มีค่าที่ลดลง (Jain, Pal, & Singh, 2017 และ Jassim et al., 2019) ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4. 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง และปริมาณความร้อนในการเชื่อม

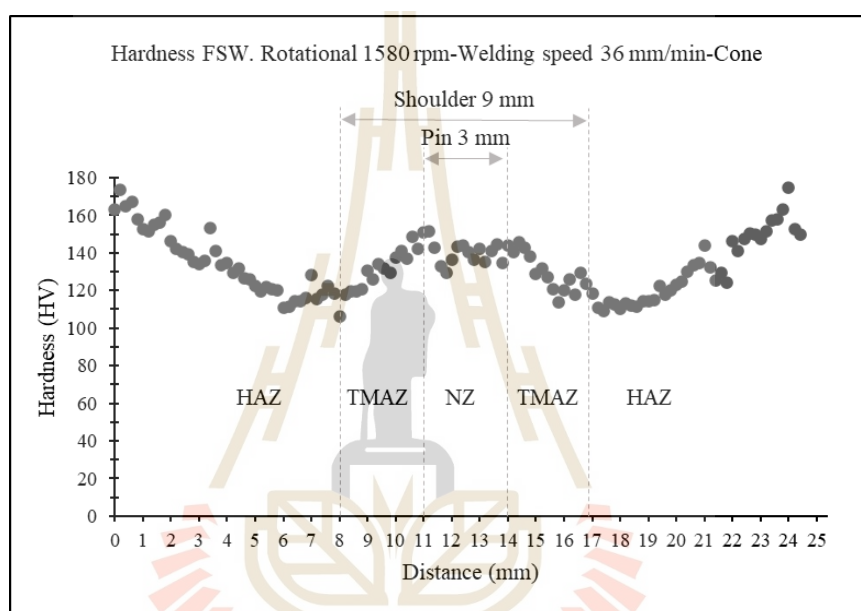
4.5 สมบัติความแข็ง

ทดสอบความแข็งของชิ้นงานตัวอย่างรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยความค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ บริเวณพื้นที่หน้าตัดรอยเชื่อมซึ่งถูกตัดตามขวางกับรอยเชื่อม (Cross-Section) โดยใช้แรงกด 100 g และใช้เวลาทดสอบ 15 s โดยรอยกคมีระยะห่างเท่ากับ 0.2 มม. เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) พื้นที่กระทบร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone ; TMAZ) และพื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ) ของรอยเชื่อมโดยเลือกเป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าแรงตามแนวแกนต่ำที่สุด คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกระบอก ต่อมาพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย และความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก เป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด



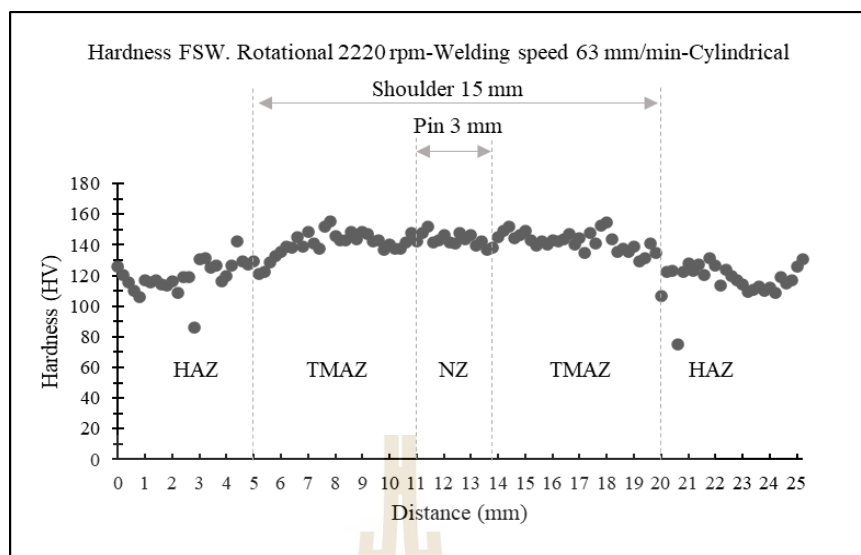
รูปที่ 4. 23 ผลค่าความแข็งที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกระบอก

จากรูปที่ 4.23 ค่าความแข็งของรอยเชื่อม โดยใช้ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที่ ความเร็วเดินเชื่อม 36 ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกระบอก พบว่า มีลักษณะรูปร่างของรอยกตแบบ W (W-Shape) โดยค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กวน (NZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 148 HV จากนั้นค่าความแข็งของรอยเชื่อมจะมีแนวโน้มที่ลดลง โดยบริเวณดังกล่าวนี้คือ พื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) ไปจนถึงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ซึ่งจะมีค่าความแข็งต่ำสุด เฉลี่ยอยู่ที่ 116 HV



รูปที่ 4. 24 ผลค่าความแข็งที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที่ ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที่ ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย

จากรูปที่ 4.24 ค่าความแข็งของรอยเชื่อม โดยใช้ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที่ ความเร็วเดินเชื่อม 36 ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย พบว่า ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กวน (NZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 141 HV จากนั้นค่าความแข็งของรอยเชื่อมก็ยังมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเข้าสู่พื้นที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) ไปจนถึงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งต่ำสุด เฉลี่ยที่ 119 HV และพบว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 4. 25 ผลค่าความแข็งที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก

จากรูปที่ 4.25 ค่าความแข็งของรอยเชื่อม โดยใช้ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก พบว่า ค่าความแข็งบริเวณพื้นที่กวน (NZ) มีค่าความแข็งเฉลี่ย 144 HV ซึ่งมีบริเวณที่ได้รับการกวนจากปากกวนที่โตขึ้นส่งผลให้บริเวณพื้นที่กวนมีลักษณะที่กว้างกว่าการใช้ปากกวนขนาดเล็ก และค่าความแข็งของรอยเชื่อมก็ยังมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) ไปจนถึงบริเวณพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) ที่มีค่าความแข็งต่ำสุด เฉลี่ยที่ 114 HV และพบว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำ

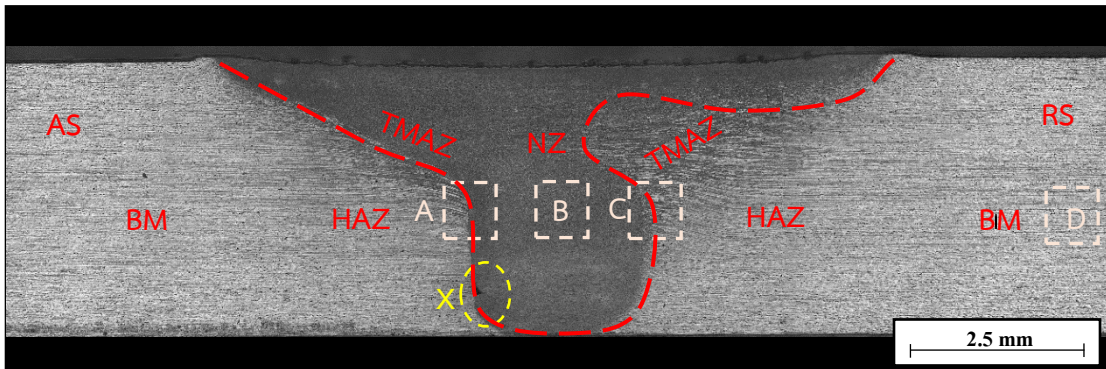
จากการทดสอบค่าความแข็งของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 มีค่าความแข็ง บริเวณพื้นที่กวน (NZ) เฉลี่ยประมาณ 141-148 HV จากนั้นเมื่อเข้าสู่พื้นที่ที่กระทบร้อนทางกล (TMAZ) ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง และมีค่าความแข็งต่ำสุดที่บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (HAZ) เฉลี่ยประมาณ 114-119 HV (Mahoney, Rhodes, Flintoff, Bingel, & Spurling, 1998, Sivaraj, Kanagarajan, & Balasubramanian, 2014 และ Dawood, Mohammed, Rahmat, & Uday, 2015) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนเพียงอย่างเดียวส่งผลให้โครงสร้างมีเกรนที่หยาบ และมักเกิดการแตกหักบริเวณพื้นที่นี้เมื่อนำไปทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ต่อมาค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งไปจนถึงบริเวณพื้นที่เนื้อวัสดุเดิมที่มีค่าความแข็งประมาณ 170 HV

4.6 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

จากการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนผู้วิจัยได้เลือกชิ้นงานทดสอบจากการเชื่อมในสภาวะดังกล่าวซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าแรงตามแนวแกนต่ำสุด พารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและต่ำสุด เพื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างมหภาค และจุลภาคของรอยเชื่อมจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสมเกรด A17075 ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 ขนาดบ่ากวน 9 และหัวกวนทรงกระบอกเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ค่าแรงตามแนวแกนที่ต่ำสุด จากนั้นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดบ่ากวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย และความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดบ่ากวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก เป็นพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำสุด โดยทำการตัดชิ้นงานทดสอบในทิศทางตั้งฉากกับรอยเชื่อม และให้รอยเชื่อมอยู่ตำแหน่งกลางของชิ้นงานสอบ ขัดตอนขึ้นตอนของการเตรียมชิ้นงานทดสอบ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม และเพื่อแสดงพื้นที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) พื้นที่กระทบร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affect Zone ; TMAZ) และพื้นที่กวน (Nugget zone ; NZ) ของเขตอิทธิพลความร้อนด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side, AS) และด้านรีทเรตติงไซด์ (Retreating side, RS)

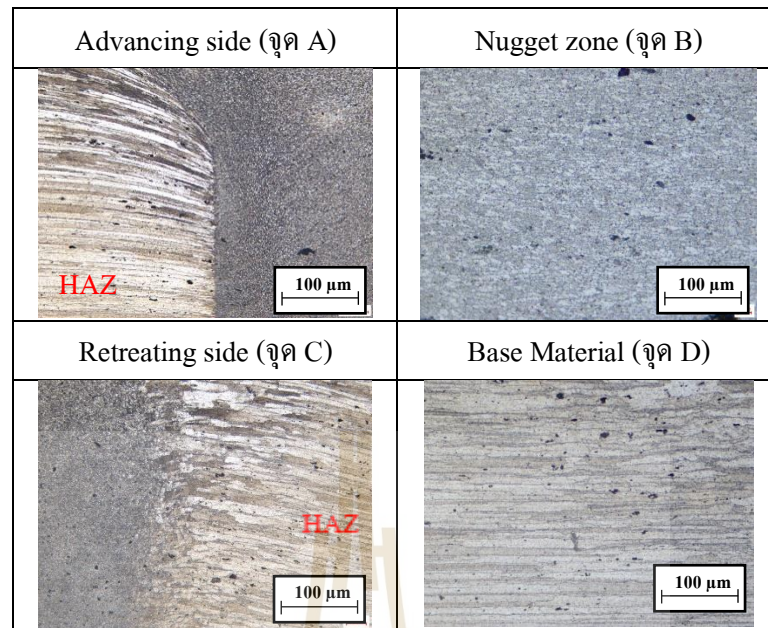
4.6.1 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดบ่ากวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย

จากการทดลองพบว่า รูปทรงของรอยเชื่อมมีลักษณะตามรูปทรงของหัวกวน คือ รูปทรงกรวยมีรูปร่างแบบอ่าง (Basin-shaped nugget) ซึ่งบริเวณพื้นที่กวนที่หัวกวนสัมผัสโดยตรงมีลักษณะเกรนที่ละเอียด บริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกลเกิดเกรนที่มีลักษณะบิดเบี้ยวยืดยาว เกิดจากการกวนของหัวกวนตามทิศทางการหมุนรอบของหัวกวน จากการทดลองเป็นการหมุนตามทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขณะที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อนมีลักษณะเกรนหยาบ จากการทดสอบสมบัติความแข็งแรงเป็นบริเวณพื้นที่ค่าความแข็งแรงลดลง จึงส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดการแตกหัก (Mahoney et al., 1998 และ Elangovan et al., 2008) จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของพารามิเตอร์ดังกล่าว พบข้อบกพร่องเกิดช่องว่างที่บริเวณจุด X ตรงมุมหัวกวนด้านล่างด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing side) รูปที่



รูปที่ 4. 26 โครงสร้างมหภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวย

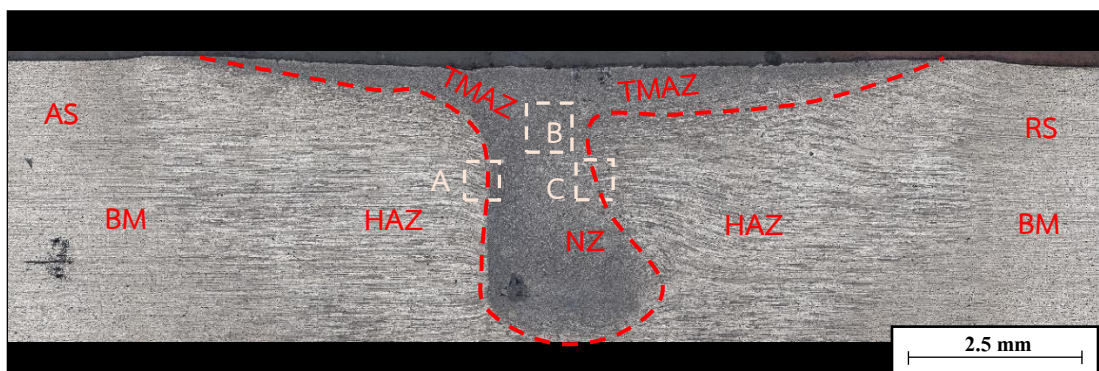
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวยพบว่าบริเวณพื้นที่กวนมีขนาดความกว้างเกรนประมาณ 3 - 4 ไมครอน และบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมีขนาดความกว้างเกรนประมาณ 19 - 26 ไมครอน เนื่องจากเป็นบริเวณพื้นที่ ๆ ได้รับความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งลักษณะโครงสร้างเนื้อโลหะเดิม (Base Material, BM) ของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 เป็นอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็น (อะลูมิเนียมรีด) โดยลักษณะโครงสร้างจะเป็นลักษณะที่ถูกการรีดมีเกรนที่ยืดยาวซึ่งรอยต่อชนของชิ้นงานจะมีการต่อชนลักษณะตั้งฉากกับแนวรีดชิ้นงาน โครงสร้างโลหะเดิมของอะลูมิเนียมผสมเกรด 7075 มีขนาดเกรนประมาณ 13 - 18 ไมครอน



รูปที่ 4. 27 โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนถนอม 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากถนอม 9 มม. และหัวถนอมทรงกรวย

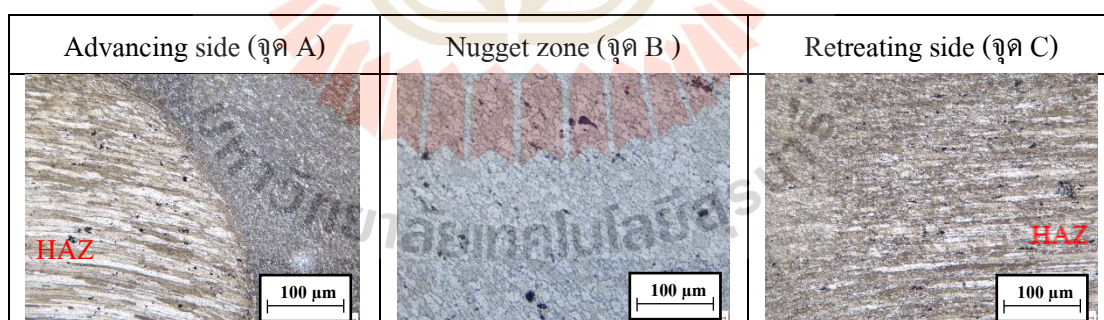
4.6.2 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนถนอม 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากถนอม 15 มม. และหัวถนอมทรงกระบอก

จากการทดลองพบว่า รูปทรงของรอยเชื่อมมีลักษณะตามรูปทรงของหัวถนอม คือ รูปทรงกระบอกมีรูปร่างแบบอ่าง (Basin-shaped nugget) ยังคงมีบริเวณพื้นที่กวนที่หัวถนอมสัมผัสโดยตรงมีลักษณะเกรนที่ละเอียด บริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกลเกิดเกรนที่มีลักษณะบิดเบี้ยวยืดยาว เกิดจากการกวนของหัวถนอมตามทิศทางการหมุนรอบของหัวถนอม จากการทดลองเป็นการหมุนตามทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขณะที่บริเวณพื้นที่กระทบร้อนมีลักษณะเกรนหยาบ โดยลักษณะการกระจายความร้อนจากการเชื่อมมีขนาดที่กว้างเนื่องจากการใช้ขนาดปากถนอมที่ใหญ่ขึ้น แต่การเกิดผลึกใหม่ของเกรนจากความร้อนและการกวน จากปากถนอมลงสู่ชิ้นงานเกิดขึ้นได้น้อย สังเกตได้จากบริเวณขอบเขตพื้นที่กระทบร้อนทางกล จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของพารามิเตอร์ดังกล่าวยังพบข้อบกพร่องเกิดช่องว่างที่บริเวณตรงมุมหัวถนอมด้านล่างด้านแอดวานซิงไซด์ เช่นเดียวกันแต่มีขนาดที่กว้างกว่าพารามิเตอร์ที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด รูปที่ 4.28



รูปที่ 4. 28 โครงสร้างมหภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก

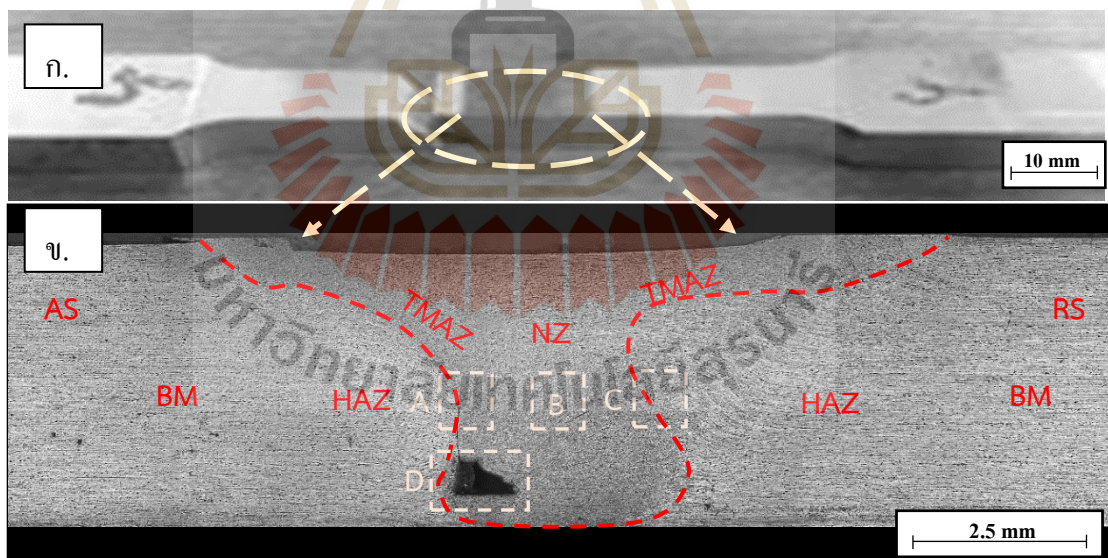
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก พบว่าบริเวณพื้นที่กวนมีขนาดความกว้างเกรนประมาณ 5 - 7 ไมครอน และบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมีขนาดความกว้างเกรนประมาณ 22- 30 ไมครอน ส่งผลให้ชิ้นงานดังกล่าวมีค่าความแข็งแรงดิ่งต่ำสุด (Dawood et al., 2015)



รูปที่ 4. 29 โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก

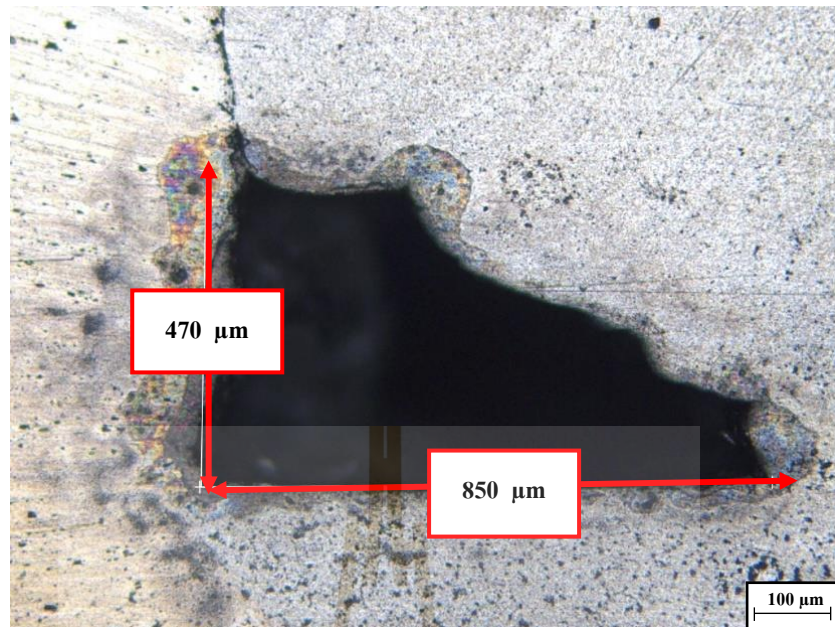
4.6.3 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกระบอก

จากการทดลองพบว่า รูปทรงของรอยเชื่อมมีลักษณะตามรูปทรงของหัวกวน คือ รูปทรงกระบอกมีรูปร่างแบบอ่าง (Basin-shaped nugget) โดยมีลักษณะโครงสร้างของแต่ละพื้นที่ ๆ ได้รับผลกระทบความร้อนไม่แตกต่างจากพารามิเตอร์ที่มีค่าความแข็งแรงถึงสูงสุด โดยลักษณะการกระจายความร้อนจากการเชื่อมมีขนาดที่แคบ เนื่องจากการใช้ขนาดปากกวนเล็กลงที่ขนาดปากกวน 9 มม. การเกิดผลึกใหม่ของเกรนจากความร้อนและการกวน จากปากกวนลงสู่ชิ้นงานมีความหนามากขึ้น สังเกตได้จากบริเวณขอบเขตพื้นที่ที่กระทบร้อนทางกล จากรูปที่ 4.30 ข. พบช่องว่างที่บริเวณตรงมุมหัวกวนด้านล่างด้านแอดวานซิงไซด์ไซด์ที่มีขนาดใหญ่ โดยที่มีขนาดความยาวประมาณ 850 ไมครอน ความกว้างประมาณ 470 ไมครอน เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวให้แรงตามแนวแกนที่น้อย การเกิดสภาวะพลาสติกจากการเชื่อมเสียดทานมีไม่เพียงพอ รูปที่ 4.30 ก. แสดงรอยแตกหักขึ้นทดสอบ ซึ่งขาดบริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนด้านแอดวานซิงไซด์ไซด์ (Advancing side) พบว่ารอยแตกหักไม่ได้เกิดตรงบริเวณช่องว่างมุมหัวกวน (Rajakumar et al., 2011)



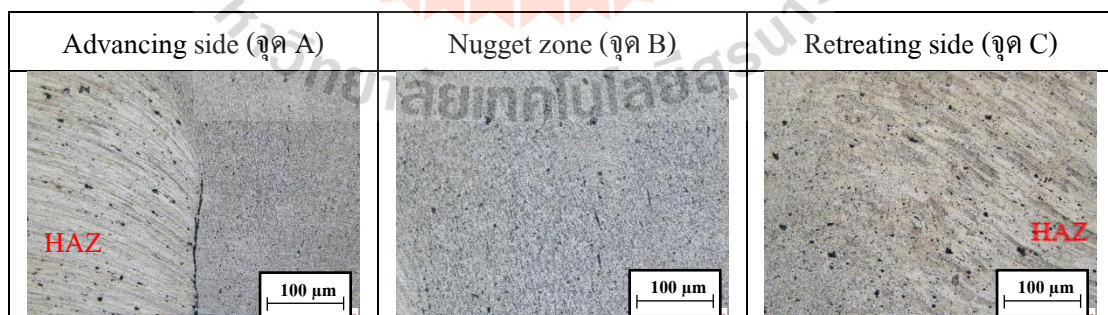
รูปที่ 4.30 ก. รอยแตกหักขึ้นทดสอบ

ข. โครงสร้างมหภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกระบอก



รูปที่ 4.31 ลักษณะช่องว่างของรอยเชื่อม (จุด D)

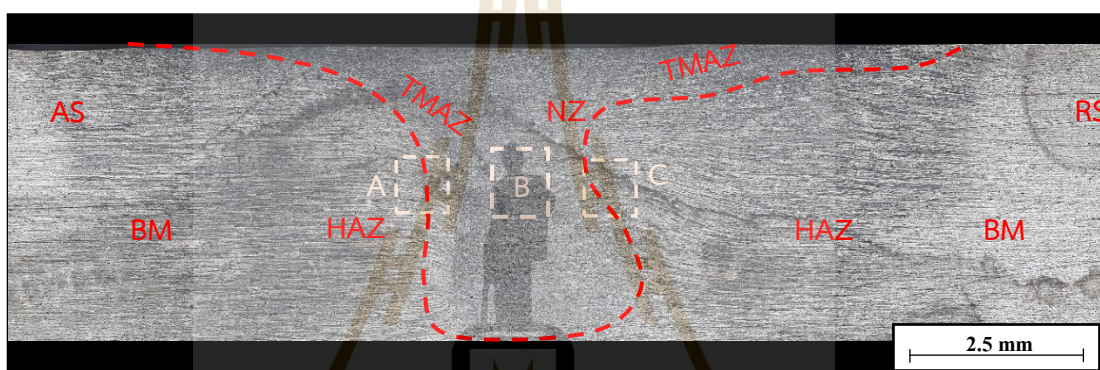
จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนแกน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกระบอก พบว่าบริเวณพื้นที่กวนมีขนาดความกว้างเกรนประมาณ 4 - 6 ไมครอน และบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมีขนาดความกว้างเกรนประมาณ 14 - 19 ไมครอน



รูปที่ 4.32 โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนแกน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก

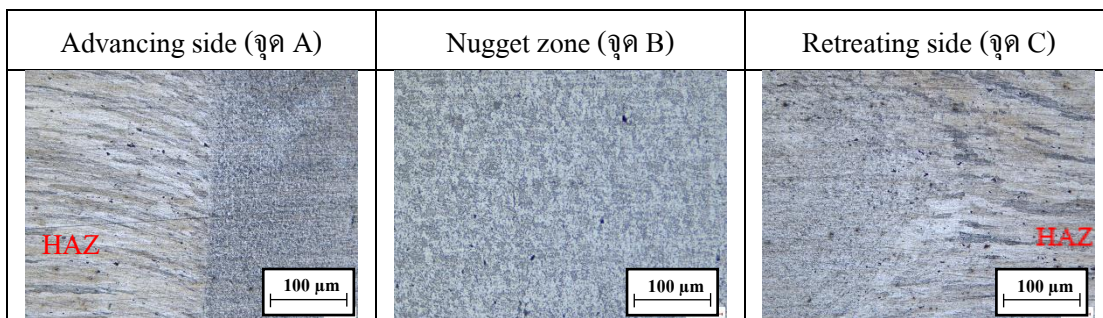
4.6.4 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก

จากการทดลองพบว่า รูปทรงของรอยเชื่อมมีลักษณะตามรูปทรงของหัวกวน คือ รูปทรงกระบอกมีรูปร่างแบบอ่าง (Basin-shaped nugget) เกิด โครงสร้างของแต่ละพื้นที่ ๆ ได้รับผลกระทบความร้อนพื้นที่ต่างๆ ไม่แตกต่างกันจากพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความแข็งแรงดิ่งน้อยสุด โดยลักษณะการกระจายความร้อนจากการเชื่อมมีขนาดที่กว้าง เนื่องจากการใช้ขนาดปากกวนที่ใหญ่เท่ากับ 15 มม. การเกิดผลึกใหม่ของเกรนจากความร้อนและการกวน จากปากกวนลงสู่ชิ้นงานมีความหนาที่น้อย สังเกตได้จากบริเวณขอบเขตพื้นที่ที่กระทบร้อนทางกล รูปที่ 4.33



รูปที่ 4. 33 โครงสร้างมหภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดปากกวน 15 มม. และหัวกวนทรงกระบอก พบว่า บริเวณพื้นที่กวนมีขนาดความกว้างเกรนประมาณ 7 - 9 ไมครอน และบริเวณพื้นที่กระทบร้อนมีขนาดความกว้างเกรนประมาณ 30 - 37 ไมครอน



รูปที่ 4. 34 โครงสร้างจุลภาคลักษณะรอยเชื่อมความเร็วรอบในการหมุนถวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 63 มม./นาที ขนาดบ่าถวน 15 มม. และหัวถวนทรงกระบอก



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การดำเนินการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของหัวกวนขนาดเล็กในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อแรงตามแนวแกนและสมบัติทางกล อะลูมิเนียมผสม 7075 ผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยสรุปได้ดังนี้

- 5.1 พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกน
- 5.2 พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสมต่อสมบัติทางกล
- 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.1 พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกน

จากการทดลองค่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้หัวกวนขนาดเล็ก พบว่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าแรงตามแนวแกนต่ำสุด คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวน 2220 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที หัวกวนทรงกระบอก และขนาดปากกวนที่ 9 มม. โดยให้ค่าแรงตามแนวแกนเท่ากับ 3205 N ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 334 MPa คิดเป็น 62% ของวัสดุเดิม เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงตามแนวแกน คือ ขนาดปากกวน และความเร็วเดินเชื่อม ตามลำดับ โดยที่ความเร็วรอบในการหมุนกวนและรูปทรงหัวกวนในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงตามแนวแกนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความเร็วในการหมุนกวนที่สูงส่งผลต่อปริมาณการสร้างความร้อนเสียดทาน วัสดุเกิดสภาวะพลาสติกได้ง่ายขึ้น เนื่องจากระยะเวลาหมุนหัวกวนที่เท่ากันหัวกวนที่มีความเร็วในการหมุนกวนที่สูง สามารถหมุนเสียดทานวัสดุที่จำนวนรอบที่มากกว่า ปริมาณการสร้างความร้อนจึงมากตามไปด้วย ส่วนความเร็วเดินเชื่อมจะมีผลต่อการควบคุมความร้อนเสียดทานให้เพียงพอ เมื่อระยะเคลื่อนที่หัวกวนที่เท่ากัน ความเร็วเดินเชื่อมที่ช้า เวลาในการสร้างความร้อนเสียดทานนานกว่า วัสดุเกิดสภาวะพลาสติกมากขึ้นค่าแรงตามแนวแกนจึงต่ำต่อมาขนาดปากกวนมีผลอย่างมากต่อการสร้างความร้อนเสียดทานบนผิววัสดุ ทั้งนี้เมื่อขนาดปากกวนเล็กลงทำให้บริเวณพื้นผิวของปากกวนมีการสัมผัสกับผิววัสดุที่มีพื้นที่ๆ น้อยลงไปจึงทำให้ค่าแรงตามแนวแกนลดลงไปตามขนาดปากกวน รูปทรงของหัว-

กวน ทรงกรวยและทรงกระบอก จากการวิเคราะห์ทางสถิติไม่ส่งผลต่อค่าแรงตามแนวแกน โดยรูปทรงหัวกวนทั้งสองแบบให้ค่าแรงตามแนวแกนที่ใกล้เคียงกัน

5.2 พารามิเตอร์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่เหมาะสมต่อสมบัติทางกล

จากการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-E8M ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยจำนวน 3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ โดยวัสดุเดิมมีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 539 MPa พบว่า ความเร็วรอบในการหมุนกวน 1580 รอบ/นาที ความเร็วเดินเชื่อม 36 มม./นาที ขนาดปากกวน 9 มม. และหัวกวนทรงกรวยให้ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 366 MPa คิดเป็น 68 % ของวัสดุเดิม ซึ่งบริเวณที่เกิดการแตกหักคือ บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) ทางด้านแอดวานซิง ไซด์ (Advancing side) และจากการทดสอบความแข็งแรงเชื่อม บริเวณพื้นที่ดังกล่าวมีค่าความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีโครงสร้างเกรนหยาบที่สุด ซึ่งโครงสร้างเกรนที่หยาบนั้นเกิดขึ้นมากจากปริมาณความร้อนในกระบวนการเชื่อม จากผลการวิเคราะห์สถิติพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม คือขนาดปากกวนและความเร็วเดินเชื่อม โดยความเร็วรอบในการหมุนกวน และรูปทรงหัวกวน ในช่วงระดับปัจจัยที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความสัมพันธ์ของปัจจัยในกระบวนการเชื่อมเสียดทาน ที่จะส่งผลต่อความแข็งแรงดึง คือ ความเร็วรอบในการหมุนกวนที่ไม่สูงเกินไป ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำ ใช้หัวกวนทรงกระบอก และขนาดปากกวนที่เล็กลง ทำให้ความร้อนระหว่างกระบวนการเชื่อมไม่สูงมาก เกิดสภาวะพลาสติกที่เหมาะสม ทำให้เกิดโครงสร้างเกรนที่เล็กลง บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อน (Heat Affect Zone ; HAZ) จึงส่งผลให้ได้ค่าความแข็งแรงดึงที่ดี

5.3 ข้อเสนอแนะ

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นการเตรียมผิวชิ้นงานควรให้ความสำคัญอย่างมาก ควรมีผิวเรียบที่สม่ำเสมอมีขนาดความหนาเท่ากัน เนื่องจากมีผลต่อค่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้น และคุณภาพของผิวรอยเชื่อม และงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนนั้นยังมีปัจจัยอื่นที่น่าสนใจ ได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนหัวกวนในช่วงระยะกวดหัวกวน ระยะเวลากดแช่หัวกวน และอัตราป้อนที่ใช้ในการกดแช่หัวกวนกับชิ้นงาน

รายการอ้างอิง

- Angkarn Kamruan, Somsak Siwadamrongpong, Ukrit Thanasubtawee, & Muangjunburee, P. (2020). Influence of Friction Stir Welding Parameters on Tensile Strength of Semi-Solid Cast 2024 Aluminum Alloy Butt Joints. *The Journal of KMUTNB*, 2020, 3(2465-4698).
- Anil Kumar, K., Karur, A., Chipli, S., & Singh, A. (2015). Optimization of FSW parameters to improve the mechanical properties of AA2024-T351 similar joints using Taguchi method. *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 5, 27-32.
- Ares, A., & Schvezov, C. (2007). Influence of solidification thermal parameters on the columnar-to-equiaxed transition of aluminum-zinc and zinc-aluminum alloys. *Metallurgical and Materials transactions A*, 38(7), 1485-1499.
- 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.
- Dawood, H., Mohammed, K. S., Rahmat, A., & Uday, M. (2015). Effect of small tool pin profiles on microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(9), 2856-2865.
- El-Morsy, A.-W., Ghanem, M., & Bahaitham, H. (2018). Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of AA2024-T4 aluminum alloy. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(1), 2493-2498.
- Elangovan, K., & Balasubramanian, V. (2007). Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 459(1-2), 7-18.
- Elangovan, K., Balasubramanian, V., & Valliappan, M. (2008). Effect of tool pin profile and tool rotational speed on mechanical properties of friction stir welded AA6061 aluminium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(3), 251-260.
- Elangovan, K., Balasubramanian, V., & Valliappan, M. (2008). Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(3-4), 285-295.

- Eslami, S., Tavares, P. J., & Moreira, P. (2017). Friction stir welding tooling for polymers: review and prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5-8), 1677-1690.
- International, A. (2013). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. In. United States.
- Jain, R., Pal, S. K., & Singh, S. B. (2017). Finite element simulation of temperature and strain distribution during friction stir welding of AA2024 aluminum alloy. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98(1), 37-43.
- Jassim, A. H., Abtan, N. S., & Marmoos, M. S. (2019). Study on the Effects of Rotational and Transverse Speed on Temperature Distribution through Friction Stir Welding of AA2024-T3 Aluminium Alloy. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 53(2), 234-248.
- Kadaganchi, R., Gankidi, M. R., & Gokhale, H. (2015). Optimization of process parameters of aluminum alloy AA 2014-T6 friction stir welds by response surface methodology. *Defence Technology*, 11(3), 209-219.
- Kasman, Ş., & Yenier, Z. (2014). Analyzing dissimilar friction stir welding of AA5754/AA7075. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1-4), 145-156.
- 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.
- Lammlein, D., DeLapp, D., Fleming, P., Strauss, A., & Cook, G. (2009). The application of shoulderless conical tools in friction stir welding: An experimental and theoretical study. *Materials & Design*, 30(10), 4012-4022.
- Mahoney, M., Rhodes, C., Flintoff, J., Bingel, W., & Spurling, R. (1998). Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum. *Metallurgical and Materials transactions A*, 29(7), 1955-1964.
- Mishra, R. S., & Ma, Z. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials science and engineering: R: reports*, 50(1-2), 1-78.

- Moshwan, R., Yusof, F., Hassan, M., & Rahmat, S. M. (2015). Effect of tool rotational speed on force generation, microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al–Mg–Cr–Mn (AA 5052-O) alloy. *Materials & Design (1980-2015)*, 66, 118-128.
- Othman, N., Ishak, M., & Shah, L. (2017). *Effect of shoulder to pin ratio on magnesium alloy Friction Stir Welding*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Prakash, P., Jha, S. K., & Lal, S. P. (2013). A study of process parameters of friction stir welded AA 6061 aluminum alloy. *International journal of innovative research in science, engineering and technology*, 2(6), 2304-2309.
- Prakash, P., Jha, S. K., & Lal, S. P. (2018). Effect of Tool-Pin Profile on Weld Zone and Mechanical Properties in Friction Stir Welding of Aluminium Alloy. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 26(2).
- Rajakumar, S., Muralidharan, C., & Balasubramanian, V. (2011). Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*, 32(2), 535-549.
- Ramanjaneyulu, K., Reddy, G. M., & Rao, A. V. (2014). Role of tool shoulder diameter in friction stir welding: an analysis of the temperature and plastic deformation of AA 2014 aluminium alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67(5), 769-780.
- Saravanan, V., Rajakumar, S., Banerjee, N., & Amuthakkannan, R. (2016). Effect of shoulder diameter to pin diameter ratio on microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA2024-T6 and AA7075-T6 aluminum alloy joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9), 3637-3645.
- Shojaeefard, M. H., Khalkhali, A., Akbari, M., & Asadi, P. (2015). Investigation of friction stir welding tool parameters using FEM and neural network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 229(3), 209-217.
- Sivaraj, P., Kanagarajan, D., & Balasubramanian, V. (2014). Effect of post weld heat treatment on tensile properties and microstructure characteristics of friction stir welded armour grade AA7075-T651 aluminium alloy. *Defence Technology*, 10(1), 1-8.

- Su, H., Wu, C. S., Pittner, A., & Rethmeier, M. (2013). Simultaneous measurement of tool torque, traverse force and axial force in friction stir welding. *Journal of Manufacturing processes*, 15(4), 495-500.
- Trimble, D., Monaghan, J., & O'donnell, G. (2012). Force generation during friction stir welding of AA2024-T3. *CIRP annals*, 61(1), 9-12.
- Ugenter, S., Kumar, A., & Reddy, A. S. (2014). Experimental investigation of tool geometry on mechanical properties of friction stir welding of AA 2014 aluminium alloy. *Procedia Materials Science*, 5, 824-831.
- Venkateswarlu, D., Mandal, N., Mahapatra, M., & Harsh, S. (2013). Tool design effects for FSW of AA7039. *Welding Journal*, 92(2), 41-47.
- Yeni, C., Sayer, S., & Pakdil, M. (2009). Comparison of mechanical and microstructural behaviour of TIG, MIG and friction stir welded 7075 aluminium alloy. *Kovove Mater*, 47, 341-347.
- Zhang, Z., Qi, W., & Zhang, H.-w. (2014). Numerical studies of effect of tool sizes and pin shapes on friction stir welding of AA2024-T3 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(10), 3293-3301.
- ปารเมศ ชูติมา, (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, (2549). วัสดุวิศวกรรม: กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดเคชั่น.
- อนันต์ ศรีมุกษ์, (2015). การปรับปรุงสมบัติเชิงกล ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 7075 โดยใช้กระบวนการทางความร้อน. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์,
- วรพจน์ ศิริรักษ์, (2016). การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียมอัลลอย : การทบทวนและมุมมองสู่อนาคต. วารสารวิศวกรรมศาสตร์, 23(3), 64-82.
- แมน อมรสิทธิ์, (2545). วัสดุวิศวกรรม: กรุงเทพฯ: ท็อป จำกัด.



ภาคผนวก ก.

บทความงานประชุมนานาชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Influence of Friction Stir Welding Parameters on Axial Forces and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 7075

Angkarn Kamruan¹ Somdech Ingkawara² Kodcharawit Lamkam³[0000-0001-6526-4013] and Somsak Siwadamrongpong³[0000-0001-7353-7325]

¹ Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, 340 Suranarai Road, Nai Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology, 833 Rama 1 Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok, Thailand

³ School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand
somsaksi@sut.ac.th

Abstract. Friction stir welding (FSW) process was widely used in many industries due to using of aluminium was rising for light weight design. It was generally known that some grades of Aluminum have low melting weldability which might lead to cracks, porosity, warping and deformation, such as 7075 Aluminum alloy. The aim of this research was to investigate the effect of FSW parameters on the axial forces and mechanical properties of Aluminium alloy 7075. The 3 welding parameters were studied, rotation speed, welding speed and stir tool shoulder diameter. The experiment was performed on force measuring fixture with 3-axis vertical milling machine. Shoulder diameter was only main effect that significant affect to axial force. The minimum axial force was 3205 N with rotational speeds of 1580 rpm, welding speed of 63 mm/min and Shoulder diameter 15 mm which given tensile strength of 325 MPa or 67% of based material. On the other hand, shoulder diameter and welding speed were main effect which significant affect tensile strength. The maximum tensile strength was 331 MPa or 68% of base metal with rotational speeds of 1580 rpm, welding speed of 36 mm/min and shoulder diameter 9 mm.

Keywords: friction stir welding, Aluminum alloy, Al7075, Tensile strength, Axial forces

1 Introduction

Aluminum was widely used in many industries such as electric vehicles, high-speed trains, and aircraft component. Because of its lightweight, good mechanical properties compared to weight and corrosion resistant. However, there was generally known that some grades of Aluminum were low fusion weldability and might yielded crack or porosity problems after welding, such as 7075 Aluminum alloy. The fusion welding also might create harmful fumes for operators and environment. [1] Therefore, friction stir welding (FSW) which was one of solid-state welding techniques was initiated for better mechanical properties in such aluminum grades. The welding of Al7075 [2] was studied using three different welding processes: MIG, TIG, and FSW and investigated on microstructure and mechanical properties. It was reported that smaller grain sizes were found with FSW compared to other welding processes. The highest tensile strength was also the test piece under FSW. Friction stir welding was yielded lower distortions and residual stresses at weldment. It was discussed as lower heat obtained from welding by FSW. However, the friction stir welding often had problems with high axial loads to plug and feed stir tool into workpiece. Theses also might lead to wear and tear of the machine parts. [3] Moreover, the axial force was also reported that higher axial force affect higher weld strength, in particular welding of high-strength aluminum grades, such as Al7075 aluminum. [4] According to the report, optimum parameters of FSW in Al7075 aluminum were rotation speed of 1400 rpm, welding speed of 60 mm/min, which caused an axial force of 8000 N and yielded the maximum tensile strength of 397 MPa.[5] In addition, for other grades of aluminum, the axial force was also reported that the axial force affected

microstructure and mechanical properties, for instant, Al5052. The objective of this research was to study influence of FSW parameters on axial forces and mechanical properties of 7075 aluminum alloy. The parameters were rotational speed, weld speed and shoulder diameter.

2 Material and Methods

The 7075 Aluminum alloy rolled plate was into workpiece dimensions of 100 x 50 x 4 mm by vertical milling machine. Chemical composition by spectrometer and tested mechanical properties were shown in Table 1. 2 workpieces were set up on force measurable fixture as indicated in Figure 1. Stir tool with cylindrical pin 3 mm in diameter was made by SKD61 hot-work tool steel and hardened to 51-55 HRC. [6] which displayed in Figure 2, respectively. The welding experiment was performed using 3-axis Haven XLW6332 HIV vertical milling machine. 2^k factorial design was employed to analyzed on 3 FSW parameters as indicated in Table 2. FSW was carried out with fixed tool tilt angle 3° . The axial force was measured during welding. Welded sample was cut into specimen for tensile test following ASTM-E8M standard.

Table 1. Chemical composition and Mechanical properties of Al7075

Composition (wt%)							Mechanical properties			
Mg	Mn	Zn	Fe	Cu	Si	Al	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Vicker Hardness (HV)
2.1	0.12	5.1	0.35	1.2	0.58	Bal.	410	485	12	160

Table 2. FSW process parameters

Parameters	Low	high	Unit
Rotation speed	1580	2220	rpm
Welding speed	36	63	mm/min
Shoulder diameter	9	15	mm



Figure 1. Force measuring fixture.[7]



Figure 2. Tool geometry

3 Results and Discussions

Axial force

Table 3 displayed axial force which was maximum axial force during feed stir tool along the welding line. From analysed results of DOE showed in Table 4, tool shoulder diameter was only main effect that significant influence the axial force while the others were not significant at confident level of 0.05. The main effect plot on axial force was illustrated in Figure 3. The minimum axial force was 3205 N with rotational speed of 2220 rpm, welding speed 36 mm/min and shoulder diameter 9 mm which given tensile strength of 325 MPa or 67% of based material. [8] The wider of tool shoulder was discussed as higher area of bearing compression force might lead to higher axial force to reach the same pressure on workpiece.

Tensile strength

Table 3 illustrated average tensile strength from 3 specimen. Table 5 indicated analysed results of DOE, it was found that and shoulder diameter and welding speed were main effect which significant influence the tensile strength while rotational speed was not significant at test range with confident level of 0.05. The main effect plot on tensile strength was indicated in Figure 4. The interaction between rotational speed and welding speed was also significant affect the tensile strength. It could be discussed that bigger shoulder diameter may result in high heat generation [9] and consequently lead to affect the microstructure within the heat affect zone (HAZ) area. [10] The grain growth in HAZ area might reflect in decrease of tensile strength. The maximum tensile strength was 331 MPa or 68% of base metal at rotational speeds of 1580 rpm, welding speed 36 mm/min and shoulder diameter 9 mm which was acceptable strength of welding work. [11]

Table 3. Experimental results

Parameters/RUN	1	2	3	4	5	6	7	8
Rotational speed (rpm)	1580	1580	1580	1580	2220	2220	2220	2220
Welding speed (mm/min)	36	36	63	63	36	36	63	63
Shoulder Diameter (mm)	9	15	9	15	9	15	9	15
Axial Force (N)	3433	5465	3825	6301	3205	4893	3900	5682
Tensile Strength (MPa)	331	269	313	251	325	268	285	241

Table 4. Analysis results of Design of Experiment on Axial force

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	9280273	1546712	101.01	0.076
Linear	3	9101221	3033740	198.12	0.052
Rotational speed (A)	1	225792	225792	14.75	0.162
Welding speed (B)	1	919368	919368	60.04	0.082
Shoulder diameter (C)	1	7956061	7956061	519.58	0.028
2-Way Interactions	3	179053	59684	3.90	0.353
A*B	1	8192	8192	0.53	0.598
A*C	1	134680	134680	8.80	0.207
B*C	1	36181	36181	2.36	0.367
Error	1	15312	15312		
Total	7	9295586			
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)	
Model Summary	123.744	99.84%	98.85%	89.46%	

Table 5. Analysis results of Design of Experiment on Tensile strength

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	24948.0	3564.0	14.67	0.000
Linear	3	22189.5	7396.5	30.45	0.000
Rotational speed (A)	1	63.1	63.1	0.26	0.617
Welding speed (B)	1	5465.3	5465.3	22.50	0.000
Shoulder diameter (C)	1	16661.1	16661.1	68.59	0.000
2-Way Interactions	3	2737.2	912.4	3.76	0.032
A*B	1	2360.4	2360.4	9.72	0.007
A*C	1	41.5	41.5	0.17	0.685
B*C	1	335.3	335.3	1.38	0.257
3-Way Interactions	1	21.3	21.3	0.09	0.771
Error	16	3886.3	242.9		
Total	23	28834.3			
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)	
Model Summary	15.5851	86.52%	80.63%	69.67%	

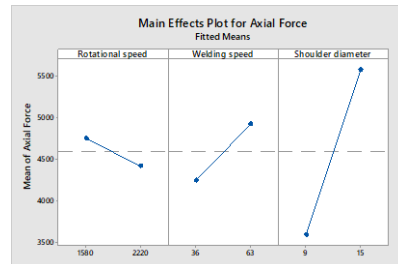


Figure 3. Main Effects Plot for Axial force

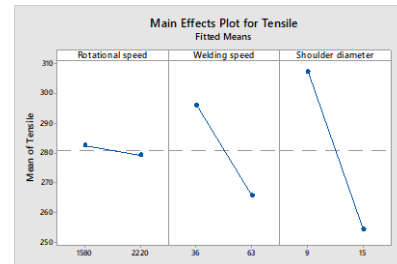


Figure 4. Main Effects Plot for Tensile

4 Conclusions

3 FSW parameters including rotational speed, welding speed and tool shoulder diameter were investigated on axial force and tensile strength of Aluminium alloy 7075. Analysed of DOE results were revealed that;

- Shoulder diameter was only main effect that significant affect to axial force. The minimum axial force was 3205 N with rotational speeds of 2220 rpm, welding speed of 36 mm/min and Shoulder diameter 9 mm which given tensile strength of 325 MPa or 67% of based material.
- Shoulder diameter and welding speed were main effect which significant affect tensile strength. The maximum tensile strength was 331 MPa or 68% of base metal with rotational speeds of 1580 rpm, welding speed of 36 mm/min and shoulder diameter 9 mm.

Acknowledgement

The authors would like to thank you Suranaree University of Technology for research grant and support in equipment.

References

- D Baffari, G Buffa, D Campanella, L Fratini, and F Micari, Friction based solid state welding techniques for transportation industry applications. *Procedia CIRP*, 2014. 18: p. 162-167.
- C Yeni, SAMI Sayer, and M Pakdil, Comparison of mechanical and microstructural behaviour of TIG, MIG and friction stir welded 7075 aluminium alloy. *Kovove Mater*, 2009. 47: p. 341-347.
- K Elangovan, V Balasubramanian, and M Valliappan, Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2008. 38(3-4): p. 285-295.
- S Rajakumar, Chandrasekaran Muralidharan, and V Balasubramanian, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*, 2011. 32(2): p. 535-549.
- Raza Moshwan, Farazila Yusof, MA Hassan, and Sahifulddin M Rahmat, Effect of tool rotational speed on force generation, microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Mg-Cr-Mn (AA 5052-O) alloy. *Materials & Design (1980-2015)*, 2015. 66: p. 118-128.
- Şefika Kasman and Zafer Yenier, Analyzing dissimilar friction stir welding of AA5754/AA7075. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014. 70(1-4): p. 145-156.
- Angkarn Kamruan, Somsak Siwadamrongpong, Ukrit Thanasubtawee, and Prapas Muangjunburee, Influence of Friction Stir Welding Parameters on Tensile Strength of Semi-Solid Cast 2024 Aluminum Alloy Butt Joints. *The Journal of KMUTNB*, 2020. 3(2465-4698).
- Ataalah Hussain Jassim, Nageeb Salman Abtan, and Mustafa Shakir Marmoos, Study on the Effects of Rotational and Transverse Speed on Temperature Distribution through Friction Stir Welding of AA2024-T3 Aluminium Alloy. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2019 53(2): p. 234-248.
- K Ramanjaneyulu, G Madhusudhan Reddy, and A Venugopal Rao, Role of tool shoulder diameter in friction stir welding: an analysis of the temperature and plastic deformation of AA 2014 aluminium alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2014. 67(5): p. 769-780.
- HI Dawood, Kahtan S Mohammed, Azmi Rahmat, and MB Uday, Effect of small tool pin profiles on microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy by friction stir welding, 2015. 25(9): p. 2856-2865.

Prashant Prakash, Sanjay Kumar Jha, and Shree Prakash Lal, A study of process parameters of friction stir welded AA 6061 aluminum alloy. International journal of innovative research in science, engineering and technology, 2013. 2(6): p. 2304-2309.



ประวัติผู้เขียน

นายทศวิศ หล้าคำ เกิดเมื่อวันที่ 2 มีนาคม พ.ศ. 2538 ที่อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอนุบาลตาก จังหวัดตาก ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนตากพิทยาคม ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาช่างกลโรงงาน ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตาก สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม (เทียบโอน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตาก เมื่อปี พ.ศ. 2561 จากนั้นในปี พ.ศ. 2562 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะศึกษาระดับปริญญาโท ผู้วิจัยได้ปฏิบัติงานตำแหน่งผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการต่างๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความชำนาญทางด้านการผลิต การใช้เครื่องจักรในงานอุตสาหกรรม และการนำเครื่องจักรมาประยุกต์ใช้ในงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี